



DIPLOMARBEIT

Parameteroptimierung beim MIG- Schweißen ausgewählter Al- Legierungen für ein Kühlkompressor- Gehäuse

Technische Universität Graz

Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

Vorstand:

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

Beurteiler:

Assoc. Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Norbert Enzinger

Betreuer:

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

Dipl. -Ing. Klaus Kerschbaumer

erstellt von:

Daniel Pölzleitner

Dezember 2011

Eidesstattliche Erklärung

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

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

Graz, am 15. Dezember 2011

.....
Pölzleitner Daniel

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich in meiner Arbeit in irgendeiner Weise unterstützt haben.

Besonders möchte ich mich beim Vorstand des Instituts für Werkstoffkunde und Schweißtechnik der TU Graz, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christof Sommitsch, sowie Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Norbert Enzinger für das Zustandekommen der Diplomarbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen aufrichtig bedanken.

Ein Dank gebührt natürlich Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Rudolf Vallant und Herrn Dipl.-Ing. Klaus Kerschbaumer, die mich während meiner Diplomarbeit umfassend betreut haben. Durch unzählige anregende Diskussionen und das Korrekturlesen haben sie maßgebend zum Gelingen der Diplomarbeit beigetragen.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen MitarbeiterInnen des Instituts für Werkstoffkunde und Schweißtechnik für die hervorragende Zusammenarbeit in einem sehr freundschaftlichen und hilfsbereiten Klima bedanken.

Zu guter Letzt möchte ich die Gelegenheit wahrnehmen und mich bei jenen Menschen bedanken, die mir das Studium überhaupt erst ermöglicht haben:

Der größte Dank gebührt meinen Eltern, die mir durch Ihre finanzielle Unterstützung und ihr schier unendlich entgegengebrachtes Vertrauen einen sehr wichtigen Meilenstein in meinem Leben ermöglicht haben.

Graz, am 15. Dezember 2011

.....
Pölzleitner Daniel

Kurzfassung

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde untersucht, ob Aluminium-Legierungen als Alternativwerkstoff für ein Haushaltskühlkompressor-Gehäuse in der Massenproduktion hinsichtlich Schweißbarkeit, Festigkeit, Umformverhalten sowie Korrosionsbeständigkeit einsetzbar ist.

Hierfür wurden MIG-Puls Schweißversuche mittels einer Schweißanlage, bestehend aus einer CMT Anlage (TPS 4000 mit CMT Vorschubeinheit) und einem Schweißroboter der Fa. ABB (IRB 140) durchgeführt. Als Versuchsmaterialien kamen Aluminiumbleche der Qualitäten AW-5083-O und AW-6181-T4 zum Einsatz. Im Zuge einer Schweißparameteroptimierung wurde der Drahtvorschub an zwei Schweißgeschwindigkeiten (15 u. 30 mm/s) und an zwei Schutzgasen (100% Argon u. 50/50% Argon Helium) angepasst. Als zusätzlicher Parameter wurde der Brenneranstellwinkel im Bereich von -5° (schleppend) bis $+5^\circ$ (stechend) variiert. Mit den so erhaltenen Schweißparametern wurden Prüfnähte im Überlappstoß verschweißt und anschließend mittels Scherzugversuchen in Anlehnung an EN ISO 9018:2006 sowie Härtemessungen [HV1] nach EN ISO 6507 überprüft. Anhand von lichtmikroskopischen Untersuchungen und mittels einer digitalen Bildauswertesoftware (KS400) wurde an den Schweißnahtquerschnitten Porenauswertungen vorgenommen. Mittels der Ergebnisse aus den Scherzugversuchen und der Porenauswertung wurden die optimalen Schweißparameter der Versuchsreihe definiert. Im Anschluss wurden die Schweißverbindungen auf ihre Korrosionsbeständigkeit überprüft. Bei dieser Korrosionsprüfung, nach welcher Scherzugversuche der korrodierten Proben erfolgten, handelte es sich um einen neutralen Salzsprühnebeltest nach EN ISO 9227-2006. Um die Tiefziehfähigkeit zu überprüfen, wurden als Abschluss Flachzugversuche der Legierungen AW-5083-O und AW-6181-T4 in Anlehnung an DIN ISO 10113:2009-06 durchgeführt. Als Prüflinge dienten Flachzugproben vom Grundmaterial nach DIN EN ISO 6892-1:2009.

Das Gesamtergebnis zeigt, dass Aluminiumlegierungen hinsichtlich Schweißbarkeit, Korrosionsbeständigkeit und Tiefziehbarkeit das Potential besitzen, die aktuell verwendete, geschweißte Stahlausführung des Kompressorgehäuses zu ersetzen.

Abstract

The present thesis aims to investigate whether aluminum alloys can be used as alternative material for household refrigerator compressor casings in mass production. For this purpose, pulsed MIG lap joints were performed. In these experiments, a CMT welding system (TPS 4000 with CMT feed unit) and a welding robot (IRB 140) from ABB company were used. Experimental materials were thin sheets of the aluminum alloys AW-5083-O and AW-6181-T4.

Within the welding parameter optimization, the wire feed rate was adapted for two welding speeds (15 and 30 mm/s) and two shielding gases (100% argon and 50/50% argon helium mixture). As additional parameter, the torch angle was varied from -5° (drag angle) to $+5^\circ$ (lead angle). The obtained welding parameters were used to weld first samples in a lap joint. These samples were checked by tensile shear tests referring to EN ISO 9018:2006 and hardness tests [HV 1] according to EN ISO 6507. Based on light microscopy photographs of weld cross sections evaluated with a digital picture analysis software KS400, the areas of pores in the welds were measured. Optimal welding parameters based on the results of the tensile shear tests and the pore area measurements were defined. Subsequently, the corrosion resistance of the welded joints was tested by a neutral salt spray test according to EN ISO 9227-2006. After this, tensile shear tests of the corroded samples were done. Finally, flat tensile tests referring to DIN ISO 10113:2009-06 were performed to verify the deep drawability of the aluminum alloys. The geometry of specimens was defined according to DIN EN ISO 6892-1:2009.

The overall results demonstrate, that aluminum alloys have the potential to replace the currently used welded steel construction of the compressor casing regarding weldability, corrosion resistance and formability.

Inhaltsverzeichnis

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG.....	I
VORWORT	II
KURZFASSUNG.....	III
ABSTRACT	IV
INHALTSVERZEICHNIS	V
1. EINLEITUNG	1
1.1. Zielsetzung	1
1.2. Produkt Delta Kompressor.....	2
1.2.1. Geschichte und Historie	2
1.2.2. Funktionsweise	2
1.2.3. Aktuelle Gehäusewerkstoffe	3
2. WERKSTOFFWAHL.....	5
2.1. Auswahlprozess	5
2.2. Ermittlung der Anforderungen.....	7
2.2.1. Statische Festigkeit.....	7
2.2.2. Weitere Anforderungen.....	12
2.2.3. Materialanforderungsliste.....	13
2.3. Vorauswahl geeigneter Werkstoffe.....	15
2.3.1. Grundlagen der Aluminiumwerkstoffe	15
2.3.1.1. Einteilung	15
2.3.1.2. Eigenschaften der Aluminiumknetlegierungen	17
2.3.2. Mögliche Materiallösungen.....	20
2.4. Auswahl der Versuchswerkstoffe.....	22
3. PRAKTISCHE UNTERSUCHUNGEN.....	25
3.1. Schweißbarkeit und Parameteroptimierung	25
3.1.1. Grundlagen zum Schweißen von Aluminium	25
3.1.1.1. Oxidschicht.....	26
3.1.1.2. Porenbildung	27
3.1.1.3. Entfestigung der Schweißverbindung	30
3.1.1.4. Heißrissempfindlichkeit	32
3.1.1.5. Magnesiumabbrand	37
3.1.2. MIG Schweißen.....	39
3.1.2.1. Lichtbogenarten.....	40
3.1.2.2. Schweißparameter und ihr Einflüsse	42
3.1.3. Versuchsaufbau	48
3.1.3.1. Vorstudie	48
3.1.3.2. Hauptversuche	49
3.1.3.3. Probenentnahmeplan	50
3.1.4. Probenvorbereitung, Prüfung und Auswertung.....	50
3.1.4.1. Scherzugprüfung	50
3.1.4.2. Porenauswertung	51

3.1.5.	Vorstudie zur Schweißparameterfindung.....	52
3.1.5.1.	Vorauswahl der Schweißparameter.....	52
3.1.5.2.	Ergebnisse	55
3.1.5.3.	Zusammenfassung.....	63
3.1.6.	Hauptversuche AW-5083-O/AlMg5	66
3.1.6.1.	Scherzugversuche.....	66
3.1.6.2.	Bruchlage.....	68
3.1.6.3.	Härtemessung und Mikrostruktur.....	69
3.1.6.4.	Porenauswertung	71
3.1.7.	Hauptversuche AW-6181-T4/AlSi5.....	75
3.1.7.1.	Scherzugversuche.....	75
3.1.7.2.	Bruchlage.....	76
3.1.7.3.	Härtemessung und Mikrostruktur.....	77
3.1.7.4.	Porenauswertung	80
3.1.9.	Zusammenfassung	86
3.2.1.	Grundlagen	89
3.2.1.1.	Werkzeuge für das Tiefziehen.....	89
3.2.1.2.	Werkstoffkennwerte der Kaltumformbarkeit	90
3.2.2.	Versuchsaufbau und –ablauf	92
3.2.3.	Flachzugversuche	93
3.2.4.	Zusammenfassung	95
3.3.	Korrosionsbeständigkeit von Aluminium	96
3.3.1.	Grundlagen	96
3.3.1.1.	Allgemeines zum Korrosionsverhalten	96
3.3.1.2.	Korrosionsarten	98
3.3.1.3.	Korrosionseigenschaften der Al-Legierungen.....	102
3.3.2.	Versuchsaufbau und –ablauf	102
3.3.3.	Ergebnisse NSS Test nach EN ISO 9227-2006.....	103
3.3.3.1.	Korrosionsangriff im Grundmaterial.....	103
3.3.3.2.	Korrosionsangriff der Schweißnähte.....	105
3.3.3.3.	Bruchverlauf und Bruchflächen	109
3.3.3.4.	Scherzugversuche- Festigkeit.....	112
3.3.4.	Zusammenfassung	113
4.	SCHLUSSFOLGERUNG.....	114
5.	AUSBLICK.....	115
6.	LITERATURVERZEICHNIS	116
7.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	122
ANHANG A:	MATERIALKENNWERTE DD11-DD14.....	129
ANHANG B:	SCHWEIBPARAMETER VORVERSUCHE	130
ANHANG C:	SCHWEIBPARAMETER HAUPTVERSUCHE	134
ANHANG D:	ERGEBNISSE HAUPTVERSUCHE	135
ANHANG E:	AUSWERTEROUTINE PORENMESSUNG	159
ANHANG F:	ROBOTERPROGRAMMIERUNG	163

1. Einleitung

Im Sinne von Weiterentwicklung und Innovation hat das Unternehmen ACC Fürstenfeld im Jahr 2010 das Projekt UCC2018 gestartet. Ein umfassendes Forschungsprojekt mit dem Ziel bis 2018 einen „Ultra Clean Compressor (UCC2018)“ zu entwickeln. Im Zuge dessen wurde die dritte Generation ihres Kältemittelkompressors, der „Delta-Kompressor“, analysiert, um mögliche Potenziale für Verbesserungen zu finden. Diese wurden verschiedenen Kompetenzzentren zur weiteren Untersuchung überlassen. Einer der so identifizierten Forschungsschwerpunkte befasst sich mit der Wahl des geeigneten Werkstoffs für das Kompressorgehäuse, wobei mögliche Alternativen zur derzeitigen Stahlausführung ausgewählt und evaluiert werden sollten. Voruntersuchungen [Kerschbaumer K. 2010, S.25] haben ergeben, dass Aluminium ein möglicher Alternativwerkstoff sein könnte.

1.1. Zielsetzung

Ziel dieser Diplomarbeit war es, geeignete Aluminiumlegierungen für das Gehäuse eines Kompressors zu finden. Mit Hilfe der Versuchsblöcke aus Tabelle 1.1 sollte eine Aussage darüber getroffen werden, ob ein industrieller Einsatz von ausgewählten Aluminiumlegierungen möglich ist.

<i>Versuchsblock</i>	<i>Versuch</i>	<i>Ziel</i>
I. Schweißbarkeit u. Parameter- optimierung	Variation der Schweißparameter	Auswahl optimaler Schweißparameter
	Lichtmikroskopische Aufnahmen	Darstellung des Nahtquerschnittes
	Scherzugversuch	Maximierung der Scherzugkraft
	Härteprüfung	Einfluss der Schweißwärme darstellen
	Porenauswertung	Minimierung der rel. Porenfläche
II. Korrosions- beständigkeit	NSS Test 480h	Korrosion
	Lichtmikroskopische Aufnahmen	Bestimmung der Korrosionsart
	Scherzugversuch	Einfluss der Korr. auf die stat. Festigkeit
III. Tiefziehfähigkeit	Flachzugversuche	Ermittlung der Zugversuchskennwerte, Abschätzung der Tiefziehfähigkeit

Tabelle 1.1 Überblick über die geplanten Versuchsblöcke

Um bei der anschließenden Werkstoffwahl die Anforderungen an den Gehäusewerkstoff zu verstehen, bedarf es, das Produkt „Delta Kompressor“ genauer zu kennen.

1.2. Produkt Delta Kompressor

1.2.1. Geschichte und Historie

Das Unternehmen ACC Austria (vormals Verdichter Oe. 1982-2004) startete in Fürstenfeld im Jahr 1983 erstmals mit der Produktion des Alpha Kompressors. Ursprünglich von der Fa. Robert Bosch in Nürnberg entwickelt, wurde deren Produkt-Know-How samt der Produktionsanlagen 1982 an ACC Austria verkauft. Die Entwicklung des leistungsstärkeren Kappa Kompressors startete im Jahr 1996 und ging 2001 in Produktion. Zu diesem Zeitpunkt entstanden erstmals konkrete Ideen, den „alten“ Alpha Kompressor durch eine Neuentwicklung zu ersetzen, jedoch begannen die Entwicklungsarbeiten erst im Jahr 2003 [Freiberger A. 2003, S.8-17], [ACC 2011a]. Im Jahr 2010 begann die Produktion des Delta Kompressors. Zugleich wurde das Projekt UCC (Ultra Clean Compressor) mit dem Ziel, durch innovative Verbesserungen des Kappa und Delta Kompressors bis zum Jahr 2018 ein neues Produkt zu entwickeln, gestartet. Abbildung 1.1 zeigt die Zusammenfassung der Entwicklungsschritte inklusive des Ziels für das Jahr 2018.

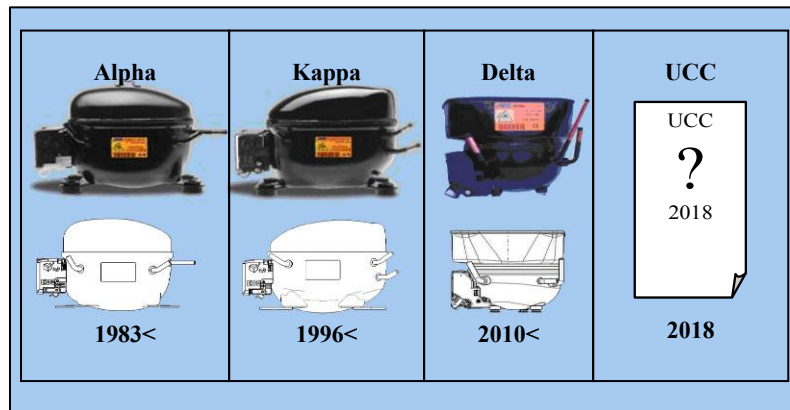


Abbildung 1.1 Entwicklungsschritte vom Alpha- zum Ultra Clean –Kompressor [ACC 2011a]

1.2.2. Funktionsweise

Der Delta Kompressor findet als Kältemittelkompressor in einem Kältekreislauf Anwendung und besteht aus einer vollhermetischen Konstruktion. Als „vollhermetisch“ wird vollkommene Gasdichtheit bezeichnet. Diese wird dadurch erreicht, dass die komplette Verdichtereinheit samt Motor in einem Gehäuse gasdicht verschweißt wird. Diese Bauweise hat den großen Vorteil, dass innenliegende Bauteile nicht gegen die Umwelt abgedichtet werden müssen, und zudem kann die Lärmemission gegenüber der Umgebung reduziert werden. [Freiberger A. 2003,S.24]

Der konstruktive Aufbau des Delta Kompressors ist in Abbildung 1.2 in Form einer Explosionszeichnung ersichtlich. Der gesamte Kompressor steht auf drei schwingungsdämpfenden Elastomeren, welche die Übertragung der Vibrationen vom Kompressor auf das Gehäuse des Kühlgerätes minimieren sollen. Die vollständige Gasdichtheit und ein reduzierter Geräuschpegel wurden durch die tiefgezogenen und verschweißten Gehäuseschalen erreicht. Der Deckel wurde zusätzlich mit einer Verdunsterschale verschweißt, deren Aufgabe es ist, die aus dem Kühlraum aufgefangene Kondensflüssigkeit wieder zu verdunsten, wofür die Abwärme des Elektromotors, des Verdichtungsprozesses und der Reibung des Triebwerkes genutzt wird. Die Wärme wird über das Gehäuse an die Kondensflüssigkeit und die Umgebung abgegeben. Um die Wärmeabstrahlung zu erhöhen, wurde das Gehäuse außen schwarz lackiert, was den Nebeneffekt eines verbesserten Korrosionsschutzes mit sich brachte.

Der Elektromotor ist auf drei Federelementen im Gehäuse gelagert und treibt die Kurbelwelle an. Diese dient zur Schmierung aller bewegten Bauteile und zum Antrieb des Kolbenkompressors. Das gasförmige Kältemittel wird durch die Saugleitung und ein Ventilsystem in den Verdichter geführt und strömt über die Druckleitung in den Kältekreislauf. Weitere Anschlüsse sind die Serviceleitung und eine Verbindung zur Steuereinheit.

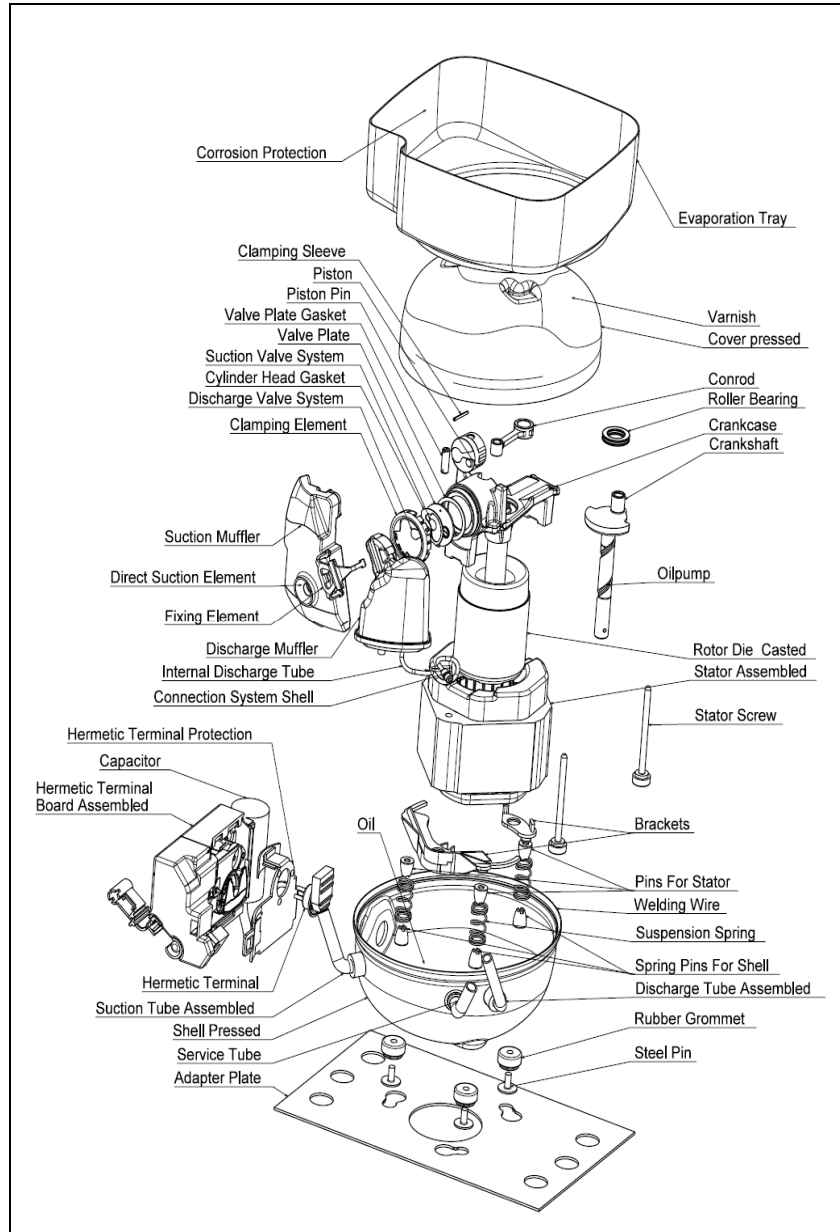


Abbildung 1.2 Explosionszeichnung des Delta Kompressors [Kerschbaumer K. 2011, S.4]

Die aktuell verwendeten Werkstoffe der Gehäuseschale werden im nachstehenden Kapitel angeführt.

1.2.3. Aktuelle Gehäusewerkstoffe

Die Werkstoffe DD11 und DD13 zählen zur Gruppe der Flacherzeugnisse zur Kaltumformung, welche sich durch ein besonderes gutes Verformungsvermögen auszeichnen. Anwendungsgebiete dieser Werkstoffe sind zum Beispiel: Teile im Automobilbau, Kompressor-Gehäuse, Stationäre Behälter u.v.m. [Jäniche W. et al. Band 2 1985, S.80ff].

Tabelle 1.2 zeigt neben der aktuellen Norm [EN 10111:2008] auch noch frühere Bezeichnungen für die beiden Stahlwerkstoffe [Atlas-Blech-Center 2011].

Norm:	DIN 1614 Teil 2	Werkstoffnr.	EU 111-77	DIN EN 10111
Bezeichnung	StW22	1.0332	FeP 11	DD11
	StW24	1.0335	FeP 13	DD13

Tabelle 1.2 Normenvergleich für DD11 und DD13 [Atlas-Blech-Center 2011].

Die aktuelle Bezeichnung ist wie folgt aufgebaut:

Erster Buchstabe 1: „D“ ... Warmband aus weichem Stahl

Zweiter Buchstabe 2: „D“ ... warmgewalzt

„C“ ... kaltgewalzt

„11“...zuätzl. Kennzahl

Je höher diese Kennzahl ist, umso besser sind die Tiefzieheigenschaften des Stahls. So besitzt DD11 eine gute Ziehüte und DD13 eine Sondertiefziehüte. Die beiden Stahlsorten sind für folgende Anwendungen geeignet [Voestalpine 2011, S.3]:

- DD11
ist für einfache, unverformte Teile bis hin zu mittlerer Ziehtiefe sowie zum Abkanten und für schwierige Profilformen mit engen Radien geeignet.
- DD13
ist für hohe Umformansprüche, wie z.B. bei Tiefziehteilen größerer Ziehtiefe, für mehrstufiges Tiefziehen und schwierigste Profilformen geeignet.

Diese unterschiedlichen Verformungsvermögen lassen sich durch die Verschiedenheit der chemischen Zusammensetzung erklären. In Tabelle 1.3 sind die Bestandteile verschiedener Legierungen, darunter DD11 und DD13, ersichtlich. Darin wird erkenntlich, dass sich der Stahl DD13 durch geringere Massenprozent der Elemente Kohlenstoff, Mangan, Phosphor und Schwefel von DD11 unterscheidet [Berns H. 2006, S.116f], [Jäniche W. et al. Band 1 1985 S.262ff u. 604ff].

Stahlsorte		Chemische Zusammensetzung (Schmelzenanalyse)				
Werkstoff-Nr.	nach DIN EN 10111	C max.	Mn max.	P max.	S max.	
1.0332	DD 11	0,12	0,60	0,045	0,045	
1.0398	DD 12	0,10	0,45	0,035	0,035	
1.0335	DD 13	0,08	0,40	0,030	0,030	
1.0389	DD 14	0,08	0,35	0,025	0,025	

Tabelle 1.3 Chemische Zusammensetzung warmgewalzter Bänder aus weichem Stahl für die Kaltumformung [Moeller E. 2008, S.203].

2. Werkstoffwahl

Gründe zum Anstoß für eine Änderung des Werkstoffes gibt es viele, die basierend auf folgenden Sachverhalten, in fünf Gruppen zusammengefasst werden [Reuter M. 2007, S.16], [Weißbach W. 2010, S.358]:

- Der Wettbewerb am Markt erfordert z.B. technische Verbesserung oder Kostenreduktion
- Entwicklung neuer Produkte für neue Märkte und Kundenwünsche
- Qualitätsprobleme
- Normen, Vorschriften, gesetzliche Auflagen oder auch ein steigendes Umweltbewusstsein
- Unternehmensinterne wirtschaftliche Gründe

Werkstoffe werden bei ihrer Auswahl unter verschiedenen Gesichtspunkten, die im Grunde von der Aufgabenstellung und den finanziellen Mitteln abhängen, betrachtet. Die nachstehenden Kriterien können zur Beurteilung von Werkstoffen herangezogen werden [Trzesniowski M. 2010, S.65f]:

- Werkstoffkennwerte zur Sicherstellung der Funktion (Festigkeit, E-Modul, Wärmeleitfähigkeit etc.)
- Kosten
- Recyclingmöglichkeit etc.

Bei Serienfertigungen sind in der Regel die Kostenpunkte am wichtigsten, da hier der wirtschaftliche Ansatz dominiert. Durch die große Anzahl an zu berücksichtigenden Kriterien bietet sich ein Auswahlprozess an, um eine systematische Vorgehensweise der Werkstoffauswahl zu gewährleisten [Trzesniowski M. 2010, S.65f], [Reuter M. 2007, S.16].

2.1. Auswahlprozess

In der Literatur findet man mögliche Ansätze (Problemlösungszyklus, VDI Richtlinie 2221) für die methodische Vorgangsweise der Werkstoffwahl. Allerdings sind diese Ansätze im Grunde ähnlich und unterscheiden sich nur durch ihren Schwerpunkt. Der in Abbildung 2.1 gezeigte Prozess der Werkstoffwahl ist die Zusammenfassung aller Ideen zu den gegenwärtigen Vorgehensmethoden. Die wesentlichen Stärken einer solchen systematischen Werkstoffauswahl liegen in der Nachvollziehbarkeit. Aus diesem Grund wird im Weiteren nach dem „Gesamtprozess der Werkstoffwahl“ (Abbildung 2.1) vorgegangen, welcher vier Phasen unterscheidet [Reuter M. 2007, S.31ff]:

I. Ermittlung der Anforderungen (Klärung der Aufgabenstellung)

Der Einstieg in den Materialauswahlprozess umfasst eine genaue Analyse der auf die Materialwahl einwirkenden Größen (zweckmäßige Elemente zur Funktionserfüllung), sowohl in Hinblick auf das Produkt, als auch in Anbetracht anderer für notwendig empfundener Kriterien. Den Output der ersten Phase stellt die Übersetzung der Bauteilanforderungen in eine Materialanforderungsliste dar.

II. Vorauswahl geeigneter Materialien (Konzeptphase)

In der noch sehr unscharf ausgeführten Vorauswahl werden in den seltensten Fällen einzelne Werkstoffe betrachtet. Vielmehr ist man auf der Suche nach möglichen Werkstofffamilien bzw. -gruppen.

III. Feinauswahl und Bewertung (Entwurfsphase)

In dieser Phase werden die Werkstoffe der Vorauswahl aufgrund der Materialanforderungsliste bewertet und nach einer Rangliste gereiht. Output dieser Phase ist eine Liste mit jenen Werkstoffen, die dem Profil am besten entsprechen und im weiteren für Versuche Anwendung finden.

IV. Evaluierung, Validierung und Entscheidung (Ausarbeitungsphase)

Im letzten Abschnitt der Werkstoffwahl wird aufgrund von Versuchen und detaillierter Informationsbeschaffung die Grundlage für die schlussendliche Werkstoffentscheidung geschaffen.

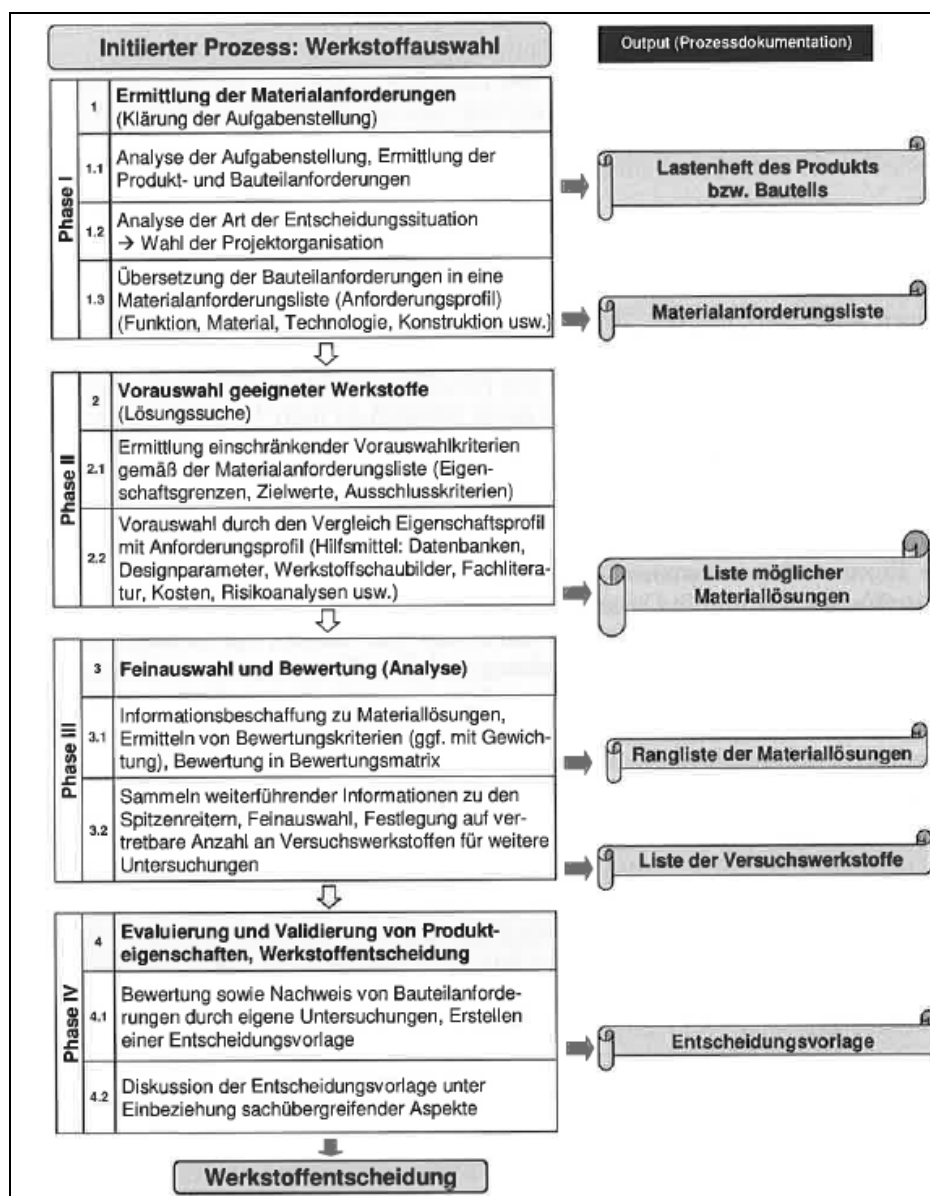


Abbildung 2.1 Gesamtprozess der Werkstoffauswahl [Reuter M. 2007,S.31ff]

2.2. Ermittlung der Anforderungen

Neben funktionellen Anforderungen muss ein Kühlkompressorgehäuse auch betriebswirtschaftliche Kriterien erfüllen (Abbildung 2.2). Allgemein muss das Schweißen und Tiefziehen der Gehäuseschalen möglich sein. Weiters sollte der Werkstoff korrosionsbeständig gegen das Kondenswasser sein. Im Betrieb wird ein einmaliger Druck von 40 bar aufgebracht, um die Dichtheit zu prüfen, wobei die auftretenden Kräfte von Grundmaterial und Schweißnaht aufgenommen werden müssen. Die Kräfte im Betrieb stellen keine Anforderungen an die Festigkeit, da diese vernachlässigbar sind. Das Management von ACC [ACC 2011b] fordert neben einer hohen Energieeffizienz (COP coefficient of performance) auch niedrige Kosten und Lärmbelastung. Die Lebensdauer und der Kundennutzen sollten dabei hoch bleiben. Diese Anforderungen bilden, mit Ausnahme von COP Wert und Akustik, die Grundlage für die Werkstoffwahl. COP Wert und Akustik wurden wegen ihrer Komplexität nicht weiter untersucht.

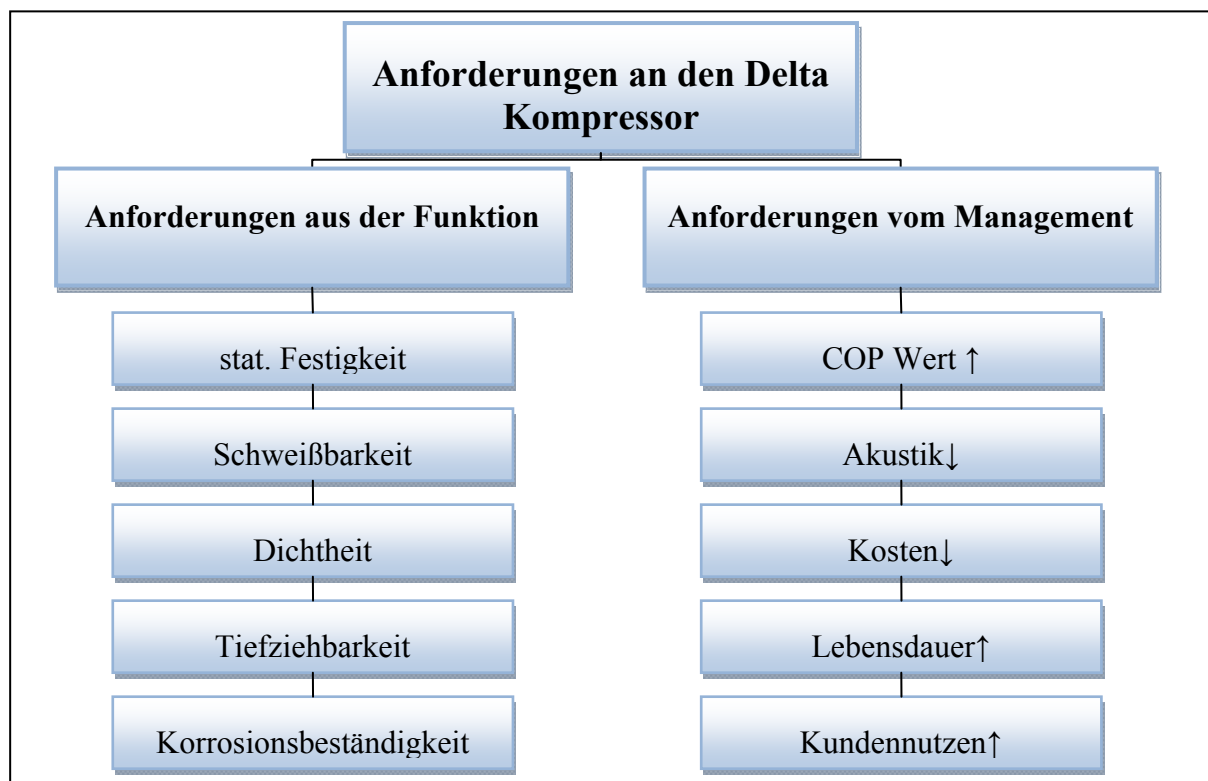


Abbildung 2.2 Zusammenfassung aller Anforderungen an den Delta Kompressor (Lastenheft)

Um vom Lastenheft zur Materialanforderungsliste zu gelangen, müssen die Anforderungen in Abbildung 2.2 in Materialkennwerte umgewandelt werden.

2.2.1. Statische Festigkeit

a) Belastung

Der Delta Kompressor wird mit einem Prüfdruck von $p_i=40$ [bar] auf Dichtheit geprüft. Die Kräfte, die von der Kompressoreinheit über die Lagerung auf die Trägerplatte abgegeben werden, sind vergleichbar gering und werden daher nicht berücksichtigt. Die Festigkeitsberechnung soll dazu dienen, eine grobe Vorauswahl der ausführbaren Aluminiumwerkstoffe zu ermöglichen.

b) Abmessungen

Das Gehäuse besteht aus einer Ober- und einer Unterschale. Beide Bauteile haben in der XY Ebene (Abbildung 2.3) eine genaue elliptische Form. Im Schnitt der XZ bzw. YZ Ebene (Abbildung 2.4, Abbildung 2.5) wird die elliptische Form näherungsweise angenommen.

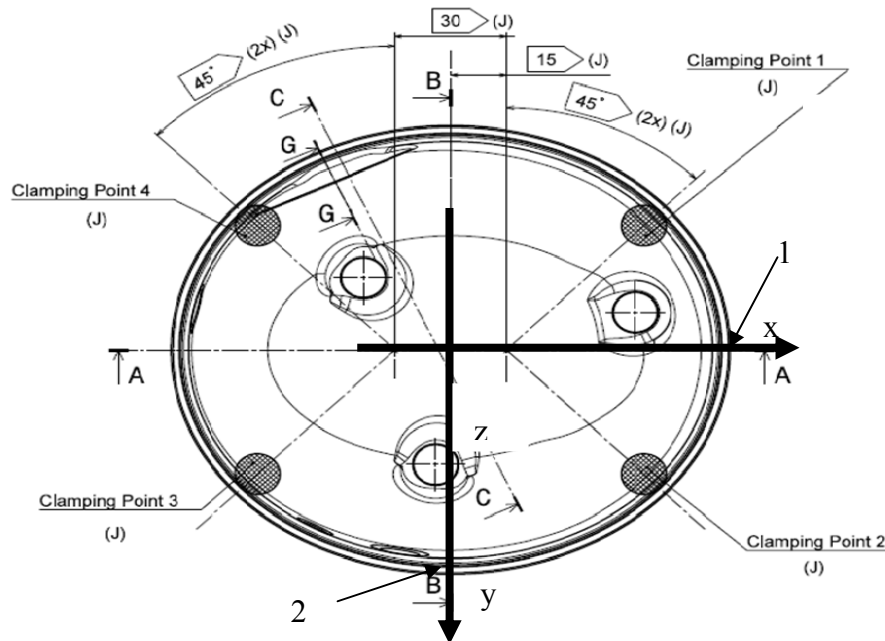


Abbildung 2.3 Blick von unten auf den Deltakompressor (mit eingezeichnetem Koordinatensystem für die Festigkeitsberechnung) [ACC 2011c]

Oberschale

Abbildung 2.4 zeigt die zwei Querschnitte durch die Gehäuseoberschale inkl. relevanter Abmessungen für die Berechnung.

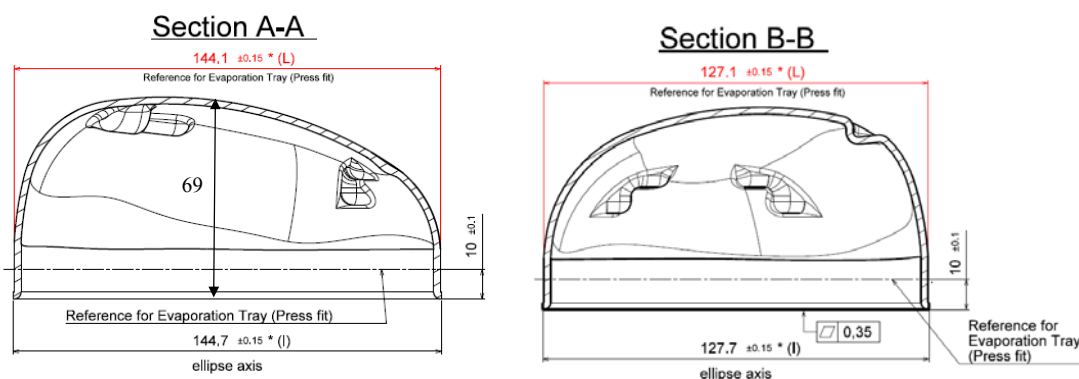


Abbildung 2.4 Querschnitt A-A und B-B durch die Oberschale (vgl. Abbildung 2.3) [ACC 2011c]

Für die Berechnung wurden folgende Annahmen getroffen:

- Im Schnitt A-A – Zylinder mit aufgesetzter Ellipse
 - Zylinder: $\varnothing 145$ [mm], $h = 20$ [mm]
 - Ellipse: $a = 72,5$ [mm], $b = 49$ [mm]
- Im Schnitt B-B – Zylinder mit aufgesetzter Ellipse
 - Zylinder: $\varnothing 128$ [mm], $h = 20$ [mm]

- Ellipse: $a=64$ [mm], $b=49$ [mm]

Unterschale

Abbildung 2.5 zeigt die zwei Querschnitte durch die Gehäuseunterschale samt relevanter Abmessungen für die Berechnung.

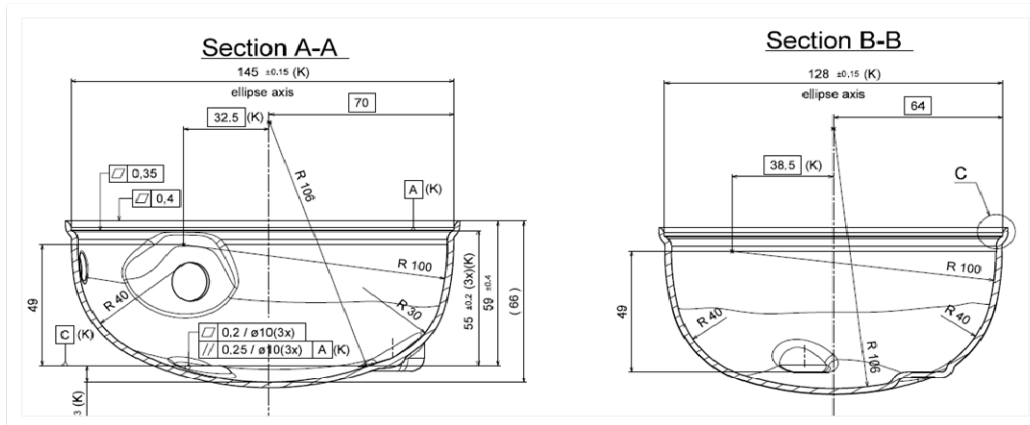


Abbildung 2.5 Querschnitt A-A und B-B durch den Boden (vgl. Abbildung 2.3) [ACC 2011c]

Wiederum zeigt das Schnittbild (Abbildung 2.5) eine annähernd elliptische Form. Es wurden daher für die Berechnung folgende Annahmen getroffen:

- Im Schnitt A-A – Ellipse
 - Ellipse: $a=145/2=72,5$ [mm], $b=55+7+2,4=64,4$ [mm]
- Im Schnitt B-B – Ellipse
 - Ellipse: $a=128/2=64$ [mm], $b=55+7+2,4=64,4$ [mm]

c) Grundlagen für die Berechnung

Fläche der Ellipse

Die Fläche der Ellipse wird mit Formel (1) berechnet [Oskar M. et al. 2010, S.18].

$$A_{\text{Ellipse}}(a, b) = a \cdot b \cdot \pi \quad (1)$$

a... Hauptschneitellänge, [mm] b... Nebenschneitellänge [mm]

Umfang der Ellipse

Der Umfang der Ellipse kann durch Formel (2) annähernd berechnet werden. Der durch diese Näherung resultierende Fehler ist eine Funktion aus dem Quotienten von b/a . Am Grenzwert $b/a=1$ ($a=b \rightarrow$ Kreis) liefert die Gleichung den exakten Umfang, der maximale Fehler von 4,2 % wird bei $b/a=0$ erreicht, d.h. für diesen Anwendungsfall vernachlässigbar klein [Wunderlich W. 1956, S465].

$$U_{\text{Ellipse}}(a, b) = \pi \cdot \left[3 \cdot (a + b) - \sqrt{(3 \cdot a + b) \cdot (a + 3 \cdot b)} \right] \quad (2)$$

a... Hauptschneitellänge, [mm] b... Nebenschneitellänge [mm]

Kesselformeln

Mit den Kesselformeln lassen sich Spannungen von dünnwandigen Behältern ($d_a/d_i \leq 1,2$ und $\delta/d_i \leq 0,1$) unter Innendruck berechnen (Abbildung 2.6), zudem kann die Radialspannung zur Gänze vernachlässigt werden [Läpple V. 2008, S.207]. Bei der Kesselformel wird die infolge eines Innendruckes p_i (Formel (3) u. (4)) erzeugte Kraft F mit der tragenden Wandfläche zur Spannung σ (Formel (8)) umgerechnet. Diese Kraft F resultiert aus dem mit der

projizierenden Fläche multiplizierten Innendruck [Knappstein G. 2008 S.243], [Läpple V. 2008, S.207].

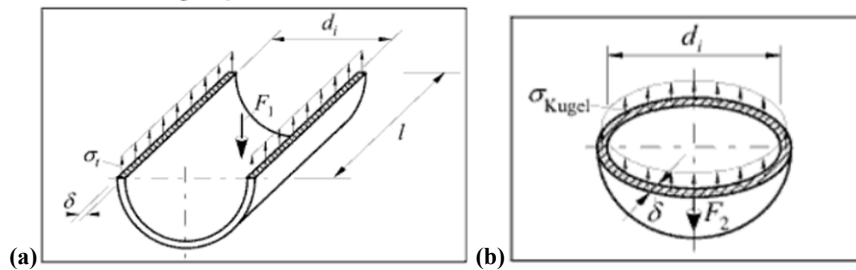


Abbildung 2.6 Freischnitt eines innen belasteten (a) Zylinders (b) und einer Kugel [Knappstein G. 2008 S.243]

$$F_{Zyl}(p_i, d_i, l) = p_i \cdot 10^{-1} \cdot A_{Zyl,i}(d_i, l) = p_i \cdot 10^{-1} \cdot d_i \cdot l \quad (3)$$

$$F_{Kugel}(p_i, d_i) = p_i \cdot 10^{-1} \cdot A_{Kugel,i}(d_i) = p_i \cdot 10^{-1} \cdot \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} \quad (4)$$

$$A_{Zyl, bel.}(\delta, l) = \delta \cdot l \cdot 2 \quad (5)$$

$$A_{Kugel, bel.}(d_i, \delta) = d_i \cdot \pi \cdot \delta \quad (6)$$

p_i ... Innendruck [bar], d_i ... Innendurchmesser [mm], l ...Zylinderlänge [mm], δ ...Wandstärke [mm], F_{Zyl} ...Druckkraft Zylinder [N], F_{Kugel} ...Druckkraft Kugel [N], $A_{Zyl, bel.}$...belastete Zylinderwandfläche [mm²], $A_{Kugel, bel.}$...belastete Kugelwandfläche [mm²]

Durch Division der Formeln (3) mit (5) und (4) mit (6) wurden die Spannungen des Zylinder- und Kugelmantels berechnet.

$$\sigma_{Zyl}(p_i, d_i, \delta, l) = \frac{F_{Zyl}(p_i, d_i, l)}{A_{Zyl, bel.}(\delta, l)} = \frac{p_i \cdot 10^{-1} \cdot d_i \cdot l}{\delta \cdot l \cdot 2} \quad (7)$$

$$\sigma_{Kug}(p_i, d_i, \delta) = \frac{F_{Kug}(p_i, d_i)}{A_{Kugel, bel.}(d_i, \delta)} = \frac{p_i \cdot 10^{-1} \cdot \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4}}{d_i \cdot \pi \cdot \delta} \quad (8)$$

σ_{Zyl} ...Spannung in der Zylindermantelfläche [N/mm²], σ_{Kug} ...Spannung in der Kugelmantelfläche [N/mm²]

d) Berechnung der stat. Festigkeit

Allgemeine Angaben

Die Berechnung der stat. Festigkeit erfolgte nach der an die Ellipse angepassten Kesselformel (Formel (11)). Hierfür wurden in Formel (8) die Flächen der Kugel durch jene der Ellipse ersetzt. Der Innendruck $p_i=40$ [bar] und die Wandstärke $\delta=2,4$ [mm] wurden als konstant angenommen.

$$F_{\text{Ellipse}}(p_i, a_i, b_i) = p_i \cdot 10^{-1} \cdot A_{\text{Ellipse}}(a_i, b_i) = p_i \cdot 10^{-1} \cdot \pi \cdot a_i \cdot b_i \quad (9)$$

$$A_{\text{Ellipse, bel.}}(a_i, b_i, \delta) = A_{\text{Ellipse}}(a_i + \delta, b_i + \delta) - A_{\text{Ellipse}}(a_i, b_i) = [\pi \cdot (a_i + \delta) \cdot (b_i + \delta)] - \pi \cdot a_i \cdot b_i \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{Ellipse}}(p_i, a_i, b_i, \delta) = \frac{F_{\text{Ellipse}}(p_i, a_i, b_i)}{A_{\text{Ellipse, bel.}}(a_i, b_i, \delta)} = \frac{p_i \cdot 10^{-1} \cdot \pi \cdot a_i \cdot b_i}{[\pi \cdot (a_i + \delta) \cdot (b_i + \delta)] - \pi \cdot a_i \cdot b_i} \quad (11)$$

p_i ...Innendruck [bar], a_i ...innerer Hauptscheitel Ellipse [mm], b_i ...innerer Nebenscheitel Ellipse[mm], δ ...Wandstärke [mm], F_{Ellipse} ...Druckkraft Ellipse [N], $A_{\text{Ellipse, bel.}}$... belastete Ellipsenwandfläche [mm²], σ_{Ellipse} ...Spannung in der Ellipsenmantelfläche [N/mm²]

Nahtlänge

Der Ellipsenumfang U_{Ellipse} wurde basierend auf Formel (2) in Formel (12) berechnet.

$$U_{\text{Ellipse}}(a, b) = U_{\text{Ellipse}}\left(\frac{145}{2}, \frac{128}{2}\right) = 429.24 \text{ [mm]} \quad (12)$$

a ... Hauptscheitellänge, [mm], b ... Nebenscheitellänge [mm], U_{Ellipse} ... Ellipsenumfang [mm]

Mit diesem Ergebnis wurde für die Parameterstudie eine Schweißnahtlänge von 480 mm im Überlapstoß gewählt.

Spannung σ_z in der Schnittebene X-Y

Der Schnitt in der XY-Ebene (Abbildung 2.3 S.8) ergibt einen elliptischen Querschnitt. Die Berechnung der Spannung σ_z erfolgte mit Formel (11). Es ergab sich eine Spannung σ_z von ca. 54 [N/mm²].

$$\sigma_z = \sigma_{\text{Ellipse}}(p_i, a_i, b_i, \delta) = \sigma_{\text{Ellipse}}(40, 70.1, 61.6, 2.4) = 53.67 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (13)$$

p_i ...Innendruck [bar], a_i ...innerer Hauptscheitel Ellipse [mm], b_i ...innerer Nebenscheitel Ellipse[mm], δ ...Wandstärke [mm], σ_{Ellipse} ...Spannung in der Ellipsenmantelfläche [N/mm²]

Spannung σ_y in der Schnittebene X-Z

Der Schnitt in der xz-Ebene (Abbildung 2.3 S.8) ergibt zwei Ellipsen und einen Zylinder (siehe Kap.b). Die Spannung σ_y wurde mit den Formeln (3), (5), (10) und (11) berechnet und ergab ca. 56 [N/mm²].

$$\sigma_y = \frac{F_{\text{Ellipse, Deckel}}(p_i, a_i, b_i)/2 + F_{\text{Ellipse, Boden}}(p_i, a_i, b_i)/2 + F_{\text{Zyl, deckel}}(p_i, d_i, l)}{A_{\text{Ellipse, Deckel, bel.}}(a_i, b_i, \delta)/2 + A_{\text{Ellipse, Boden, bel.}}(a_i, b_i, \delta)/2 + A_{\text{Zyl, bel.}}(\delta, l)} = \frac{F_{\text{Ellipse, Deckel}}(40, 70.1, 46.6)/2 + F_{\text{Ellipse, Boden}}(40, 70.1, 62)/2 + F_{\text{Zyl, deckel}}(40, 145, 20)}{A_{\text{Ellipse, Deckel, bel.}}(70.1, 46.6, 2.4)/2 + A_{\text{Ellipse, Boden, bel.}}(70.1, 62, 2.4)/2 + A_{\text{Zyl, bel.}}(2.4, 20)} = 56.13 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (14)$$

p_i ...Innendruck [bar], a_i ...innerer Hauptscheitel Ellipse [mm], b_i ...innerer Nebenscheitel Ellipse[mm], δ ...Wandstärke [mm], F_{Ellipse} ...Druckkraft Ellipse [N], $A_{\text{Ellipse, bel.}}$... belastete Ellipsenwandfläche [mm²], F_{Zyl} ...Druckkraft Zylinder [N], $A_{\text{Zyl, bel.}}$... belastete Zylinderwandfläche [mm²], σ_y ...Spannung der Ellipsenmantelfläche in y-Richtung [N/mm²]

Spannung σ_x in der Schnittebene Y-Z

Der Schnitt in der yz-Ebene (Abbildung 2.3) ergibt zwei Ellipsen und einen Zylinder (siehe Kap.b)). Die Spannung σ_x wurde mit den Formeln (3), (5), (10) und (11) berechnet und ergab ca. 53 [N/mm²].

$$\sigma_x = \frac{F_{\text{Ellipse,Deckel}}(p_i, a_i, b_i)/2 + F_{\text{Ellipse,Boden}}(p_i, a_i, b_i)/2 + F_{\text{Zyl,deckel}}(p_i, d_i, l)}{A_{\text{Ellipse,Deckel,bel.}}(a_i, b_i, \delta)/2 + A_{\text{Ellipse,Boden,bel.}}(a_i, b_i, \delta)/2 + A_{\text{Zyl,bel.}}(\delta, l)} = \quad (15)$$

$$= \frac{F_{\text{Ellipse,Deckel}}(40,61.6,46.6)/2 + F_{\text{Ellipse,Boden}}(40,61.1,62)/2 + F_{\text{Zyl,deckel}}(40,128,20)}{A_{\text{Ellipse,Deckel,bel.}}(61.6,46.6,2.4)/2 + A_{\text{Ellipse,Boden,bel.}}(61.6,62,2.4)/2 + A_{\text{Zyl,bel.}}(2.4,20)} = 52.52 [N/mm^2]$$

p_i ...Innendruck [bar], a_i ...innerer Hauptscheitel Ellipse [mm], b_i ...innerer Nebenscheitel Ellipse[mm], δ ...Wandstärke [mm], F_{Ellipse} ...Druckkraft Ellipse [N], $A_{\text{Ellipse,bel}}$... belastete Ellipsenwandfläche [mm²], F_{Zyl} ...Druckkraft Zylinder [N], $A_{\text{Zyl,bel}}$... belastete Zylinderwandfläche [mm²], σ_x ...Spannung der Ellipsenmantelfläche in x-Richtung [N/mm²]

Zum Abschluss werden die ermittelten Normalspannungen auf eine Vergleichsspannung zusammengeführt. Dies erfolgt mit Formel (16) für zwei Hauptnormalspannungen nach der Gestaltänderungshypothese [Dilthey U. 2006, S.42f].

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \quad (16)$$

σ_v ...Vergleichsspannung nach GEH [N/mm²], $\sigma_{1,2}$...Hauptnormalspannungen [N/mm²]

Dadurch ergeben sich folgende Vergleichsspannungen für die Punkte 1 und 2 in Abbildung 2.3 auf Seite 8.

$$\sigma_{v1} = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_y \sigma_z} = 54,99 [N/mm^2] \quad (17)$$

$$\sigma_{v2} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z} = 53,11 [N/mm^2] \quad (18)$$

$\sigma_{x,y,z}$...Spannungen der Ellipsenmantelfläche in x,y u. z-Richtung [N/mm²]

Zusammenfassend wurde die minimal zulässige Spannung der Schweißverbindungen berechnet. Alle Zugproben müssen dieser Spannung standhalten, um einsatztauglich zu sein. Es wurde die größte Spannung aus den Formeln (17) und (18) ausgewählt und mit einem Sicherheitsfaktor $S=1,5$ erhöht [Thier B. 1997 S.20]. Dadurch ergab sich eine minimal zulässige Dehngrenze $R_{p0.2min}$ von ca. 85 [N/mm²]:

$$R_{p0.2,min} = \sigma_{max} \cdot S = \sigma_{v1} \cdot S = 54,99 \cdot 1.5 = 82.5 \approx 85 [N/mm^2] \quad (19)$$

2.2.2. Weitere Anforderungen

An dieser Stelle werden die restlichen Materialanforderungen aus Abbildung 2.2 S.7 kurz beschrieben. Diese sind: Schweißbarkeit, Dichtheit, Tiefziehfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit, Kosten, Lebensdauer und Kundennutzen.

a) Schweißbarkeit und Dichtheit

Deckel und Boden werden derzeit mit MAG-Standardverfahren verbunden. Ein Metall Schutzgas- Schweißverfahren (MSG) sollte auch bei alternativen Werkstoffen möglich sein.

Da die Kühlmittelkompressoreinheit vollhermetisch sein muss, ist eine absolute Gas-Dichtheit erforderlich. Aus diesem Grund sind Anbindefehler und Schlauchporen nicht zulässig. Zudem sollten auch keine Schweißspritzer und Oberflächenporen vorhanden sein, da diese möglicherweise einen negativen Einfluss auf die Produktqualität (Lackierung, Korrosion usw.) haben.

b) Tiefziehfähigkeit

Auf die Tiefziehfähigkeit wird in späterer Folge (Kapitel 3.2.1 S.89) noch ausführlicher eingegangen. Zur Vorauswahl genügen die aus der Literatur leicht erhältlichen Werte des Zugversuchs. Für eine gute Kaltumformbarkeit sollte das Gefüge bei gleichzeitig hoher



Bruchdehnung weich sein, sowie eine niedrige Streckgrenze und Zugfestigkeit besitzen. [Jäniche W. et al. Bd. 1 1985, S.604].

c) Korrosionsbeständigkeit

Die Korrosionsbeständigkeit lässt sich nicht unmittelbar als einzelner Materialkennwert ausdrücken, da diese von äußerst vielen Faktoren abhängt [Roos E. 2008, S.347]. Für die Vorauswahl wird eine allgemein gute Korrosionsbeständigkeit gefordert.

d) Kosten

Für die Serienproduktion sind die Materialkosten der wichtigste Anteil an den Produktionskosten. Beim Delta Kompressor betragen diese zum Beispiel rund 85% der Produktkosten der gesamten Kompressoreinheit. In dieser Arbeit wurden die Abmessungen und die Wandstärken des Kompressor- Gehäuses konstant angenommen. Für die weiteren Auswahlsschritte wurden daher volumenbezogene Materialkosten (€/dm^3) als Kriterium eingeführt, da diese Kostenart eine bessere Vergleichsgröße als die Kosten pro Kilogramm darstellen [Kukutschki G. 2007, S.12], [Trzesniowski M. 2010, S.65f].

e) Lebensdauer

Maschinen werden nicht für die Ewigkeit gebaut, denn sie haben nur während einer kalkulierten Lebensdauer ihre Funktion zu erfüllen. Diese Tatsache sollte bei der Werkstoffwahl berücksichtigt werden. Neben der dynamischen Belastung (Wöhler Diagramm) sind auch werkstoffabtragende Wirkungen (Korrosion, Reibverschleiß, Kavitation, Erosion, u.v.m.) zu berücksichtigen. Die dynamische Belastung des Gehäuses durch Vibrationen wurde in dieser Arbeit vernachlässigt, daher hängt die Lebensdauer allein von der Korrosionsbeständigkeit ab. Aus diesem Grund wird der Parameter Lebensdauer für das weitere Vorgehen nicht berücksichtigt [Kurz U. et al. 2009, S.60].

f) Kundennutzen

Die Literatur deutet einheitlich darauf hin, dass die Produktqualität mitunter einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Kundenzufriedenheit und somit auf den Unternehmenserfolg ist. Für Produktqualität gibt es mehrere Definitionen. Eine sehr umfassende basiert auf folgenden acht Punkten: Leistung, Merkmale, Verlässlichkeit, Nützlichkeit, Ästhetik, Konformität, Haltbarkeit und objektive wahrgenommene Eigenschaften. Viele dieser Punkte werden vom Gehäusewerkstoff nicht beeinflusst oder sind durch andere Anforderungen bereits abgedeckt. Nur die Dichte des Kompressorwerkstoffes kann beeinflusst werden. Ein leichter Kompressor stellt eine objektiv wahrgenommene Eigenschaft dar, welche als Gewichtsreduktion erkennbar ist [Herrmann A. 2009, S.12f], [Beutin N. 2000, S.70ff].

In dieser Arbeit sind keine Änderungen an der Produktgeometrie vorgesehen, dadurch fällt eine Größenreduktion heraus [Kukutschki G. 2007, S.13].

2.2.3. Materialanforderungsliste

Aus den Bauteilanforderungen lässt sich eine Materialanforderungsliste (Tabelle 2.1) erstellen. Die darin enthaltenen Anforderungen sind auf den Werkstoff DD11 bzw. auf allgemeinen Stahl bezogen und zeigen den erwünschten Zielbereich ($>$, $<$) an. Anhand dieser Tabelle kann eine Vorauswahl getroffen werden.

Pos.	Anforderung	Eigenschaftsgröße	Grenze / Zielwert	Einheit	Bezugswert	Quelle
1	stat. Festigkeit	Streckgrenze Re	>85	N/mm ²		
2	Kosten	Materialkosten	<3.46	€/dm ³	Stahl	[1]
3	Kundennutzen	Dichte ρ	<7.8	kg/dm ³	Stahl	[2]
4	Schweißbarkeit	MIG	sehr gut	[]		
5	Tiefziehbarkeit	Streckgrenze Re	so gering wie möglich	N/mm ²		
6	Tiefziehbarkeit	Bruchdehnung A ₅₀	>24	%	DD11	[3]
7	Korrosionsbest.	Korrosionsbest.	sehr gut	[]		
8	Schweißbarkeit	Schweißbarkeit	sehr gut	[]		

Tabelle 2.1 Materialanforderungsliste für das Delta Kompressorgehäuse aufgrund der Anforderungen aus Funktion und Management, [1] LME 2011, [2] Möser M. 2009 S.146, [3] siehe Anhang A S.129.

Für die anschließende Vorauswahl (Phase II in Abbildung 2.1) wurden Streckgrenze, Bruchdehnung, Schweißbarkeit und Korrosionsbeständigkeit der Materialanforderungsliste verwendet, da es für das Kompressorgehäuse die wichtigsten waren.



2.3. Vorauswahl geeigneter Werkstoffe

Da für diese Arbeit nur das Nichteisen-Metall Aluminium interessant ist, beschreibt dieses Kapitel die Suche nach Legierungsgruppen, welche grundsätzlich für den Einsatz möglich sind.

2.3.1. Grundlagen der Aluminiumwerkstoffe

Aluminiumanwendungen findet man auf fast allen Gebieten des modernen Lebens. Sie reichen von Maschinenbau, Architektur über Verkehr und Verpackung bis hin zu Freizeit und Sport. Aluminium steht im direkten Wettbewerb mit anderen Werkstoffen und muss sich gegenüber technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen dieser Konkurrenten behaupten. Erfolg wird nur beschert, wenn ein Anwendernutzen deutlich erkennbar ist. Vorrangig wird der Anwendernutzen an der Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Produkte gemessen. Die Herausforderung besteht deshalb darin, trotz des höheren Materialpreises von Aluminium zu wettbewerbsfähigen Lösungen zu kommen. Der Grund für seine rasante Verbrauchsentwicklung sind die vielseitigen Eigenschaften, durch die sich Aluminium gegenüber anderen Gebrauchsmetallen auszeichnet [Ostermann F. 2007, S.1ff], [Dilthey U. 2005, S.218]. Hierzu zählen:

- Geringes spezifisches Gewicht: 1/3 des Gewichts von Stahl
- Vielfältige Herstellungsmöglichkeiten: Gießen, Walzen, Strangpressen, Schmieden, Kaltfließpressen, Ziehen
- Vielseitige Formgebungsmöglichkeiten u.a.: Spanen, Tiefziehen, Streckziehen, Biegen, Stanzen
- Gute Korrosionsbeständigkeit: durch Anodisieren und Beschichten noch zu verbessern
- Großes Festigkeitsspektrum: von 70 bis 800 N/mm²
- Ungiftig: verwendbar als Verpackungstoff für Lebensmittel
- Hohe Wärmeleitfähigkeit: 3x so hoch wie Stahl (2,3 [W/cm*K])

Aufgrund der großen Anzahl von Aluminiumlegierungen und deren unterschiedlichen Eigenschaften sind diese in Gruppen eingeteilt.

2.3.1.1. Einteilung

Aluminiumwerkstoffe werden in der Literatur nach folgenden Kriterien gegliedert [Moeller E. 2008, S.311]:

- nach ihrem Hauptlegierungselement (Tabelle 2.2)
- nach Art der Herstellung
 - Knet- und Gusslegierungen
- nach der Möglichkeit zur Aushärtung
 - nicht aushärtbare und aushärtbare.

Legierungsgruppe	Hauptlegierungselement
EN AW-1xxx (Serie 1000)	Al \geq 99,0%
EN AW-2xxx (Serie 2000)	Cu
EN AW-3xxx (Serie 3000)	Mn
EN AW-4xxx (Serie 4000)	Si
EN AW-5xxx (Serie 5000)	Mg
EN AW-6xxx (Serie 6000)	Mg und Si
EN AW-7xxx (Serie 7000)	Zn
EN AW-8xxx (Serie 8000)	Sonstige Elemente

Tabelle 2.2 Einteilung der Aluminiumwerkstoffe nach ihrem Hauptlegierungselement. EN...Europäische Norm, AW...Aluminium Wrought alloys (Knetlegierungen) [Moeller E. 2008 S.311]

Die Einteilung von Aluminiumgusslegierungen (EN AC „Aluminium Cast Alloy“) darf nicht mit der in Tabelle 2.2 dargestellten verwechselt werden, da sich bei Gusslegierungen die Bezeichnungen ändern [Mandal N. 2002, S.5]. Üblicherweise wird nach der Legierungsbezeichnung ein Wärmebehandlungs- bzw. Verarbeitungszustand angeführt. Nicht aushärtbare Legierungen (Tabelle 2.3) werden weichgeglüht oder kaltverfestigt angeboten. Aushärtbare Legierungen (Tabelle 2.4) kommen in verschiedensten Wärmebehandlungszuständen und in lösungsgelöhter Form vor [Moeller E. 2008 S.311], [Mandal N. 2002, S.5].

Bezeichnung	Zustand	Bemerkungen	alte DIN-Bezeichnung			
			Zeichen	Nummer*		
F	Herstellungszustand	Grenzwerte der mechanischen Eigenschaften sind nicht festgelegt	F	07; 08		
O	weichgeglüht	Um möglichst geringe Festigkeiten zu erzielen	W	1n		
O1		Bei hoher Temperatur geblüht und langsam abgekühlt				
O2		Thermomechanisch behandelt für nachfolgende superplastische Verformung				
O3		Homogenisiert; Verformungsgrad von Gießdraht und Gießbändern verbessert				
H	kaltverfestigt	Um festgelegte mechanische Eigenschaften zu erreichen	F	2 g 3 g		
H1x		Nur kaltverfestigt, ohne zusätzliche thermische Behandlung			G	2u 3u
H2x		Kaltverfestigt und rückgeglüht, geringfügig				
H3x		Kaltverfestigt und stabilisiert, mechanische Eigenschaften stabilisiert und Umformvermögen verbessert				
H4x		Kaltverfestigt und einbrennlackiert, d. h. teilweise entfestigt				

* g = gerade Zahl, u = ungerade Zahl; n = g oder u

Tabelle 2.3 Wärmebehandlungszustände von nicht aushärtbaren Aluminium Knetlegierungen [Moeller E. 2008 S.311]

Die zweite Zahl der Kaltverfestigung beschreibt den Grad der Verfestigung [Mandal N.R. 2005, S.7]: HX2→viertel hart, HX4→halb hart, HX6→dreiviertel hart, HX8→ganz hart, HX8→extra hart. Es kommen auch noch speziellere Bezeichnungen, wie z.B. H111 (geglüht und geringfügig kaltverformt), vor [Prometall 2011].

Bezeichnung	Zustand	Bemerkungen	alte DIN-Bezeichnung	
			Zeichen	Nummer*
W	lösungsgeglüht	Instabiler Zustand; für Legierungen, die nach dem Lösungsglühen spontan bei Raumtemperatur aushärten; eine angehängte Zeit für das Kaltauslagern macht den Zustand eindeutig, z. B. W ¹ / ₂ h		
T	Wärmebehandelt	Um stabilen Zustand zu erzielen		
T1		Abgeschreckt aus der Warmumformungstemperatur und kaltausgelagert		
T2		Abgeschreckt aus der Warmumformungstemperatur, kaltumgeformt und kaltausgelagert		
T3		Lösungsgeglüht, kaltumgeformt und kaltausgelagert		
T4		Lösungsgeglüht und kaltausgelagert	Ka	4n 5n
T5		Abgeschreckt aus der Warmumformungstemperatur und warmausgelagert		
T6		Lösungsgeglüht und warmausgelagert	Wa	6n 7n
T7		Lösungsgeglüht und überhärtet/stabilisiert; verbessert Bruchzähigkeit und Beständigkeit gegen Spannungsriss- und Schichtkorrosion		
T8		Lösungsgeglüht, kaltumgeformt und warmausgelagert		
T9		Lösungsgeglüht, warmausgelagert und kaltumgeformt		

* g = gerade Zahl, u = ungerade Zahl; n = g oder u

Tabelle 2.4 Wärmebehandlungszustände von aushärtbaren Aluminium Knetlegierungen

2.3.1.2. Eigenschaften der Aluminiumknetlegierungen

a) Nicht aushärtbare Legierungen

Zu den nicht aushärtbaren Legierungen zählen Knetlegierungen der Gruppen: 1xxx, 3xxx, 4xxx und 5xxx.

Serie 1xxx (Reinaluminium)

Diese Legierungen haben einem Mindestgehalt von 99,0% Al. Mit zunehmender Reinheit nimmt die $R_{p0,2}$ Grenze ab, jedoch steigen Bruchdehnung und Korrosionsbeständigkeit. Serie 1xxx Legierungen sind gut schweiß- und hartlötbar. Die gute elektrische Leitfähigkeit (bei Al >99,5%) und der gute Korrosionswiderstand drängen die niedrige Festigkeit in den Hintergrund. Al99,5 hat im weichgeglühten Zustand geringe Festigkeitswerte und eine ausgezeichnete Zähigkeit, die selbst nach starker Kaltverfestigung (z.B. H18) noch eine nennenswerte Bruchdehnung ergibt. Rückglühungen zur Verbesserung der Verformbarkeit (H2X) sind nicht üblich. Reinaluminium wird vor allem für funktionale, weniger für strukturelle, Aufgaben eingesetzt. Gründe dafür sind die gute Verarbeitbarkeit, sehr gute Korrosionsbeständigkeit und toxikologische Unbedenklichkeit sowie viele interessante physikalische Eigenschaften (z.B. geringes Absorptions- und hohes Reflexionsvermögen, hohe Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit) [Ostermann F. 2007, S.114f], [Olson D.-L. et al. 2008 Vol.6, S.537].

Serie 3xxx (Al-Mn)

3xxx Legierungen zeichnen sich im Vergleich zu 1xxx Legierungen durch höhere Festigkeit und verbesserte Beständigkeit gegen alkalische Lösungen aus. Al-Mn Legierungen sind gut schweißbar, lötbar und gut umformbar. Wegen der geringen Festigkeit zählen AlMn-Legierungen weniger zu den Konstruktionslegierungen, sondern eher zu den Funktionslegierungen. Aufgrund des sehr guten Korrosionswiderstandes finden diese Legierungen vielfältig Anwendung, wie zum Beispiel als Dosenkörper in der Verpackungsindustrie, in der chemischen Industrie, als unbeschichtete Dach- und Wandverkleidungen, als Wärmeaustauscher sowie Klimaanlage und gas- und flüssigkeitsleitende Rohre. Mangan hat eine begrenzte Löslichkeit im α -Mischkristall von maximal 1,8 Gew.-%, die mit abnehmender Temperatur stark abnimmt. Mn ist ein langsam

diffundierendes Legierungselement und scheidet sich als feine, thermisch stabile, nicht kohärente Teilchendispersion der Gleichgewichtsphase $MnAl_6$ im Gefüge aus. Dadurch wird eine Dispersionshärtung erzeugt, die gegenüber unlegiertem Aluminium eine Festigkeitssteigerung von etwa 25% bewirkt. Die Dispersion der Mn-haltigen Phase wirkt Kornverfeinernd und erschwert die Rekristallisation. Allerdings ist der Beitrag der geringeren Korngröße zur Festigkeitssteigerung von AlMn-Legierungen gering. [Ostermann F. 2007, S.115f], [Olson D.-L. et al. 2008 Vol.6, S.537]

Serie 4xxx (Al-Si)

Die Gruppe der 4xxx-Legierungen besteht aus Legierungen für Hartlote und Schweißzusatzdrähte sowie Legierungen für besondere Zwecke (z.B. Schmiedeteile). Größere Mengen an Si (bis 12%) setzen den Schmelzbereich der Legierung stark herab, ohne ihn zu verspröden. Durch die Zugabe von Silizium wird auch die Benetzbarkeit verbessert. Aus diesem Grund werden AlSi Legierungen hauptsächlich als Schweißzusätze verwendet (z.B. EN AW 4043, EN AW 4045, EN AW 4046) [Moeller E. 2008 S.318], [Baumgartner S. 2005, S.21], [Ostermann F. 2007, S.169].

Serie 5xxx (Al-Mg / Al-MgMn)

Al-Mg-Legierungen werden als nicht aushärtbare Legierungen mit niedrigem bis mittlerem Festigkeitsniveau eingestuft. Im Vergleich zu anderen nicht aushärtbaren Legierungen neigt die Serie 5xxx zu größeren Verfestigungen. AlMg Werkstoffe haben eine gute Witterungsbeständigkeit und sind seewasserbeständig. Bei Anwendungstemperaturen über 65°C und Mg Gehalten größer 3% kann es zu Spannungsrissskorrosion kommen. Die maximale Löslichkeit von Mg in Aluminium in festem Zustand beträgt bei 450°C 17,4 Gew.-%. Bei Raumtemperatur reduziert sich diese maximale Löslichkeit von Mg auf 1,9 Gew.-%. Trotz dieser starken Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit entsteht bei AlMg(Mn)-Legierungen keine Ausscheidungshärtung. Die hohe Löslichkeit im festen Zustand, sowie der vergleichsweise größere Atomradius machen Magnesium zum bevorzugten Legierungselement für eine substitutionelle Mischkristallhärtung von Aluminium. Bei niedrigen Mg -Werten steigt die Gefahr für Heißrisse. Aus diesem Grunde werden für Schweißkonstruktionen und Schweißzusätze nur Legierungen mit einem Mg Gehalt über 3% verwendet. Die weichgeglühten Legierungen haben den Vorteil, dass die Festigkeitsabnahme von Schweißverbindungen nur sehr gering ausfällt. Eine weitere günstige Eigenschaft ist, dass trotz fallender Temperatur sowohl Zugfestigkeit und Streckgrenze als auch Bruchdehnung steigen. Aus diesen Gründen werden AlMg-Legierungen in den Bereichen Schiffsbau, Fahrzeugbau, Behälterbau, Rohrleitungsbau und im Tragwerkbau verwendet. Der überwiegende Teil der AlMg-Legierungen wird zu Walzprodukten und nur in Ausnahmefällen zu Konstruktionsprofilen verarbeitet. Es gibt nur wenige handelsübliche binäre AlMg-Legierungen, wozu EN AW-AlMg1(C) (EN AW-5005A) und EN AW-AlMg1,5 (EN AW-5050) gehören. Alle anderen, höher legierten AlMg-Legierungen haben kleinere oder größere Zusätze von Dispersionsbildnern, vornehmlich Mn und Cr. Der Übergang von den AlMg zu den AlMgMn-Legierungen ist kontinuierlich, Legierungen mit mehr als 5,6% Mg haben als Knetwerkstoffe keine Bedeutung mehr [Hufnagel W. 1983, S.44], [Moeller E. 2008, S.318f], [Sauders H.-L. 1989, S.8.10], [Gene M. 2005, S.42], [Baumgartner S. 2005, S.23], [Ostermann F. 2007, S.117f].

AlMgMn Legierungen haben mit zunehmendem Legierungsanteil und mit zunehmender Kaltverfestigung eine höhere Festigkeit. Durch den Mn Anteil in der Legierung erhöhen sich Heißrissebeständigkeit und Schweißbarkeit. Al-MgMn Legierungen sind gut korrosionsbeständig und haben auch eine gute Kombination von Festigkeit und Zähigkeit bei



niedrigeren Temperaturen. Bei hoch Mg haltigen und stark kaltverfestigten Legierungen besteht bei Temperaturen von 120-200°C die Gefahr der interkristallinen Korrosion. Mn und Cr dienen hauptsächlich zur Stabilisierung des Korngefüges bei der Warmumformung, zur Steuerung der Rekristallisation und auch zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit. Die Dispersionsbildner Mn und Cr wirken sich, wie auch Mg, positiv auf das plastische Verhalten aus, indem sie die Versetzungsbewegungen begrenzen. Die Schmelzschweißbarkeit und Korrosionsbeständigkeit, sowie die Duktilität der AlMg(Mn)-Legierungsgruppe bei tiefen Temperaturen ist ausgezeichnet. Das Einsatzgebiet der AlMgMn Legierung ist dem der vorher genannten AlMg Legierungen sehr ähnlich. Zu den Standardkonstruktionslegierungen für allgemeine Anwendungen zählen die Legierungen AlMg3Mn (EN AW-5754) und AlMg4,5Mn0,7 (EN AW-5083). Für den Karosseriebau hat sich wegen der guten Kombination von Umformbarkeit und Festigkeit die Legierung AlMg4,5Mn0,4 (EN AW-5182) durchgesetzt. [Ostermann F. 2007, S.118f], [Olson D.-L. et al. 2008, Vol.6 S.535].

b) Aushärtbare Legierungen

Zu den aushärtbaren Legierungen zählen die Gruppen 2xxx, 6xxx und 7xxx.

Serie 2000 (Al-CuMg)

Diese Legierung hat den Vorteil, dass sie bei tieferen Temperaturen vergleichsweise hohe Festigkeit und Bruchdehnung hat, nachteilig ist jedoch ihre schlechtere Korrosionsbeständigkeit. Die Löslichkeit von Kupfer fällt bei Raumtemperatur auf praktische Unlöslichkeit ab. Korngrenzenausscheidungen von Al₂Cu sind korrosionstechnisch kritisch, da sie edler sind als der α Mischkristall. Daher besteht die Gefahr der anodischen Auflösung des an den Korngrenzen benachbarten α Mischkristalls. Dadurch entstehen eine Empfindlichkeit gegenüber Fehlern bei der Wärmebehandlung, erschwerte Warmumformbarkeit und bedingte Schweißbarkeit von 2xxx Legierungen. So gilt die 2xxx Serie für Schweißkonstruktionen als unwirtschaftlich. Die Legierungen 2014, 2219 und 2519 haben eine bessere Schweißbarkeit, sind jedoch schlechter verformbar als andere aushärtbare Legierungen [Moeller E. 2008, S.319], [Sauders H.-L. 1989, S.8.10], [Baumgartner S. 2005, S.19], [Olson D.-L. et al. 2008, Vol.6 S.530ff].

Serie 6xxx (Al-MgSi)

Diese Legierung ist allgemein nicht so fest wie die Gruppen 2xxx und 7xxx. Das Eigenschaftsspektrum der 6xxx Legierung erstreckt sich auf mittlere bis hohe Festigkeiten, hohe Bruchzähigkeiten, gute Schweißbarkeit, gute Korrosionsbeständigkeit und bei Walzprodukten auf gute Kaltumformbarkeit. AlMgSi Legierungen sind im quasibinären System durch die Bildung von Mg₂Si aushärtbar. Das AlMgSi Legierungssystem ist die Grundlage für viele aushärtbare Knet- und Gußlegierungen, die als Konstruktionswerkstoffe in den verschiedensten Anwendungsbereichen als Strangpress-, Walz-, Schmiede- und Formgussprodukte eingesetzt werden. Sie verliert im warmausgehärteten Zustand nach dem Schweißen in der WEZ jedoch an Festigkeit (bis Zustand O möglich), ist aber dennoch gut schweißbar. In weichem Zustand ist die AlMgSi Legierung sehr gut umformbar. Der Zusatz von 0,2 bis 1 % Cu führt bei der Warmaushärtung zu einer deutlichen Anhebung der Festigkeit. Überschüssiges Si scheidet sich bevorzugt in gröberer Form an den Korngrenzen aus und führt zu energiearmem, teilweise interkristallinem Bruchverhalten. Weiters wird durch Si interkristalline Korrosion angeregt. Legierungen wie z.B. 6061 und 6063 haben gute Korrosionseigenschaften in geschweißtem sowie in nicht geschweißtem Zustand, sind jedoch auf Seewasser vermehrt korrosionsanfällig [Ostermann F. 2007, S138ff], [Baumgartner S. 2005, S.23], [Moeller E. 2008, S.319].

Serie 7xxx (Al-ZnMg(Cu))

7xxx Legierungen haben im Vergleich zu den anderen Legierungsgruppen mit bis zu 700N/mm² die höchste Festigkeit. Jedoch sind nur die Cu-freien 7xxx Legierungen, wie z.B. 7004, 7005, 7039, und 7020 gut schweißbar. Die Legierung 7020 härtet bei Raumtemperatur in der WEZ wieder selbstständig aus. Die hochfesten Legierungen mit Cu-Anteil sind anfällig auf Spannungsrissskorrosion, und Legierungen, die Zink beinhalten, sind nicht lebensmittelgeeignet [Moeller E. 2008, S.320], [Ostermann F. 2007, S.157], [Olson D.-L. et al. 2008, Vol.6 S.530], [Olson D.-L. et al. 2008 Vol.6, S.533].

c) Legierungen für spezielle Anforderungen

Serie 8xxx (sonstige)

Die 8xxx Serie umfasst alle Legierungen, welche andere als die vorher genannten Hauptlegierungselemente enthalten. Anwendung finden diese Legierungen z.B. in der Luft und Raumfahrt, sowie bei hoher geforderter Spanbarkeit des Werkstoffs [Olson D.-L. et al. 2008 Vol.6, S.528].

Außer den oben angeführten gibt es noch weitere Legierungen für spezielle Anforderungen, wie z.B. Automatenlegierungen oder für elektrotechnische Anwendungen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll [Moeller E. 2008, S.320].

2.3.2. Mögliche Materiallösungen

Aufgrund bestimmter K.O.- Kriterien aus der Materialanforderungsliste (Tabelle 2.1, S.14) konnte in Verbindung mit den Grundlagen der Aluminiumlegierungen aus Kapitel 2.3.1 eine Vorauswahl getroffen werden. Mögliche Gehäuselegierungen sind in Tabelle 2.5 zusammengefasst und wurden mit K.O.- Kriterien bewertet, welche Streckgrenze, Bruchdehnung, Schweißbarkeit und Korrosionsbeständigkeit waren. Für die Streckgrenze wurde der unter Kapitel 2.2.1 S.7 berechnete Grenzwert von 85 N/mm² übernommen. Als Grenzwert für die Bruchdehnung wurde mit 24% der Wert von DD11 angenommen [Voestalpine 2011, S.4].

Pos.	Legierungsgruppe	nicht erfüllte Kriterien*	Einsatz möglich? ja/nein
1	EN AW-1xxx-O	zu geringe Dehngrenze / max. 40 [N/mm ²]	nein
2	EN AW-1xxx-Hx	zu geringe Bruchdehnung / max. 12 [%]	nein
3	EN AW-2xxx-Tx	zu geringe Bruchdehnung / max. 21 [%]	nein
		bedingt schweißbar	
		schlechte Korrosionseigenschaft	
4	EN AW-3xxx-O	zu geringe Dehngrenze / max. 80 [N/mm ²]	nein
5	EN AW-3xxx-Hx	zu geringe Bruchdehnung / max. 12 [%]	nein
6	EN AW-4xxx-O	zu geringe Dehngrenze / max. 60 [N/mm ²]	nein
		Info: eher als Schweißzusatz verwendet	
7	EN AW-5xxx-O		ja
8	EN AW-5xxx-Hx	zu geringe Bruchdehnung / max. 16 [%]	nein
9	EN AW-6xxx-O	zu geringe Dehngrenze / max. 70 [N/mm ²]	
10	EN AW-6xxx-Tx		ja
11	EN AW-7xxx	schlechte Schweißbarkeit oder schlechte Korrosionseigenschaft	nein
12	EN AW-8xxx	wenig verbreitet	nein

Tabelle 2.5 Vorauswahl geeigneter Aluminiumknetlegierungen für das Kühlkompressorgehäuse. *die einzelnen Materialkennwerte wurden aus [Ostermann F. 2007, S757ff] und [Vargel C. 2004, S.75] entnommen

Aus Tabelle 2.5 ist ersichtlich, dass aufgrund der definierten Kriterien nur 5xxx-O und 6xxx-Tx Legierungen die Anforderungen eines Werkstoffs für ein Kompressorgehäuse erfüllen. Dieses Ergebnis diente als Ausgangspunkt für die anschließende Feinauswahl des Untersuchungsmaterials.

2.4. Auswahl der Versuchswerkstoffe

Aus allen oben genannten Gruppen wurde je eine Legierung gewählt. In Tabelle 2.6 und Tabelle 2.7 sind für die Reihung der Legierungen alle 5xxx und 6xxx Legierungen angeführt, welche als Halbzeug „Blech“ erzeugt werden sowie eine Mindest-Streckgrenze von 85N/mm^2 aufweisen. Die Werkstoffe sind nach Tiefziehfähigkeit sortiert, d.h. Werkstoffe mit geringer Streckgrenze ($R_{p0,2}\downarrow$) und zugleich hoher Bruchdehnung ($A_{50}\uparrow$) stehen zu Beginn. Allgemeine Tiefziehbarkeit, Schweißbarkeit und Korrosionsbeständigkeit wurden als zusätzliche Auswahlhilfen angeführt.

Aus Tabelle 2.6 besitzt AA-5022-O die beste Tiefziehfähigkeit, jedoch ist die allgemeine Korrosionsbeständigkeit schlechter als die der anderen Legierungen. Aus diesem Grund wäre 5182-O die günstigste Legierung, da sie in allen Bereichen sehr gute Eigenschaften aufweist. Aus Verfügbarkeitsgründen wurde jedoch AW-5083-O mit 3mm Blechstärke gewählt. Mit Ausnahme seiner schlechteren Tiefziehfähigkeit hat AW-5083-O näherungsweise gleiche Eigenschaften wie AW-5182-O.

Pos.	Material	Dehngrenze N/mm^2	Bruchdehnung $A_{50}^* A_5$ %	Tiefziehbarkeit	Schweißbarkeit	allgemeine Korrosions- beständigkeit
1	AA 5022-O	135	30	sehr gut	sehr gut	gut
2	AA 5023-O	155	30	sehr gut	sehr gut	gut
3	EN AW 5182-O	140	28	sehr gut	sehr gut	sehr gut
4	EN AW 5052-O	90	24	sehr gut	gut	sehr gut
5	EN AW 5754-O	100	24	gut	sehr gut	sehr gut
6	EN AW 5454-O	110	24	gut	sehr gut	sehr gut
7	EN AW 5154A-O	95	23	gut	sehr gut	sehr gut
8	EN AW 5049-O	95	22	sehr gut	sehr gut	sehr gut
9	EN AW 5086-O	115	23	gut	sehr gut	sehr gut
10	EN AW 5059-O	175	26*	gut	sehr gut	sehr gut
11	EN AW 5083-O	145	22	gut	sehr gut	sehr gut
12	AA 5383-O	240	22	gut	sehr gut	sehr gut

Tabelle 2.6 Feinauswahl einer geeigneten 5xxx Legierung [Ostermann F. 2007, S.754ff]

Für die Auswahl der 6xxx Legierung wurde ähnlich vorgegangen. Tabelle 2.7 fasst die möglichen Legierungen zusammen. Aus der 6xxx-Reihe kommen mehrere Werkstoffe in Frage. Sowohl die Legierung 6014-T4, als auch 6016-T4 haben in allen Bereichen eine sehr gute Eignung. Auch bei dieser Auswahl musste aus Verfügbarkeitsgründen eine andere als die optimale Legierung ausgewählt werden, so wurde für die weiteren Versuche AW-6181-T4 mit einer Blechstärke von 2,5mm verwendet.

Pos.	Material	Dehngrenze N/mm ²	Bruchdehnung A50 %	Tiefziehbarkeit	Schweißbarkeit	allgemeine Korrosions- beständigkeit
1	EN AW 6116-T5	100	28	sehr gut	gut	sehr gut
2	AA 6014-T4	90	25	sehr gut	sehr gut	sehr gut
3	EN AW 6060-T1	90	25	gut	sehr gut	sehr gut
4	EN AW 6016-T4	100	25	sehr gut	sehr gut	sehr gut
5	EN AW 6063-T4	90	24	gut	sehr gut	sehr gut
6	EN AW 6111-T4	135	26	gut	sehr gut	gut
7	AA 6009-T6	125	25	gut	sehr gut	sehr gut
8	AA 6022-T4	148	26	sehr gut	sehr gut	sehr gut
9	EN AW 6181A-T4	125	23	sehr gut	sehr gut	gut
10	EN AW 6061-T4	140	21	sehr gut	sehr gut	gut
11	EN AW 6082-T4	180	20	annehmbar	sehr gut	gut

Tabelle 2.7 Feinauswahl einer geeigneten 6xxx Legierung [Ostermann F. 2007, S.754ff]

Zusammenfassend sind in Tabelle 2.8 die chemischen Eigenschaften sowie die Festigkeits-, Korrosions- und Verarbeitungseigenschaften von AW-5083-O und AW-6181-T4 gegenübergestellt. AW-5083-O hat neben unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung auch eine um ca. 22% höhere Zugfestigkeit als AW-6181-T4. Weitere deutliche Unterschiede im Vergleich zu AW-6181-T4 sind die geringere Wärmeleitfähigkeit (-45%) und die allgemein bessere Korrosionsbeständigkeit von AW-5083-O.

Legierungsbezeichnung		Legierungselemente in Gew.-%										Andere		
CEN-(AA-) Nr.	CEN-Bezeichnung	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sonstige ¹⁾	einzel	gesamt	Al
EN AW-5083	Al Mg4,5Mn0,7	0,40	0,40	0,10	0,40-1,0	4,0-4,9	0,05-0,25	...	0,25	0,15	...	0,05	0,15	Rest
EN AW-6181A	Al Si1Mg0,8(A)	0,7-1,1	0,15-0,50	0,25	0,40	0,6-1,0	0,15	...	0,30	0,15	0,10 V	0,05	0,15	Rest

CEN-(AA-) Nr.	CEN-Bezeichnung	Zustand	Halbzeug ¹⁾	E-Modul [MPa]	G-Modul [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	R _T [MPa]	A ₅ [%]	A ₉₀ [%]	HBS [...]	σ _{w,0,2} ²⁾ [MPa]
EN AW-5083	Al Mg4,5Mn0,7	0/H111	B, P, G, R	70300	26400	145	300	180	23	22	70	85
EN AW-6181A	Al Si1Mg0,8(A)	T4	K	70000	26400	125	235	150	25	23	65	n.b.

CEN-(AA-) Nr.	CEN-Bezeichnung	Zustand	Elektr. Leitfähigkeit [%IACS]	Spezif. elektr. Widerstand [nΩm]	Wärmeleitfähigkeit [W/m-K]	Spezif. Wärme c _p [J/kg-K]	Dichte ρ [g/cm ³]	Solidustemperatur [°C]	Liquidustemperatur [°C]	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient 10 ⁻⁶ [1/K]	Poisson's Zahl ν [...]
EN AW-5083	Al Mg4,5Mn0,7	0/H111	28,5	60,0	117	899	2,66	574	638	23,8	0,33
EN AW-6181A	Al Si1Mg0,8(A)	T4	46,0	37	170	894	2,70	570	645	23,4	0,33

Legierungsbezeichnung		Zustand	Korrosionsbeständigkeit in der Atmosphäre					Beständigkeit gegen die Korrosionsarten				Anodisierbarkeit		
CEN-(AA-) Nr.	CEN-Bezeichnung		allg. Beständigkeit	Industrie-klima	Meeres-klima	ländliches Klima	Schicht-korrosion	Interkrist. Korrosion	Loch-korrosion	Spannungsriss-korrosion	Glanz-anodisieren	Farb-anodisieren	Hart-anodisieren	Schütz-wirkung
EN AW-5083	Al Mg4,5Mn0,7	0/H111	6	6	6	6	6	5	6	6	4	5	6	6
EN AW-6181A	Al Si1Mg0,8(A)	T4	5	5	5	6	5	5	5	5	4	5	5	6

Legierungsbezeichnung		Zustand	Schweißbarkeit			Lötbarkeit			Mechanische Bearbeitbarkeit				
CEN-(AA-) Nr.	CEN-Bezeichnung		MIG-/WIG-Schweißen	Gas-Schweißen	EB-Schweißen	Widerst.-Punktschweißen	Hartlötbarkeit	Weichlötbarkeit	Kaltverformbarkeit (allg.)	Tiefziehbarkeit	Streckziehbarkeit	Drückwalzbarkeit	Zerspanbarkeit
EN AW-5083	Al Mg4,5Mn0,7	0/H111	6	4	6	5	3	3	5	5	5	5	4
EN AW-6181A	Al Si1Mg0,8(A)	T4	6	4	6	5	4	5	6	6	6	5	k.A.

Bewertungsskala: 1 = nicht anwendbar; 2 = ungeeignet; 3 = nicht empfohlen; 4 = annehmbar; 5 = gut; 6 = sehr gut; 7 = ausgezeichnet.
k.A. = keine Angaben

Tabelle 2.8 Eigenschaften der Versuchswerkstoffe AW-5083-O und AW-6181-T4 [Ostermann F. 2007, S.754ff]

3. Praktische Untersuchungen

3.1. Schweißbarkeit und Parameteroptimierung

3.1.1. Grundlagen zum Schweißen von Aluminium

Das Schweißen von Aluminiumwerkstoffen weist einige Eigenheiten auf, die aus den physikalischen Eigenschaften von Aluminium resultieren. In Tabelle 3.1 sind jene von Eisen und Aluminium gegenübergestellt. Neben unterschiedlichem mechanischen Verhalten weist Aluminium folgende bedeutende Unterschiede gegenüber Eisen auf [Dilthey U. 2005, S.217ff]:

- eine dreimal größere Wärmeleitfähigkeit λ [W/(cm*K)]
- ein doppelt so großer Ausdehnungskoeffizient α [1/K]
- eine ca. 2,5fach geringerer Schmelzpunkt als Fe T_S [°C]
- ein erheblich geringerer elektrischer Widerstand R [Ω]
- der Schmelzpunkt vom Aluminiumoxid (Al_2O_3) ist erheblich höher als der von Aluminium; im Vergleich dazu schmelzen bei Eisen das Metall und Oxidverbindungen bei etwa gleicher Temperatur.

		Al	Fe
Atommasse	g/mol	26,9	55,84
Dichte	g/cm ³	2,7	7,87
Kristallgitter		kfz	krz
Elastizitätsmodul	N/mm ²	71 * 10 ³	210 * 10 ³
R _{p0,2}	N/mm ²	10	100
R _m	N/mm ²	50	200
spezifische Wärmekapazität	J/(g * K)	0,88	0,53
Schmelzpunkt	°C	660	1539
Wärmeleitfähigkeit	W/(cm * K)	2,30	0,75
spezifischer elektrischer Widerstand	$\mu\Omega * m$	28 bis 29	97
Ausdehnungskoeffizient	1/K	24 * 10 ⁻⁶	12 * 10 ⁻⁶
Oxide		Al ₂ O ₃	FeO Fe ₃ O ₄ Fe ₂ O ₃
Schmelzpunkt der Oxide	°C	2050	1400 1600 (1455)

Tabelle 3.1 Vergleich der physikalischen Eigenschaften von Aluminium und Stahl [Dilthey U. 2005, S.218]

Aluminium hat gegenüber Stahl eine höhere Wärmeleitfähigkeit λ , die einen entscheidenden Einfluss auf das Temperaturfeld beim Schweißen hat (Abbildung 3.1). Der Temperaturgradient um die Schweißstelle ist bei Aluminium deutlich geringer als bei Stahl. Obwohl die Maximaltemperatur beim Aluminiumschweißen im Vergleich zum Stahlschweißen um ca. 900 °C tiefer liegt, hat das Temperaturfeld um die Schweißstelle eine größere Ausdehnung. Dies hat zur Folge, dass bei gleicher Blechdicke beim Aluminiumschweißen nahezu die gleiche Wärmemenge wie beim Schweißen von Stahl in den Grundwerkstoff eingebracht werden muss [Dilthey U. 2005, S.230]. Trotz des geringen Schmelzpunktes ist wegen der großen Wärmeleitfähigkeit und der großen spezifischen

Wärme ein Schweißverfahren mit großer Leistungsintensität (Plasma-, MIG-, WIG-, Laserschweißen) gefordert. Schweißverfahren mit wenig konzentrierter Wärmequelle (z.B. Autogenschweißen) führen bei Knetlegierungen und ausscheidungshärtenden Legierungen zu breiten, entfestigten und versprödeten Wärmeeinflusszonen. Als Folge der raschen Wärmeabfuhr wird außerdem die Bildung von Poren und Rissen begünstigt. Zudem begünstigt die Kombination aus hoher Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnung die Bildung von Eigenspannungen und Verzug [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.532], [Mandal N.R. 2005, S.1ff], [Bargel H.J. et al. 2008, S.94f], [Fritz H. et al. 2010, S.124], [Dilthey U. 2005, S.44, 230].

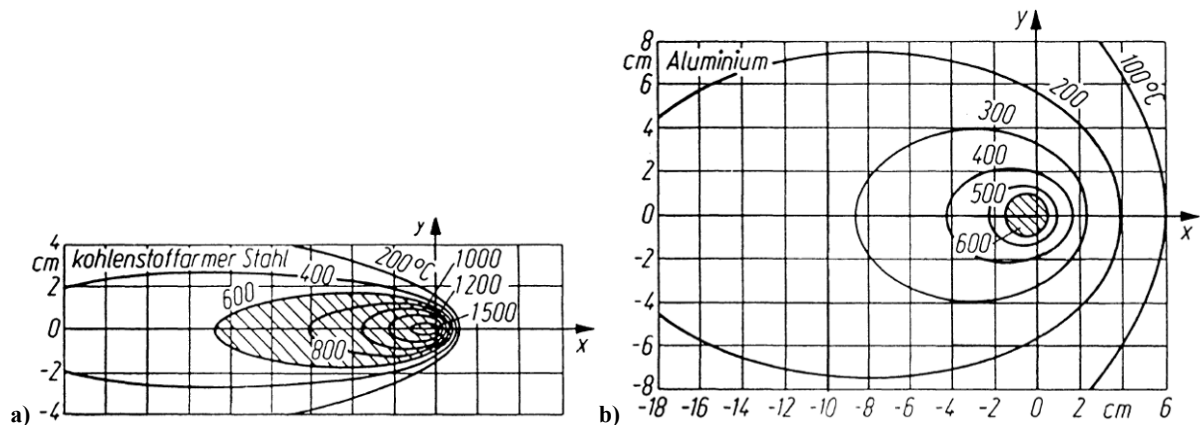


Abbildung 3.1 Isothermenfelder beim Schweißen a) Stahl b) Aluminium [Dilthey U. 2005, S230]

3.1.1.1. Oxidschicht

Die hohe Affinität von Aluminium zum Sauerstoff führt an der Luft sehr schnell dazu, dass eine dünne Oxidschicht aus Al_2O_3 auf der Werkstückoberfläche entsteht. Das Oxid ist eine festhaftende, elektrisch nicht leitende Schicht, die eine tiefergehende Oxidation von Aluminium verhindert. Der Schmelzpunkt von Aluminiumoxid liegt ca. 4-mal höher als der von Aluminium. Beim Schweißen verhindert die Oxidschicht ein Zusammenlaufen des Schmelzbades, so dass Flankenfehler entstehen können. Dies kann durch mechanische oder chemische Nahtvorbereitung verhindert werden. Nach der mechanischen Nahtvorbereitung bildet sich die Oxidschicht wieder neu, jedoch ist sie zum einen dünner und besitzt zum anderen eine gleichmäßige Dicke. Aufgebrochene Oxidhäute können wegen des höheren spezifischen Gewichts, als jenes der Schmelze, ins Schweißgut eingeschwemmt werden. Dort erzeugen sie rissähnliche Fehlstellen (Abbildung 3.2 a). Durch die Porosität der Deckschicht werden Feuchtigkeit und Verunreinigungen (Öle und Fette) aufgenommen, die mit zunehmender Oxidschichtdicke eine verstärkte Porenbildung (Abbildung 3.2 b) der Schweißnaht verursachen können [Dilthey U. 2005, S.232f], [Ostermann F. 2007, S.593].

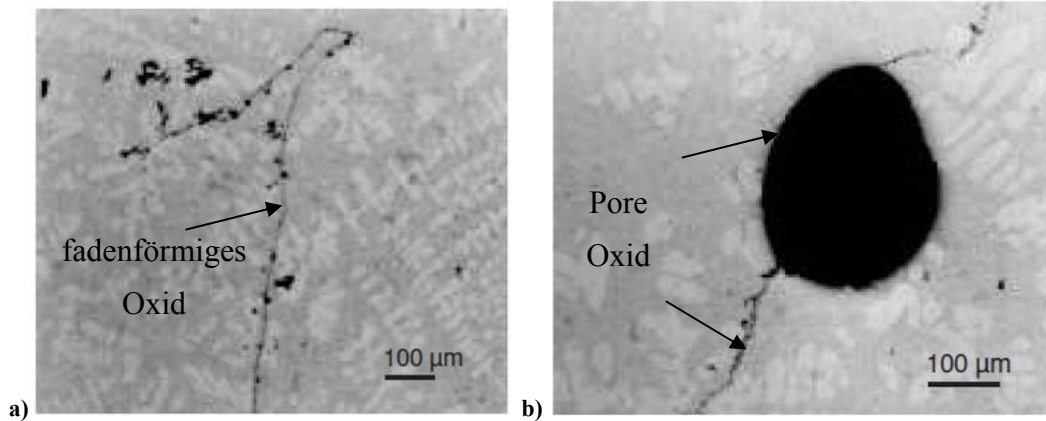


Abbildung 3.2 a) Eingeschwemmte Oxidhaut b) Oxidhaut mit Pore [Reihfeld Alloys 2010, S.100]

3.1.1.2. Porenbildung

Beim Schweißen von Aluminium ist die Porosität im Gussgefüge der Schweißnaht schwierig zu vermeiden. Die Poren entstehen bei der Erstarrung aus der Schmelze, zumeist durch Wiederausscheidung von gelöstem Wasserstoff. Die Löslichkeit von Wasserstoff in Aluminium ändert sich bei der Erstarrung sprunghaft bis auf 1/20 der Löslichkeit (Abbildung 3.3). Dadurch entsteht ein Wasserstoffüberschuss im Schweißgut, der sich als Gasblase an der Erstarrungsfront ausscheidet (Abbildung 3.4). Durch den niedrigen Schmelzpunkt und einer sehr hohen Wärmeleitfähigkeit ist bei Aluminium die Erstarrungsgeschwindigkeit hoch. Ausscheidende Gasblasen werden dadurch von der Erstarrungsfront überholt und verbleiben als Poren im Schweißgut (Abbildung 3.4). Durch das geringe Erstarrungsintervall von Reinaluminium (Abbildung 3.14 S.35) wird die Porenbildung zusätzlich begünstigt [Dilthey U. 2005, S.235ff], [Klock H. et al. 1997; S.113].

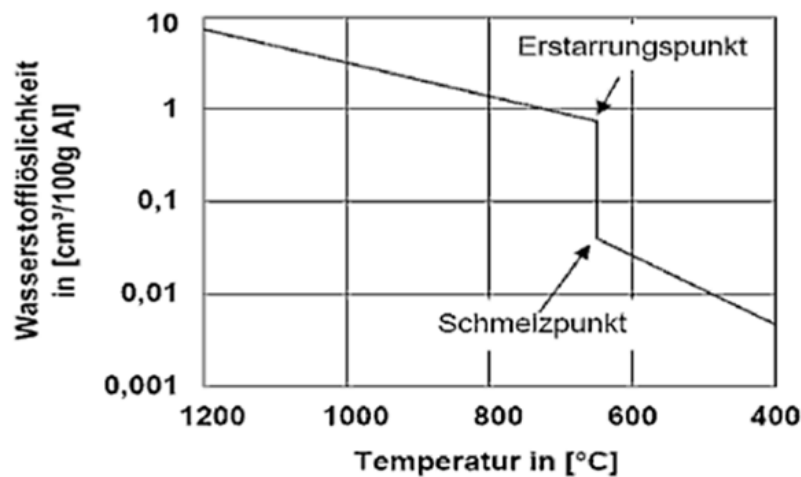


Abbildung 3.3 Wasserstofflöslichkeit in Aluminium [Brückner C. 2009, S.11]

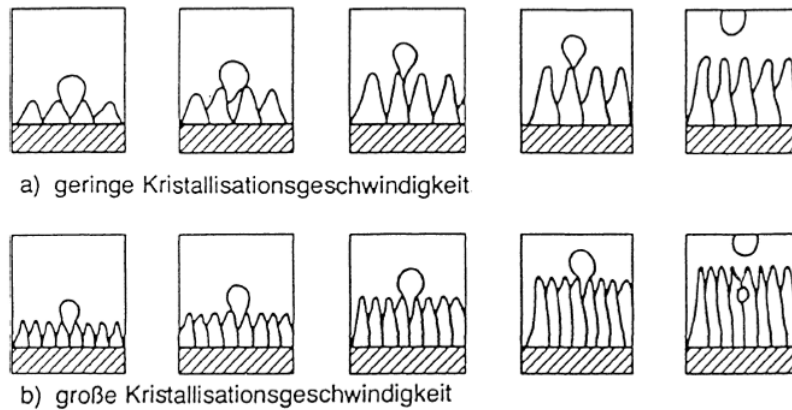


Abbildung 3.4 Wachstum und Loslösung von Gashohlräumen an der Phasengrenzfläche [Dilthey U. 2005, S.288]

Wesentliche Wasserstoffquellen beim MIG-Schweißen von Aluminium sind eine falsche Brennerstellung, Turbulenzen im Schutzgasstrom, Turbulenzen durch verschmutzte Düsenansätze und wasserstoffhaltige Schweißzusatzwerkstoffe (Abbildung 3.5). Öle und Fette auf der Blechoberfläche und die im Schlauchpaket eingeschlossene Luftfeuchtigkeit erhöhen ebenfalls den Wasserstoffgehalt im Schweißgut. Maßnahmen die zur Porenreduktion führen (Tabelle 3.2), sind ausreichende Vorwärmung des Werkstoffes, die richtige Wahl des Schutzgases und die Verminderung des Wasserstoffangebotes. Die Wasserstoffmenge wird durch entsprechende Reinigung der Materialoberflächen, richtige Brennerneigung und einer regelmäßigen Wartung der Schweißanlage reduziert [Dilthey U. 2005, S.235ff], [Kosteas D. 1978, S.68].

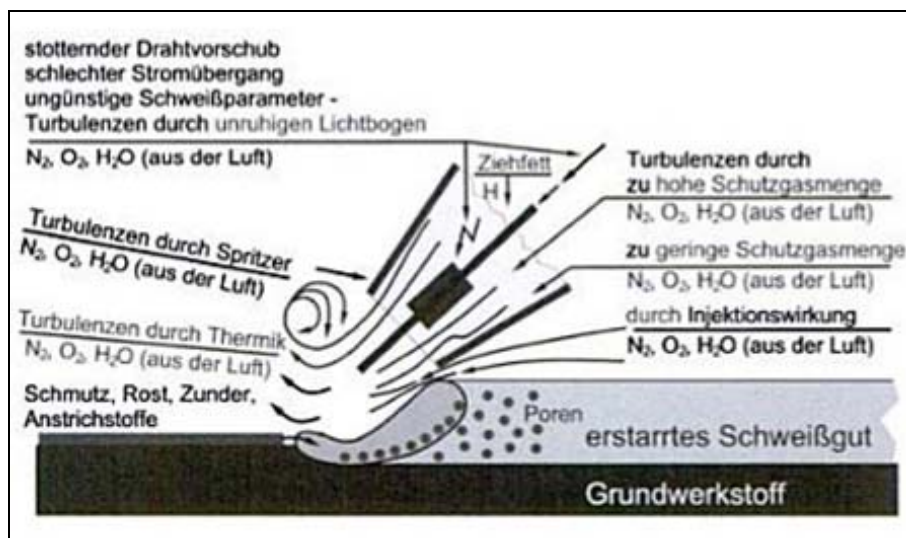


Abbildung 3.5 Möglichkeiten der Gasaufnahme beim MSG Schweißen [Heubner U. et al. 2009, S.87]

Art der Unregelmäßigkeit	Ursache	Vermeidung, Abhilfe
Poren	Verschmutzte Fuge (Fett, Farbe, Oxide)	Reinigen mit Fettlösemittel; nur trockene Werkstücke schweißen; Oxidschicht vor dem Schweißen entfernen
	Verschmutzte Drahtelektrode	Drahtelektrode wechseln
	Ungeeigneter Drahtelektrodendurchmesser	Durchmesser entsprechend Werkstückdicke und Schweißposition auswählen
	Falsche Schutzgasmenge	Gasmenge korrigieren
	Falsches Schutzgas	Argon, Helium oder Gemisch aus beiden verwenden
	Leck im Kühlwasserkreislauf	Schweißbrenner, Schlauchpaket und Kühlwasserleitungen kontrollieren und gegebenenfalls reparieren
	Einwirbeln von Luft in den Schutzgasstrom	Schutzgasleitungen und Schweißbrenner auf Dichtheit prüfen; Gasdüse von Spritzern säubern;
	Zu kurze Gasvor- und/oder Gasnachströmzeit	Gasdüsenabstand verringern; Brennerneigung korrigieren; Einstellung ändern
	Ungleichmäßige Drahtförderung	Anpressdruck der Drahtrollen überprüfen; verschlissene oder falsche Vorschubrollen austauschen; Stellung des Drahteinlaufrohrs prüfen; Drahtführungsseele ausblasen oder austauschen; kürzeres Schlauchpaket oder Push-Pull-Brenner verwenden
	Zugluft	Schweißarbeitsplatz gegen Zugluft sichern
	Ungenügender Masseanschluss	Masseanschluss verbessern, Kontaktflächen reinigen
	Unsachgemäße Heftschweißung	Heftstelle vor dem Überschweißen ausschleifen bzw. schräg schleifen
	Zu starke Wärmeableitung	Ausreichend vorwärmen
	Ungeeignete Schleifscheiben zum Schleifen der Heftstellen oder vorherigen Lagen	Für Aluminium geeignete Schleifscheiben verwenden

Tabelle 3.2 Ursache und Abhilfe gegen Poren beim MIG Schweißen von Aluminium [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.548]

Zum Einfluss der Poren auf die Festigkeit gibt es in der Literatur verschiedene Meinungen. So ist laut Klock H. [Klock H. et al. 1977, S.114] der Einfluss von Poren auf die statische und dynamische Festigkeit nur geringfügig, außer wenn diese den tragenden Querschnitt deutlich vermindern oder Kerben durch Oberflächenporen bilden. Das stimmt auch mit den Aussagen von Cáceres C.H. [Cáceres C.H. 1995, S.1851ff] überein, welcher empfiehlt nur die in der Bruchfläche vorhandenen Poren zur Beschreibung von Festigkeitseigenschaften heranzuziehen. Die Verwendung des relativen Porenvolumens stuft er in seiner Arbeit als nicht zweckgeeignet ein. Außerdem zitiert er Quellen, die belegen, dass die Duktilität stark mit zunehmender Porengröße in der Bruchfläche abnimmt. Laut Literatur [Kammer C. 2003, Kap.3], [Hufnagel W. 1977, S.620] ist erst ab einem Porengehalt von 13% ein Festigkeitsabfall erkennbar, wobei die Poren einen größeren Einfluss auf Bruchdehnung und Umformverhalten als auf die Zugfestigkeit haben. Bis 0,4mm Durchmesser haben Poren einen geringeren Einfluss auf die Zugfestigkeit. Lahnsteiner R. [Baumgartner S. 2005, S.33] behauptet, dass sogar bis zu 15% Porenfläche keinen Einfluss auf dynamische und statische Festigkeit hat. Ashton R.F. et al. [Baumgartner S. 2005, S.33] haben in ihren Versuchen jedoch festgestellt, dass die Festigkeit schon ab nur 1% deutlich sinkt, gleichermaßen fällt auch die Bruchdehnung rapide ab. Bis zu 4% Porenfläche konnte nur eine geringfügige Änderung der Streckgrenze verzeichnet werden. Ashton R.F. et al. behaupten außerdem, dass

kleine (zerstörungsfrei nicht nachweisbare) Poren zum Abfall von Festigkeit und Zähigkeit führen. Goecke S.F., welcher in seiner Dissertation [Goecke S.F. 2004, S.12] diesbezüglich auf auch auf Ashton R.F. et al verweist, fügt zusätzlich an, dass aus dynamischer Sicht nur Oberflächenporen relevant sind. Poren haben im Vergleich zur Nahtüberhöhung einen geringeren Einfluss auf die Dauerfestigkeit [Goecke S.F. 2004, S.12], [Hufnagel W. 1977, S.620] Laut den Untersuchungen von Kosteas D. [Kosteas D. 1978, S97f] an MIG Stumpfnähten (aus AlZnMg1 mit SZ AlMg5 verschweißt; vgl. dazu Abbildung 3.6) stehen Porenfläche und Bruchfestigkeit der Schweißhaut in linearem Zusammenhang. Dabei führen 10% Porenfläche zu einer Festigkeitsabnahme von 18%. Die Lage der Poren nahe der Oberfläche oder in tieferen Lagen spielt für die statische Festigkeit keine Rolle. Der geringe Einfluss von Poren wird durch die generell hohe Duktilität von Aluminiumwerkstoffen begründet. Bei dynamischer Belastung hat die Lage der Poren mehr Einfluss und kann bei einem Anteil von 10% die dynamische Festigkeit um 90% reduzieren. Laut seinen Aussagen überschattet aber der weitaus schwerwiegendere Einfluss der Nahtüberhöhung den Einfluss der Porosität [Kosteas D. 1978, S97f], [Klock H. et al. 1977, S.114], [Cáceres C.H. 1995, S.1851ff], [Baumgartner S. 2005, S.33], [Kammer C. 2003, Kap.3], [Hufnagel W. 1977, S.620], [Goecke S.F. 2004, S.12].

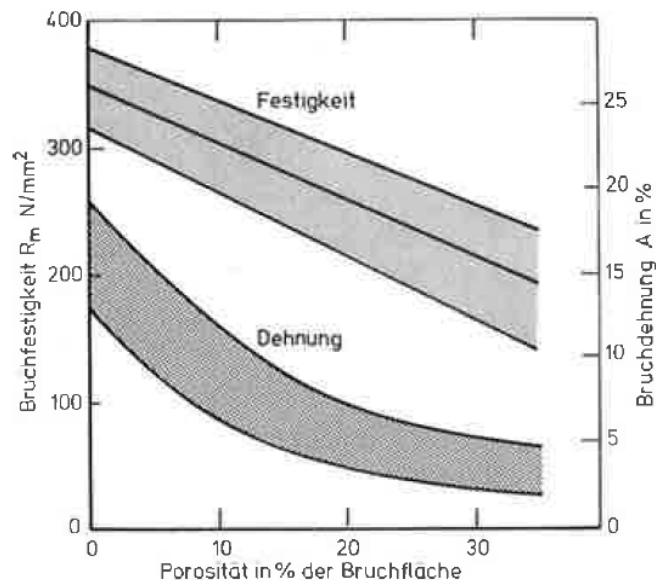


Abbildung 3.6 Abhängigkeit der Bruchfestigkeit und Dehnung von der Porosität in der Bruchfläche von AlZnMg1 mit SZ AlMg5 [Kosteas D. 1978, S.97]

3.1.1.3. Entfestigung der Schweißverbindung

Durch den Schweißvorgang ist bei stärker verfestigten Aluminiumlegierungen mit einer Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften zu rechnen (Tabelle 3.3). Bei nichtaushärtbaren Legierungen im weichen Zustand entstehen keine Änderungen von Gefüge und Festigkeit (Abbildung 3.7), hingegen ist bei harten und dreiviertelharten Aluminiumgüten ein starker Festigkeitsabfall zu verzeichnen. Infolge der eingebrachten Wärme wird die Versetzungsverfestigung aufgehoben (Kristallerholung bzw. Rekristallisation). Zusätzlich entsteht in der WEZ eine Kornvergrößerung (Abbildung 3.8 a), was zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führt. Dies hat zur Folge, dass Streckgrenze und Zugfestigkeit stark absinken. Die Höhe des Festigkeitsverlustes ist von Schweißverfahren, Streckenenergie, Lagenanzahl und Lichtbogenlänge, sowie von der Wärmeleitfähigkeit der Legierung abhängig. Die Festigkeit im Schweißgut kann bei den naturharten Legierungen durch den Schweißzusatz bestimmt werden, der Festigkeitsverlust in

der WEZ ist jedoch irreversibel [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.206], [Dilthey U. 2005, S.230f], [Brückner C. 2009, S.12].

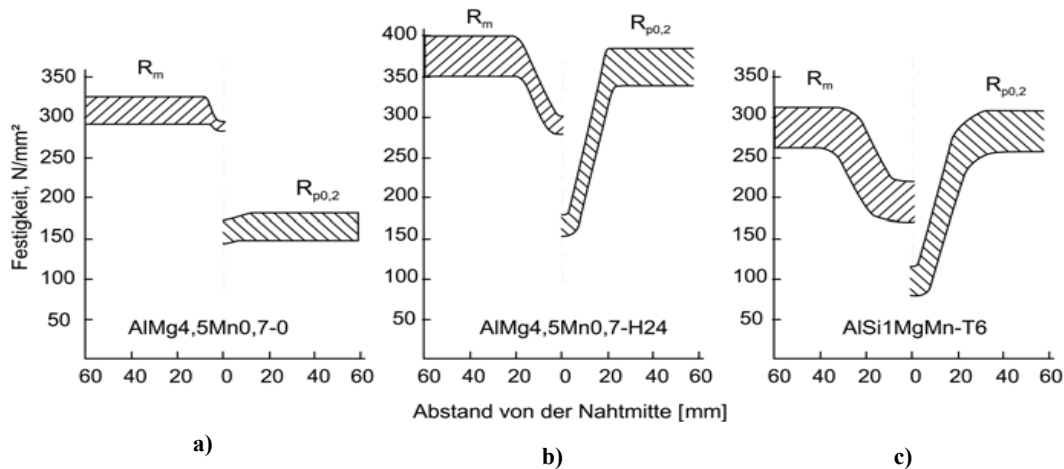


Abbildung 3.7 Festigkeitsverläufe quer zur Schweißnaht von MIG Aluminiumschweißverbindungen a) AW-5083-O, b) AW-5083-H24, c) 6082-T6 [Ostermann F. 2007, S.602]

Schweißgeeignete aushärtbare Legierungen (Tabelle 3.3) zeigen unterschiedliches Verhalten. Eine Erwärmung der Legierung vom Typ AlMgSi1 führt in der Regel durch die Bildung grober Ausscheidungen (Abbildung 3.8 b) aus dem übersättigten Mischkristall und durch ein Wachsen von inkohärenten Ausscheidungen zu einer bleibenden Entfestigung (Tabelle 3.3). Der alte Zustand kann durch erneutes Aushärten wiederhergestellt werden. Die Legierung AlZn4.5Mg1 zeichnet sich durch einen großen Temperaturbereich für das Lösungsglühen und lange Auslagerungszeiten bei Raumtemperatur aus. Die Schweißwärme führt zu einer Mischkristallbildung wie beim Lösungsglühen. Nach Abkühlung kommt es bei Raumtemperatur wieder zu selbständiger Aushärtung in der WEZ [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.206].

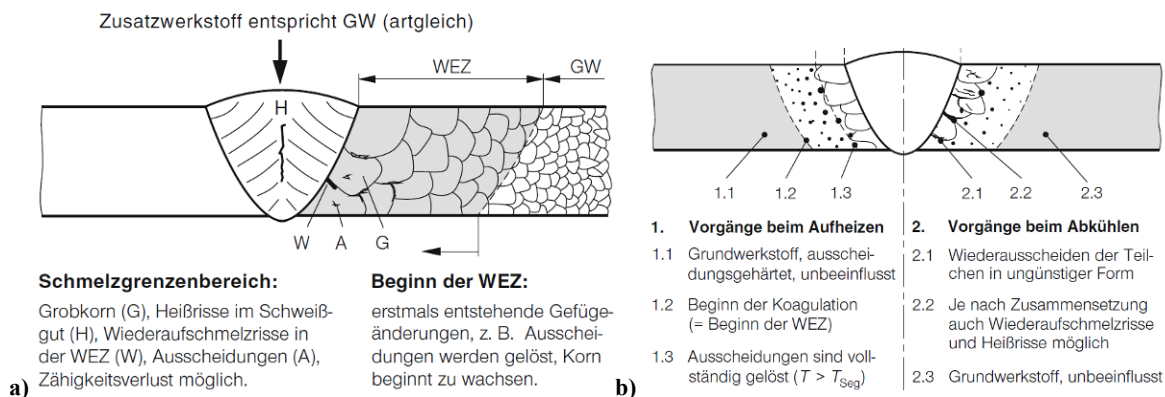


Abbildung 3.8 Charakteristische Vorgänge in der WEZ von Aluminiumschweißverbindungen. a) Grobkornbildung, b) Ausscheidungsvorgänge bei aushärtbaren Legierungen [Schulze G. 2010, S.504f]

Tabelle 3.3 fasst die oben genannten Veränderungen in der WEZ zusammen.

Werkstoff		Eigenschaften in der Wärmeeinflusszone		
Legierung	Ausgangszustand	Veränderungen		nachträgliche Festigkeitssteigerung
		des Zustands	der Festigkeit	
Al99,5 AlMn AlMg3	Weich, Rekristallisationsgefüge	keine	keine	nicht möglich
AlMgMn AlMg4,5Mn	halbhart, hart, kaltverfestigt: vom Verformungsgrad abhängiges Gefüge	Erholung, ggf. Rekristallisation	Entfestigung ggf. bis Zustand weich	
AlMgSi1	kaltausgehärtet, warmausgehärtet: ausgehärtetes Rekristallisationsgefüge	Veränderung des Mischkristalls durch Ausscheidungen	Entfestigung	mittels erneuter Wärmebehandlung der Bauteile durch Lösungsglühen, Abschrecken, Warmauslagern. Zu beachten: Verzug und Eigenspannungen
AlZnMg1	kaltausgehärtet, warmausgehärtet: ausgehärtetes, rekristallisiertes oder nicht rekristallisiertes Gefüge	Lösungsglüh- und Abschreckeffekt, Mischkristallbildung	nur kurzfristige Entfestigung	a) durch selbsttätiges Wiederaushärten bei Raumtemp.; Endzustand kalt ausgehärtet b) durch Warmauslagern a) und b): Kein Verzug a) ggf. Abbau von Eigenspannungen

Tabelle 3.3 Eigenschaften der Wärmeeinflusszonen von Aluminiumschweißnähten [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.207]

3.1.1.4. Heißrissempfindlichkeit

Heißrisse sind interkristallin oder interdendritisch verlaufende Werkstofftrennungen, die im Erstarrungsintervall zwischen Solidus- und Liquidustemperatur entstehen. Aufgrund der Entstehungsursache wird zwischen Erstarrungs- und Wiederaufschmelzungsrissen unterschieden. Erstarrungsrisse kommen im Nahtbereich, Aufschmelzrisse in der WEZ oder in überschweißten Nahtlagen vor. Beide Rissarten weisen ein charakteristisches Bruchbild auf (Abbildung 3.9, Abbildung 3.10). Auch der Ductility Dip Crack (DDC, Abbildung 3.11) wird als Heißriss definiert, wenn auch nur als eine Sonderform. Der Grund hierfür ist, dass noch nicht nachgewiesen werden konnte, ob schmelzflüssige Phasen an seiner Entstehung beteiligt ist. Als Ursache für die Entstehung von DDC gelten feste, versprödende Ausscheidungen an den Korngrenzen. Gemäß Literatur, kann diese Rissart auch bei Al-MgSi Legierungen vorkommen [Hilbinger R.M. 2001S.9], [Dilthey U. 2005, S.266f], [Wolf M. 2006, S.3].

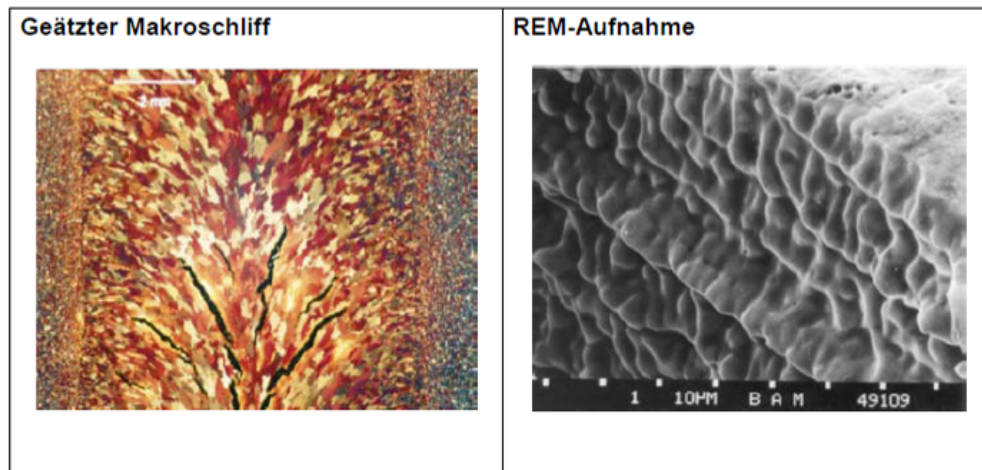


Abbildung 3.9 Erstarrungsrisse beim Werkstoff NiCr28FeSiCe (Werkstoff Nr.: 2.4889) [Wolf M. 2006, S.3]

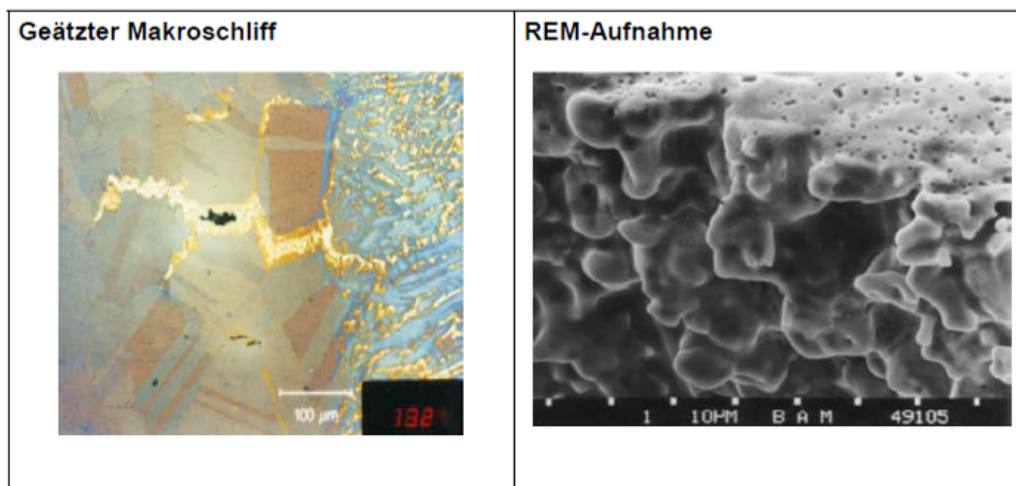


Abbildung 3.10 Wiederaufschmelzrisse beim Werkstoff NiMo16Cr15 W (Werkstoff Nr.: 2.4819) [Wolf M. 2006, S.3]

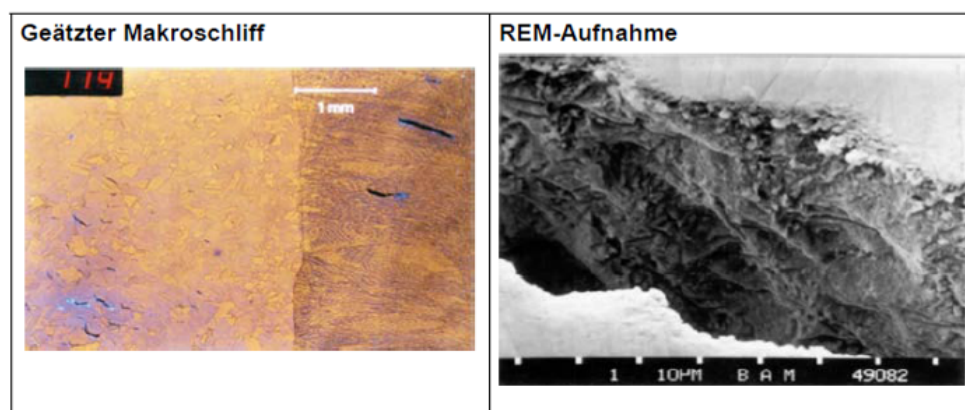


Abbildung 3.11 Ductility Dip Cracks beim Werkstoff NiMo27 (Werkstoff Nr.: 2.4615) [Wolf M. 2006, S.6]

Abbildung 3.12 fasst das Thema Heißrisse zusammen und zeigt die Stellen im Nahtbereich, an denen sie vorkommen.

Eine Art der Erstarrungsrisse ist der nicht vollständig vermeidbare Endkraterriss. Dieser entsteht durch eine abrupte Abkühlung bei starker Schrumpfung und unter verhältnismäßig starrer Einspannung am Ende der Schweißnaht. Der Endkraterriss wird durch Auslaufbleche, Absenken der Lichtbogenenergie oder durch Überschweißen minimiert. Vor

dem Überschweißen von Endkratern sollten alle dort befindlichen Risse ausgeschliffen werden, um eine Rissfortpflanzung innerhalb der Schweißnaht zu vermeiden [Dilthey U. 2005, S.235], [Klock H. et al. 1975, S.111ff], [Wolf M. 2006, S.4].

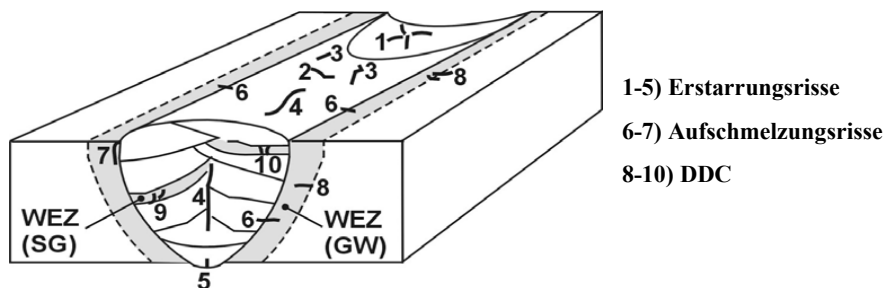


Abbildung 3.12 Lage von Heißbrissen eingeteilt nach ihrer Entstehungsart [Wolf M. 2006, S.4].

Die Heißbrissanfälligkeit wird im Allgemeinen durch folgende Faktoren bestimmt:

- Grundwerkstoff
- Schweißzusatz
- Erstarrungsintervall
- Legierungsbedingtem Anteil an Restschmelze
- Schrumpfbehinderung
- Erstarrungsbedingung des Schweißbades.

Die Korngröße und der Wasserstoffgehalt spielen bei der Heißbrissanfälligkeit meist nur eine geringe Rolle. Die Aufmischung aus Grundwerkstoff und Schweißzusatz ergibt jene Legierungskonzentration, welche die Heißrissigkeit bestimmt. Abbildung 3.13 zeigt den Einfluss der Legierungselemente von binären Al-Li, Al-Si, Al-Cu, Al-Mg und von quasi binären Legierungssystemen Al-Mg₂Si. Die Zugabe von Chrom und Mangan steigert bei AlMg Legierungen die Rissicherheit. Auch die kornverfeinernde Wirkung von Zirkonium kann die Heißrissigkeit der Schweißverbindung senken [Klock H. et al. 1975, S.24, S.111f], [Davis J.R. et al. 1994 S.380], [Goecke S.F. 2004, S.14].

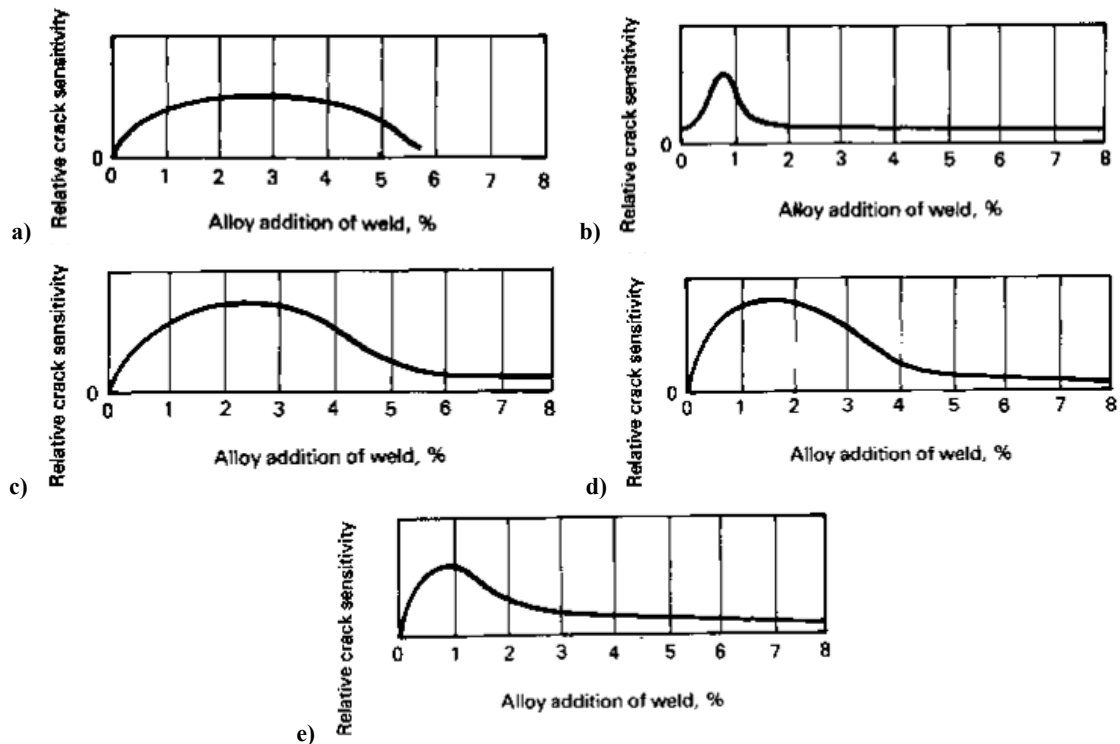


Abbildung 3.13 Einfluss der Legierungsbestandteile auf die Heißrissanfälligkeit von binären und quasibinären Legierungssystemen a) Al-Li, b) Al-Si, c) Al-Cu, d) Al-Mg, e) Al-Mg₂Si [Davis J.R. et al. 1994 S.380]

Aluminiumlegierungen besitzen teilweise ein großes Erstarrungsintervall von bis zu 170°C (Abbildung 3.14) und sind dadurch stärker heißrissgefährdet. Durch die Bildung von niedrigschmelzenden Phasen sind aushärtbare Aluminiumlegierungen vermehrt heißrissgefährdet [Dilthey U. 2005, S.233].

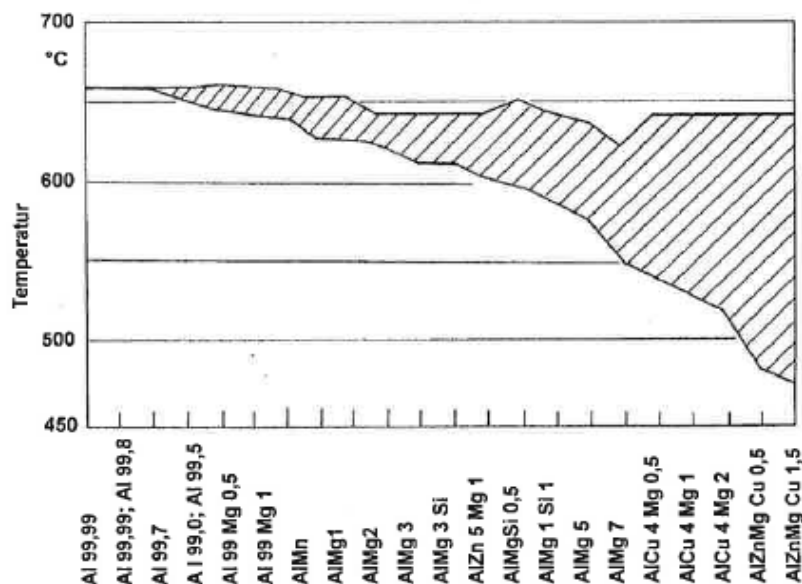


Abbildung 3.14 Erstarrungsintervalle üblicher Aluminiumlegierungen [Goecke S.F. 2004, S.14]

Heißrisse entstehen am Ende des Erstarrungsprozesses, wenn nur noch ein geringer Anteil an Restschmelze zwischen den erstarrten Gusskörnern vorhanden ist und gleichzeitig Dehnung auf diese Zonen wirkt. Eine Modellvorstellung über den Heißrissprozess ist in Abbildung 3.15 dargestellt und zeigt die Bedeutung von Menge und Fließvermögen der Restschmelze für die

Entstehung bzw. Vermeidung von Heißrissen. Gut heißrissbeständig sind daher Legierungen mit geringem Erstarrungsintervall und großen Mengen an Resteutektika, welche Anrisse im Gefüge füllen können („Ausheilen von Warmrissen“) [Ostermann F. 2007, S.199], [Klock H. et al. 1975, S.111ff].

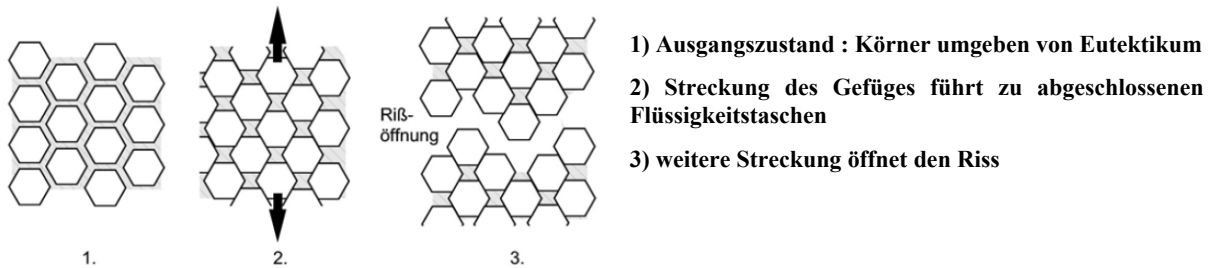


Abbildung 3.15 Modellvorstellung über die Entstehung von Warmrissen [Ostermann F. 2007, S.200]

Vujic S. [Vujic S. 2011 28f], Goecke S.F. [Goecke S.F. 2004, S.14] und Dilthey U. [Dilthey U. 2005, S.235] fassen in ihren Recherchen zusammen, dass Heißrissgefährdung durch folgende Punkte reduziert werden kann:

- Richtige Wahl des Schweißzusatzwerkstoffes
- Magnetische Lichtbogenoszillation
- Reduktion der Wärmeeinbringung
- Verwendung von Schweißquellen mit hoher Wärmedichte
- Optimale geometrische Ausbildung der Naht (leicht konvex mit $b/t > 1$)
- Verwendung von hohen Schweißgeschwindigkeiten
- Reduktion von Schweißspannungen.
- Vorwärmung (Abbildung 3.17)

Auch Gruss H. hat in seiner Dissertation [Gruss H. 2008, S.26ff] eine ausführliche Recherche zur Vermeidung von Heißrissen erstellt.

Während Erstarrungsrisse oft in der Nahtmitte oder zwischen Dendriten liegen und meist bis zur Nahtoberfläche reichen (Abbildung 3.16 a), können Aufschmelzungsrisse sowohl im Grundwerkstoff als auch in den unteren Lagen von mehrlagig geschweißten Verbindungen im Bereich der Schmelzlinie auftreten (Abbildung 3.16 c). Dabei wird beim Überschweißen der zweiten Lage die Seigerungszone der ersten Lagen aufgeschmolzen und ein bereits bestehender Riss kann sich in die obere Lage fortsetzen. Die günstigste Raupenform besitzt ein Breiten- zu Tiefenverhältnis von größer eins [Dilthey U. 2005, S.272].

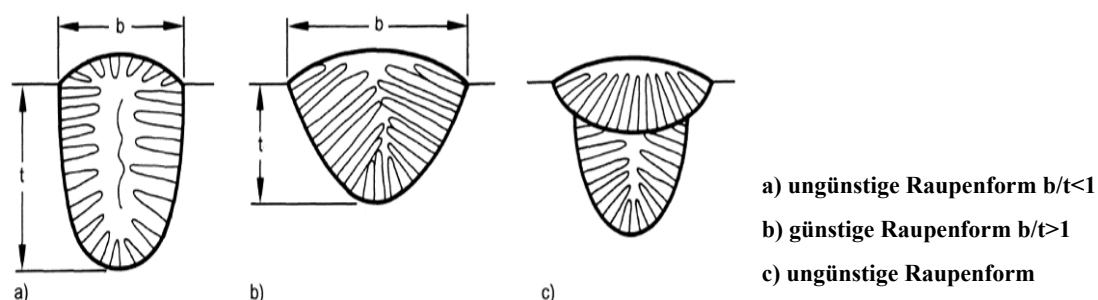


Abbildung 3.16 Kristallisation des Schweißgutes bei verschiedenen Raupenformen und hieraus resultierenden Gefahren für die Heißrissbildung [Dilthey U. 2005, S.272].

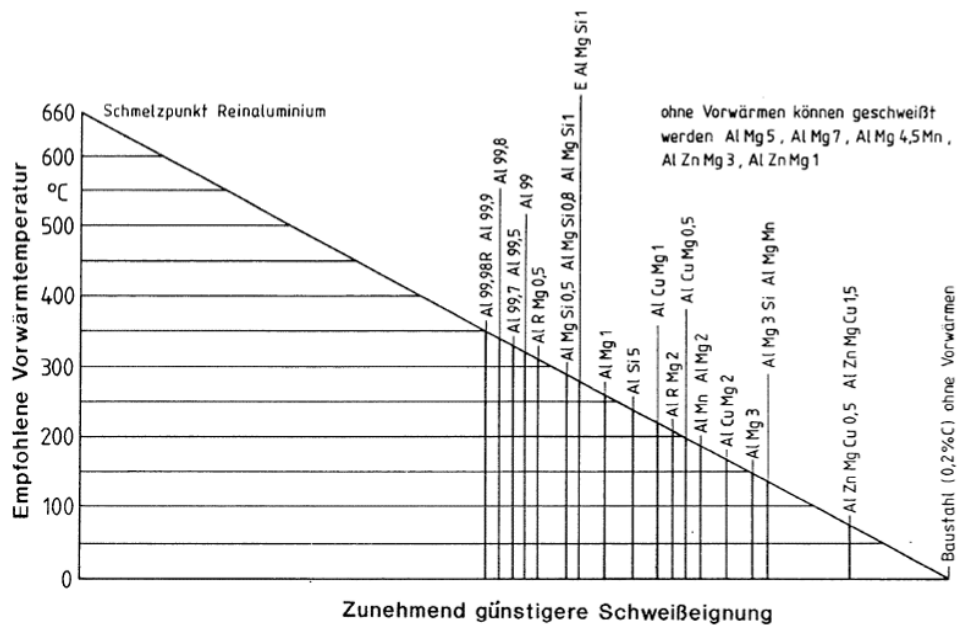


Abbildung 3.17 Richtwerte für das Vorwärmen von Aluminiumlegierungen bezogen auf ohne Vorwärmung geschweißten Baustahl [Dilthey U. 2005, S.235].

3.1.1.5. Magnesiumabbrand

Goecke S.F. führte in seiner Dissertation [Goecke S.F. 2004 S.15,35,75ff] auch Untersuchungen und Recherchen zum Magnesiumabbrand durch. Er untersuchte einen Niederschlag auf einem benachbarten Schweißspritzer mittels röntgendispersiver EDX-Analyse (Abbildung 3.18). Da dort die Schichtdicke der Ablagerungen größer als auf der Schweißnaht selbst war. Das Ergebnis war, dass diese Ablagerung aus etwa 50-60% Sauerstoff, 40-30% Magnesium und nur im geringsten Maße aus Aluminium bestand. Daher konnte man davon ausgehen, dass es sich dabei vorrangig um Ablagerungen aus Magnesiumoxiden (z.B. MgO) handelte.

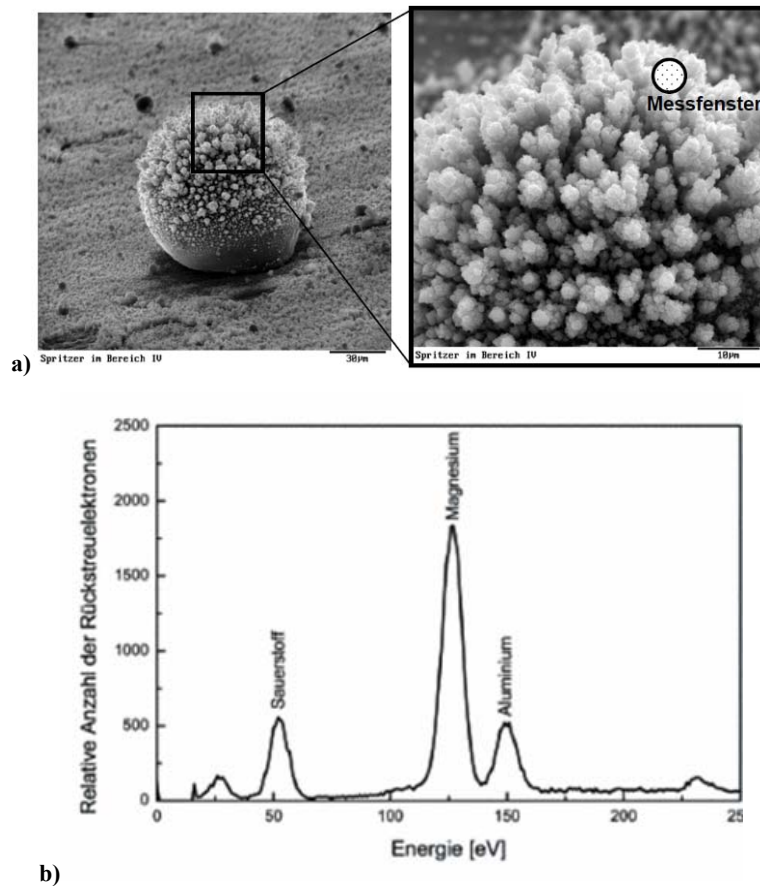


Abbildung 3.18 Metalloxidniederschlag auf einem Schweißspritzers von 5182 mit AlMg5 verschweißt a) REM Aufnahme, b) EDX Analyse [Goecke S.F. 2004 S. 78f]

Die Recherchen von Goecke S.F. lassen sich wie folgt zusammenfassen. Magnesium hat einen niedrigeren Siedepunkt (1097°C) als Aluminium (2270°C), wodurch es im übergelassenen überhitzten Tropfen zum plötzlichen Verdampfen des Magnesiumanteiles kommt. Durch die schlagartige Volumenzunahme bei der Metaldampfbildung platzt der Tropfen. Dies führt zu vermehrter Bildung von Spritzern und Entweichen des Metaldampfes. Der Metaldampf kondensiert anschließend auf der Metalloberfläche. Zink und Lithium sind Legierungselemente mit ähnlich hohem Dampfdruck. Neben der Spritzerbildung führt der Verdampfungsverlust (Abbildung 3.19 b) auch zu einem Festigkeitsabfall der Schweißverbindung. Der Abbrand an Mg kann dabei mehr als 5% betragen. Die Schichtfarbe muss mitunter nicht immer eine dunkelbraune bis schwarze Farbe besitzen. Sie kann auch weiß, grau oder gelb sein und besteht speziell bei AlMg Legierungen aus MgO , Al_2O_3 und Al-Dampf. Beim Schweißzusatz 5356 (AlMg5) kommt es durch seinen hohen Mg Anteil vermehrt zur Rauchbildung. Unter anderem führt der Mg-Abbrand auch zur gesundheitlichen Belastung des Schweißers, wenn nicht sachgemäße Schutzeinrichtungen verwendet werden [Goecke S.F. 2004 S.15,35,75ff], [Klock H. et al. 1977, S.57], [Beck A. 2001, S.117], [Rauh G. et al. 2004, S.77].

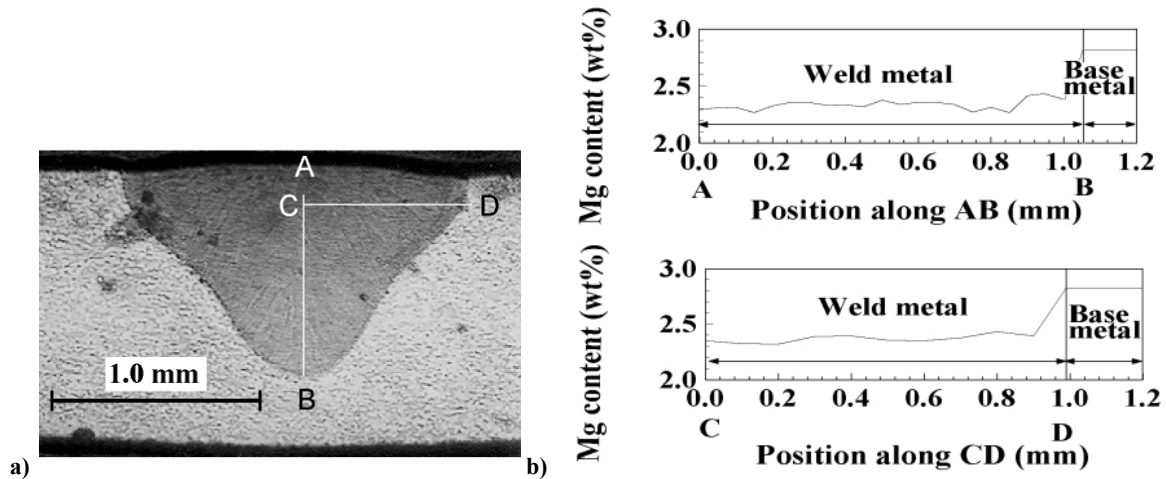


Abbildung 3.19 Verlauf der Magnesiumkonzentration in einer Laserverschweißten 5754 Al-Legierung a) Markierung des Linescan in Querschliff, b) Massenprozent von Mg [Pastor M. et al. 1999, S.214]

3.1.2. MIG Schweißen

Das Metall- Inertgas Schweißen (MIG) (Abbildung 3.20) gehört zur Gruppe der Schutzgasschweißverfahren mit abschmelzender Elektrode, wobei der Lichtbogen zwischen Elektrode und dem Werkstück brennt. Die Elektrode dient gleichzeitig als Schweißzusatz. Das MIG Verfahren arbeitet mit Gleichstrom, wobei sich die positive Polung an der Elektrode befindet. Die Pluspolung erzeugt eine reinigende Wirkung, wodurch das Aluminiumoxid an der Materialoberfläche während des Schweißvorganges zerstört wird. Dieser Effekt wird als kathodischer Reinigungseffekt bezeichnet. Neben Gleichstrom wird dünnes Aluminiumblech, aufgrund der besseren Spaltüberbrückbarkeit, auch mit Wechselstrom geschweißt (Abbildung 3.21). Hohe Schweißgeschwindigkeiten und eine hohe Wärmekonzentration sind die Vorteile die den Einsatz des MIG Verfahrens zum Schweißen von Aluminium begünstigen [Goecke S.F. 2004, S.17f], [Kammer C. 2003, S.135f], [Ostermann F. 2007, S.610], [Dilthey U. 2005, S.232f], [Dilthey U. 2006, S.79], [Brückner C. 2009, S.28].

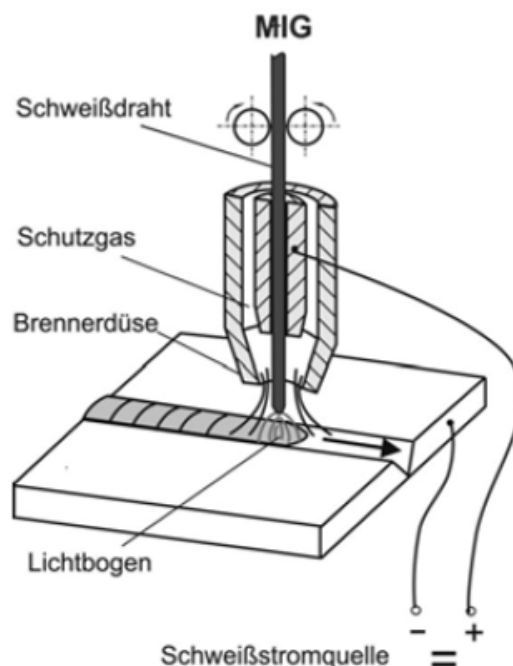


Abbildung 3.20 Verfahrensprinzip des MIG Schweißprozesses [Ostermann F. 2007, S.610]

Draht: A5356 (AlMg5), 1.2 mm, Grundmaterial A5052 (AlMg2,5), 1.5 mm + 1.0 mm, 60 A, 90 cm/min			
Spalt	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm
DC Puls			Unmöglich
AC Puls (EN:20%)			

Abbildung 3.21 Verbesserung der Spaltüberbrückbarkeit durch AC Puls MIG Schweißen [Dilthey U. 2006, S.79]

3.1.2.1. Lichtbogenarten

Je nach Schutzgas und gewählter Schweißparameterauswahl können beim MIG Schweißen verschiedene Lichtbogenarten (Abbildung 3.22) zum Einsatz kommen [Dilthey U. 2006 S.68f], [Spur G. 1986, S.271], [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.56], [Witt G. 2006 S.187]. Es sind dies:

- Kurzlichtbogen
- Übergangslichtbogen
- Sprühlichtbogen
- Impulslichtbogen
- CMT Prozess (Cold Metall Transfer-Prozess)

Der Langlichtbogen wird an dieser Stelle nicht näher erläutert, da sich dieser nur bei MAG schweißen mit CO₂ einstellt. Schweißverfahren ab 15m/min Drahtvorschub gelten als Hochleistungsverfahren (HL) (Abbildung 3.22). Zu diesen Verfahren gehören der HL-Kurz- u. HL-Sprühlichtbogen, sowie der rotierende Lichtbogen. Die HL-Verfahren nutzen die Widerstandserwärmung der freien Elektrodenlänge ($l_e < 25\text{mm}$) zur Steigerung der Abschmelzleistung. All diese Lichtbögen kommen beim MAG Schweißen zur Anwendung [Spur G. 1986, S.271], [Dzelmitzki D. 2000, S1ff], [Dilthey U. 2006, S.74].

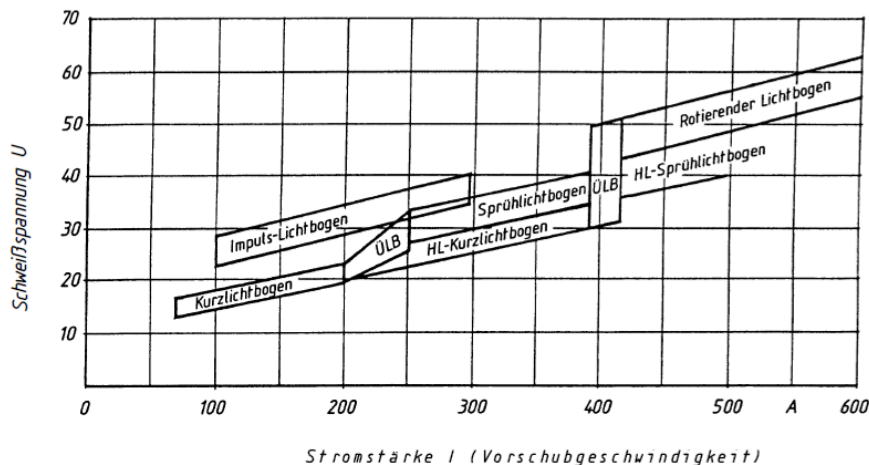


Abbildung 3.22 Lichtbogenarten beim MSG Schweißen [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.56]

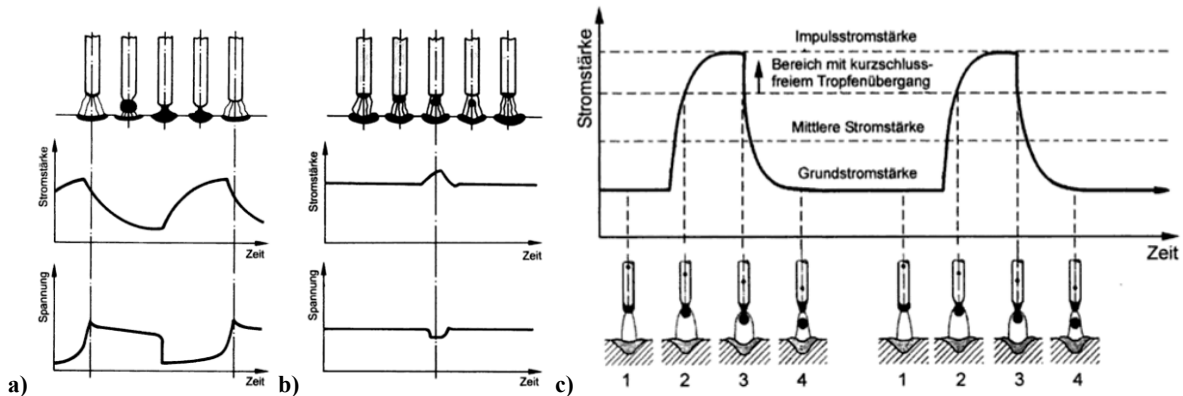


Abbildung 3.23 Werkstoffübergang beim a) Kurzlichtbogen b) Sprühlichtbogen c) Impulslichtbogen [Dilthey U. 2006 S.70ff]

a) Kurzlichtbogen (Abbildung 3.23 a)

Beim Kurzlichtbogen wird während der Lichtbogen brennt die Elektrodenspitze nicht abgeschmolzen. Durch den Drahtvorschub kommt es zum Kurzschlusskontakt zwischen Elektrode und Grundmaterial, und die dabei entstehende hohe Kurzschlussstromstärke führt zum Ablösen eines Tropfens. Der dadurch gebildete Spalt wird wieder durch einen aus ionisierten Metalldämpfen neu gebildeten Lichtbogen überbrückt, und der Vorgang beginnt erneut. Der Vorteil vom Kurzlichtbogen liegt in der geringen Wärmeeinbringung. Nachteilig sind die vermehrte Porenbildung und die unvermeidbare Spritzerbildung beim Kurzlichtbogen. Anwendungsbereiche sind Dünobleche bis 2mm und Wurzelschweißungen [Dilthey U. 2006 S.68f], [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.56], [Witt G. 2006 S.187], [Brückner C. 2009, S.26].

b) Übergangslichtbogen

Bei mittleren Blechdicken bis 4mm wird der Übergangs- od. Mischlichtbogen angewendet. Der Werkstoffübergang erfolgt nur teilweise im Kurzschluss. Nachteilig sind die grobtropfigen Spritzer die beim Übergangslichtbogen entstehen [Brückner C. 2009, S.26], [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.56].

c) Sprühlichtbogen (Abbildung 3.23 b)

Übersteigt der Schweißstrom eine gewisse kritische Stromstärke, welche von Elektrodendurchmesser und –werkstoff abhängt, so stellt sich eine konstante Lichtbogenlänge mit feintropfigem Werkstoffübergang ein. Die Schweißspannung und der Schweißstrom bleiben dabei nahezu konstant. Der entstehende Sprühlichtbogen führt zu einem stabilen und spritzerarmen Schweißprozess. Anwendung findet der Sprühlichtbogen bei Blechstärken bis 6 mm [Dilthey U. 2006 S.68f], [Witt G. 2006 S.187], [Brückner C. 2009, S.26].

d) Impulslichtbogen (Abbildung 3.23 c)

Beim Impulslichtbogen werden die Vorteile von Kurz- und Sprühlichtbogen genutzt. Der Grundstrom dient lediglich der Aufrechterhaltung des Lichtbogens, beim Wechsel auf den Impulsstrom wird die kritische Stromstärke überschritten und es kommt zur kurzschlussfreien Tropfenablösung. Wie viele Tropfen bis zum erneuten Absenken der Stromstärke abgelöst werden und deren Größe ist durch die Parameter des Stromimpulses einstellbar. Es soll ein Tropfen pro Impuls abgelöst werden, um einen spritzerarmen und stabilen Prozess zu erreichen [Dilthey U. 2006 S.68f], [Brückner C. 2009, S.26], [Spur G. 1986, S.271].

Der Impulslichtbogen bietet folgende Vorteile [Kammer C. 2003, S.145], [Kosteas D. 1978, S.62], [Brückner C. 2009, S.26]:

- durch gute Steuerung der Wärmeeinbringung (Impulsstrom und –zeit, Grundstrom und -zeit) vielseitig einsetzbar (1-6mm Blechstärke)
- Zwangspositionen möglich
- Verschweißen von dicken Elektroden
- Geringere Störanfälligkeit durch dickere Elektrode
- Durch das günstigere Oberflächen- zu Volumenverhältnis werden durch dickere Elektroden weniger Verunreinigungen bzw. Feuchtigkeit in das Schweißbad gebracht
- Spezielle Pulsstromquelle nötig

e) Spezialfall: CMT Prozess

Der Cold Metal Transfer (CMT) –Prozess (Abbildung 3.24) bedient sich des Kurzlichtbogens, jedoch kann hier die Wärmeeinbringung nochmals verringert werden. Das wird dadurch erreicht, dass die Elektrode genau in der Kurzschlussphase wieder zurückgezogen wird. Durch dieses Rückziehen wird ein kontrolliertes, nahezu stromloses Ablösen des Tropfens erzeugt. Der CMT Prozess findet z.B. Anwendung bei Dünnblechschweißungen von Aluminium [Fronius 2011c], [Dilthey U. 2006 S.68f].

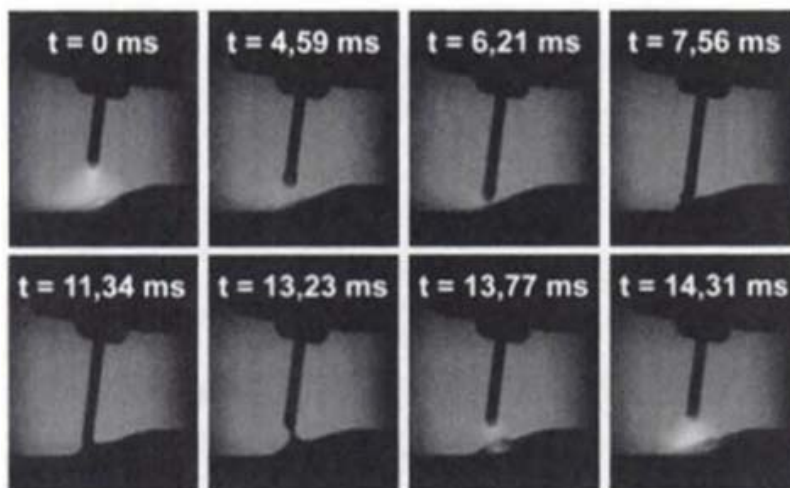


Abbildung 3.24 CMT Prozess mit oszillierender Drahtvorschubbewegung [Dilthey U. 2006 S.68f]

3.1.2.2. Schweißparameter und ihr Einflüsse

Um qualitative Schweißnähte mit möglichst geringem Fehleranteil erzeugen zu können, muss man die Auswirkungen der Schweißparameter verstehen. Nahtqualität und metallurgische Ausprägung werden durch viele Parameter beeinflusst, welche für jede Anwendung spezifisch abgestimmt werden müssen. Die Parameter für den MIG Prozess sind [Mandal N. 2005, S.32ff]:

- Stromstärke I [A]
- Schweißspannung U [V]
- Drahtvorschub f [m/min]
- Elektrodenlänge l_e [mm]
- Schweißgeschwindigkeit v [mm/s]
- Brennerposition



- Drahtdurchmesser d [mm]
- Nahtgeometrie
- Schutzgas

All diese Parameter haben unterschiedlichen Einfluss auf das Schweißergebnis, wie z.B. auf Badform, Abkühlrate, Verzug und Ausscheidungen [Mandal N. 2005, S.32ff]. Nachfolgend wird auf diese Parameter genauer eingegangen.

a) Stromstärke I [A] (Drahtvorschub f [m/min])

Für jede Elektrode ist die Abschmelzleistung direkt mit der elektrischen Leistung Q (Formel (20)) des Lichtbogens und der Polarität verbunden. Die Leistung P des Lichtbogens ist direkt proportional zur Stromstärke I und wird zum Schmelzen von Grund und Zusatzwerkstoff benötigt [Mandal N. 2005, S.32f].

$$Q = U \cdot I = I^2 \cdot R \quad (20)$$

Q ... elektrische Leistung [W], I ... Stromstärke [A], U ... Spannung [V], R ... Lichtbogenwiderstand [Ω]

Die Schweißstromstärke ist jener Parameter mit der größten Auswirkung auf den Schweißprozess. Karadeniz E. hat in seinen Untersuchungen [Karadeniz E. 2007, S.651ff] herausgefunden, dass die Stromstärke den stärksten Einfluss auf die Einbrandtiefe hat. Dieser ist im Vergleich zur Spannung und Schweißgeschwindigkeit ca. 2,5mal so hoch. Wenn bei gegebener Schweißgeschwindigkeit die Stromstärke zu hoch ist, dann besteht die Gefahr von Schweißnahtdurchbruch und zu hoher Schweißzusatzabschmelzung. Andererseits führt eine zu geringe Stromstärke zu unzureichendem Aufschmelzen des Grundwerkstoffes [Mandal N. 2005, S.32f], [Karadeniz E. 2007, S.651ff].

Die Stromstärke beim MIG Schweißen wird über den Drahtvorschub f eingestellt und führt bei Erhöhung zu:

- einer tieferen, breiteren und höheren Naht,
- vermehrtem Zuführen von Zusatzwerkstoff und
- einer Vergrößerung des Schweißbades

Die Stromstärke kann nur in einem gewissen Bereich (Abbildung 3.25) verändert werden, da ein Zusammenhang zwischen Stromstärke, Spannung, Drahtvorschub, Lichtbogenlänge und freier Elektrodenlänge besteht. Geregelt wird dieser Zusammenhang durch die Schweißstromquelle. Bei WIG und Elektrodenhandschweißgeräten kommt die ΔU -Regelung mit konstanter Abschmelzleistung und angepasster Lichtbogenlänge zum Einsatz. Bei MIG/MAG Schweißungen wird die ΔI -Regelung mit konstanter Lichtbogenlänge und angepasster Stromstärke verwendet. Die Grenzen der Einstellmöglichkeit sind Rückbrenn- und Kurzschlussgrenze. Aus diesem Grund existieren nur bestimmte Arbeitspunkte, an denen ein stabiler Schweißprozess möglich ist [Ruge J. 1980, S.49ff], [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.23f], [Hochreiter G. 1995 S.75].

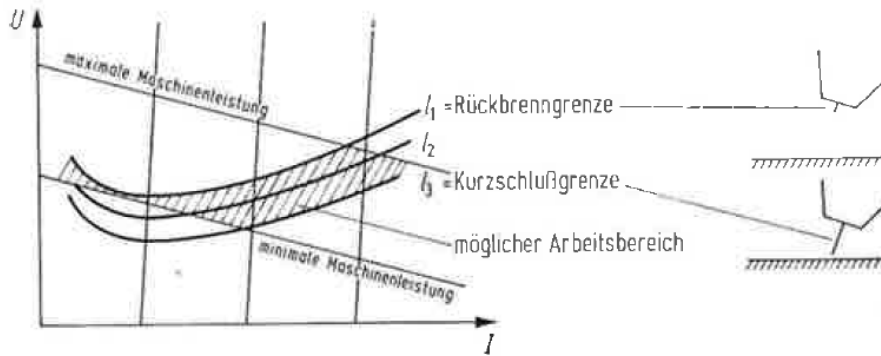


Abbildung 3.25 Möglicher Arbeitsbereich beim Metall Schutzgasschweißen [Ruge J. 1980, S.61]

Die aktuelle Anlage (von Fronius) am Institut für Werkstoffkunde (IWS) arbeitet mit dafür vordefinierten Kennlinien, eingestellt wird nur der Drahtvorschub. Damit werden Stromstärke und Spannung automatisch verändert. Bei älteren Maschinen muss der Drahtvorschub und die dazu passenden Spannung aufeinander abgestimmt werden. Durch die gespeicherten Kennlinien besteht dieses Problem nicht mehr. Für die Kennlinien werden vom Hersteller [Fronius 2011] bestimmte Kontaktrohrabstände empfohlen (Tabelle 3.4). Dabei wird nach Lichtbogenart und Stromstärke unterschieden. Beim CMT Prozess werden für alle Stromstärken 13mm empfohlen. Die Abstände für das Impulsschweißen sind in nachstehender Tabelle angeführt [Fronius 2011], [Lorren H. et al. 2002, S.1].

Stromstärke [A]	Kontaktrohrabstand [mm]
<200	15
200-250	18
>250	20

Tabelle 3.4 Kontaktrohrabstand als Funktion der Stromstärke beim Impulslichtbogenschweißen [Fronius 2011]

b) Schweißspannung U

Die Schweißspannung bestimmt die Lichtbogenlänge des Schweißprozesses. Ein langer Lichtbogen führt im Vergleich zu einem kurzen zu einer breiteren und flacheren Naht mit geringerer Einbrandtiefe (Tabelle 3.5, Abbildung 3.26). Für Stumpfnähte wird ein kurzer Lichtbogen mit höherer Stromstärke und für Füll- bzw. Decknähte ein langer Lichtbogen mit geringerer Stromstärke empfohlen. [Sauders H.-L. 1989, S.7.18], [Mandal N. 2005, S.33f], [Hochreiter G. 1995 S.75].

Charakteristik	Kurzer Lichtbogen	Langer Lichtbogen
Schweißtiefe	Tief	Gering
Nahtbreite	Eng	Weit
Nahthöhe	Hoch	Flach
Schweißbadoberfläche	Gedrückt	Flach
Schweißspritzer	Mehr	Wenig
Lichtbogengeräusch	Knistern	Summen
Porosität	Mehr	Wenig

Tabelle 3.5 Einflüsse der Lichtbogenlänge auf Aluminiumnähte. [Mandal N. 2005, S.64]

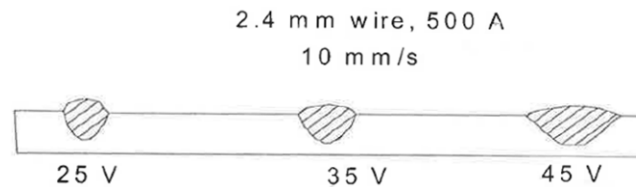


Abbildung 3.26 Einfluss der Schweißspannung auf die Schweißbadform und Einbrandtiefe (Bsp. Stahl) [Mandal N. 2005, S.36]

c) Elektrodenlänge l_e

Als Elektrodenlänge bzw. Stick out wird der stromführende Bereich der Drahtelektrode bezeichnet. Diese ergibt sich aus der Kombination von Schweißspannung, Stromstärke und Kontaktrohrabstand. Das freie Drahtende beeinflusst sowohl die Abschmelzleistung als auch den Einbrand. Je größer die freie Elektrodenlänge ist, umso größer wird die durch den elektrischen Widerstand bewirkte Erwärmung der Elektrode. Dadurch muss der Schweißstrom reduziert werden und der Lichtbogen verliert an Intensität. Deshalb kann ein zu langes freies Drahtende der Grund für Bindefehler sein. Die Elektrodenlänge hat Einfluss auf die Nahtform und die Schweißtiefe (Abbildung 3.27), daher wird für tiefe Schweißnähte eine kürzere und bei Gefahr des Nahtdurchbruches eine größere Länge empfohlen [Mandal N. 2005, S.36ff u. 59ff], [Killing R. 1984, S.173].

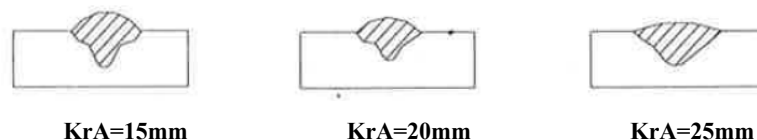


Abbildung 3.27 Auswirkung des Kontaktrohrabstandes (KrA) auf die Nahtgeometrie bei konst. Spannung (Bsp. Stahl) [Mandal N. 2005, S.36ff]

d) Schweißgeschwindigkeit v [mm/s]

Die Schweißgeschwindigkeit hat Einfluss auf die Nahtgeometrie sowie auch auf die Dauer und die Kosten des Schweißvorganges. Steigt die Schweißgeschwindigkeit wenn alle anderen Parameter gleich bleiben, so nehmen Streckenenergie und Nahtbreite ab. Es besteht die Gefahr, dass eine ungünstige Badform oder Porosität entsteht. Wenn die Schweißgeschwindigkeit sinkt, dann nehmen Streckenenergie und Menge an in die Schweißnaht eingebrachtem Zusatzwerkstoff ab. Weiters wird die Einbrandtiefe geringer und das Schweißbad wird weiter und konvexer. Bleiben alle anderen Schweißparameter konstant, so erreicht man im mittleren Schweißgeschwindigkeitbereich die größte Schweißtiefe (Abbildung 3.28). Dies ist darin begründet, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten der Lichtbogen auf dem größeren und schlechter wärmeleitenden Schmelzbad brennt. Bei zu hohen Geschwindigkeiten führen die Abnahme der Streckenergie und der weniger eingebrachte Schweißzusatz zu eingefallenen Nähten. Aus diesem Grund kann die Schweißgeschwindigkeit nur in gewissen Grenzen dazu verwendet werden, die Schweißtiefe zu beeinflussen. Für Aluminium sind hohe Schweißgeschwindigkeiten wünschenswert, da dies zu einer schnelleren Abkühlung führt, und die Bildung von niedrigschmelzenden Phasen an den Korngrenzen verzögert [Mandal N. 2005, S.36ff], [Killing R. 1984, S.172], [Hochreiter G. 1995 S.75], [Kammer C. 203, S.151], [Reuter M. 2001, S.10].

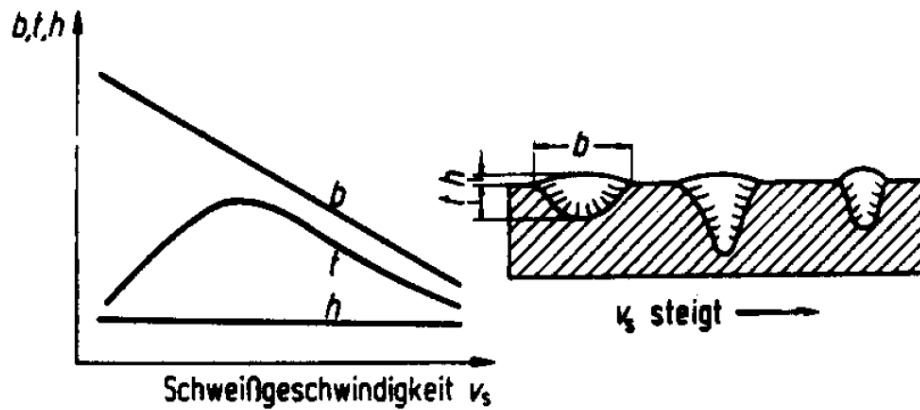


Abbildung 3.28 Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Nahtgeometrie einer UP-Naht [Ruge J. 1980, S.49]

e) Brennerposition

Mit der Brennerposition kann die Schweißbadform und –tiefe beeinflusst werden (Abbildung 3.29). Dieser Einfluss ist größer als jener von Spannung und Schweißgeschwindigkeit. Die Brennerposition lässt sich dabei durch zwei Winkel definieren: dem Anstellwinkel (Abbildung 3.29) und dem Arbeitswinkel (Abbildung 3.30) [Mandal N. 2005, S.62f]. Laut Literatur [Aichele G. et al. 1975, S.86], [Mandal N. 2005, S.62f], [Hochreiter G. 1995 S.101], [Fritz H. et al. 2010 S.180] wird der tiefste Einbrand mit dem schleppenden Verfahren (bei ca. 25°) erreicht. Zudem ist beim schleppenden Winkel die Nahtbreite kleiner und die Nahtüberhöhung größer als beim stechenden Winkel. Killing R. schreibt jedoch, dass der größte Einbrand bei neutraler Anstellung des Brenners erreicht wird [Killing R. 1984, S173]. Bezüglich Nahtbreite und Einbrand besteht lt. Killing R. zwischen stechendem und schleppendem Winkel kein Unterschied [Aichele G. et al. 1975, S.86], [Mandal N. 2005, S.62f], [Killing R. 1984, S173], [Hochreiter G. 1995 S.101], [Fritz H. et al. 2010 S.180].

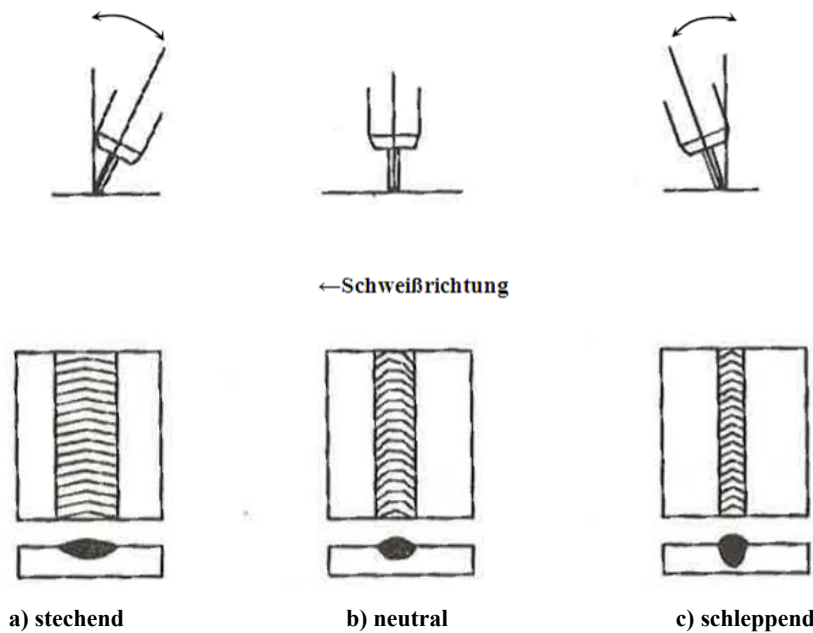


Abbildung 3.29 Einfluss des Anstellwinkels auf die Schweißbadform und Einbrandtiefe. a) stechend b) neutral c) schleppend [Mandal N. 2005, S.62]

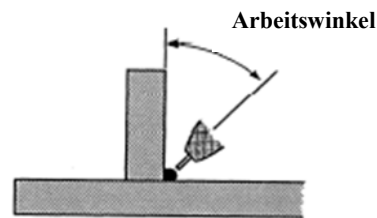


Abbildung 3.30 Arbeitswinkel beim MIG Schweißen [Sweetheaven 2011]

Aus der Literatur lässt sich keine klare Empfehlung zum Anstellwinkel für Aluminium erkennen. Mandal empfiehlt aufgrund des besseren kathodischen Reinigungseffektes den stechenden Winkel [Mandal N. 2005, S.62f]. Klock empfiehlt eine möglichst neutrale Brennerführung [Klock H. et al. 1977, S.56]. Kammer bildet mit der Empfehlung zu einem neutralen bzw. leicht stechend geführten Brenner eine Kombination aus vorherigen Aussagen [Kammer C. 2003, S.151]. Allgemein wird beim MSG Schweißen der stechende Winkel für dünne und schnell zu schweißende Nähte, Wurzelnähte, sowie Kehlnähte mit $a < 4\text{mm}$, empfohlen. Der schleppende Winkel sollte für Füll- und Decknähte sowie für Kehlnähte mit $a > 4\text{mm}$ angewendet werden [Fritz H. et al. 2010 S.180], [Aichele G. et al. 1975, S.86]. Laut Mandal und hat der schleppende Schweißprozess einen stabileren Lichtbogen, einen besseren Gasschutz und weniger Schweißspritzer zur Folge [Mandal N. 2005, S.62f], [Fritz H. et al. 2010 S.180]. Sauders behauptet, dass durch die schleppende Brennerstellung zu Schutzgasturbulenzen kommt und somit die Schutzwirkung verloren geht [Sauders H.-L. 1989, S.7.19]. Kammer C. [Kammer C. 2003, S.151] rät auch aus dem Grund der Schweißbadüberhitzung (Grobkornbildung) vom schleppenden Winkel ab [Mandal N. 2005, S.62f], [Sauders H.-L. 1989, S.7.19], [Kammer C. 2003, S.151], [Dilthey U. 2005, S.54], [Klock H. et al. 1977, S.56], [Aichele G. et al. 1975, S.86].

Einigkeit herrscht bezüglich der Größe des Anstellwinkels: Dieser sollte den Bereich von $\pm 15^\circ$ nicht überschreiten. Bei zu großen Winkeln, besteht die Gefahr der Injektorwirkung (Sogwirkung) [Kammer C. 2003, S.151]. Wichtig ist, dass das Schweißbad nicht vorläuft oder dieses überschweißt wird. Beides könnte das Entstehen von Bundefehlern und Spritzern begünstigen. Im Gegensatz zum schleppenden Schweißen, besteht dieses Problem beim stechenden Schweißen vermehrt [Kosteas D. 1978, S.72], [Mandal N. 2005, S.62f], [Kammer C. 2003, S.151], [Klock H. et al. 1977, S.56], [Heubner U. et al. 2009, S.86], [Fritz H. et al. 2010 S.180].

Bezüglich des Einflusses vom Anstellwinkel auf die Zugfestigkeit geschweißter Nähte, haben Kamal et al. in ihrer Arbeit unterschiedliche MIG- Schweißparameter auf die Beeinflussung von geometrischen und mechanisch technologischen Kennwerten untersucht [Kamal P. et al. 2010, 55ff]. Ein Y-Stumpfstoß aus Stahl (0,2% C) mit Anstellwinkeln von 25° , 0° und -25° wurde verschweißt. Das Zugfestigkeitsmaximum wurde bei Nähten die in neutraler Brennerstellung geschweißt wurden festgestellt, gefolgt von der stechenden und der schleppenden Brennerstellung [Kamal P. et al. 2010, 55ff].

Laut Fritz H. et al. [Fritz H. et al. 2010 S.180] kann durch die schleppende Brennerführung die Porenmenge reduziert werden, da das Schweißbad im Vergleich zur stechenden Brennerführung länger flüssig bleibt [Fritz H. et al. 2010, S.180].

f) Elektrodendurchmesser d

Durch die sinkende Stromdichte bei steigendem Durchmesser erfordern größere Durchmesser höhere Ströme, um das Ablösen eines Tropfens zu ermöglichen. Bei gleicher Stromstärke und Spannung entsteht bei geringeren Durchmessern eine größere Nahtüberhöhung als bei

dickeren Drähten (Abbildung 3.31). Sind die Grenzen des Drahtvorschubes erreicht, ist es möglich den Drahtdurchmesser zu verändern [Mandal N. 2005, S.37].

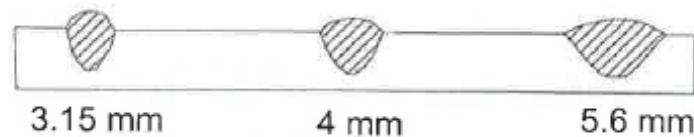


Abbildung 3.31 Einfluss des Drahtdurchmessers auf die Nahtform (Bsp. Stahl bei $I=600A$, $U=30V$, $v=13mm/s$) [Mandal N. 2005, S.37]

g) Schutzgas

Schweißen von Aluminium erfordert inerte Schutzgase. Es kommen Argon (Ar), Helium (He) und deren Gemische zum Einsatz. Vermehrt wird Ar als Schutzgas verwendet, da es in Europa kostengünstiger als He und Ar/He Gemische ist. Der Einsatz von Argon gilt für Aluminium bis zu einer Blechdicke von ca. 12 mm als am wirtschaftlichsten [Sauders H.-L. 1989, S.7.22]. Der Einsatz von Ar-He-Gemischen mit steigendem He Gehalt führt zu folgende Änderungen im Schweißverhalten [DVS 0913 1994, S.3], [Klock H. et al. 1977, S.41], [Fritz H. A. et al. 2010 S.159]:

- Unruhigerer Lichtbogen durch höhere Ionisierungsspannung von He
- Werkstück wird wärmer (es kann z.B. die Schweißgeschwindigkeit erhöht werden, oder ein Vorwärmen wegfallen.)
- Größere Nahtbreite, flachere und feinschuppigere Naht
- Einbrand wird runder und tiefer (Abbildung 3.32)
- Bindefehler und Poren nehmen ab
- Schutzgasvolumenstrom steigt durch geringere Gasdichte,
- Lichtbogenspannung steigt (56%)

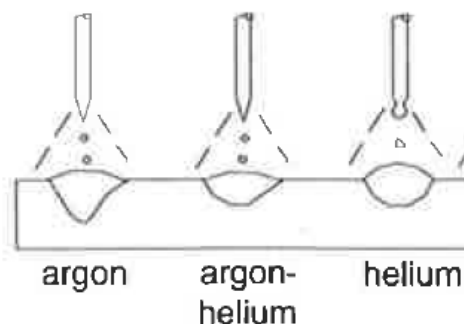


Abbildung 3.32 Einfluss ausgewählter Schutzgase auf die Nahtgeometrie [Mandal N. 2005, S.44]

3.1.3. Versuchsaufbau

3.1.3.1. Vorstudie

Um die Parameter für die Hauptversuche zu bestimmen, wurden in einer Vorstudie Blechstreifen ($3*35*200mm$) auf $3*200*500mm$ große Grundbleche (Abbildung 3.33) aufgeschweißt. Alle Querschliffe wurden 90mm vor dem Nahtende entnommen. In der Vorstudie wurde Porenauswertung durchgeführt.

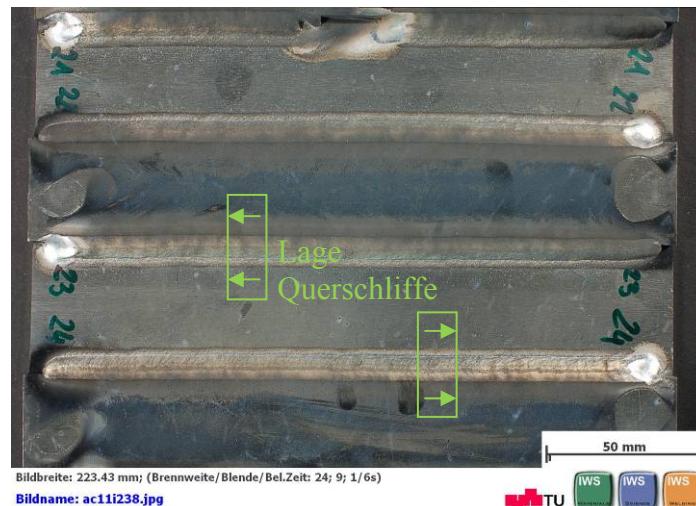


Abbildung 3.33 Versuchsblech der Schweißparametervorstudie von AW-5083-O

3.1.3.2. Hauptversuche

Aus Verzugsgründen mussten die Probenbleche fest eingespannt werden. Abbildung 3.34 zeigt den Versuchsaufbau. Der leicht durchhängende Schweißtisch wurde mit Niveausgleichsplatten geebnet. Das Versuchsblech wurde vor dem Schweißen entfettet und nicht mechanisch oder chemisch behandelt. Die Schweißversuche wurden mit dem Schweißroboter IRB140 von ABB in Verbindung mit der Schweißanlage TPS4000+CMT von Fronius durchgeführt. Die Elektrodenausrichtung wurde mit 1,4mm Abstand zur Schweißfuge und 45° Neigung gewählt (Abbildung 3.35).



Abbildung 3.34 Versuchsaufbau der Hauptschweißversuche mit eingespanntem Versuchsblech

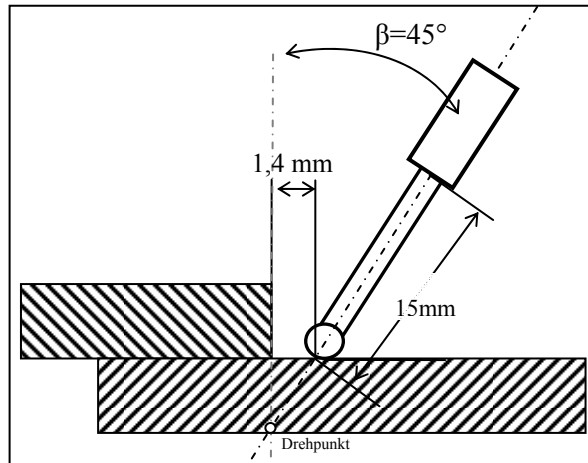


Abbildung 3.35 Skizze der Elektrodenausrichtung an der Überlappnaht

3.1.3.3. Probenentnahmeplan

Aus den verschweißten Blechen (Abbildung 3.36) wurden Scherzugproben, Korrosionsproben und Querschliffe entnommen. Wie in Abbildung 3.36 ersichtlich, wurden pro Schweißnaht je 3 Zugproben, 2 Korrosionsproben und 3 Querschliffe entnommen. Die Scherzug- und Korrosionsproben hatten eine Breite von 50 ± 1 mm. Alle anderen Bereiche der Schweißnaht hatten keine weitere Verwendung.

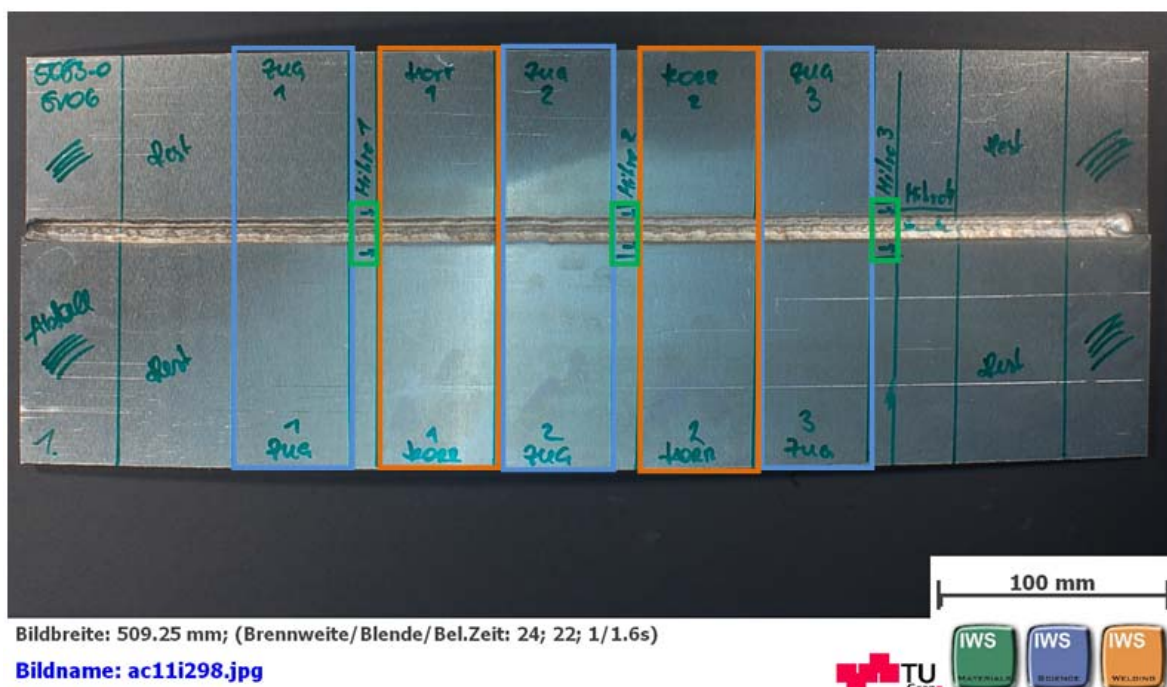


Abbildung 3.36 Probenplan: Scherzugversuche (blau), Querschliffe (grün), Korrosionsproben (orange)

3.1.4. Probenvorbereitung, Prüfung und Auswertung

3.1.4.1. Scherzugprüfung

Die Scherzugproben wurden an der Zugprüfmaschine „RMC100“ mit einer freien Einspannlänge von ca. 120mm durchgeführt. Die Traversengeschwindigkeit betrug 2mm/min und die Raumtemperatur lag bei 24°C. Die maximalen Zugkräfte der drei Zugproben pro Schweißnaht wurden mit der Blechstärke und der Probenbreite auf eine maximale Spannung normiert. Aus den drei ermittelten Spannungen wurden der Mittelwert und die

Standardabweichung berechnet. Alle Ergebnisse sind im Anhang D (S.134) zu finden, wo die Zugversuche auch mit der wahren Bruchfläche (Abbildung 3.37) nach EN ISO 9018:2003 ausgewertet wurden. Abbildung 3.37 zeigt exemplarisch die Vermessung der Bruchflächen einer Naht. Zu sehen ist jeweils eine Hälfte der Bruchfläche von den drei Scherzugproben (blau) aus Abbildung 3.36.



Abbildung 3.37 Bruchflächenauswertung von den drei Scherzugproben einer Naht; AW-5083-O mit SZ AlMg5

3.1.4.2. Porenauswertung

Für die Porenauswertung wurden polierte Querschliffe der Naht verwendet. Zum Einbetten wurde das aushärtende Kalteinbettmittel (VariDur200) auf Methylmetacrylatbasis verwendet [Buehler 2011]. Im Anschluss wurden die unter Tabelle 3.6 angeführten Arbeitsschritte auf der „TegraPol-31“ Nass-Schleifmaschine von Struers durchgeführt. Die OP-Silica Suspension bewährte sich als Poliermittel für die Querschliffe um Kratzer zu vermeiden. Dieses Poliermittel führte jedoch zu einem milchigen Schleier auf den Proben, weshalb als abschließender Arbeitsschritt mit reinem Wasser poliert werden musste.

Arbeitsschritt	Schleifmittel / Körnung	Kühlung	Umdrehung [min ⁻¹]	Dauer [min]	Anpresskraft pro ø30mm Probe [N]
1	SiC / 180	Wasser	150	bis plan	15
2	SiC / 500	Wasser	150	1	15
3	SiC / 1200	Wasser	150	2	15
4	SiC / 2400	Wasser	150	3	15
5	SiC / 4000	Wasser	150	4	15
6	Reinigung der Polierscheibe mit Wasser				
7	OP-S Suspension 1:1 mit Wasser verdünnt / Polierscheibe	keine	150	3	15
8	keines / Polierscheibe	Wasser	300	1	15

Tabelle 3.6 Arbeitsschritte beim Schleifen und Polieren

Aufgrund der Probengröße, mussten pro Probe drei Fotos am Lichtmikroskop erstellt und per Bildbearbeitungsprogramm KS400 zusammengefügt werden. Die Porenfläche wurde digital mit der im Anhang E angeführten Auswertungsroutine evaluiert. Die in der Wurzel gebildete Wurzelpore wurde nicht ausgewertet (Abbildung 3.38 a). Um die relative Porenfläche, dem Quotient aus Porenfläche zu Schweißquerschnittsfläche, ermitteln zu können, musste die Schweißgutfläche ausgewertet werden. Hierfür wurden die Proben mit abgeändertem „Alm1“ Ätzmittel [Petzow G. 1994, S.65] aus 2,8ml 40%iger Flusssäure und 100 ml destilliertem Wasser für 100 Sekunden geätzt und digital ausgewertet (Abbildung 3.38 b). Für jede Naht wurde ein Mittelwert aus drei Messergebnissen (Querschliffen) gebildet. Weiters wurden Histogramme mit der Häufigkeit als Funktion des Porendurchmessers erstellt. Alle Ergebnisse der Porenauswertungen sind auch im Anhang D aufgelistet.

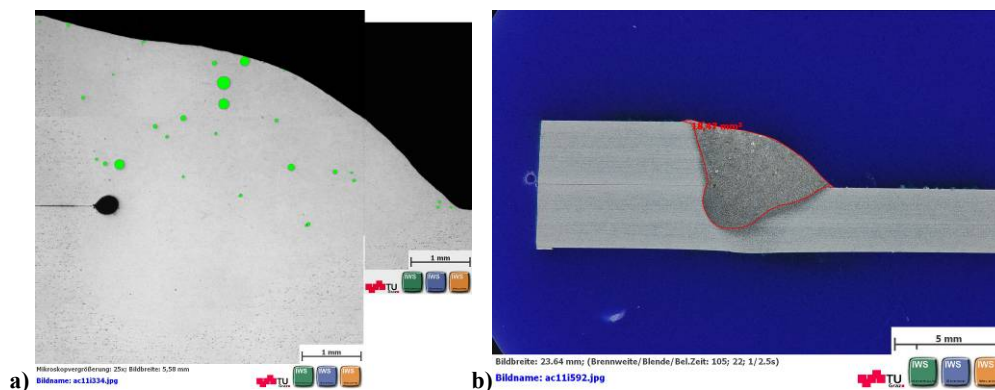


Abbildung 3.38 Ausgabebilder der digitalen Auswertung a) Porenfläche, b) Schweißgutfläche

3.1.5. Vorstudie zur Schweißparameterfindung

3.1.5.1. Vorauswahl der Schweißparameter

Einige der Schweißparameter für die Vorstudie aus Tabelle 3.7 wurden im Vorhinein bestimmt. Die Schweißzusätze wurden nach Empfehlungen der Literatur [DVS 0913 1994, S.2] ausgewählt. Deren chem. Zusammensetzung ist in Tabelle 3.8 abgebildet. Für die

Aufgrund seiner günstigen Eigenschaften wurde mit Impulslichtbogen (Kap.3.1.2.1 S.40) geschweißt. Die Bleche wurden mit dem von Fronius vorgegebenen Kontaktrohrabstand von 15mm im Überlappstoß verschweißt. Als Schutzgas wurde 100% Argon verwendet, und aus Gründen der Porenreduktion [DVS 0913 1994, S.4] wurde zusätzlich ein 50/50% Ar-He Gemisch verwendet. Die dafür vorgeschlagenen Schutzgasmengen wurden vom DVS [DVS 0913 1994, S.3] übernommen. Der Arbeitswinkel wurde aus Symmetriegründen mit 45° festgelegt, da es bei 0° und 90° zur Kollision von Schutzgasdüse und Gehäuseoberfläche käme. Die in Tabelle 3.7 grau hinterlegten Felder wurden mit den Versuchen der Vorstudie definiert. Puls- und Lichtbogenkorrektur wurden in die Parameterliste aufgenommen, da dadurch die an den Drahtvorschub gekoppelte Stromstärke und die Spannung abgeändert werden können [Fronius 2011b, S.81f]. Die Lichtbogenkorrektur war auch nötig, um die Kennlinie von AW-5083-O auf das 50Ar/50He%-Gemisch abzustimmen, da hierfür keine Kennlinie vorhanden war.

Schweißparameter	Einheit	EN AW 5083-O				EN AW 6181-T4			
Schweißzusatz	/	5356 / AlMg 5				4043 / AlSi5			
Elektroden Durchmesser d	mm	1,2							
Lichtbogenart	/	Impulslichtbogen							
Nahtgeometrie	/	Überlappstoß							
Kontaktrohrabstand KrA	mm	15							
Arbeitswinkel β	Grad	45							
Kennlinie	/	AlMg5, 100%Ar, ϕ 1,2		AlMg5, 100%Ar, ϕ 1,2		AlSi5, 100%Ar, ϕ 1,2		AlSi5, 50Ar/50He%, ϕ 1,2	
Schutzgas	/	100% Argon		50/50% Ar/He Gem.		100% Argon		50/50% Ar/He Gem.	
Schutzgasvolumenstrom \dot{V}	l/min	15		26		15		26	
Schweißgeschwindigkeit v	mm/s	15	30	15	30	15	30	15	30
Drahtvorschub f	m/min								
Pulskorrektur Pk	/								
Lichtbogenkorrektur Lbk	%								
Anstellwinkel α	Grad								

Tabelle 3.7 Schweißparameter als Grundlage für die Vorversuche

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	andere
5356/AlMg5	<0,25	<0,4	<0,1	0,05-0,2	4,5-5,5	0,05-0,2	<0,1	0,06-0,2	<0,0003	<0,05
4043/AlSi5	4,5-6,0	<0,6	<0,3	<0,15	<0,2	-	<0,1	<0,15	<0,0003	<0,05

Tabelle 3.8 Chemische Zusammensetzung der Schweißzusätze in Gew. % [Safra 2011, S.4ff]

Als Ausgangspunkt für die Vorstudie dienten Querschliffe von Park und Rakesh. Park hatte in seinen Untersuchungen die Naht von Abbildung 3.39 a, als Naht mit optimaler Schweißnahtgeometrie definiert. Abbildung 3.39 b zeigt die optimale Naht aus den Untersuchungen von Rakesh, die auf Porosität und statische Festigkeit untersucht worden war [Park H.J. et al. 2008, S.85], [Rakesh K. et al. 2009, S.309ff].

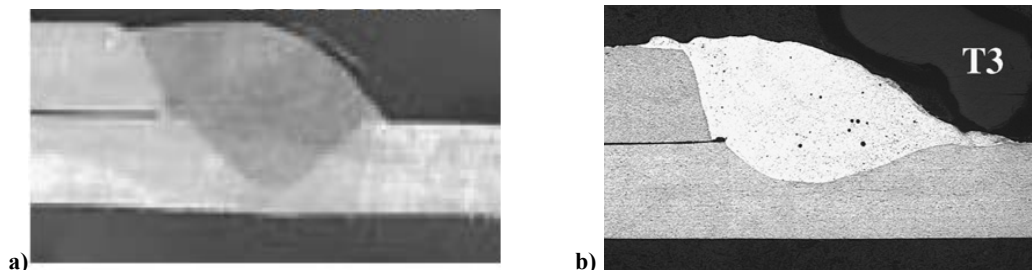


Abbildung 3.39 Querschliffe von Überlappnähten: a) s=1,6mm Al6k21 mit AlSi5 [Park H.J. et al. 2008, S.85], b) s=1mm 6082 mit 4047 [Rakesh K. et al. 2009, S.309ff]

Durch schrittweise Änderung der Streckenenergie wurde versucht, sich den Nähten von Abbildung 3.39 anzunähern. Abbildung 3.40 zeigt beispielsweise, wie sich die Anpassung der Streckenenergie auf den Schweißnahtquerschnitt auswirkt. Durch eine geringere Streckenenergie sinkt der Einbrand.



Abbildung 3.40 Vorstudie: Einfluss der Streckenenergie auf die Nahtgeometrie. a) 178,1 J/mm b) 173,3 J/mm

Neben der Streckenenergie wurden Puls-, Lichtbogenkorrektur und Anstellwinkel variiert. In Diagramm 3.1 sind für AW-5083-O die Parameter der Vorstudie grafisch dargestellt; Jene für AW-6181-T4 in Diagramm 3.2. Eine detaillierte Auflistung der gesamten Parameter der Vorstudie befindet sich in Anhang B. (S.129ff) Die ersten Versuche wurden mit der Legierung AW-5083-O durchgeführt. Es wurde der Anstellwinkel im Bereich von 15° schleppend bis 15° stechend variiert. Der Anstellwinkel wurde schließlich auf ±5° eingegrenzt, da bei größeren stechenden Winkeln zu flache Nähte entstanden sind. Größere, schleppende Winkel führten zu einer stärkeren Schmauch- Bildung der Schweißnaht und der Lichtbogen war bei der Schweißgeschwindigkeit von 30 mm/s merkbar unruhiger. Daher wurden für AW-6181-T4 nur die Grenzwerte 5° stechend und 5° schleppend untersucht. Diagramm 3.2 zeigt, dass sich durch die vorher durchgeführte Versuche mit AW-5083-O, die Anzahl der Vorversuche für AW-6181-T4 stark reduzierte.

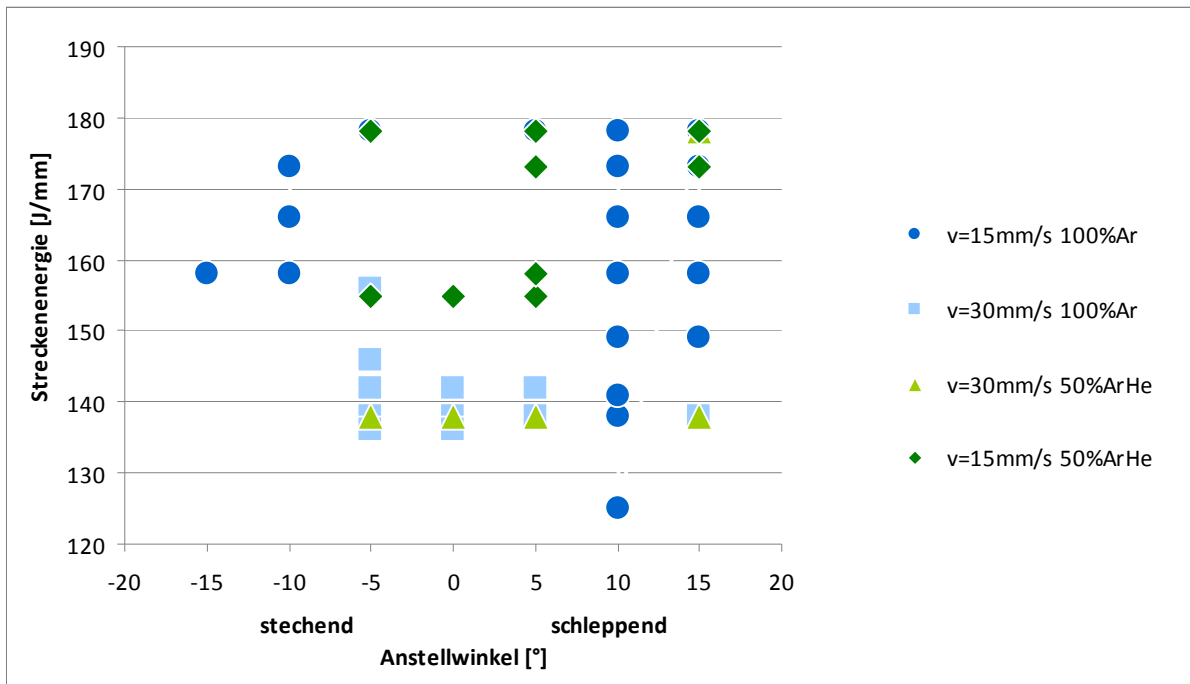


Diagramm 3.1 Getestete Parameter der Vorversuche von AW-5083-O

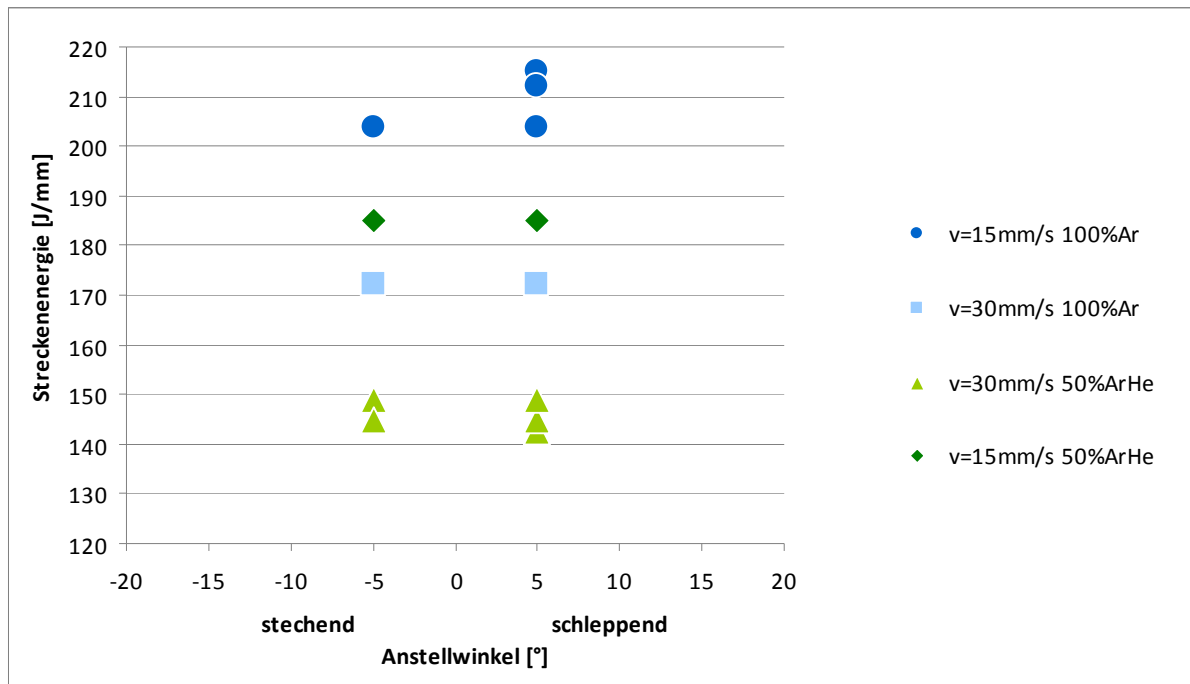


Diagramm 3.2 Getestete Parameter der Vorversuche von AW-6181-T4

3.1.5.2. Ergebnisse

Dieses Kapitel beinhaltet die zu den Themen Anstellwinkel, Schweißschmouch-Niederschlag, Schutzgas, Streckenergie und Schweißnahtfehler gewonnenen Erkenntnisse.

Der Anstellwinkel beeinflusst den Schweißschmouch- Niederschlag, und zum Teil änderte sich die Nahtgeometrie und der Einbrand. Der Einbrand und die Nahtüberhöhung wurden vom schleppenden zum stechenden Winkel stets kleiner, und die Nahtbreite wurde größer (Abbildung 3.41). Ein Vergleich dieser Querschliffe von mit 50Ar/50He% geschweißten Nähten (Abbildung 3.42, Abbildung 3.43) zeigte, dass der Einfluss auf die Nahtgeometrie nicht immer eindeutig ist. Die Nähte wurden mit dem 50Ar/50He% Schutzgas Richtung stechenden Anstellwinkel nur etwas flacher und breiter. Der Einbrand veränderte sich jedoch nicht merklich.

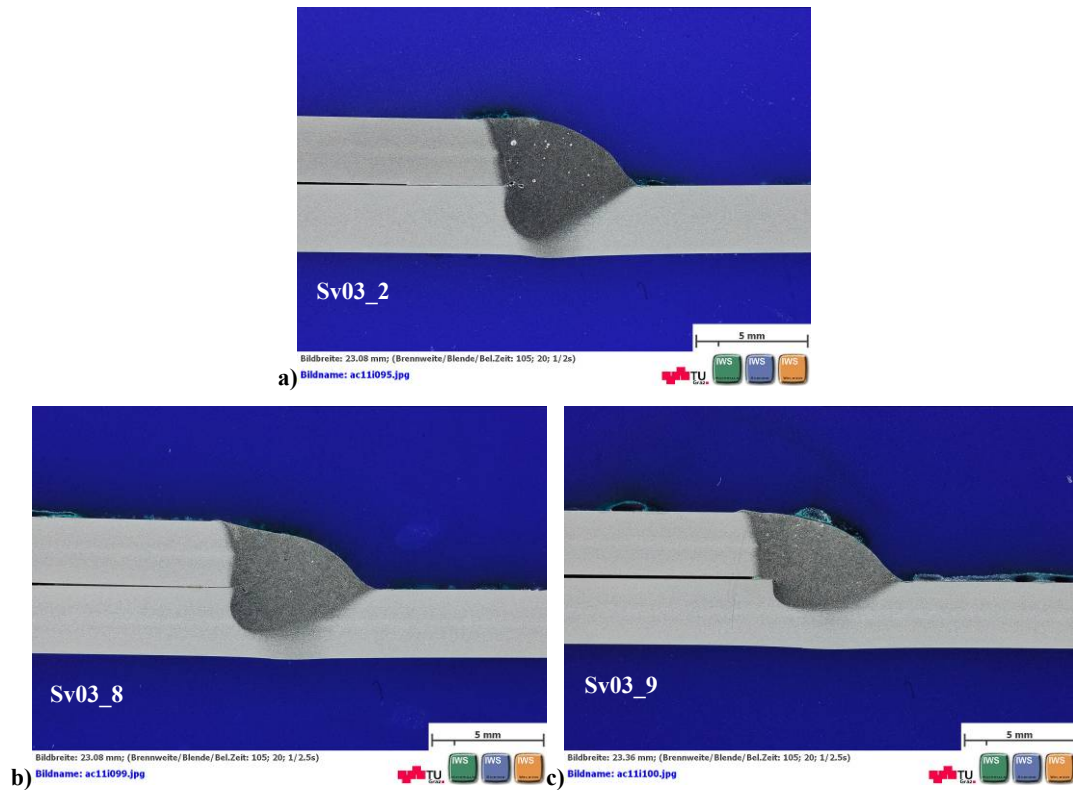


Abbildung 3.41 Einfluss des Anstellwinkels auf die Nahtgeometrie bei AW-5083-O/AlMg5 a) 15° und b) 5° schleppend c) 5° stechend ($E=178 \text{ J/mm}$, $v=15 \text{ mm/s}$, 100%Ar)

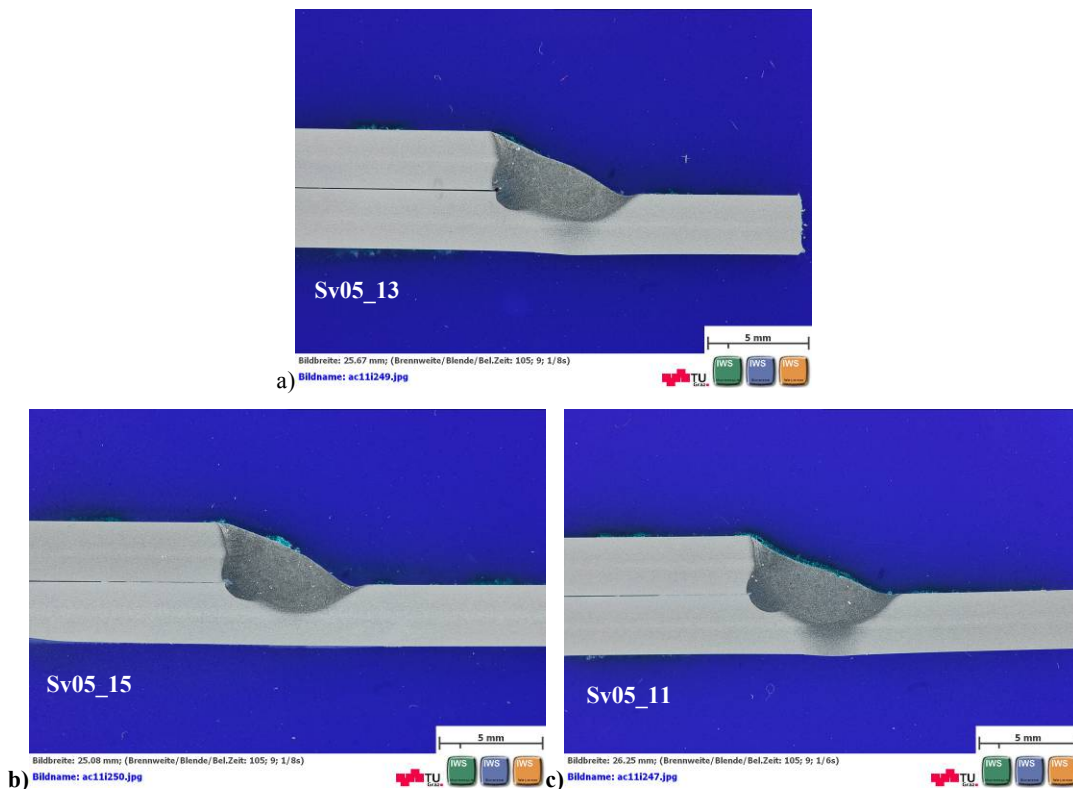


Abbildung 3.42 Einfluss des Anstellwinkels auf die Nahtgeometrie AW-5083-O/AlMg5 a) 15° und b) 5° schleppend c) 5° stechend ($E=137 \text{ J/mm}$, $v=30 \text{ mm/s}$, 50Ar/50He% Gemisch)

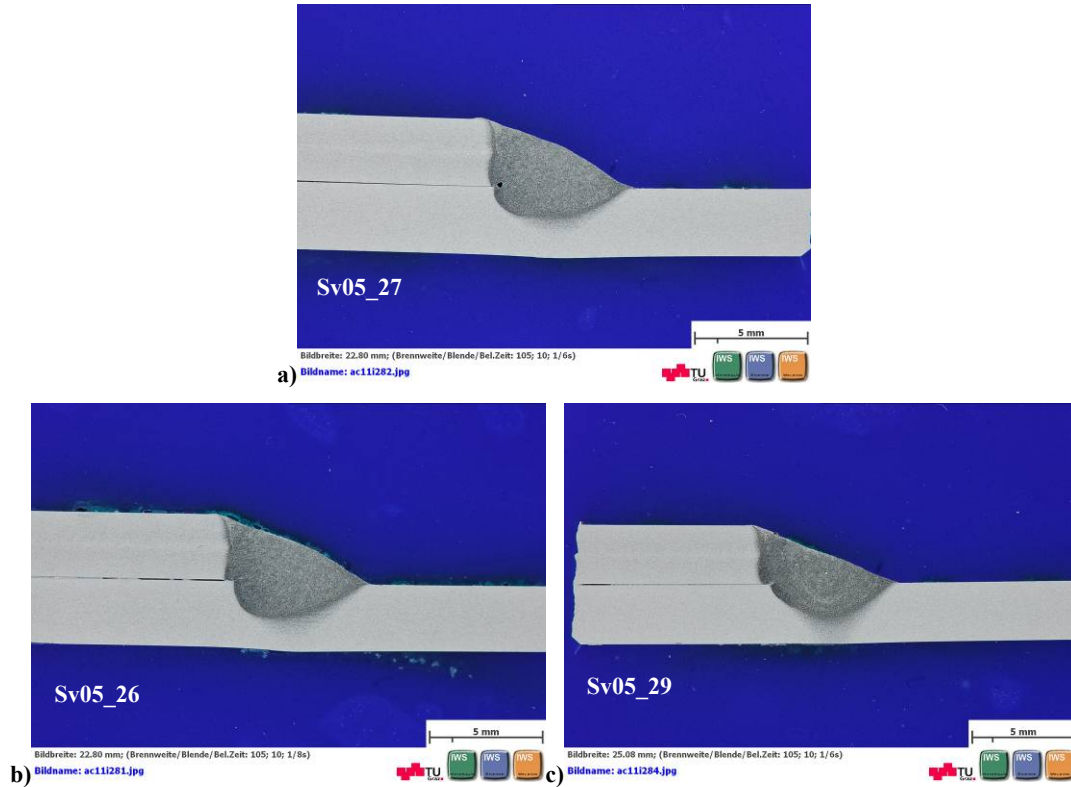


Abbildung 3.43 Einfluss des Anstellwinkels auf die Nahtgeometrie von AW-5083-O/AlMg5 a) 15° und b) 5° schleppend c) 5° stechend ($E=155 \text{ J/mm}$, $v=15 \text{ mm/s}$, 50Ar/50He% Gemisch)

Die Variation des Anstellwinkels zeigte einen sehr deutlichen Einfluss auf den Schweißschmauchniederschlag. Beim schleppenden Schweißen kam es zu einem Niederschlag, neben und auf der Schweißbraupe (Abbildung 3.44). Die stechend und neutral geschweißten Proben zeigten diesen Niederschlag neben der Naht. Die Ablagerungen auf der Naht ließen sich nicht mit einem Schwamm und Wasser entfernen, wie Abbildung 3.45 zeigt.

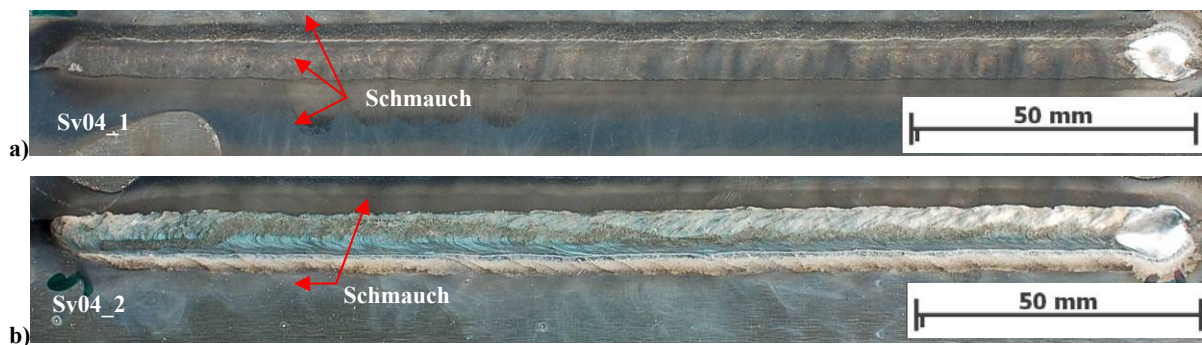


Abbildung 3.44 Einfluss des Anstellwinkels auf den Schweißschmauch- Niederschlag beim Schweißen von ungereinigten AW-5083-O Schweißnähten a) 15° schleppend b) 5° stechend

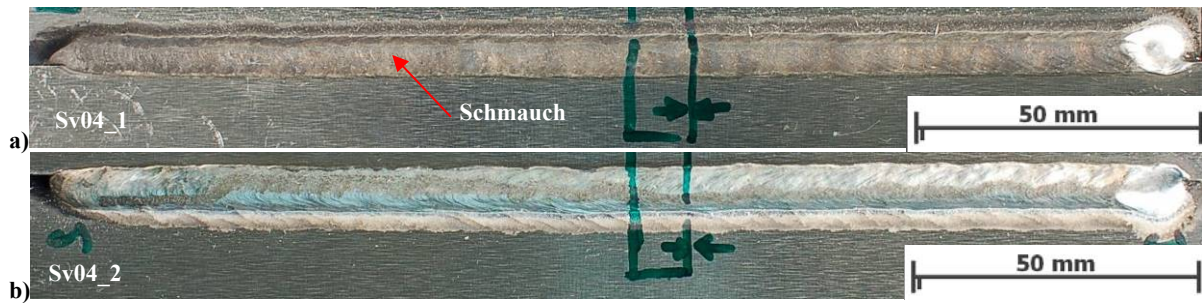


Abbildung 3.45 Einfluss des Anstellwinkels auf die Schweißschmauch- Niederschlag beim Schweißen von gereinigten AW-5083-O/AlMg5 Schweißnähten a) 15° schleppend b) 5° stechend

Versuche mit unterschiedlicher Pulskorrektur zeigten, dass diese die Bildung von Schmauch, Poren und die Endkraterrissen beeinflusst. Mit einer positiven Pulskorrektur konnte ein leicht verbessertes Ausfließverhalten erreicht werden (Abbildung 3.46). Der Anbindewinkel der Nahtoberfläche wurde merklich spitzer. Hinsichtlich Einbrand und Nahtquerschnitt kam es jedoch zu keinen nennenswerten Änderungen. Der Vergleich von zwei mit unterschiedlicher Pulskorrektur verschweißten Proben in Abbildung 3.47 illustriert, dass der Schweißschmauchniederschlag mit zunehmender Pulskorrektur zunahm. Die Naht mit der höheren Pulskorrektur zeigte einen deutlich dunkleren Niederschlag, was darauf hindeutet, dass sich mit zunehmender Pulskorrektur der Mg-Abbrand [Goecke S.F. 2004 S. 78f] erhöht.



Abbildung 3.46 Einfluss der Pulskorrektur auf den Schweißnahtquerschnitt von AW-5083-O a) PK=0 b) PK=+2,1

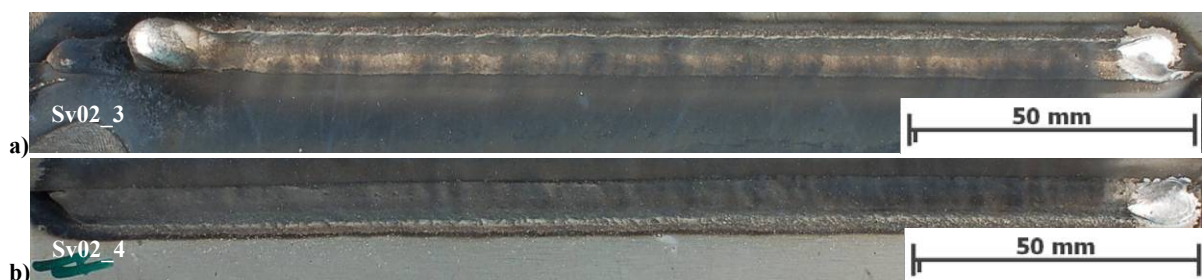


Abbildung 3.47 Einfluss der steigenden Pulskorrektur auf die Bildung von Schweißrauchablagerungen (AW-5083-O/AlMg5) a) Pk=+1,0 b) Pk=+2,1

Weiters wurde bei höherer Pulskorrektur eine Porenreduktion festgestellt. Abbildung 3.48 zeigt den Vergleich von zwei Querschliffen mit jeweils 0 bzw. +1,8 Pulskorrektur. Bei allen schwarzen, kreisrunden Einschlüssen handelt es sich um Poren im Schweißgut. Der Vergleich dieser Poren zeigte bei zunehmender Pulskorrektur eine Abnahme der Porenfläche im Nahtquerschnitt. Abbildung 3.49 zeigt den Vergleich der Korrekturen 0 und -0. Die negative Pulskorrektur führte zu einer deutlichen Vermehrung der Porenfläche.

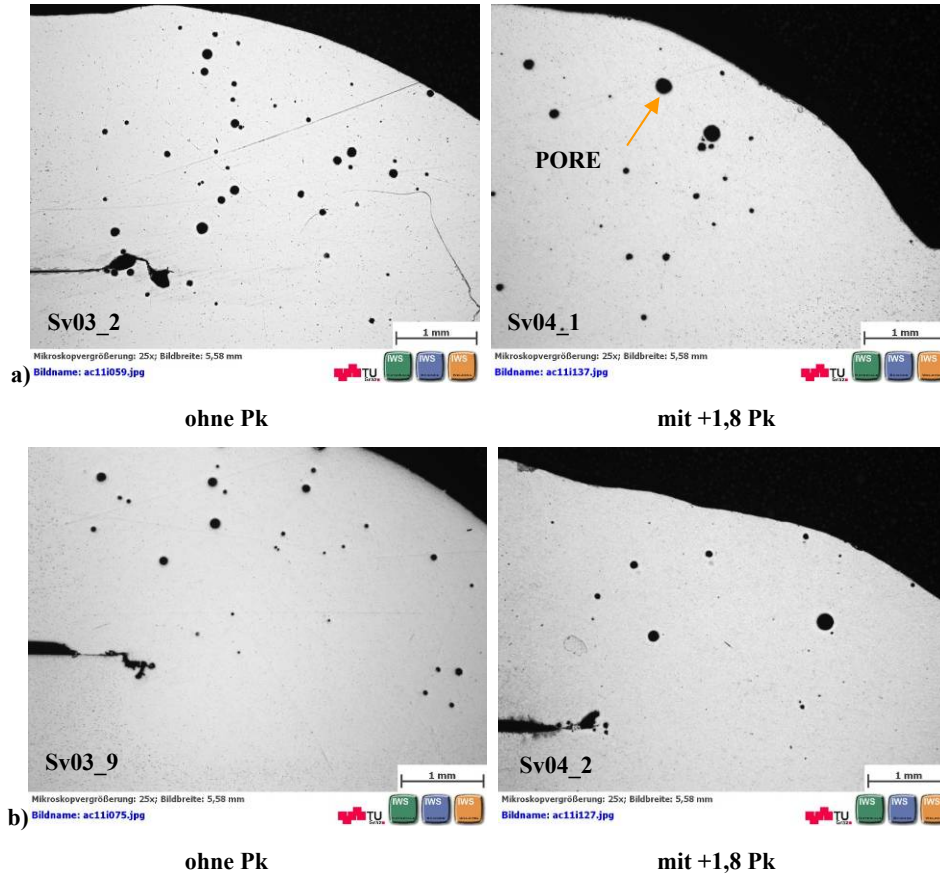


Abbildung 3.48 Einfluss der positiven Pulskorrektur auf die Porenbildung von AW-5083-O/AlMg5 a) 15° schleppend und b) 5° stehend

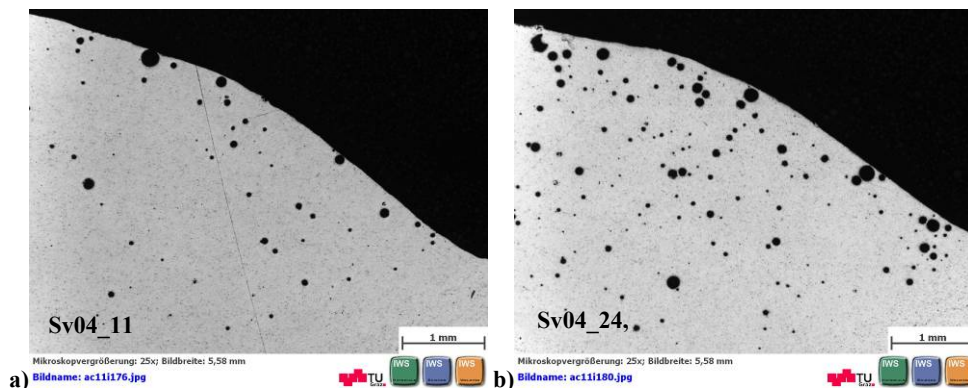


Abbildung 3.49 Einfluss der negativen Pulskorrektur auf die Porenfläche von AW-5083-O a) Pk=0 (E=138 J/mm), b) Pk=-0,8 (E=142 J/mm)

Bei den Schweißversuchen mit AW-6181-T4/AlSi5 konnten Endkraterrisse nicht gänzlich vermieden werden. Der Vergleich der Endkraterrisse von Proben mit und ohne Pulskorrektur (Pk) zeigte einen Unterschied in der Größe der Endkraterrisse, siehe Abbildung 3.50. Während bei der Naht ohne Pk mit freiem Auge kein Riss erkennbar war, konnte dieser dennoch mittels Stereo-Mikroskop nachgewiesen werden (Abbildung 3.50 a). Im Vergleich dazu war der Endkraterriss bei Proben mit positiver Pk, klar mit freiem Auge ersichtlich (Abbildung 3.50 b). Aus diesem Grund wurde im Weiteren bei AW-6181-T4 auf die Verwendung einer Pulskorrektur verzichtet.



Abbildung 3.50 Einfluss der Pulskorrektur auf die Bildung von Endkraterrissen beim Schweißen von AW-6181-T4/AlSi5 a) ohne Pk, b) mit Pk=+1,8

Der Vergleich von Schweißnähten mit identischen Schweißparametern aber unterschiedlichem Schutzgas zeigte klare Unterschiede bezüglich Ausfließverhalten und Porenfläche. Die mit 100%Ar erzeugten Nähte zeigten eine konvexe Schweißbadoberfläche mit kleinem Einbrand (Abbildung 3.51). Hingegen wiesen die mit 50Ar/50He% verschweißten Nähte eine eindeutig breitere und flachere Nahtgeometrie mit etwas größerem Einbrand auf (Abbildung 3.52). Die in Abbildung 3.52 b dargestellte Nahtoberfläche wechselt von der konvexen in die konkave Form und schwächt dadurch den tragenden Querschnitt der Schweißnaht. Die genannten Änderungen werden auch in vielen Literaturstellen erwähnt [DVS 0913 1994, S.3], [Klock H. et al. 1977, S.41], [Fritz H. A. et al. 2010 S.159]. Bezüglich der Porenbildung konnte qualitativ festgestellt werden, dass die Verwendung von 50Ar/50He% bei AW-5083-O/AlMg5 zur Reduktion der Poren führt. In Abbildung 3.53 ist der Vergleich von Schweißnähten mit unterschiedlichem Schutzgas dargestellt. Es war zu erkennen, dass die mit 50Ar/50He% geschweißte Naht merklich weniger Poren aufwies, als wie jene die mit 100%Ar verschweißte wurde. Für die Legierung AW-6181-T4 wurde in diesem Stadium der Untersuchungen kein solcher Vergleich durchgeführt.

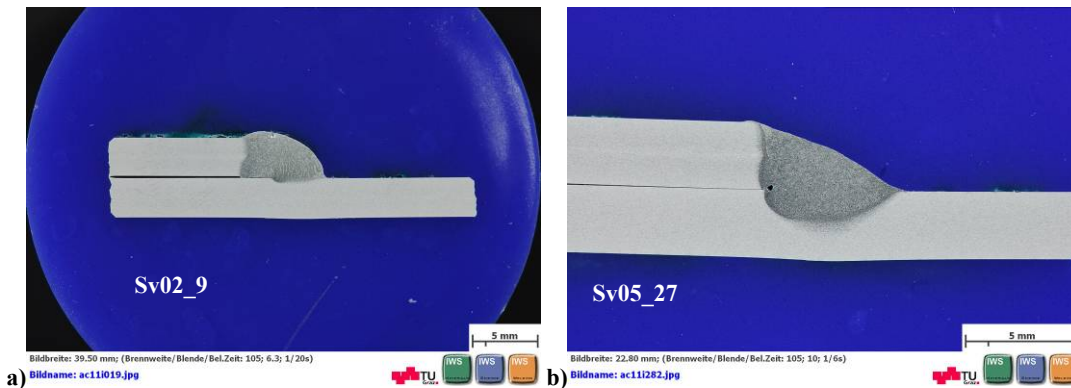


Abbildung 3.51 Einfluss des Schutzgases auf den Nahtquerschnitt von AW-5083-O/AlMg5 bei 15mm/s u. 15° schleppend a) 100%Ar (E=155J/mm), b) 50Ar/50He%-Gemisch (E=158J/mm)



Abbildung 3.52 Einfluss des Schutzgases auf den Nahtquerschnitt von AW-5083-O/AlMg5 bei v=30mm/s, 5° stechend u. E=138J/mm a) 100%Ar, b) 50Ar/50He%-Gemisch

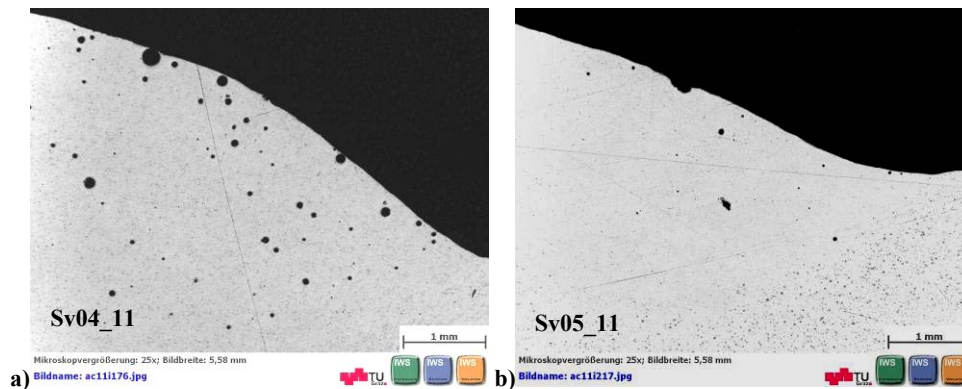


Abbildung 3.53 Einfluss des Schutzgases auf die Porenbildung von AW-5083-O bei v=30mm/s, 5° st. u. E=138J/mm a) 100%Ar b) 50Ar/50He%-Gemisch

Neben den in Anhang F (S.162ff) beschriebenen anlagenspezifischen Fehlern (Zünd- und Kühlprobleme) traten auch Bindefehler und Einbrandkerben auf. Abbildung 3.54 zeigt die Erscheinungsform dieser Bindefehler. Durch das Anheben der Streckenenergie konnten diese Schweißfehler reduziert werden. Diese Bindefehler entstanden hauptsächlich bei AW-5083-O/AlMg5. Beim Schweißen von AW-6181-T4/AlSi5 sind keine dieser Bindefehler aufgetreten. Das Hauptproblem bei AW-6181-T4/AlSi5 in Verbindung 50Ar/50He% war, dass Einbrandkerben am unteren Blech entstanden sind. Abbildung 3.55 zeigt, dass sich bei noch geringem Einbrand schon erste Ansätze von Einbrandkerben zu erkennen waren. Aus diesem Grund konnte die Streckenenergie nicht weiter erhöht werden.

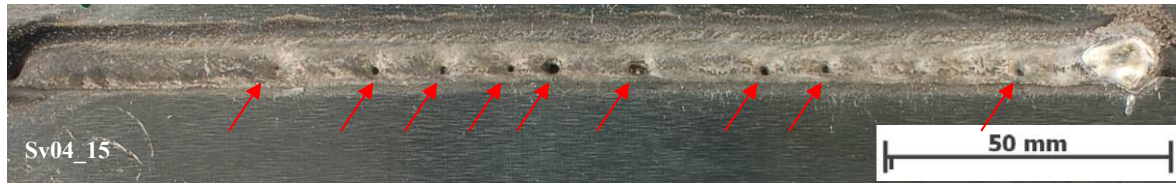


Abbildung 3.54 Nicht ausfließendes Schweißgut AlMg5 bei zu geringer Wärmeeinbringung in das Schweißblech beim verschweißen von AW-5083-O

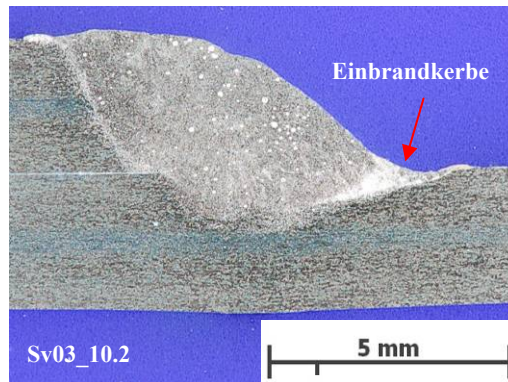


Abbildung 3.55 n Einbrandkerbenbildung bei Verwendung von ArHe Gemischen bei AW-6181-T4/AlSi5

Die Anpassung des Drahtvorschubes führte zu den in Diagramm 3.3 und Diagramm 3.4 optimierter Streckenenergien. Es ist zu erkennen, dass die Streckenenergien von AW-6181-T4/AlSi5 größer sind als jene von AW-5083-O/AlMg5 waren, obwohl die Blechstärke bei ersterem nur 2,5 mm und bei zweiterem 3 mm beträgt. Grund dafür könnte die um 45% größere Wärmeleitfähigkeit von AW-6181-T4 (170 W/mK) sein. Die Diagramme zeigen, dass bei ähnlichem Einbrand mit einer Schweißgeschwindigkeit von 15mm/s höhere Streckenenergien als mit 30mm/s benötigt wurden. Auch beim Schweißen mit 100%Ar wurde mehr Streckenenergie als mit 50Ar/50He% benötigt.

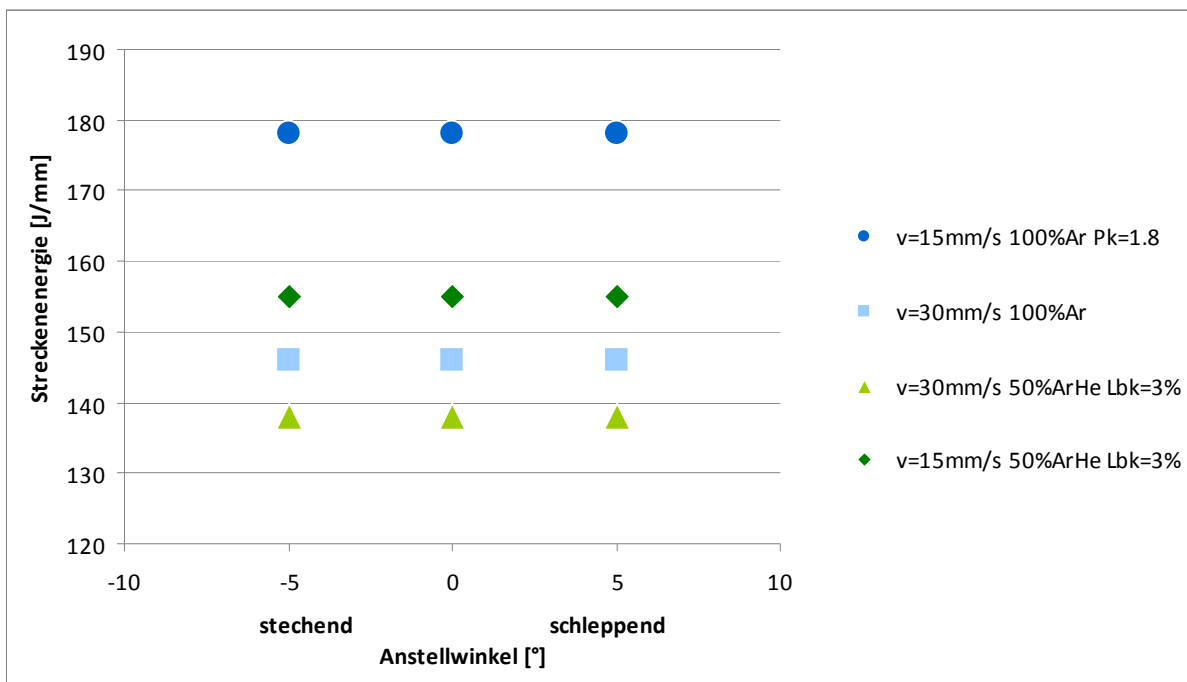


Diagramm 3.3 Optimierte Schweißparameter für die Schweißversuche von AW-5083-O/AlMg5 (t=3mm)

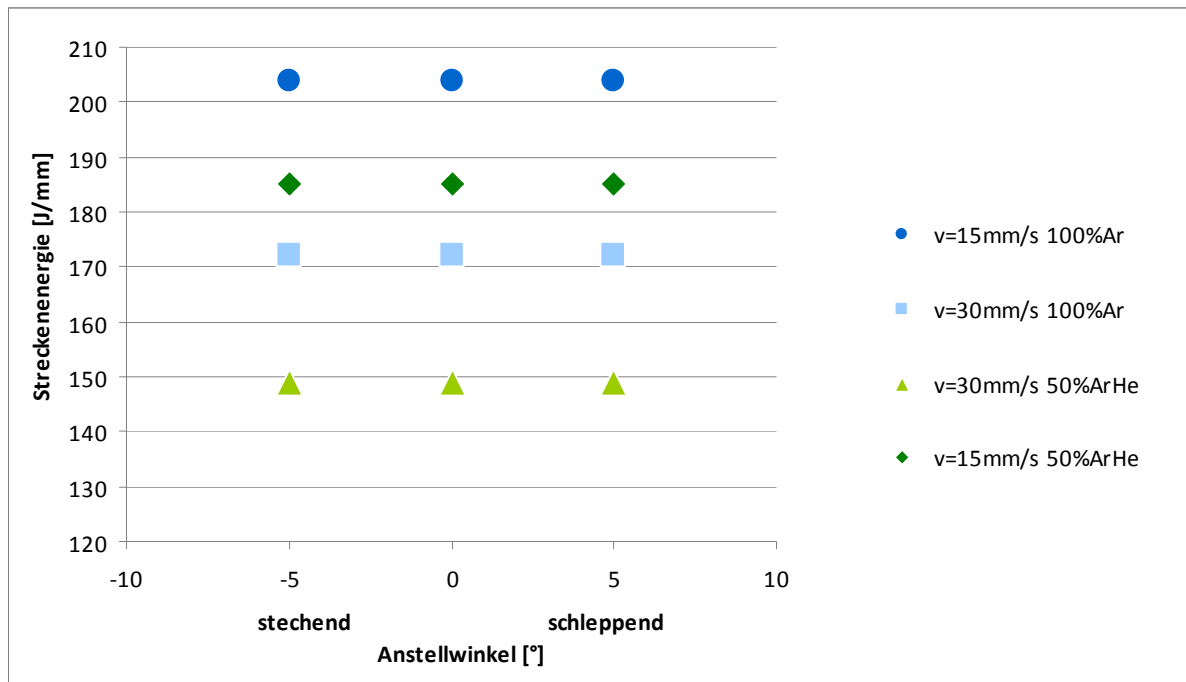


Diagramm 3.4 Optimierte Schweißparameter für die Schweißversuche von AW-6181-T4/AlSi5 ($t=2.5\text{mm}$)

3.1.5.3. Zusammenfassung

Durch eine Schweißparametervorstudie wurden alle Schweißparameter für die Hauptversuche definiert. Tabelle 3.9 fasst diese Schweißparameter zusammen.

Bei den MIG-Puls Schweißversuchen entstand bei schleppender Brennerführung auf der Nahtoberfläche ein fest haftender Schweißschmauchniederschlag, was bei neutraler und stechender Brennerstellung nicht der Fall war (Abbildung 3.45, S.58). Grund ist eventuell, dass der Schutzgasstrom beim stechenden Schweißen den Schmauch von der Naht weg und beim schleppenden Schweißen auf die Naht bläst. Laut Literatur [Goecke S.F. 2004, S.78f] handelt es sich bei diesem Niederschlag, gemäß einer durchgeführten EDX-Analyse, vorrangig um Magnesium und Sauerstoff (MgO). Der Anstellwinkel hatte in Verbindung mit 100%Ar Einfluss auf den Einbrand und die Nahtgeometrie. Dabei nahmen der Einbrand und die Nahtüberhöhung vom schleppenden zum stechenden Winkel zu, und die Nahtbreite wurde kleiner (Abbildung 3.41, S.57). Beim 50/50% Ar/He Schutzgas wurden diese Änderungen nicht festgestellt (Abbildung 3.42, Abbildung 3.43, S.57), vermutlich deshalb, weil dieses Schutzgas heißer ist bzw. höhere Wärmeleitfähigkeit als 100%Ar hat und für ein besseres Nahtausfließen [DVS 0913 1994, S.3] sorgt, sodass im Vergleich dazu der Einfluss vom Anstellwinkel auf die Nahtgeometrie geringer ist. Dieses verbesserte Nahtausfließen von 50/50% ArHe wurde auch in den durchgeführten Versuchen festgestellt (Abbildung 3.51, Abbildung 3.52, S.61).

Die häufigsten Schweißfehler von AW-5083-O/AlMg5 waren schlauchporenförmige Bindefehler (Abbildung 3.54, S.62), die bis zum Unterblech reichten. Diese wurden durch Anheben der Streckenergie verhindert. Bei AW-6181-T4/AlSi5 konnten Endkraterisse nicht gänzlich vermieden werden (Abbildung 3.50, S.60). In Verbindung mit dem 50/50% ArHe Schutzgas war bei AW-6181-T4 die Gefahr der Einbrandkerbenbildung deutlich erhöht (Abbildung 3.55, S.62). Grund dafür könnte das breitere Schweißbad von Nähten mit 50/50% ArHe sein [DVS 0913 1994, S.3].

Durch die Änderung der Pulskorrektur wurden der Schweißschmauch- Niederschlag auf und neben der Naht, die Porenfläche und die Endkraterisse beeinflusst. Durch eine positive Korrektur kam es zur Zunahme der Ablagerungen (Abbildung 3.47, S.58), einer Abnahme der Porenfläche (Abbildung 3.48, S.59) und einer Vergrößerung der Endkraterisse (Abbildung 3.50, S.60). Die negative Pulskorrektur führte zu einem Anstieg der Porenfläche (Abbildung 3.49, S.59). Bei zu großen Korrekturen wurde ein negativer Einfluss auf die Prozessstabilität beobachtet. Möglicherweise war die durch die Pulskorrektur erzeugte höhere Impulsstromstärke Grund dafür [Fronius 2011b, S.81f].

Bei ähnlichem Einbrand, wurde bei $v=15$ mm/s eine höhere Streckenergie als bei 30 mm/s benötigt. Möglicherweise aufgrund der unterschiedlichen Temperaturfelder [Dilthey U. 2005, S.45]. Die Verwendung von 100%Ar forderte eine höhere Streckenergie als 50Ar/50He%. Grund hierfür könnte der zuvor genannte heißere Lichtbogen von 50Ar/50He% sein [DVS 0913 1994, S.3]. Die benötigten Streckenergien waren bei AW-6181-T4/AlSi5 höher als bei AW-5083-O/AlMg5, obwohl die Blechstärke von AW-6181-T4 um 0.5mm geringer ist. Grund dafür ist gegebenenfalls die um 45% höhere Wärmeleitfähigkeit von AW-6181-T4 (Tabelle 2.8, S.24). Es wurden 5° stechend, 0° und 5° schleppend als Anstellwinkel für die Hauptversuche definiert, da bei $v=30$ mm/s und größeren schleppenden Winkeln der Lichtbogen merklich unruhiger war. Größere stechende Winkel wurden nicht verwendet, da die 50Ar/50He% Nähte ohnehin sehr breit und flach waren und man noch breitere Nähte verhindern wollte. Eine Pulskorrektur wurde nur bei AW-5083-O/AlMg5 und $v=15$ mm/s verwendet. In allen anderen Fällen wurde die Korrektur aufgrund der schlechteren Prozessstabilität und der vermehrten Endkraterbildung nicht verwendet. Bei AW-5083-O/AlMg5 wurde die Kennlinie für 50Ar/50He% mit einer Lichtbogenkorrektur von 3% angepasst, da hierfür noch keine vordefinierte Kennlinie vorhanden war.

Schweißparameter	Einheit	EN AW 5083-O												EN AW 6181-T4											
		Schweißzusatz	/	5356 / AlMg5												4043 / AISi5									
Elektroden Durchmesser d	mm	1,2																							
Lichtbogenart	/	Impulslichtbogen																							
Nahtgeometrie	/	Überlappstoß																							
Kontaktrohrabstand KRA	mm	15																							
Arbeitswinkel β	Grad	45																							
Schutzgas	/	100% Argon						50/50% ArHe Gem.						100% Argon						50/50% ArHe Gem.					
Kennlinie	/	AlMg5, 100%Ar, ϕ 1,2mm						AlMg5, 100%Ar, ϕ 1,2mm						AISi5, 100%Ar, ϕ 1,2mm						AISi5, 50/50%Ar, ϕ 1,2mm					
Schutzgasvolumenstrom \dot{V}	l/min	15	17	26	26	15	17	26	26	15	17	26	26	15	17	26	26	15	17	26	26	15	17	26	26
Schweißgeschwindigkeit v	mm/s	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30
Drahtvorschub f	m/min	8,1	12	7,1	11,5	6,6	9,8	5,8	8,5	8,1	12	7,1	11,5	6,6	9,8	5,8	8,5	8,1	12	7,1	11,5	6,6	9,8	5,8	8,5
Spannung U	V	19,5	23,2	18,9	23,2	21,1	23,5	24,6	26,3	19,5	23,2	18,9	23,2	21,1	23,5	24,6	26,3	19,5	23,2	18,9	23,2	21,1	23,5	24,6	26,3
Stromstärke I	A	137	178	123	178	145	220	113	170	137	178	123	178	145	220	113	170	137	178	123	178	145	220	113	170
Streckenenergie E	kJ/cm	1,78	1,46	1,55	1,37	2,04	1,72	1,85	1,49	1,78	1,46	1,55	1,37	2,04	1,72	1,85	1,49	1,78	1,46	1,55	1,37	2,04	1,72	1,85	1,49
Pulskorrektur Pk	/	+1,8	+1,8	0	0	0	0	0	0	+1,8	+1,8	0	0	0	0	0	0	+1,8	+1,8	0	0	0	0	0	0
Lichtbogenkorrektur Lbk	%	0	0	+3	+3	0	0	0	0	0	0	+3	+3	0	0	0	0	0	0	+3	+3	0	0	0	0
Anstellwinkel* α	Grad	+5	0	-5	+5	0	-5	+5	0	-5	+5	0	-5	+5	0	-5	+5	0	-5	+5	0	-5	+5	0	-5
Nahtnummer	/	1	2	3	7x	7xx	7xxx	4	5	6	8	9	10	1	2	3	7	8	9	4	5	6	10	11	12

Tabelle 3.9 Parametertabelle der optimierten Schweißparameter für die Haupt-Schweißversuche von AW-5083-O und AW-6181-T4 (* α =schleppend)

3.1.6. Hauptversuche AW-5083-O/AlMg5

3.1.6.1. Scherzugversuche

Die Scherzugversuche mit den Schweißparametern für AW-5083-O aus Tabelle 3.9 (S.65) führten zu den anschließenden Ergebnissen. Die jeweiligen Standardabweichungen wurden aus drei Messwerten ermittelt (vgl. Abbildung 3.36, S.50).

Die mit $v=15$ mm/s und 100%Ar erhaltenen Ergebnisse sind in Diagramm 3.5 zusammengefasst. Die höchste Spannung lag bei 163 N/mm² und wurde mit schleppender Brennerführung erreicht. Die geringste Spannung von 150 N/mm² wurde bei 5° stechend gemessen. Die neutrale Brennerstellung lag mit 153 N/mm² zwischen diesen beiden Werten. Es war mit 13 N/mm² (8,6%) ein Abfall der Festigkeit vom schleppenden zum stechenden Winkel erkennbar. Die Standardabweichungen lagen im Bereich von $8-10$ N/mm².

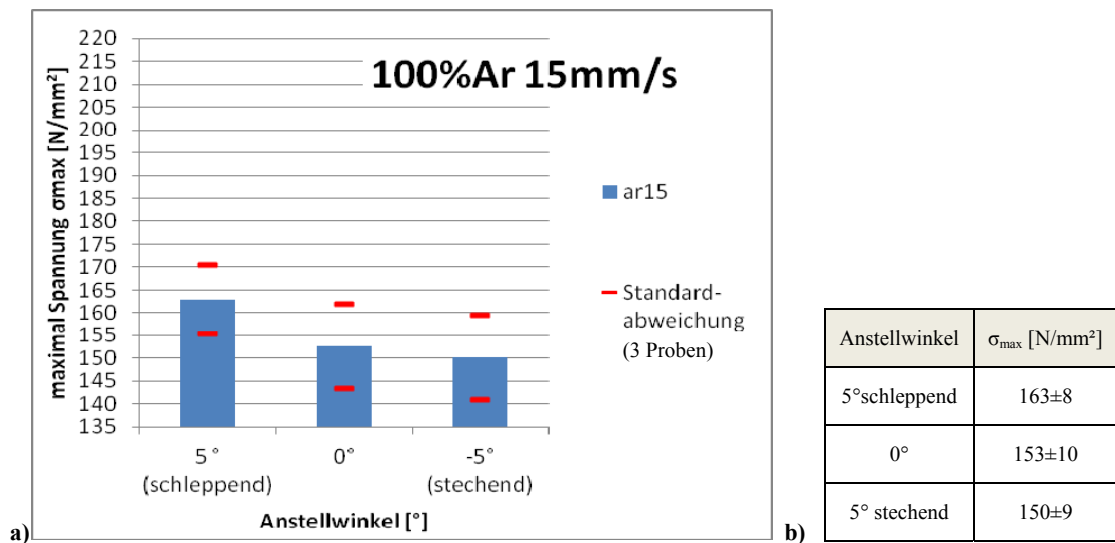


Diagramm 3.5 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-5083-O mit AlMg5 verschweißt (100% Argon, $v=15$ mm/s, $P_k=1,8$, $E=178$ J/mm) a) Diagramm, b) tabellarisch

Einen ähnlichen Verlauf zeigten die mit $v=30$ mm/s und 100%Ar erhaltenen Ergebnisse (Diagramm 3.6). Das Maximum lag mit 195 N/mm² bei der 5° schleppenden geschweißten Naht. Dieses Ergebnis war zugleich das Festigkeitsmaximum von allen Scherzugversuche mit AW-5083-O. Die stechend verschweißten Proben hatten mit 179 N/mm² die niedrigsten Festigkeiten. Die Spannungen der neutral geschweißten Proben lagen mit 182 N/mm² zwischen schleppendem und stechendem Winkel. Es war wiederum mit 16 N/mm² (8,2%) ein Abfall der Festigkeit vom schleppenden zum stechenden Winkel zu erkennen. Die Standardabweichungen lagen im Bereich von $5-16$ N/mm².

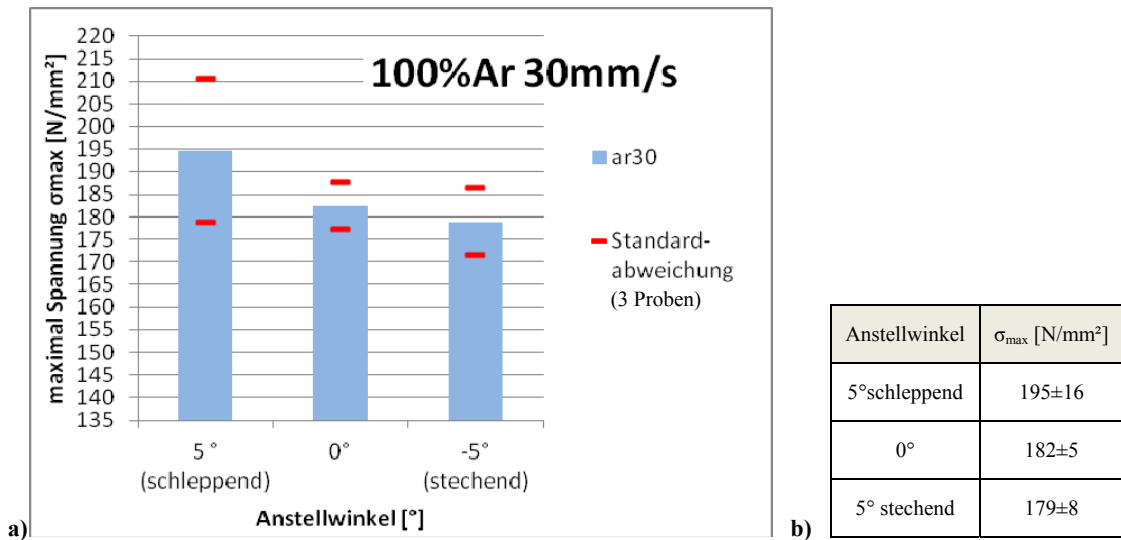


Diagramm 3.6 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-5083-O mit AlMg5 verschweißt (100% Argon und $v=30\text{mm/s}$ $E=155\text{J/mm}$) a) Diagramm, b) tabellarisch

Die mit $v=15\text{mm/s}$ und 50Ar/50He% erhaltenen Ergebnisse sind in Diagramm 3.7 zusammengefasst. Die Festigkeiten der schleppend und stechend geschweißten Nähte wichen mit 170 N/mm^2 und 166 N/mm^2 nur gering voneinander ab. Die geringste Spannung lag beim neutralen Winkel mit 160 N/mm^2 vor. Die Standardabweichungen bewegten sich im Bereich von $6\text{-}14\text{ N/mm}^2$.

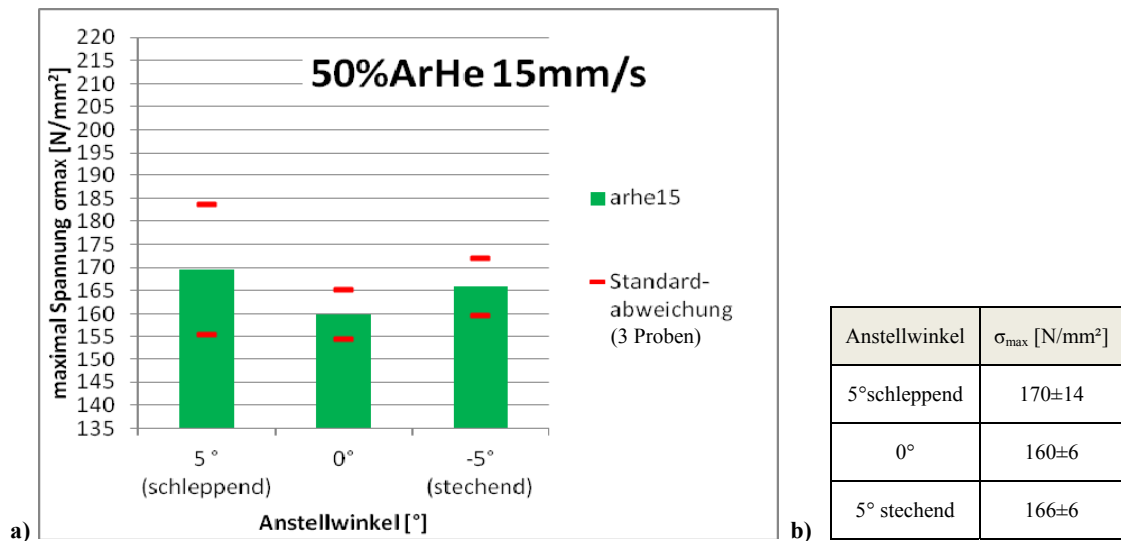


Diagramm 3.7 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-5083-O mit AlMg5 verschweißt (50Ar/50He%, $v=15\text{mm/s}$, $LbK=3$, $E=146\text{J/mm}$) a) Diagramm, b) tabellarisch

Bei den mit 50Ar/50He% und $v=30\text{mm/s}$ geschweißten Nähten führten die schleppende und neutrale Brennerstellung mit 180 und 179 N/mm^2 zu nahezu gleichen Festigkeiten (Diagramm 3.8). Mit 160 N/mm^2 ergab sich beim stechenden Winkel die geringste Festigkeit. Die Standardabweichungen der Festigkeiten lagen in einem Bereich von $7\text{-}12\text{ N/mm}^2$.

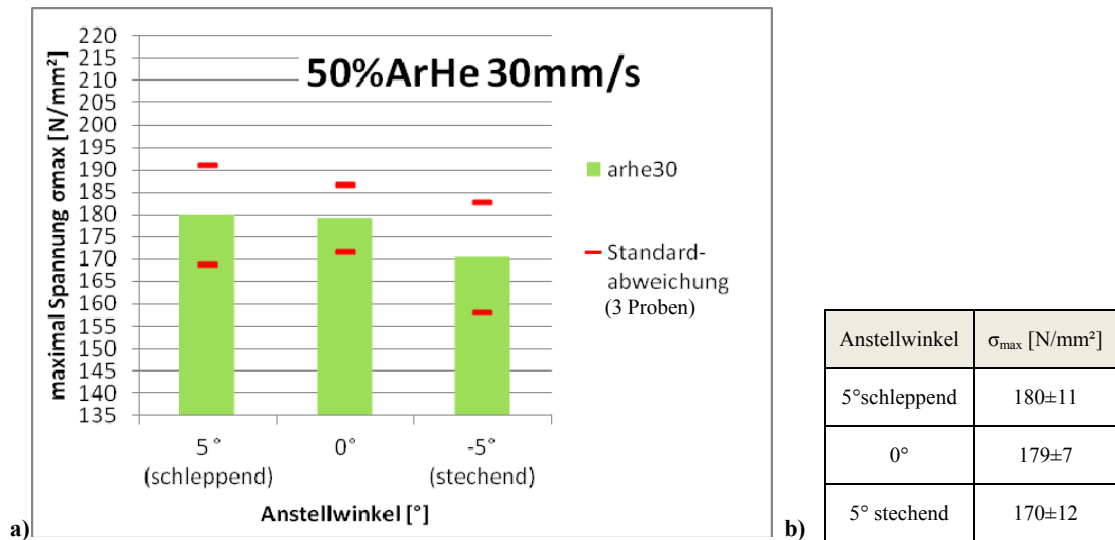


Diagramm 3.8 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-5083-O mit AlMg5 verschweißt (50Ar/50He%, $v=30\text{mm/s}$, $LbK=3$, $E=138\text{J/mm}$) a) Diagramm, b) tabellarisch

3.1.6.2. Bruchlage

Das Bruchverhalten war bei allen Proben ident, und ist in Abbildung 3.56 zu sehen. Nach einer Aufweitung (Abbildung 3.56 b) von ca. 20° kam es bei allen Proben beider Werkstoffe nahezu senkrecht zur Belastungsrichtung zum Bruch. Abbildung 3.56 c zeigt die Bruchlage im Querschliff. Der Bruch verlief vom Kerbgrund (Schweißspalt) durch das Schweißgut, bis hin zur Nahtoberfläche.

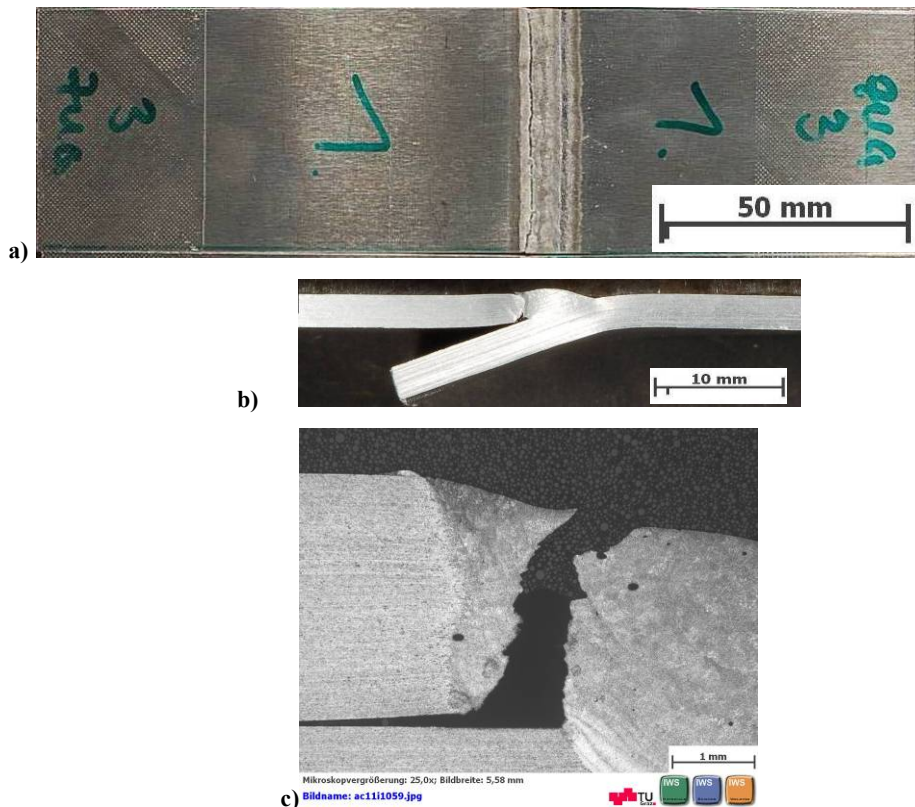


Abbildung 3.56 Bruchlage der Scherzugversuche a) Draufsicht b) Seitenansicht c) metallograph. Schliff geätzt

3.1.6.3. Härtemessung und Mikrostruktur

Die Härtemessung wurde mit dem Vickersverfahren (HV1) auf einer automatischen Härteprüfmaschine „MTC 010“ von Fa. Emco durchgeführt. Es wurden aus jeder Schutzgas-Geschwindigkeits-Kombination jeweils jene Proben mit der größten und jene mit der kleinsten Festigkeit überprüft.

Alle Proben zeigten ähnliche Härtewerte, deshalb wurde an dieser Stelle nur ein Härteverlauf angeführt (Abbildung 3.57). Dieser zeigt, dass die Härte mit ca. 78 [HV1] vom Grundmaterial über die WEZ bis ins Schweißgut nahezu konstant blieb. Bei den polierten Proben waren mit Hilfe des Lichtmikroskops Ausscheidungen zu finden. Bei diesen handelt es sich nach Davis um $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$ (grau) und um Mg_2Si (schwarz) [Davis J.R. et al. 1994, S.497]. Im Schweißgut (Abbildung 3.58 a) sind die beiden Ausscheidungen sehr klein und fein verteilt. Die grauen $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$ Ausscheidungen sind in der WEZ koaguliert (Abbildung 3.58 b) und zeigen eine eckige Form. Im Grundwerkstoff (Abbildung 3.58 c) liegt wiederum $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$ in rundlicher Form vor und Mg_2Si zeigt aufgrund des Walzvorganges eine längsgestreckte, bröckelige Form. Eine durchgeführte EDX Aufnahme (Abbildung 3.59, S.71) sollte die Identifizierung der Ausscheidungen unterstützen. Die Mg_2Si Ausscheidungen konnten klar identifiziert werden. Bei den $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$ Ausscheidungen ist im Mapping jedoch kein Al Anteil ersichtlich.

Probe 1.1

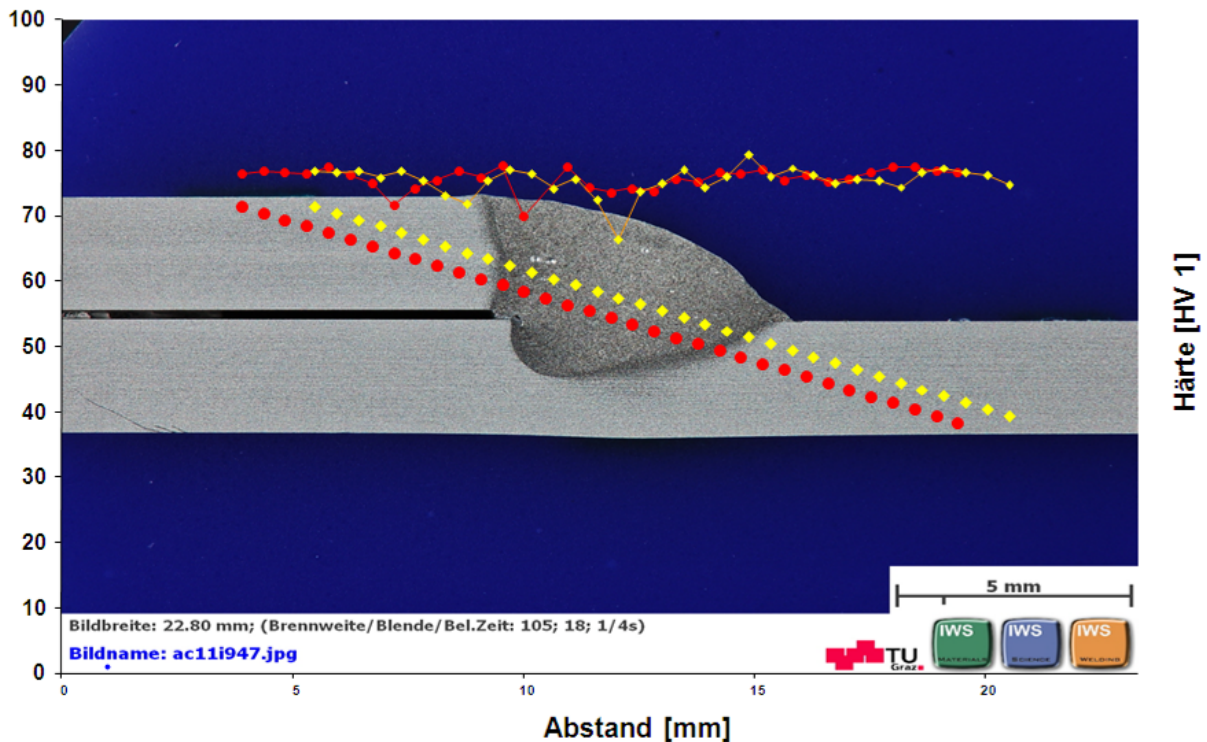


Abbildung 3.57 Härteverlauf AW-5083-O mit SZ AlMg5 (E=178J/mm, 100%Ar, 15mm/s, 5°schleppend)

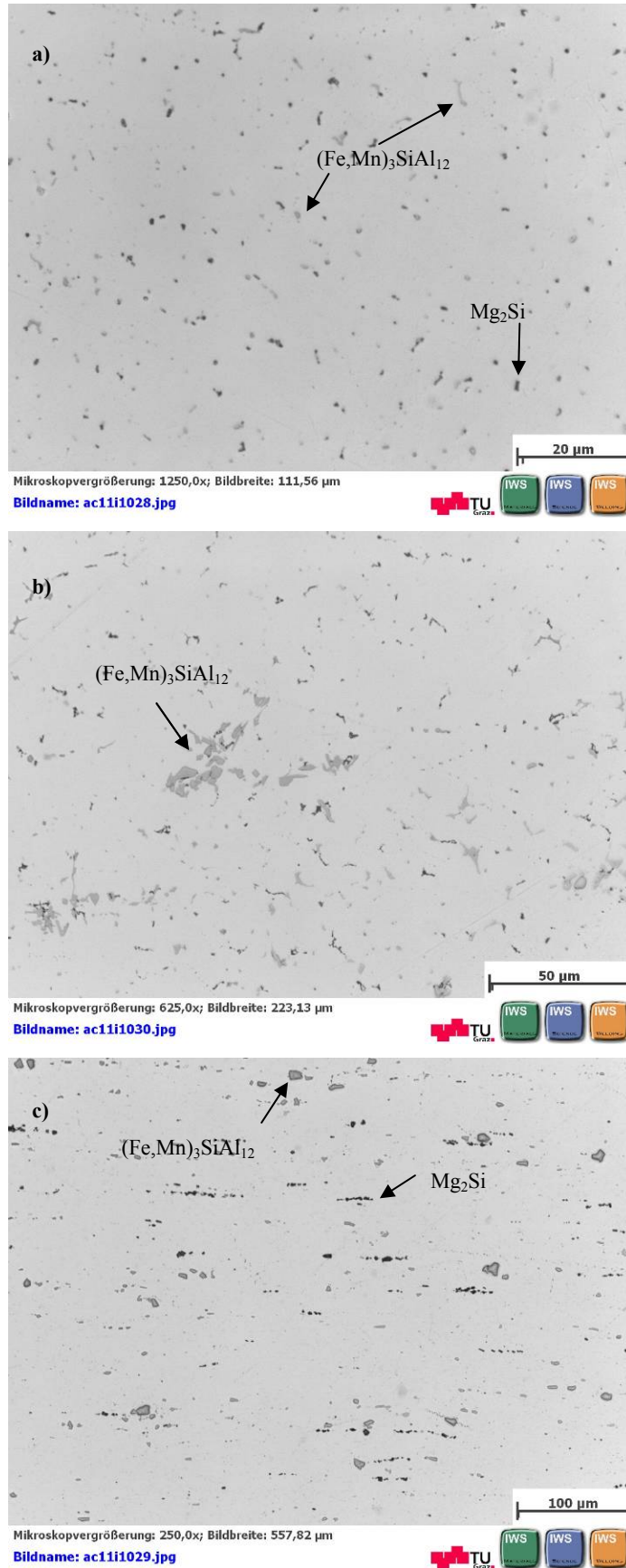


Abbildung 3.58 Schweißverbindung von AW-5083-O mit SZ AlMg5 a) SG b) WEZ c) GW

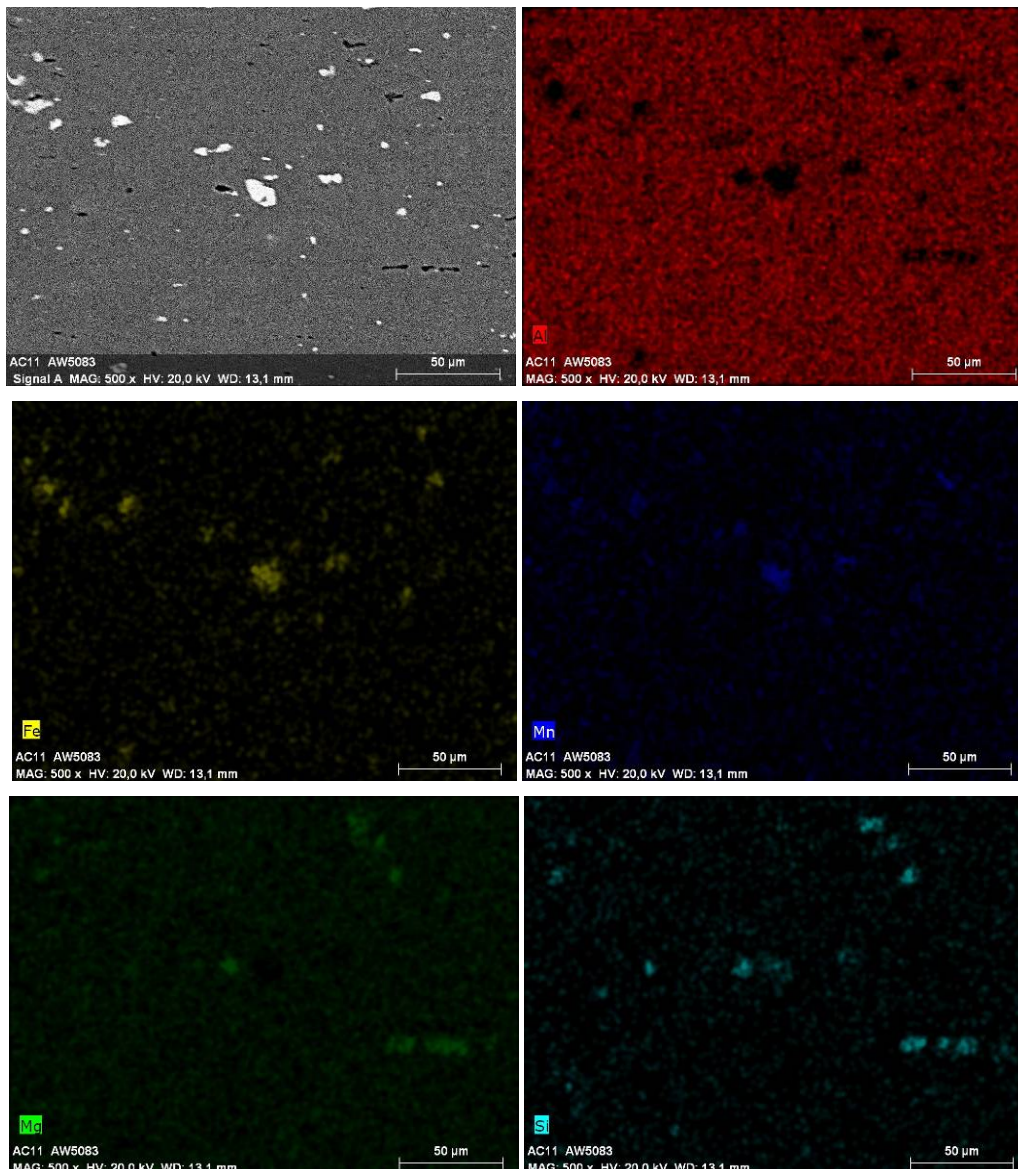


Abbildung 3.59 EDX Mapping (Al, Fe, Mn, Mg, Si) des AW-5083-O Grundwerkstoffes

3.1.6.4. Porenauswertung

Die Ergebnisse der Porenauswertung für das Schweißgut AlMg5 bei AW-5083-O sind in Diagramm 3.9 zusammengefasst. Zur Veranschaulichung der ermittelten Maximal- und Minimalwerte sind die dazugehörigen Querschliffe zusätzlich abgebildet. Die geringste Porenfläche von 0,1% wurde mit allen drei Anstellwinkeln, mit dem 50Ar/50He% Schutzgas und bei einer Geschwindigkeit von 15mm/s erreicht. Der Querschliff (Abbildung 3.60 a) dazu zeigt, dass es sich dabei um eine nahezu porenfreie Probe handelte. Auch bei den Proben die mit der höheren Geschwindigkeit (30mm/s) und demselben Schutzgas verschweißt wurden, waren nur geringe Porenmengen messbar (0,3-0,4%). Mit Ausnahme vom stechenden Winkel wurden mit 100%Ar und 15mm/s mit Pulskorrektur ähnlich gute Ergebnisse wie mit 50Ar/50He% gemessen. Der maximale Porenanteil lag bei 1,5% und wurde bei den Nähten mit 100%Ar Schutzgas und $v=15\text{mm/s}$ gemessen. Der Querschliff dazu (Abbildung 3.60 b) zeigte, dass bei 1,5% kleine aber auch schon größere Poren im Schweißgut vorhanden waren.

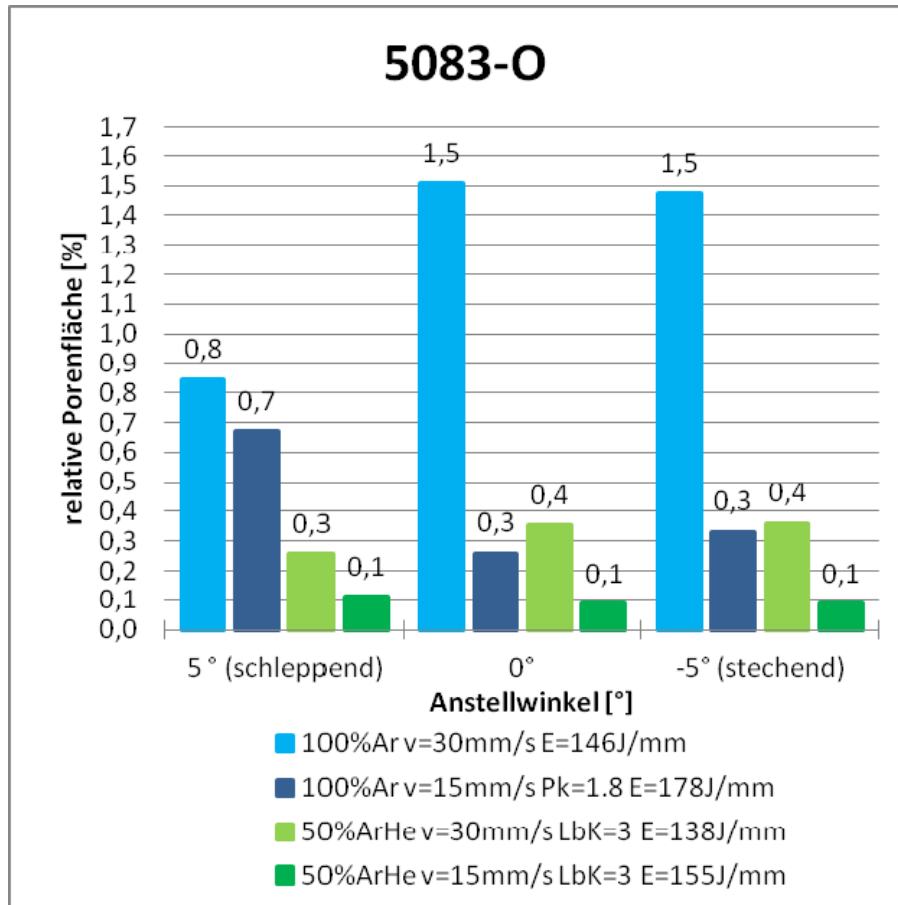


Diagramm 3.9 Porenanteil der Schweißversuche von AW-5083-O mit SZ AlMg5

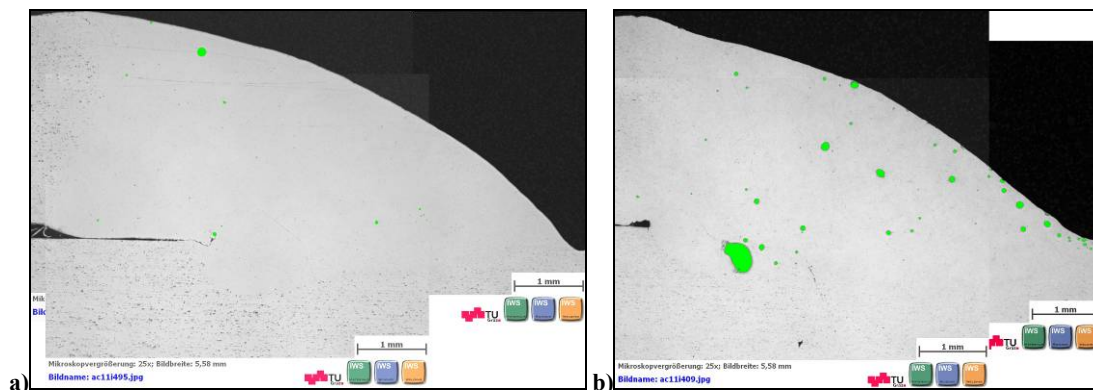


Abbildung 3.60 Porenanteil im Schweißgut AlMg5 von AW-5083-O a) Probe mit 0,1% (50Ar/50He% Gas) b) Probe mit 1,5% (100%Ar Gas)

Aus allen Messungen der relativen Porenfläche wurden auch die Porengröße und deren Mengenverteilung ermittelt und in einem Histogramm zusammengefasst. Die Auswertung (Diagramm 3.10, Tabelle 3.10) ergab, dass Poren mit einem Durchmesser von 0,04mm am häufigsten vorkamen. Der Größenbereich der Porendurchmesser lag bei 0,01-0,4mm mit einem Mittelwert von ca. 0,04 mm.

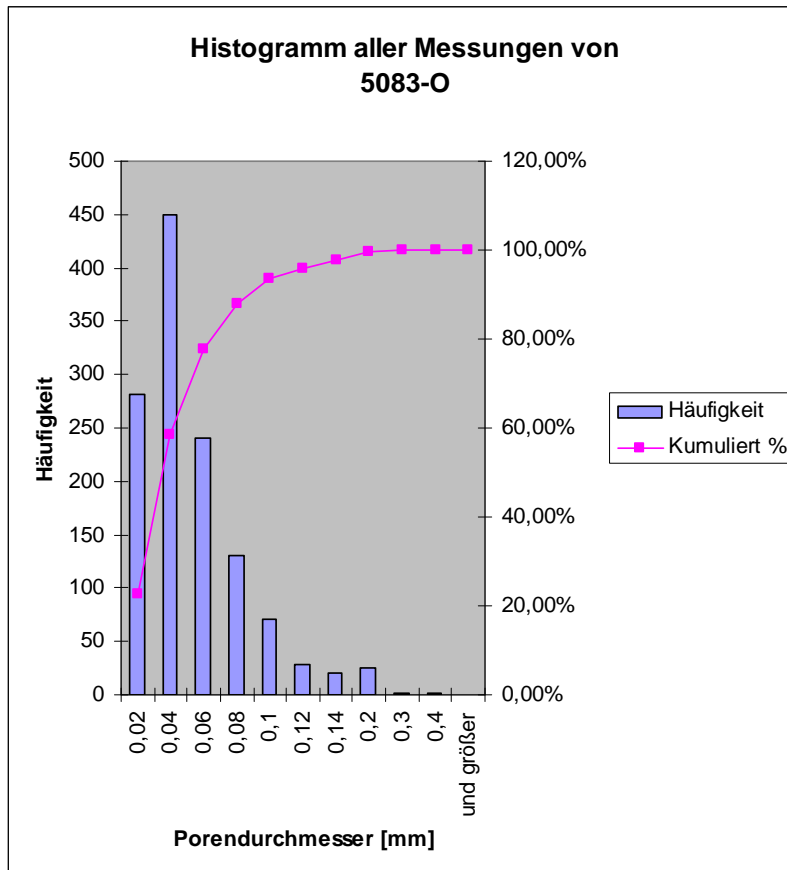


Diagramm 3.10 Mengenverteilung der Porengröße bei AW-5083-O/AlMg5

<i>Porendurchmesser [mm]</i>	<i>Häufigkeit 5083-O/AlMg5</i>
0,02	282
0,04	450
0,06	240
0,08	130
0,1	71
0,12	29
0,14	21
0,2	25
0,3	2
0,4	2
bis 0,85	0

Tabelle 3.10 Mengenverteilung der Porengröße in Tabellenform

Durch die Einspannung der Schweißbleche mittels Schraubzwingen, stellte sich ein Schweißspalt mit unterschiedlicher Höhe ein (Abbildung 3.61), welcher sich auf die Ausbildung der Wurzelfehler auswirkte. Der Querschliff von AW-5083-O/AlMg5 mit

Schweißspalt (Abbildung 3.62 a) zeigte eine rissähnliche Erstarrung der Wurzel. Jene Bereiche, die ohne Spalt verschweißt wurden, zeigten im Querschliff eine große Pore am Spaltende (Abbildung 3.62 b). Es war kein Einfluss der unterschiedlichen Wurzelfehlerrausbildung auf die Höhe der maximalen Zugkraft feststellbar. Möglicherweise haben andere Faktoren einen weitaus größeren Einfluss auf die Festigkeit der Naht.

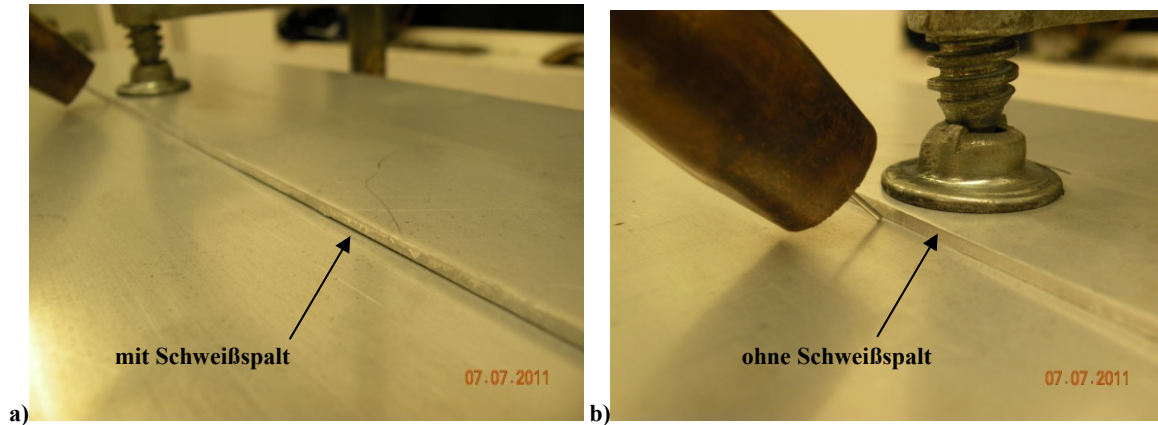


Abbildung 3.61 Ausbildung der Schweißspalthöhe aufgrund der Blecheinspannung a) mit Spalt, b) ohne Spalt

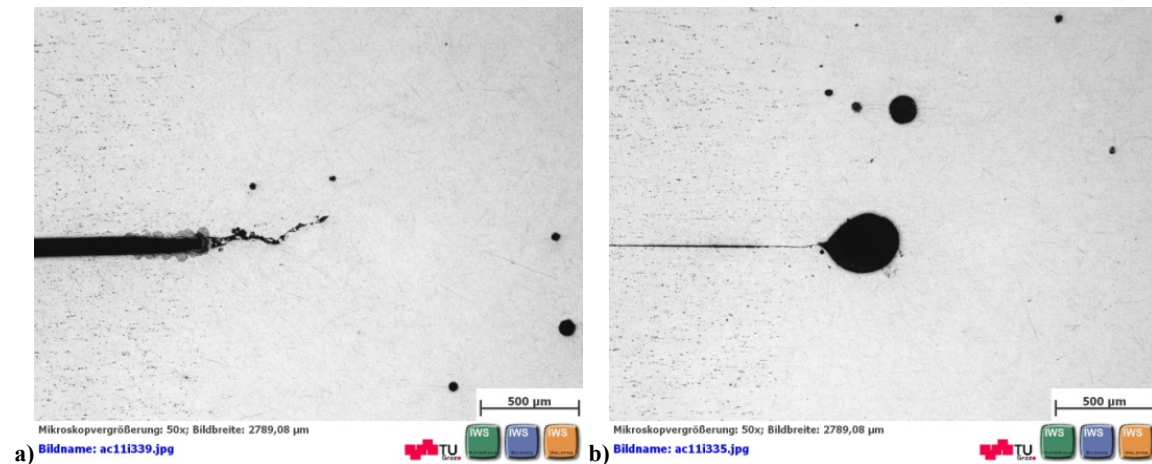


Abbildung 3.62 Wurzelbildung von AW-5083-O/AlMg5 a) mit Schweißspalt, b) ohne Spalt

3.1.7. Hauptversuche AW-6181-T4/AlSi5

3.1.7.1. Scherzugversuche

Die mit 15 mm/s Schweißgeschwindigkeit und 100%Ar erzielten Zugfestigkeiten im Scherzugversuch sind in Diagramm 3.11 zusammengefasst (Parameter siehe Tabelle 3.9, S.65). Die höchste maximale Spannung lag bei 135 N/mm² und wurde mit schleppender Brennerführung erreicht. Die geringste Spannung von 96 N/mm² wurde bei 5° stechend gemessen. Die neutrale Brennerstellung lag mit 126 N/mm² zwischen diesen beiden Werten. Es war mit 39 N/mm² (28,8%) ein Abfall der Festigkeit vom schleppenden zum stechenden Winkel zu erkennen. Die Standardabweichungen lagen im Bereich von 16-25 N/mm². Alle Standardabweichungen wurden aus drei Messwerten ermittelt (vgl. Abbildung 3.36, S.50).

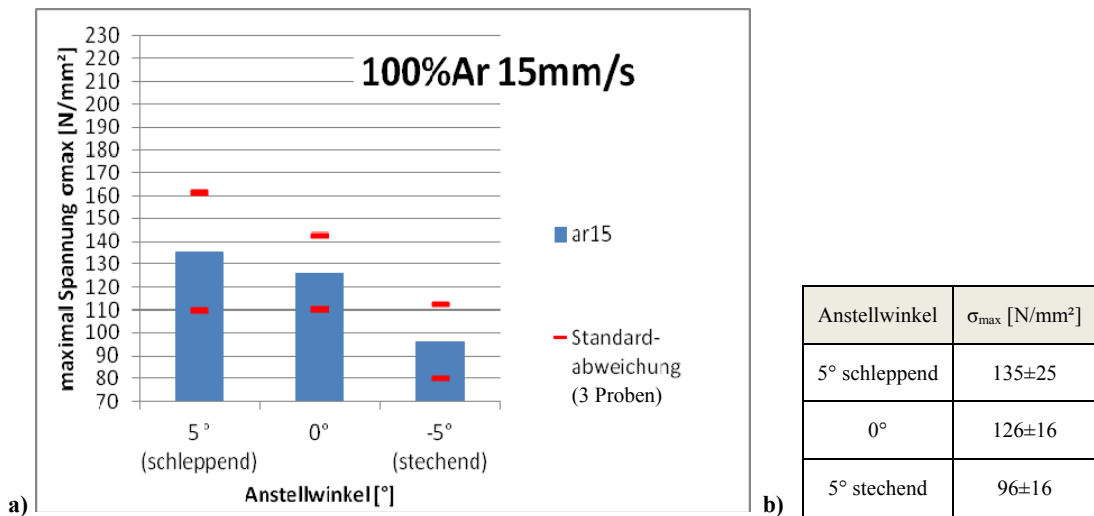


Diagramm 3.11 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-6181-T4 mit AlSi5 verschweißt für: 100% Argon, v=15mm/s und E=204J/mm a) Diagramm, b) tabellarisch

Die mit 100%Ar und 30mm/s Schweißgeschwindigkeit erhaltenen Ergebnisse (Diagramm 3.12) zeigten bezüglich der Festigkeit nahezu keine Unterschiede. Die Werte lagen im Bereich von 123-128 N/mm² mit Standardabweichungen von 2-11 N/mm².

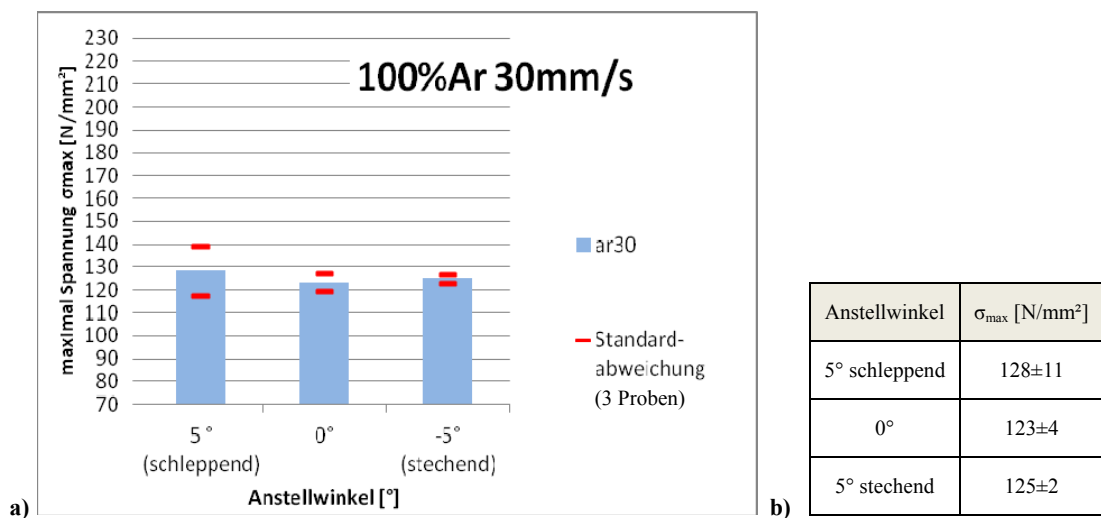


Diagramm 3.12 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-6181-T4 mit AlSi5 verschweißt für: 100% Argon, v=30mm/s und E=172J/mm a) Diagramm, b) tabellarisch

Bei den mit 50Ar/50He% mit $v=15\text{mm/s}$ geschweißten Proben (Diagramm 3.13) hatten der schleppende und neutrale Winkel mit 124 und 122 N/mm^2 ähnliche Festigkeiten, die stechend geschweißte Naht lag mit 112 N/mm^2 geringfügig unter diesen beiden Werten. Die Standardabweichungen lagen in einem Bereich von $14\text{--}23\text{ N/mm}^2$

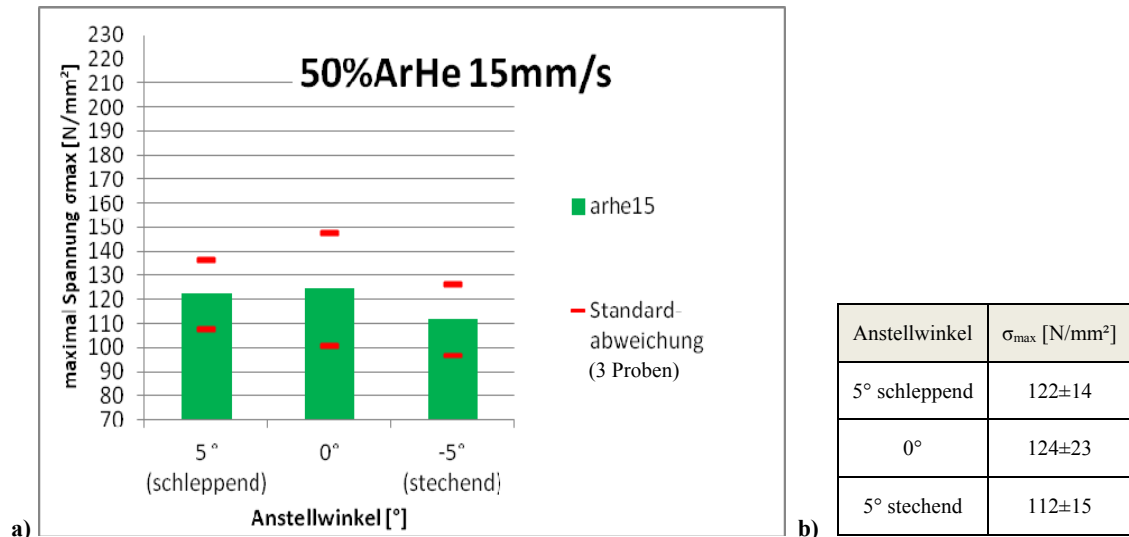


Diagramm 3.13 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-6181-T4 mit AlSi5 verschweißt für: 50Ar/50He%, $v=15\text{mm/s}$ und $E=185\text{J/mm}$ a) Diagramm, b) tabellarisch

In Diagramm 3.14 sind die Ergebnisse der mit 50Ar/50He% und 30mm/s verschweißten Proben dargestellt. Die Ergebnisse zeigten nur geringe Unterschiede, lagen im Bereich zwischen $112\text{--}115\text{ N/mm}^2$ und hatten eine Standardabweichung von $14\text{--}23\text{ N/mm}^2$.

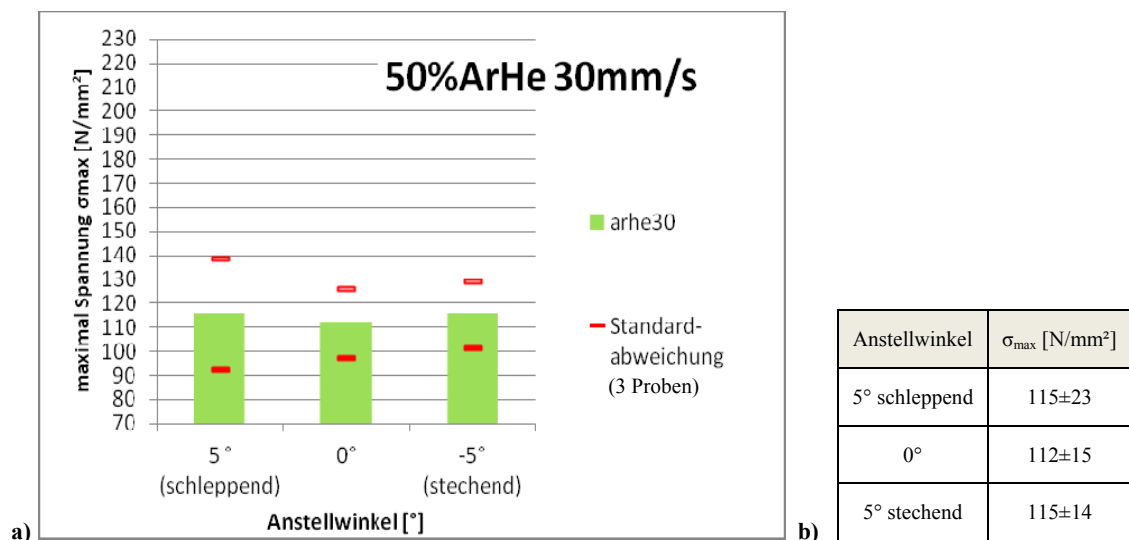


Diagramm 3.14 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-6181-T4 mit AlSi5 verschweißt: 50Ar/50He%, $v=30\text{mm/s}$ und $E=149\text{J/mm}$ a) Diagramm, b) tabellarisch

3.1.7.2. Bruchlage

Die Bruchlage der Scherzugproben von AW-6181-T4/AlSi5 war ident zu jener von AW-5083-O/AlMg5 in Kap. 3.1.6.2 auf S.68, d.h. Bruch im Schweißgut, ausgehend von der Wurzelkerbe im unteren Blech.



3.1.7.3. Härtemessung und Mikrostruktur

Die Härtemessung wurde mit dem Vickersverfahren (HV1) auf einer automatischen Härteprüfmaschine „MTC 010“ von Fa. Emco durchgeführt. Es wurden aus jeder Schutzgas-Geschwindigkeits-Kombination jeweils jene Proben mit der größten und jene mit der kleinsten Festigkeit überprüft.

Der Härteverlauf von AW-6181-T4/AlSi5 (Abbildung 3.63) zeigte, dass die Härte im Schweißgut bei 60HV1 liegt, in der WEZ auf ca. 80HV1 ansteigt und im Grundmaterial wieder auf ca. 70HV1 sinkt. Vermutlich war die um ca. 50% geringe Festigkeit [Safra 2011] des Schweißzusatzes der Grund für die niedrige Härte im SG. Ursache für die Aufhärtung in der WEZ (Abbildung 3.63 b) könnten die Ausscheidungen an den Korngrenzen und ein feineres Korn sein [Schulze G. 2010, S.504f]. Aus dem Vergleich der Korngröße von Grundwerkstoff (Abbildung 3.64 d) und WEZ, (Abbildung 3.64 b) ließ sich jedoch kaum ein Unterschied erkennen. Im Schliffbild des Schweißgutes (Abbildung 3.64 a) war die dendritische Erstarrung mit einer niedrigschmelzenden Phase (Al-Si-Eutektikum) an den Korngrenzen zu erkennen [Davis J.R. et al. 1994, S.518]. In der WEZ nahe der Schmelzlinie (Abbildung 3.64 b) kam es zur Ausbildung von einer niedrigschmelzenden Phase an den Korngrenzen. Davis hat bei einer Schweißnaht von 6061-T6 mit SZ AlSi5 festgestellt, dass es sich dabei um Al-Mg₂Si Eutektikum handelt [Davis J.R. et al. 1994, S.518]. Für das Grundmaterial AW-6181-T4 konnte keine entsprechende Literatur gefunden werden, welche die in Abbildung 3.64 c dargestellten Ausscheidungen klar benennen würde. Die Abbildung einer geätzten 6151-T6 Aluminiumlegierung zeigte ähnliche Ausscheidungen wie jene der Legierung AW-6181-T4 in Abbildung 3.64 c. In dieser Literatur wurden die großen, schwarzen und runden Ausscheidungen als Mg₂Si definiert [Davis J.R. et al. 1994, S.518]. Die eckigen und grauen wurden als (Fe,Mn)₃SiAl₁₂ benannt. Auch Zhang hat bei seinen Untersuchungen zur Legierung 6014-T4 eine ähnliche Mikrostruktur vom Grundwerkstoff dokumentiert [Zhang H. et al. 2002]. Er definierte die grauen Ausscheidungen (schmal-längsgestreckt und groß-eckig) als Al-Fe-Si-Mn- haltige Primärausscheidungen, was mit den Aussagen von Davis übereinstimmen würde. [Zhang H. et al. 2002], [Davis J.R. et al. 1994, S.518], [Safra 2011], [Schulze G. 2010, S.504f].

Probe 11.3

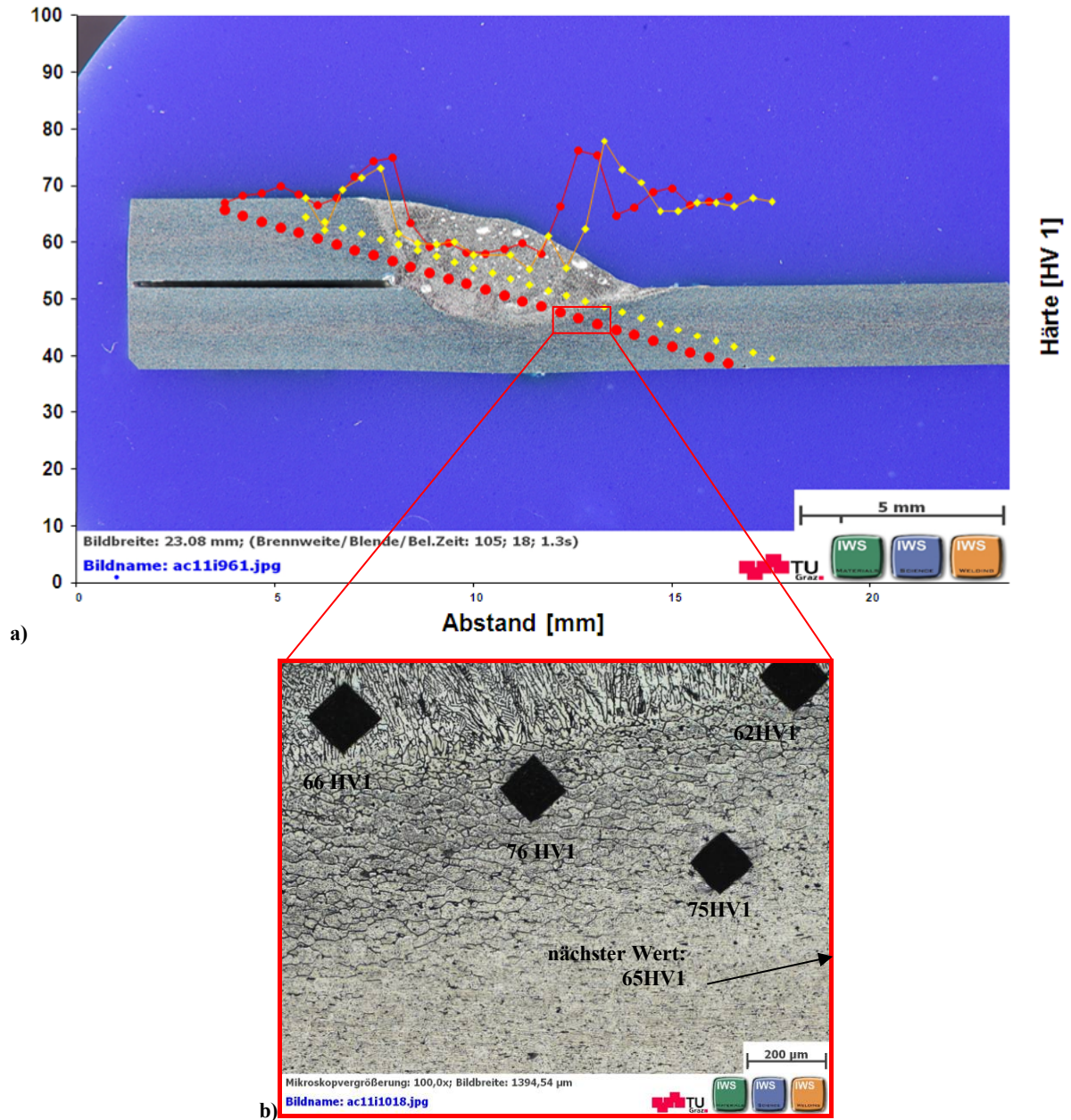


Abbildung 3.63 a) Härteverlauf der AW-6181-T4 mit AlSi5 verschweißten und geätzten Al-Legierung. (E=149J/mm, 50Ar/50He%, 30mm/s, 0°) b) Detailaufnahme der WEZ

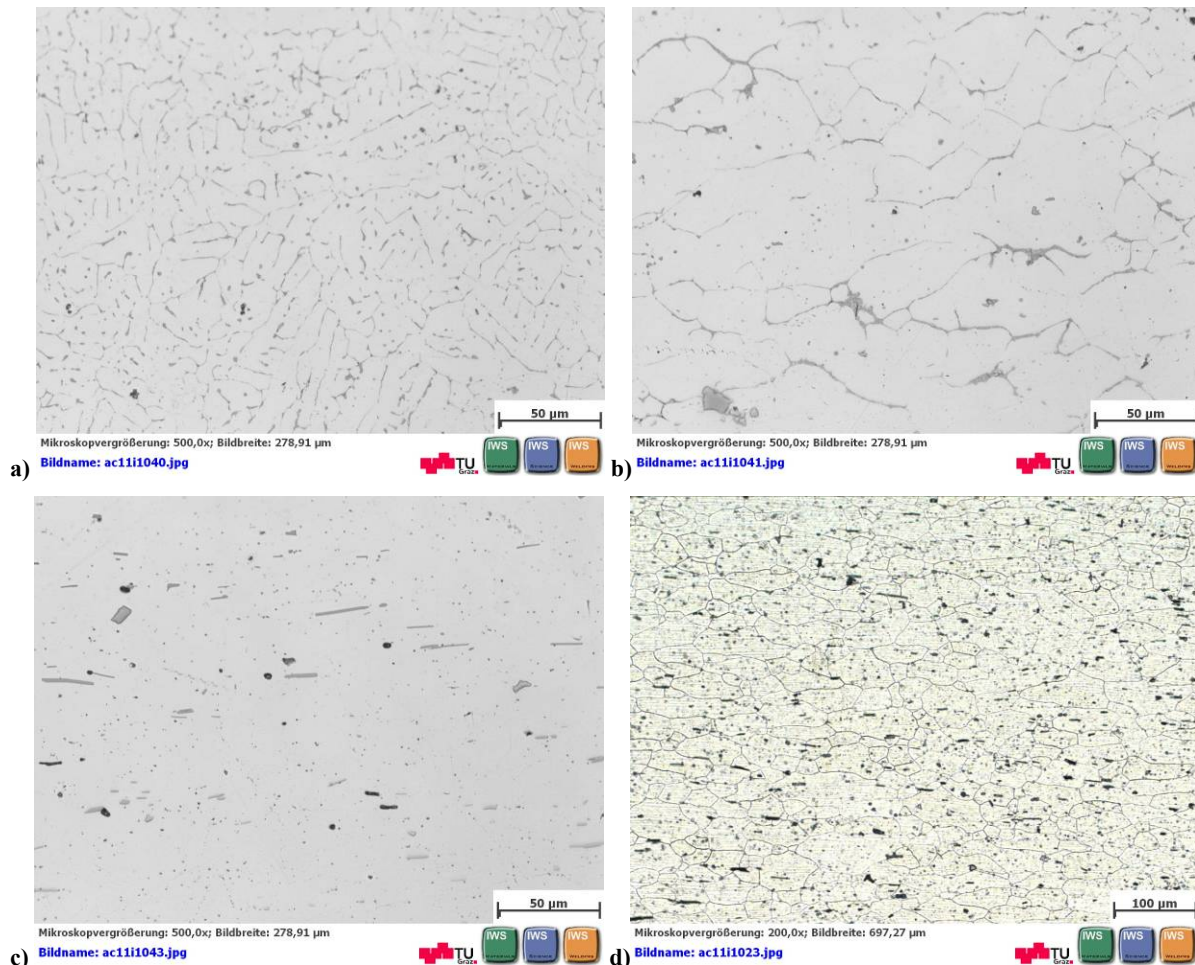


Abbildung 3.64 Schweißnahtverbindung AW-6181-T4 mit SZ AISi5 a) Schweißgut ungeätzt, b) WEZ ungeätzt, c) Grundwerkstoff ungeätzt, d) geätzter Grundwerkstoff (Flusssäure)

Durch ein EDX Mapping des Grundwerkstoffes (Abbildung 3.65) war eine genauere Aussage über die Ausscheidungen im Grundwerkstoff nur begrenzt möglich, da ausgenommen bei Al, Fe und Si kein deutlicher Kontrast erkennbar war. Daher waren andere Legierungselemente den Ausscheidungen nur schwer zuzuordnen. Das Mapping zeigte schwarze Si-haltige und graue Fe-reiche Ausscheidungen. Für eine deutlichere Aussage war das Messverfahren zu ungenau.

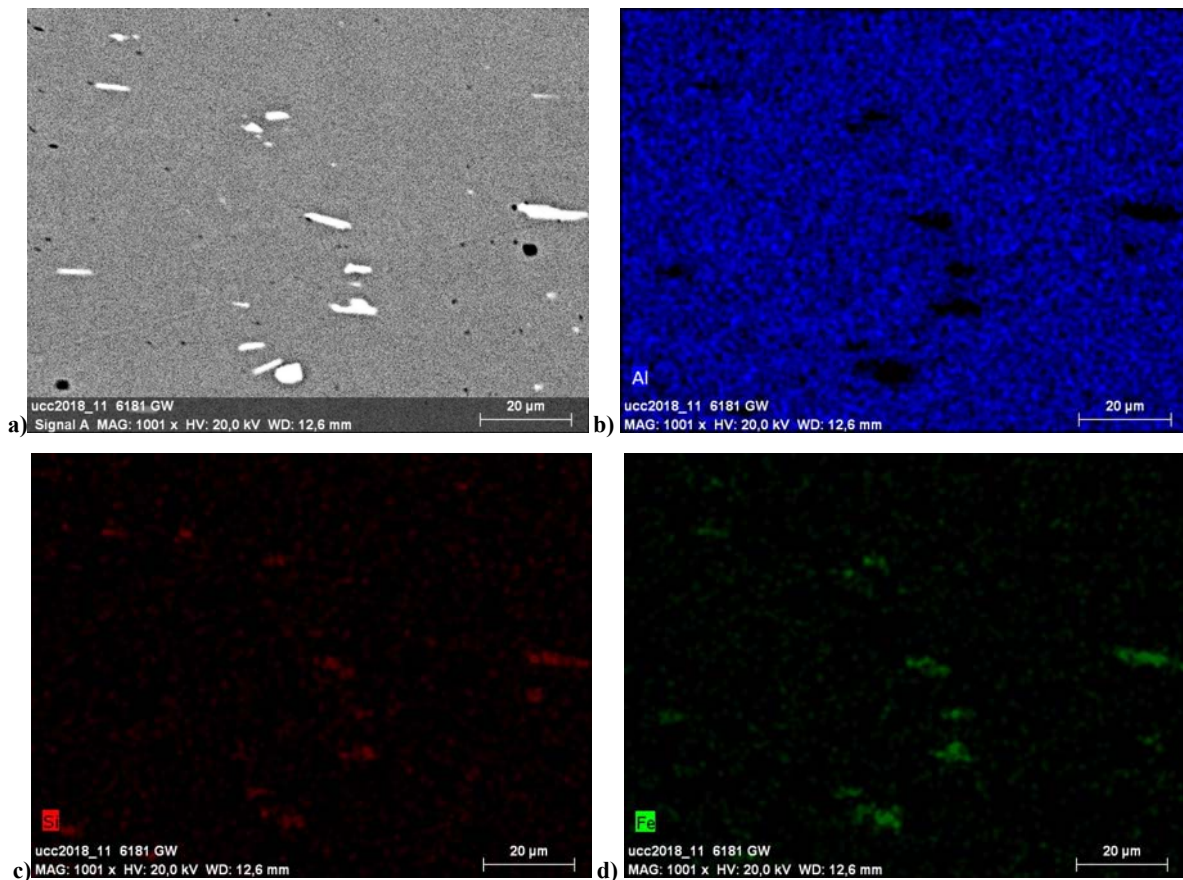


Abbildung 3.65 EDX Mappings des AW-6181-T4 Grundwerkstoffes a) Übersicht, b) Al, c) Si, d) Fe

3.1.7.4. Porenauswertung

Die Ergebnisse der Porenauswertung für das Versuchsmaterial AW-6181-T4 sind in Diagramm 3.15 zusammengefasst. Zur Veranschaulichung der ermittelten Maximal- und Minimalwerte sind die dazugehörigen Querschliffe eingefügt. Die geringste Porenfläche von 0,5% wurde mit neutralem Anstellwinkel, 50Ar/50He% als Schutzgas und einer Schweißgeschwindigkeit von 15mm/s erreicht. Der Querschliff in Abbildung 3.66 a zeigt, dass es sich dabei um eine Probe handelte, bei welcher nur wenige kleine Poren vorhanden waren. Alle anderen Werte lagen mit Porenflächen von 1,4-4,0% vergleichsweise dazu eher hoch. Mit 4% Porenfläche, ergab sich bei der Naht mit 30mm/s Schweißgeschwindigkeit und 50Ar/50He% das schlechteste Ergebnis aller Versuche. Der Querschliff (Abbildung 3.66 b) dazu zeigte, dass viele kleine und mehrere größere Poren im Schweißgut vorhanden waren.

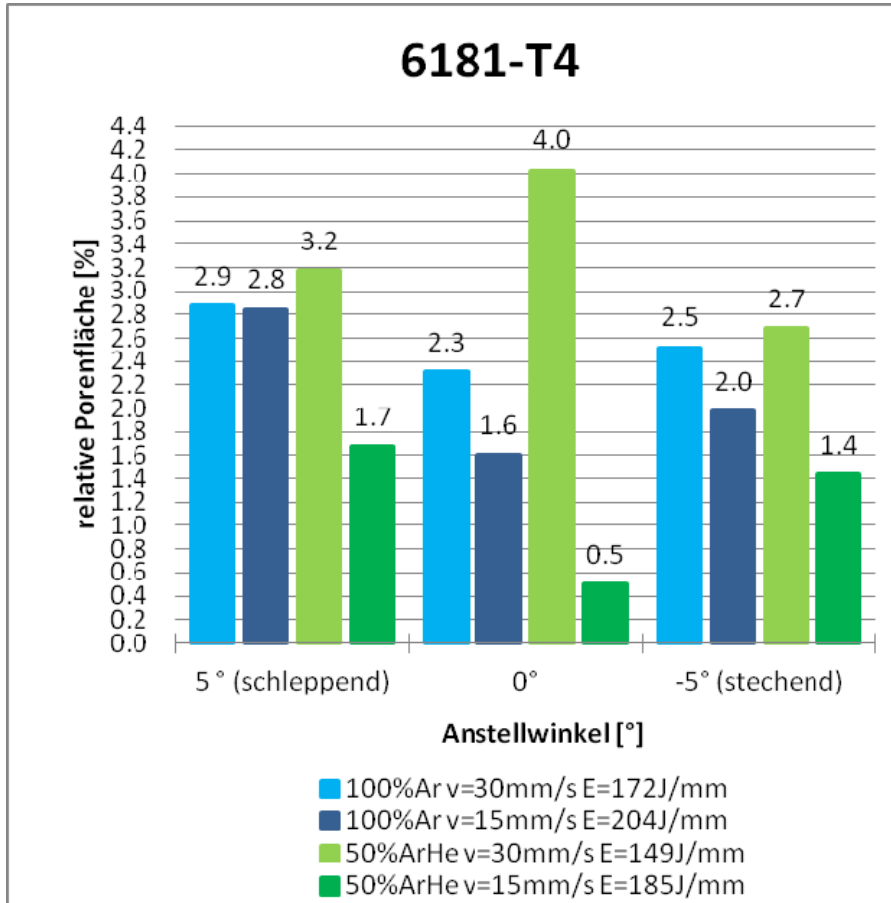


Diagramm 3.15 Porenanteil der Schweißversuche von AW-6181-T4 mit SZ AISi5

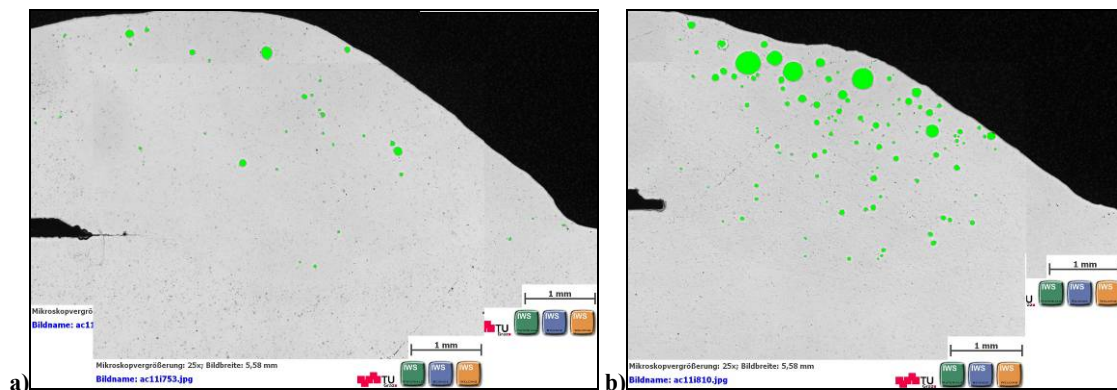


Abbildung 3.66 Schweißversuche von AW-6181-T4 mit SZ AISi5 a) Probe mit 0,5% (50Ar/50He% Gas), b) Probe mit 4,0% (50Ar/50He% Gas)

Aus den Messungen der relativen Porenfläche wurden auch die Porengrößen und deren Mengenverteilung ermittelt. Hierfür wurden je Untersuchungswerkstoff alle Messungen in einem Histogramm zusammengefasst. Die Auswertung (Diagramm 3.16, Tabelle 3.11) ergab, dass im Schweißgut AISi5 bei der Legierung AW-6181-T4 Poren mit einem Durchmesser von 0,04mm am häufigsten vorkamen. Die Poren lagen mit einem mittleren Durchmesser von ca. 0,06 mm im Größenbereich von 0,01-0,85mm.

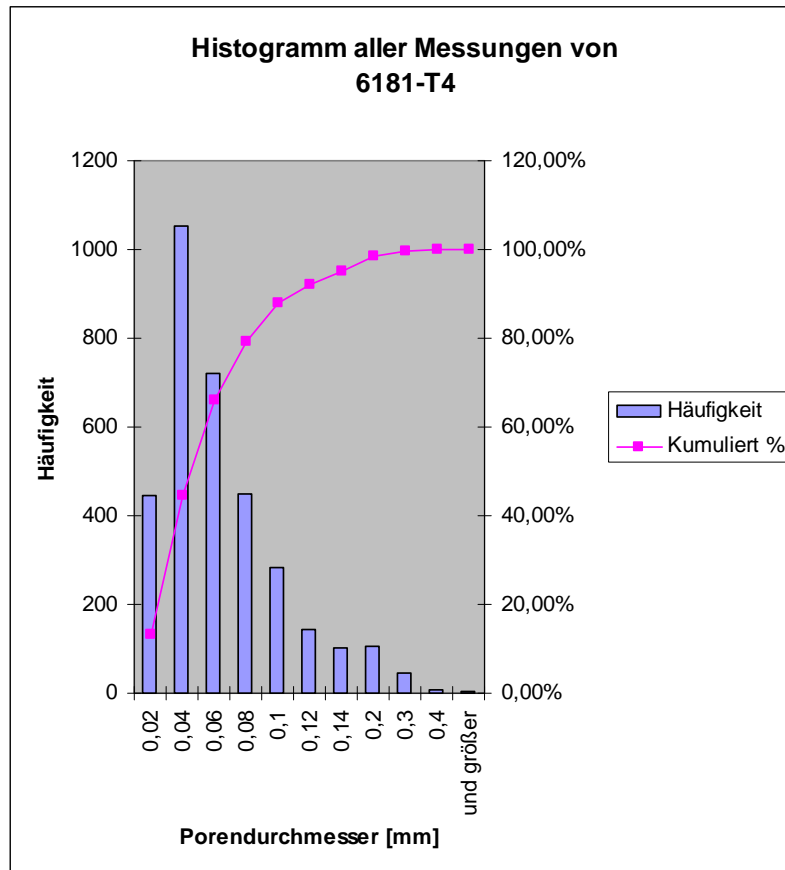


Diagramm 3.16 Mengenverteilung der Porengröße im Schweißgut von AW-6181-T4/AlSi5

Porendurchmesser [mm]	Häufigkeit 6181-T4/AlSi5
0,02	444
0,04	1051
0,06	722
0,08	450
0,1	283
0,12	145
0,14	101
0,2	106
0,3	46
0,4	6
bis 0,85	5

Tabelle 3.11 Mengenverteilung der Porengröße in Tabellenform

Durch die Einspannung der Schweißbleche mittels Schraubzwingen stellte sich wiederum ein Schweißspalt mit unterschiedlicher Höhe ein (Abbildung 3.61 S.74). Dieser wirkte sich auf die Ausbildung der Wurzelfehler aus. Die Querschliffe von AW-6181-T4/AlSi5 mit Schweißspalt (Abbildung 3.67) zeigten, dass der Wurzelfehler eine rissähnliche Form

aufwies. Jene Bereiche, die ohne Spalt verschweißt wurden, zeigten im Querschliff kleine bis große unförmige Poren am Spaltende (Abbildung 3.67 b). Es war kein Einfluss der unterschiedlichen Wurzelfehlerausbildung auf die Höhe der maximalen Scherzugkraft feststellbar. Möglicherweise haben andere Faktoren einen weitaus größeren Einfluss auf die Festigkeit der Naht.

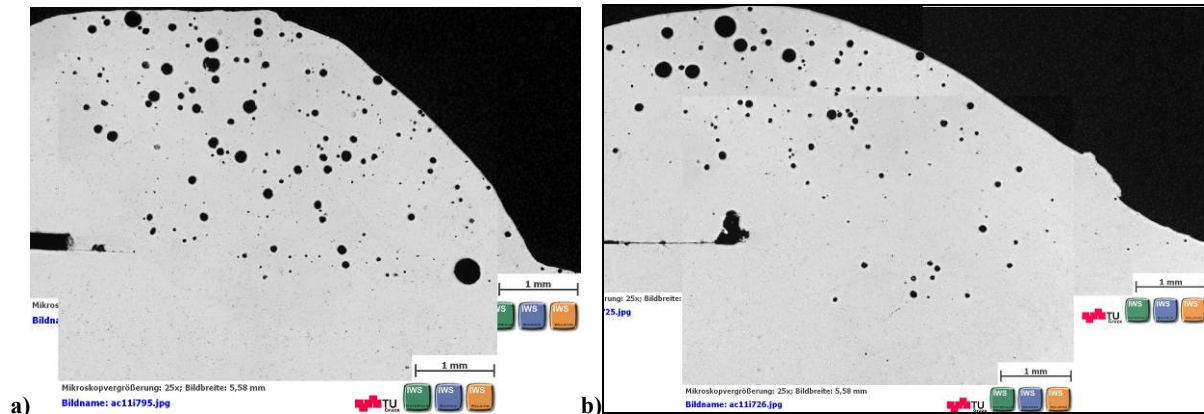


Abbildung 3.67 Querschliffe von AW-6181-T4 a) mit Spalt b) ohne Spalt

3.1.8. Auswahl der optimalen Schweißparameter

Mit den Ergebnissen aus den Hauptversuchen wurden Tabelle 3.12 und Tabelle 3.13 erstellt. Diese Tabellen beinhalten die Messwerte aus den Scherzugversuchen und der Porenauswertung, sowie eine qualitative Aussage über die Spritzermenge an der Nahtoberfläche. Die optimale Naht soll möglichst hohe Festigkeit bei einer geringen Porenfläche haben. Zur Auswahl wurden Faktoren errechnet, wobei der Faktor 1,0 jeweils den besten und der Faktor 0,0 den schlechtesten Messwert der jeweiligen Messergebnisse beschreibt. Messergebnisse dazwischen wurden prozentuell aufgeteilt. So konnten für die Scherzugfestigkeit und die relative Porenfläche die entsprechenden Faktoren berechnet werden. Den endgültigen Faktor zur Auswahl der optimalen Naht bildet die Summe aus den beiden Einzelfaktoren. Demnach ist die optimale Naht jene, welche den größten Faktor aufweist.

Nach diesem Auswahlverfahren, waren 50Ar/50He%, 30mm/s und 5° schleppend (Naht 8, Tabelle 3.12) die günstigsten Parameter für den Werkstoff AW-5083-O geschweißt mit AlMg5. Für AW-6181-T4/AlSi5 ergaben die Parameter 50Ar/50He%, 15mm/s und 0° (Naht 5, Tabelle 3.13) die beste Kombination aus Festigkeit und Porenfläche. Der Nahtquerschnitt und die Nahtoberfläche der ausgewählten Nähte sind in Abbildung 3.68 und Abbildung 3.69 zu sehen.

Schutzgas, Schw.geschw.	Anstellwinkel	Nahtnummer	σ_{max}	rel.Porenfläche	Spritzer	Faktor σ_{max}	Faktor rel.Porenfläche	Summe Faktor
[/], [mm/s]	[°]	[/]	[N/mm ²]	[%]	[/]	[N/mm ²]	[/]	[/]
100Ar, 15	5 schleppend	1	163	0.67	keine	0.29	0.59	0.88
100Ar, 15	0	2	153	0.26	keine	0.05	0.88	0.93
100Ar, 15	5 stechend	3	150	0.33	keine	0.00	0.83	0.83
50Arhe, 15	5 schleppend	4	170	0.11	wenig	0.44	0.99	1.42
50Arhe, 15	0	5	160	0.09	mittel	0.22	1.00	1.22
50Arhe, 15	5 stechend	6	166	0.09	mittel	0.35	1.00	1.35
100Ar, 30	5 schleppend	7x	195	0.85	keine	1.00	0.46	1.46
100Ar, 30	0	7xx	182	1.51	keine	0.72	0.00	0.72
100Ar, 30	5stechend	7xxx	179	1.47	keine	0.64	0.03	0.67
50Arhe, 30	5schleppend	8	180	0.17	wenig	0.67	0.94	1.61
50Arhe, 30	0	9	179	0.35	wenig	0.65	0.82	1.47
50Arhe, 30	5stechend	10	170	0.36	keine	0.45	0.81	1.26

Tabelle 3.12 Tabelle zur Auswahl optimalen Naht von AW-5083-O/AlMg5



Abbildung 3.68 Ergebnis Parameteroptimierung für AW-5083-O/AlMg5 (Optimale Naht 8: 50Ar/50He%, v=30mm/s, 5°schleppend, E=138J/mm) a) Querschliff, b) Nahtoberfläche

Schutzgas, Schw.geschw.	Anstellwinkel	Nahtnummer	σ_{max}	Rel. Porenfl	Spritzer	Faktor σ_{max}	Faktor Porenfl.	Summe Faktor
[/],[mm/s]	[°]	[/]	[N/mm ²]	[%]	[/]	[/]	[/]	[/]
100Ar, 15	5 schleppend	1	135	2.84	keine	1.00	0.34	1.34
100Ar, 15	0	2	126	1.6	keine	0.77	0.69	1.46
100Ar, 15	5 stechend	3	96	1.98	keine	0.00	0.58	0.58
50Arhe, 15	5 schleppend	4	122	1.68	keine	0.66	0.67	1.33
50Arhe, 15	0	5	124	0.5	keine	0.72	1.00	1.72
50Arhe, 15	5 stechend	6	112	1.44	wenig	0.40	0.73	1.13
100Ar, 30	5 schleppend	7	128	2.87	keine	0.82	0.33	1.14
100Ar, 30	0	8	123	2.31	keine	0.69	0.49	1.17
100Ar, 30	5 stechend	9	125	2.52	keine	0.73	0.43	1.15
50Arhe, 30	5 schleppend	10	115	2.45	keine	0.48	0.45	0.93
50Arhe, 30	0	11	112	4.03	wenig	0.39	0.00	0.39
50Arhe, 30	5 stechend	12	115	2.68	mittel	0.49	0.38	0.87

Tabelle 3.13 Tabelle zur Auswahl optimalen Naht von AW-6181-T4/AISI5

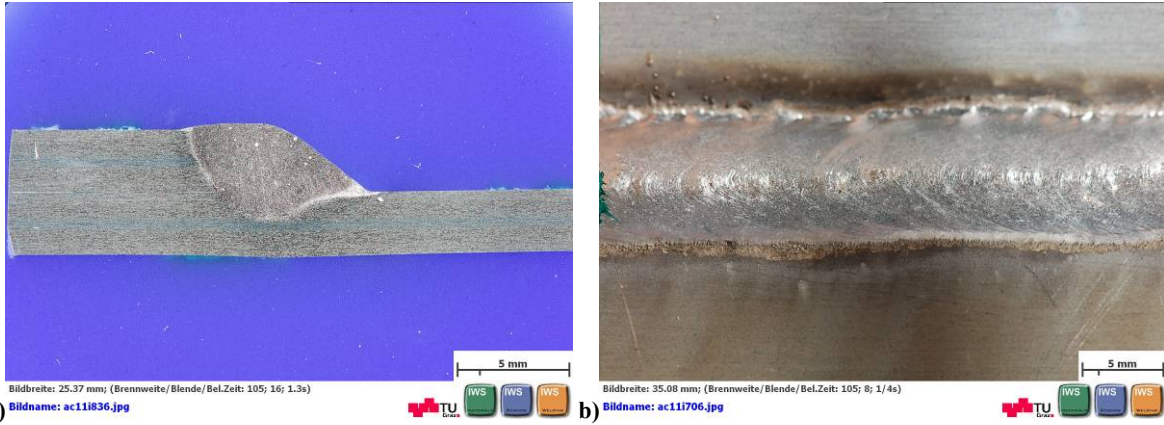


Abbildung 3.69 Ergebnis Parameteroptimierung für AW-6181-T4/AlSi5 (Optimale Naht 5: 50Ar/50He%, $v=15\text{mm/s}$, 0° , $E=185\text{J/mm}$) a) Querschliff, b) Nahtoberfläche

3.1.9. Zusammenfassung

Durch die Variation von Schutzgas, Anstellwinkel und Schweißgeschwindigkeit wurden die Schweißparameter der Aluminiumlegierungen AW-5083-O und AW-6181-T4 geschweißt mit AlMg5 und AlSi5 Massivdraht hinsichtlich Scherzugfestigkeit und relativer Porenfläche optimiert. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 3.14 zusammengefasst.

Die Scherzugversuche zeigten, dass es in gewissen Fällen sinnvoll ist, mit schleppendem Anstellwinkel zu schweißen, was im Widerspruch zu publizierten Empfehlungen [Mandal N. 2005, S.62f], [Klock H. et al. 1977, S.56], [Kammer C. 2003, S.151], [Fritz H. et al. 2010 S.180] steht. Die schleppende Brennerführung führte im Vergleich zur stechenden zu einem Anstieg der Scherzugfestigkeit von 8 auf bis zu 30%, was bei AW-5083-O/AlMg5 mit 100%Ar und beiden Schweißgeschwindigkeiten (15 u. 30 mm/s) zu erkennen war. Bei AW-6181-T4 beeinflusste der Anstellwinkel nur in Verbindung mit 100%Ar und einer Schweißgeschwindigkeit von 15mm/s die Festigkeit. Gründe hierfür könnten sein, dass der Einfluss des Anstellwinkels auf die Nahtüberhöhung bei 100%Ar größer ist als beim 50Ar/50He% Gemisch. Möglicherweise verhindert das bessere Nahtausfließen des ArHe Gemisches eine Nahtüberhöhung. Außerdem wäre denkbar, dass die laut Literatur vermehrte Wärmeeinbringung des schleppenden Verfahrens beim kälteren 100%Ar Lichtbogen sich stärker als beim heißeren 50Ar/50He% Lichtbogen auswirkt. Neben dem Einfluss auf die Nahtgeometrie wird in der Literatur [Fritz H. et al. 2010 S.180] ein porenmindernder Einfluss des schleppenden Winkels erwähnt. Diese Aussage stimmt nicht mit den hier ermittelten Ergebnissen überein. Zum Teil wurde bei schleppend geschweißten Nähten eine größere Porenfläche als bei neutral und stechend geschweißten Nähten festgestellt.

Die Schweißgeschwindigkeit von 30 mm/s zeigte nur bei AW-5083-O/AlMg5 einen Einfluss auf die Festigkeit. In Verbindung mit dem 100% Ar- Schutzgas konnte im Vergleich zu 15 mm/s Schweißgeschwindigkeit ein Festigkeitsanstieg von ca. 20% erreicht werden. Auch beim 50Ar/50He%- Gemisch konnte mit 30 mm/s ein Anstieg der Festigkeit um ca. 12.5% verzeichnet werden. Dies stimmt auch mit den Empfehlungen der Literatur [Kammer C 2003, S.151] überein, in der aufgrund der rascheren Abkühlung hohe Schweißgeschwindigkeiten für Aluminium empfohlen werden. Ein zusätzlicher Grund könnte die für 30mm/s geringere Streckenenergie und die damit verbundene reduzierte Beeinflussung des Werkstoffes sein.

Bei den Ergebnissen der Porenauswertung wurde ein Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Porenfläche festgestellt. Alle schnell verschweißten Proben ($v=30\text{mm/s}$) hatten eine höhere Porenfläche als jene, die mit 15mm/s verschweißt wurden. Dieser Einfluss war bei beiden Legierungen zu erkennen. Grund für diesen Einfluss könnte zum Beispiel die höhere Streckenenergie bei den Nähten mit 30mm/s Schweißgeschwindigkeit sein, aber auch die in der Literatur [Dilthey U. 2005, S.288] erwähnte größere Abkühlgeschwindigkeit könnte einen möglichen Grund darstellen.

Durch den Einsatz von 50Ar/50He% bei AW-5083-O/AlMg5 wurde in allen Fällen eine Porenreduktion von bis zu 80% festgestellt. Dies stimmt mit der Literatur [DVS 0913 1994, S.3] überein, in der die porenreduzierende Wirkung vom Argon Helium Gemisch erwähnt wird. Das 50Ar/50He% Schutzgas führte jedoch bei AW-6181-T4 nur zu geringer Porenreduktion und in manchen Fällen sogar zum Anstieg der rel. Porenfläche. Die Porenauswertung von AW-6181-T4/AlSi5 ergab generell eine viel höhere relative Porenfläche als bei AW-5083-O/AlMg5. Es wurde auch festgestellt, dass die durchschnittliche Porengröße von AW-6181-T4/AlSi5 größer ist. Grund für die erhöhte relative Porenfläche von AW-6181-T4/AlSi5 könnte die nicht entfernte, matte Walzstruktur der Oberfläche sein. Die Oberfläche von AW-5083-O war hingegen glänzend glatt. Es könnte



sein, dass die matte Oberfläche von AW-6181-T4 mehr Feuchtigkeit gebunden hat [Ostermann F. 2007, S.232]. Möglicherweise führte diese Feuchtigkeit zur erhöhten Porenmenge. In der Literatur [Fahrenwaldt et al. 2009, S.548] wird das Entfernen der Oxidschicht empfohlen, möglicherweise könnte man dadurch eine weitere Porenreduktion bei beiden Legierungen erreichen.

In Bezug auf die Porenbildung an der Nahtwurzel wurde ein Einfluss des Schweißspaltes auf den Wurzelfehler erkannt. Die Querschliffe der Schweißversuche zeigten, dass bei Schweißnähten mit Schweißspalt rissähnliche Wurzelfehler, und bei Nähten ohne Spalt Wurzelporen entstehen. Die Wurzelporen von AW-5083-O/AlMg5 hatten eine kreisrunde Form, jene von AW-6181-T4/AlSi5 hatten eine unregelmäßige Kontur. Möglicherweise wurde Feuchtigkeit in den vernachlässigbar kleinen Spalt von eigentlich als spaltlos definierten Proben gezogen und führte so zu dieser Porenbildung. Ein weiterer Grund war eventuell auch der unterschiedliche Gasschutz, denn bei Proben mit Spalt kann das Schutzgas auch durch den Spalt strömen und somit vor Feuchtigkeit der Atmosphäre schützen. Dies ist bei Proben ohne Spalt nicht möglich. Es wurde kein Einfluss dieser Wurzelporen auf die Festigkeit erkannt, vermutlich weil dieser aufgrund der hohen Duktilität von Aluminium nur gering war [Kosteas D, 1978, S.98]. Vujic zeigte jedoch in seiner Arbeit, dass ein Schweißspalt mit 1,1 mm die Festigkeit der Überlappverbindung von einer AlMgSi/AlSi5 Verbindung positiv beeinflusst [Vujic S. 2011, S.87]. Womöglich war der Unterschied von 0 mm und max. 0,4 mm Schweißspalt in dieser Arbeit zu gering um Festigkeitsunterschiede zu erkennen.

Die Schweißparameteroptimierung ergab für AW-5083-O/AlMg5 als bestes Ergebnis eine max. Zugfestigkeit von 195 N/mm^2 (Schweißfaktor= $\frac{\text{Zugfestigkeit Schweißverbindung}}{\text{Zugfestigkeit Grundmaterial}} = 0.65$) und eine min. rel. Porenfläche von 0.1%. Die besten Ergebnisse von AW-6181-T4 wurden mit 135 N/mm^2 (Schweißfaktor 0.57) und 0.5% erreicht. Es wurden für jede Legierung jene Parameter ausgewählt, welche das günstigste Verhältnis an max. Zugfestigkeit und min. rel. Porenfläche aufwiesen. Diese optimalen Parameter sind in Tabelle 3.14 grau hinterlegt. Generell überschritten alle gemessenen Schweißnahtfestigkeiten die erforderliche Mindestfestigkeit von 85 N/mm^2 .

Die Anwendung unterschiedlicher Schweißparameter, d.h. unterschiedlicher Streckenenergien, wirkte sich nicht auf die Härte in der WEZ bzw. im Schweißgut aus. Die Härtmessungen von AW-5083-O/AlMg5 ergaben keine Unterschiede zwischen Grundmaterial, WEZ und Schweißgut, da die Härte mit ca. 78 [HV1] quer zur Naht nahezu konstant war. Dieser Härteverlauf stimmt mit den Aussagen der Literatur [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.207] überein. Bei AW-6181-T4/AlSi5 kam es in der WEZ zu einer Härtespitze von 80 [HV1]. Dieser Bereich erstreckte sich von der Schmelzlinie bis ca. $400 \mu\text{m}$ entfernt von dieser. Die Härte im Schweißgut war mit ca. 60 [HV1] geringer als jene vom Grundmaterial mit 70 [HV1]. Das ist ein Widerspruch, denn laut Literatur [Totten G.E. et al. 2003a, S.511] sollte es bei AW-6181-T4 anstatt der Aufhärtung zu einer weicheren Zone kommen. Für höhere Festigkeiten der Schweißnaht von AW-6181-T4 empfiehlt die Literatur [Davis J.R. et al. 1994, S.385ff] zulaste der Heißrissbeständigkeit anstatt dem SZ AlSi5 z.B. den SZ AlMg5.

Schweiß- geschwindigkeit	Schutzgas / Korrekturen	Streckenenergie / [kJ/cm]	Anstellwinkel	σ_{\max} [N/mm ²]	A _{Pore} [%]
AW-5083-O mit AlMg5					
15 mm/s	100%Ar Pk=1,8	1,78	5°schl.	163±8	0,7
			0°	153±10	0,3
			5°st.	150±9	0,3
	50Ar/50He% LbK=3	1,46	5°schl.	170±14	0,1
			0°	160±6	0,1
			5°st.	166±6	0,1
30 mm/s	100%Ar	1,55	5°schl.	195±16	0,8
			0°	182±5	1,5
			5°st.	179±8	1,5
	50Ar/50He% LbK=3	1,38	5°schl.	180±11	0,3
			0°	179±7	0,4
			5°st.	170±12	0,4
AW-6181-T4 mit AlSi5					
15 mm/s	100%Ar	2,04	5°schl.	135±25	2,8
			0°	126±16	1,6
			5°st.	96±16	2,0
	50Ar/50He%	1,85	5°schl.	122±14	1,7
			0°	124±23	0,5
			5°st.	112±15	1,4
30 mm/s	100%Ar	1,72	5°schl.	128±11	2,9
			0°	123±4	2,3
			5°st.	125±2	2,5
	50Ar/50He%	1,49	5°schl.	115±23	3,2
			0°	112±15	4,0
			5°st.	115±14	2,7

Tabelle 3.14 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Schweißversuchen

3.2. Tiefziehfähigkeit von Aluminium

3.2.1. Grundlagen

Allgemein ist die Tiefziehfähigkeit (hier: Kaltumformbarkeit) eines Werkstoffes jene versagensfrei die Endform eines Hohlteils anzunehmen. Die Güte des Umformergebnisses ist aber nicht allein vom Bauteilwerkstoff abhängig, sondern auch von Werkstoff und Werkzeug der Presse (Abbildung 3.70). Diese Arbeit konzentriert sich nur auf den Bereich des Werkstoffes, dennoch werden die Werkzeuge für das Tiefziehen kurz diskutiert, da diese mitunter den industriellen Einsatz von Aluminium bestimmen [Jäniche W. et al. Bd. 1 1985, S.595f].

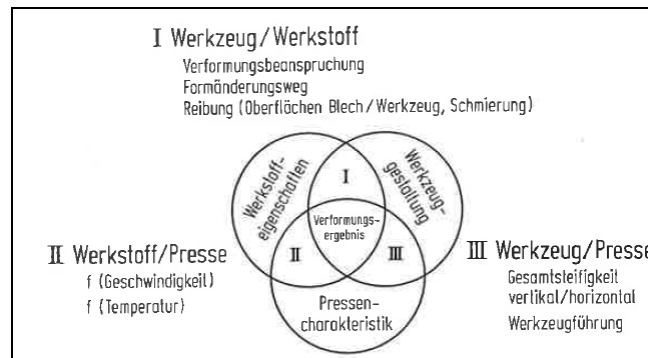


Abbildung 3.70 Einflussgrößen auf das Verformungsergebnis [Jäniche W. et al. Bd. 1 1985, S.595]

3.2.1.1. Werkzeuge für das Tiefziehen

Meist können für Stahl konzipierte Werkzeuge auch für Aluminium verwendet werden. Aluminium erfordert durch die geringere Streckgrenze weniger Umformkraft und führt zu geringerem Werkzeugverschleiß. Daher können für Aluminium kostengünstigere Werkzeuge mit dennoch relativ hoher Standzeit verwendet werden. Es gibt dennoch Unterschiede beim Tiefziehen von Stahl und Aluminium. Abbildung 3.71 zeigt eine schematische Darstellung eines Tiefziehvorganges. Die wesentlichen Bauteile sind die Platine (Werkstück), der Stempel, der Ziehring (Matrize) und der Niederhalter [Davis J.-R. et al. 1994, S.233ff], [Fritz H. et al. 2010, S.455].

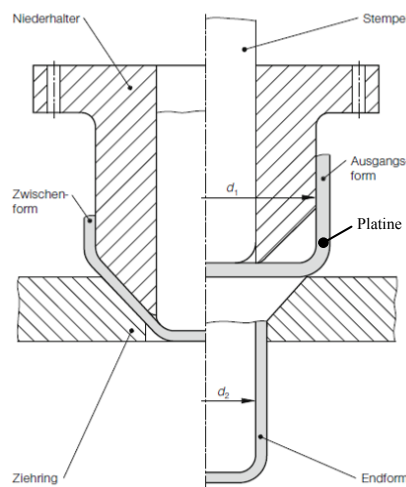


Abbildung 3.71 Schematische Darstellung des Tiefziehvorganges [Fritz H. et al. 2010, S.455]

Generell können für Stahl konzipierte Werkzeuge für Al-Umformvorgänge verwendet werden, jedoch muss gewährleistet sein dass es beim Al-Blech zu keinen übermäßigen

Dehnungen kommt, und dass sich das Al- Blech nicht im Ziehspalt verklemmt. Beim Tiefziehen von Al sollte die Wandstärke gleichmäßig erhalten bleiben. Hingegen kann die Dicke bei Stahlumformungen bis zu 25% abnehmen. Daher wird für Al- Tiefziehvorgänge von niedrigfesten Legierungen eine Spaltbreite von ca. 1,1 facher Blechdicke vorgeschlagen. Als Spalt wird der Unterschied zwischen Stempel- u. Ziehringdurchmesser verstanden. Diese Spaltgröße ist bei höher festen Al Legierungen auf das 1,15 bis 1,25-fache anzuheben. Neben der Spaltbreite werden auch für Matrizenradien Empfehlungen angeführt. Zu große Matrizenradien führen zur Faltenbildung, kleine Stempelradien hingegen zu Rissen. Für Al- Werkzeuge werden üblicherweise Radien von 8 bis 10-mal der Blechdicke verwendet. Das Schmiermittel reduziert die Reibungskräfte zwischen Platine und Werkzeugoberfläche und muss auf das jeweilige Platinenmaterial abgestimmt werden. Als Schmiermittel für Aluminium werden Petroleum mit Zusatz von kornfreiem Grafit, Rübölersatz oder mineralische Fette empfohlen. Aluminium neigt zu Kaltaufschweißungen auf den Werkzeugen, dies beeinflusst den Werkzeugverschleiß und die Ziehteiloberflächenqualität. Durch eine Optimierung von Werkzeug, Schmiermittel und Werkstoff kann diesem Verschleiß entgegengewirkt werden. Ein weiteres Problem stellt die Oxidschicht an der Oberfläche von Aluminium dar. Größere Oxidschichtdicken neigen beim Umformen verstärkt zum Aufreißen, verschlechtern somit den Korrosionsschutz und führen zu höherer Rissempfindlichkeit des Bauteils [Fritz H. et al. 2010, S.454], [Davis J.-R. et al. 1994, S.233ff], [Doege E. Behrens B.-A. 2010, S.444f].

3.2.1.2. Werkstoffkennwerte der Kaltumformbarkeit

Um die Tiefziehbarkeit zu untersuchen, gibt es folgende Methoden [Lehnert W. et al. 1996, S.156]: der Erichsen-, der Engelhardt-, der Fukui-, der Nakazima- sowie der Swift-Versuch. Diese werden aber in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt [Doege E. Behrens B.-A. 2010, S.444f], [Lehnert W. et al. 1996, S.156]. Die Güte des Umformergebnisses verschiedener Umformprozesse wie Tiefziehen, Streckziehen, Profilieren, Biegen oder Abkanten kann unter anderem auch auf bestimmte Werkstoffeinflüsse der Platine zurückgeführt werden. Diese sind:

- Beschichtung
- Rauheit R_a [μm]
- Blechdicke s [mm]
- R_p [N/mm^2], R_m [N/mm^2], A_{50} [%]
- r und n Werte [/]

Die Oberfläche (inkl. Beschichtung) stellt durch die Reibungskräfte bei der Umformung eine Einflussgröße dar, die sich negativ auf Kraftaufwand, Temperaturentwicklung und Verschleiß auswirken. Der arithmetische Mittenrauwert R_a und die Spitzenzahl S haben sich als sinnvolle Bewertungsgrößen für die Oberfläche herausgestellt. [Jäniche W. et al. Bd. 1 1985, S.600], [Doege E. 2010 S.224].

Für eine vergleichende Bewertung der Kaltumformbarkeit, stellen die aus dem Zugversuch (R_p , R_m , A_{50} , r , n) ermittelten mechanischen Eigenschaften die wichtigste Grundlage dar. Mit diesen Kenngrößen kann die Tiefziehfähigkeit in befriedigendem Ausmaß abgeschätzt werden. Für vergleichende Betrachtungen unterschiedlicher Werkstoffe kann es sinnvoll sein, das Produkt von Bruchdehnung und Zugfestigkeit zu betrachten [Jäniche W. et al. Bd. 1 1985, S.596ff]. Vor allem in der Feinblechentwicklung gibt es noch zwei weitere wichtige Kenngrößen. Dies sind die senkrechte Anisotropie (r) und der Verfestigungsexponent (n). Die



senkrechte Anisotropie stellt für die Tiefziehfähigkeit eine wichtige Informationsquelle dar. Der Verfestigungsexponent liefert hingegen Informationen für die Streckziehfähigkeit. Gute Kaltumformbarkeit ist aufgrund einer hohen Gleichmaßdehnung, niedrigen Streckgrenze (oder auch niedrigem Streckgrenzenverhältnis R_e/R_m) und hohen r - und n -Werten aus dem Zugversuch charakterisiert. Die Bestimmung dieser Werte birgt gewisse Unsicherheiten in sich, und insbesondere der r Wert unterliegt, wie alle texturbedingten Eigenschaften, stark herstellungsbedingten Einflüssen [Mandal N. 2005, S.220], [Moeller E. 2008 S.201], [Jäniche W. et al. Bd. 1 1985, S.604].

Durch die unterschiedliche Orientierung ausgeprägter Texturen (kristallographische und Walztexturen) im Werkstoff kann es bei der Prüfung zu unterschiedlichen r -Werten kommen. Daher wird allgemein die mittlere Anisotropie r_m (Formel (22)) aus Messungen der senkrechten Anisotropie r (Formel (21)) von Proben im Winkel von 0° , 45° , und 90° zur Walzrichtung (Abbildung 3.73) berechnet [Doege E. Behrens B.-A. 2010, S.300ff].

$$r = \frac{\ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{s_1}{s_0}\right)} = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad (21)$$

r ... senkrechte Anisotropie [/], $b_{0,1}$... Probenbreite vor und nach Verformung [mm], $s_{0,1}$... Probendicke vor und nach Verformung [mm], φ_b ... wahre Breitendehnung [/], φ_s ... wahre Dickendehnung [/]

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (22)$$

r_m ... mittlere Anisotropie [/], r_{0° ... senkrechte Anisotropie in Walzrichtung [/], r_{45° ... senkrechte Anisotropie in 45° zur Walzrichtung [/], r_{90° ... senkrechte Anisotropie in 90° zur Walzrichtung [/]

Für rotationsymmetrische Tiefziehteile und dem damit verbundenen Problem der Zipfelbildung (Abbildung 3.72) ist auch die planare Anisotropie Δr wichtig. Angestrebt sollte ein Δr von 0 werden. Bei $\Delta r > 0$ entstehen Zipfel in 0 und 90° und bei $\Delta r < 0$ unter 45° zur Walzrichtung [Jäniche W. et al. Bd. 1 1985, S.597f]. Hohe r - Werte reduzieren die Einzugskräfte im Flansch und ermöglichen eine verbesserte Übertragung der Stempelkraft [Doege E. Behrens B.-A. 2010, S.300ff], [Jäniche W. et al. Bd. 1 1985, S.597f].

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (23)$$

Δr ... planare Anisotropie [/], r_{0° ... senkrechte Anisotropie in Walzrichtung [/], r_{45° ... senkrechte Anisotropie in 45° zur Walzrichtung [/], r_{90° ... senkrechte Anisotropie in 90° zur Walzrichtung [/]

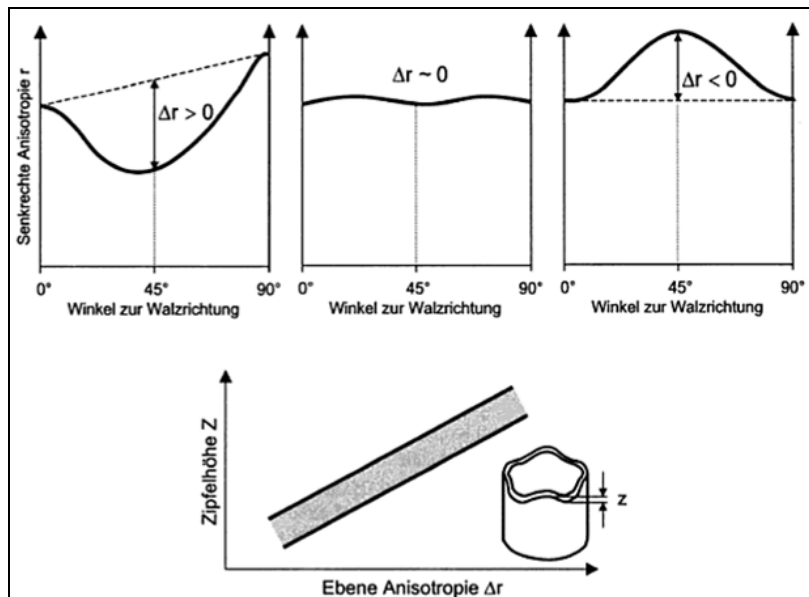


Abbildung 3.72 Auswirkung der Anisotropie auf die Zifpelbildung bei Tiefziehvorgängen [Burkhard H. 2003, S.135]

Nach DIN ISO 10113 sollte der jeweilige r -Wert bei einer Dehnung von 20% ermittelt werden. Die Messung darf aber nur im Bereich der homogenen plastischen Verformung erfolgen, d.h. überschreitet 20% Dehnung die Gleichmaßdehnung, so kann die Messung auch bei einer Dehnung zwischen 10 und 20% erfolgen. Laut Norm beinhaltet das Messergebnis in den Indizes noch Angaben über die Walzrichtung und die Dehnung bei der gemessen wurde (z.B. $r_{0/15}$). [Doege E. Behrens B.-A. 2010, S.300ff], [DIN ISO 10113:2009]



Abbildung 3.73 Probenlage bei der Ermittlung der Anisotropiewerte [Doege E. Behrens B.-A. 2010, S.300ff]

In der Norm DIN ISO 10275 wird der Verfestigungsexponent in einem Mehrpunktverfahren ermittelt. In dieser Arbeit wurde der Verfestigungsexponent jedoch über die Gleichmaßdehnung bestimmt, denn an dieser Stelle kann die Neigung der doppellogarithmischen Fließkurve mit der Vereinfachung wie in Formel (24) berechnet werden. Durch hohe Verfestigungsexponenten werden Dehnungen und Spannungen besser verlagert, dadurch wird die vorzeitige Rissbildung verzögert [Doege E. Behrens B.-A. 2010, S.300ff], [DIN ISO 10275:2009].

$$n = \varphi_{gl} = \ln(1 + \varepsilon_{gl}) \quad (24)$$

n ... Verfestigungsexponent[/], φ_{gl} ...wahre Dehnung am Punkt der Gleichmaßdehnung[/], ε_{gl} ... Gleichmaßdehnung[/]

3.2.2. Versuchsaufbau und -ablauf

Alle Zugproben mit den Abmessungen nach DIN EN ISO 6792-1, wurden auf der Zugprüfmaschine RMC100 in Anlehnung an die DIN ISO 10113 [DIN ISO 10113:2009] geprüft. Der Zugversuch wurde jeweils bei einer Längsdehnung von 20% unterbrochen, um

die Breiten- und Dickenänderungen zu messen. Dies erfolgte mit einem digitalem Messschieber ($\pm 0,01\text{mm}$). Anschließend wurde der Zugversuch ohne weitere Unterbrechungen bis zum Probenbruch durchgeführt. Die Anisotropie-Werte wurden nach den Formeln (21) bis (23) und der Verfestigungsexponent nach Formel (24) ausgewertet. Für die Kennwerte (R_e , R_m , A_{50} und A_g) wurde der Mittelwert aus 6 Proben (je zwei Proben in 0° , 45° und 90° zur Walzrichtung) ermittelt. Die Mittelwerte der senkrechten Anisotropiewerte wurden pro Winkel zur WR aus je zwei Proben ermittelt [DIN EN ISO 6792-1:2009].

3.2.3. Flachzugversuche

Eine Gegenüberstellung der Spannungsdehnungskurven (Diagramm 3.17) zeigt die unterschiedlichen Verläufe von Stahl (DD11 u. DD13) und Aluminium (AW-5083-O und AW-6181-T4) im Zugversuch. Beide Werkstoffgruppen hatten zunächst einen linear-elastischen Verlauf nach dem Hooke'schen Gesetz [Issler L. et al. 2006 S.76f], bei den Stahlsorten (DD11 u. DD13) geht der linear elastische Bereich nach der ausgeprägten Streckgrenze in den plastischen Bereich über. Die geprüften Aluminiumproben hatten aufgrund ihrer kubisch flächenzentrierten Gitterstruktur keine ausgeprägte Streckgrenze und der Übergang zwischen linear-elastischen und plastischen Bereich war fließend [Ruge J. et al. 2002, S.14f]. Auffällig war der „sägezahnartige“ Verlauf der AlMg Legierung (AW-5083-O). Dieser Verlauf beruht auf dem PLC-Effekt (Portevin-Le Chatelier- Effekt), oder auch dynamische Reckalterung genannt. Dabei werden die zur Verformung nötigen Versetzungsbewegungen durch gelöste Mg-Atome behindert. Die Versetzungen können sich erst ab einer gewissen Spannung von diesen Mg-Verankerungen losreißen, bis dahin steigt die Fließspannung. Nach dem Überwinden dieses Hindernisses sinkt die Fließspannung wieder bis zu dem Punkt, bei dem die Versetzung erneut auf andere Mg-Atome stößt. Durch diesen ständigen Anstieg und Abfall der Fließspannung kommt es bei der AlMg(Mn) Legierung zu dem charakteristischen Verlauf der Spannungsdehnungskurve [Ostermann F. 2007, 123ff], [Ruge J. et al. 2002, S.14f], [Issler L. et al. 2006, S.76f].

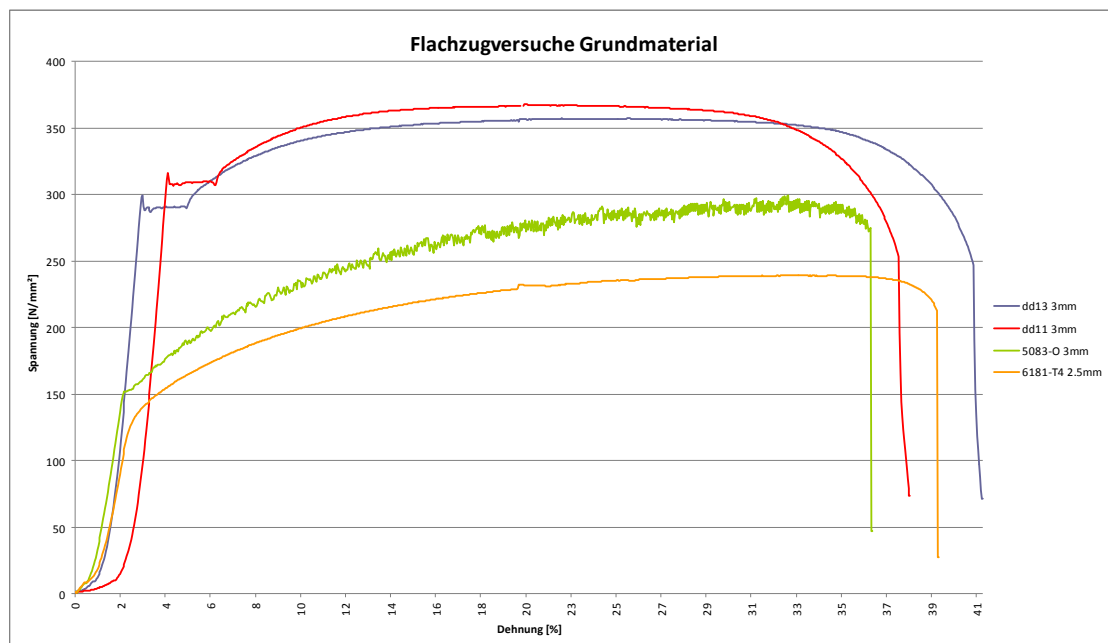


Diagramm 3.17 Spannungsdehnungsdiagramm der Werkstoffe DD13, DD11, AW-5083-O und AW-6181-T4 von Flachzugproben nach DIN EN ISO 6792-1.

Die Al- Flachzugproben zeigen den typischen Scherbruch unter 45° zur Belastungsrichtung und weisen im Vergleich zu den Stahlproben geringere Brucheinschnürungen auf (Abbildung 3.74 a und b) [Weißbach W. et al. 2011, S.381], [Issler L. et al. 2006, S.144], [Matschinsky W. 2007 S.299].



Abbildung 3.74 gebrochene Flachzugproben a) Vergleich aller Werkstoffe b) Scherbruch einer Flachzugprobe (AW-5083-O)

Zusammenfassend wurden alle Ergebnisse aus den Flachzugversuchen in Tabelle 3.15 aufgelistet. Die Festigkeitskennwerte (R_e , $R_{p0.2}$, R_m , A_{50}) von DD11 und DD13 stimmten mit jenen aus der Literatur [Voestalpine 2011, S.4] überein, nur die Anisotropiewerte wichen von den bekannten Werten (siehe Anhang A) ab. Auch bei den Aluminiumwerkstoffen stimmen die Festigkeitskennwerte mit der Literatur [Ostermann F. 2007, S.754ff] gut überein, aber wiederum wichen die Kennwerte der Anisotropie von Werten aus der Literatur [Ostermann F. 2007, S.514, 785] ab. Grund für diese Abweichungen könnten herstellungsbedingte Unterschiede [Mandal N. 2005, S.220] aber auch Messabweichungen sein.

Material/ Blechdicke	$R_{p0.2}$ bzw. R_{eH} N/mm ²	R_m N/mm ²	R_e/R_m /	A_{50} %	A_g %	n_{Ag} /	$r_{m20\%}$ /	$\Delta r_{20\%}$ /	$R_{p0.2}^*$ N/mm ²	$A_{50}^*A_5^*$ Min. N/mm ²	A_g %	r_m^* /	Δr /
DD13 / 3 mm	289	358	0.8	35	20	0.18	1.14	-0.071	170-310	33	22	0.96	-0,105
DD11 / 3 mm	311	368	0.84	31	16	0.15	1.10	0.032	170-340	28	17	0.93	-0,055
AW-5083-O / 3 mm	154	299	0.5	29	22	0.20	0.69	-0.10	145	22	18	0,9	-0,3
AW-6181-T4 / 2,5 mm	135	240	0.56	36	26	0.23	0.79	-0.07	125	25	22	0,65	/

Tabelle 3.15 Mechanische Kennwerte aus den Flachzugversuchen für die Werkstoffe DD13, DD11, AW-5083-O und AW-6181-T4 (* ... Kennwerte aus Lit. [Ostermann F. 2007, S.514, 754, 785], [Voestalpine 2011, S.4], [Anhang A S.128])



3.2.4. Zusammenfassung

Gemäß Literatur kann die Tiefziehfähigkeit durch das Streckgrenzenverhältnis, die Bruchdehnung sowie den r - und n -Wert abgeschätzt werden. Durch Flachzugversuche nach DIN EN ISO 6792-1:2009 und in Anlehnung an DIN ISO 10113:2009 wurde ein Vergleich der Tiefziehfähigkeit von Stahl (DD11 u. DD13) mit Aluminium (AW-5083-O u. AW-6181-T4) erstellt.

Die ermittelten Dehngrenzen von Aluminium waren nur halb so groß wie jene von DD11 und DD13. Die Aluminiumlegierungen benötigen daher geringere Umformkräfte. AW-5083-O und AW-6181-T4 zeigten auch ein günstigeres Streckgrenzenverhältnis ($R_e/R_m \sim 0.5$) als DD11 und DD13 ($R_e/R_m \sim 0.8$). Die Bruchdehnungen hatten vergleichsweise ähnlich hohe Werte. Die Bruchdehnung von AW-6181-T4 mit 36% lag in der gleichen Größenordnung wie jene von DD13 mit 35%, und jene von AW-5083-O (29%) lag eher im Bereich von DD11 (31%). Auch der Verfestigungsexponent beider Aluminiumlegierungen war höher. Die Aussagekraft der Anisotropiewerte war aufgrund der Messabweichungen beschränkt. Nach den Messergebnissen liegen die r_m Werte klar unter denen der Stähle. Nach den Werten aus der Literatur liegt jedoch nur AW-6181-T4 mit 0.65 klar unter denen von DD11 und DD13 (ca. 0.95). Jener Wert von AW-5083-O ist mit 0.9 sehr nahe an den der Stähle, allerdings ist auch der Δr - Wert deutlich größer (-0,3).

Aufgrund der erzielten Ergebnisse ist ein Einsatz von Aluminiumlegierungen für das Kompressorgehäuse im Sinne der Tiefziehbarkeit möglich. Problematisch könnten nur die Fließfiguren (PLC- Effekt) von AW-5083-O an der Ziehteiloberfläche und die geringeren r -Werte sein. Testversuche mit den Aluminiumlegierungen wären hilfreich.

3.3. Korrosionsbeständigkeit von Aluminium

3.3.1. Grundlagen

3.3.1.1. Allgemeines zum Korrosionsverhalten

a) Einflussfaktoren

Zahlreiche Einflussfaktoren (Abbildung 3.75) bestimmen die Korrosionsbeständigkeit metallischer Werkstoffe. Diese werden wie folgt eingeteilt [Roos E. et al. 2005, S.351], [Ostermann F. 2007, S.228]:

- *Medium*: Art des Korrosionsmediums (z.B. Cl-Gehalt, pH-Wert, O₂-Gehalt), Dauer der Einwirkung, Trockenphasen, Temperatur, Verunreinigungen, Strömung des Korrosionsmediums, Kavitation, Erosion.
- *Werkstoff*: Zusammensetzung, Passiv- bzw. Oxidschicht, Beständigkeit, Leitfähigkeit Legierungselemente, Gefüge und Ausscheidungen, Kaltumformgrad, Oberflächenbeschaffenheit.
- *Belastung und Konstruktion*: Belastungsgeschwindigkeit, Eigenspannungen, Betriebsbelastung, Spalte, Hohlräume, Flüssigkeitsansammlungen, Kontakt mit Fremdmetallen, mechanische Verbindungen, Schweißverbindungen, mechanische Bearbeitung, Beschichtungen.
- *Temperatur*

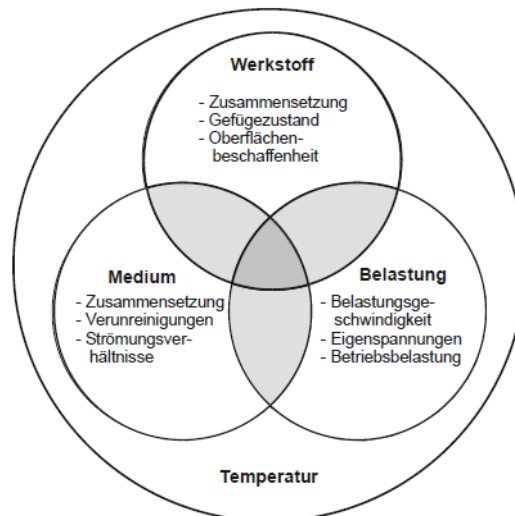


Abbildung 3.75 Einflüsse auf das Korrosionsverhalten [Roos E. et al. 2005, S.351]

Aufgrund der Kombination dieser Faktoren entstehen unterschiedliche Korrosionsarten, die im Anschluss diskutiert werden. Zuvor bedarf es jedoch den Aufbau der Oxidschicht von Aluminium und die Grundlagen der elektrochemischen Korrosion zu kennen.

b) Oxidschicht

Aluminium bildet eine dünne, dichte und festhaftende Schutzschicht von sehr geringer Elektronen- und Ionen-Leitfähigkeit. Dadurch passiviert sich die Oberfläche. Dies ist der Grund für die Korrosionsbeständigkeit von Aluminium, obwohl es zugleich ein Metall mit hoher Reaktionsenergie ist. Die elektrochemische Spannungsreihe in Abbildung 3.76 zeigt, dass es sich bei Aluminium um ein unedles Metall handelt. Die Oxidschicht teilt sich in zwei Teile (Abbildung 3.77). Bei der unteren und dünneren Schicht handelt es sich um eine nahezu

porenfreie Sperrschicht. Die darüber liegende Schicht ist porös und kann Feuchtigkeit aufnehmen. Die Oxidschicht ist in einem pH-Bereich von 4,5 bis 8,5 chemisch beständig. Außerhalb dieses Bereiches kommt es zur Auflösung der Oxidschicht und zum flächigen Metallabtrag. Innerhalb besteht vermehrt die Gefahr der Lochfraßbildung [Ostermann F. 2007, S.232f].

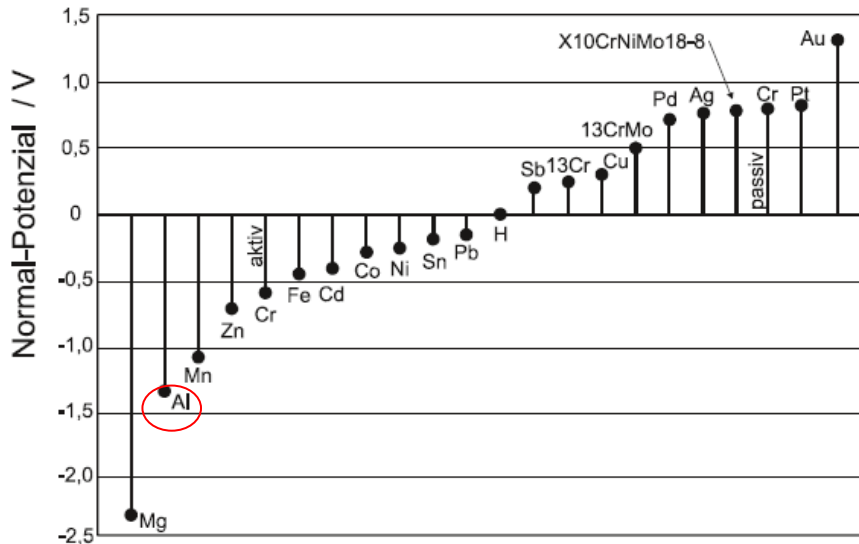


Abbildung 3.76 Elektrochemische Spannungsreihe der Metalle [Roos E. et al. 2005, S.354]

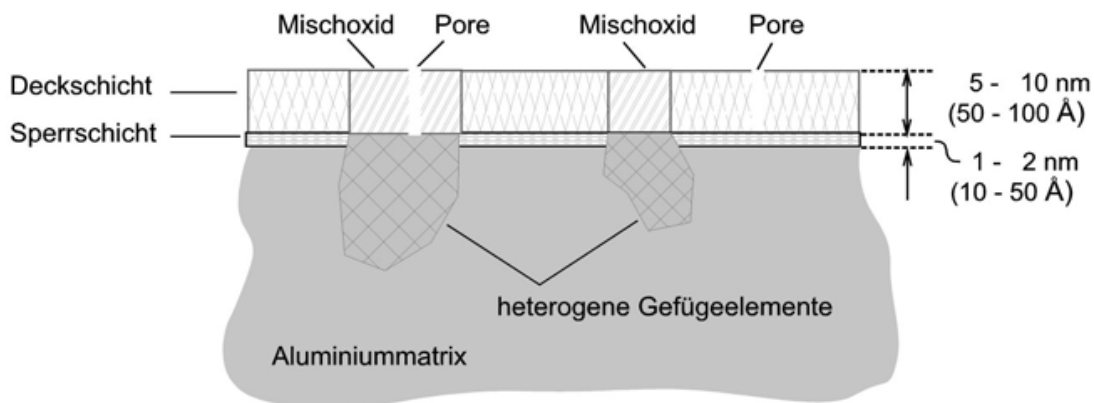
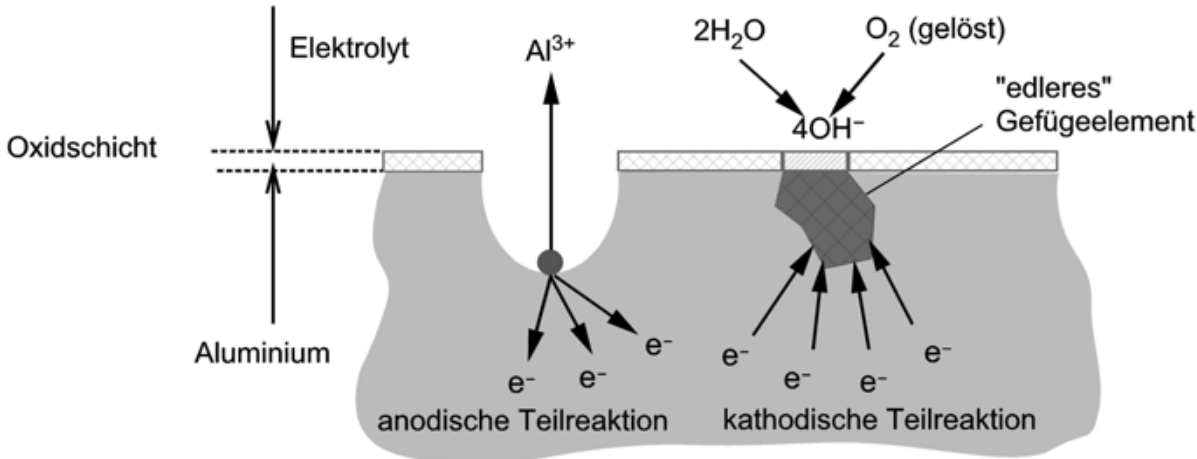


Abbildung 3.77 Aufbau der Oxidschicht von Aluminium [Ostermann F. 2007, S.232]

c) Elektrochemische Korrosion von Aluminium

Die elektrochemische Korrosion von Aluminium besteht, wie bei allen Korrosionsvorgängen in Elektrolyten, aus der Koppelung zweier Teilprozesse. Diese sind die anodische und kathodische Teilreaktion (Abbildung 3.78). Grundlage für die Korrosion ist die Elektronen leitende Verbindung zweier Metalle mit unterschiedlichem elektrochem. Potential und das Vorhandensein einer Ionen- leitenden Flüssigkeit (Elektrolyt). Sind diese Voraussetzungen gegeben, kommt es zur Korrosion. Bei der anodischen Teilreaktion oxidiert Aluminium und trennt sich von seinen drei Valenzelektronen. Diese freien Elektronen werden für die Reduktion von Sauerstoff und Wasser zu OH⁻ benötigt (kathodische Teilreaktion). Die dabei entstehenden Ionen (Al³⁺, OH⁻) verbinden sich anschließend zum schwer löslichem Al(OH)₃. Diese elektrochemischen Abläufe werden durch Zwischenreaktionen unter dem Vorhandensein von Cl beschleunigt [Schulze G. 2010, S.69], [Ostermann F. 2007, S.236f], [Roos E. et al. 2005, S.352f].



anodische Teilreaktion (Oxidationsschritt): kathodische Teilreaktion (Reduktionsschritt):



Abbildung 3.78 Elektrochemischer Korrosionsmechanismus von Aluminium [Ostermann F. 2007, S. 236]

3.3.1.2. Korrosionsarten

Infolge des elektrochemischen Korrosionsmechanismus, sowie den vorher beschriebenen Einflussfaktoren entstehen unterschiedliche Korrosionsarten. Diese Korrosionsarten werden im Zusammenhang mit Aluminiumknetlegierungen im Weiteren näher diskutiert [Roos E. et al. 2005, S.350].

Angriffsform	Bezeichnung	Schema
gleichmäßig	Korrosion unter - Wasserstoffentwicklung - Sauerstoffverbrauch (Flächenkorrosion)	
ungleichmäßig	Kontaktkorrosion	
	Lochfraßkorrosion	
	Selektive Korrosion	
	Spaltkorrosion	
	Physikalisch induzierte Wasserstoffrissbildung	
	Spannungsrisskorrosion anodisch, kathodisch	
	Dehnungsinduzierte Risskorrosion	
	Schwingungsrisskorrosion	
	Chemische Wasserstoffrissbildung	
	Interkristalline Korrosion Kornzerfall	

Abbildung 3.79 Korrosionsarten [Roos E. et al. 2005, S.350]

a) Gleichmäßige Flächenkorrosion

Bei der Flächenkorrosion erfolgt der Materialabtrag nahezu gleichmäßig auf der gesamten Oberfläche. Dies kommt bei Aluminium nur unter Einwirkung von Säuren bzw. Laugen (pH-Werte $<4,5$ und $>8,5$) sowie unter Sauerstoff vor. Die gleichmäßige Flächenkorrosion unter Sauerstoff klingt bei Aluminium mit zunehmender Zeit ab, da das Korrosionsprodukt vor weiterer Korrosion schützt (Passivierung). Bei den Säuren und Laugen kommt es zu keiner Passivierung, weil das Korrosionsprodukt vom Korrosionsmedium gelöst wird [Hufnagel W. 1983, S.177], [Kammer C. 2002, S.434], [Göner H. et al. 1969, S.136].

b) Lochkorrosion

Lochkorrosion bzw. Lochfraß (Abbildung 3.80 a und b) entsteht, wenn Unregelmäßigkeiten in der Oxidhaut und Metallteilchen mit unterschiedlichem Potential nahe der Metalloberfläche vorliegen. An den Lochstellen entstehen „Ausblühungen“ des voluminösen Aluminiumhydroxid $\text{Al}(\text{OH})_3$, das einen stärkeren Korrosionsangriff vortäuscht. $\text{Al}(\text{OH})_3$ ist in Wasser unlöslich und haftet im Loch fest. Somit nimmt das Lochwachstum mit der Zeit ab. Außerhalb der Löcher erfolgt praktisch kein Flächenabtrag. Das Vorhandensein von Cl begünstigt die Lochfraßbildung von Aluminium. Rein- bzw. Reinstaluminium sowie AlMgSi , AlMg und AlMgMn Legierungen haben annähernd gleiche Lochfraßpotentiale (-750 mV GKE). Nur die Legierung 7075 hat ein geringeres Lochfraßpotential [Hufnagel W. 1983, S.176], [Tödt F. 1961, S.417], [Ostermann F. 2007, S.247], [Cottis R.A et al. 2010, S.1987].

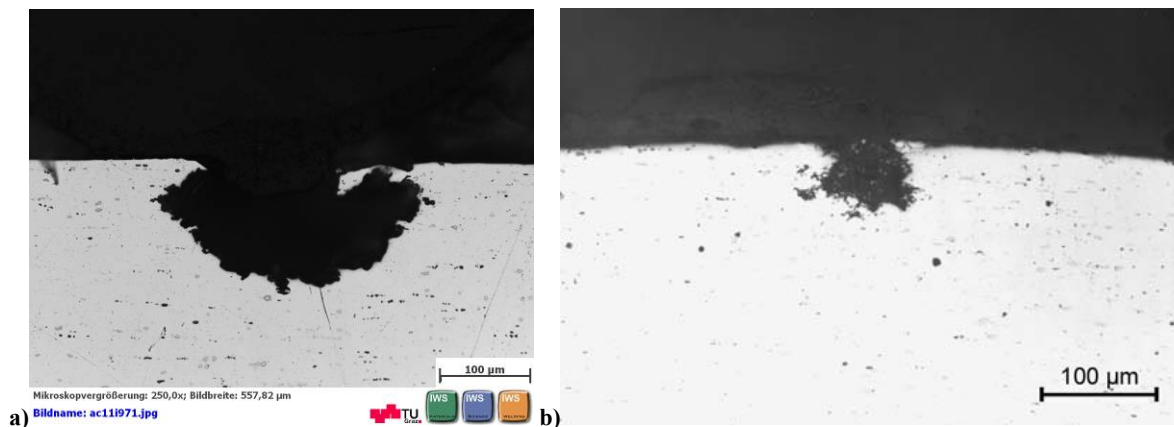


Abbildung 3.80 Erscheinungsform von Lochkorrosion a) Bei 5083-O nach 240h NSS Test, b) bei AlMg3 [Ostermann F. 2007, S.247]

Aballe hat in seinen Arbeiten festgestellt, dass Primärausscheidungen die Ursache für den Lochfraß bei 5083 sind. Getestet wurde in einer neutralen 3,5%NaCl Lösung. Mit einer EDX Analyse (Abbildung 3.81) wurde festgestellt, dass es sich um Ausscheidungen aus $\text{Al}(\text{Mn,Fe,Cr})$ handelt. Es wird beschrieben, dass diese Ausscheidungen edler als die Al-Grundmatrix sind, und als Kathode dienen. Dabei kommt es zur anodischen Auflösung des angrenzenden Al-Mischkristalls. Diese Korrosion wird durch einen lokalen Anstieg des pH Wertes, ähnlich der Spaltkorrosion, beschleunigt. Um die $\text{Al}(\text{Mg,Si})$ Ausscheidungen wurde bei den Untersuchungen kein Lochfraß festgestellt [Aballe A. et al. 2001, S.1910ff], [Aballe A. et al. 2004, S.1658ff].

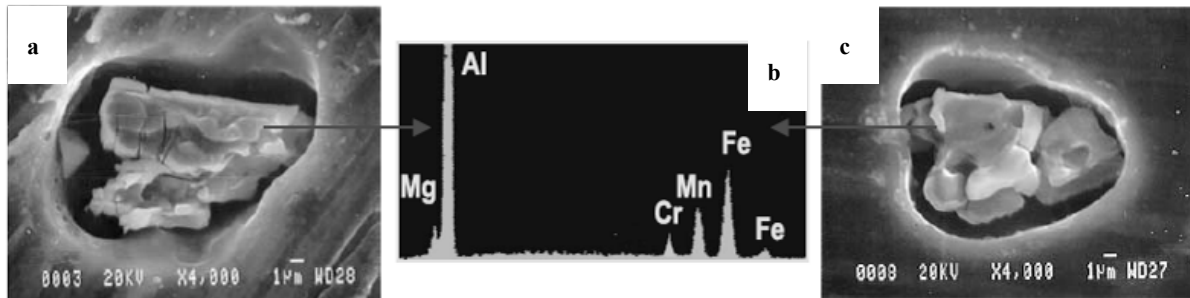


Abbildung 3.81 EDX Spektrum von AA5083 Ausscheidungen a) Al(Mn,Fe,Cr) Ausscheidung, b) Edx Sprechtrum der Ausscheidungen, c) Al(Mn,Fe,Cr) Ausscheidung [Aballe A. et al. 2001, S.1163]

c) Selektive Korrosion

Selektive Korrosion ist eine Korrosionsart, bei der bestimmte Gefügebestandteile den Korrosionsprozess steuern. Dies können zum Beispiel Ausscheidungen an Korngrenzen sein. Selektive Korrosion ist der Sammelbegriff für Korrosionsarten, wie z.B. Schichtkorrosion und interkristalline Korrosion. Bei der interkristallinen Korrosion werden zwei, vom Potential der Korngrenzen abhängige Arten unterschieden (Abbildung 3.82, Abbildung 3.83). Sind die Korngrenzen elektrochemisch unedler als das Korn, so kommt es zu anodischer Auflösung der Ersteren. Als Beispiel dazu seien Al_8Mg_5 Ausscheidungen, die bei AlMgMn Legierungen (über 3%Mg) bei einer Temperatur von 85-175°C an den Korngrenzen entstehen, genannt. $MgZn_2$ hat bei den 7xxx Legierungen selbige Wirkung. Bei der zweiten Art von interkristalliner Korrosion dienen die edleren Ausscheidungen an den Korngrenzen als Kathode. Dabei kommt es zur Auflösung des angrenzenden Kornes. Beispiele hierfür sind Mg_2Si oder $CuAl_2$ Ausscheidungen in 6xxx Legierungen. Durch den erhöhten Kupfergehalt der 2xxx Legierungen, sind auch diese vermehrt anfällig auf interkristalline Korrosion [Ostermann F. 2007, S.248ff], [Totten G.E. et al. 2003, S.436], [Ghali E. 2010, S.171], [Kammer C. 2002, S.437f], [Davis J.R. et al. 1994, S.582], [Totten G.E. et al. 2003 a, S.515], [Svenningsen G. et al. 2006, S.227ff], [Svenningsen G. et al. 2006a, S.259ff].

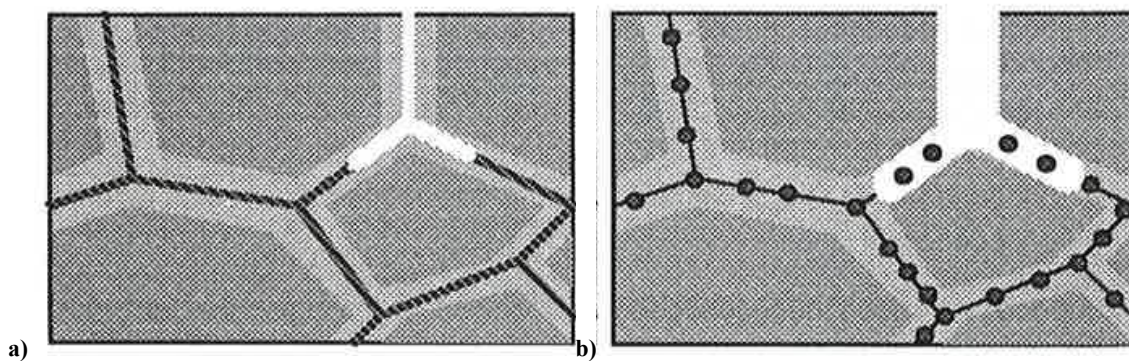


Abbildung 3.82 Arten der interkristallinen Korrosion a) unedlere Korngrenzen, b) edlere Korngrenze [Totten G.E. et al. 2003, S.436]

Legierungselement	Gefügebestandteil	Potential [mV(GKE)]	
		pH 7,5	pH 4,5
Fe	Al ₃ Fe	-580	-660
Mn	Al ₆ Mn	-880	-800
Mn + Fe	Al ₆ (Mn, Fe)	-830	-800
Mg	Al ₃ Mg ₅	-1380	-1090
Si	Si	-500	-580
Si + Fe	Al ₁₂ Fe ₃ Si	-720	-720
Mg + Si	Mg ₂ Si	-1230	-1240
Cu	Al ₂ Cu	-620	-620
	Cu	-230	-260

Werte bei pH 4,5 in 3 % NaCl, bei pH 7,5 in künstlichem Meerwasser gegen gesättigte Kalomelektrode (GKE) gemessen

Abbildung 3.83 Elektrochemische Potentialwerte intermetallischer Phasen von Aluminium [Ostermann F.2007 ,S.243]

d) Kontaktkorrosion

Die Kontaktkorrosion, auch galvanische Korrosion genannt, ist ein großes Problem von Al-Legierungen. Dabei kommen zwei Metalle mit unterschiedlicher Potentialdifferenz in Kontakt. Wiederum ist ein Elektrolyt nötig, der die beiden Metalle leitend miteinander verbindet. Abbildung 3.76 auf S.97 zeigt die elektrochemische Spannungsreihe, mit welcher die galvanische Korrosion erklärbar ist. Jenes Metall mit geringerem Potential wird anodisch vom edleren Metall aufgelöst. Daher ist der metallische Kontakt von Al mit z.B. Stahl od. Cu kritisch, wenn Kontakt über ein Elektrolyt besteht [Kammer C. 2002, S.443f], [Roos E. et al. 2005, S.358], [Totten G.E. et al. 2003, S.429f].

e) Spaltkorrosion

Für die Spaltkorrosion ist das Vorhandensein eines Spaltes in Verbindung mit Chlorid Ionen in einem Elektrolyten nötig. Zu Beginn der Korrosion ist genügend Sauerstoff im Spalt vorhanden. Der pH-Wert in einer neutralen Lösung beträgt 7. Durch die im Spalt startende Korrosion kommt es zum Sauerstoffmangel. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse kann der Sauerstoff nur erschwert in den Spalt diffundieren, daher kommt es im Spalt zur Hydrolyse des Wassers ($\text{Me}^+, \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Me}^+ \text{OH}^- + \text{H}^+ \text{Cl}^-$). Dies hat zur Folge, dass der pH Wert im Spalt sinkt. Durch die erhöhte Metallionen Konzentration im Spalt, beschleunigt sich die Korrosion. Dies kann zu pH-Werten von 3 führen, sodass die Oxidschicht von Al ihre Wirkung verliert und die Korrosion noch verstärkt wirkt. Als kritische Spalte gelten jene mit Weiten in der Größenordnung von 0,02 bis 0,5mm [Grote K.H. et al. 2011, S.E110], [Totten G.E. et al. 2003, S.433], [Schulze G. 2010, S. 86], [Hufnagel W. 1983, S.178].

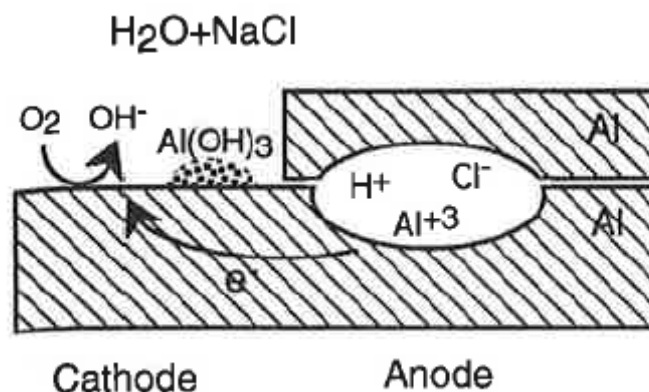


Abbildung 3.84 Spaltkorrosion von Aluminium [Totten G.E. et al. 2003, S.433]

f) Weitere Korrosionsarten

Neben den vorher genannten Korrosionsarten gibt es noch wasserstoffinduzierte Rissbildung, Spannungsrissskorrosion, Schwingungsrissskorrosion, Schichtkorrosion, dehnungsinduzierte Risskorrosion, Filiformkorrosion, Erosionskorrosion, Kavitationskorrosion sowie Reibkorrosion. Für weitere Informationen sei an dieser Stelle auf die zahlreiche Literatur [Göner H. et al. 1969], [Tödt F. 1961], [Hufnagel W. 1983], [Kammer C. 2002, S.428ff], [Totten G.E. et al. 2003], [Totten G.E. et al. 2003a], [Ghali E. 2010], [Ostermann F. 2007], [Davis J.R. et al. 1994] verwiesen.

3.3.1.3. Korrosionseigenschaften der Al-Legierungen

Die allgemeinen Korrosionseigenschaften sind im Folgenden noch kurz in Stichworten zusammengefasst [Ostermann F. 2007, S.244].

- *Reinaluminium*: beste Korrosionsbeständigkeit
- *Al-Mn*: sehr gute Korrosions- und Witterungsbeständigkeit
- *Al-Mg(Mn)*: beste Korrosionsbeständigkeit unter den Aluminiumlegierungen, bei Legierungen mit mehr als 3% Mg Gefahr der interkristallinen Korrosion.
- *AlMgSi*: Korrosionsbeständigkeit abhängig von Legierungsgehalt an Silizium, niedrig legierte Werkstoffe haben eine gute bis sehr gute Beständigkeit, höhere Legierungsgehalte und Siliziumüberschuß beeinträchtigen die Beständigkeit und neigen zu interkristalliner Korrosion
- *Al-Cu-Mg*: mit größeren Anteilen an Kupfer (>0.3%) nur wenig korrosionsbeständig in aggressiven Meeres- oder Industrieklimaten
- *Al-Zn-Mg*: anfällig für Spannungsriß- und Schichtkorrosion.
- *Al-Zn-Mg-Cu*: ähnliches Korrosionsverhalten wie Al-Cu, abschreckempfindlich, neigt zur interkristalliner Korrosion.

3.3.2. Versuchsaufbau und –ablauf

Für die Korrosionsuntersuchungen wurden pro geschweißter Naht je zwei Korrosionsproben mit 50x180mm aus dem mittleren Nahtbereich entnommen (Abbildung 3.36, S.50). Die Korrosionsproben der beiden Legierungen wurden bis zu 480h mit einem 5% neutralen Salzsprühnebeltest (NSS) nach Norm [EN ISO 9227:2006] geprüft. Genauere Parameter zu den Prüfbedingungen sind in Tabelle 3.16 angeführt. Die Korrosionsprüfung erfolgte in einer Korrosionsprüfruhe HKT500 der Fa. Klima Temp. Systems (CTS). Zusätzlich zu den Scherzugproben der Schweißnähte wurde auch das unbeeinflusste Grundmaterial von DD11, DD13 und den Al-Legierungen geprüft. Die Probenlage der Prüflinge in der Prüfkammer ist in Abbildung 3.85 gekennzeichnet. Die Korrosionsuntersuchungen wurden nach 2h, 6h, 24h, 48h, 96h, 168h, 240h und 480h dokumentiert. Zusätzlich wurden, von den Proben nach 240 und 480h Querschliffe angefertigt und Zugversuche durchgeführt.

Konzentration* [%]	Dichte* [kg/dm ³]	pH-Wert*	T _{Kammer} [°C]	T _{Befeuchtung} [°C]
0,45-0,55% NaCl	1,029-1,036	6,5-7,2	35	48

Tabelle 3.16 Parameter der Korrosionsprüfung (*vom Korrosionsmedium) [EN ISO 9227:2006]

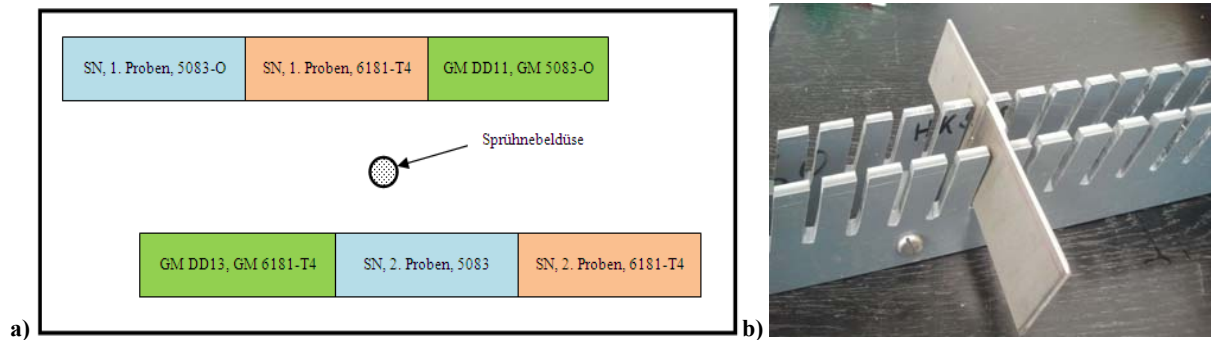


Abbildung 3.85 a) Probenanordnung in der Prüfkammer (SN... Schweißverbindungen, GM... Grundmaterial), b) Probenlage von Schweißverbindungen und Grundmaterial im Probenhalter

3.3.3. Ergebnisse NSS Test nach EN ISO 9227-2006

3.3.3.1. Korrosionsangriff im Grundmaterial

In Abbildung 3.86 sind die Korrosionsproben vor dem NSS Test abgebildet. Auffällig war hier die glänzende Oberfläche von AW-5083-O im Vergleich zu den anderen Proben, die eine leicht mattere Oberfläche aufwiesen.

Abbildung 3.87 zeigt die korrodierten Proben nach 480h NSS Test. Bei den Stahlproben bildete sich eine dicke, flächendeckende Rostschicht. Bei AW-5083-O waren vereinzelt kleine Lochfraßstellen (Abbildung 3.88 a) zu erkennen. Die Proben von AW-6181-T4 zeigten im Vergleich dazu vermehrte Korrosionsangriffspunkte, wobei jeder der weißen Korrosionsstellen den Startpunkt einer interkristallinen Korrosion markiert (Abbildung 3.88 b).



Abbildung 3.86 Korrosionsproben vom Grundmaterial vor dem NSS Test



Bildbreite: 223.43 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 24; 20; 1/1.3s)

Bildname: ac11i995.jpg



Abbildung 3.87 Korrosionsproben vom Grundmaterial nach 480h NSS Test



Abbildung 3.88 Detailaufnahme der Korrosionserscheinungen a) Lochfraßstellen von AW-5083-O, b) Lochfraßstellen als Ausgangspunkt der interkristallinen Korrosion bei von AW-6181-T4

Die Querschliffe durch die Proben beweisen, dass es unter den gegebenen Prüfungsbedingungen bei AW-5083-O zu Lochkorrosion gekommen ist (Abbildung 3.89). Bei AW-6181-T4 hat sich ausgehend von Lochfraßstellen hingegen interkristalline Korrosion gebildet (Abbildung 3.90). Die interkristalline Korrosion bei 480h hat sich gegenüber 240h verbreitert, d.h. die Korrosionstiefe blieb annähernd konstant. An den Korrosionsproben DD11 und DD13 wurden keine Schliffe angefertigt. Die ersten Korrosionserscheinungen von DD11, DD13 und AW-6181-T4 traten bereits nach 2h auf. Bei AW-5083-O traten erst nach 168h erste Korrosionsstellen auf, deutliche Korrosionserscheinungen waren erst nach 240h erkennbar. Laut der in Kap. 3.3.1.2 auf S.98 beschriebenen Literatur waren diese Ergebnisse auch zu erwarten.

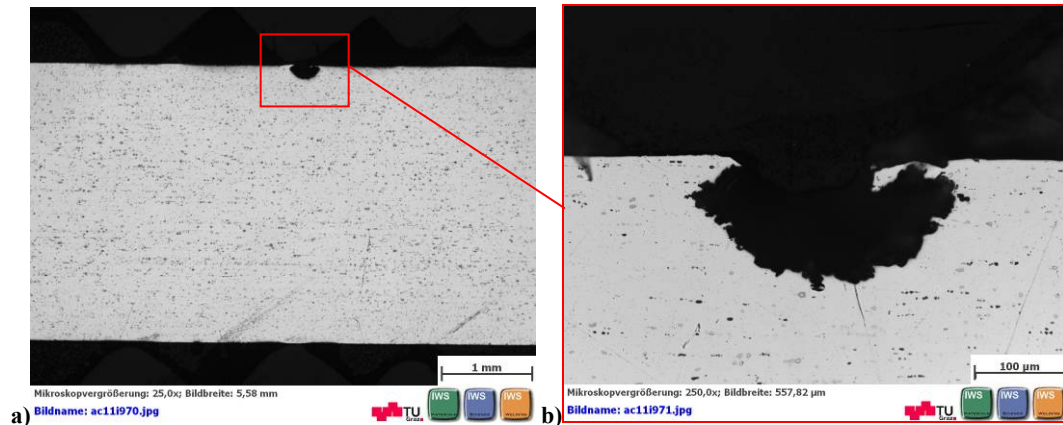


Abbildung 3.89 Lochfraßstelle bei AW-5083-O im Grundmaterial nach 240h NSS Test a) Übersicht b) Detailaufnahme

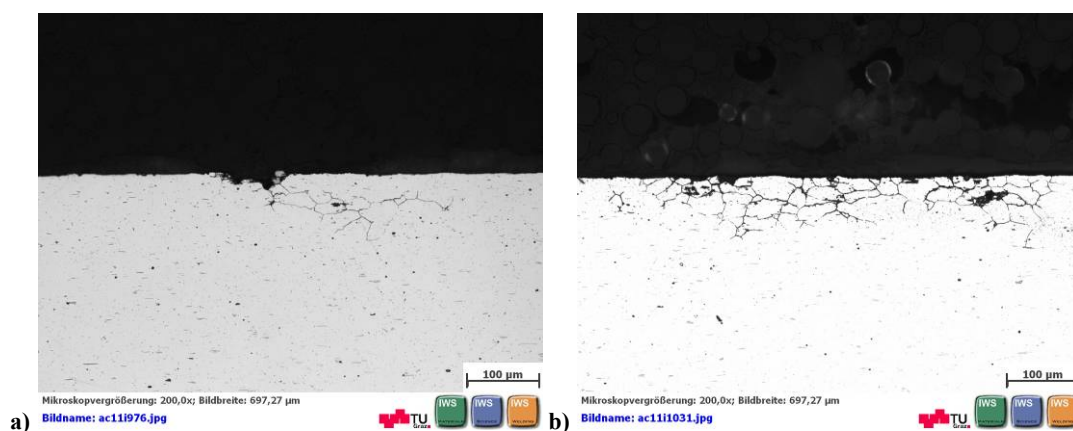


Abbildung 3.90 Interkristalline Korrosion von AW-6181-T4 im Grundmaterial a) 240h NSS b) 480h NSS

3.3.3.2. Korrosionsangriff der Schweißnähte

Die geschweißten Korrosionsproben zeigten in weiter entfernten Bereichen (unbeeinflusster Grundwerkstoff) dasselbe Korrosionsverhalten wie die Grundwerkstoffe selbst. Aus Abbildung 3.91 ist ersichtlich, dass makroskopisch auch keine Unterschiede bestanden. Im Folgenden wird speziell auf die Korrosion im Nahtbereich eingegangen. Die mit dem Schweißzusatz AlSi5 verschweißten Nähte von AW-6181-T4 zeigten eine leicht bräunliche Verfärbung an der Nahtoberfläche (Abbildung 3.91 b). Ein Korrosionsangriff im Nahtbereich konnte makroskopisch nicht festgestellt werden. Im Nahtbereich von AW-5083-O/AlMg5 wurde im Schweißgut nahe der WEZ lokale Korrosion festgestellt (Abbildung 3.91 c). Dieser Korrosionsangriff trat bereits nach 2h auf.

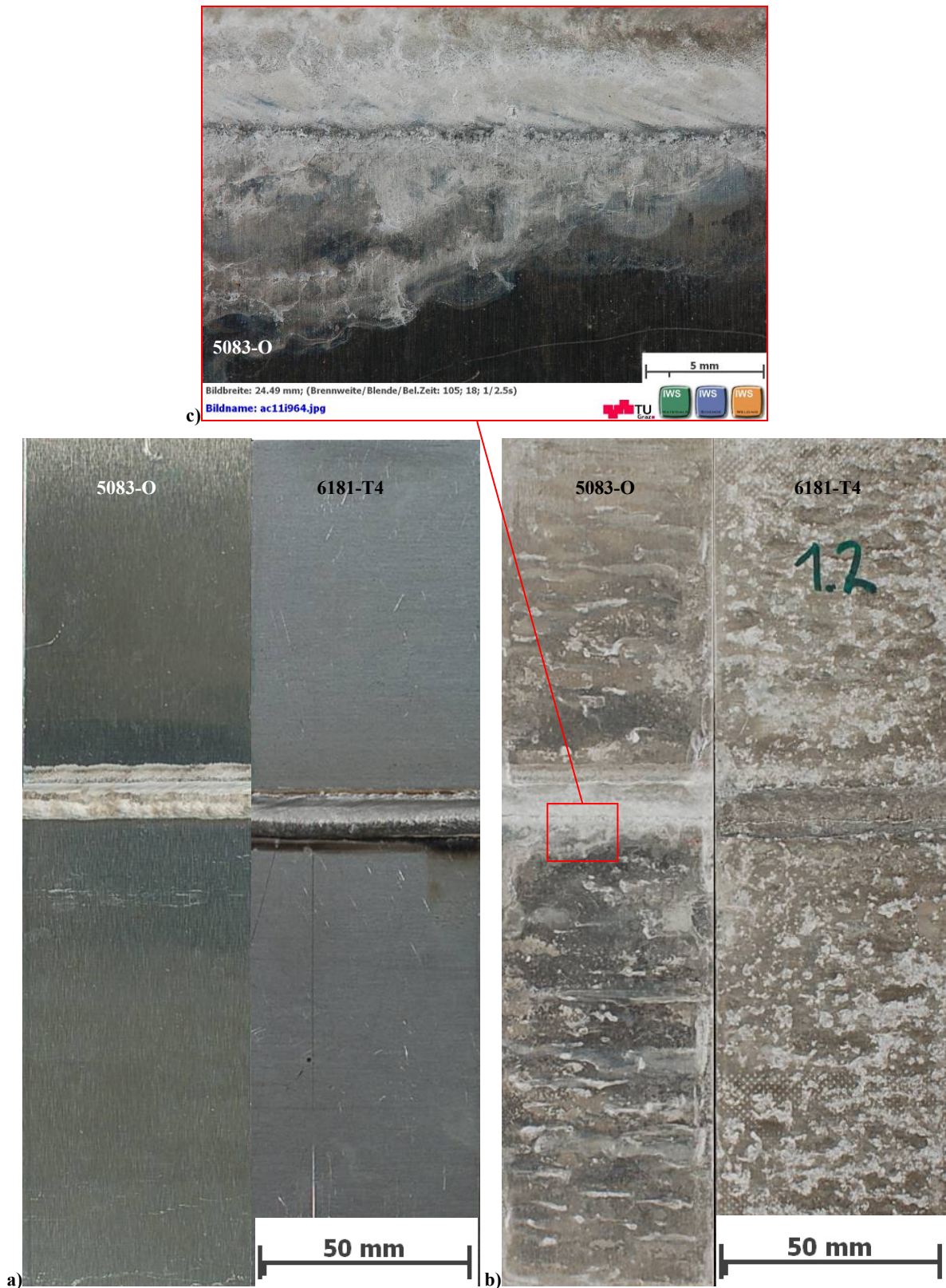


Abbildung 3.91 Scherzugproben von Schweißnähten a) vor NSS Test b) nach 480h NSS Test c) lokaler Korrosionsangriff in der WEZ bei AW-5083-O/AlMg5

Mittels Querschliffen wurde nachgewiesen, dass es zu einer tiefergehenden Korrosion kam. Abbildung 3.93 zeigt die Korrosionserscheinung von AW-5083-O an den Nahtausläufen des AlMg5 Schweißgutes, die in Abbildung 3.92 markiert sind. Es ist zu erkennen, dass es am

unteren Blech zur Bildung eines Korrosionsspalt (Abbildung 3.93 b) gekommen ist. Das Detail derselben Stelle vor der Korrosionsprüfung (Abbildung 3.93 a) beweist, dass kein Bindefehler am Nahtauslauf vorlag. Auch am Nahtauslauf des oberen Bleches ist es zu einem ähnlichen Korrosionsangriff gekommen (Abbildung 3.93 c, d), wobei wiederum ein Spalt entstand. Auffällig war, dass es vorwiegend zur Auflösung des Schweißgutes gekommen ist. Wobei auch Oberflächenporen auftreten (Abbildung 3.93 c), die möglicherweise Ausgangspunkt für die Spaltkorrosion sein können.

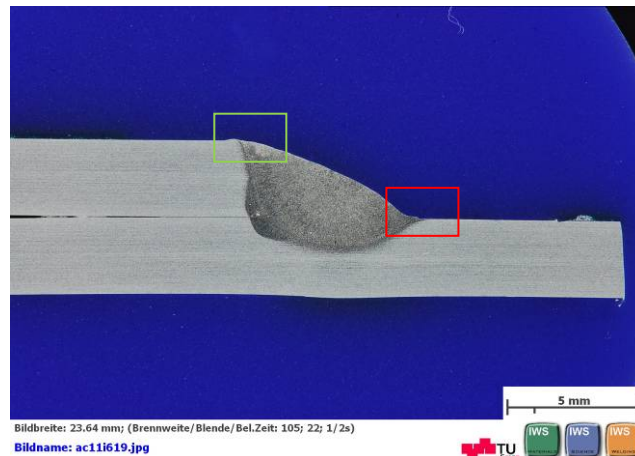


Abbildung 3.92 Querschliff einer Schweißnaht von AW-5083-O vor der Korrosionsprüfung (Ätzung: Flusssäure)

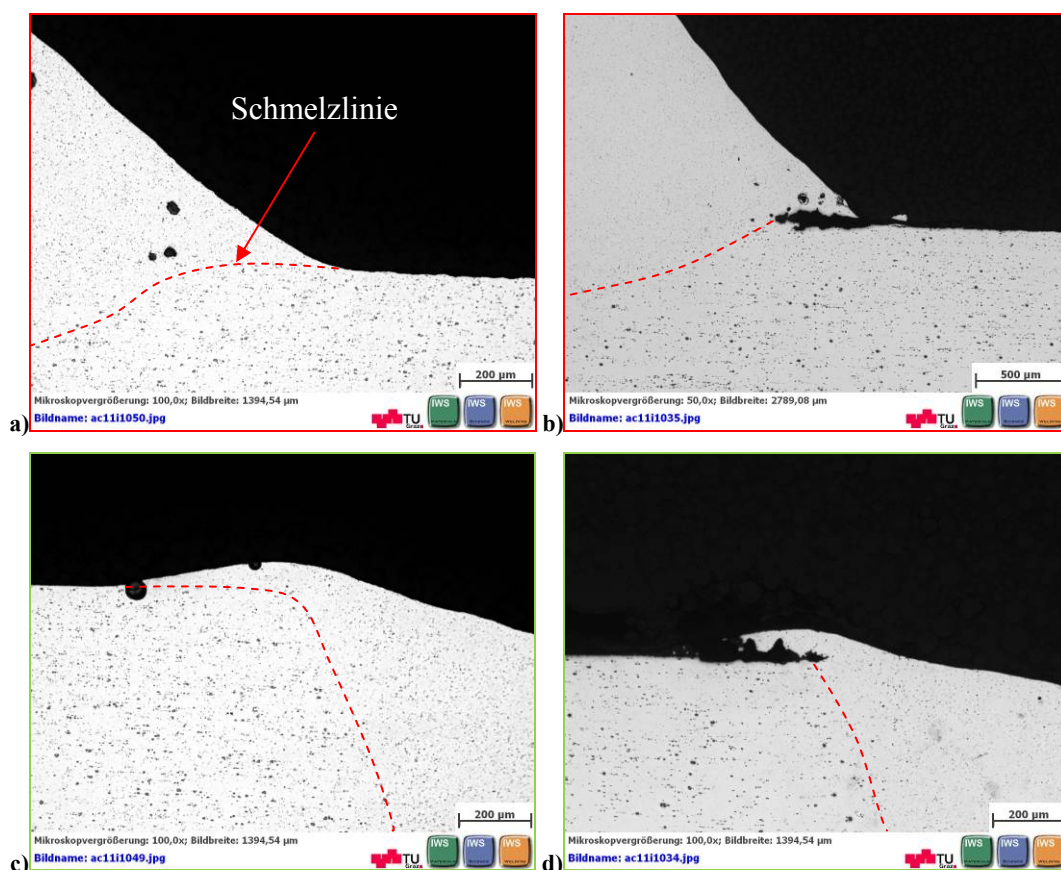


Abbildung 3.93 Details aus Abbildung 3.92: Korrosionserscheinungen AW-5083-O mit AlMg5 Schweißgut a) Nahtanbindung vor NSS Test, b) nach 480h NSS Test, c) Nahtanbindung vor NSS Test, d) nach 480h NSS Test.

Ein weiterer Querschliff samt Ätzung verdeutlichte die oben genannte Auflösung des AlMg5 Schweißgutes (Abbildung 3.94). Der Korrosionsangriff begann an der Schmelzlinie und verlief ins Schweißgut. Eine Literaturrecherche zu dieser Korrosionserscheinung hat zu einer Publikation [Sánchez-Amaya J.M. 2009] geführt wobei eine ähnliche Erscheinung beschrieben ist (Auflösung der Schweißnaht, Abbildung 3.95), welche jedoch auch in der WEZ verläuft. Es handelt sich dabei um eine lasergeschweißte Naht von AW-5083-T0, wobei die Wärmebehandlung T0 als Bezeichnung unüblich ist. Vermutlich ist mit dieser der weichgeglühte Zustand –O gemeint. Die Naht wurde mit Natriumchlorid (NaCl) und Wasserstoffperoxid (H₂O₂) für 6h geprüft. Neben der lokalen Auflösung ist in Abbildung 3.94 auch eine Lochfraßstelle zu erkennen. Es wird vermutet, dass eine Oberflächenpore der Ausgangspunkt für diese Korrosion war.

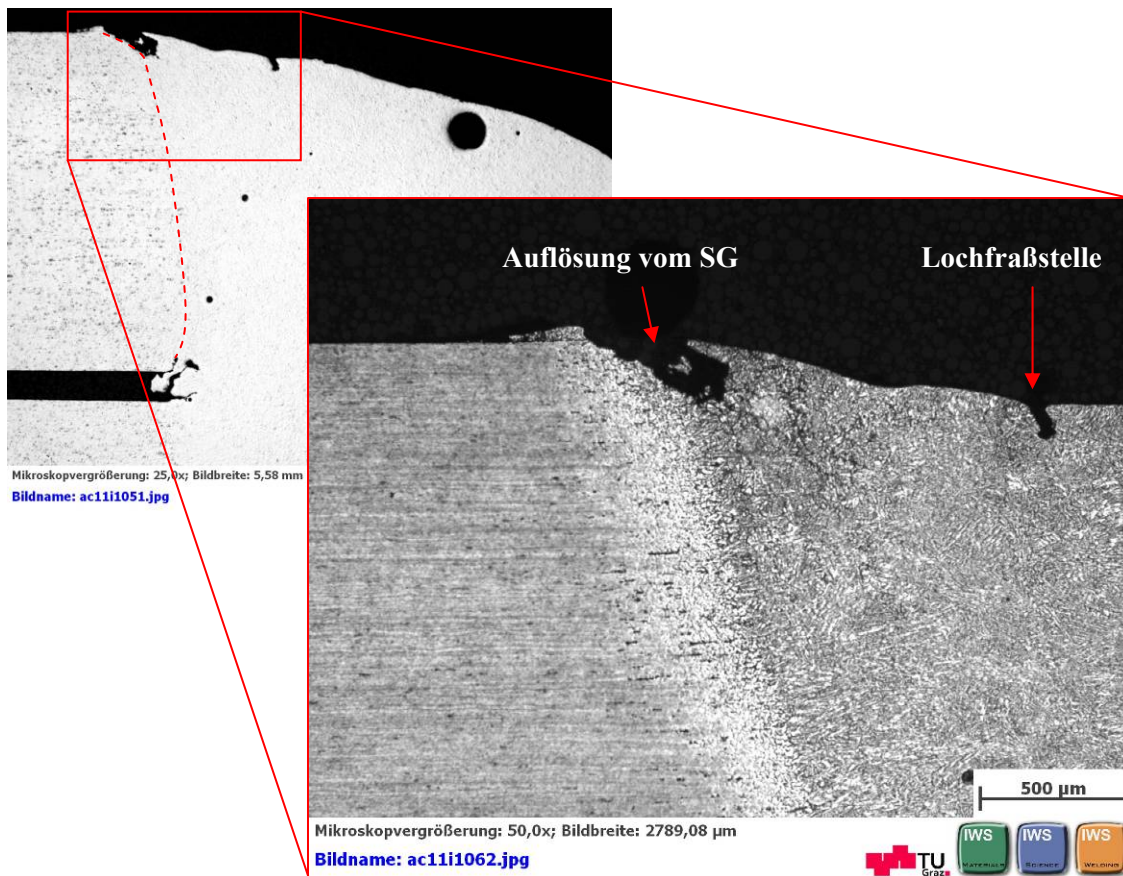


Abbildung 3.94 Korrosionsangriff des Schweißgutes von AW-5083-O mit SG AlMg5 nach 480h NSS

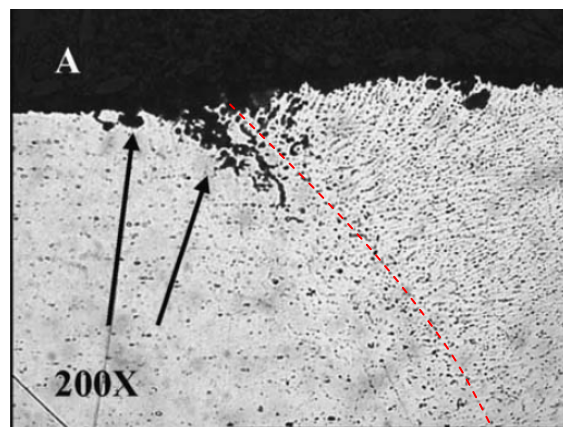


Abbildung 3.95 Korrosion einer lasergeschweißten Naht AW-5083-T0 [Sánchez-Amaya J.M. 2009, S.9520]

3.3.3.3. Bruchverlauf und Bruchflächen

Aufgrund der vorher gezeigten Korrosionserscheinungen wurden auch Scherzugversuche nach 240h und 480h NSS Test durchgeführt, um den Einfluss dieser auf die Festigkeit zu ermitteln. Bevor die Ergebnisse der Scherzugversuche diskutiert werden, wird auf das Bruchverhalten näher eingegangen. Die Scherzugproben von AW-6181-T4 zeigten vor und nach korrosiver Belastung denselben Bruchverlauf im AlSi5 Schweißgut, ähnlich jenem von AW-5083-O/AlMg5 in Abbildung 3.96 a. Bei AW-5083-O waren deutliche Unterschiede ersichtlich. Vor dem NSS Test brachen alle Proben wie in Abbildung 3.96 a. Ähnliches Bruchbild zeigte sich auch noch nach 240h, jedoch wurden erste Anzeichen von Rissen an der Schmelzlinie beobachtet, die erst während der Scherzugbelastung entstanden (Abbildung 3.96 b). Bei den Proben, welche 480h im NSS Test korrosiv belastet wurden, ist es zu einer Änderung des Rissverlaufes gekommen (vgl. Abbildung 3.96 a und Abbildung 3.97 b). Der Riss verlief hier nicht mehr in einem Winkel von ca. 20 Grad durch das Schweißgut, sondern scherte ca. in der Mitte ab. Die Detailaufnahmen in Abbildung 3.98 zeigen, dass womöglich der korrosive Angriff, Grund für die Änderung des Rissverlaufes war.

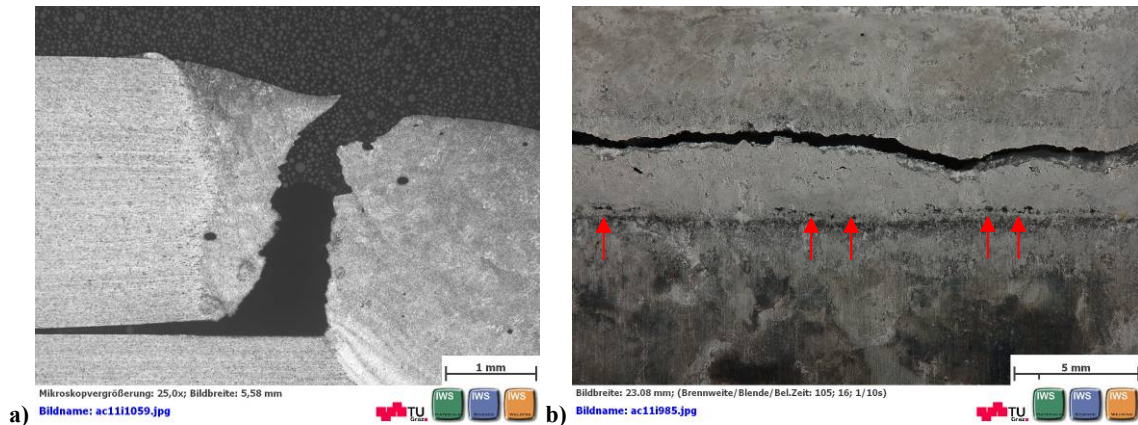


Abbildung 3.96 Bruchverlauf AW-5083-O in der AlMg5 Schweißnaht a) Querschliff vor NSS Test b) Draufsicht nach 240h NSS Test

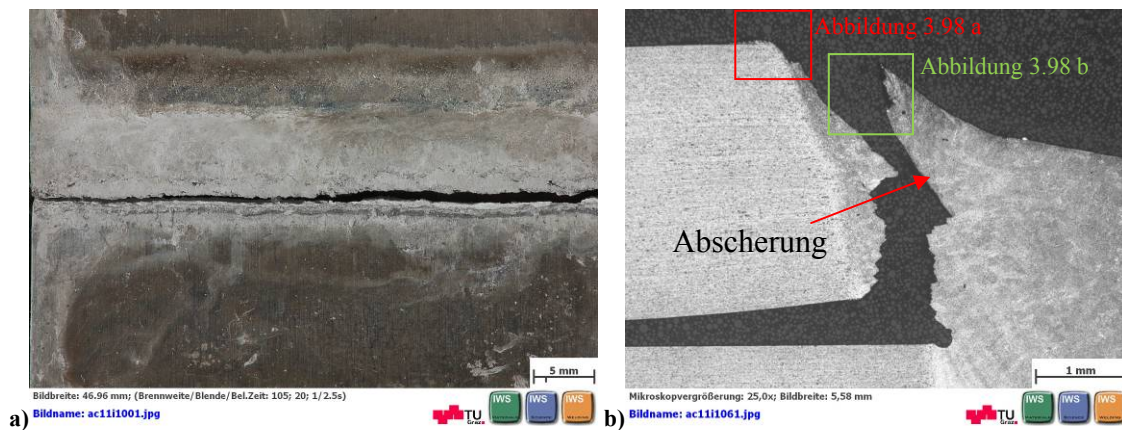


Abbildung 3.97 Bruchverlauf AW-5083-O in der AlMg5 Schweißnaht nach 480h NSS Test a) Draufsicht b) Querschliff

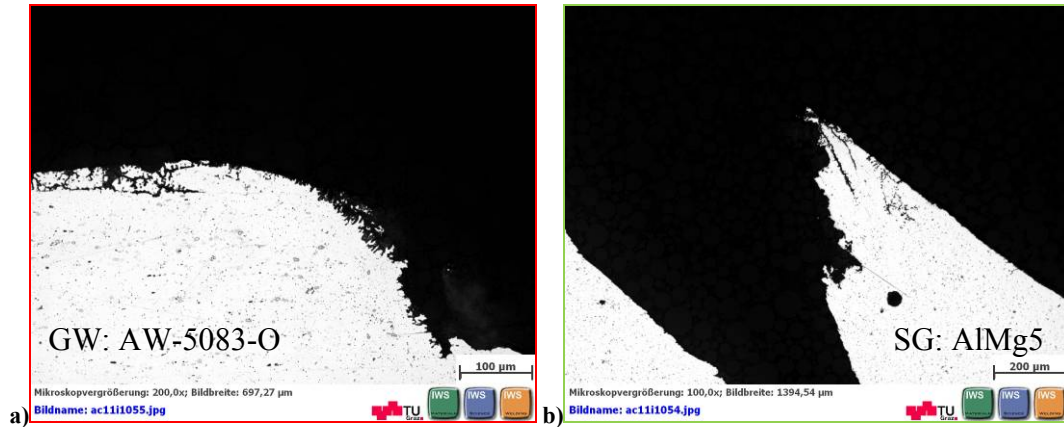


Abbildung 3.98 Detailaufnahmen aus Abbildung 3.97 b, Korrosionsangriff a) GW Seite b) SG Seite

Bei genauerer Betrachtung der Bruchfläche einer geschweißten Probe (Abbildung 3.99 a) von AW-5083-O, wurden im oberen Bereich teilweise rissige Korrosionsprodukte ersichtlich (Abbildung 3.99 b). Die restliche Bruchfläche zeigte großteils duktiles Erscheinungsbild (Waben, Abbildung 3.99 c). Durch eine EDX Aufnahme der Bruchfläche wurde nachgewiesen, dass Oxide vorhanden waren (Abbildung 3.100). Das Al-O Mapping (Abbildung 3.100 b) zeigte die Oxide am oberen und unteren Bereich der Bruchfläche. Die oberen Oxide entstanden aufgrund der Korrosion und reichten ca. 750 µm unter die Metalloberfläche. Der untere, blau markierte Bereich wies auch Sauerstoff auf und war die oxidierte Wurzelkerbe.

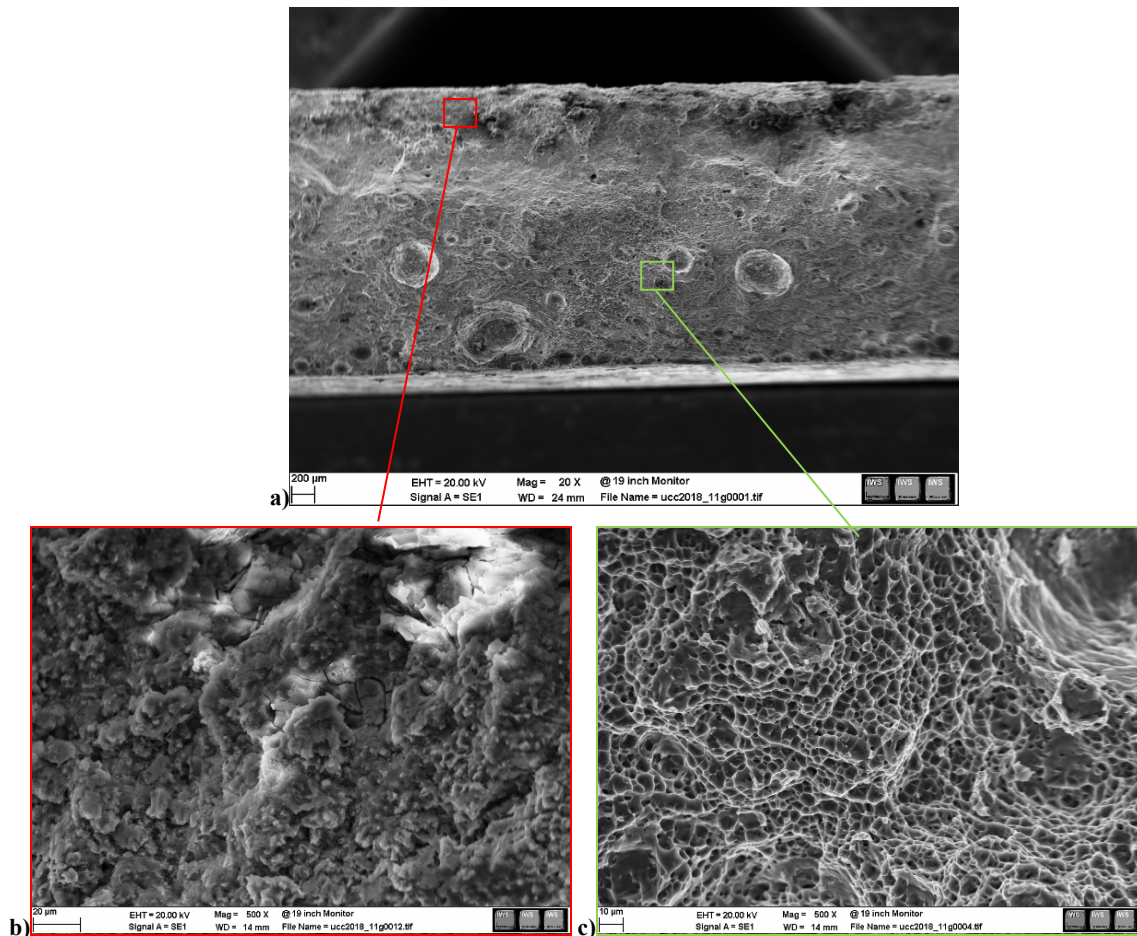


Abbildung 3.99 REM SE Aufnahmen einer AW-5083-O/AlMg5 Bruchfläche nach 480h NSS Test a) Aufnahme Bruchfläche im Schweißgut AlMg5 b) Detail vom Korrosionsbelag c) duktiler Bruchflächenbereich (Waben)

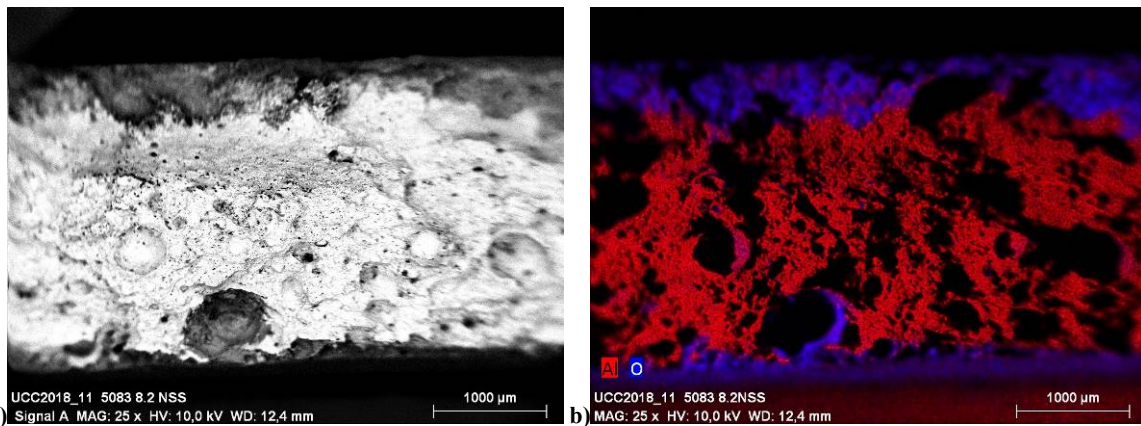


Abbildung 3.100 a) REM RE Aufnahme einer AW-5083-O/ALMg5 Bruchfläche nach 480h NSS Test (vgl. Abbildung 3.99), b) EDX Mapping Al-O

Im Gegensatz dazu wurden bei AW-6181-T4 nach 480h NSS Test auf der Bruchfläche keine Korrosionsprodukte festgestellt (Abbildung 3.101). Die Detailaufnahme der Bruchfläche zeigt duktile Bereiche (Waben) sowie Bereiche dendritischer Erstarrung, was auf das Vorhandensein von Mikrolunkern hindeutet (Abbildung 3.101 c).

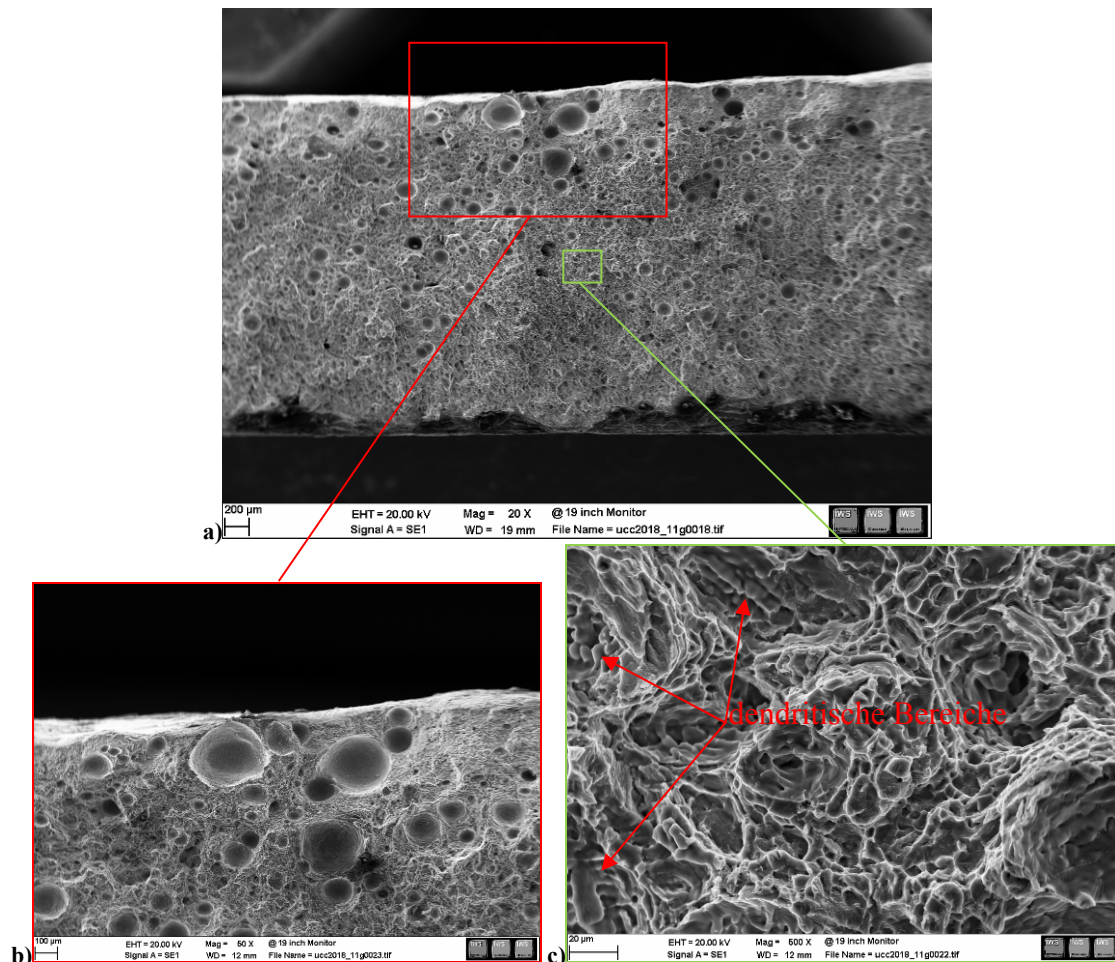


Abbildung 3.101 a) Bruchfläche von AW-6181-T4 im AISi5 Schweißgut nach 480h NSS, b) Detailaufnahme, c) Nahaufnahme Bruchfläche

3.3.3.4. Scherzugversuche- Festigkeit

Für AW-5083-O/AlMg5 und AW-6181-T4/AlSi5 wurde nach 240h NSS Test je ein Schweißparametersatz im Zugversuch getestet (Tabelle 3.17). Die Festigkeiten wichen nur geringfügig von jenen der Proben ohne Korrosion ab. Teilweise waren die Zugfestigkeiten sogar geringfügig höher (+5%), d.h. in diesem Stadium der Korrosion besteht noch kein festigkeitsmindernder Einfluss. Nach 480h NSS Test wurden nur die drei Schweißnähte mit bester Kombination aus Festigkeit und relativer Porenfläche (aus Kap. 3.1.8, S.83) je Werkstoff untersucht. Wiederum wurden keine Unterschiede hinsichtlich der Zugfestigkeit festgestellt, obwohl es bei AW-5083-O/AlMg5 zu einer Veränderung des Bruchverlaufes und einer Auflösung des Schweißgutes gekommen ist.

Schweißparameter				Ergebnisse Scherzugversuche			
Schweißgeschwindigkeit	Schutzgas / Korrekturen	Streckenenergie / [kJ/cm]	Brenner-Anstellwinkel	σ_{\max} nach 0h NSS [N/mm ²]	σ_{\max} nach 240h NSS [N/mm ²]	σ_{\max} nach 480h NSS [N/mm ²]	A _{Pore} [%]
AW-5083-O mit AlMg5 Schweißzusatz							
15 mm/s	100%Ar Pk=1,8	1,78	5°schl.	163±8			0,7
			0°	153±10			0,3
			5°st.	150±9			0,3
	50%ArHe LbK=3	1,46	5°schl.	170±14	179±11		0,1
			0°	160±6	164±1		0,1
			5°st.	166±6	164±4		0,1
30 mm/s	100%Ar	1,55	5°schl.	195±16		211±2	0,8
			0°	182±5			1,5
			5°st.	179±8			1,5
	50%ArHe LbK=3	1,38	5°schl.	180±11		180±7	0,3
			0°	179±7		184±7	0,4
			5°st.	170±12			0,4
AW-6181-T4 mit AlSi5 Schweißzusatz							
15 mm/s	100%Ar	2,04	5°schl.	135±25		116±9	2,8
			0°	126±16		132±2	1,6
			5°st.	96±16			2,0
	50%ArHe	1,85	5°schl.	122±14			1,7
			0°	124±23		120±8	0,5
			5°st.	112±15			1,4
30 mm/s	100%Ar	1,72	5°schl.	128±11	125±1		2,9
			0°	123±4	128±7		2,3
			5°st.	125±2	124±0		2,5
	50%ArHe	1,49	5°schl.	115±23			3,2
			0°	112±15			4,0
			5°st.	115±14			2,7

Tabelle 3.17 Ergebnisse der Scherzugversuche nach 240 und 480h NSS Test (LbK...Lichtbogenkorrektur, Pk...Pulskorrektur)



3.3.4. Zusammenfassung

Alle Proben der Schweißversuche (Überlappstoß) wurden gemäß EN ISO 9227 in einem neutralen Salzsprühnebel für 240h geprüft und pro Legierung wurden die mit den drei besten Parameter geschweißten Proben noch weitere 240h geprüft (NSS Test). Mittels Querschliffen, Zugversuchen und REM Aufnahmen der Bruchflächen wurden die Korrosionsart und deren Einfluss auf die Scherzugfestigkeit bestimmt.

Die Untersuchungen zur Legierung AW-6181-T4/AlSi5 zeigten, dass es im Grundmaterial zur interkristallinen Korrosion kommt (Abbildung 3.90, S.105), was laut Literatur [Ostermann F. 2007, S.244] bekannt ist. Erste Korrosionserscheinungen traten in allen Fällen schon nach 2h Testdauer auf. Die Schweißnaht von AW-6181-T4/AlSi5 hatte die beste Korrosionsbeständigkeit, und zeigte keinen korrosiven Angriff. Die interkristalline Korrosion im von 204h auf 480h NSS Test ca. konstant auf 100µm Tiefe geblieben und hat sich verbreitert (größerer Flächenangriff, Abbildung 3.90, S.105). Zugversuche nach 240 sowie 480h NSS Test ergaben keine Festigkeitsminderung durch den Korrosionsangriff (Tabelle 3.17, S.112). In der Literatur [Rechner R. et al. 2010] hat sich erst ab 1000h NSS Test ein deutlicher Festigkeitsabfall ergeben. Die Bruchfläche von AW-6181-T4 war duktil, es wurden jedoch auch Bereiche dendritischer Erstarrung nachgewiesen.

Die AW-5083-O Legierung erwies im Vergleich zu Stahl und AW-6181-T4 bessere Korrosionsbeständigkeit im Grundmaterial. Es zeigte sich, dass AW-5083-O im Grundmaterial anfällig auf Lochkorrosion ist (Abbildung 3.89, S.105). Der Bereich im AlMg5 Schweißgut nahe der Schmelzlinie wurde als Schwachpunkt festgestellt, da es dort zur lokalen Auflösung des Schweißgutes gekommen ist (Abbildung 3.94, S.108). In manchen Fällen wurde dies möglicherweise durch Spaltkorrosion beschleunigt, wobei keine Bindefehler an den Nahtflanken festgestellt werden konnten (Abbildung 3.93, S.107). Die Korrosion nahe der Schmelzlinie wurde schon nach 2h Testdauer beobachtet. Bei EDX Mappings der Bruchfläche wurde festgestellt, dass diese Korrosion nach 480h NSS bis zu 750µm Tiefe gereicht hat (Abbildung 3.100, S.111). Weiters wurde eine Lochkorrosionsstelle im Schweißgut festgestellt (Abbildung 3.94, S.108), die eventuell von einer Oberflächenpore ausging. Trotz der lokalen und teils tiefer reichenden Korrosion am Übergang von Schweißgut zur Wärmeeinflusszone wurde kein Einfluss der Korrosion auf die Festigkeit festgestellt. Grund für diese Korrosion könnte die galvanische Korrosion sein, d.h. unterschiedliche elektrochemische Potential zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut. Die Literatur [Totten G.E. et al. 2003 a, S.515] schreibt, dass es bei 5083-O zur Bildung des unedleren Al_3Mg_5 kommen kann, welche in dieser Arbeit jedoch nicht untersucht worden sind. Eventuell könnten diese Ausscheidungen Grund für die lokale Auflösung des Schweißgutes sein, denn der Schweißzusatz AlMg5 ist höher mit Mg legiert als der Grundwerkstoff AW-5083-O. Eine Abhilfemaßnahme könnte aber eine Schweißverbindung von AW-5083-O mit dem SZ AlSi5 sein.

4. Schlussfolgerung

Die MIG Puls Schweißversuche an Überlappverbindungen haben ergeben, dass Aluminium die Festigkeitsansprüche der Konstruktion eines Kühlmittelkompressor- Gehäuses erfüllt. Es wurden Schweißparameter ermittelt, die es ermöglichen die Schweißgeschwindigkeit gegenüber Stahl zu verdoppeln, was zu einer Verkürzung der Schweißzeit (Lichtbogenbrennzeit) von 14 Sekunden pro Kompressor führen würde. In Verbindung dazu zeigten die Ergebnisse der Porenauswertung, dass es bei der Verwendung eines Ar-He-Gemisches auch ohne ein mechanisches Abarbeiten der Oxidschicht möglich ist geringe Porenmengen in der Schweißnaht zu erhalten, womit die Gasdichtheit des Gehäuses gewährleistet werden konnte. Die Schweißbarkeit der Aluminiumlegierungen stellt somit keine Schwierigkeit, für den Einsatz von Aluminium als Gehäusewerkstoff, dar und erfüllt alle geforderten Festigkeitskriterien. Die höheren Schutzgaskosten vom Ar-He Schutzgas könnten ggf. einen Nachteil darstellen.

Scherzugversuche haben einen Vergleich der Tiefziehfähigkeit zwischen Stahl und Aluminium ermöglicht. Diese haben ergeben, dass die Aluminiumlegierungen, bis auf die etwas schlechteren Anisotropiewerte, durchaus gleichwertige Tiefzieheigenschaften, wie die aktuell verwendeten Stahlsorten DD11 und DD13 besitzen. Neben ähnlich hoher Bruchdehnung überzeugen die Al-Legierungen durch eine höhere Gleichmaßdehnung und einem für Umformvorgänge günstigeren Streckgrenzenverhältnis. Die geringeren Dehngrenzen der Aluminiumlegierungen hätten den positiven Nebeneffekt einer Senkung der Umformkräfte, was zu geringerer Werkzeugbelastung führen und eventuell Energieeinsparungen mit sich bringen würde.

Die Korrosionseigenschaften der Aluminiumlegierungen ergaben zwar im Vergleich zu Stahl gute Ergebnisse, d.h. keine starke Flächenkorrosion, die jedoch hinsichtlich Schweißzusatz noch verbesserbar sind. Sollte es möglich sein, den lokalen Korrosionsangriff des AlMg5 Schweißgutes bei AW-5083-O zu vermeiden bzw. zu verringern, dann wäre diese Legierung sicherlich eine sehr gute Alternative zum Stahl.

Die Schweißverbindung von AW-6181-T4 überzeugte nur mit der korrosionsfreien Schweißnaht AlSi5, der interkristalline Korrosionsangriff im Grundmaterial ist hingegen schon nach wenigen Stunden NSS- Test aufgetreten und macht diese Legierung dadurch weniger empfehlenswert. In Verbindung mit der schwarzen Tauchbadlackierung, wie sie zur Zeit eingesetzt wird, wäre jedoch aus korrosionstechnischer Sicht ein Einsatz von Aluminium sicherlich denkbar.

Weitere Argumente sind die lebensmitteltechnische Unbedenklichkeit von Aluminium, die höhere Wärmeleitfähigkeit mit möglichen günstigem Einfluss auf den COP Wert (coefficient of performance), sowie die geringere Dichte und der damit verbundenen Gewichtsreduktion. Nachteilig sind jedoch die volumenbezogenen Kosten von Aluminium, die im Vergleich zu Stahl um ca. 19% höher sind [LME 2011]. Dennoch zeigt die nachstehende Argumentenbilanz, dass der Einsatz von Aluminium einer genaueren Betrachtung unterzogen werden sollte.

Vorteile von Aluminium

- Einsparung von 50% der Schweißzeit (14 Sekunden / Kompressor)
- Geringere Umformkräfte nötig, mögliche Energieeinsparung
- Nahezu gleiche Umformeigenschaften
- Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit
- Höhere Wärmeleitfähigkeit für bessere Verdunstung des Kondenswassers
- Gewichtseinsparung durch geringere Dichte
- Lebensmitteltechnisch unbedenklich

Nachteile von Aluminium

- Erhöhte Materialkosten
- Bei Verwendung von He: höhere Schutzgaskosten
- Mehr Verzug/Eigenspannungen durch größeren Ausdehnungskoeffizienten

5. Ausblick

Weitere, schweißtechnische Untersuchungen zum Anstellwinkel sollten durchgeführt werden, um die Gründe für die Festigkeitssteigerung des schleppenden Winkels zu finden. Da der COP Wert sowie die Akustik aufgrund ihrer Komplexität in dieser Arbeit nicht untersucht wurden, wären Analysen in diesen Bereichen wegen der unterschiedlichen Dichte und Wärmeleitfähigkeit sowie dem höheren Reflexionsvermögen von Aluminium erforderlich.

Tiefziehversuche könnte bei ACC in Fürstenfeld durchgeführt werden um das reale Tiefziehverhalten der Al Legierungen zu testen. Eventuell kann man hier auf besser umformbare Al-Legierungen als die Versuchswerkstoffe ausweichen. Weiters sollten die in dieser Arbeit ermittelten Schweißparameter an den tiefgezogenen Al-Schalen getestet und optimiert werden, ob diese auch bei einer 2D gekrümmten Naht noch anwendbar sind.

Betreffend Korrosionsbeständigkeit im NSS- Test ist der Einsatz unterschiedlicher Schweißzusätze für die AW-5083-O Legierung zu überprüfen, um womöglich die lokal entstehende Korrosion im AlMg5 Schweißgut zu verhindern, d.h. Untersuchungen einer AW-5083-O/AISi5 Schweißnaht. Weiters wären artfremde Schweißversuche eine Überlegung wert. So könnte man die erforderliche hohe Korrosionsbeständigkeit der Oberschale des Kompressors und die für die Unterschale benötigte hohe Umformbarkeit durch unterschiedliche Werkstoffe erfüllen. Durch eine längere NSS Testdauer könnte man den Einfluss der Korrosion auf die Scherzugfestigkeit der Schweißverbindungen besser definieren, denn mit 480h NSS Test waren noch keine Änderungen der Scherzugfestigkeiten erkennbar.

6. Literaturverzeichnis

- Aballe A. et al. 2001: Localized alkaline corrosion of AA5083 in neutral 3,5% NaCl solution, Corrosion Science 43 (2011) 1657-1675, Elsevier Ltd.
- Aballe A. et al. 2004: Influence of the degree of polishing of alloy AA5083 on its behavior against localized alkaline corrosion, Corrosion Science 46 (2004) 1909-1920, Elsevier Ltd.
- ACC 2011a: ACC Homepage, www.verdichter.at, 12.08.2011.
- ACC 2011b: Firmenpräsentation für IAESTE Firmenshuttel, 07. April 2011.
- ACC 2011c: CAD Zeichnungen, Nr. T8210028L und T8210038L, ACC Austria.
- Aichele G. et al. 1975: MAG Schweißen, Fachbuchreihe Schweißtechnik 65, DVS Verlag, Düsseldorf.
- Alu Schlüssel 2010: Homepage, <http://www.alu-schluessel.de/> 28.01.2011
- Aluminium Verlag 2007: Aluminium Datenblätter 5.Auflage, Aluminium Verlag, Düsseldorf.
- Atlas-Blech-Center 2011: www.abcsteel.org/ABC2/de/i_normenvergleich.php, 17.Jänner 2011.
- Atkinson M. 1979: Strength of metals and alloys Vol. 1 u. 2, New York, Oxford, Toronto, Sydney, Paris, Kronberg.
- Ashton R.F. et al. 1975: The Effect of Porosity on 5086-H116 Aluminum Welds, Welding Research Supplement March 1975.
- Bachhofer A. 2000: Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau, Herbert Utz Verlag GmbH, München.
- Bargel H.J. 2008: Werkstoffkunde, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Baum L. 1990: Der Schutzgasschweißer- Teil 2, MAG Schweißen, Fachbuchreihe Schweißtechnik Bd.12, 3. Auflage, DVS Verlag Düsseldorf.
- Baumgartner S. 2005: Fülldrahtelektroden zum MIG Schweißen von Aluminiumwerkstoffen. Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, Dissertation TU Graz.
- Beck A. 2001: Magnesium und seine Legierungen, Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Berns H. Theisen W. 2006: Eisenwerkstoffe- Stahl und Gusseisen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Beutin N. 2000: Kundennutzen in industriellen Geschäftsbeziehungen, 1. Auflage, Deutscher Universitätsverlag GmbH, Wiesbaden.
- Buchmayr B. 2002: Werkstoff- und Produktionstechnik mit Mathcad, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Buehler 2011: <http://www.buehler-met.de>, Zugriff:31.10.2011.
- Burkhard H. 2003: Werkstoffprüfung: Ermittlung von Werkstoffeigenschaften, Carl Hanser Verlag, München Wien.
- Brückner C. 2009: MIG-Schweißen von Aluminium im Automobilbau, IGEL Verlag, Hamburg.



- Cáceres C.H. 1995: On the effect of macroporosity on the tensile properties of the Al-7%Si-0.4%Mg casting alloy, Scripta Metallurgica et Materialia Vol 32 No. 11, Elsevier Science Ltd., USA.
- Cottis R.A. et al. 2010: Shreir's Corrosion, Volume 3, Elsevier B.V., Amsterdam.
- Davis J.R. et al. 1994: Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Handbook, ASM International.
- DIN ISO 10113:2009: Metallische Werkstoffe- Blech und Band- Bestimmung der senkrechten Anisotropie.
- DIN ISO 10275:2009: Metallische Werkstoffe- Blech und Band- Bestimmung des Verfestigungsexponenten im Zugversuch.
- DIN EN ISO 6792-1:2009: Metallische Werkstoffe- Zugversuch- Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur.
- Dilthey U. 2005: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen 3.Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Dilthey U. 2006: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: Schweiß und Schneidtechnologien, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Doege E. Behrens B.-A. 2010: Handbuch Umformtechnik, Springer Verlag, Heidelberg Dordrecht London New York.
- DVS 0933 1991: DVS Merkblatt 0933, Deutscher Verband für Schweißtechnik, Düsseldorf.
- DVS 0913 1994: DVS Merkblatt 0913, Deutscher Verband für Schweißtechnik, Düsseldorf.
- Dzelnitzki D. 2000: Vergrößerung des Einbringvolumens oder Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit- Vorteile des MAG Hochleistungsschweißens, EWM Hightec Welding GmbH.
- EAA 2001: European Aluminum Association Homepage, <http://aluminium.matter.org.uk/> 28.01.2011.
- EN 10111:2008: Kontinuierlich warmgewalztes Band und Blech aus weichen Stählen zum Kaltumformen.
- EN ISO 9227:2006: Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären - Salzsprühnebelprüfungen.
- Fahrenwaldt H. et al. 2009: Praxiswissen Schweißtechnik, 3. Auflage, Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- Freiberger A. 2003 Vorstudie zur Entwicklung der Druckstrecke einer Kleinkältemaschine, : Diplomarbeit TU-Graz, Fa. ACC.
- Fritz H. et al. 2010: Fertigungstechnik, 9. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Fronius 2011: Information des technischen Supports von Fronius, kalchgruber.ferdinand@fronius.com, 24.03.2011.
- Fronius 2011b: Bedienungsanleitung, TransPuls Synergic 3200 / 4000 / 5000, www.fronius.at, Zugriff am 28.09.2011.
- Fronius 2011c: Homepage www.fronius.com, Zugriff: 31.10.2011.

- Lorren H. et al. 2002: Einstellen von MIG/MAG Schweißgeräten leicht gemacht, EMV Hightech Welding GmbH.
- Gene M. 2005: The welding of aluminum and its alloys, Woodhead Publishing.
- Ghali E. 2010: Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys, John Wiley & Sons, Canada.
- Goecke S.F. 2004: Dissertation, Auswirkungen von Aktivgaszumischungen im vpm-Bereich zu Argon auf das MIG-Impulsschweißen von Aluminium, TU Berlin Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme.
- Göner H. et al. 1969: Aluminiumhandbuch ,VEB Verlag Technik, Berlin.
- Grote K.H. et al. 2011: Doppel- Taschenbuch für den Maschinenbau, 23. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Gruss H. 2008: Schweißgerechte Struktur- und Prozessstrategien im Flugzeugbau, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- Herrmann A. 2009: Produktmanagement: Grundlagen, Methoden, Beispiele 2.Auflage, Gabler | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- Heubner U. et al. 2009: Nickelwerkstoffe und hochlegierte Sonderedelstähle, Eigenschaften Verarbeitung Anwendung, 4. Auflage, expert Verlag, Renningen.
- Hilbinger R.M. 2001: Heissrissbildung beim Schweißen von Aluminium in Blechrandlage, Herbert Utz Verlag GmbH, München.
- Hirsch J. 2006: Virtual Fabrication of Aluminum Products, WILEY-VCH Verlag, Weinheim.
- Hochreiter G. 1995: Unterpulverschweißen in der Praxis, expert Verlag, Renningen-Malmsheim.
- Hufnagel W. 1977: Einfluss der Porosität auf die statische und dynamische Festigkeit von Aluminium-Schweißverbindungen, Zeitschrift: Aluminium (Düsseldorf) Jg. 53 Nr.10. Düsseldorf.
- Hufnagel W. 1983: Aluminium Taschenbuch 14. Auflage, Aluminium Verlag, Düsseldorf.
- Issler L. et al. 2006: Festigkeitslehre Grundlagen Band 1, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Jäniche W. 1985: Werkstoffkunde Stahl Band 1, Stahleisen Verlag, Düsseldorf.
- Jäniche W. 1985: Werkstoffkunde Stahl Band 2, Stahleisen Verlag, Düsseldorf.
- Kamal P. et al. 2010: Study of weld joint strength using sensor signals for various torch angles in pulsed MIG Welding, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 3.
- Kammer C. 2002: Aluminium Taschenbuch Bd.1 16.Auflage, Aluminium Verlag, Düsseldorf.
- Kammer C. 2003: Aluminium Taschenbuch Bd.3 16.Auflage, Aluminium Verlag, Düsseldorf.
- Kardeniz E. et al. 2007: The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes, Materials and Design 28 (2007) 649–656, Elsevier Ltd.
- Kerschbaumer K. 2011: Präsentation zum Report: IWS_UCC2018_5/10, Dissertation Institut für Werkstoffkunde, TU Graz.



- Kerschbaumer K. 2010: Werkstoffvorauswahl eines Kühlkompressorgehäuses für das Jahr 2018, DokNr. 09/2010, Dissertation Institut für Werkstoffkunde, TU Graz.
- Killing R. 1984: Handbuch der Schweißtechnik Teil 1: Lichtbogenschweißverfahren, DVS Verlag, Düsseldorf.
- Klock H. et al. 1977: Schweißen und Löten von Aluminiumwerkstoffen, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf
- Knappstein G. 2008: Aufgaben zur Festigkeitslehre ausführlich gelöst, Hari Verlag Deutsch GmbH, Frankfurt am Main.
- Kosteas D. 1978: Geschweißte Aluminiumkonstruktionen, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig.
- Kukutschki G. 2007: Werkstoffwahl für die Neuentwicklung eines Kleinkühlkompressors, Dissertation TU Graz, Fa. ACC Fürstenfeld.
- Kurz U. et al. 2009: Konstruieren, Entwickeln, Entwerfen 4. Auflage, Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- Lahnsteiner R. 2004: MIG-Schweißen von Aluminium- Weiterentwicklung der letzten 20 Jahre. Jahrbuch der Schweißtechnik 2004, DVS Verlag, Düsseldorf.
- Lange K. 1990: Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft Bd. 3, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Lange K. 1975: Lehrbuch der Blechumformung Bd. 3, Springer Verlag, Heidelberg.
- Läpple V. 2008: Einführung in die Festigkeitslehre: Lehr- und Übungsbuch, Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- Lehnert W. et al. 1996: Aluminium Taschenbuch Bd.2 15.Auflage: Umformen, Gießen, Oberflächenbehandlung, Recycling und Ökologie, Aluminium Verlag, Düsseldorf.
- LME 2011: London Metall Exchange: www.lme.com, 31.August 2011
- Mandal N. 2002: Aluminum welding, Woodhead Publishing, Abington Hall, England
- Mandal N. 2005: Aluminum Welding Bd.1, Narosa Publishing House, New Delhi.
- Matschinsky W. 2007: Radführungen der Straßenfahrzeuge: Kinematik, Elasto-Kinematik und Konstruktion, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Moeller E. 2008: Handbuch Konstruktionswerkstoffe: Auswahl, Eigenschaften, Anwendung, Carl Hanser Verlag, München.
- Olson D.-L. et al. 2008: ASM Handbook Vol.6: Welding, Brazing and Soldering, ASM International, United States of America.
- Olson D.-L. et al. 2008: ASM Handbook Vol.2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, United States of America.
- Oskar M. et al. 2010: Alles wichtige für das Abitur in Mathematik, Books on Demand GmbH, Norderstedt.
- Ostermann F. 2007: Anwendungstechnologie Aluminium, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.

- Park H.J. et al. 2008: Optimisation of the wire feed rate during pulse Mig welding of Al sheets, Journal of Achievements in Material and Manufacturing Engineering Volume 27 Issue 1.
- Pastor M. et al. 1999: Porosity, Underfill and Magnesium Loss during Continuous Wave Nd:YAG Laser Welding of Thin Plates of Aluminum Alloys 5182 and 5754, Welding Research Supplement.
- Petzow G. 1994: Metallographisches- Keramisches- Plastographisches Ätzen, Gebrüder Bornträger, Berlin Stuttgart.
- Prometall 2011: Aluminium Zustandstabelle zu EN 515 Bezeichnung der Werkstoffzustände, www.prometall.ch, Zugriff: 16.11.2011
- Rakesh K. et al. 2009: Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse GMA and AC wave pulse-GMA welding, Materials and Design 30, Elsevier.
- Rauh G. et al. 2004: Die Metalle: Werkstoffkunde mit ihren chemischen und physikalischen Grundlagen, 19. Auflage, Verlag neuer Merkur GmbH.
- Rechner R. et al. 2010: Influence on the strength and aging resistance of aluminum joints by laser pre-treatment and surface modification, International Journal of Adhesion & Adhesives 30 (2010) 595–601, Elsevier Ltd.
- Rheinfelden Alloys 2010: Broschüre zu Hüttenaluminium- Gusslegierungen, www.rheinfelden-alloys.eu.
- Reuter M. 2007: Methodik der Werkstoffauswahl- Der systematische Weg zum richtigen Material, Carl Hanser Verlag, München.
- Roos E. et al. 2005: Werkstoffkunde für Ingenieure, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Roos E. 2008: Werkstoffkunde für Ingenieure, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Ruge J. 1980: Handbuch der Schweißtechnik, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Ruge J. et al. 2002: Technologie der Werkstoffe, 7. Auflage, Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig/ Wiesbaden.
- Safra 2011: aluminum- copper welding alloys wires & rods, www.safraspa.com, Zugriff: 07.11.2011
- Sánchez-Amaya J.M. 2009: Laser welding of aluminum and 6082 under conduction regime, Applied Surface Science 255 (2009) 9512-9521, Elsevier Ltd.
- Sauders H.-L. 1989: Welding Aluminum: Theory and Practice, Aluminum Association.
- Schulze G. 2010: Die Metallurgie des Schweißens, 4 Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Spur G. 1986: Handbuch der Fertigungstechnik, Band 5, Carl Hanser Verlag, München/ Wien.
- Svenningsen G. et al. 2006: Effect of low copper content and heat treatment on intergranular corrosion of model AlMgSi alloys, Corrosion Science 48 (2006) 226-242, Elsevier Ltd.



- Svenningsen G. et al. 2006a: Effect of high temperature heat treatment on intergranular corrosion of AlMgSi(Cu) model alloy, Corrosion Science 48 (2006) 258-272, Elsevier Ltd.
- Sweathaven 2011: <http://www.sweethaven.com/sweethaven/BldgConst/Welding>, Zugriff: 31.10.2011
- Thier Bernd 1997: Apparate: Technik, Bau und Anwendungen 2. Ausgabe, Vulkan Verlag, Essen.
- Totten G.E. et al. 2003: Handbook of Aluminum, Volume 2, Marcel Dekker Inc., New York / Basel.
- Totten G.E. et al. 2003 a: Handbook of Aluminum, Volume 1, Marcel Dekker Inc., New York / Basel.
- Tödt F. 1961: Korrosion und Korrosionsschutz, Walter De Gruyter & Co., Berlin.
- Trzesniowski M. 2010: Rennwagentechnik: Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Vargel C. 2004: Corrosion of Aluminum, Elsevier B.V., Amsterdam Netherlands
- Voestalpine 2011: Technische Lieferbedingungen: Weiche, unlegierte Stähle zum Kaltumformen. www.voestalpine.com/stahl, 24.08.2011
- Vujic S. 2011: Wurzelkerbenausbildung beim MIG und CMT Schweißen von Aluminium, Diplomarbeit Institut für Werkstoffkunde, TU Graz.
- Weißbach W. 2010: Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung 17.Auflage, Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- Weißbach W. et al. 2011: Aufgabensammlung Werkstoffkunde, 9. Auflage, Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- Witt G. 2006: Taschenbuch der Fertigungstechnik, Carl Hanser Verlag, München/ Wien.
- Wolf M. 2006: Zur Phänomenologie der Heißrissbildung beim Schweißen und Entwicklung aussagekräftiger Prüfverfahren, BAM-Dissertationsreihe Band 19 Berlin, Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven
- Wunderlich W. 1956: ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik Volume 36 Issue 11-12, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Zhang H. et al. 2002: Werkstoffkundliche Untersuchungen zur Heißrissbildung beim Schweißen von Aluminiumlegierungen, Lehrstuhl Metallische Werkstoffe, Universität Bayreuth.

Sekundärzitat:

- Lahnsteiner R. 2004 und Ashton R.F. et al. 1975 zitiert nach: Baumgartner S. 2005, Fülldrahtelektroden zum MIG Schweißen von Aluminiumwerkstoffen. Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, Dissertation TU Graz.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Entwicklungsschritte vom Alpha- zum Ultra Clean –Kompressor [ACC 2011a].....	2
Abbildung 1.2 Explosionszeichnung des Delta Kompressors [Kerschbaumer K. 2011, S.4] ...	3
Abbildung 2.1 Gesamtprozess der Werkstoffauswahl [Reuter M. 2007,S.31ff]	6
Abbildung 2.2 Zusammenfassung aller Anforderungen an den Delta Kompressor (Lastenheft).....	7
Abbildung 2.3 Blick von unten auf den Deltakompressor (mit eingezeichnetem Koordinatensystem für die Festigkeitsberechnung) [ACC 2011c]	8
Abbildung 2.4 Querschnitt A-A und B-B durch die Oberschale (vgl. Abbildung 2.3) [ACC 2011c].....	8
Abbildung 2.5 Querschnitt A-A und B-B durch den Boden (vgl. Abbildung 2.3) [ACC 2011c].....	9
Abbildung 2.6 Freischnitt eines innen belasteten (a) Zylinders (b) und einer Kugel [Knappstein G. 2008 S.243]	10
Abbildung 3.1 Isothermenfelder beim Schweißen a) Stahl b) Aluminium [Dilthey U. 2005, S230].....	26
Abbildung 3.2 a) Eingeschwemmte Oxidhaut b) Oxidhaut mit Pore [Reihnfeld Alloys 2010, S.100].....	27
Abbildung 3.3 Wasserstofflöslichkeit in Aluminium [Brückner C. 2009, S.11].....	27
Abbildung 3.4 Wachstum und Loslösung von Gashohlräumen an der Phasengrenzfläche [Dilthey U. 2005, S.288]	28
Abbildung 3.5 Möglichkeiten der Gasaufnahme beim MSG Schweißen [Heubner U. et al. 2009, S.87].....	28
Abbildung 3.6 Abhängigkeit der Bruchfestigkeit und Dehnung von der Porosität in der Bruchfläche von AlZnMg1 mit SZ AlMg5 [Kosteas D. 1978, S.97].....	30
Abbildung 3.7 Festigkeitsverläufe quer zur Schweißnaht von MIG Aluminiumschweißverbindungen a) AW-5083-O, b) AW-5083-H24, c) 6082-T6 [Ostermann F. 2007, S.602]	31
Abbildung 3.8 Charakteristische Vorgänge in der WEZ von Aluminiumschweißverbindungen. a) Grobkornbildung, b) Ausscheidungsvorgänge bei aushärtbaren Legierungen [Schulze G. 2010, S.504f].....	31
Abbildung 3.9 Erstarrungsrisse beim Werkstoff NiCr28FeSiCe (Werkstoff Nr.: 2.4889) [Wolf M. 2006, S.3]	33
Abbildung 3.10 Wiederaufschmelzrisse beim Werkstoff NiMo16Cr15 W (Werkstoff Nr.: 2.4819) [Wolf M. 2006, S.3]	33
Abbildung 3.11 Ductility Dip Cracks beim Werkstoff NiMo27 (Werkstoff Nr.: 2.4615) [Wolf M. 2006, S.6]	33
Abbildung 3.12 Lage von Heißrissen eingeteilt nach ihrer Entstehungsart [Wolf M. 2006, S.4].....	34
Abbildung 3.13 Einfluss der Legierungsbestandteile auf die Heißrissanfälligkeit von binären und quasibinären Legierungssystemen a) Al-Li, b) Al-Si, c) Al-Cu, d) Al-Mg, e)Al-Mg ₂ Si [Davis J.R. et al. 1994 S.380]	35
Abbildung 3.14 Erstarrungsintervalle üblicher Aluminiumlegierungen [Goecke S.F. 2004, S.14].....	35
Abbildung 3.15 Modellvorstellung über die Entstehung von Warmrissen [Ostermann F. 2007, S.200].....	36
Abbildung 3.16 Kristallisation des Schweißgutes bei verschiedenen Raupenformen und hieraus resultierenden Gefahren für die Heißrissbildung [Dilthey U. 2005, S.272].	36

Abbildung 3.17 Richtwerte für das Vorwärmen von Aluminiumlegierungen bezogen auf ohne Vorwärmung geschweißten Baustahl [Dilthey U. 2005, S.235].	37
Abbildung 3.18 Metalloxidniederschlag auf einem Schweißspritzers von 5182 mit AlMg5 verschweißt a) REM Aufnahme, b) EDX Analyse [Goecke S.F. 2004 S. 78f].	38
Abbildung 3.19 Verlauf der Magnesiumkonzentration in einer Laserverschweißten 5754 Al-Legierung a) Markierung des Linescan in Querschiff, b) Massenprozent von Mg [Pastor M. et al. 1999, S.214].	39
Abbildung 3.20 Verfahrensprinzip des MIG Schweißprozesses [Ostermann F. 2007, S.610]	39
Abbildung 3.21 Verbesserung der Spaltüberbrückbarkeit durch AC Puls MIG Schweißen [Dilthey U. 2006, S.79].	40
Abbildung 3.22 Lichtbogenarten beim MSG Schweißen [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.56].	40
Abbildung 3.23 Werkstoffübergang beim a) Kurzlichtbogen b) Sprühlichtbogen c) Impulslichtbogen [Dilthey U. 2006 S.70ff].	41
Abbildung 3.24 CMT Prozess mit oszillierender Drahtvorschubbewegung [Dilthey U. 2006 S.68f].	42
Abbildung 3.25 Möglicher Arbeitsbereich beim Metall Schutzgasschweißen [Ruge J. 1980, S.61].	44
Abbildung 3.26 Einfluss der Schweißspannung auf die Schweißbadform und Einbrandtiefe (Bsp. Stahl) [Mandal N. 2005, S.36].	45
Abbildung 3.27 Auswirkung des Kontaktrahabstandes (KrA) auf die Nahtgeometrie bei konst. Spannung (Bsp. Stahl) [Mandal N. 2005, S.36ff].	45
Abbildung 3.28 Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Nahtgeometrie einer UP-Naht [Ruge J. 1980, S.49].	46
Abbildung 3.29 Einfluss des Anstellwinkels auf die Schweißbadform und Einbrandtiefe. a) stechend b) neutral c) schleppend [Mandal N. 2005, S.62].	46
Abbildung 3.30 Arbeitswinkel beim MIG Schweißen [Sweetheaven 2011].	47
Abbildung 3.31 Einfluss des Drahtdurchmessers auf die Nahtform (Bsp. Stahl bei I=600A, U=30V, v=13mm/s) [Mandal N. 2005, S.37].	48
Abbildung 3.32 Einfluss ausgewählter Schutzgase auf die Nahtgeometrie [Mandal N. 2005, S.44].	48
Abbildung 3.33 Versuchsblech der Schweißparametervorstudie von AW-5083-O	49
Abbildung 3.34 Versuchsaufbau der Hauptschweißversuche mit eingespanntem Versuchsblech.	49
Abbildung 3.35 Skizze der Elektrodenausrichtung an der Überlappnaht	50
Abbildung 3.36 Probenplan: Scherzugversuche (blau), Querschleife (grün), Korrosionsproben (orange).	50
Abbildung 3.37 Bruchflächenauswertung von den drei Scherzugproben einer Naht; AW-5083-O mit SZ AlMg5	51
Abbildung 3.38 Ausgabebilder der digitalen Auswertung a) Porenfläche, b) Schweißgutfläche	52
Abbildung 3.39 Querschleife von Überlappnähten: a) s=1,6mm Al6k21 mit AlSi5 [Park H.J. et al. 2008, S.85], b) s=1mm 6082 mit 4047[Rakesh K. et al. 2009, S.309ff].	53
Abbildung 3.40 Vorstudie: Einfluss der Streckenenergie auf die Nahtgeometrie. a)178,1 J/mm b) 173,3J/mm	54
Abbildung 3.41 Einfluss des Anstellwinkels auf die Nahtgeometrie bei AW-5083-O/AlMg5 a) 15°und b) 5°schleppend c) 5° stechend (E=178 J/mm, v=15mm/s, 100%Ar)	56

Abbildung 3.42 Einfluss des Anstellwinkels auf die Nahtgeometrie AW-5083-O/AlMg5 a) 15° und b) 5° schleppend c) 5° stechend (E=137 J/mm, v=30mm/s, 50Ar/50He% Gemisch).....	56
Abbildung 3.43 Einfluss des Anstellwinkels auf die Nahtgeometrie von AW-5083-O/AlMg5 a) 15° und b) 5° schleppend c) 5° stechend (E=155 J/mm, v=15mm/s, 50Ar/50He% Gemisch)	57
Abbildung 3.44 Einfluss des Anstellwinkels auf den Schweißschmauch- Niederschlag beim Schweißen von ungereinigten AW-5083-O Schweißnähten a) 15° schleppend b) 5° stechend.....	57
Abbildung 3.45 Einfluss des Anstellwinkels auf die Schweißschmauch- Niederschlag beim Schweißen von gereinigten AW-5083-O/AlMg5 Schweißnähten a) 15° schleppend b) 5° stechend	58
Abbildung 3.46 Einfluss der Pulskorrektur auf den Schweißnahtquerschnitt von AW-5083-O a) PK=0 b) PK=+2,1	58
Abbildung 3.47 Einfluss der steigenden Pulskorrektur auf die Bildung von Schweißrauchablagerungen (AW-5083-O/AlMg5) a) Pk=+1,0 b) Pk=+2,1	58
Abbildung 3.48 Einfluss der positiven Pulskorrektur auf die Porenbildung von AW-5083-O/AlMg5 a) 15° schleppend und b) 5° stechend.....	59
Abbildung 3.49 Einfluss der negativen Pulskorrektur auf die Porenfläche von AW-5083-O a) Pk=0 (E=138 J/mm), b) Pk=-0,8 (E=142 J/mm).....	59
Abbildung 3.50 Einfluss der Pulskorrektur auf die Bildung von Endkraterrissen beim Schweißen von AW-6181-T4/AlSi5 a) ohne Pk, b) mit Pk=+1,8.....	60
Abbildung 3.51 Einfluss des Schutzgases auf den Nahtquerschnitt von AW-5083-O/AlMg5 bei 15mm/s u. 15° schleppend a) 100%Ar (E=155J/mm), b) 50Ar/50He%-Gemisch (E=158J/mm).....	61
Abbildung 3.52 Einfluss des Schutzgases auf den Nahtquerschnitt von AW-5083-O/AlMg5 bei v=30mm/s, 5° stechend u. E=138J/mm a) 100%Ar, b) 50Ar/50He%-Gemisch	61
Abbildung 3.53 Einfluss des Schutzgases auf die Porenbildung von AW-5083-O bei v=30mm/s, 5° st. u. E=138J/mm a) 100%Ar b) 50Ar/50He%-Gemisch	61
Abbildung 3.54 Nicht ausfließendes Schweißgut AlMg5 bei zu geringer Wärmeeinbringung in das Schweißblech beim verschweißen von AW-5083-O	62
Abbildung 3.55 Einbrandkerbenbildung bei Verwendung von ArHe Gemischen bei AW-6181-T4/AlSi5	62
Abbildung 3.56 Bruchlage der Scherzugversuche a) Draufsicht b) Seitenansicht c) metallograph. Schliff geätzt.....	68
Abbildung 3.57 Härteverlauf AW-5083-O mit SZ AlMg5 (E=178J/mm, 100%Ar, 15mm/s, 5° schleppend)	69
Abbildung 3.58 Schweißverbindung von AW-5083-O mit SZ AlMg5 a) SG b) WEZ c) GW	70
Abbildung 3.59 EDX Mapping (Al, Fe, Mn, Mg, Si) des AW-5083-O Grundwerkstoffes.....	71
Abbildung 3.60 Porenanteil im Schweißgut AlMg5 von AW-5083-O a) Probe mit 0,1% (50Ar/50He% Gas) b) Probe mit 1,5% (100%Ar Gas)	72
Abbildung 3.61 Ausbildung der Schweißspalthöhe aufgrund der Blecheinspannung a) mit Spalt, b) ohne Spalt.....	74
Abbildung 3.62 Wurzel Ausbildung von AW-5083-O/AlMg5 a) mit Schweißspalt, b) ohne Spalt.....	74
Abbildung 3.63 a) Härteverlauf der AW-6181-T4 mit AlSi5 verschweißten und geätzten Al- Legierung. (E=149J/mm, 50Ar/50He%, 30mm/s, 0°) b) Detailaufnahme der WEZ....	78

Abbildung 3.64 Schweißnahtverbindung AW-6181-T4 mit SZ AlSi5 a) Schweißgut ungeätzt, b) WEZ ungeätzt, c) Grundwerkstoff ungeätzt, d) geätzter Grundwerkstoff (Flusssäure).....	79
Abbildung 3.65 EDX Mappings des AW-6181-T4 Grundwerkstoffes a) Übersicht, b) Al, c) Si, d) Fe	80
Abbildung 3.66 Schweißversuche von AW-6181-T4 mit SZ AlSi5 a) Probe mit 0,5% (50Ar/50He% Gas), b) Probe mit 4,0% (50Ar/50He% Gas)	81
Abbildung 3.67 Querschliffe von AW-6181-T4 ohne Spalt a) mit Spalt b) ohne Spalt	83
Abbildung 3.68 Ergebnis Parameteroptimierung für AW-5083-O/AlMg5 (Optimale Naht 8: 50Ar/50He%, v=30mm/s, 5°schleppend, E=138J/mm) a) Querschliff, b) Nahtoberfläche	84
Abbildung 3.69 Ergebnis Parameteroptimierung für AW-6181-T4/AlSi5 (Optimale Naht 5: 50Ar/50He%, v=15mm/s, 0°, E=185J/mm) a) Querschliff, b) Nahtoberfläche.....	85
Abbildung 3.70 Einflussgrößen auf das Verformungsergebnis [Jäniche W. et al. Bd. 1 1985, S.595].....	89
Abbildung 3.71 Schematische Darstellung des Tiefziehvorganges [Fritz H. et al. 2010, S.455].....	89
Abbildung 3.72 Auswirkung der Anisotropie auf die Zipfelbildung bei Tiefziehvorgängen [Burkhard H. 2003, S.135]	92
Abbildung 3.73 Probenlage bei der Ermittlung der Anisotropiewerte [Doege E. Behrens B.-A. 2010, S.300ff]	92
Abbildung 3.74 gebrochene Flachzugproben a) Vergleich aller Werkstoffe b) Scherbruch einer Flachzugprobe (AW-5083-O)	94
Abbildung 3.75 Einflüsse auf das Korrosionsverhalten [Roos E. et al. 2005, S.351]	96
Abbildung 3.76 Elektrochemische Spannungsreihe der Metalle [Roos E. et al. 2005, S.354]	97
Abbildung 3.77 Aufbau der Oxidschicht von Aluminium [Ostermann F. 2007, S.232]	97
Abbildung 3.78 Elektrochemischer Korrosionsmechanismus von Aluminium [Ostermann F. 2007, S. 236]	98
Abbildung 3.79 Korrosionsarten [Roos E. et al. 2005, S.350].....	98
Abbildung 3.80 Erscheinungsform von Lochkorrosion a) Bei 5083-O nach 240h NSS Test, b) bei AlMg3 [Ostermann F. 2007, S.247].....	99
Abbildung 3.81 EDX Spektrum von AA5083 Ausscheidungen a) Al(Mn,Fe,Cr) Ausscheidung, b) Edx Sprechtrum der Ausscheidungen, c) Al(Mn,Fe,Cr) Ausscheidung [Aballe A. et al. 2001, S.1163].....	100
Abbildung 3.82 Arten der interkristallinen Korrosion a) unedlere Korngrenzen, b) edlere Korngrenze [Totten G.E. et al. 2003, S.436].....	100
Abbildung 3.83 Elektrochemische Potentialwerte intermetallischer Phasen von Aluminium	101
Abbildung 3.84 Spaltkorrosion von Aluminium [Totten G.E. et al. 2003, S.433]	101
Abbildung 3.85 a) Probenanordnung in der Prüfkammer (SN... Schweißverbindungen, GM... Grundmaterial), b) Probenlage von Schweißverbindungen und Grundmaterial im Probenhalter.....	103
Abbildung 3.86 Korrosionsproben vom Grundmaterial vor dem NSS Test.....	103
Abbildung 3.87 Korrosionsproben vom Grundmaterial nach 480h NSS Test.....	104
Abbildung 3.88 Detailaufnahme der Korrosionserscheinungen a) Lochfraßstellen von AW-5083-O, b) Lochfraßstellen als Ausgangspunkt der interkristalline Korrosion bei von AW-6181-T4	104
Abbildung 3.89 Lochfraßstelle bei AW-5083-O im Grundmaterial nach 240h NSS Test a) Übersicht b) Detailaufnahme.....	105

Abbildung 3.90 Interkristalline Korrosion von AW-6181-T4 im Grundmaterial a) 240h NSS b) 480h NSS	105
Abbildung 3.91 Scherzugproben von Schweißnähten a) vor NSS Test b) nach 480h NSS Test c) lokaler Korrosionsangriff in der WEZ bei AW-5083-O/AlMg5.....	106
Abbildung 3.92 Querschliff einer Schweißnaht von AW-5083-O vor der Korrosionsprüfung (Ätzung: Flusssäure)	107
Abbildung 3.93 Details aus Abbildung 3.92: Korrosionserscheinungen AW-5083-O mit AlMg5 Schweißgut a) Nahtanbindung vor NSS Test, b) nach 480h NSS Test, c) Nahtanbindung vor NSS Test, d) nach 480h NSS Test.....	107
Abbildung 3.94 Korrosionsangriff des Schweißgutes von AW-5083-O mit SG AlMg5 nach 480h NSS.....	108
Abbildung 3.95 Korrosion einer lasergeschweißten Naht AW-5083-T0 [Sánchez-Amaya J.M. 2009, S.9520]	108
Abbildung 3.96 Bruchverlauf AW-5083-O in der AlMg5 Schweißnaht a) Querschliff vor NSS Test b) Draufsicht nach 240h NSS Test.....	109
Abbildung 3.97 Bruchverlauf AW-5083-O in der AlMg5 Schweißnaht nach 480h NSS Test a) Draufsicht b) Querschliff.....	109
Abbildung 3.98 Detailaufnahmen aus Abbildung 3.97 b, Korrosionsangriff a) GW Seite b) SG Seite.....	110
Abbildung 3.99 REM SE Aufnahmen einer AW-5083-O/AlMg5 Bruchfläche nach 480h NSS Test a) Aufnahme Bruchfläche im Schweißgut AlMg5 b) Detail vom Korrosionsbelag c) duktiler Bruchflächenbereich (Waben).....	110
Abbildung 3.100 a) REM RE Aufnahme einer AW-5083-O/AlMg5 Bruchfläche nach 480h NSS Test (vgl. Abbildung 3.99), b) EDX Mapping Al-O.....	111
Abbildung 3.101 a) Bruchfläche von AW-6181-T4 im AlSi5 Schweißgut nach 480h NSS, b) Detailaufnahme, c) Nahaufnahme Bruchfläche	111
Diagramm 3.1 Getestete Parameter der Vorversuche von AW-5083-O.....	54
Diagramm 3.2 Getestete Parameter der Vorversuche von AW-6181-T4	55
Diagramm 3.3 Optimierte Schweißparameter für die Schweißversuche von AW-5083-O/AlMg5 (t=3mm)	62
Diagramm 3.4 Optimierte Schweißparameter für die Schweißversuche von AW-6181-T4/AlSi5 (t=2.5mm).....	63
Diagramm 3.5 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-5083-O mit AlMg5 verschweißt (100% Argon, v=15mm/s, Pk=1,8, E=178J/mm) a) Diagramm, b) tabellarisch.....	66
Diagramm 3.6 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-5083-O mit AlMg5 verschweißt (100% Argon und v=30mm/s E=155J/mm) a) Diagramm, b) tabellarisch	67
Diagramm 3.7 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-5083-O mit AlMg5 verschweißt (50Ar/50He%, v=15mm/s, LbK=3, E=146J/mm) a) Diagramm, b) tabellarisch.....	67
Diagramm 3.8 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-5083-O mit AlMg5 verschweißt (50Ar/50He%, v=30mm/s, LbK=3, E=138J/mm) a) Diagramm, b) tabellarisch.....	68
Diagramm 3.9 Porenanteil der Schweißversuche von AW-5083-O mit SZ AlMg5.....	72
Diagramm 3.10 Mengenverteilung der Porengröße bei AW-5083-O/AlMg5	73
Diagramm 3.11 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-6181-T4 mit AlSi5 verschweißt für: 100% Argon, v=15mm/s und E=204J/mm a) Diagramm, b) tabellarisch	75
Diagramm 3.12 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-6181-T4 mit AlSi5 verschweißt für: 100% Argon, v=30mm/s und E=172J/mm a) Diagramm, b) tabellarisch	75

Diagramm 3.13 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-6181-T4 mit AlSi5 verschweißt für: 50Ar/50He%, v=15mm/s und E=185J/mm a) Diagramm, b) tabellarisch.....	76
Diagramm 3.14 Ergebnisse der Scherzugversuche von AW-6181-T4 mit AlSi5 verschweißt: 50Ar/50He%, v=30mm/s und E=149J/mm a) Diagramm, b) tabellarisch.....	76
Diagramm 3.15 Porenanteil der Schweißversuche von AW-6181-T4 mit SZ AlSi5	81
Diagramm 3.16 Mengenverteilung der Porengröße im Schweißgut von AW-6181-T4/AlSi5 82	
Diagramm 3.17 Spannungsdehnungsdiagramm der Werkstoffe DD13, DD11, AW-5083-O und AW-6181-T4 von Flachzugproben nach DIN EN ISO 6792-1.....	93
Tabelle 1.1 Überblick über die geplanten Versuchsblöcke.....	1
Tabelle 1.2 Normenvergleich für DD11 und DD13 [Atlas-Blech-Center 2011].....	4
Tabelle 1.3 Chemische Zusammensetzung warmgewalzter Bänder aus weichem Stahl für die Kaltumformung [Moeller E. 2008, S.203].	4
Tabelle 2.1 Materialanforderungsliste für das Delta Kompressorgehäuse aufgrund der Anforderungen aus Funktion und Management, [1] LME 2011, [2] Möser M. 2009 S.146, [3] siehe Anhang A S.129.	14
Tabelle 2.2 Einteilung der Aluminiumwerkstoffe nach ihrem Hauptlegierungselement. EN...Europäische Norm, AW...Aluminium Wrought alloys (Knetlegierungen) [Moeller E. 2008 S.311]	16
Tabelle 2.3 Wärmebehandlungszustände von nicht aushärtbaren Aluminium Knetlegierungen [Moeller E. 2008 S.311]	16
Tabelle 2.4 Wärmebehandlungszustände von aushärtbaren Aluminium Knetlegierungen	17
Tabelle 2.5 Vorauswahl geeigneter Aluminiumknetlegierungen für das Kühlkompressorgehäuse. *die einzelnen Materialkennwerte wurden aus [Ostermann F. 2007, S757ff] und [Vargel C. 2004, S.75] entnommen.....	21
Tabelle 2.6 Feinauswahl einer geeigneten 5xxx Legierung [Ostermann F. 2007, S.754ff].....	22
Tabelle 2.7 Feinauswahl einer geeigneten 6xxx Legierung [Ostermann F. 2007, S.754ff].....	23
Tabelle 2.8 Eigenschaften der Versuchswerkstoffe AW-5083-O und AW-6181-T4 [Ostermann F. 2007, S.754ff].....	24
Tabelle 3.1 Vergleich der physikalischen Eigenschaften von Aluminium und Stahl [Dilthey U. 2005, S.218].....	25
Tabelle 3.2 Ursache und Abhilfe gegen Poren beim MIG Schweißen von Aluminium [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.548].....	29
Tabelle 3.3 Eigenschaften der Wärmeeinflusszonen von Aluminiumschweißnähten [Fahrenwaldt H. et al. 2009, S.207].....	32
Tabelle 3.4 Kontaktrahabstand als Funktion der Stromstärke beim Impulslichtbogenschweißen [Fronius 2011]	44
Tabelle 3.5 Einflüsse der Lichtbogenlänge auf Aluminiumnähte. [Mandal N. 2005, S.64]....	44
Tabelle 3.6 Arbeitsschritte beim Schleifen und Polieren.....	51
Tabelle 3.7 Schweißparameter als Grundlage für die Vorversuche.....	53
Tabelle 3.8 Chemische Zusammensetzung der Schweißzusätze in Gew. % [Safera 2011, S.4ff].....	53
Tabelle 3.9 Parametertabelle der optimierten Schweißparameter für die Haupt-Schweißversuche von AW-5083-O und AW-6181-T4 (* +α=schleppend).....	65
Tabelle 3.10 Mengenverteilung der Porengröße in Tabellenform	73
Tabelle 3.11 Mengenverteilung der Porengröße in Tabellenform	82
Tabelle 3.12 Tabelle zur Auswahl optimalen Naht von AW-5083-O/AlMg5	84

Tabelle 3.13 Tabelle zur Auswahl optimalen Naht von AW-6181-T4/AlSi5.....	84
Tabelle 3.14 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Schweißversuchen	88
Tabelle 3.15 Mechanische Kennwerte aus den Flachzugversuchen für die Werkstoffe DD13, DD11, AW-5083-O und AW-6181-T4 (* ... Kennwerte aus Lit. [Ostermann F. 2007, S.514, 754, 785], [Voestalpine 2011, S.4], [Anhang A S.128]).....	94
Tabelle 3.16 Parameter der Korrosionsprüfung (*vom Korrosionsmedium) [EN ISO 9227:2006].....	102
Tabelle 3.17 Ergebnisse der Scherzugversuche nach 240 und 480h NSS Test (LbK...Lichtbogenkorrektur, Pk... Pulskorrektur).....	112

Anhang A: Materialkennwerte DD11-DD14

Anhang A beinhaltet Materialkennwerte der Tiefziehstähle DD11-DD14, die vom der Fa. Voestalpine Stahl GmbH durchgeführt und zur Verfügung gestellt wurden.

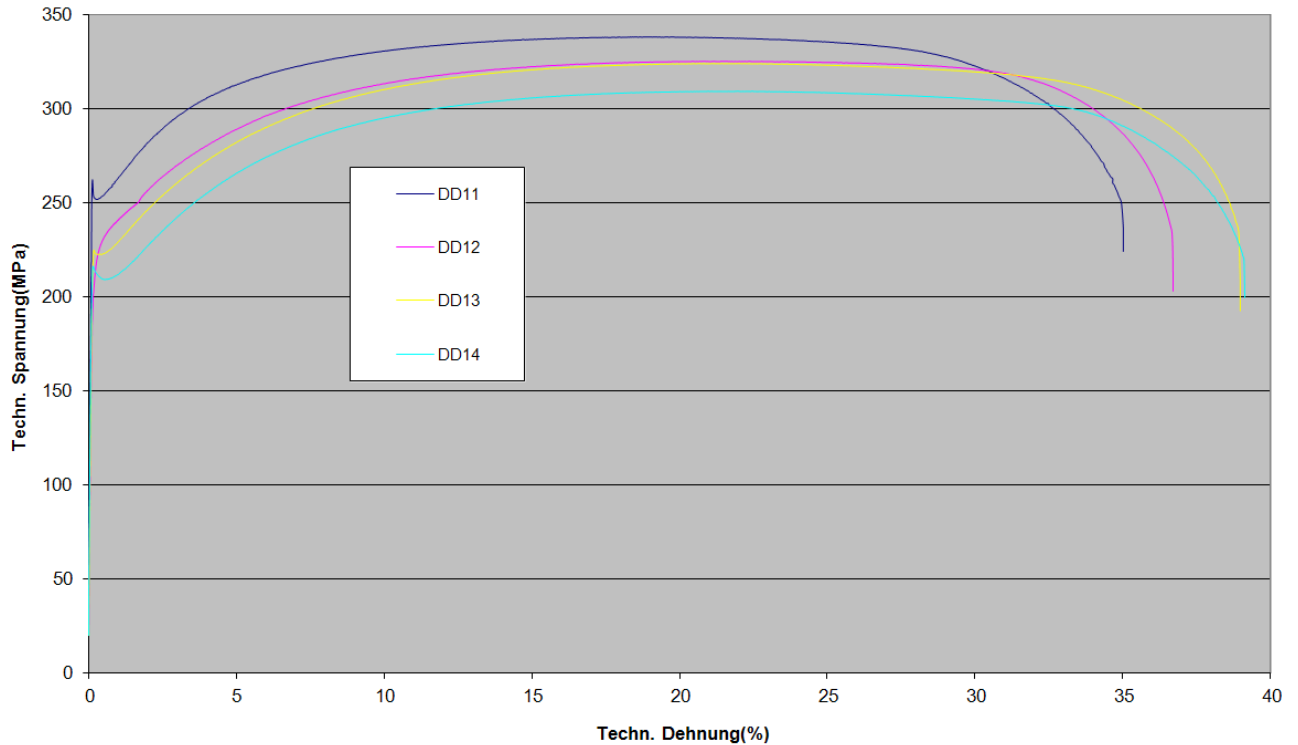


Abb. 1 Spannungs- Dehnungs Diagramm der Stähle DD11-DD14

Werkstoffe	r_{0°	r_{45°	r_{90°	r_m	Δr
DD11	0.88	0.98	0.87	0.9275	-0.105
DD12	0.89	0.97	0.95	0.945	-0.05
DD13	0.92	0.99	0.95	0.9625	-0.055
DD14	0.78	0.98	0.84	0.895	-0.17

Abb. 2 Anisotropiekennwerte der Stähle DD11-DD14 (r_m ... mittlere Anisotropie, Δr ... senkrechte Anisotropie)

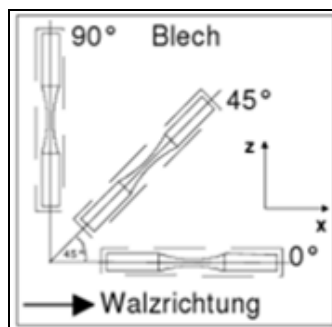


Abb. 3 Probenlage bei der Ermittlung der Anisotropiewerte [Doeg E. Behrens B.-A. 2010, S.300ff]

Anhang B: Schweißparameter Vorversuche

Gasvorströmzeit... 0,2sec

Gasnachströmzeit... 0,5sec

Ar... 100% Argon, Kennlinie (100%Ar, \varnothing 1,2mm AlMg5)

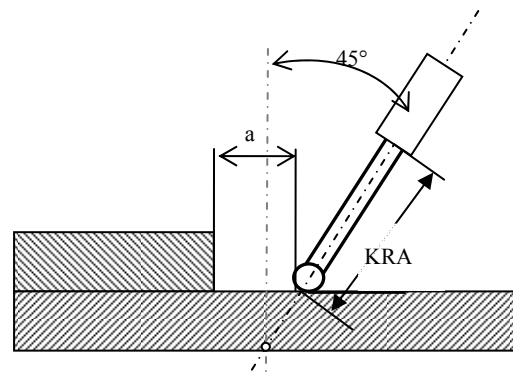
Ar/He... 50Ar/50He%, Kennlinie (100%Ar, \varnothing 1,2mm AlMg5)

Positiver Anstellwinkel... schleppend

Grundwerkstoff... 5083-O / s=3mm

Schweißzusatz... AlMg5 / \varnothing 1,2mm

*...zu diesen Parametern wurden Querschliffe angefertigt



Nahtnummer	U [V]	I [A]	v [mm/s]	f [m/min]	E [kJ/cm]	Schutzgas / Menge [l/min]	Puls-korrektur	Lichtbogen-korrektur	KRA [mm]	Anstellwinkel [°]	a [mm]
Sv02_1	18,2	103	15	6,0	1,25	Ar/15	0	0	15	10	1,0
Sv02_2	18,5	112	15	6,5	1,38	Ar/15	0	0	15	10	1,0
Sv02_3	18,6	114	15	6,6	1,41	Ar/15	0	0	15	10	1,0
Sv02_4	18,8	119	15	6,9	1,49	Ar/15	0	0	15	10	1,0
Sv02_5*	19,0	125	15	7,2	1,58	Ar/15	0	0	15	10	1,0
Sv02_6	19,2	130	15	7,5	1,66	Ar/15	0	0	15	10	1,0
Sv02_7*	19,4	134	15	7,8	1,73	Ar/15	0	0	15	10	1,0
Sv02_8	18,8	119	15	6,9	1,49	Ar/15	0	0	15	15	1,0
Sv02_9*	19,0	125	15	7,2	1,58	Ar/15	0	0	15	15	1,0
Sv02_10	19,2	130	15	7,5	1,66	Ar/15	0	0	15	15	1,0
Sv02_11*	19,4	134	15	7,8	1,73	Ar/15	0	0	15	15	1,0
Sv02_12	19,0	125	15	7,2	1,58	Ar/15	0	0	15	-15	1,0
Sv02_13*	19,4	134	15	7,8	1,73	Ar/15	0	0	15	-10	1,0
Sv02_14	19,2	130	15	7,5	1,66	Ar/19	0	0	15	-10	1,0
Sv02_15*	19,0	125	15	7,2	1,58	Ar/15	0	0	15	-10	1,0
Sv03_1	19,5	137	15	8,1	1,78	Ar/15	0	0	15	15	1,5
Sv03_2*	19,5	137	15	8,1	1,78	Ar/15	0	0	15	15	1,5
Sv03_3*	19,4	134	15	7,8	1,73	Ar/15	1,0	0	15	15	1,5
Sv03_4	19,4	134	15	7,8	1,73	Ar/15	2,0	0	15	15	1,5
Sv03_5*	19,4	134	15	7,8	1,73	Ar/15	1,8	0	15	15	1,5

Anhang B: Schweißparameter Vorversuche

Sv03_6*	19,4	134	15	7,8	1,73	Ar/15	2,1	0	15	15	1,5
Sv03_7	19,5	137	15	8,1	1,78	Ar/15	0	0	15	10	1,5
Sv03_8*	19,5	137	15	8,1	1,78	Ar/15	0	0	15	5	1,5
Sv03_9*	19,5	137	15	8,1	1,78	Ar/15	0	0	15	-5	1,5
Sv04_1	19,5	137	15	8,1	1,78	Ar/15	1,8	0	15	15	1,0
Sv04_2	19,5	137	15	8,1	1,78	Ar/15	1,8	0	15	-5	1,0
Sv04_3	24,4	260	35,6	16	1,78	Ar/17,5	1,8	0	20	-5	1,5
Sv04_4	23,9	224	30,0	14	1,78	Ar/17,5	0	0	20	-5	1,5
Sv04_5	23,9	224	40,0	14	1,34	Ar/17,5	0	0	20	-5	1,5
Sv04_6	23,9	224	45	14	1,19	Ar/17,5	0	0	20	-5	1,5
Sv04_7	23,9	224	45	14	1,19	Ar/17,5	0	0	20	-5	0
Sv04_8	23,9	224	45	04	1,19	Ar/17,5	1,8	0	18	-5	0
Sv04_9	23,5	200	30	12,7	1,57	Ar/17,5	0	0	18	-5	0
Sv04_10*	23,4	187	30	12,0	1,46	Ar/17,5	0	0	15	-5	1,0
Sv04_11*	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	0	0	15	-5	1,0
Sv04_12	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	0	0	15	15	1,0
Sv04_13	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	0	0	15	5	1,0
Sv04_14	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	1,3	0	15	5	0,5
Sv04_15	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	0,5	0	15	5	1,0
Sv04_16	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	0,5	0	15	5	0,5
Sv04_17	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	0	0	15	5	1,0
Sv04_18	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	0	0	15	0	1,0
Sv04_19	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	0	0	15	0	1,0
Sv04_20	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	0	0	15	-5	1,0
Sv04_21	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	0	0	15	5	1,0
Sv04_22	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	0	0	15	0	1,0
Sv04_23	23,2	178	30	11,5	1,38	Ar/17,5	0	0	15	0	1,0
Sv04_24*	23,3	183	30	11,8	1,42	Ar/17,5	-0,8	0	15	-5	0,7
Sv04_25	23,3	183	30	11,8	1,42	Ar/17,5	-0,8	0	15	0	0,7
Sv04_26	23,3	183	30	11,8	1,42	Ar/17,5	-0,8	0	15	5	0,7
Sv04_27	23,1	177	30	11,4	1,36	Ar/17,5	-0,4	0	15	0	0,7
Sv04_28	23,1	177	30	11,4	1,36	Ar/17,5	-0,4	0	15	-5	0,7
Sv05_1	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	0	15	-5	1,4
Sv05_2	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	10	15	-5	0,4

Sv05_3	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	10	15	-5	1,4
Sv05_4	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	0	15	-5	1,4
Sv05_5	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	5	15	-5	1,4
Sv05_6	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	5	15	-5	1,4
Sv05_7	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	5	15	-5	1,4
Sv05_8	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	5	15	-5	1,4
Sv05_9	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	3	15	-5	1,4
Sv05_10	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	3	15	-5	1,4
Sv05_11*	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	3	15	-5	1,4
Sv05_12*	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	3	15	0	1,4
Sv05_13*	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	3	15	15	1,4
Sv05_14	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	3	15	5	1,4
Sv05_15*	23,2	178	30	11,5	1,38	ArHe/26	0	3	15	5	1,4
Sv05_16	19,5	137	30	8,1	1,78	ArHe/26	1,8	3	15	15	1,4
Sv05_17	19,5	137	15	8,1	1,78	ArHe/26	1,8	3	15	15	1,4
Sv05_18	19,5	137	15	8,1	1,78	ArHe/26	1,8	3	15	5	1,4
Sv05_19	19,5	137	15	8,1	1,78	ArHe/26	1,8	3	15	-5	1,4
Sv05_20	19,4	134	15	7,8	1,73	ArHe/26	1,8	3	15	15	1,4
Sv05_21	19,3	131	15	7,6	1,69	ArHe/26	1,8	8	15	15	1,4
Sv05_22	19,3	131	15	7,6	1,69	ArHe/26	1,0	5	15	15	1,4
Sv05_23	19,2	130	15	7,5	1,66	ArHe/26	1,0	3	15	15	1,4
Sv05_24	19,2	130	15	7,5	1,66	ArHe/26	1,0	3	15	5	1,4
Sv05_25	19	125	15	7,2	1,58	ArHe/26	1,0	3	15	5	1,4
Sv05_26*	18,9	123	15	7,1	1,55	ArHe/26	0	3	15	5	1,4
Sv05_27*	18,9	123	15	7,1	1,55	ArHe/26	0	3	15	15	1,4
Sv05_28*	18,9	123	15	7,1	1,55	ArHe/26	0	3	15	0	1,4
Sv05_29*	18,9	123	15	7,1	1,55	ArHe/26	0	3	15	-5	1,4
SV06... siehe Hauptversuche 5083-O											

Gasvorströmzeit...0,2sec

Gasnachströmzeit... 0,5sec

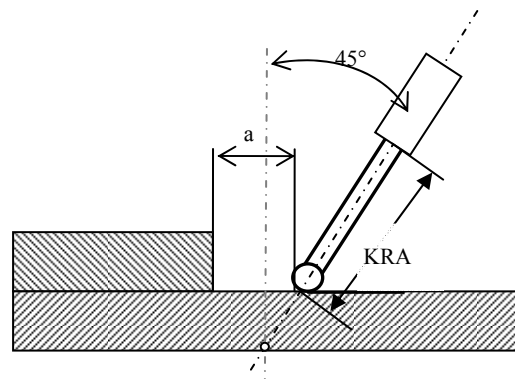
Ar... 100% Argon, Kennlinie (100%Ar, ø 1,2mm 4043)

Ar/He...50Ar/50He%, Kennlinie (50Ar/50He%, ø 1,2mm AlSi5)

Positiver Anstellwinkel... schleppend

Grundwerkstoff... 6181-T4 / s=2,5mm

Schweißzusatz... AlSi5 / ø 1,2mm



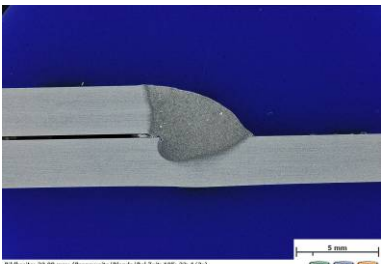
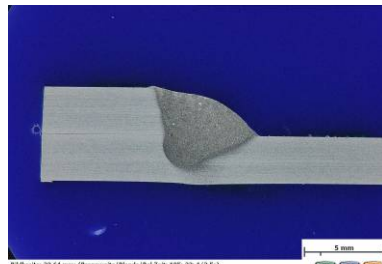
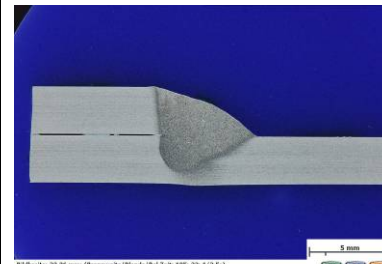
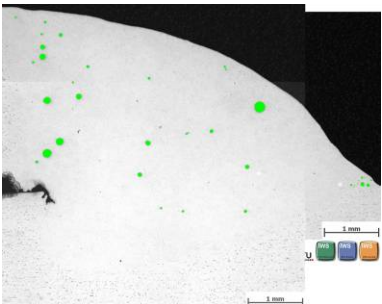
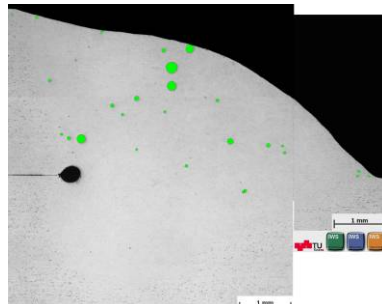
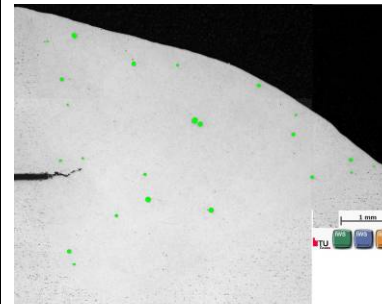

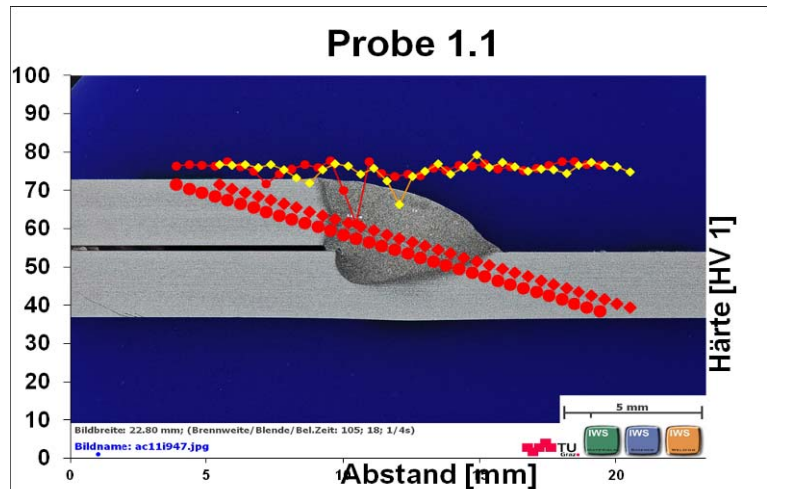
***...zu diesen Parametern wurden Querschliffe angefertigt**

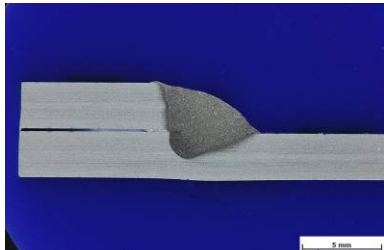
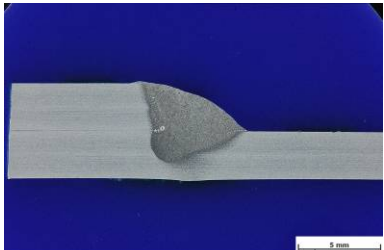
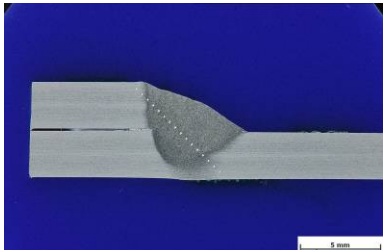
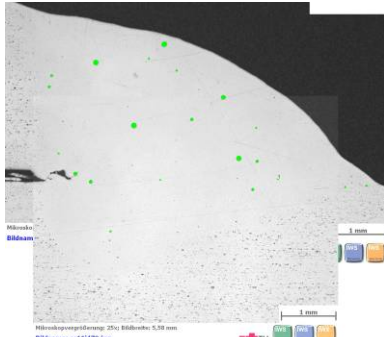
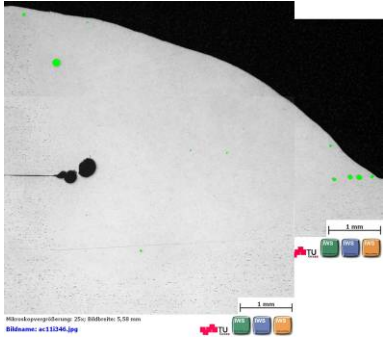


Nahtnummer	U [V]	I [A]	v [mm/s]	f [m/min]	E [kJ/cm]	Schutzgas / Menge [l/min]	Puls-korrektur	Lichtbogen-korrektur	KRA [mm]	Anstell-winkel [°]	a [mm]
Sv01_1	21,3	153	15	6,9	2,17	Ar/15	0	0	15	5	1,0
Sv01_2	21,2	150	15	6,8	2,12	Ar/15	0	0	15	5	1,0
Sv01_3*	21,1	145	15	6,6	2,04	Ar/15	0	0	15	5	1,0
Sv01_4	21,1	145	15	6,6	2,04	Ar/15	1,8	0	15	5	1,0
Sv01_5*	23,5	220	30	9,8	1,72	Ar/15	0	0	15	5	1,0
Sv01_6	23,5	220	30	9,8	1,72	Ar/18	0	0	15	5	1,0
Sv01_7*	21,1	145	15	6,6	2,04	Ar/15	0	0	15	-5	1,0
Sv01_8	23,5	220	30	9,8	1,72	Ar/18	0	0	15	-5	1,0
Sv01_9*	23,5	220	30	9,8	1,72	Ar/18	0	0	15	-5	1,0
Sv02_1*	24,6	113	15	5,8	1,85	ArHe/26	0	0	15	-5	1,0
Sv02_2*	24,6	113	15	5,8	1,85	ArHe/26	0	0	15	5	1,0
Sv02_3	26,1	164	30	8,2	1,43	ArHe/26	0	0	15	5	1,0
Sv02_4*	26,2	166	30	8,3	1,45	ArHe/26	0	0	15	5	1,0
Sv02_5	26,3	170	30	8,5	1,49	ArHe/26	0	0	15	5	1,0
Sv02_6	26,3	170	30	8,5	1,49	ArHe/26	0	0	15	-5	1,0
Sv02_7*	26,2	166	30	8,3	1,45	ArHe/26	0	0	15	-5	1,0
SV03... siehe Hauptversuche 6181-T4											

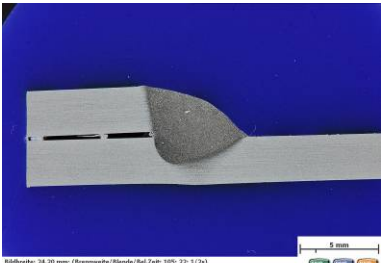
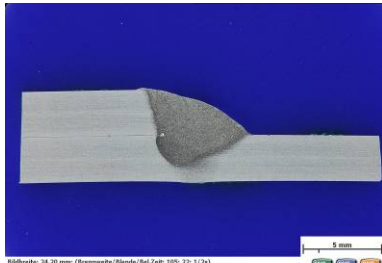
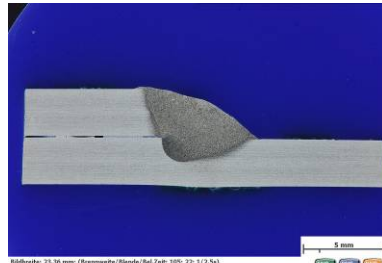
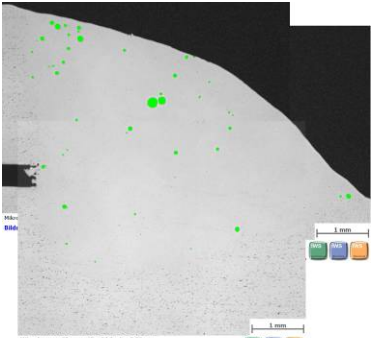
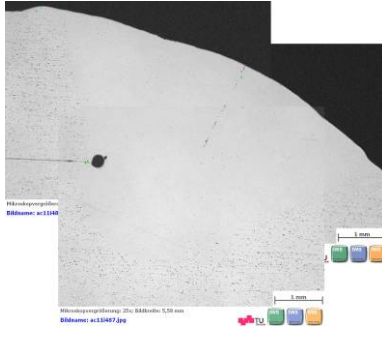


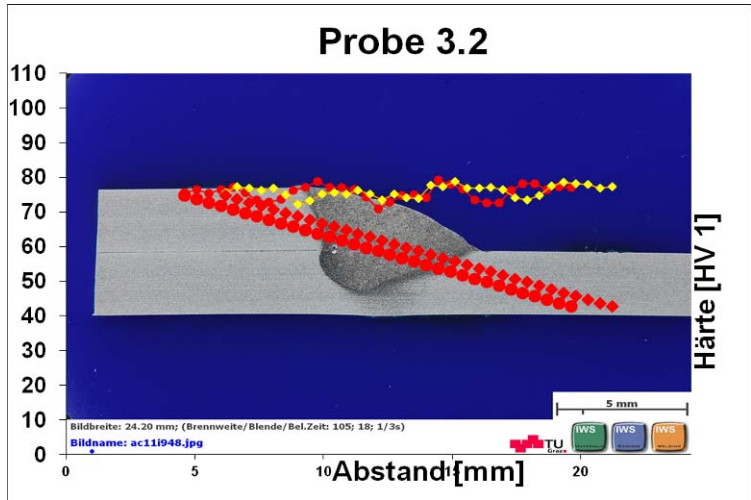
Anhang C: Schweißparameter Hauptversuche

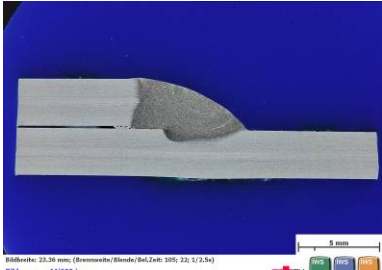
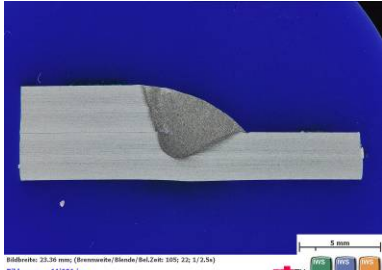
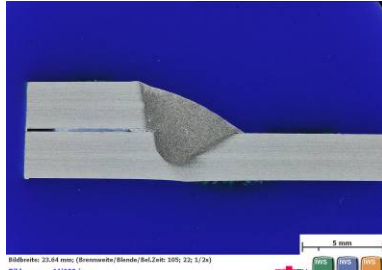

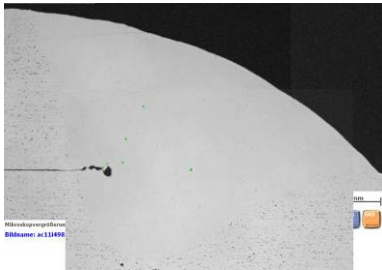
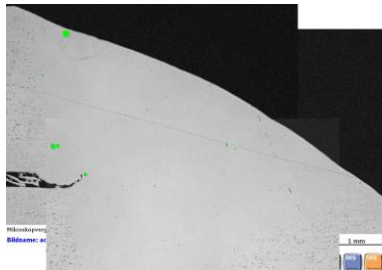

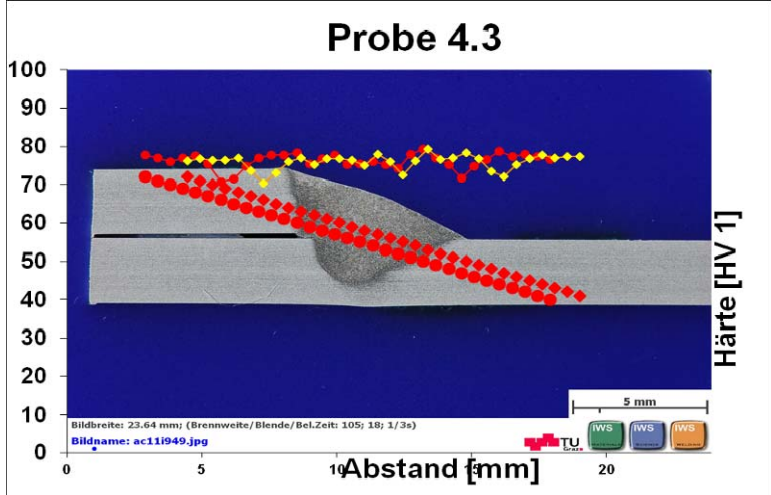
Nahtnummer	GW	SZ	U [V]	I [A]	v [mm/s]	E [kJ/cm]	Schutzgas / Menge [l/min]	Puls- bzw. Lichtbogen-Korrektur	Anstellwinkel [°]
1	5083-0	AlMg5	20	137	15	1,78	100%Ar / 15	Pk+1,8	5 schl.
2	5083-0	AlMg5	20	137	15	1,78	100%Ar / 15	Pk+1,8	0
3	5083-0	AlMg5	20	137	15	1,78	100%Ar / 15	Pk+1,8	5 st.
4	5083-0	AlMg5	19	123	15	1,55	50%ArHe / 26	Lbk+3	5 schl.
5	5083-0	AlMg5	19	123	15	1,55	50%ArHe / 26	Lbk+3	0
6	5083-0	AlMg5	19	123	15	1,55	50%ArHe / 26	Lbk+3	5 st.
7x	5083-0	AlMg5	23	187	30	1,46	100%Ar / 17	/	5 schl.
7xx	5083-0	AlMg5	23	187	30	1,46	100%Ar / 17	/	0
7xxx	5083-0	AlMg5	23	187	30	1,46	100%Ar / 17	/	5 st.
8	5083-0	AlMg5	23	178	30	1,37	50%ArHe / 26	LbK+3	5 schl.
9	5083-0	AlMg5	23	178	30	1,37	50%ArHe / 26	LbK+3	0
10	5083-0	AlMg5	23	178	30	1,37	50%ArHe / 26	LbK+3	5 st.
Nahtnummer	GW	SZ	U [V]	I [A]	v [mm/s]	E [kJ/cm]	Schutzgas / Menge [l/min]	Korrektur	Anstellwinkel
1	6181-T4	AISI5	21,1	145	15	2,04	100%Ar / 15	/	5 schl.
2	6181-T4	AISI5	21,1	145	15	2,04	100%Ar / 15	/	0
3	6181-T4	AISI5	21,1	145	15	2,04	100%Ar / 15	/	5 st.
64	6181-T4	AISI5	24,6	113	15	1,85	50%ArHe / 26	/	5 schl.
5	6181-T4	AISI5	24,6	113	15	1,85	50%ArHe / 26	/	0
6	6181-T4	AISI5	24,6	113	15	1,85	50%ArHe / 26	/	5 st.
7	6181-T4	AISI5	23,5	220	30	1,72	100%Ar / 17	/	5 schl.
8	6181-T4	AISI5	23,5	220	30	1,72	100%Ar / 17	/	0
9	6181-T4	AISI5	23,5	220	30	1,72	100%Ar / 17	/	5 st.
10	6181-T4	AISI5	26,3	170	30	1,49	50%ArHe / 26	/	5 schl.
11	6181-T4	AISI5	26,3	170	30	1,49	50%ArHe / 26	/	0
12	6181-T4	AISI5	26,3	170	30	1,49	50%ArHe / 26	/	5 st.

Anhang D: Ergebnisse Hauptversuche

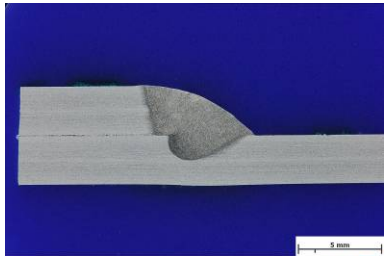
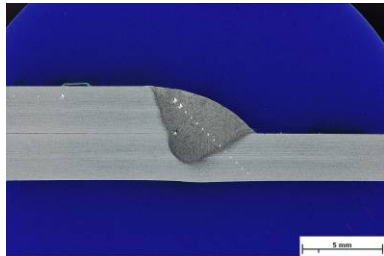
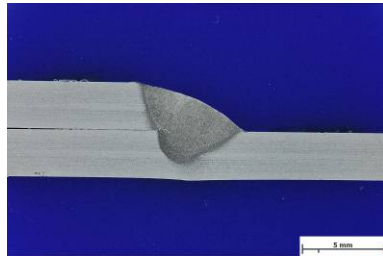

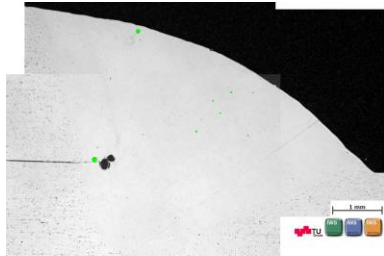
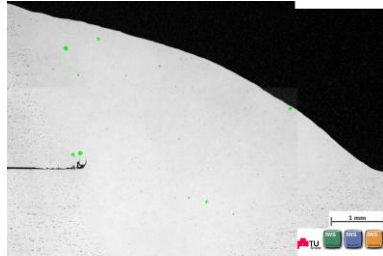
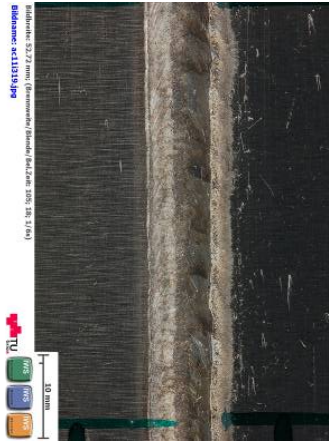
5083-O Naht 1					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 23,00 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 20; 1/3s) Bildname: ac11091.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 23,64 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 20; 1/2,5s) Bildname: ac11092.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 23,36 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 20; 1/2,5s) Bildname: ac11093.jpg</p>	
 <p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,50 mm Bildname: ac11030.jpg</p>		 <p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,50 mm Bildname: ac11034.jpg</p>		 <p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,50 mm Bildname: ac11038.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtanfang		
			 <p>Probe 1.1</p> <p>Härte [HV 1]</p> <p>Abstand [mm]</p> <p>Bildbreite: 22,80 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1/4s) Bildname: ac11047.jpg</p>		
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	Σ_{max} bezogen auf Blechdicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	25,58	144,5	177	171	0,76
Nahtmitte	24,41	131	186	163	0,83
Nahtende	23,30	121,5	192	155	0,43

5083-O Naht 2					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 23,97 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2,5s) Bildname: ac11094.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 22,09 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2,5s) Bildname: ac11095.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 22,64 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2,5s) Bildname: ac11096.jpg</p>	
 <p>Mikroskop Bildname Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,59 mm Bildname: ac11043.jpg</p>		 <p>Mikroskop Bildname Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,59 mm Bildname: ac11044.jpg</p>		 <p>Mikroskop Bildname Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,59 mm Bildname: ac11050.jpg</p>	
Nahtoberfläche		Härtemessung			
 <p>Bildbreite: 32,27 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 10; 1/1,1s) Bildname: ac11033.jpg</p>		keine			
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	24,50	126	194	163	0,36
Nahtmitte	22,21	122,5	181	148	0,25
Nahtende	21,95	120,5	182	146	0,17

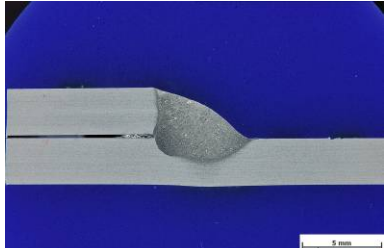
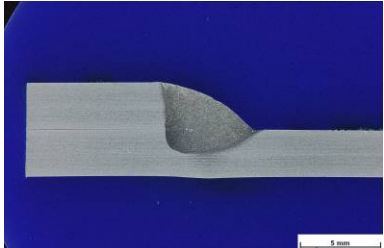
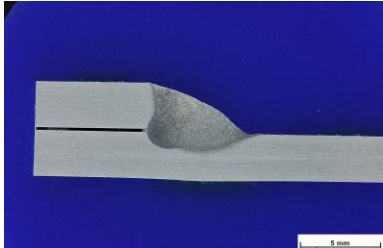
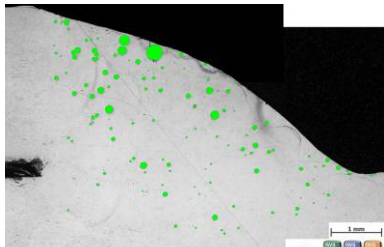
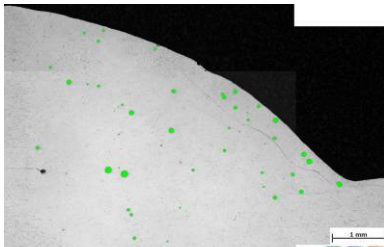
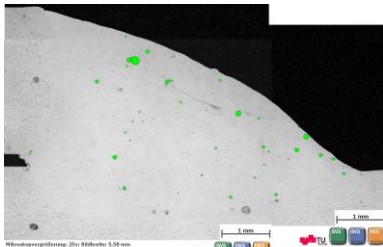

5083-O Naht 3					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 24.20 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2s) Bildname: ac11997.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 24.20 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2s) Bildname: ac11998.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 23.36 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2,5s) Bildname: ac11999.jpg</p>	
 <p>Bildbreite: 1.00 mm</p>		 <p>Bildbreite: 1.00 mm</p>		 <p>Bildbreite: 1.00 mm</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtmitte		
 <p>Bildbreite: 32.72 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2s) Bildname: ac11943.jpg</p>			<p style="text-align: center;">Probe 3.2</p>  <p>Bildbreite: 24.20 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1/3s) Bildname: ac11948.jpg</p>		
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechdicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	25,50	137,5	186	170	0,79
Nahtmitte	20,92	125	167	139	0,02
Nahtende	21,15	118	179	141	0,19

5083-O Naht 4					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 23,36 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2,5s) Bildname: ac11060.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 23,36 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2,5s) Bildname: ac11061.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 23,64 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2s) Bildname: ac11062.jpg</p>	
 <p>MikroskopgröÙe: 5x; Bildbreite: 5,0 mm Bildname: ac11065.jpg</p>		 <p>MikroskopgröÙe: 5x; Bildbreite: 5,0 mm Bildname: ac11069.jpg</p>		 <p>MikroskopgröÙe: 5x; Bildbreite: 5,0 mm Bildname: ac11070.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtende		
 <p>Bildbreite: 32,27 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 20; 3/2s) Bildname: ac11121.jpg</p>			<p style="text-align: center;">Probe 4.3</p>  <p>Bildbreite: 23,64 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1/3s) Bildname: ac111949.jpg</p>		
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	27,31	106,5	257	172	0,13
Nahtmitte	23,16	103,5	224	182	0,05
Nahtende	26,48	95	279	154	0,17

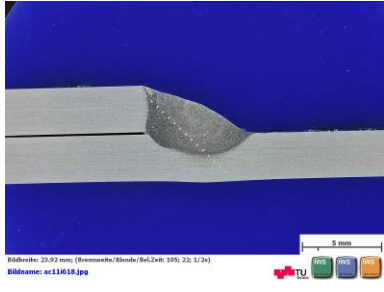
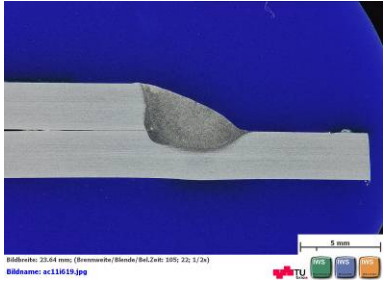
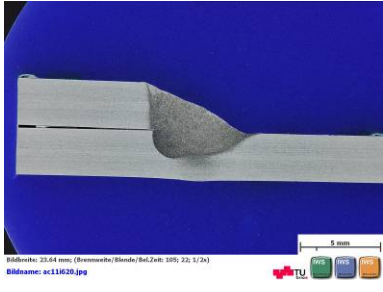
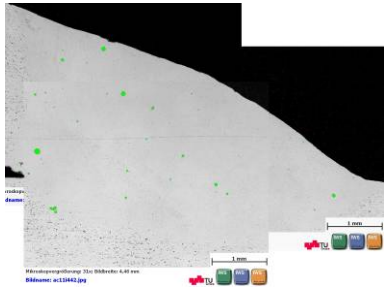
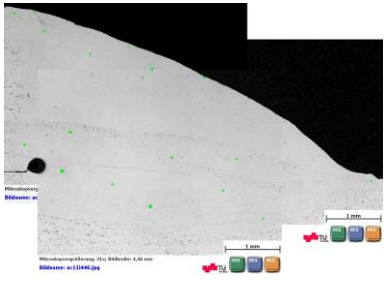
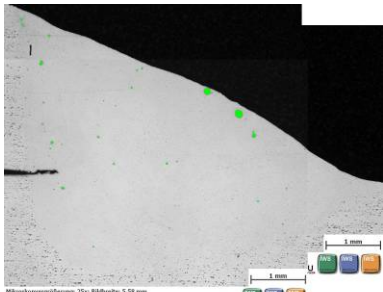
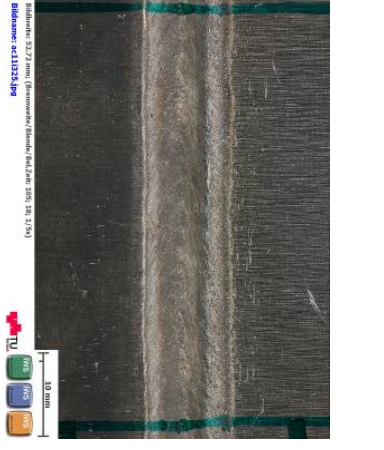
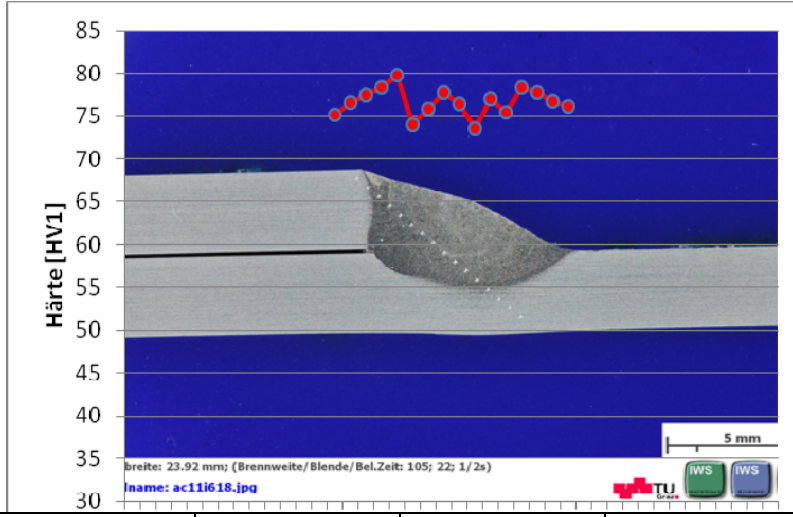
5083-O Naht 5					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtmitte		
			<p>Probe 5.2wh</p> <p>Bildbreite: 22,80 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1/3s) Bildname: ac11950.jpg</p>		
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	23,48	98,5	238	166	0,18
Nahtmitte	23,52	91	258	157	0,05
Nahtende	23,48	91	258	157	0,03

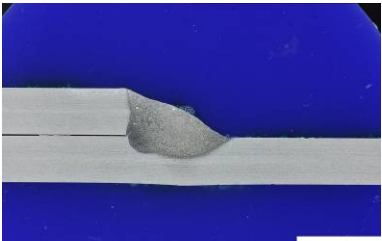
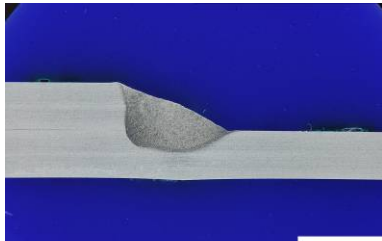
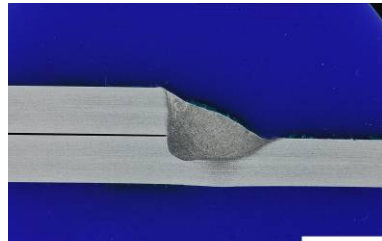
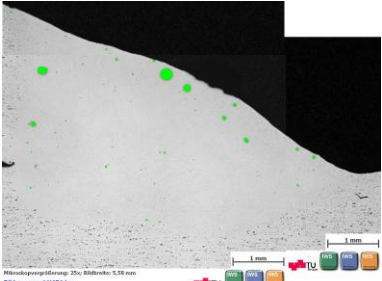
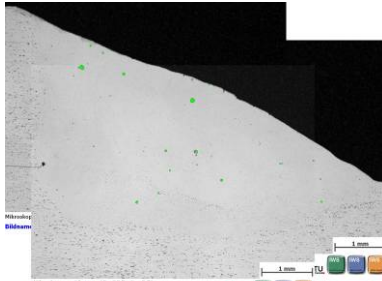
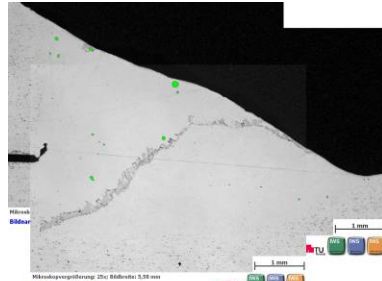
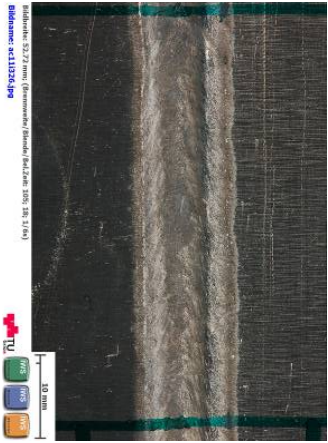
5083-O Naht 6					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 22,80 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zahl: 105; 22; 1/2,5s) Bildname: ac11606.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 22,64 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zahl: 105; 22; 1/2,5s) Bildname: ac11607.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 22,36 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zahl: 105; 22; 1/2,5s) Bildname: ac11608.jpg</p>	
 <p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,50 mm Bildname: ac11609.jpg</p>		 <p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,50 mm Bildname: ac11610.jpg</p>		 <p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,50 mm Bildname: ac11611.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung		
 <p>Bildbreite: 52,27 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zahl: 105; 28; 2/2,5s) Bildname: ac11612.jpg</p>			keine		
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	26,68	101	264	172	0,01
Nahtmitte	23,91	97,5	245	166	0,13
Nahtende	24,92	93,5	267	159	0,14

5083-O Naht 7x					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtende		
			<p>Probe 7x.3</p> <p>Bildbreite: 23,64 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1/3s) Bildname: ac11951.jpg</p>		
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	30,30	137,5	220	177	0,81
Nahtmitte	30,83	123,5	250	202	1,43
Nahtende	28,84	118	241	206	0,29

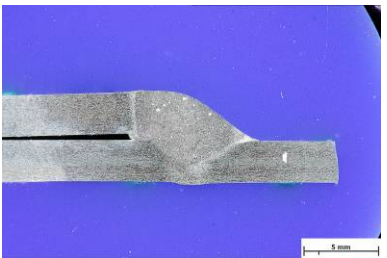
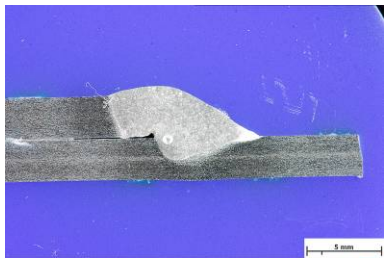
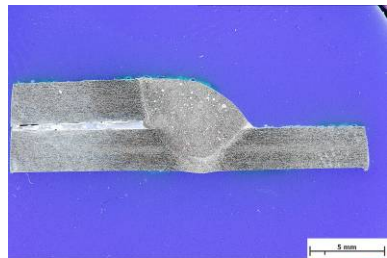
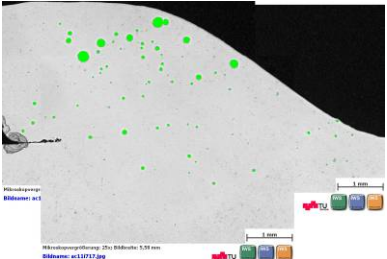
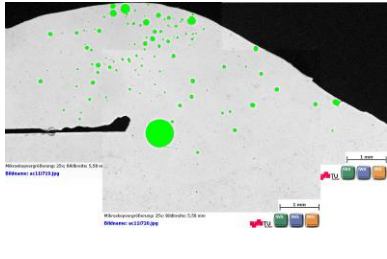
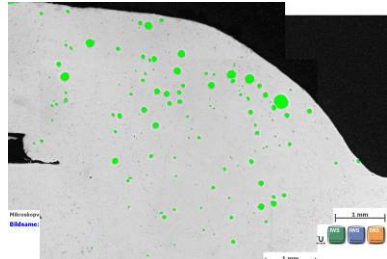

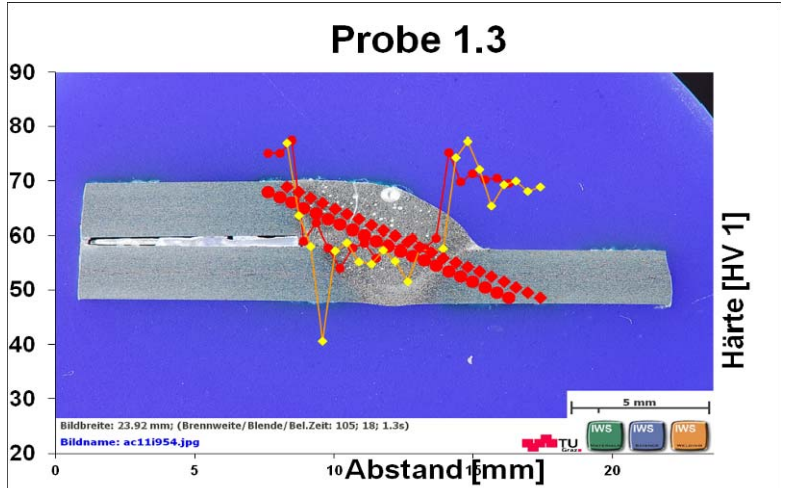
5083-O Naht 7xx					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 23,92 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zahl: 105; 22; 1/2,5x) Bildname: ac11612.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 23,64 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zahl: 105; 22; 1/3x) Bildname: ac11613.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 23,64 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zahl: 105; 22; 1/2,5x) Bildname: ac11614.jpg</p>	
 <p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,38 mm Bildname: ac11617.jpg</p>		 <p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,38 mm Bildname: ac11618.jpg</p>		 <p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,38 mm Bildname: ac11619.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung		
 <p>Bildbreite: 52,27 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zahl: 105; 30; 2/2,5x) Bildname: ac11615.jpg</p>			keine		
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	26,51	127	209	184	2,99
Nahtmitte	28,00	123,5	227	177	0,83
Nahtende	28,12	115,5	244	187	0,70

5083-O Naht 7xxx					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
<p>Bildbreite: 23.64 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2.5s) Bildname: ac11615.jpg</p>		<p>Bildbreite: 23.64 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2.5s) Bildname: ac11616.jpg</p>		<p>Bildbreite: 23.09 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2s) Bildname: ac11617.jpg</p>	
<p>Mikrovergrößerung: 31x; Bildbreite: 6.48 mm Bildname: ac11619.jpg</p>		<p>Mikrovergrößerung: 31x; Bildbreite: 6.48 mm Bildname: ac11620.jpg</p>		<p>Mikrovergrößerung: 31x; Bildbreite: 6.48 mm Bildname: ac11621.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtmitte		
<p>Bildbreite: 52.72 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 28; 1/3s) Bildname: ac11618.jpg</p>			<p>Probe 7xxx.2</p> <p>Bildbreite: 23.92 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1/3s) Bildname: ac11952.jpg</p>		
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechdicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	25,79	135	191	178	2,22
Nahtmitte	28,00	121,5	231	172	1,56
Nahtende	27,37	121,5	225	187	0,64

5083-O Naht 8					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 23,92 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2s) Bildname: ac11618.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 23,64 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2s) Bildname: ac11619.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 23,64 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2s) Bildname: ac11620.jpg</p>	
 <p>MikroskopgröÙe: 20x; Bildbreite: 4,41 mm Bildname: ac11642.jpg</p>		 <p>MikroskopgröÙe: 20x; Bildbreite: 4,41 mm Bildname: ac11643.jpg</p>		 <p>MikroskopgröÙe: 20x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11650.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtanfang HV1		
 <p>Bildbreite: 32,27 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2s) Bildname: ac11323.jpg</p>			 <p>breite: 23,92 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2s) Name: ac11618.jpg</p>		
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechdicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	27,29	115,5	236	190	0,23
Nahtmitte	25,19	98,5	256	182	0,27
Nahtende	24,43	103,5	236	168	0,27

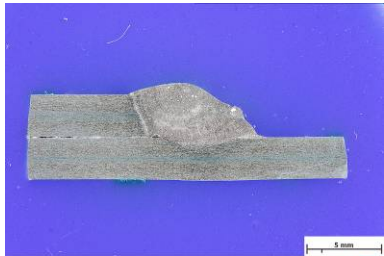
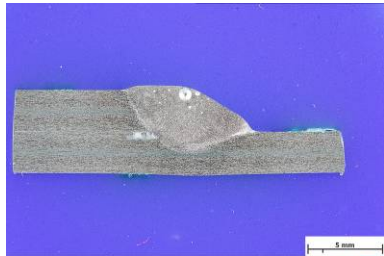
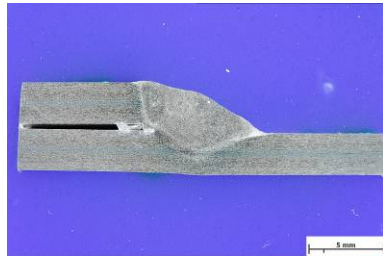
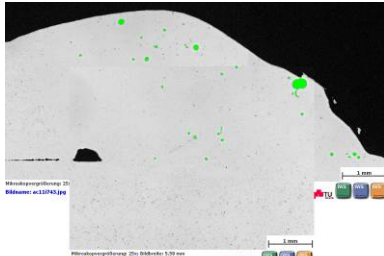

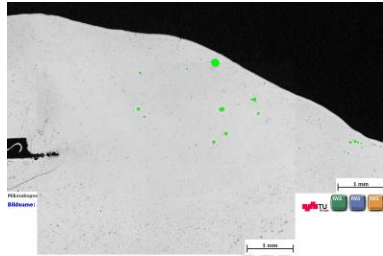
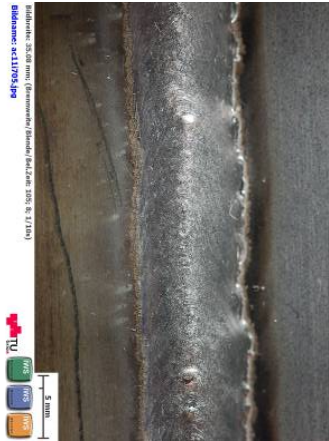
5083-O Naht 9					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 23,92 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zahl: 105; 22; 1/24) Bildname: ac11621.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 23,36 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zahl: 105; 22; 1/24) Bildname: ac11622.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 23,64 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zahl: 105; 22; 1/2,54) Bildname: ac11623.jpg</p>	
 <p>MikroskopgröÙerung: 20x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11454.jpg</p>		 <p>MikroskopgröÙerung: 20x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11455.jpg</p>		 <p>MikroskopgröÙerung: 20x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11462.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung		
 <p>Bildbreite: 32,27 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zahl: 105; 20; 1/24) Bildname: ac11326.jpg</p>			keine		
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	25,99	113,5	229	188	0,72
Nahtmitte	26,45	104	254	173	0,17
Nahtende	22,89	94,5	242	176	0,18

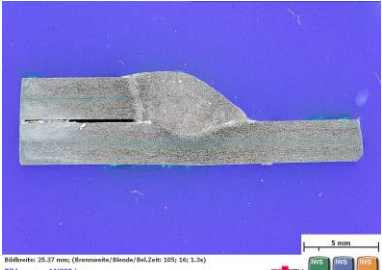
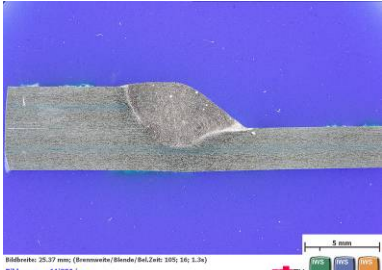
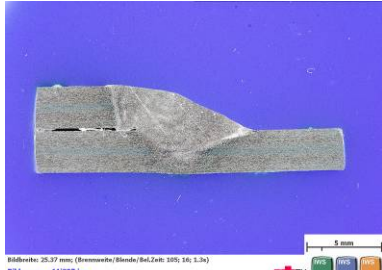
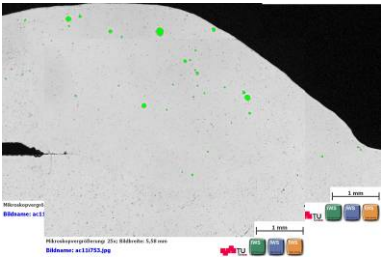
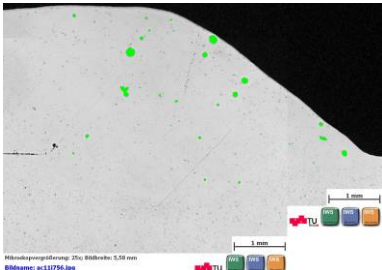
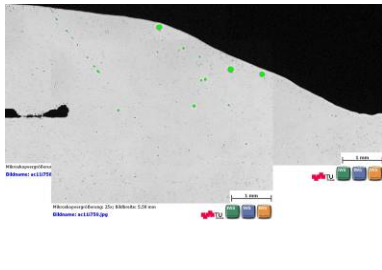

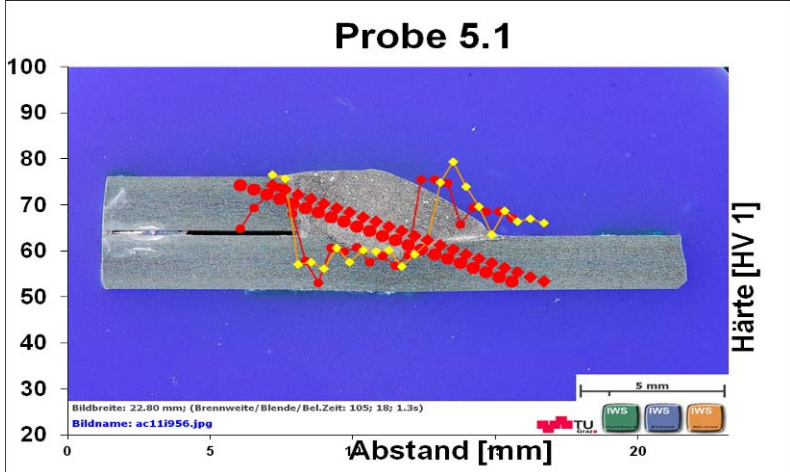
5083-O Naht 10					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
<p>Bildbreite: 23,64 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/1,3s) Bildname: ac11624.jpg</p>		<p>Bildbreite: 23,36 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2,5s) Bildname: ac11625.jpg</p>		<p>Bildbreite: 23,36 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 22; 1/2,5s) Bildname: ac11626.jpg</p>	
<p>Winkelvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11644.jpg</p>		<p>Winkelvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11673.jpg</p>		<p>Winkelvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11675.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtende		
<p>Bildbreite: 52,72 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 28; 1/1s) Bildname: ac113277.jpg</p>			<p>Probe 10.3</p> <p>Härte [HV 1]</p> <p>Abstand [mm]</p> <p>Bildbreite: 23,64 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1/3s) Bildname: ac111953.jpg</p>		
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechdicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	25,61	97	264	183	0,60
Nahtmitte	23,64	95	249	171	0,34
Nahtende	22,53	91	248	158	0,15

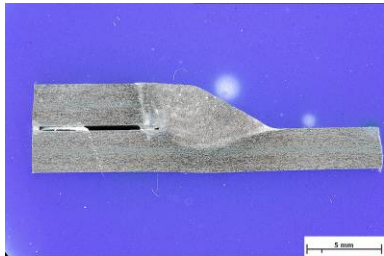
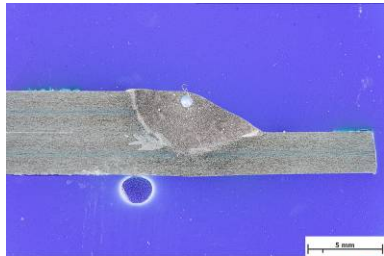
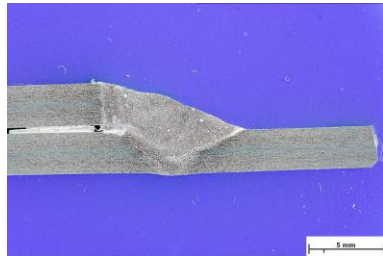
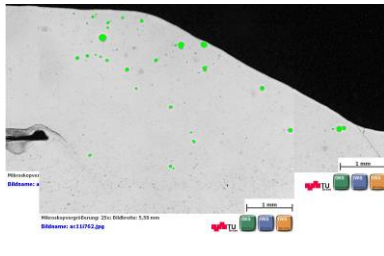
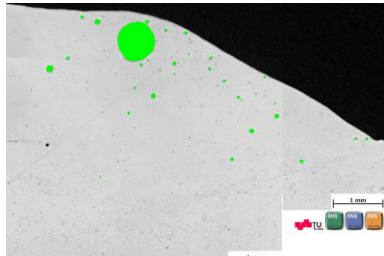
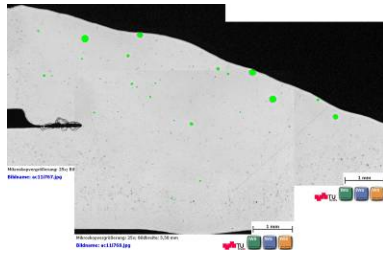

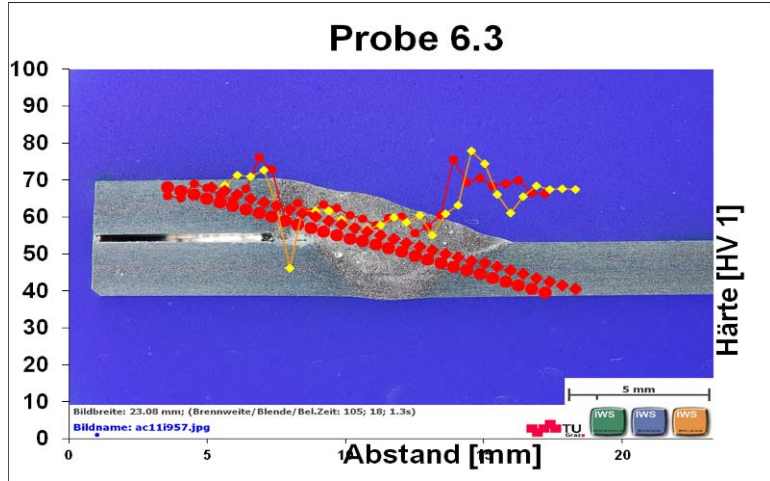
6181-T4 Naht 1					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11823.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11824.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11825.jpg</p>	
 <p>Mikrovergrößerung: 20x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11823.jpg</p>		 <p>Mikrovergrößerung: 20x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11824.jpg</p>		 <p>Mikrovergrößerung: 20x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11825.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtende		
 <p>Bildbreite: 23,92 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11954.jpg</p>			<p style="text-align: center;">Probe 1.3</p>  <p>Bildbreite: 23,92 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11954.jpg</p>		
Pos.	F_{max} Probe 50mm breit [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	18,62	144,5	129	149	2,83
Nahtmitte	13,24	130,5	101	106	3,54
Nahtende	18,94	117,5	161	152	2,16

6181-T4 Naht 2					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11825.jpg</p>		<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11827.jpg</p>		<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11828.jpg</p>	
<p>Wirtungseingriffung: 20; Bildbreite: 1,01 mm Bildname: ac11825.jpg</p>		<p>Wirtungseingriffung: 20; Bildbreite: 1,01 mm Bildname: ac11827.jpg</p>		<p>Wirtungseingriffung: 20; Bildbreite: 1,01 mm Bildname: ac11828.jpg</p>	
Nahtoberfläche		Härtemessung			
<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11825.jpg</p>		keine			
Pos.	F_{max} [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	14,75	145	102	118	2,38
Nahtmitte	14,49	149	97	116	1,32
Nahtende	18,12	137	132	145	1,32

6181-T4 Naht 3					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11929.jpg</p>		<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11930.jpg</p>		<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11931.jpg</p>	
<p>Bildbreite: 2,00 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11932.jpg</p>		<p>Bildbreite: 2,00 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11933.jpg</p>		<p>Bildbreite: 2,00 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11934.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtende		
<p>Bildbreite: 23,08 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11955.jpg</p>			<p>Probe 3.3</p> <p>Härte [HV 1]</p> <p>Abstand [mm]</p> <p>Bildbreite: 23,08 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11955.jpg</p>		
Pos.	F_{max} [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechdicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	13,64	136	100	109	1,88
Nahtmitte	11,36	116,5	98	91	1,27
Nahtende	11,00	104	106	88	2,79

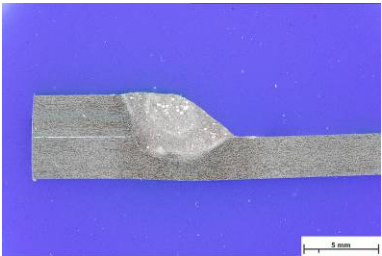
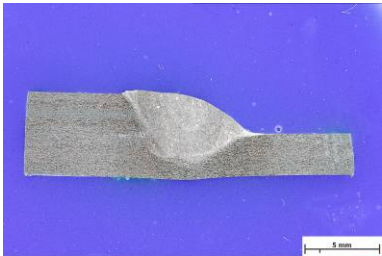
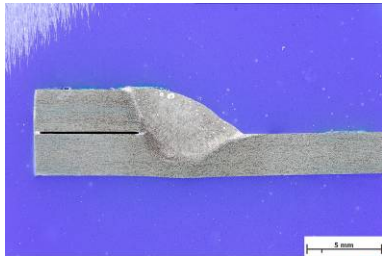
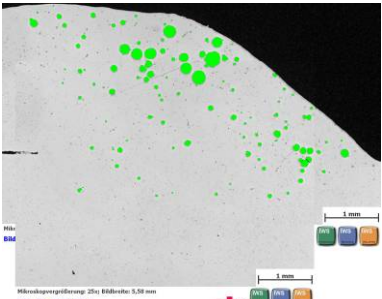
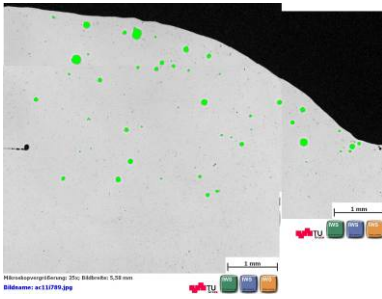
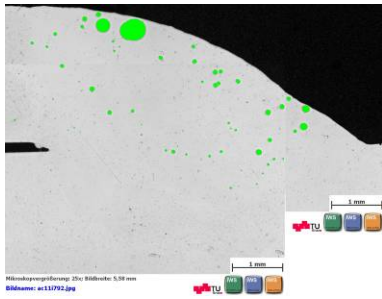

6181-T4 Naht 4					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11822.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11832.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11824.jpg</p>	
 <p>Werkzeuggröße: 20 Bildname: ac1076.jpg</p> <p>Werkzeuggröße: 20; Bildbreite: 5,00 mm Bildname: ac1074.jpg</p>		 <p>Werkzeuggröße: 20; Bildbreite: 5,00 mm Bildname: ac11</p> <p>Werkzeuggröße: 20; Bildbreite: 5,00 mm Bildname: ac1077.jpg</p>		 <p>Werkzeuggröße: 20; Bildbreite: 5,00 mm Bildname: ac1078.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung		
 <p>Bildbreite: 30,00 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11795.jpg</p>			keine		
Pos.	F_{max} [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	17,31	134,5	129	139	0,78
Nahtmitte	14,50	135	107	116	3,96
Nahtende	13,97	115	122	112	0,29

6181-T4 Naht 5					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11825.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11836.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11837.jpg</p>	
 <p>Weldungstyp: ... Bildbreite: 2,00 mm Bildname: ac11873.jpg</p>		 <p>Weldungstyp: ... Bildbreite: 2,00 mm Bildname: ac11876.jpg</p>		 <p>Weldungstyp: ... Bildbreite: 2,00 mm Bildname: ac11879.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtanfang		
 <p>Bildbreite: 20,00 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11874.jpg</p>			<p style="text-align: center;">Probe 5.1</p>  <p>Bildbreite: 22,80 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11856.jpg</p>		
Pos.	F_{max} [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	18,90	121	156	151	0,43
Nahtmitte	14,24	130	110	114	0,79
Nahtende	13,44	113,5	118	108	0,28

6181-T4 Naht 6					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11828.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11829.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11840.jpg</p>	
 <p>Mikrospiegel Bildname: a Mikrospiegelgröße: 23; Bildbreite: 5,53 mm Bildname: ac11874.jpg</p>		 <p>Mikrospiegelgröße: 23; Bildbreite: 5,53 mm Bildname: ac11875.jpg</p>		 <p>Mikrospiegelgröße: 23; Bildbreite: 5,53 mm Bildname: ac11876.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtende		
 <p>Bildbreite: 23,08 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11957.jpg</p>			 <p>Probe 6.3</p> <p>Härte [HV 1]</p> <p>Abstand [mm]</p> <p>Bildbreite: 23,08 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11957.jpg</p>		
Pos.	F_{max} [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	15,80	108	146	126	0,68
Nahtmitte	13,99	120	117	112	3,02
Nahtende	12,07	108	112	97	0,61

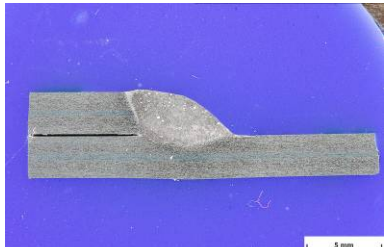
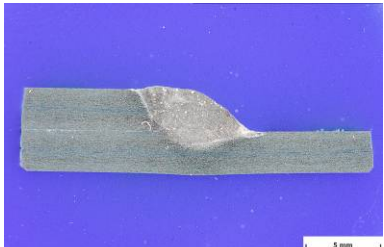
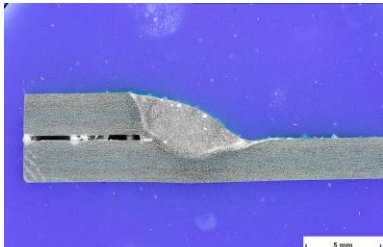
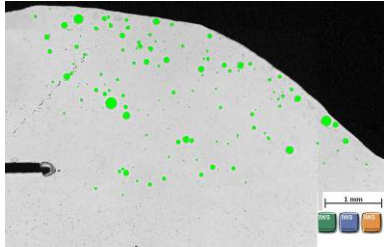
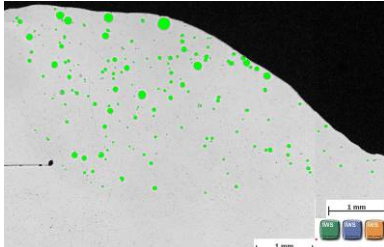
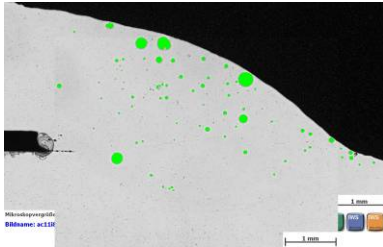

6181-T4 Naht 7					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bal.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11841.jpg</p>		<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bal.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11842.jpg</p>		<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bal.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11843.jpg</p>	
<p>Mikroskopgröße: 20x; Bildbreite: 5,00 mm Bildname: ac11771.jpg</p>		<p>Mikroskopgröße: 20x; Bildbreite: 5,00 mm Bildname: ac11774.jpg</p>		<p>Mikroskopgröße: 20x; Bildbreite: 5,00 mm</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtende		
<p>Bildbreite: 23,92 mm; (Brennweite/Blende/Bal.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11958.jpg</p>			<p>Probe 7.3</p> <p>Härte [HV 1]</p> <p>Abstand [mm]</p> <p>Bildbreite: 23,92 mm; (Brennweite/Blende/Bal.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11958.jpg</p>		
Pos.	F_{max} [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	15,45	124	125	124	4,85
Nahtmitte	15,04	127	118	120	2,59
Nahtende	17,56	125	141	141	1,17

6181-T4 Naht 8					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11844.jpg</p>		<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11845.jpg</p>		<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11846.jpg</p>	
<p>Mikroskop Bildname: Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11870.jpg</p>		<p>Mikroskop Bildname: Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11872.jpg</p>		<p>Mikroskop Bildname: Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11874.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtmitte		
<p>Bildbreite: 38,88 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11958.jpg</p>			<p>Probe 8.2</p> <p>Härte [HV 1]</p> <p>Abstand [mm]</p> <p>Bildbreite: 23,36 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11959.jpg</p>		
Pos.	F_{max} [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechdicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	15,25	116,5	131	122	3,24
Nahtmitte	15,01	119,5	126	120	1,98
Nahtende	15,91	123	129	127	1,70

6181-T4 Naht 9					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11047.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11048.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11049.jpg</p>	
 <p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11073.jpg</p>		 <p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11074.jpg</p>		 <p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11072.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung		
 <p>Bildbreite: 30,00 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,72s) Bildname: ac11071.jpg</p>			keine		
Pos.	F_{max} [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechdicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	15,84	129,5	122	127	4,23
Nahtmitte	15,45	125,5	123	124	1,16
Nahtende	15,45	130,5	118	124	2,17

6181-T4 Naht 10					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11895.jpg</p>		<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11891.jpg</p>		<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11892.jpg</p>	
<p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,00 mm Bildname: ac11794.jpg</p>		<p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,00 mm Bildname: ac11798.jpg</p>		<p>Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,00 mm Bildname: ac11801.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtanfang		
<p>Bildbreite: 23,36 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 6; 1,20s) Bildname: ac11713.jpg</p>			<p>Probe 10.1</p> <p>Härte [HV 1]</p> <p>Abstand [mm]</p> <p>Bildbreite: 23,36 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11960.jpg</p>		
Pos.	F_{max} [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechdicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	17,72	135,5	131	142	4,97
Nahtmitte	12,52	127	99	100	2,18
Nahtende	12,92	118,5	109	103	2,35

6181-T4 Naht 11					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11893.jpg</p>		<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11894.jpg</p>		<p>Bildbreite: 25,37 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11895.jpg</p>	
<p>Mikroskop Bildname: ac11893.jpg Mikroskopgrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm</p>		<p>Mikroskop Bildname: ac11894.jpg Mikroskopgrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm</p>		<p>Mikroskop Bildname: ac11895.jpg Mikroskopgrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung Nahtende		
			<p>Probe 11.3</p> <p>Bildbreite: 23,08 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1,3s) Bildname: ac11861.jpg</p>		
Pos.	F_{max} [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	15,97	121,5	131	128	3,17
Nahtmitte	13,23	131	101	106	5,3
Nahtende	12,62	122,5	103	101	3,63

6181-T4 Naht 12					
Nahtanfang		Nahtmitte		Nahtende	
 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11895.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11897.jpg</p>		 <p>Bildbreite: 25,37 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,3s) Bildname: ac11898.jpg</p>	
 <p>MikroskopgröÙenang: 25x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11895.jpg</p>		 <p>MikroskopgröÙenang: 25x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11897.jpg</p>		 <p>MikroskopgröÙenang: 25x; Bildbreite: 5,58 mm Bildname: ac11898.jpg</p>	
Nahtoberfläche			Härtemessung		
 <p>Bildbreite: 34,39 mm; (Erreichte/Blecke/Bel.Zeit: 105; 16; 1,27s) Bildname: ac11744.jpg</p>			keine		
Pos.	F_{max} [kN]	wahre Bruchfläche (vermessene Bruchfläche) [mm ²]	σ_{max} bezogen auf wahre Bruchfl. [N/mm ²]	σ_{max} bezogen auf Blechedicke [N/mm ²]	rel. Porenfläche [%]
Nahtanfang	16,31	118,5	138	130	2,86
Nahtmitte	13,93	127	110	111	2,89
Nahtende	12,94	116,5	111	104	2,28

Anhang E: Auswerteroutine Porenmessung

Anhang E beinhaltet die Auswerteroutine zur Messung der Porenfläche mit dem Programm KS400. Abb. 4 zeigt den Programmcode der für die Auswertungen verwendet wurde. Die Auswertung erfolgte nur teilweise automatisch. Der genaue Ablauf der Porenauswertung wird im Folgenden beschrieben.

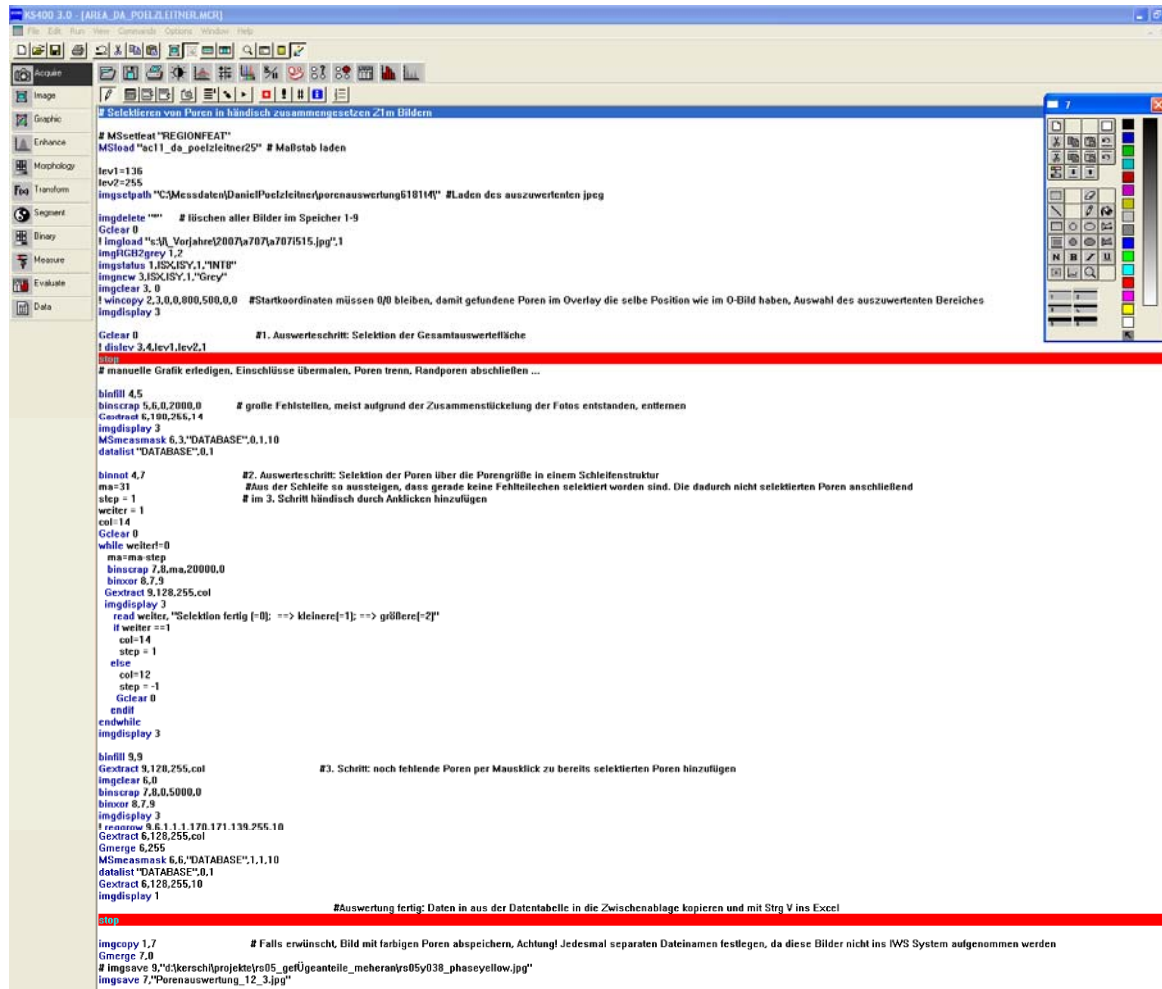


Abb. 4 Programmcode zur Porenauswertung von polierten Schweißnahtquerschnitten

Zu Beginn wurde im Photoshop aus drei metallografischen Einzelbildern ein großes Bild zusammengesetzt, Abb. 5 zeigt den Schweißnahtquerschnitt. Die Proben wurden aufgrund des günstigen Kontrastes im polierten Zustand fotografiert.

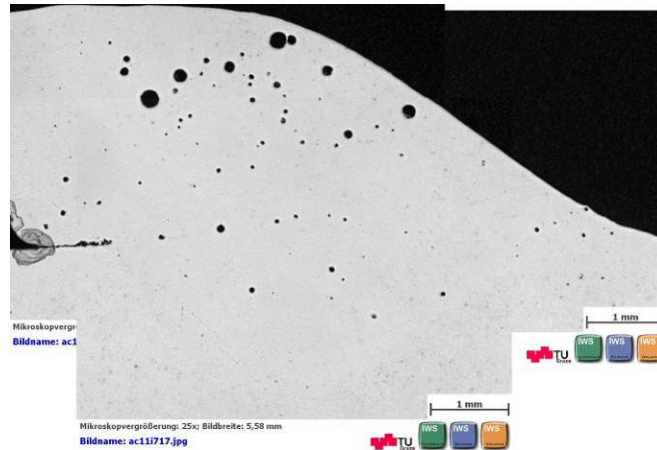


Abb. 5 Polierter ungeätzter Schweißnahtquerschnitte aus drei Bildern zusammengesetzt.

Anschließend wurde das Bild im Programm KS400 aufgerufen und zugleich musste der auszuwertende Bereich (gelbes Kästchen in Abb. 6 a) ausgewählt werden. Wichtig war, dass das linke obere Eck des Kästchens die Startkoordinaten (StartXInp u. StartYInp) mit „0“ beibehielt, da ansonsten das Einfärben der Poren beim Ausgabebild nicht funktionierte. Im nächsten Schritt wurde das Graustufen-Bild in ein binäres Schwarz/Weiß-Bild umgewandelt (Abb. 6 b). Es wurde durch das Verschieben des blauen Reglers im Histogramm eingestellt, ab welcher Intensität der Grauton in Schwarz oder Weiß umgewandelt wird.

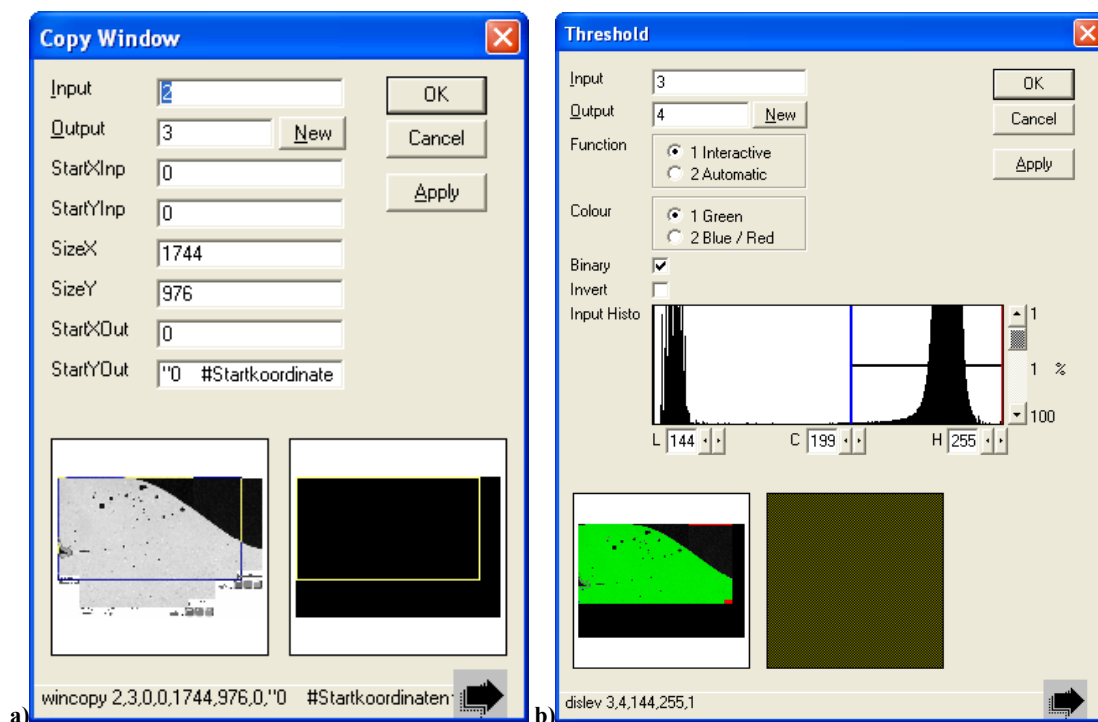


Abb. 6 a) Auswählen auszuwertender Bereich b) Umwandlung Grautöne in binäres Schwarz/Weiß - Bild

Das binäre Bild wurde anschließend von Störungen befreit, wobei unerwünschte Bereiche markiert, ins Bild eingebracht und weiß eingefärbt wurden (Abb. 7 a-d).

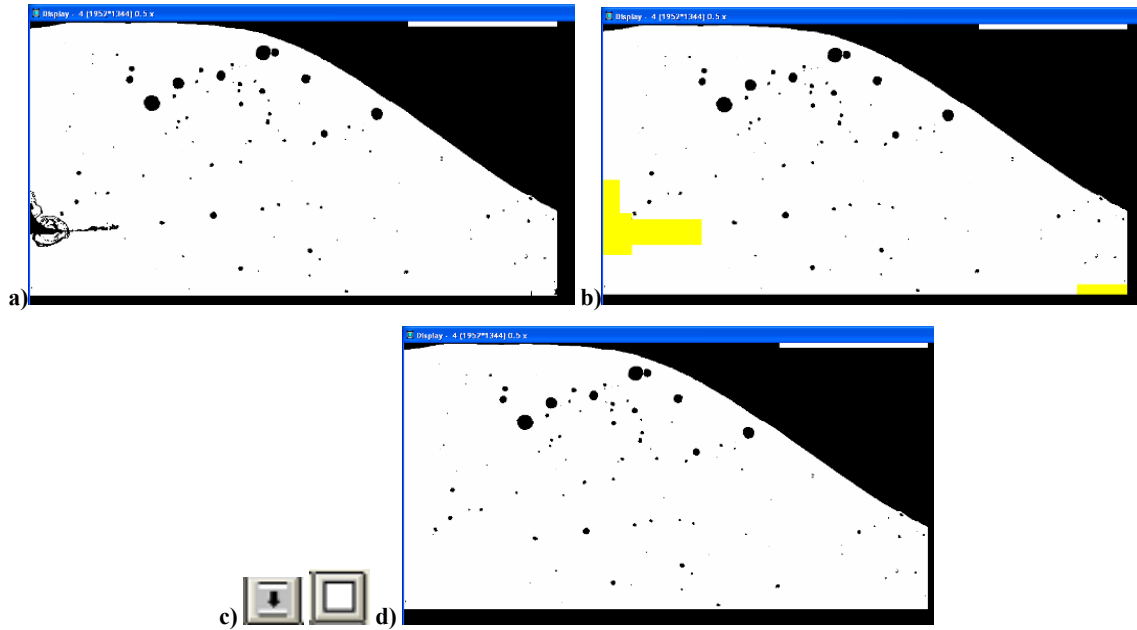


Abb. 7 a) binäres Schwarz/Weiß- Bild der Auswertung b) Markieren der störenden Bereiche c) mit „merge“ vom Overlay ins Bild einbrennen und die gelben Bereiche weiß färben. d) binäres Bild, frei von Störungen

Das Bild war in der Darstellung, wie es Abb. 7 d zeigt, auswertbar. Die maximal auszuwertende Porenfläche wurde im Quellcode festgelegt und kann bei Bedarf dort geändert werden. Die minimale Porengröße, wurde in Einzelschritten eingestellt und erfolgte durch drücken der Tasten 1 oder 2. Waren alle erwünschten Poren markiert, wurde diese Iterationsschleife (Abb. 8) mit 0 abgeschlossen.

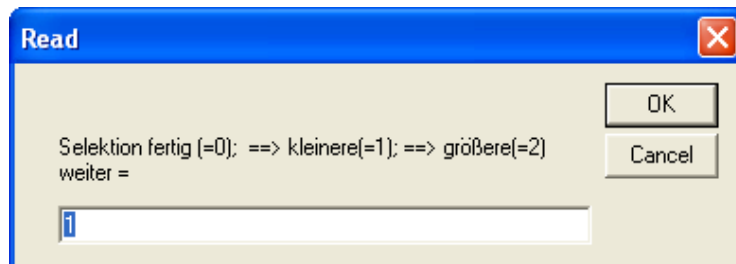


Abb. 8 Einstellen der erwünschten minimalen Porengröße die ausgewertet werden sollte

Zusätzlich konnten im Anschluss noch einzelne Poren manuell ausgewählt oder gestrichen werden (Abb. 9).

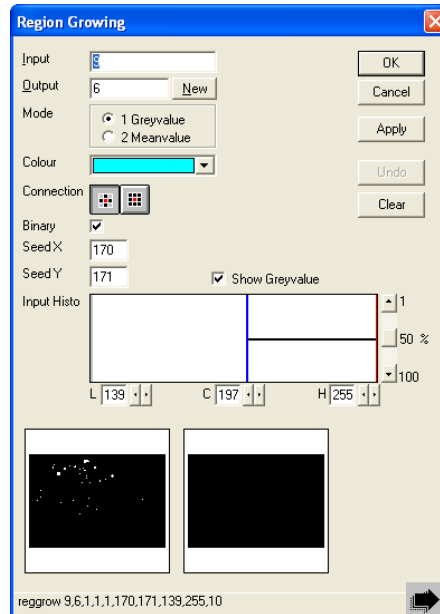


Abb. 9 Mit „Region Growing“ Fenster können zusätzlich Poren ausgewählt oder gelöscht werden

Nach dem An- oder Abwählen der Poren war der Auswertevorgang abgeschlossen. Es wurden die ausgewerteten Poren im Startbild markiert und eine Liste mit der Anzahl und Fläche der Poren ausgegeben (Abb. 10). Der erste Wert in der Datenliste war keine Pore, sondern die Fläche des ausgewählten Schweißnahtquerschnittes (weiße Nahtfläche + Porenfläche in Abb. 7 d).

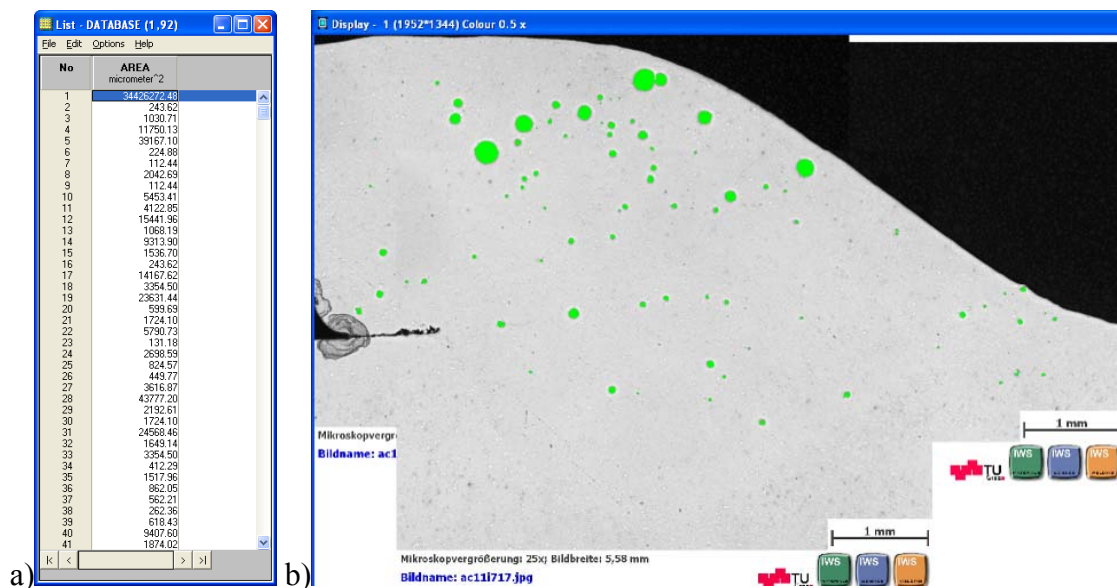


Abb. 10 Ausgaberesultate der Porenauswertung a) Datenliste der Porenfläche b) Grafik der ausgewerteten Poren.

Mit dieser Auswerterroutine, wurden je Naht, drei Messungen durchgeführt, aus denen anschließend das arithmetische Mittel gebildet wurde. Die Wurzelpore wurde nicht mit ausgewertet.

Anhang F: Roboterprogrammierung

1. Einleitung

Im Rahmen dieses Abschnittes werden grundlegenden Funktionen der Roboteranwendung erläutert. Für zukünftige Arbeiten am Roboter (IRB140) in Verbindung mit der Fronius Schweißanlage (TPS4000+CMT) bildet dieses Kapitel eine Grundlage um die Handhabung und Probleme im Betrieb kennenzulernen. Für weiterführende Informationen, die dieses Kapitel überschreiten, wird auf die Literatur (Betriebsanleitungen^{1,2}) der Anlagen verwiesen.

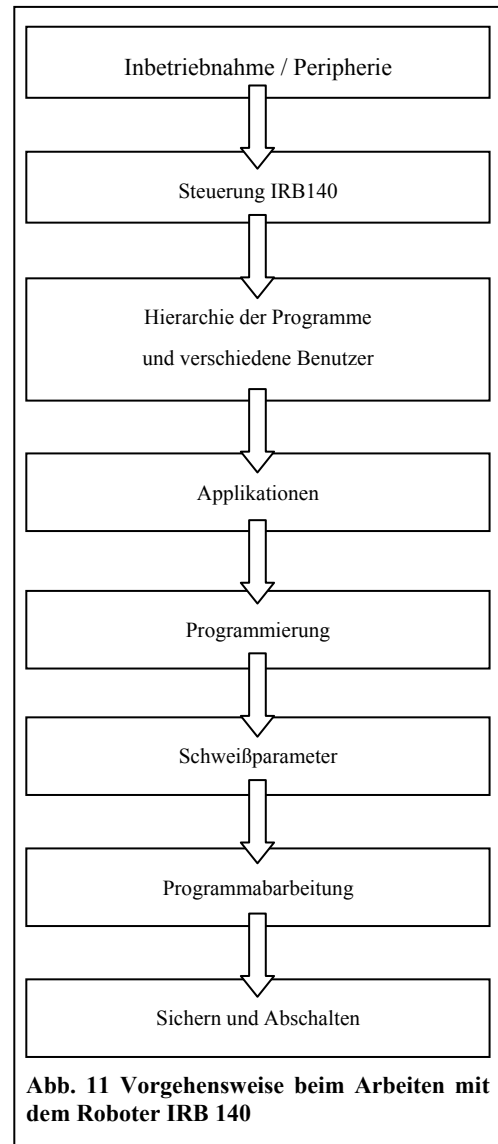
Im Kapitel 2 wird ein Konzept vorgestellt, welches die Arbeitsschritte von der Inbetriebnahme bis zur fertigen Schweißnaht in einer natürlichen Vorgehensweise darstellen soll.

2. Vorgehensweise

Die nachgestellten Kapitel richten sich nach dem in Abb. 11 dargestellten Ablauf und beschreiben nur die grundlegendsten Funktionen.

2.1. Inbetriebnahme / Peripherie

Der Startvorgang ist unkompliziert. Nach dem Anschluss an das Stromnetz werden am Schaltkasten (IRC5) vom Roboter und der Schweißanlage die Hauptschalter auf „EIN“ geschaltet. Der Startvorgang dauert beim Roboter zirka eine Minute, wobei die Schweißanlage in der Regel deutlich früher bereit ist. Danach wird der Schlauch für das Schutzgas mit der entsprechenden Leitung verbunden, und zugleich alle Ventile geöffnet. **Wichtig** ist, dass der Wert des Mengenflussreglers an der Wand größer als der definierte Gasvolumenstrom sein muss, da die Schweißanlage den Durchfluss automatisch regelt. Wird jedoch zu wenig Schutzgas an die Schweißanlage geliefert, so kommt es zur Fehlermeldung und zum Abbruch des Schweißprozesses. An der Schweißanlage muss „online editieren JA“ gewählt werden, ansonsten wird die Gasmenge nicht aktualisiert.



¹ ABB 2010: Bedienanleitung IRC5 mit FlexPendant M2004, Dokumentnr: 3HAC16590-3 Revision: N, ABB Robot Products Schweden.

² ABB 2010: Anwendungshandbuch Bewegungsfunktionen und Ereignisse RobotWare 5.13, Dokumentnr: 3HAC 18152-3 Revision: E, ABB Robot Products Schweden.

2.2. Steuerung IRB140

Der IRB140 besitzt sechs, voneinander unabhängig steuerbare Rotationsachsen. Diese ermöglichen ein Anfahren aller Punkte im Arbeitsraum.

2.2.1. Arbeitsraum

Der Arbeitsraum wird durch drei sehr wesentliche Punkte beschränkt:

- Reichweite
- Kollisionen

Es ist nicht selten der Fall, dass der Roboter beim Verfahren in einen der Kollisionsbereiche gelangt. Diese Kollisionen beziehen sich auf die einzelnen Roboterachsen zueinander und nicht auf die Roboterachsen zum Umfeld. Bevor es zur Kollision zwischen den Achsen kommt wird zum Einen die Geschwindigkeit minimiert und zum Anderen kommt es vor einer Berührung zur Fehlermeldung.

- Singuläre Positionen

Singuläre Positionen werden erreicht, wenn für die Steuerung nicht mehr eindeutig definierbar ist, wie die Achsen im Weiteren bewegt werden sollen. Dies ist der Fall, wenn zwei Achsen vollständig ausgestreckt sind. Danach müssen die Achsen manuell verstellt werden.

Um unnötige Fehlermeldungen zu vermeiden, hat sich der Y+ Bereich als vorteilhafte Position des Werkstücks erwiesen. Da im Bereich der XZ-Ebene vermehrt Kollisionsprobleme auftreten (Abb. 12)

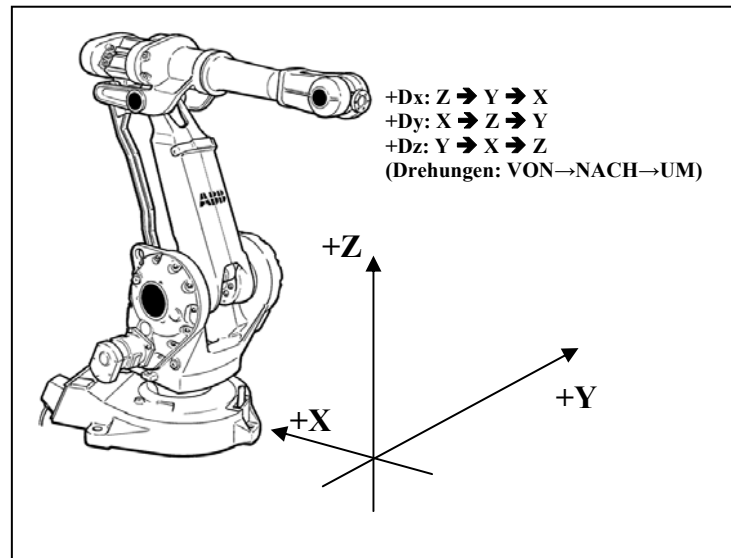


Abb. 12 Koordinatensystem und Drehungen des Roboters (Skizze des Roboters IRB 2400)

2.2.2. Koordinaten

Der IRB140 besitzt verschiedene Koordinatensysteme, die beliebig generiert und verändert werden können. Für die Anwendung in der Schweißtechnik ist das voreingestellte Koordinatensystem jedoch ausreichend (Abb. 12). Leider sind die Drehungen (Dx, Dy, Dz) nicht mit den mathematischen Drehungen ident.

Die genaue Konfiguration der Achsen für die Elektrodenposition, besteht aus zwei wesentlichen Elementen:

- der Position

Die Position beschreibt die X, Y und Z Koordinate der Elektrodenspitze im Arbeitsraum.

- der Orientierung.

Die Orientierung definiert die Drehungen (Dx, Dy u. Dz) der Elektrodenspitze um die X, Y und Z Achse. Die Position der Elektrode bleibt dabei bestehen.

Für das Anfahren von Punkten im Arbeitsraum werden grundsätzlich nur lineare Bewegung benötigt und mittels Steuerknüppel durchgeführt. Im Folgenden werden die Hauptbedienelement (Teach-Pendant) des Roboters erklärt.

2.2.3. Teach- Pendant

In Abb. 13 sind die Bereiche des Teach- Pendants grob erklärt. Genauere Erklärung der Funktionen erfolgen in den Unterpunkten.

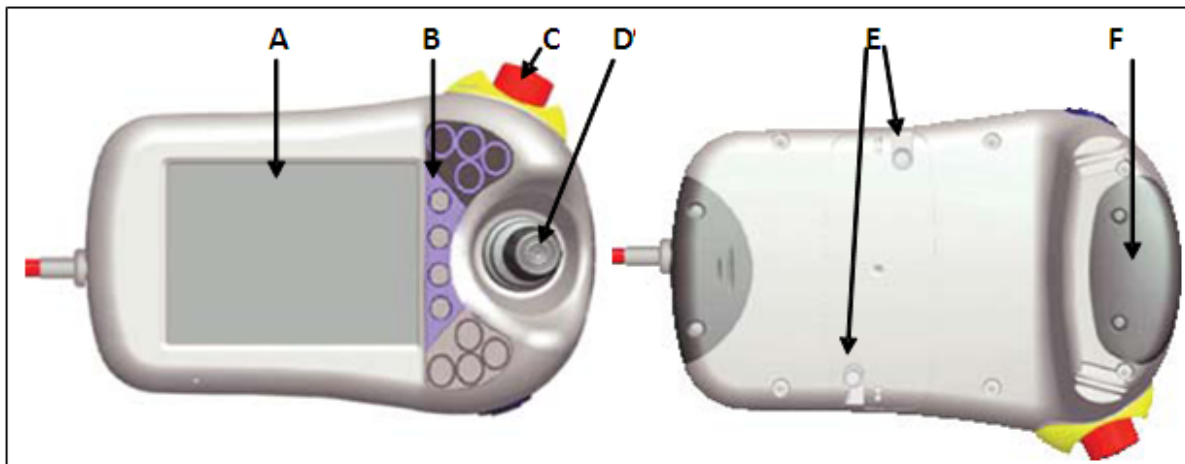


Abb. 13 Teach-Pendant IRB140

- A Touchscreen: zur Eingabe von Programmcode und zum Durchführen von Einstellarbeiten. **Wichtig** ausschließlich die Stifte von E verwenden.
- B Funktionstasten: zur Abarbeitung von Programmen und für Funktionen zur Bewegung des Roboters.
- C „Not Aus“ Schalter
- D Steuerknüppel: zum Bewegen der Roboterachsen
- E Stifte für das Arbeiten mit dem Touchscreen
- F Zustimmungsschalter: ohne dieses Signal ist keine Roboterbewegung möglich!

Steuerknüppel

Beim Bewegen des Roboters sollte man stets vor demselben stehen, da die Funktionen des Steuerknüppels darauf ausgerichtet sind. Mit dem Steuerknüppel kann linear in kartesischen Koordinaten (Abb. 14) verfahren werden. Außerdem ist eine Änderung der Orientierung sowie das voneinander unabhängige bewegen einzelner Achsen möglich.

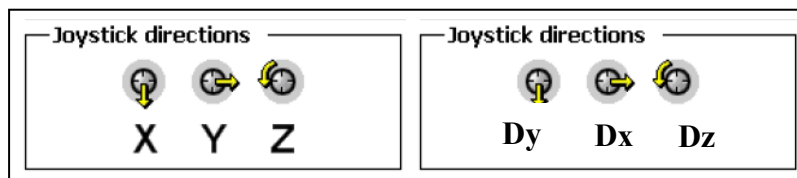


Abb. 14 Steuerknüppelfunktionen für Position (links) und Orientierung (rechts)

Funktionstasten

Von den Funktionstasten A bis M (Abb. 15) werden nur die Tasten F bis M beschrieben. Die Tasten A bis D sind programmierbare Tasten ohne wichtige Funktionen. Mit der Taste E könnte zwischen mehreren Robotereinheiten gewechselt werden.

Die weiteren Tasten haben nachstehende Funktionen:

- F: Wechseln zwischen „Positionieren“ und „Umorientieren“ (linear Verfahren od. Orientierung ändern).
- G: Wechseln zwischen den Achsen 1-3 und 4-6. (Ansteuern einzelner Achsen)
- H: Senken der Bewegungsgeschwindigkeit (besonders für das genaue Anfahren von bestimmten Punkten wichtig).
- K: beim Drücken wird ein ganzes Programm abgearbeitet.
- J u. L: Abarbeiten der vorherigen oder der nächsten Programmzeile.
- M: Stoppen des Programmes

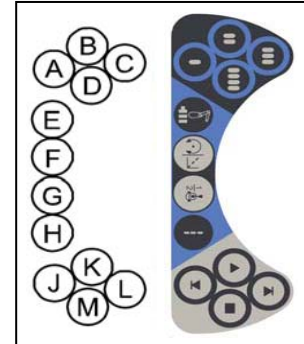


Abb. 15 Funktionstasten am Teach-Pendant

Zustimmungsschalter

Der Zustimmungsschalter, gibt die Zustimmung zum Bewegen und zum Abarbeiten eines Programmes und hat 3 Positionen:

- nicht gedrückt → kein Verfahren möglich
- halb durchgedrückt → Verfahren möglich
- ganz durchgedrückt → kein Verfahren möglich.

Wichtig: Es gibt 3 verschiedene Betriebsmodi: Einrichtbetrieb (Abb. 16), Einrichtbetrieb 100% und Automatikbetrieb. Die Funktion des Zustimmungsschalters ist nur in den Einrichtbetrieben aktiv! Aus Sicherheitsgründen ist es daher empfehlenswert nur im Einrichtbetrieb zu arbeiten, da auch in diesem Betriebsmodus die Sicherheit durch den Zustimmungsschalters besteht und zusätzlich die Robotergeschwindigkeit zu Testzwecken gedrosselt wird.

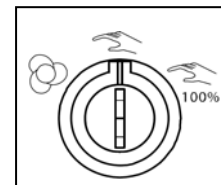


Abb. 16 Schalterstellung für Einrichtbetrieb

2.3. Hierarchie der Programme und verschiedene Benutzer

Wenn mehrere Personen ohne systembedingte Rechte und Grenzen an einem Objekt arbeiten, kommt es oft zu Missverständnissen oder Problemen. Speziell beim IRB140 bedarf es der Kenntnis des Systemaufbaus. Da beim IRB140 nur eine Benutzeroberfläche vorhanden ist, sollte jeder Benutzer einen speziellen Ordner für seine Programme anlegen (in den Ordner **/hd0a/!/Programme**). Nach dem Hochfahren der IRB140 Anlage greift der Programmierer immer auf das zuletzt verwendete Programm zu. Daher sollte man zu Beginn immer eines seiner eigenen Programme öffnen oder ein neues erstellen (Abb. 19 b).

Grundsätzlich hat ein solches Programm folgende Struktur:

- Programm
 - Modul
 - Routine
 - Funktion

- Programm

Das Programm, repräsentiert die eigentliche Datei. Der Programmcode selbst, ist erst in unteren Ebenen enthalten. Ein Programm besteht aus Modulen.

- Modul

In einem Programm werden automatisch mehrere Module generiert (System- und Programmmodule). Änderungen am Systemmodul sind nicht nötig. In einem neuen Programm befindet sich immer ein Modul Namens **MainModul**, welches die Routinen mit dem eigentlichen Programmcode enthält. Aus Gründen der Übersicht können weitere Programmmodule erzeugt werden. Ein Modul muss mindestens eine Routinen enthalten („main()“ wird automatisch erstellt).



- Routine

Die Routine enthält den eigentlichen Programmcode und kann einzeln oder in andere Aufgaben eingebettet abgearbeitet werden. Grundsätzlich könnte man ein ganzes Programm mit nur einer Routine programmieren. Dies ist jedoch sehr unübersichtlich und es man kann mit dem Programmzeiger nicht mehr zwischen den verschiedenen Routinen gewechselt werden. Routinen beinhalten den aus Funktionen bestehenden Programmcode.

- Funktionen

Funktionen sind vordefiniert und stellen die grundlegendsten Aufgaben, die der Roboter durchführen kann, dar. Dies können Schweißfunktionen (ArcLStart, ArcCEnd,...) Mathematische Funktionen (sin(), ln(),...) u.v.m. sein.

2.4. Applikationen

Der Aufbau des Touchscreens ist dem einer Windows Oberfläche sehr ähnlich. Durch den Button  gelangt man zu den installierten Applikationen, die mit dem Knopf  wieder geschlossen werden. Alle gleichzeitig geöffneten Applikationen scheinen in der Taskleiste im unteren Bereich des Bildschirms auf. In den Applikationen sind nützliche Funktionen versteckt, daher empfiehlt es sich zusätzlich zum „Programmeditor“ noch „Bewegen“, „Programmdaten“ und „RobotWare Arc“ zu öffnen. Welche nützlichen Funktionen diese Applikationen bieten, wird in den nachstehenden Punkten beschrieben.

2.4.1. Bewegen

In der Applikation „Bewegen“ kann die aktuelle Position der Elektroden spitze (Punkt mit 16mm KRA) im Koordinatensystem abgelesen werden. Auf kartesische Koordinaten mit Euler’schen Winkeln kann mit dem Positionsformat- Button gewechselt werden. Eine weitere hilfreiche Funktion ist die Ausrichtung. Dabei wird der Schweißbrenner automatisch parallel zur Z-Achse ausgerichtet (d.h. normal auf den Werkstück). **Wichtig:** Es werden nur Dx und Dy ausgerichtet!

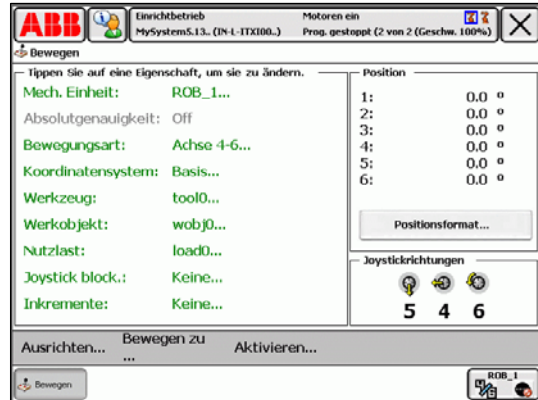


Abb. 17 Oberfläche der Bewegen Applikation

2.4.2. RobotWare Arc

Im Allgemeinen werden vor der Programmabarbeitung eines Schweißvorganges Testruns durchgeführt, für die das Schweißen unterdrückt werden muss. Für diesen Befehl ist „RobotWare Arc“ wichtig. Mit dem Button Blockieren (Abb. 18) kann der Lichtbogen blockiert und wiederhergestellt werden.



Abb. 18
RobotWare
Arc:
Lichtbogen
blockieren

2.4.3. Programmeditor

Der Programmeditor (Abb. 19) stellt die wichtigste Applikation dar. In diesem werden Programme erstellt, sowie auch abgearbeitet.

- A Programmzeiger:

Zeigt die aktuelle Position in der Programmabarbeitung an. Das Programm startet beim Startbefehl immer von der Position des Programmzeigers. Der Programmzeiger kann durch den Testbutton (siehe E) verschoben werden.

- B

In dieser Leiste können Programme neu erstellt, gespeichert, gelöscht und kopiert werden. Selbiges ist auch für Module und Routinen möglich.

- C Programmzeile:

In der Programmzeile stehen die für die Roboteraufgaben nötigen Informationen.

- D Navigationsbuttons

Ermöglichen das Zoomen und Scrollen im Editorbereich.

- E Diese Leiste hat folgende Funktionen:

- Instruktionen hinzufügen: es können neue Funktionen (MoveL, ArcC, WaitTime uvm.) hinzugefügt werden.

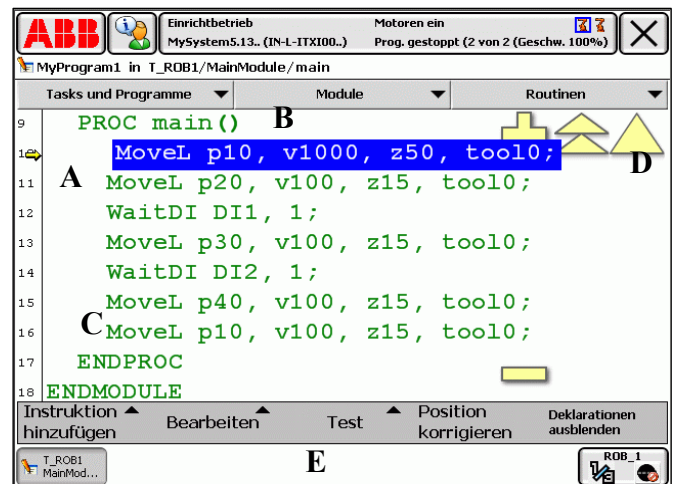


Abb. 19 Oberfläche des Programmeditors

- Bearbeiten: ermöglicht Copy Paste, Programmzeile löschen, Bereich auswählen uvm.
- Test: hier kann der Programmzeiger auf die gewünschte Programmzeile verschoben werden.
- Position korrigieren: mit diesem Button kann eine „alte“ Position durch die aktuelle Roboterposition ersetzt werden.

2.4.4. Programmdaten

Durch die Programmdaten werden Schutzgasströmzeiten, Schweißgeschwindigkeiten und Verknüpfung zur Schweißanlage geregelt. Funktionen und Einstellungen der Programmdaten werden in Kap.2.5.2 genauer erklärt.

2.5. Programmierung

2.5.1. Aufbau der Programmzeile

Im Folgenden wird der Aufbau einer Muster Programmzeile erklärt:

```
>>ArcL *, seam1, wave1, weld1, v150, z15, toSchweißbrenner;
```

ArcL...	Bewegungsfunktion
*...	Position
seam1...	Gas Vor- und Nachströmzeiten
wave1...	Pendelbewegung
weld1...	Schweißparameter
v150...	Geschwindigkeit mit welcher der Punkt * angefahren wird
z15...	Fly by Radius
toSchweißbrenner...	Werkzeug

Bewegungsfunktionen

Die wichtigsten Funktionen sind:

MoveL: Lineares Verfahren zu einem bestimmten Punkt

MoveC: Kreisbewegung durch zwei bestimmte Punkte (in der Praxis sollte der Kreisbogenwinkel 180° nicht überschreiten).

ArcL, ArcC: gleiche Bahnbewegungen wie bei den Move Befehlen, nur inkl. Schweißen (für Programmtests muss Lichtbogen gesperrt werden! (siehe Kap. RobotWare Arc).

ArcLStart, ArcCStart: Diese Funktion sollte beim MIG/MAG Schweißen am Schweißnahtanfang verwendet werden. Dadurch wird der Schweißvorgang erst genau am definierten Punkt gestartet. Bei den Befehlen ArcL und ArcC erfolgt ein sogenannter „fliegender Start“, d.h. die Gasvorströmung und Elektrodenanwärmung erfolgen während des Anfahrens des Schweißnahtstartpunktes. **Wichtig:** Durch einen fliegenden Start kommt es beim MIG/MAG Schweißen zu einer Schweißspur, da der Schweißprozess schon vor dem Startpunkt beginnt.

ArcLEnd, ArcCEnd: Definiert das Schweißnahtende. Nur bei dieser Funktion wird am Nahtende die Funktion der Gasnachströmung genutzt.

Aus diesen Gründen sollte bei einer Schweißnaht stets am Anfang und am Ende ein Start- und Endbefehl gesetzt werden.

Beispiel: MoveL p10→ArcLStart p20→ArcL p30→ArcLEnd p40→MoveL p10

Position

Positionen werden zuerst angefahren und gespeichert (Teach in- Modus), oder relativ (siehe dazu weiter unten) zu einem Punkt definiert. Positionen können ohne Namen bleiben (Kennzeichnung *) oder mit einem Namen versehen werden. Der Geltungsbereich der Positionsnamen kann bei der Erstellung eingeschränkt werden (i.A. Geltung innerhalb des Programmes). Die Positionen können auch nachträglich verändert werden (Abb. 19 E).

Seam1 und Weld1

Diese Daten stellen einen Teil der Schweißparameter dar. (Erklärungen dazu in Kap. 2.5.2)

Wave1

Die Pendelbewegung ist ein optionales Argument und muss explizit aufgerufen werden. Es wird nur die Pendelbreite eingestellt, der Rest ergibt sich aus der Schweißgeschwindigkeit. In der Regel wird diese Option für MIG/MAG nicht verwendet.

Anfahrsgeschwindigkeit

Maximale Geschwindigkeiten, die beim Anfahren von definierten Punkten erreicht werden.

Fly by Radius

Durch einen Fly by Radius ist es dem Roboter erlaubt einen definierten Punkt nur zu streifen, um unnötige Verzögerungen und Beschleunigungen zu minimieren. Mit der Definition fine wird die „Fly By“ Funktion (Abb. 20) unterbunden. **Wichtig:** Für die Befehle ArcLStart und –End ist die fine-Funktion verpflichtend!

Werkzeug

Hiermit können verschiedene Werkzeuge (Greifer usw.) angesprochen werden. Beim IRB140 heißt der Schweißbrenner „toSchweißbrenner“.

Zusatz

Offset und RelTool:

Diese beiden Funktionen ermöglichen es verschiedene Punkte relativ zueinander durch Koordinatenverschiebungen zu definieren. Sie werden beim Doppelklick auf den Punkt unter Funktionen ausgewählt. Für Beide ist es wichtig, dass der Bezugspunkt kein anonymer Punkt (*) ist. Offset ermöglicht nur X, Y und Z Verschiebungen. Die Funktion RelTool kann zusätzlich zu den Verschiebungen relative Drehungen Dx, Dy und Dz erzeugen. Speziell für das Schweißen (im Bezug auf Arbeits- und Anstellwinkel) ist die RelTool Funktion sehr hilfreich. **Wichtig:** die relativen Drehungen sind optionale Argumente und müssen erst (unter Bearbeiten) aktiviert werden!

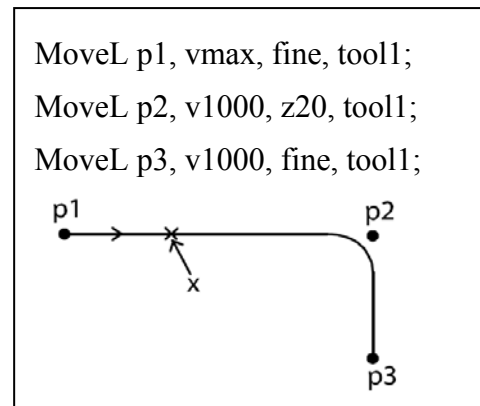



Abb. 20 „Fly By“ Funktion bei Punkt p2

2.5.2. Programmdaten

In den Programmdaten sind die oben genannten seam- u. welddata versteckt. Die welddata sind zwar auch in der RobotWare Arc Applikation einstellbar, jedoch mit deutlich weniger Komfort. Es kann sein, dass beim Öffnen noch nicht alle Daten angezeigt werden, dies kann durch den Button  und „Alle Datentypen anzeigen“ geändert werden. In den Programmdaten können bestehende Daten (z.B. seam1, weld4,...) verändert, gelöscht oder neu erstellt werden. Die Programmdaten müssen für jedes Programm neu definiert werden!

Seamdata

Die Seamdata enthält drei Parameter:

- purgeflow,
- preflow und
- postflow.

Purgeflow: bezeichnet jene Zeit die nötig ist, um das komplette Schlauchpaket mit frischem Schutzgas zu fluten.

Preflow: Gasvörströmzeit

Postflow: Gasnachströmzeit

Wichtig: Die Strömzeiten in der seamdata sind nur Verweilzeiten auf den ArcLStart und – End Positionen, d.h. der eigentliche Befehl für die Vorströmungen erfolgt erst nach diesen Zeiten durch die Schweißanlage. Beispiel: Anfahren von ArcLStart → Verweilzeit (purge- u. preflow) → Zündbefehl → Vörströmen (nach Fronius Stromquelle) → Lichtbogenzündung (Schweißprozess) → ArcLEnd → Nachströmen (postflow + Fronius).

Daher ist in den seamdata jeder Parameter mit Ausnahme der Postflowzeit gleich null zu halten, da diese nur den Programmablauf verzögern. Die Postflowzeit muss unbedingt größer der in der Froniusanlage eingestellten Nachströmzeit sein, da sonst der Schweißbrenner das Nahtende noch während des Nachströmens verlässt und somit den Nahtschutz mindert.

Welddata

Die Welddata besteht aus vier Parametern:

- weldingspeed
- original weldingspeed
- shed
- original shed

Weldingspeed: bezeichnet die Schweißgeschwindigkeit in mm/s auf welche zugegriffen (in Verbindung mit den Jobs) wird.

original weldingspeed: in dieses Label können originale Schweißgeschwindigkeiten eingetragen werden. Original weldingspeed dient nur als reine Notiz!

Shed: stellt die Verknüpfung zu den in der Schweißanlage gespeicherten Jobs dar. Es können insgesamt nur vier verschiedene Jobs angesteuert werden. Als Shed-Wert kann 0 bis 3 eingetragen werden. Bei den Werten 1 bis 3 wird auf die Jobs 01 bis 03 und bei Shed gleich 0

auf den Job 00 zugegriffen. Es können beliebig viele Schweißgeschwindigkeiten vordefiniert werden, aber vom Programm aus können nur vier verschiedene Jobs (U, I, ...). aufgerufen werden.

2.6. Schweißparameter

Dieses Kapitel befasst sich im speziellen mit dem „Wo?“ und „Wie?“ die Schweißparameter definiert werden. Als Schweißparameter beim MIG/MAG fallen zwangsläufig die Parameter:

1. Spannung,
2. Stromstärke,
3. Drahtvorschub,
4. Puls und CMT Parameter,
5. Gas Vor- und Nachströmzeiten
6. Schweißgeschwindigkeit,
7. Kontaktrahabstand, freie Elektrodenlänge,
8. Anstell und Arbeitswinkel,
9. (zur Vollständigkeit auch die) Pendelbewegung an.

Die Parameter 1 bis 5 werden in der Schweißanlage gespeichert. Es können beliebig viele Schweißparameterkonfigurationen (sog. Jobs) vordefiniert und (auf den Plätzen 04 bis 999) gespeichert werden. Um einen Job vom Roboter aus anzusteuern, muss der Jobs auf einen der Plätze 00-03 gespeichert werden. Die Verknüpfung erfolgt wie in Kap. 2.5.2 beschrieben. Es wird automatisch auf den jeweiligen (mit „shed“ definierten) Job zugegriffen, egal welcher gerade an der Schweißanlage angezeigt wird (im Normalfall schaltet die Anzeige auf den aktuellen Job um).

Die Schweißgeschwindigkeit wird in den Programmdatei „welddata“ definiert. Näheres dazu im Kap. 2.5.2.

Die Parameter 7 bis 8 entstehen durch die programmierten Positionen relativ zum Werkobjekt. Der Anstell- und/oder Arbeitswinkel wird durch das RelTool (siehe Kap.2.5.1) eingestellt.

Die Pendelbewegung (wie schon in Kap. 2.5.1.1 erwähnt) ist ein optionales Argument und muss explizit in die Programmzeile gerufen werden.

Zündproblematik:

Bei den Start- Versuchen entstand durch Fehler bei der Zündung durchgängig ein Abbruch des Schweißvorganges. Durch nachfolgende Parameter konnte dieser Fehler minimiert werden. Der Kontaktrahabstand soll nach den Herstellervorgaben (Abb. 21) eingestellt werden. Die Gasvorströmzeit sollte 0.3 sec nicht überschreiten. Die Anschleichgeschwindigkeit sollte im Automatikbetrieb eingestellt sein.

CMT:
Allgem. KRA=13mm
Puls:
<200A KRA=15mm
200-250A KRA=18mm
≥250A KRA=20mm

Abb. 21 Vorgaben Kontaktrahabstand



Wichtig: Die Roboterdrehungen finden um den 16mm vom Kontaktrohr entfernten Drehpunkt statt. Dies muss bei der Elektrodenausrichtung beachtet werden, sonst können Positionsungenauigkeiten entstehen.

2.7. Programmabarbeitung

In Kap. 2.2.3 wurde schon erwähnt, dass für die Programmabarbeitung im Einrichtbetrieb immer der Zustimmungsschalter gedrückt werden muss. Der Programmzeiger (Abb. 19 A) markiert die Position des Programmstartes und kann auf beliebige Positionen (mit einer Ausnahme) im Programm verschoben werden (Abb. 19 E). Ausnahme: Kreisbewegungen benötigen zur Bahnberechnung die Position von der zuvor stehenden Programmzeile, daher kann nicht aus einer beliebigen Position ein MoveC oder ArcC Befehl gestartet werden. Die Programmabarbeitung wird durch die Funktionstasten J bis M (siehe Abb. 15) gesteuert.

2.8. Sichern und Abschalten

Beim Abschalten des Systems bleibt das aktuell geöffnete Programm erhalten, d.h. wenn die Software das nächste Mal startet wird automatisch das zuletzt verwendete Programm geöffnet (egal ob zuvor gespeichert oder nicht). Dieses Programm geht verloren bzw. wird überschrieben, wenn ein anderer Benutzer ein neues Programm erstellt. Deshalb ist es empfehlenswert, nach jedem Arbeiten mit dem Roboter (insofern das Programm verändert wurde) das Programm zu speichern. **Wichtig:** Das Programm wird immer in einem gleichnamigen Ordner verpackt abgespeichert, daher sollte man in der Ebene des Ordners speichern, ansonsten entstehen unnötige Unterordner gleicher Bezeichnung.

Wenn die Programme und Jobs gesichert wurden, kann an beiden Anlagen (IRB140 und TPS4000CMT) der Hauptschalter umgelegt werden (es wird kein Herunterfahren benötigt).