



Stephan Fritsch, BSc

**CMT-Prozess zum Fügen von Stahl mit Aluminium
mit lokaler Verzinkung**

**Joining of steel and aluminium sheets by CMT process
using a local zinc coating**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Begutachter:

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger
Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

Betreuer:

Dipl.-Ing. Maximilian Stummer

Graz, November 2016

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am

.....

Unterschrift

Affidavit

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 indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Graz, on

.....

Signature

Danksagung

Danken möchte ich in erster Linie dem Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik und im Besonderen Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Priv.-Doz. Christof Sommitsch, der mir diese Masterarbeit an seinem Institut an der Technischen Universität in Graz ermöglicht und die für mich notwendige Infrastruktur zu meiner Verfügung gestellt hat.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Maximilian Stummer und bei meinem Begutachter Herrn Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger für die ausgezeichnete moralische und fachliche Unterstützung seitens des Instituts bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich beim gesamten Team der Fa. INOCON Technologie GmbH unter der Leitung von Dr. Fritz Pesendorfer und den beiden Kollegen Dipl.-Ing. Philipp Stögmüller und Dipl.-Ing. Andreas Hinterer für die Nutzung deren Infrastruktur, sowie für das angenehme Arbeitsklima bedanken.

Herzlichen Dank auch an die Fa. Fronius International GmbH in Wels, vor allem Herrn Stefan Hofinger für die Möglichkeit fürs Nutzen deren Schweißlabors und das Organisieren der Schweißversuche.

Meinen Dank möchte ich auch dem Laborteam des Instituts für Werkstoffkunde und Schweißtechnik mit Herrn Ing. Kurt Kerschbaumer, Herrn Thomas Friedl und Herrn Leander Herbitschek aussprechen.

Zum Schluss möchte ich mich ausdrücklich bei meiner Familie und meiner Freundin bedanken, die mich während meiner ganzen Ausbildungszeit immer mit großem Verständnis und großer Geduld unterstützt haben.

Stephan Fritsch

Kurzfassung/Abstract

Kurzfassung:

In dieser Masterarbeit wurde das Fügen von Stahl und Aluminium mit lokaler Verzinkung analysiert. Mittels atmosphärischen Plasmaspritzen, kurz APS-Beschichten, wurde diese lokale Zinkschicht auf das Stahlsubstrat aufgebracht. Als Schweißprozess wurde das CMT-Verfahren mit einem AISi5 Zusatzwerkstoff gewählt. Um das thermische Fügen von dieser artfremden Mischverbindung zu ermöglichen, waren drei Voraussetzungen zu beachten:

- Verzinkung des Stahlbleches muss vorliegen
- Kenntnis und Minimierung der intermetallischen Phasen
- Fügeverfahren mit minimaler Energieeinbringung

Ausgangsbasis waren Versuche mit denselben Werkstoffen Stahl (DC04) und Aluminium (AlSi1MgMn) nur mit einer elektrolytischen Verzinkung über die gesamte Stahloberfläche.

Zur Analyse der hergestellten Verbindungen wurden diese anhand des statischen Zugversuchs, unter dem Licht- und Rasterelektronenmikroskop und mittels digitaler Computerradiographie untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass das CMT-Verfahren für diese Mischverbindung geeignet ist. Mit dem APS-Beschichtungsprozess konnte jedoch hinsichtlich der Zugfestigkeit und Porenbildung keine bzw. eine nur wenig zufriedenstellende Schweißnaht geschweißt werden. Das Ergebnis hinsichtlich der intermetallischen Phasenbreite war hingegen erfolgreich. Für die Weiterentwicklung ist nun das Hauptaugenmerk auf den Zusatzwerkstoff und auf den Beschichtungsprozess zu legen.

Abstract:

This thesis aims to analyse the process of joining steel and aluminium sheets with a local zinc coating, which was applied with a coating process called atmospheric plasma spraying (APS). The used arc welding process was CMT with AlSi5 as filler material.

Three points have to be considered in order to enable the thermal joining of these dissimilar joints:

- Zinc layer on the steel is necessary
- Knowledge und minimization of the intermetallic phases
- Joining process with minimal energy input

Steel and aluminium sheets with an electrolytic zinc layer, applied on the whole steel surface, were used as starting point of the following experiments.

To analyse the produced joints, different testing methods like tensile testing, light and scanning electron microscopy and digital X-radiograph were used. With the applied CMT procedure as arc welding process and the minimization of the intermetallic phases, two of the three requirements could be fulfilled successfully. However, by using an APS-coating process, no or almost no satisfactory weld seams with regards to the tensile strength and porosity could be achieved. For the further development of this research topic it is therefore recommended to concentrate on the filler material and the coating process.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung	4
1.2	Variantenbaum	5
2	Literatur	6
2.1	Verwendete Werkstoffe	6
2.1.1	Stahl	8
2.1.2	Aluminium	13
2.1.3	System Eisen-Aluminium	15
2.1.4	Pulverwerkstoff	16
2.1.5	Zusatzwerkstoff	17
2.2	Industrielle Verzinkungsverfahren	18
2.2.1	Feuerverzinkung	18
2.2.2	Elektrolytische Verzinkung	22
2.2.3	Atmosphärisches Plasmaspritzen (APS)	23
2.2.4	Vergleich der Zink-Beschichtungsverfahren	25
2.3	Herausforderungen beim thermischen Fügen von artfremden Werkstoffen	26
2.3.1	Schweißeignung	26
2.3.2	Intermetallische Phasenbildung	27
2.3.3	Porenbildung im Schweißgut	29
2.3.4	Unterschiedliche Materialeigenschaften	31
2.4	Schweißverfahren	31
2.4.1	CMT-Schweißen	31
2.5	Einführung in die statistische Versuchsplanung – Design of Experiments	34
3	Schweißversuchsplanung	37

3.1	Experimenteller Ablauf	37
3.2	Versuchsdaten.....	38
3.2.1	Blechgeometrie und Blechvorbereitung	38
3.2.2	Spannsituation	38
3.2.3	Brennerstellung und Stick-Out	40
3.2.4	Offset	41
3.2.5	Schutzgaseinstellung	42
3.2.6	Schweißquelle	42
3.2.7	Schweißroboter.....	42
3.3	Schweißparameter	42
3.3.1	Vorversuchsreihe	43
3.3.2	1. Hauptversuchsreihe	43
3.3.3	Referenzversuchsreihen.....	45
3.3.4	2. Hauptversuchsreihe mit APS Verzinkung	46
3.4	Probenentnahmeplan	47
4	Ergebnisse	49
4.1	Brennereinstellungen	49
4.1.1	Schweißgeschwindigkeit	49
4.1.2	Offseteinstellung	50
4.2	Zugversuch	51
4.2.1	Zugversuchsergebnisse aus Literatur	53
4.2.2	Bruchstellen nach Zugversuch.....	53
4.3	Porenbildung	54
4.3.1	Untersuchungen der Porenbildung.....	55
4.3.2	Zinkanreicherung in der Schweißnaht	59
4.4	Vergleich der intermetallische Phasenbildung	62
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	64
6	Verzeichnisse.....	66

6.1	Literaturverzeichnis	66
6.2	Abbildungsverzeichnis.....	68
6.3	Tabellenverzeichnis	71
6.4	Formelverzeichnis.....	71
6.5	Abkürzungsverzeichnis.....	71
7	Anhang.....	73
7.1	Produktdatenblatt Argon 4.8	73
7.2	Blechwerkstoffe im Fahrzeugbau	75
7.3	Datenblatt EN AW-6082	76
7.4	Zusatzwerkstoff AX-AISI5	77
7.5	Schweißnahtaussehen der Schweißversuche	78
7.6	Digitale Röntgenbilder der Schweißversuche.....	79
7.7	Datenblätter Zugversuch	81

1 Einleitung

Weltweit betrachtet steigt die jährliche Nachfrage nach neuen Kraftfahrzeugen. Die Automobilhersteller in China, Nordamerika und Westeuropa erzielen jährlich einen Zuwachs an Neuzulassungen. Dies wirkt sich allgemein nicht nur auf die Automobilindustrie aus, sondern ist auch für die gesamte Wirtschaft sehr positiv. Sowohl die Automobilindustrien in Deutschland, als auch in Österreich, verzeichnen ebenfalls einen stetigen Anstieg an Neuzulassungen und Jahresumsätzen, sowie einen daraus resultierenden erhöhten Bedarf an Arbeitskräften (Kfz-Hersteller, Automobilzulieferer und Hersteller von Aufbauten). Von diesem Zuwachs in der Fertigung dieser Fahrzeuge profitiert die Automobilzulieferindustrie, wie Hersteller von Fahrzeugteilen, Komponenten oder Rohstoffen. Dazu gehören Investitionsgüter, Material- und Teillieferungen u.a. aus der Textilindustrie, dem allgemeinen Maschinenbau, der elektrotechnischen Industrie, der Reifenindustrie, sowie der Stahl- und Aluminiumindustrie. [1]

Aufgrund der immer wichtiger werdenden ökologischen Herausforderungen, wie Klimawandel oder Umweltverschmutzung, nimmt der Druck auf die Automobilindustrie, in Bezug auf Minimierung der Fahrzeugmasse im Zusammenhang mit der Reduktion der CO₂-Schadstoffe, stetig zu [2].

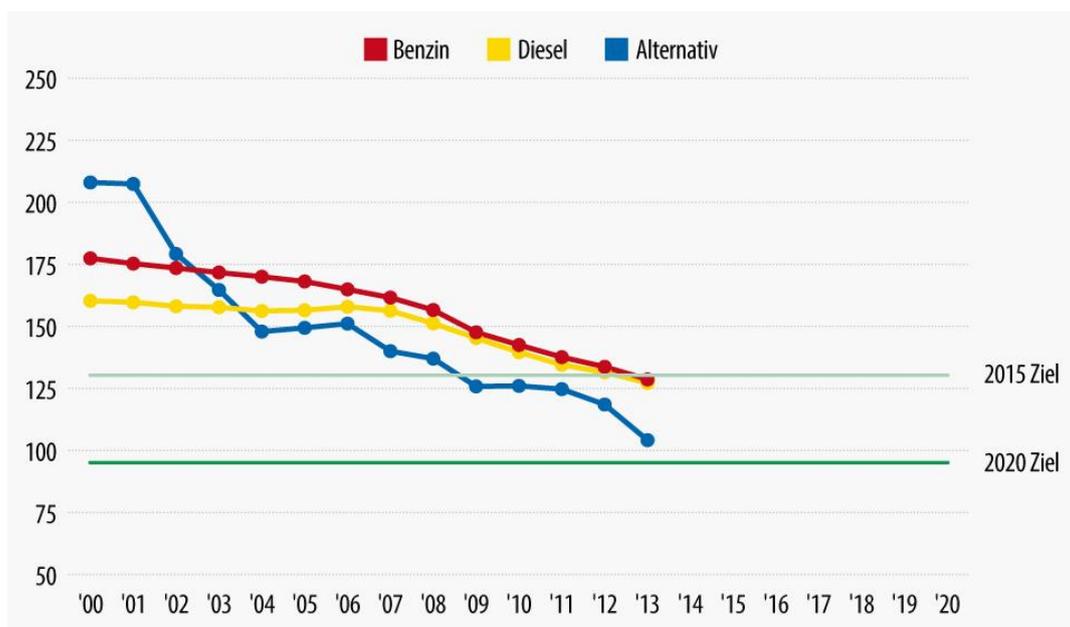


Abbildung 1-1: Durchschnittliche CO₂-Emissionen in der EU verkaufter Neuwagen nach Antriebsart (in Gramm CO₂ pro Kilometer) [2]

- Lebensdauer maximieren
- Kosten minimieren
- Optik optimieren
- Crash-Sicherheit maximieren

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden besteht die Hauptaufgabe darin, einen geeigneten Werkstoff oder eine Werkstoffkombination zu finden oder zu entwickeln, welche(r) wiederum folgende Eigenschaften aufweist [4]:

- Hohe Festigkeit
- Konventionelle Fügbarkeit
- Hohe Haltbarkeit/Geringe Korrosion
- Niedrige Kosten
- Geeigneter Oberflächenzustand
- Hohe Umformbarkeit

Sehr vorteilhaft für das Erfüllen dieser Eigenschaften zeigt sich eine Kombination aus Stahl und Aluminium. Aluminiumwerkstoffe überzeugen vor allem durch geringes spezifisches Gewicht, optimale Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften, sowie Korrosionsbeständigkeit. Stahl hingegen überzeugt durch Fügbarkeit, Festigkeit und geringe Anschaffungskosten. Die Werkstoffpaarung von Stahl und Aluminium erfüllt daher die Anforderungen des Karosseriebaus bestmöglich. Anfänglich wurden diese Mischverbindungen meist nur durch mechanische Verbindungen, wie Schrauben, Nieten und Clinchen, oder durch Kleben und Löten ausgeführt [5]. Aufgrund der stetig steigenden Ansprüche solcher Werkstoffpaarungen wurden nun auch neue stabile Prozesse in Bezug auf die Verbindung zweier unterschiedlicher Materialien notwendig. In diesem Fall spricht man von der modernen Fügetechnik, welche Prozess-Stabilität, Reproduzierbarkeit und Wirtschaftlichkeit fordert. Der Fügeprozess Stahl-Aluminium lässt sich mit dem für diese Kombination von der Fa. Fronius International GmbH eigens entwickeltem CMT-Schweißverfahren ausreichend beherrschen. [6]

Im Rahmen des COMET K-Projekts metal JOINing P1, welchem auch diese Masterarbeit zuzuordnen ist, werden solche Stahl-Aluminium Verbindungen hergestellt. Nach der Ermittlung der optimalen Schweißparameter für den CMT-Prozess auf

elektrolytisch- bzw. feuerverzinkten Stahlbleche, wird diese Beschichtung durch eine lokale APS-Verzinkung ersetzt. Durch die Analyse und dem Vergleich mit der Bandverzinkung, soll so ein Reparaturkonzept für diese Verbindung ermöglicht werden.

An diesem Projekt sind maßgeblich das Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik (IWS) an der Technischen Universität Graz, sowie die Firmen INOCON Technologie GmbH, AIR LIQUIDE Österreich GmbH und ECKART Effect Pigments GmbH beteiligt.

1.1 Motivation und Zielsetzung

Ziel ist es eine Stahl-Aluminium Überlappverbindung mittels CMT (Cold Metal Transfer) Verfahren herzustellen, wobei eine elektrolytisch bzw. feuerverzinkte Oberfläche des Stahlblechs durch eine lokale APS-Beschichtung (Atmosphärisches Plasmaspritzen) ersetzt wird. Lokale Reparaturschweißungen werden durch dieses Verzinkungsverfahren ermöglicht.



Abbildung 1-3: Zielsetzung

Das Ergebnis soll sich durch eine möglichst hohe Zugfestigkeit auszeichnen und die Schweißgeschwindigkeit soll aus wirtschaftlicher Sicht möglichst hoch sein.

Die mechanischen Kennwerte, die Schweißnahtgeometrien und die Schweißparameter dienen als Vergleichswerte für den Plasmatron-Schweißprozess der Fa. INOCON Technologie GmbH.

Diese Zielsetzung der Masterarbeit zeigt die Abbildung 1-3.

1.2 Variantenbaum

Im Zuge des Projekts P1 wurde für das Arbeitspaket „Welding – Schweißversuche“ zur Übersicht ein Variantenbaum erstellt, aus welchem die jeweiligen Aufgabenbereiche ersichtlich sind. In dieser wissenschaftlichen Arbeit fällt der Bereich auf den linken Ast dieses Baumes, also auf das CMT-Schweißen. Der CMT-Prozess wird mit einem Zusatzwerkstoff aus dem Material AlSi5 durchgeführt. In einem ersten Schritt wird dieser Prozess an einem elektrolytisch verzinkten Stahlblech und anschließend an einem Stahlblech, welches mittels Atmosphärischem Plasmaspritzen (APS) nur im Bereich der Anbindung verzinkt wurde, angewendet. Abbildung 1-4 zeigt den für diese Arbeit relevanten Ausschnitt des Variantenbaums.

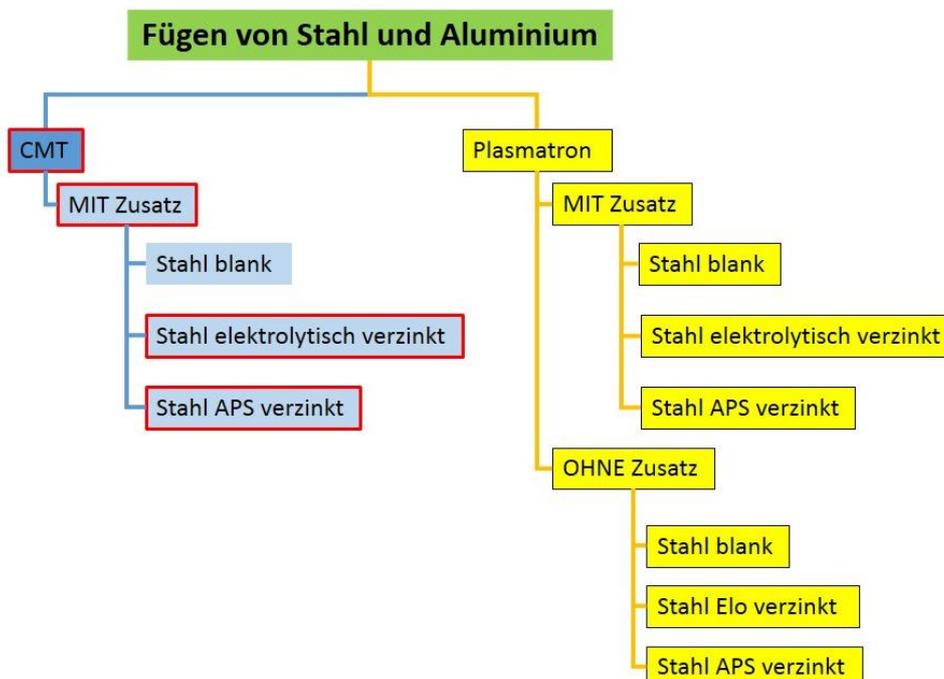


Abbildung 1-4: Variantenbaum

2 Literatur

2.1 Verwendete Werkstoffe

Die verwendeten Werkstoffe beschränken sich im Wesentlichen auf konventionelle Materialgruppen, die in der Automobilindustrie verwendet werden. Dabei wurden Verbreitung, Industrienähe, Anwendungsorientierung und kurze Lieferzeiten als Kriterium für die Werkstoffauswahl definiert.

Für die Mischverbindung wurden je ein Blech aus einer unlegierten Stahlsorte und ein Blech aus einer Aluminiumlegierung verwendet. Für den Beschichtungsprozess der Haftvermittlerschicht wurde Zink in Pulverform verwendet. [7]

Die Abbildung 2-1 vermittelt einen Überblick der gewählten Werkstoffe und deren Anordnung vor dem Schweißprozess.



Abbildung 2-1: Verwendete Werkstoffe und deren Anordnung vor dem Schweißprozess

Um sich einen groben Überblick über die grundlegenden Unterschiede und die damit verbundenen Herausforderungen des Stahls, des Aluminiums und des Zinks zu verschaffen, werden zuerst diese Materialien mit ihren Eigenschaften gegenüber gestellt. Für den Vergleich wurde als Ausgangsprodukt und Hauptbestandteil des Stahls das Element Eisen (Fe) herangezogen.

Die folgende Tabelle 2-1 zeigt die wichtigsten Werkstoffeigenschaften von reinem Eisen, Reinstaluminium und Zink bei einer Temperatur von 20°C und einem Umgebungsdruck von 1,013 bar.

Tabelle 2-1: Eigenschaften von reinem Eisen, Reinstaluminium und Zink bei 20°C und 1,013 bar [8]–[11]

Eigenschaften	Einheit	Eisen	Aluminium	Zink
Ordnungszahl	-	26	13	30
Atomgewicht	g/mol	55,847	26,982	65,38
Dichte (20°)	kg/dm ³	7,87	2,70	7,14
Gittertyp	-	kubisch- raumzentriert	kubisch- flächenzentriert	hexagonal
Gitterparameter	nm	0,2866	0,40489	-
E-Modul	N/mm ²	~210.000	~71.000	98.000
Spezifische Wärmekapazität	J/kg*K	470	940	385
Spezifische Schmelzwärme	J/g	272	397	100
Schmelzpunkt	°C	1539	660	419,47
Siedetemperatur	°C	3070	2467	906
Wärmeleitfähigkeit	W/m*K	81	204	113
Wärmedehnungskoeffizient	1/K	12*10 ⁻⁶	24*10 ⁻⁶	29,05*10 ⁻⁶
Oxide	-	FeO Fe ₂ O ₃ Fe ₃ O ₄	Al ₂ O ₃	-
Schmelzpunkt der Oxide	°C	1400 1455 1600	2050	-
Magnetismus	-	ferro- magnetisch	para- magnetisch	dia- magnetisch

Folgend werden die verwendeten Werkstoffe einzeln detaillierter beschrieben.

2.1.1 Stahl

Stahl ist weltweit der meist verwendete metallische Werkstoff. Er wird mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Eigenschaften angeboten und ist wie folgt definiert:

Definition von Stahl nach DIN EN 10020:2000-07:

„Werkstoff, dessen Massenanteil an Eisen größer ist als der jedes anderen Elementes, dessen Kohlenstoffgehalt im Allgemeinen kleiner als 2,06% Kohlenstoff ist und der andere Elemente enthält. Eine begrenzte Anzahl von Chromstählen kann mehr als 2,06% Kohlenstoff enthalten, aber 2,06% ist die übliche Grenze zwischen Stahl und Gusseisen.“

Anhand des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms (Abbildung 2-2) ist diese Grenze des Kohlenstoffgehalts leicht erkennbar. Es zeigt das stabile (Fe-C) und metastabile (Fe-Fe₃C) Gleichgewicht zwischen Eisen (Fe) und Kohlenstoff (C) sowie Zementit (Fe₃C) beziehungsweise gibt es allgemein einen guten Überblick über die Temperaturen der Umwandlungspunkte zwischen den einzelnen Phasen beim jeweiligen Kohlenstoffgehalt.

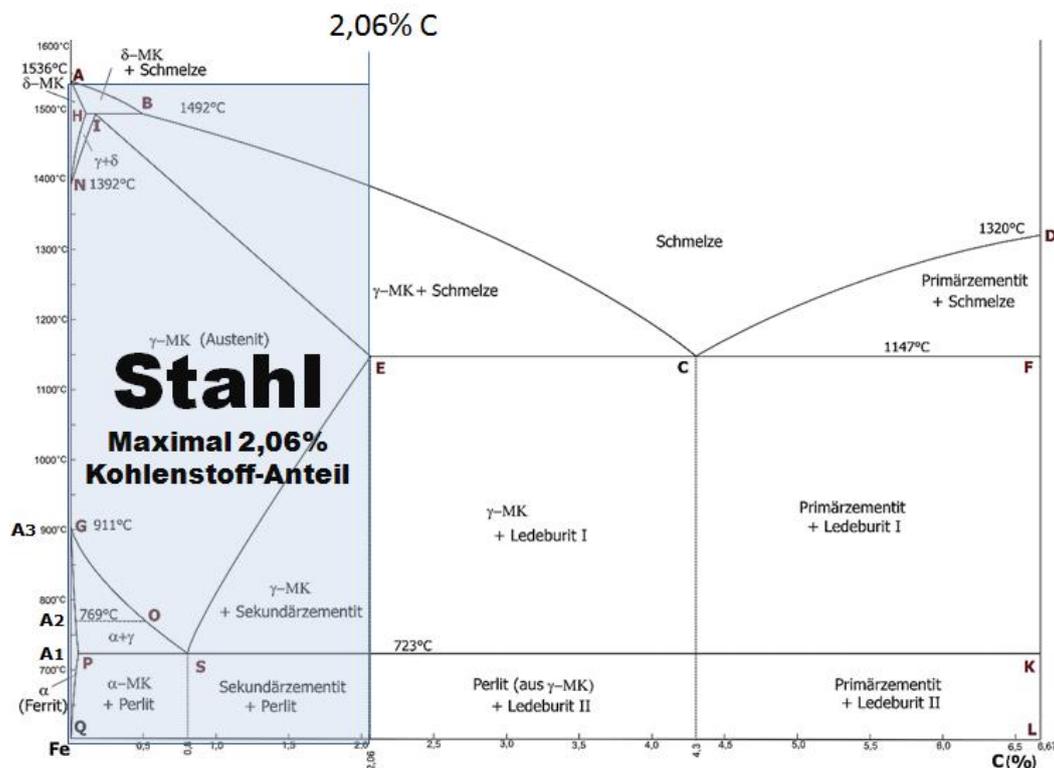


Abbildung 2-2: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm für stabile und metastabile Ausbildung des Kohlenstoffs [12]

In der Industrie werden an den Stahl sehr umfangreiche Anforderungen gestellt. Durch die vielseitige Anwendung müssen die mechanisch-technologischen Eigenschaften in allen Bereichen möglichst gut ausgeprägt sein. Durch die große Vielfalt an Legierungsmöglichkeiten können diese Ziele erreicht werden. Die meisten Legierungs- und Begleitelemente sind sowohl im α -Eisen, im γ -Eisen als auch im δ -Eisen bis zu einem gewissen Prozentsatz löslich. Somit ergeben sich vielfältige Beeinflussungsmöglichkeiten auf die Gefügeausbildung in Abhängigkeit von thermischen oder thermomechanischen Behandlungen [13].

Anforderungen von Stahl im Automobilbau:

Speziell in der Automobilindustrie zählen zu den wichtigsten Verarbeitungseigenschaften des Stahls in erster Linie die Schweißbarkeit und die Umformbarkeit. Diese technologischen Eigenschaften sind in nahezu jedem Verarbeitungsprozess dieses Werkstoffs integriert. Bei der Umformbarkeit ist speziell die Eignung zum Kanten, zum Rollprofilieren und zum Tiefziehen gemeint. Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften können mit einer möglichst hohen Streck-/Dehngrenze und Zugfestigkeit, sowie einer ausreichend hohen Bruchdehnung und Zähigkeit aufgezählt werden. Zu diesen Gebrauchseigenschaften zählen aber auch noch Anforderungen an Geometrie und Oberfläche. Das Einhalten von geringen Toleranzen in Bezug auf Werkstückabmessungen und die Möglichkeit zum Erreichen definierter Form und Lagetoleranzen muss gegeben sein. [4]

Um den Anforderungen an den Karosseriebau gerecht zu werden, muss der Werkstoff besondere Umformeigenschaften vorweisen. Ein möglichst niedriger Kraft- und Arbeitsbedarf bei der Umformung ist hier wesentlich von Vorteil. Es sollen hohe Formänderungen ohne Fehler (Bruch, Risse, Oberflächenfehler) gewährleistet werden können. Für die Umformbarkeit ist in erster Linie die chemische Zusammensetzung des Stahls bestimmend. Prinzipiell werden aus unlegierten Stählen Bleche guter Umformbarkeit hergestellt. Der Hauptbestandteil des Gefüges dieser unlegierten Stähle ist Ferrit mit nur einem geringen Anteil an Perlit. Nachteilig ist, dass die Kaltumformbarkeit und die Festigkeit einander im Widerspruch stehen. Man muss somit mit steigender Zugfestigkeit eine Abnahme der Bruchdehnung hinnehmen. [13]

Diese Kriterien werden von Tiefziehstählen optimal erfüllt. Dabei handelt es sich um weiche Stähle, deren Eigenschaften für Umformprozesse optimiert wurden. Diese Stähle besitzen eine hohe Zähigkeit und vergleichsweise niedrige Festigkeitswerte (siehe Abbildung 2-3). [14]

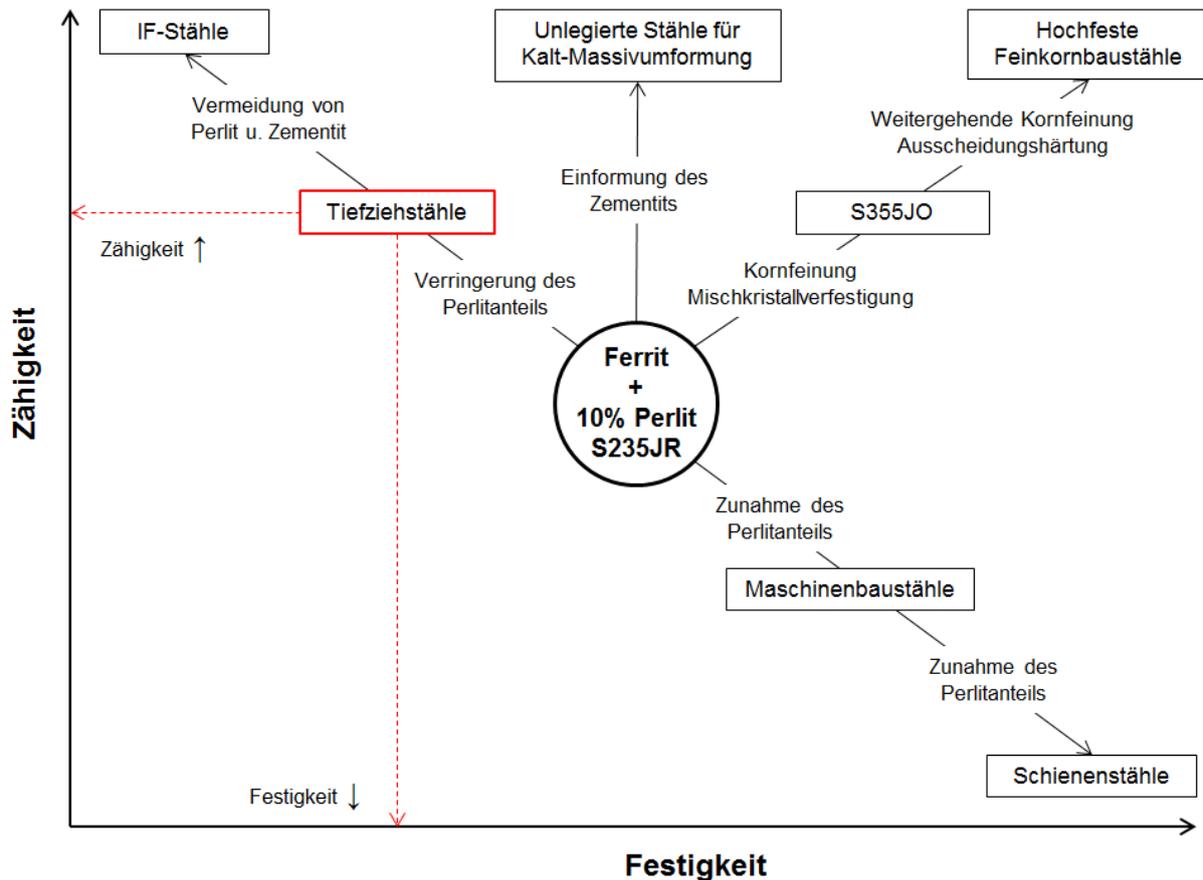


Abbildung 2-3: Gefügeanteile verschiedener Stahlsorten [14]

Zu den Anwendungsgebieten dieser Stähle zählt nicht nur der Karosseriebau, wie zum Beispiel Heckklappen, Dächer oder Türen im Automobilbau, sondern auch die Körper von Profilradiatoren oder die Seitenwände und Schalen von Kühlschränken und Waschmaschinen.

Werkstoffwahl:

Für dieses Projekt wurden drei verschiedene, aber ähnliche weiche Stähle ausgewählt. Es handelt sich dabei um die Tiefziehstähle DC01 mit lokaler APS Verzinkung, den DC04 mit elektrolytischer Verzinkung und den feuerverzinkten DX54. Tabelle 2-2

gibt einen Überblick über diese Materialien hinsichtlich des Kohlenstoffgehalts, der Verzinkungsart und der vom Hersteller garantierten Streckgrenze und Zugfestigkeit.

Tabelle 2-2: Überblick Stahlsorten [15]

Stahl- sorte	Werkstoff- nummer	C-Gehalt in %	Verzinkungs- art	Streckgrenze in N/mm ²	Zugfestigkeit in N/mm ²
DC01	1.0330	0,12	lokal APS ver- zinkt	140 - 280	270 - 410
DC04	1.0338	0,08	elektrolytisch verzinkt	140 - 210	270 - 350
DX54	1.0306	0,12	feuerverzinkt	140 - 210	260 - 350

Eine detailliertere Beschreibung inklusive einer exakten Bezeichnung dieser drei Stahlsorten ist im Folgenden kompakt erläutert:

Kaltgewalztes Feinblech (DC01)

Werkstoffnummer: 1.0330

Stahlart: unlegierter Qualitätsstahl mit Ziehgüte

Das kaltgewalzte Feinblech DC01 gehört zur Gruppe der Weichstähle und bietet sich bei der Weiterverarbeitung zum Kaltumformen an. Aufgrund dieser Eigenschaft wird es auch Tiefziehstahl genannt. Seine Anwendungsgebiete liegen im Einsatz für Kant- und einfachste Ziehoperationen wie z.B. für diverse Teile in der Hausgeräteindustrie, Fässer oder Radiatoren [16].

Kaltgewalztes Feinblech (DC04)

Werkstoffnummer: 1.0338

Stahlart: unlegierter Qualitätsstahl mit Sondertiefziehgüte

Das kaltgewalzte Feinblech DC04 gehört ebenfalls zur Gruppe der Weichstähle, eignet sich jedoch aufgrund einer höheren Tiefziehqualität etwas besser zum Kaltumformen. Anwendung finden diese unlegierten Feinbleche bei einfacheren Automobilteilen im Innen- und Außenbereich, sowie schwierige Teile in der Hausgeräteindustrie. [16]

Gewalzter Tiefziehstahl (DX54)

Werkstoffnummer: 1.0306

Stahlart: Stahl mit Sondertiefziehgüte

Beim gewalzten Tiefziehstahl wurde seitens des Herstellers keine Walzbedingung angegeben. Er kommt bei denselben Anwendungen zum Einsatz wie der DC04, weist jedoch eine noch höhere Tiefziehqualität auf.

Die exakten Stahlbezeichnungen für die gewalzten Tiefziehstähle liefert die folgende Aufstellung [15], [16]:

DC01 + APS verzinkt

D: Tiefziehstahl für Kaltumformung, C: kaltgewalzt, 01: zunehmende Tiefziehqualität

Verzinkung mittels Atmosphärischem Plasmaspritzen

DC04 A + ZE 75/75

D: Tiefziehstahl für Kaltumformung, C: kaltgewalzt, 04: zunehmende Tiefziehqualität

Oberflächenart A: Poren, leichte Kratzer, kleine Riefen zulässig

Verzinkungsart: elektrolytisch verzinkt

Beidseitig verzinkt mit Nennaufgabe von je 7,5 µm

DX54 D + Z 150 MB

D: Tiefziehstahl für Kaltumformung, X: Walzbedingung nicht angegeben, 54: zunehmende Tiefziehqualität

Für Schmelztauchbeschichtung geeignet

Verzinkungsart: feuerverzinkt

Gesamtaufgabegegewicht: 150 g/m² => ca. 11 µm

Oberflächenart: blanke metallische reine Oberfläche

Der letztgenannte Werkstoff DX54 spielt bei den Schweißversuchen eine untergeordnete Rolle. Dieser wurde lediglich als Vergleich zum DC04 bei der Vorversuchsreihe verwendet und danach nicht mehr erwähnt.

Im Anhang ab Seite 73 kann das Datenblatt für die Blechwerkstoffe im Fahrzeugbau eingesehen mit der Zusammensetzung der Stahlbezeichnung eingesehen werden.

2.1.2 Aluminium

Aluminium wird im Maschinenbau, speziell im Leichtbau oft als Alternative zu Stahl eingesetzt. Mit einer Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$, etwa ein Drittel der Dichte von Stahl, gehört es zur Gruppe der Leichtmetalle. Sein Schmelzpunkt liegt bei ca. 660°C . Aufgrund der großen Affinität zum Sauerstoff, bildet das Aluminium an der Luft eine sehr dünne (ca. $0,05 \mu\text{m}$), aber dichte Oxidschicht. Diese Passivschicht baut ihr Raumgitter auf dem Grundwerkstoff auf und schützt so das Material vor einem korrosiven Angriff. Diese Eigenschaften und auch die guten Umformeigenschaften, bei vergleichsweise hohen Festigkeitswerten, sind der Grund für die große Bedeutung in der Leichtbauindustrie, wie z.B. für zahlreiche Anwendungen im Automobil-, Schiff- und Flugzeugbau. Bedeutend für diese Branchen ist insbesondere die große Vielfalt der Legierungen des Aluminiums.

Legierungselemente sollen vor allem für die Erhöhung der Streckgrenze und der Festigkeit sorgen, ohne Benachteiligung der Dehnbarkeit und Korrosionsbeständigkeit. Kupfer, Mangan, Magnesium, Silizium und Zink sind für Aluminium die wichtigsten Legierungselemente.

Die Wirkung dieser und weiterer Elemente auf die Eigenschaften des Aluminiums ist nachfolgend in der Tabelle 2-3 angeführt:

Tabelle 2-3: Wirkung der Legierungselemente [14]

Eigenschaft	Legierungselement
Festigkeit	Mangan, Magnesium (Hochfest: Magnesium + Silizium, Zink, Kupfer)
Warmfestigkeit	Kupfer, Nickel, Mangan, Eisen
Maßkonstanz	Silizium bis 25%
Gießbarkeit	Silizium bis 13%
Chemische Beständigkeit	Magnesium, Mangan
Spanbarkeit	Blei, Bismut, Cadmium

Bei Aluminiumwerkstoffen wird zwischen Knetlegierungen und Gusslegierungen unterschieden. Die Unterteilung dieser Aluminiumlegierungen in Serien in Bezug auf die Legierungselemente veranschaulicht die Tabelle 2-4.

Tabelle 2-4: Serien von Aluminiumlegierungen [17], [18]

SERIEN VON ALUMINIUMLEGIERUNGEN		
Legierungselement	Serie der Gusslegierungen	Serie der Knetlegierungen
Keines (unlegiert)	10000	1000
Kupfer	20000	2000
Mangan		3000
Silizium	40000	4000
Magnesium	50000	5000
Magnesium und Silizium		6000
Zink (und Kupfer)	70000	7000
Sonstige Elemente		8000

Werkstoffwahl:

Für die Anwendung im Kfz-Bereich sind die beiden Serien der Knetlegierungen 5000 und 6000 am besten geeignet. Speziell die Formgebung, der optische Eindruck, die Korrosionsfestigkeit und die Steifigkeit sind bei diesen Serien besonders gut ausgeprägt. [19]

Für dieses Projekt wurde ausschließlich eine einzige Aluminium Knetlegierung aus der Serie 6000 gewählt. Es handelt sich um die Universallegierung für den Maschinenbau EN AW-6082. Die Hauptlegierungselemente sind Magnesium, Silizium und Mangan. Magnesium fördert dabei, auch in Zusammenhang mit Silizium und Mangan, die Festigkeit und trägt zur chemischen Beständigkeit bei. Ein weiterer Vorteil des Legierungselements Silizium ist die Minderung der Heißrissneigung. Das Legieren mit Mangan wirkt sich positiv auf die Warmfestigkeit, sowie die chemische Beständigkeit aus und mindert die Neigung zu interkristalliner Korrosion. [14]

Tabelle 2-5 fasst die Legierungsangaben, sowie die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Aluminium Knetlegierung EN AW-6082 zusammen.

Tabelle 2-5: Eigenschaften der Aluminium Knetlegierung EN AW-6082 [20]

Bezeichnung		Werkstoffnummer	ALUMINIUM KNETLEGIERUNG				
AlSi1MgMn	EN AW-6082	3.2315					
Physikalische Eigenschaften							
Spez. Gewicht in g/cm ³	Elastizitätsmodul in kN/mm ²	Lin. Wärmeausdehnungskoeffizient in 1/K*10 ⁻⁶			Schmelzintervall in °C		
2,7	69	23,4			585 - 650		
Mechanische Eigenschaften							
Zugfestigkeit in N/mm ²	Dehngrenze in N/mm ²		Bruchdehnung A50 in %		Brinellhärte		
275 – 300	240 – 255		6 - 9		84 - 91		
Legierungselemente							
Si in %	Fe in %	Cu in %	Mn in %	Mg in %	Cr in %	Zn in %	Ti in %
0,7 - 1,3	0,5	0,1	0,4 - 1,0	0,6 - 1,2	0,25	0,2	0,1

2.1.3 System Eisen-Aluminium

Je nach Zusammensetzung kommt es im System Eisen-Aluminium zu unerwünschten spröden intermetallischen Phasen. Die Ausbildung dieser Phasen kann durch die richtige Auswahl der Parameter des Schweißprozesses und der richtigen Auswahl des Zusatzwerkstoffes reduziert werden. Abbildung 2-4 zeigt das Phasendiagramm von Eisen mit Aluminium. Die intermetallischen Phasen treten vorwiegend im Bereich von 65-77at% (48-61wt%) Aluminium bei Temperaturen von ca. 400 – 1170 °C auf. Die intermetallische Phasenbildung ist in Kapitel 2.3 näher erklärt.

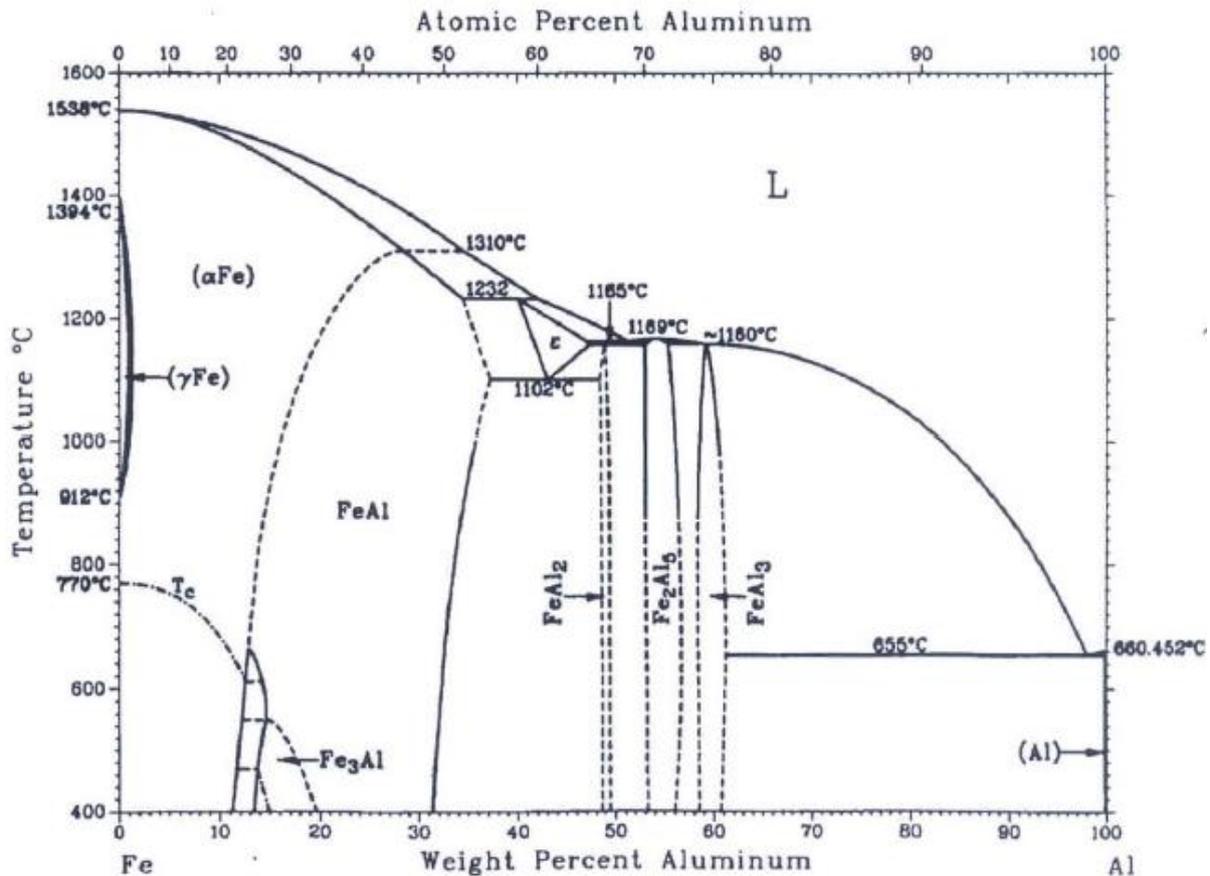


Abbildung 2-4: Phasendiagramm Eisen-Aluminium [21]

2.1.4 Pulverwerkstoff

Als Beschichtungswerkstoff für die Plasmabeschichtung wird in der Regel Zinkpulver verwendet. Die Zinkschicht dient als Konservierungsschicht für die oxidfreie Stahloberfläche. Durch das Verdampfen des aufgespritzten Zinks während des Schweißens (der Siedepunkt des Zinks liegt bei 906°C) bleibt die aktivierte Oberfläche des Stahls aufrecht und ermöglicht so eine bessere Benetzung des Stahlblechs mit dem Zusatzwerkstoff bzw. mit dem Aluminium Grundwerkstoff [22]. Dies kann natürlich auch mit anderen Pulverwerkstoffen wie Kupfer, Nickel, Chrom oder auch Silber erreicht werden, nur bietet sich das Zink als Beschichtungswerkstoff für diese Anforderung optimal an, da es mit herkömmlichen Verfahren auf die Oberfläche aufgebracht werden kann, es kostengünstig ist und die Werte der physikalischen Eigenschaften, wie Schmelzpunkt, Ausdehnungskoeffizient und Festigkeit (siehe Tabelle 2-1) von Vorteil sind [23].

2.1.5 Zusatzwerkstoff

Aufgrund der hohen Festigkeiten der in der Industrie häufig verwendeten Grundwerkstoffe bei Schweißverbindungen, spielen die Werkstoffeigenschaften der Zusatzwerkstoffe für die Eigenschaften der Verbindung eine entscheidende Rolle. Der geeignete Zusatzwerkstoff ist somit für die Gesamtfestigkeit der Schweißproben von wesentlicher Bedeutung. Er gleicht zum Teil auch Eigenschaftsunterschiede der beiden Grundwerkstoffe aus und beeinflusst zum Beispiel die intermetallische Phasenbildung oder die chemische Zusammensetzung der Naht. Die chemische Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffes bestimmt hauptsächlich die Zusammensetzung der Schweißrauche und Verbrennungsprodukte. [19]

Werkstoffwahl:

Der bei diesen Schweißversuchen ausschließlich verwendete Zusatzwerkstoff für den CMT-Prozess ist eine Aluminium-Silizium-Legierung zum WIG- bzw. MIG-Schweißen. Der Massivdraht besteht aus Aluminium mit 5% Legierungsanteil an Silizium (AlSi5). Der Durchmesser beträgt \varnothing 1,2 mm und die Grundfestigkeit ca. 160 N/mm². [24]

Detaillierte Informationen liefert die folgende Tabelle 2-6 bzw. das Datenblatt im Anhang.

Tabelle 2-6: Mechanische Eigenschaften AlSi5 [24]

Bezeichnung		Werkstoff- Nummer	Norm
AX-4043	AlSi5	3.2245	DIN EN ISO 18273
Mechanische Eigenschaften			
0,2%-Dehngrenze in N/mm ²	Zugfestigkeit in N/mm ²	Dehnung A in %	Wärmeausdehnungs- koeffizient in 1/K
90	160	15	22,1*10 ⁻⁶

2.2 Industrielle Verzinkungsverfahren

Je nach Einsatzgebiet und Anforderung lassen sich Zinkbeschichtungen mit unterschiedlichen Verfahren herstellen [11]:

- Feuerverzinken (Stück- und Bandverzinken)
- Thermisches Spritzen mit Zink (Spritzverzinken)
- Galvanisches bzw. elektrolytisches Verzinken
- Metallische Überzüge mit Zinkstaub

Die Verzinkung bei Stahl-Aluminium Mischverbindungen dient als artfremde Zwischenschicht, die während des Schweißprozesses eine Reihe von Aufgaben erfüllen kann, wie z.B. dass sie die [7]:

- Intermetallische Phase verringert oder gar vermeidet,
- Unterschiede der Schmelztemperaturen ausgleicht,
- Unterschiede der Ausdehnungskoeffizienten ausgleicht.

Die Schicht verhindert den Sauerstoffzutritt zur Stahloberfläche, denn eine saubere, oxidfreie Oberfläche ist für die Benetzung notwendig. Durch die Wärmeeinbringung des Schweißprozesses wird das Zink verdampft und hinterlässt die aktivierte und oxidfreie Stahloberfläche.

Aufgrund dessen ist es notwendig, die verschiedenen Beschichtungsverfahren näher zu analysieren. Wie bereits oberhalb erläutert wurden bei den Versuchen drei ähnliche Stähle mit verschiedener Verzinkung verwendet:

- Tiefziehstahl DC01 mit APS verzinkter, lokaler Zinkschicht
- Tiefziehstahl DC04 mit elektrolytisch verzinkter Zinkschicht
- Tiefziehstahl DX54 mit feuerverzinkter Zinkschicht

2.2.1 Feuerverzinkung

Bei der Feuerverzinkung wird zwischen einem kontinuierlichen und diskontinuierlichen Verfahren unterschieden. Der kontinuierliche Prozess wird in Bandverzinkung, auch Sendzimirverfahren, und Drahtverzinkung unterteilt, der diskontinuierliche Prozess Stückverzinkung bzw. Rohrverzinkung. Die kontinuierliche Verzinkung wird demnach für Bandstahl, sogenannte Coils, bzw. Drähte verwendet, wohingegen das

diskontinuierliche Verzinken für abgelängte Profile und für Konstruktions- und Kleinteile angewendet wird. [25]

Abbildung 2-5 zeigt die verschiedenen Arten der Feuerverzinkung, die in der Industrie angewendet werden.



Abbildung 2-5: Arten der Feuerverzinkung [11]

Kontinuierlicher Beschichtungsprozess [26]

Bei jedem Verfahrensablauf der Feuerverzinkung ist eine Oberflächenvorbehandlung unbedingt notwendig. Ein wichtiger Vorbehandlungsschritt ist die Reinigung der Stahloberfläche von Kohlenstoffresten oder Rückständen von Beschichtungen und Schweißrückständen. Üblicherweise erfolgt diese Reinigung durch eine chemische und mechanische Behandlung. Nach dem Bürsten des Walzabriebs wird die Oberfläche noch gespült und getrocknet. Durch den Walzvorgang des zu verzinkenden Werkstoffes kommt es zu einer unerwünschten Stauchung (lange und feste Körner) und zu einer Verfestigung im Gefüge. Dieser Verfahrensschritt wirkt sich negativ auf Umformeigenschaften des Stahlblechs aus. Durch eine nachgeschaltete Glühbehandlung des Coils, kommt es zur Rekristallisation im Gefüge. Dadurch wird die Umformbarkeit deutlich verbessert. Dazu durchläuft das Coil kontinuierlich einen Zonenofen, welcher in eine Aufheiz-, Reduktions- und Haltezone und Kühlzone unterteilt wird. Wie in der Abbildung 2-6 ersichtlich wird das Coil in der ersten Zone so schnell wie möglich auf ca. 700°C erwärmt, rekristallisiert in der zweiten Zone bei ca. 800°C und wird im Anschluss auf die Zinkschmelzbadtemperatur von 460°C abgekühlt.

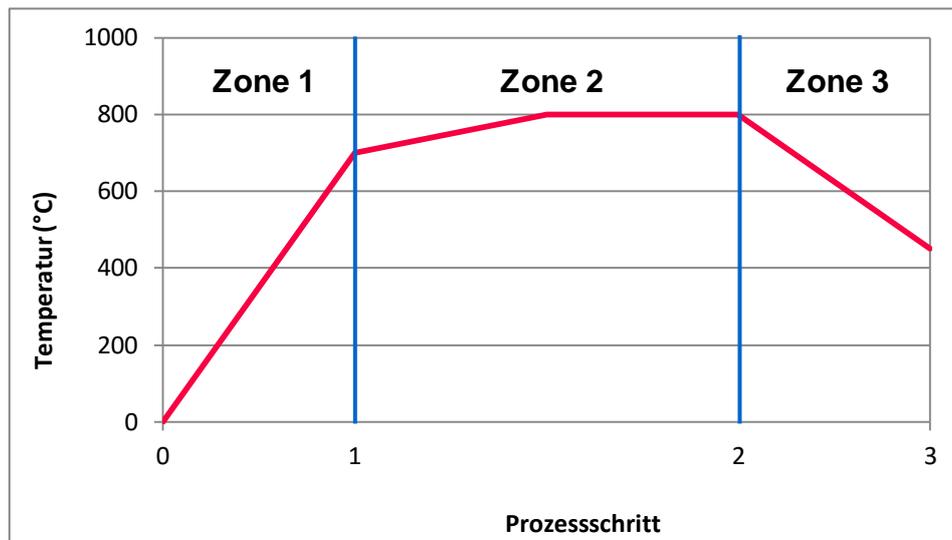


Abbildung 2-6: Temperaturdurchlauf bei der Glühbehandlung im Feuerverzinkungsprozess

Nach der Abkühlung wird das Coil direkt in das Zinkschmelzbad geleitet, wobei dies unter einer ständigen Schutzgasatmosphäre passiert. Das Zinkbad enthält eine ca. 460°C heiße Schmelze aus flüssigem Zink mit ca. 0,2 Gew. % Anteil an Aluminium. Durch diese Zugabe bildet sich an der Grenzschicht Stahl/Zink innerhalb von wenige zehntel Sekunden eine ca. 100 – 200 nm dicke Fe_2Al_5 Zwischenschicht. Diese Schicht verhindert temporär eine direkte chemische Reaktion des reinen Zinks mit der Stahloberfläche. Eine unerwünschte Verschlechterung der Zinkhaftung würde die Folge einer solchen Reaktion mit sich bringen. Der Aufbau und die Zusammensetzung der Beschichtung kann somit mit einer Eisen-Zink-Legierungsschicht am Stahluntergrund mit einer darüber liegenden Reinzinkschicht beschrieben werden (siehe Abbildung 2-7). Da die Zinkmenge nach dem Austritt aus dem Bad weit über der gewünschten Menge liegt, verteilen Abstreifdüsen den Zinküberzug gleichmäßig über das gesamte Coil. Mittels Schichtdickenmessung kann dann über den Düsenabstand, den Düsendruck, aber auch über die Bandgeschwindigkeit (bis zu 220 m/min) die gewünschte Schichtdicke eingestellt werden. Am Ende des Prozesses durchläuft das Stahlband eine Kühlstrecke, um wieder auf Raumtemperatur zu kommen.



Abbildung 2-7: Schichten nach dem Feuerverzinken [26]

Schichtdicken

Die üblichen Schichtdicken beim Feuerverzinken sind für das Band- bzw. für das Stückverzinken unterschiedlich. Die Zinküberzugstärke variiert ebenfalls mit der Materialstärke des zu verzinkendem Bauteils und auch nach dem Anwendungsbereich (z.B. Korrosionsschutzschichten). Tabelle 2-7 zeigt, dass mit dem Bandverzinken wesentlich dünnere Schichten wie beim Stückverzinken erzielt werden können.

Tabelle 2-7: Schichtdicken beim Feuerverzinken [11]

	Übliche Schichtdicke in μm
Bandverzinken	7 – 25
Stückverzinken	50 - 150

Anwendungsbeispiele

In der Regel wird die Feuerverzinkung für den Schutz vor Korrosion verwendet. Dazu zählen folgende Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der Stück- und Bandverzinkung [11], [25]:

- Hochbau (z.B.: Stahlkonstruktionen)
- Tiefbau (z.B.: Leitplanken)
- Energieversorgung (z.B.: Hochspannungsmasten)
- Fahrzeugbau (z.B.: Blech-Chassis)
- Bauelemente (z.B.: Schrauben)

2.2.2 Elektrolytische Verzinkung

Auch beim elektrolytischen Verzinken unterscheidet man zwischen dem Stückverzinken in Einzelbädern und dem Bandverzinken eines Coils in einem Durchlaufverfahren [11]. Das in dieser Masterarbeit verwendete Stahlblech DC04 wurde bei dieser Verzinkungsart ebenfalls kontinuierlich verzinkt. Beim elektrolytischen Verzinken spricht man oft auch vom galvanischen Verzinken.

Beschichtungsprozess

Wie auch beim Feuerverzinken, ist beim elektrolytischen Verzinken eine behandelte Oberfläche Voraussetzung für eine gut haftende und gleichmäßige Zinkschicht, welche man in der Regel durch einen mehrstufigen Reinigungsprozess wie Entfetten und Beizen erreicht. Bei diesem Beschichtungsprozess wird auf dem zu verzinkenden Werkstück mit Hilfe von Gleichstrom ein Zinküberzug abgeschieden. Dazu wird ein Coil in einen Zinkelektrolyten kontinuierlich eingetaucht und eine Spannung angelegt. Die Temperatur des Elektrolyten liegt dabei bei ca. 55°C. Zink kann sowohl aus alkalischen als auch aus neutralen und sauren Elektrolyten abgeschieden werden. Das Stahlband wird dabei in der Regel als Kathode, das Zink, mit einer sehr hohen Reinheit als Anode gepolt. Das Band wird von Stromrollen und der Tauchrolle zwischen Anodenplatten, die an den Anodenkasten montiert sind, geführt. Der Elektrolyt wird in den keilförmigen Zwischenraum, den Anode und Band bilden, gepumpt und strömt durch die Schwerkraft nach unten. Unter dem Einfluss der angelegten Gleichspannung (Schematischer Aufbau der elektrolytischen Bandverzinkung siehe Abbildung 2-8) wandern Zink-Ionen über den Elektrolyten zum Band und werden dort abgeschieden.

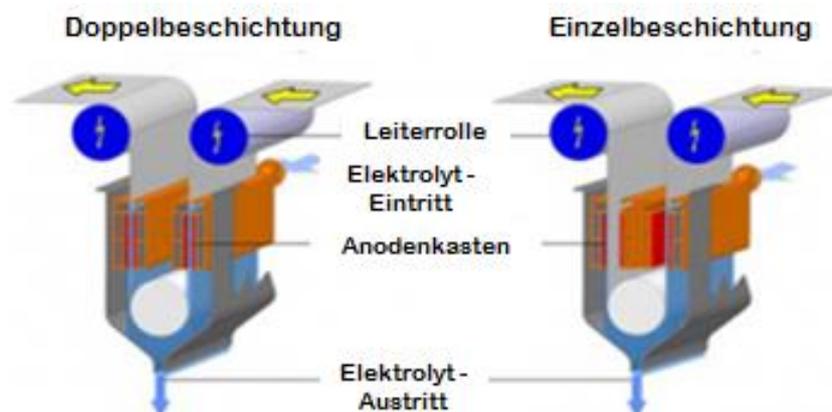


Abbildung 2-8: Schematischer Aufbau der elektrolytischen Bandverzinkung [27]

Als Nachbehandlung wird das Band gespült, mit Heißluft getrocknet und die Zinkschichtdicke gemessen. Der Überzug besteht aus einer nahezu 100%igen Reinzinkschicht. Lediglich an der Oberfläche bilden sich ca. 10 nm dünne Zinkoxidschichten aus. [11], [26]

Schichtdicken

Das Schichtdickenspektrum reicht beim elektrolytischen Bandverzinken typischerweise von 2,5 µm bis 10 µm Überzugsdicke. In Spezialfällen je nach Anwendung kann die Schichtdicke auch über 20 µm betragen. [26]

Anwendungsbeispiele

Elektrolytisch verzinktes Material eignet sich besonders gut für Fahrzeugaußenteile mit höchsten Oberflächenanforderungen sowie für diverse Gehäusekomponenten aus der Unterhaltungselektronik. Auch kleine Massenteile wie Schrauben, Muttern, Haken oder Ringe werden mit diesem Verfahren beschichtet. [11], [26]

2.2.3 Atmosphärisches Plasmaspritzen (APS)

Beim atmosphärischen Plasmaspritzen wird das Zinkpulver in geschmolzener Form auf das Substrat aufgebracht. Das Verfahren ist dem thermischen Spritzen zuzuordnen. Abbildung 2-9 zeigt eine mögliche, prozesstechnische Einteilung in der Industrie verwendeter Spritzverfahren.

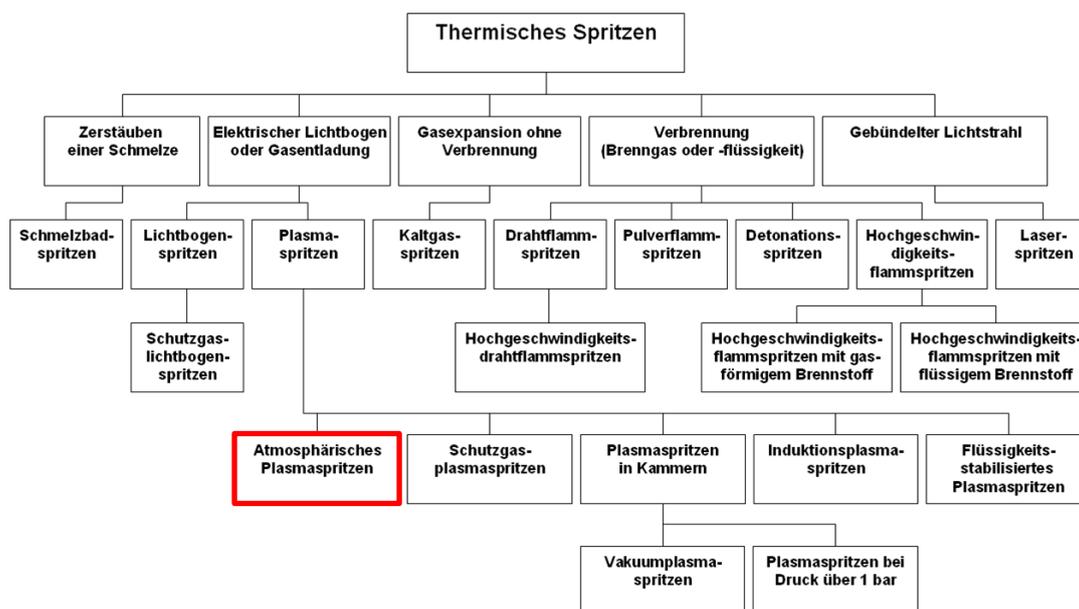


Abbildung 2-9: Einteilung der Spritzverfahren [28]

Beschichtungsprozess

Auch bei der Verzinkung mittels Plasmaverfahren muss am Substrat eine Vorbehandlung durchgeführt werden. Dazu wird der Stahl mit Industriealkohol (Isopropanol) gründlich gereinigt, um jegliche Verschmutzungen, wie Öle, Fette oder sonstige Verunreinigungen zu beseitigen. Vor dem Aufspritzen des Zinkpulvers wird die Stahloberfläche mit der Plasmaflamme gereinigt, man spricht von einer Plasmabehandlung (Aktivierung). Um die Haftung der Zinkschicht auf dem Substrat zu erhöhen, kann das Blech auf einer Heizplatte mit zwischenliegender Kupferplatte vorgewärmt werden. Durch diese Vorwärmung wird der Temperaturunterschied des Stahlsubstrats und der aufgeschmolzenen Zinkpartikel minimiert. Somit erstarren diese Partikel weniger schnell und können sich auf der Stahloberfläche besser verklammern, was eine homogenere Schicht mit sich bringt. In der Abbildung 2-10 ist die schematische Darstellung des thermischen Spritzens dargestellt. Am Substrat ist gut die nach außen hin abflachende Spritzschicht (Zinkschichtdicke) zu erkennen.

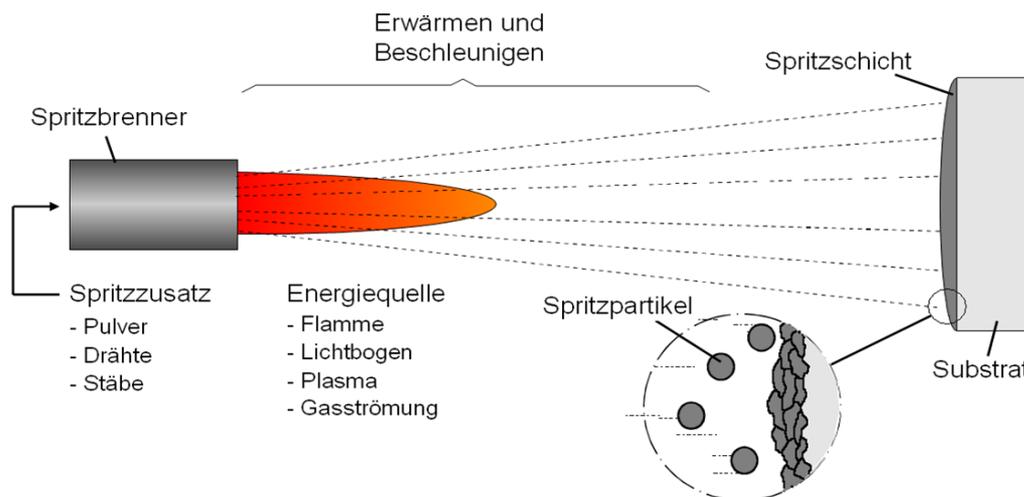


Abbildung 2-10: Schematische Darstellung des thermischen Spritzens [28]

Schichtdicken

Die Schichtdicke ist bei diesem Prozess stark variierbar. Mittels Fördermenge, Förderart, Vorschubgeschwindigkeit, Zusatzpulver und über die einstellbare Anzahl der Überfahrten vom Brenner über das Substrat lässt sich die Zinkschicht regulieren. Bei einer einzigen Überfahrt erreicht man je nach Korngröße eine Schichtdicke zwischen 10 und 30 μm . Als Maximum der Dicke wird in Literatur der Wert 100 μm angegeben [29].

Anwendungsbeispiele

Aufgrund der Verfahrensart wird APS-Verzinken oft für lokalen Korrosionsschutz verwendet. Des Weiteren kann eine APS-Schicht auch lokal als Haftvermittler, Pufferschicht bei Mischverbindungen oder Zusatzmaterial in der Fügezone dienen. Dementsprechend wird es auch immer mehr im Fahrzeugbau eingesetzt. Hervorragend eignet sich das Verfahren auch für komplexe drei-dimensionale Komponenten, wie im Kraftwerksbau, zum Beispiel beim Beschichten von Gasturbinenschaufeln. [29]–[31]

2.2.4 Vergleich der Zink-Beschichtungsverfahren

Tabelle 2-8 zeigt einen Vergleich der oben beschriebenen Verzinkungsverfahren in Bezug auf die Temperatur des Prozesses, dem Prinzip, der Vorbehandlung, der Zinkschichtzusammensetzung, dem Schichtaufbau und der in der Industrie üblichen Zinkschichtdicke.

Tabelle 2-8: Vergleich der Zink-Beschichtungsverfahren

	Feuerverzinkung	Elektrolytische Verzinkung	APS-Verzinkung
Prozess-temperatur	~460°C	~55°C	~200°C
Prinzip	Band durchläuft flüssiges Zink	Zinkabscheidung durch elektr. Strom in Elektrolyt	Aufgeschmolzenes Zinkpulver wird aufgespritzt
Vor-behandlung	Chemisch, mechanisch, Glühbehandlung	Mehrstufiger Reinigungsprozess	Reinigungsprozess, Vorwärmung, Aktivierung
Schicht-zusammen-setzung	99,8% Zink 0,2% Aluminium	100% Zink	
Schichtaufbau	Fe ₂ Al ₅ – Phase Reine Zn - Phase	Keine Legierungsbildung mit dem Stahl	
Schichtdicke	7 – 25 µm	2,5 – 10 µm	10 – 30 µm (bei 1 Überfahrt)

2.3 Herausforderungen beim thermischen Fügen von artfremden Werkstoffen

Artfremde Werkstoffe verhalten sich beim thermischen Fügen anders als artgleiche Verbindungen.

Durch das thermische Fügen von Stahl und Aluminium ergeben sich folgende Herausforderungen [7]:

- Unterschiedliche Schmelztemperaturen von Aluminium mit 660°C und Stahl mit 1539°C
- Ausbildung einer intermetallischen Phasen (IMP)
- Unterschiedliche Schwindung während der Abkühlung aus dem Schmelzbe-
reich
- Aufbau von Spannungsfeldern aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnun-
gen
- Vorbehandlung bzw. Handling der Aluminiumoxidschicht

In den folgenden Kapiteln 2.3.1 bis 2.3.4 werden die Herausforderungen beim ther-
mischen Schweißen näher betrachtet. Speziell auf die Themen Schweißbarkeit ei-
nes Werkstoffes, die intermetallische Phasenbildung, die Porenbildung im Schweiß-
gut und die Auswirkung unterschiedlicher Materialeigenschaften wird näher einge-
gangen.

2.3.1 Schweißbarkeit

Im Wesentlichen wird die Schweißbarkeit von den Werkstoffeigenschaften der Mate-
rialien, vom Fertigungsverfahren und im geringen Maß auch von der Konstruktion
beeinflusst. [5], [32]

Die Schweißbarkeit von Stählen hängt ab von [33]:

- Chemische Zusammensetzung (Legierung, Kohlenstoffgehalt, Härtingsnei-
gung, Schmelzverhalten,...)
- Metallurgische Eigenschaften (Korngröße, Gefüge, Einschlüsse, Seigerung,
Festigkeit, Kalt- und Warmverformung,...)
- Physikalische Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Ausdehnung, Erstarrung,
Schmelzpunkt, E-Modul,...)

Nachdem nicht nur der Kohlenstoff, sondern auch andere Elemente die Schweißeignung beeinflussen, wird dieser Einfluss der chemischen Zusammensetzung zum Beispiel mit der Berechnung des Kohlenstoffäquivalents berücksichtigt:

$$C_{\text{äqu}} = C + \frac{1}{6} Mn + \frac{1}{5} (Cr + Mo + V) + \frac{1}{15} (Ni + Cu)$$

Formel 2-1: Kohlenstoffäquivalent [34]

Dieses Kohlenstoffäquivalent basiert in erster Linie auf Härtemessungen. Daraus wurde abgeleitet, dass Legierungselemente, die einen Beitrag zur Aufhärtung leisten, in gleichem Maß die Kaltrissneigung fördern. Für die Schweißeignung gilt somit, dass diese besser ist, je niedriger der Wert des Kohlenstoffäquivalents ist. Im Allgemeinen ist der Werkstoff bis zu einem $C_{\text{äqu}} = 0,45$ schweißbar, die Aufhärtung ist somit noch gering.

2.3.2 Intermetallische Phasenbildung

Beim thermischen Fügen von Stahl mit Aluminium arbeitet man mit hohen Temperaturen, wodurch in der Fügezone unerwünschte intermetallische Phasen (IMP) entstehen. Grund dafür ist die begrenzte Löslichkeit von Eisen und Aluminium bei Raumtemperatur. Begründet durch den chemischen Aufbau hat die IMP eine große Härte und eine äußerst geringe Zähigkeit. Die Entstehung der IMP ist abhängig von der eingebrachten Wärmemenge. Je größer die eingebrachte Wärmemenge, desto dicker die intermetallische Phase und umso schlechter die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Verbindung. Daher streben alle wärmeintensiven Fügeverfahren nach geringstem Wärmeeintrag, um die Ausbildung der IMP so weit wie möglich einzudämmen. Die Ausbildung der intermetallischen Phase ist ein diffusionsgesteuerter Prozess. [6]

Abbildung 2-11 zeigt die Bildung der IMP auf der aluminiumseitigen Fügezone (Stahlblech unten, Aluminiumblech oben), in folgenden Ausprägungen [6]:

(a): Bildung lokal übersättigter Lösungen im festen Zustand, in der Umgebung von Fehlstellen

(b): Keimbildung der neuen Phase an Fehlstellen

(c): Horizontales Keimwachstum der intermetallischen Phase, entlang der Verbindungsebene zwischen Stahl und Aluminium im Aluminium

(d): Keimbildung der zweiten intermetallischen Phase im Stahl, gleichzeitig weiteres Wachstum der ersten IMP

(e) und (f): Wachstum einer zweiten IMP im Stahl

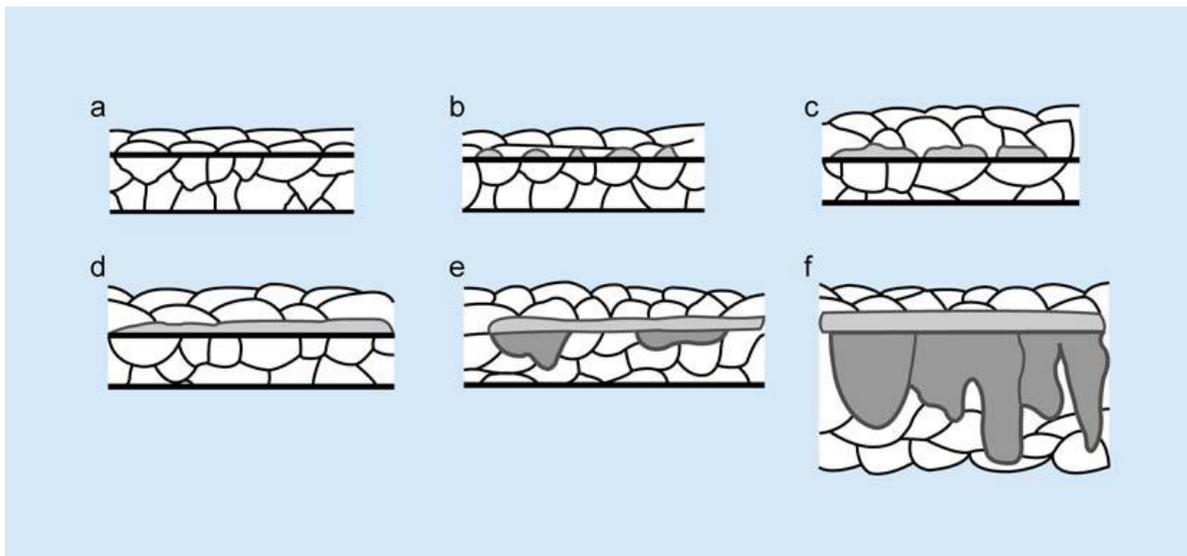


Abbildung 2-11: Bildung der intermetallischen Phase [6]

Die Illustrationen a bis d beschreiben das Wachstum der IMP auf der aluminiumseitigen Fügezone, verursacht durch die Diffusion von Eisen in Aluminium. Dabei befinden sich beide Materialien in festem Zustand ($T < 660\text{ °C}$). Die Illustrationen e und f zeigen das Wachstum der IMP auf der Stahlseite. Zu diesem Zeitpunkt ist Aluminium, laut [6], flüssig. Der Stahl hingegen befindet sich in festem Zustand ($T > 660\text{ °C}$). Für diese zweite Phase typisch ist das zungenförmige Wachstum. [6]

In Abbildung 2-11 entsprechen die Illustrationen a bis d der erste Phase (FeAl_3). Die Illustrationen e und f präsentieren die zweite Phase (Fe_2Al_5). Aufgrund des zungenförmigen Aufbaus und der deutlich größeren Härtewerte wirkt sich die zweite Phase schlechter auf die Gebrauchseigenschaften der Verbindung aus, als die erste Phase. Problematisch sind nicht nur die Vorgänge im atomaren Bereich. Zu einigen Problemen führt auch der große Unterschied der physikalischen und chemischen Eigenschaften. So bewirken beispielsweise unterschiedlich lineare Wärmeausdehnungskoeffizienten ein Spannungsfeld im Fügebereich. [6]

Folgt man dem Modell von Ryabov [35], findet sich aluminiumseitig bei Raumtemperatur die erste Phase (a bis d) aus Abbildung 2-11 und stahlseitig die zweite Phase (e und f) aus Abbildung 2-11. Diese Tatsache deckt sich mit den Ergebnissen des hier beschriebenen Versuchsprogramms. Tabelle 2-9 zeigt die theoretisch möglichen intermetallischen Phasen bei der Verbindung von Stahl mit Aluminium. [6]

Tabelle 2-9: Verbindungen der intermetallischen Phasen [6]

Verbindung	Al-Gehalt [at.-%]	Aufbau	Mikrohärte	Dichte ρ (g/cm ³)
Fe ₃ Al (β'')	25	geordnete krz-Struktur	250 - 350	6,67
FeAl (β')	50	geordnete krz-Struktur	400 - 520	5,37
Fe ₂ Al ₇ (ϵ)	63	komplexe krz-Struktur	650 - 680	nicht bekannt
FeAl ₂ (ζ)	66 - 67	komplexe rhombohedrale Struktur	1000 – 1050*	4,36
Fe ₂ Al ₅ (η)	69,7 - 73,2	krz-orthorhombische Struktur	1000 – 1100*	4,11
FeAl ₃ (θ)	74 - 76	sehr komplexe monokline krz-Struktur	820 - 980	3,95

* ermittelt mit HV0,005

In Tabelle 2-9 entsprechen die FeAl₃-Phase der aluminiumseitigen Phase und die Fe₂Al₅-Phase der stahlseitigen Phase. Verglichen mit anderen IMP zeigt sich, dass die stahlseitige Phase eine höhere Sprödigkeit aufweist. [6]

2.3.3 Porenbildung im Schweißgut

Bei Schweißverbindungen mit Aluminiumwerkstoffen sind Poren bzw. Gaseinschlüsse im Schweißgut die in der Praxis am häufigsten auftretenden Fehler. Besonders der Einfluss von Feuchte ist sehr kritisch anzusehen. Es können bereits durch geringe Mengen von Feuchtigkeit im Schutzgas oder auch durch Verunreinigungen in der naheliegenden Umgebungsluft Poren im Schweißgut entstehen. Aufgrund der hohen Temperaturen in der Fügezone beim Schweißprozess, entsteht atomarer Wasserstoff, der sich in der Aluminiumschmelze löst. Die Eigenschaft des Aluminiums, dass die Wasserstofflöslichkeit mit sinkender Temperatur abnimmt und das Erstarrungsintervall von Aluminiumlegierungen sehr klein sind, führt dazu, dass der Wasserstoff nicht schnell genug aus der Schmelze ausgasen kann und dies zur Entstehung von Gaseinschlüssen führt. Flüssiges Aluminium hat eine etwa 20-mal höhere Wasserstofflöslichkeit als erstarrtes Aluminium. Diese Eigenschaft ist in Abbildung 2-12 im

Bereich der Schmelztemperatur von Aluminium bei 660 °C ersichtlich. Es zeigt den großen Löslichkeitssprung bei der Erstarrung und dass der Wasserstoff im Aluminium bei zu rascher Abkühlung leicht eingeschlossen werden kann und somit zu Poren führt. [8], [36]

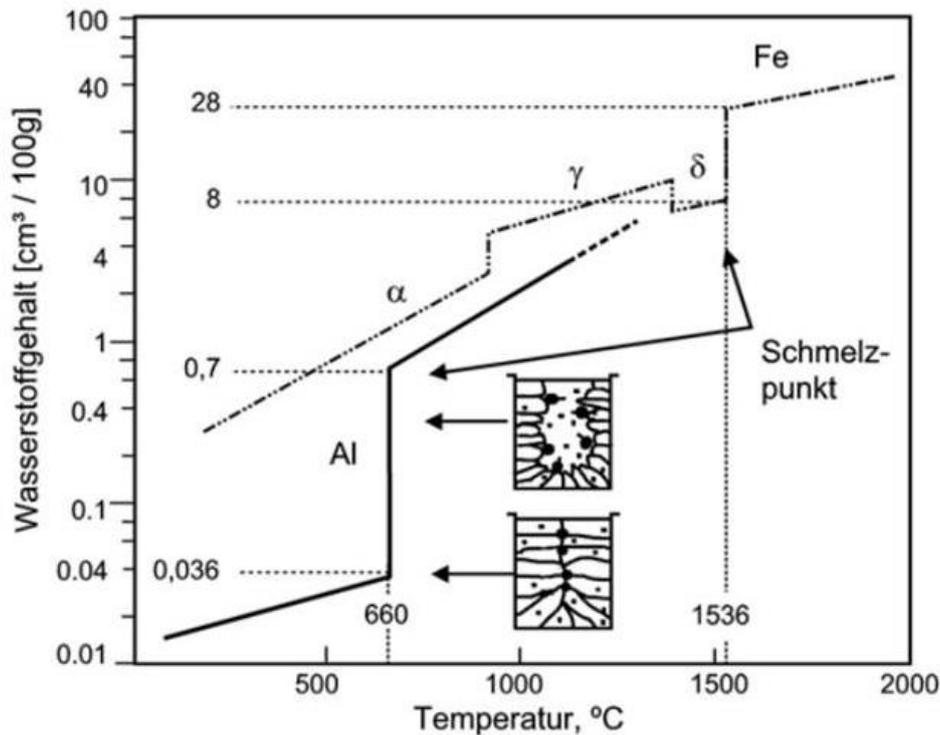


Abbildung 2-12: Wasserstofflöslichkeit von Aluminium und Stahl [8]

In erster Linie sind folgende 5 Faktoren die Hauptursache für die Entstehung von Poren oder auch Bindefehlern [8]:

- Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Aluminium
- Die gute Wasserstofflöslichkeit im flüssigen Zustand
- Der große Löslichkeitssprung bei der Erstarrung
- Die geringe Löslichkeit im festen Zustand
- Kein oder ein nur kleiner Erstarrungsbereich

Aus diesem Grund muss sichergestellt werden, dass in der gesamten Gasversorgungskette so wenig Feuchtigkeit wie möglich in das Prozessgas eindringen kann.

2.3.4 Unterschiedliche Materialeigenschaften

Beim Schweißen zweier Bleche mit unterschiedlichen Materialeigenschaften, besonders bei einer Nichtübereinstimmung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten, wirkt sich dies negativ auf das Schweißergebnis aus. Es wölbt sich die fertig geschweißte Überlappverbindung teilweise stark, nachdem die Probe aus der Einspannung gelöst wird. Folglich wird ein unerwünschtes Spannungsfeld aufgebaut. Abbildung 2-13 zeigt diese Wölbung anhand einer Stahl-Aluminium Schweißverbindung.

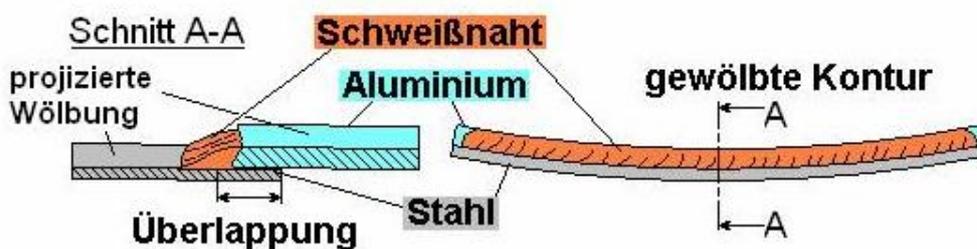


Abbildung 2-13: Probenwölbung durch unterschiedliche Materialeigenschaften [37]

2.4 Schweißverfahren

Für das erfolgreiche Verbinden der beiden Grundwerkstoffe Stahl und Aluminium wurde ein dafür speziell entwickeltes Schweißverfahren gewählt. 2004 wurde von der Fa. Fronius International GmbH ein Schweißverfahren, basierend auf dem Prozess des Metallschutzgasschweißens (MSG), entwickelt, um das Fügen von artfremden Werkstoffkombinationen wie Stahl und Aluminium zu beherrschen. Durch eine reversierende Drahtbewegung wird der Wärmeeintrag stark reduziert, weshalb der Prozess mit „Cold Metal Transfer“ (CMT), was so viel heißt wie „kalter Werkstoffübergang“, bezeichnet wird. [22]

2.4.1 CMT-Schweißen

Der CMT-Prozess ist ein modifiziertes MIG-Verfahren und verursacht einen äußerst geringen Wärmeeintrag. Der positive Effekt daraus ist eine Minimierung der Dicke der unerwünschten intermetallischen Phasen bei Stahl-Aluminium Verbindungen. Der Unterschied zum MIG-Verfahren, lässt sich mit einem gesteuerten und nahezu stromlosen Werkstoffübergang im MSG Kurzlichtbogen beschreiben. Der durch den

Schweißbrenner zugeführte Zusatzwerkstoff schmilzt zusammen mit dem Aluminium-Grundwerkstoff auf, wobei die Schmelze den verzinkten Stahlwerkstoff benetzt. Der Stahl wird somit bei diesem Vorgang aufgrund des geringen Wärmeeintrags nicht aufgeschmolzen und verschmolzen, sondern mit der Schmelze gelötet. Der Tropfen fällt nicht durch einen Stromstoß, wie beim herkömmlichen Impulslichtbogen, sondern wird durch eine definierte Rückwärtsbewegung des Schweißdrahtes kontrolliert abgelöst. Sobald die Stromquelle einen Kurzschluss erkennt, startet diese Rückwärtsbewegung bei gleichzeitig abgesenktem Schweißstrom. Im Anschluss findet eine Bewegungsumkehr statt und der Schweißdraht läuft wieder vorwärts. Der soeben beschriebene Zyklus beginnt von neuem, mit hoher Frequenz (bis zu 120 Hz) bei äußerster Präzision, was die Grundvoraussetzung für einen absolut kontrollierten Werkstoffübergang ist. Ein hochdynamischer Drahtantrieb, direkt am Schweißbrenner, macht diesen Ablauf möglich. Für die notwendige Entkopplung vom Haupt-Drahtantrieb sorgt ein Drahtpuffer. [6], [22]

Dieses Prozessprinzip erklärt die folgende Abbildung 2-14.

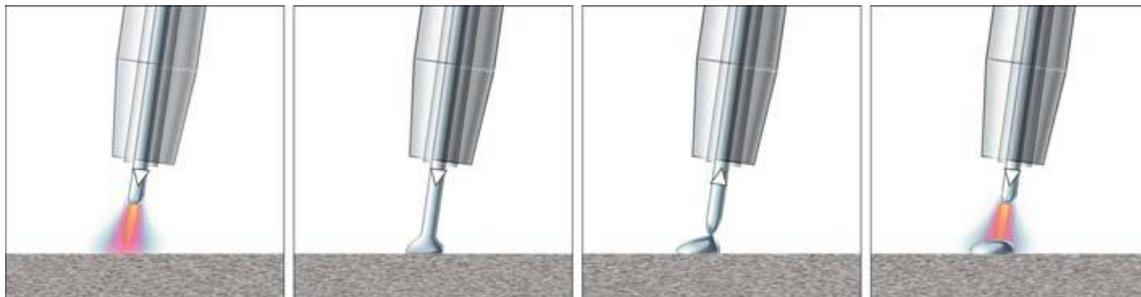


Abbildung 2-14: Tropfenübergang beim CMT-Prozess [38]

Vorteile [38]

Dünn- und Dünnstbleche ($> 0,3$ mm Blechdicke) lassen sich aufgrund der geringen Wärmeeinbringung hervorragend fügen. Die Erfassung und Regelung der Lichtbogenlänge erfolgt „mechanisch“ und nicht wie bei herkömmlichen MIG-Prozessen „elektrisch“ über Spannungsmessung. Der Lichtbogen ist dadurch äußerst stabil, denn der Prozess ist gegen Einflüsse durch die Werkstückoberfläche oder Änderungen der Schweißgeschwindigkeit, die eine Änderung der Spannung und damit eine Änderung der Lichtbogenlänge verursachen, unempfindlich.

Die Eigenschaft nahezu spritzerfrei zu schweißen und zu lüten ist ein weiterer massiver Vorteil des CMT-Prozesses.

Das Verfahren ermöglicht zusätzlich noch eine sehr gute Spaltüberbrückbarkeit, sowie eine höhere Schweiß- bzw. Lötgeschwindigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren.

Zusammenfassend sind folgend die wichtigsten Vorteile des CMT-Prozesses aufgelistet:

- Geringe Wärmeeinbringung
- Geringe Aufmischung
- Verschiedene Werkstoffpaarungen
- Spritzerfrei
- Dünnblechschweißungen möglich
- Automatisierbar
- Emissionsärmer als MIG-Verfahren

Anwendungen [38]

Schweißverbindungen von Dünn- und Dünnstblechen eignen sich hervorragend zum Fügen mittels CMT-Prozess. Vor allem bei Aluminiumwerkstoffen sind bei Dicken bis zu 3 mm und bei Stahlwerkstoffen bis zu 2 mm die enormen Vorteile zu erkennen. Beim Fügen von elektrolytisch- bzw. feuerverzinkten Blechen bietet sich dieses Verfahren, aufgrund der fast gegebenen Spritzerfreiheit und der Möglichkeit die Schweiß- bzw. Lötgeschwindigkeit höher zu halten, optimal an.

Einsatz bei Aluminiumwerkstoffen [38]

Bei der Auswahl des Schutzgases sollte Reinargon mit einer Durchflussmenge von 12 l/min zum Einsatz kommen und als Zusatzwerkstoffe sollen in der Regel Aluminium-Silizium- bzw. Aluminium-Magnesium-Legierungen verwendet werden. Der Durchmesser der Drahtqualitäten liegt bei 1,2 mm. Auf jeden Fall sollte eine grobe Reinigung des Aluminiumwerkstoffes mit einem herkömmlichen Putzpapier zum Entfernen von grobem Dreck (Fettrückstände, Staub, ...) erfolgen. Von großem Vorteil ist auch noch eine weitere Reinigung mittels Alkohol bzw. Aceton. So verhindert man einerseits eine verstärkte Korrosion durch eventuelle Verschmutzungen des Blechs und eine Porenbildung in der Naht.

2.5 Einführung in die statistische Versuchsplanung – Design of Experiments

Design of Experiments (DoE) wird eine Methodik zur Planung und statistischen Auswertung von Versuchen bezeichnet. Das Ziel der Methodik ist, dass man mit geringem zeitlichen und versuchstechnischen Aufwand möglichst viele Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Parametern erkennt. Dabei werden diese Wechselwirkungen über Zusammenhänge zwischen Eingabe- und Ausgabegrößen ermittelt (Abbildung 2-15).

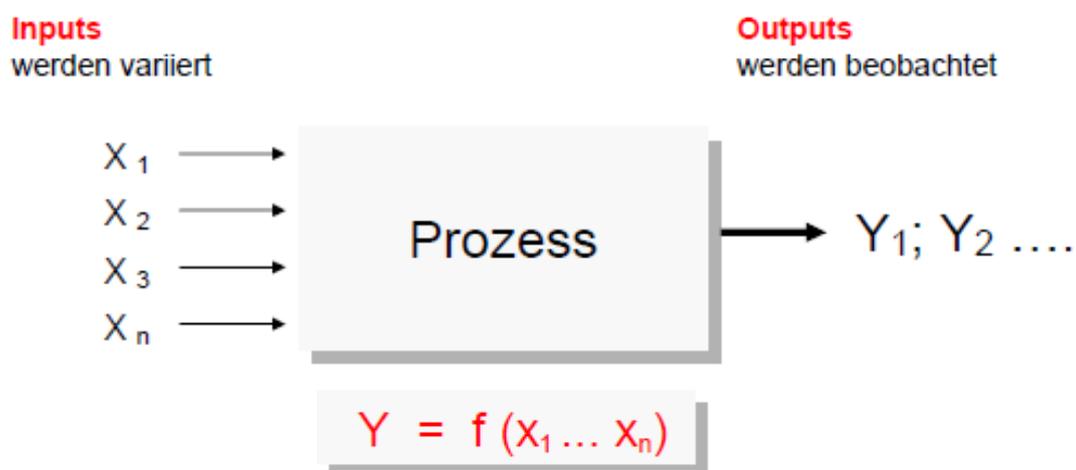


Abbildung 2-15: Prozesskette der DoE [39]

Die Anzahl der Einzelversuche sollte dabei möglichst gering, jedoch ausreichend sein, dass relevante Unterschiede zwischen den Parametern erkannt werden. Somit ist die Eingrenzung des Versuchsumfanges ein Hauptziel bei der DoE Analyse.

Als Output werden eine oder mehrere Zielgrößen gewählt. Dazu können mechanische oder physikalische Kenngrößen oder Eigenschaften der Schweißzone herangezogen werden. Eine quantitative Auswertung dieser Output-Größen ist Pflicht. Durch computergestützte, statistische Auswertung kann nach Durchführung der DoE auf optimale Eingangsparameter rückgeschlossen werden. [39]

Design of Experiments

Eine genaue Betrachtung zeigt, dass die Vorgehensweise mittels statistischer Versuchsplanung nur Vorteile mit sich bringt. Man erhält aufgrund der systematischen Beobachtung mit weniger Einzelversuchen mehr Information. Ein weiterer Vorteil liegt in der Ausgewogenheit des Versuchsplans, das bedeutet, dass keine Kombina-

tion der Faktoren eine größere Bedeutung als die anderen hat. Jedes Ergebnis wird mehrfach genutzt und daraus resultiert die Einsparung des Mehraufwands. Am Beginn der Versuche muss bereits festgelegt werden, was untersucht werden soll, weil die Faktoren gleichzeitig verändert werden. Dies erzwingt eine systematische Vorgehensweise und vermeidet ein planloses Probieren. Ein empirisches Modell, das den Zusammenhang zwischen den untersuchten Faktoren und Zielgrößen quantitativ beschreibt, ist das Ergebnis der DoE und der anschließenden Auswertung. [40]

Die gesamte Durchführung der Versuchsplanung wird von einem statistischen Programm (z.B. Minitab) unterstützt. Es werden die Inputs definiert, eine Versuchsmatrix (Grenzen mit Minima und Maxima) aufgespannt, die Zielgröße(n) werden bestimmt und das Programm gibt die Anzahl der Versuche und auch die Versuchsreihenfolge vor. Nach Auswertung der quantitativen Werte der Zielgrößen (z.B. bei Zugversuchen die Zugfestigkeitswerte) und anschließender Eingabe ins Programm, werden die Ergebnisse von diesem ausgewertet und dargestellt. Es können dann Rückschlüsse auf die einzelnen Parameter und deren Wechselwirkungen zueinander statistisch ermittelt werden. Anhand von Wechselwirkungsdiagrammen (siehe Abbildung 2-16) kann man ablesen, wie stark ein Parameter die Zielgröße beeinflusst.

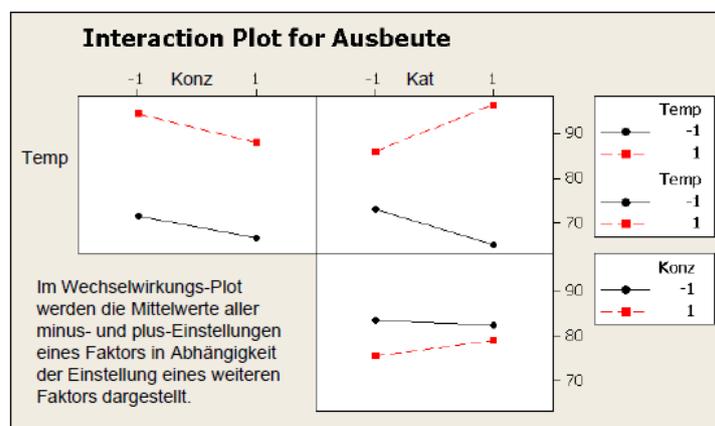


Abbildung 2-16: Wechselwirkungsdiagramm einer chemischen Reaktion [39]

Das Optimum der einzelnen Parameter, wobei die Wechselwirkungen schon mitberücksichtigt wurden, kann bei Minitab zum Beispiel durch ein Höhenliniendiagramm „Contour Plot“ in zweidimensionaler Ansicht oder durch ein Oberflächenschaubild „Surface Plot“ dreidimensional, wie in Abbildung 2-17 dargestellt, gezeigt werden.

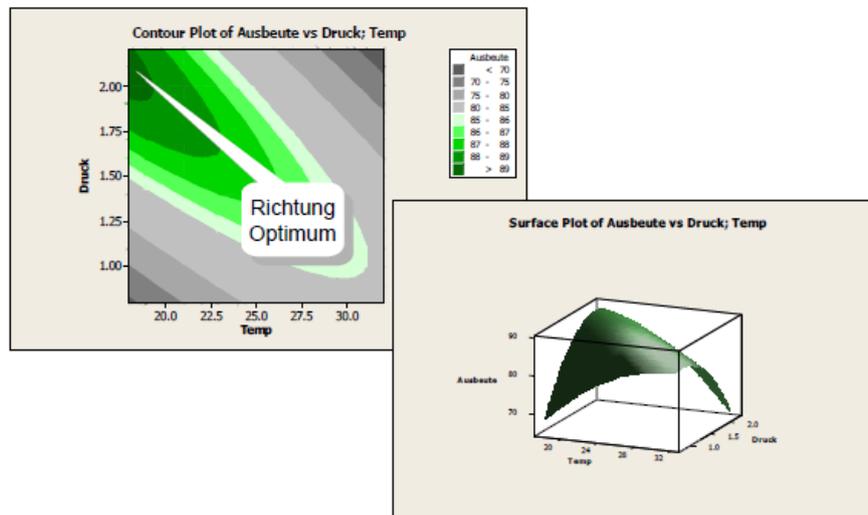


Abbildung 2-17: Konturdiagramm und Oberflächenschaubild einer chemischen Reaktion [39]

One-factor-at-a-time

Um die Vorteile der statistischen Versuchsplanung zu erkennen, wird sie mit der Standardversuchsmethode One-factor-at-a-time (OFAT) verglichen. Bei dieser wird immer nur ein einziger Faktor verändert und das resultierende Ergebnis beobachtet. Der Faktor des besseren Ergebnisses bleibt eingestellt und der nächste Faktor wird untersucht. Der Aufwand wird somit für jeden weiteren Faktor schnell sehr groß. Ein zusätzlicher Nachteil ist, dass aus diesen Einzelversuchen keine Einzelwirkungen und auch keine Zusammenhänge, man spricht auch von Wechselwirkungen, zwischen den einzelnen Faktoren erkennbar sind. [39]

3 Schweißversuchsplanung

3.1 Experimenteller Ablauf

Um die Ziele der Masterarbeit zu erreichen, wurde ein experimenteller Ablaufplan für die Schweißversuche aufgestellt. Dieser startete mit einer Vorversuchsreihe, in der zum einen Teil APS-verzinkte und zum anderen Teil elektrolytisch verzinkte Stahlbleche mit dem Aluminiumblech verschweißt und wurden. Die im Anschluss aus der DoE erstellte Hauptversuchsreihe wurde nur mehr mit elektrolytisch verzinkten Blechen fortgesetzt. Für eine Bestätigung der Ergebnisse dieser Versuchsreihe wurde der Ablaufplan zuerst um eine und dann um eine zweite Referenzversuchsreihe erweitert. Erst nach Ende einer zweiten Hauptversuchsreihe, in welcher die Parameter auf rein APS-verzinkte Stahlbleche übertragen wurde, wurden diese Ergebnisse beurteilt und mit den Zielen verglichen. Die Vorversuchsreihe, sowie die erste Hauptversuchsreihe wurde im Schweißlabor an der TU Graz geschweißt. Für die erste Referenzversuchsreihe wurde die Schweißwerkstatt der Fa. Fronius International GmbH verwendet. Alle weiteren Versuchsreihen wurden bei der Fa. INOCON Technologie GmbH abgewickelt. Die Abbildung 3-1 zeigt die Abfolge des gesamten experimentellen Ablaufs.

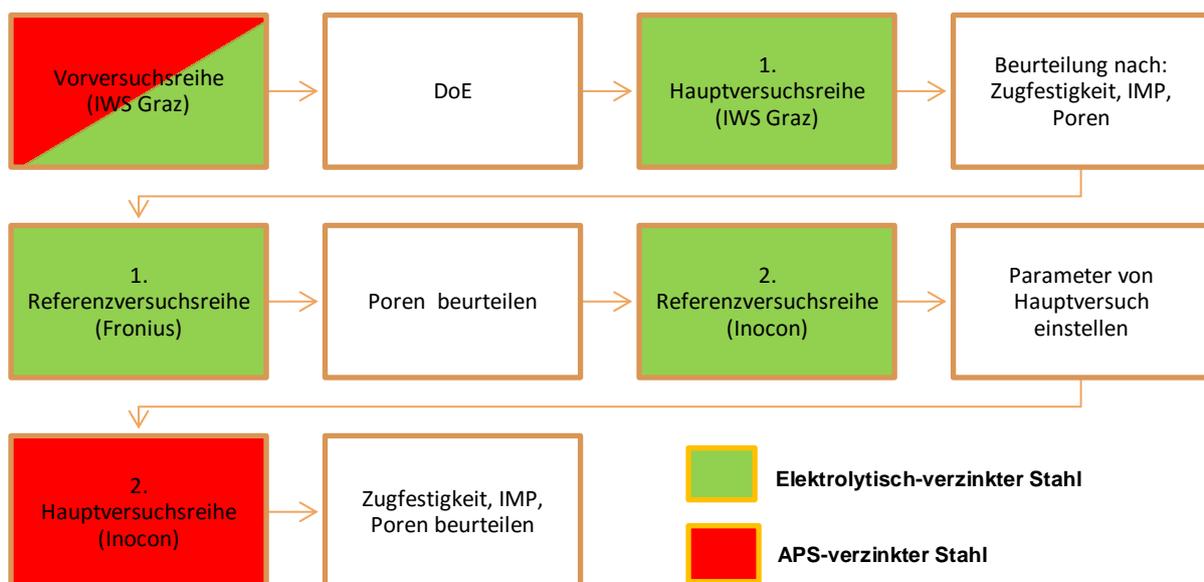


Abbildung 3-1: Experimenteller Ablauf

3.2 Versuchsdaten

3.2.1 Blechgeometrie und Blechvorbereitung

Sowohl die Stahl- als auch die Aluminiumbleche wurden jeweils aus einem großen Blech (ca. 1 m²) mittels einer Schlagschere der Fa. INOCON Technologie GmbH auf die gewünschte Geometrie abgelängt. Die verwendeten Bleche wurden von den Firmen FRANKSTAHL Rohr- und Stahlhandelsgesellschaft m.b.H. und der voestalpine AG zugekauft. Die Geometrie der Vorversuchsbleche wurde bei beiden Werkstoffen mit 200 mm Länge, 100 mm Breite und einer Dicke von 1,5 mm gewählt. Die Geometrie der Bleche von den Haupt- bzw. Referenzversuchsreihen betrug hingegen in der Länge um 50 mm mehr, also 250 x 100 x 1,5 mm (siehe Abbildung 3-2). Diese Änderung ergab sich aus der besseren Aufteilung der Großblechlängen mit weniger Verschnitt.

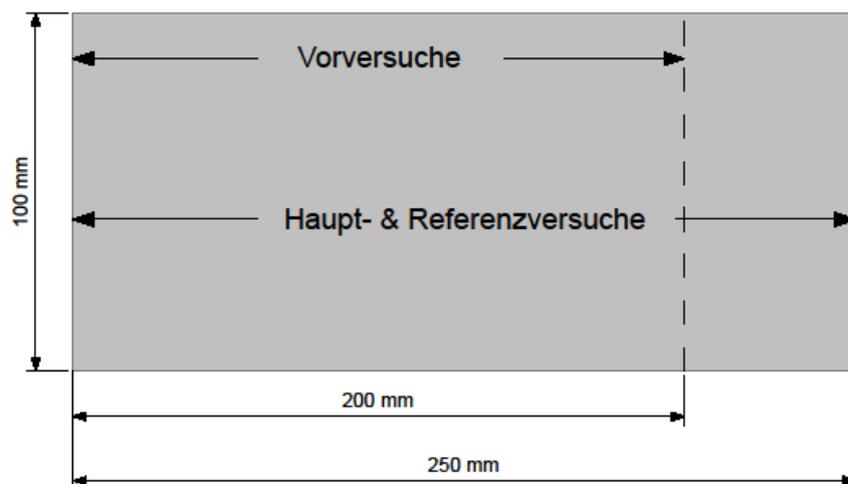


Abbildung 3-2: Probengeometrie der Vor-, Haupt- und Referenzversuchsreihe

Durch das Ablängen mittels Schlagschere entstand auf der Unterseite der Schneidekante ein Grat, der von jedem Blech entfernt werden musste. Um die Bleche von diversen Schmutzpartikeln, Ölen oder Fetten zu reinigen, wurden diese vor dem Schweißen mit Aceton gereinigt.

3.2.2 Spannsituation

Bei den Versuchsreihen an der TU Graz wurde das Stahlblech (in der Abbildung 3-3 mit (A) markiert) zuerst auf den Schweißstisch (B) gelegt. Als Unterlage für die Bleche

konnte, siehe Abbildung 3-4. Nach dem Platzieren des Stahlbleches wurde das Aluminiumblech ohne direkte Unterlage überlappend auf das Stahlblech aufgelegt. Durch das Niederspannen mit einem Spannblech und einer Schraubzwinge war die Positionierung der Bleche zentral gesichert.



Abbildung 3-4: Spannsituation der Versuche bei der Fa. INOCON Technologie GmbH

3.2.3 Brennerstellung und Stick-Out

Der Brenner wurde unter einem Winkel von ca. 10° zur Schweißrichtung stechend angestellt und zusätzlich um ca. 6° zur Aluminiumkante geneigt (Position PB). Wie in der Abbildung 3-5 ersichtlich, wurde die Spitze des AlSi5-Zusatzdrahtes dabei genau zur Aluminiumblechkante positioniert. Bei einem Durchmesser des Zusatzdrahtes von 1,2 mm ist somit der Offset genau 0,6 mm in Richtung des Stahlbleches, siehe Kapitel 3.2.4. Nur mit dieser Einstellung ist gewährleistet, dass einerseits genügend Energieeinbringung für das Aluminiumblech vorhanden ist und dadurch aufgeschmolzen wird und andererseits die Oberflächentemperatur des Stahlbleches möglichst gering gehalten wird. Abweichend eingestellte Brennerpositionen zeigten bei den Schweißversuchen einen instabilen Lichtbogen und eine ungenügende Anbindung der Schweißnaht. Die Abbildung 3-5 zeigt auch die Winkeleinstellung des Brenners für den Prozess.

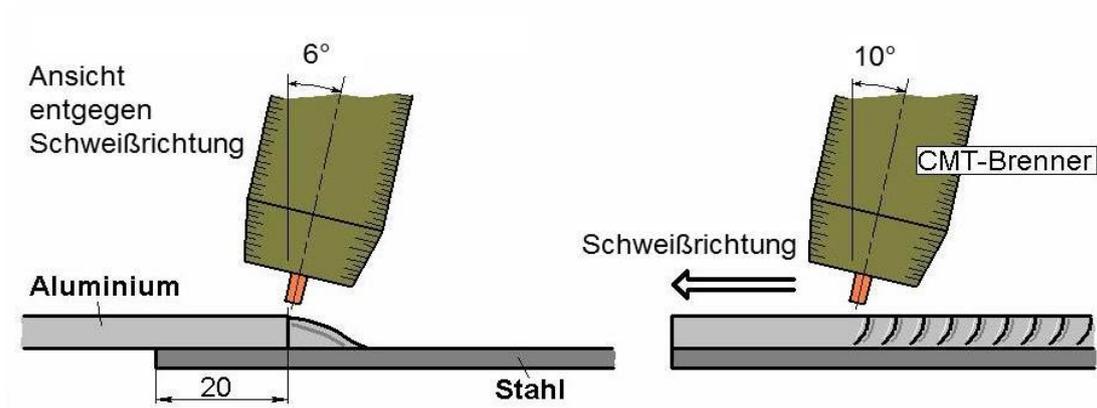


Abbildung 3-5: Brennerstellung des CMT-Brenners während des Prozesses [37]

Der Stick-Out, also der Abstand zwischen dem Kontaktrohr und dem Lichtbogen, betrug bei allen Versuchen 12 mm [22].

3.2.4 Offset

Der Offset beschreibt den Abstand der Zusatzwerkstoffspitze bis zum Beginn der Überlappung vom Aluminium auf dem Stahlblech. Der Wert 0 wurde an der Stahloberfläche bei der Aluminiumunterkante definiert. Die nachstehende Abbildung 3-6 zeigt die Einstellung für einen positiven bzw. negativen Offset.

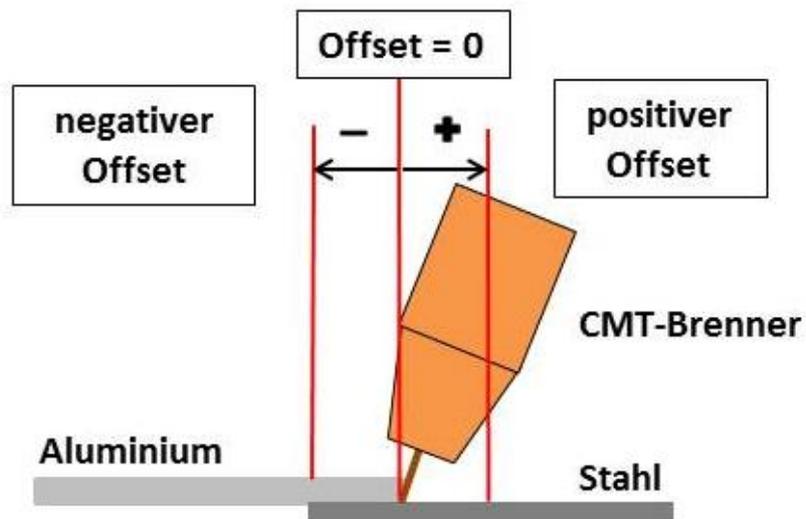


Abbildung 3-6: Offsetklärung CMT-Brenner

3.2.5 Schutzgaseinstellung

Das für den CMT-Prozess verwendete Schutzgas war das inerte Gas Argon 4.8 mit mindestens 99,998 % Reinheit (siehe Produktdatenblatt im Anhang). Am Manometer des Druckminderers wurde dabei eine konstante Durchflussmenge von 15 l/min eingestellt. Dieser Einstellungswert wurde zuerst aus der Literatur recherchiert [22]. Durch Übereinstimmung mit Erfahrungswerten der TU GRAZ sowie von Spezialisten der Fa. Fronius International GmbH wurde dieser für diesen Schweißvorgang mit jenen Grund- und Zusatzwerkstoffen bestätigt.

3.2.6 Schweißquelle

Das verwendete Schweißgerät war sowohl am IWS der TU GRAZ, bei der Fa. Fronius International GmbH als auch bei der Fa. INOCON Technologie GmbH eine voll digitalisierte und mikroprozessorgesteuerte MIG/MAG Stromquelle TransPuls Synergic 3200 CMT, mit einer Leistung von 320 A [41].

Die Steuerung des Roboters und die Eingabe der Schweißparameter erfolgte mit der Fernbedieneinheit RCU 5000i. [42]

3.2.7 Schweißroboter

An der TU GRAZ wurde der ABB Schweißroboter IRB 140 mit 6 Achsen verwendet. Dieser erreicht eine maximale Schweißgeschwindigkeit von 7 m/s und schafft eine unterbrechungsfreie Reichweite von maximal 810 mm. Die dazugehörige Software wurde mit dem ABB IRC 5 gesteuert [43].

3.3 Schweißparameter

In diesem Kapitel werden die Schweißparameter aller Versuchsreihen tabellarisch angeführt. Des Öfteren wurden bis zu drei Schweißvorgänge mit verschiedenen Einstellungen auf einem Blechpaar durchgeführt. Neben dem verwendeten Grundwerkstoff (APS-verzinkt = rot, feuerverzinkt = orange, elektrolytisch-verzinkt = grün) werden auch die Anzahl der Plasmabrennerüberfahrten beim Beschichtungsprozess, die Stromstärke in Ampere, die Spannung in Volt, der Drahtvorschub in m/min, die Schweißgeschwindigkeit in cm/min und der eingestellte Offset in mm angeführt. Die Parameter Stromstärke und Spannung sind mit dem Drahtvorschub über das Schweißprogramm gekoppelt und lassen sich somit nur über diesen einstellen.

3.3.1 Vorversuchsreihe

Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 zeigen die Schweißparameter für die in zwei geteilte Vorversuchsreihe. Dabei wurden zuerst 13 und im Anschluss 12 Blechpaare verschweißt.

Tabelle 3-1: Schweißparameter der 1. Vorversuchsreihe

Versuchsnummer	Blechnummer	Grundwerkstoff	Überfahrten in #	Stromstärke in A	Spannung in V	Drahtvorschub in m/min	Schweißgeschw. in cm/min	Offset in mm
1	1	DC01 (APS)	2	76	12,3	4,2	60	0,6
2			2	64	12,2	3,8	60	2
3	2		2	64	12,2	3,8	60	1,5
4			2	69	12,0	4,0	60	1,5
5			2	69	12,0	4,0	42	1
6	3		2	69	12,0	4,0	42	0,6
7			2	69	12,0	4,0	42	0,6
8			2	55	11,4	3,5	42	0,6
9	4		2	55	11,4	3,5	42	0,6
10			2	55	11,4	3,5	42	0,6
11			3	69	12,0	4,0	42	0,6
12	5		3	69	12,0	4,0	42	0,8
13			3	78	12,4	4,5	30	0,8

Tabelle 3-2: Schweißparameter der 2. Vorversuchsreihe

Versuchsnummer	Blechnummer	Grundwerkstoff	Überfahrten in #	Stromstärke in A	Spannung in V	Drahtvorschub in m/min	Schweißgeschw. in cm/min	Offset in mm
1	1	DC04 (elo)	-	55	11,4	3,5	60	-0,6
2			-	55	11,4	3,0	60	0
3	2		-	59	11,5	3,7	60	0
4	3		-	69	12,0	4,0	90	0
5	4	DX54 (feuer)	-	69	12,0	4,0	90	0
6		DC01 (APS)	4	69	12,0	4,0	90	0
7	5		4	78	12,4	4,5	30	0
8			4	78	12,4	4,5	30	0
9	6		3	78	12,4	4,5	30	0
10			3	78	12,4	4,5	30	0,6
11			3	78	12,4	4,5	30	0,6
12	7		3	78	12,4	4,5	30	0,8

3.3.2 1. Hauptversuchsreihe

Bei der ersten Hauptversuchsreihe wurden nur jeweils die Minima und Maxima der drei Parameter Brennerabstand x , Schweißgeschwindigkeit v und Drahtvorschub f für die DoE definiert, siehe Tabelle 3-3. Die Werte für den Strom I und die Spannung U sind in den Einstellungen mit dem Drahtvorschub gekoppelt.

Tabelle 3-3: Minima und Maxima der Schweißparameter für DoE der 1. Hauptversuchsreihe

X in mm		V in cm/min		f in m/min		I in A		U in V	
MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
-2	3	30	180	3,7	4,8	59	80	11,5	12,5

Mithilfe des Statistikprogramms „Minitab“ wurde daraus ein Versuchsplan in zufälliger Versuchsreihenfolge erstellt.

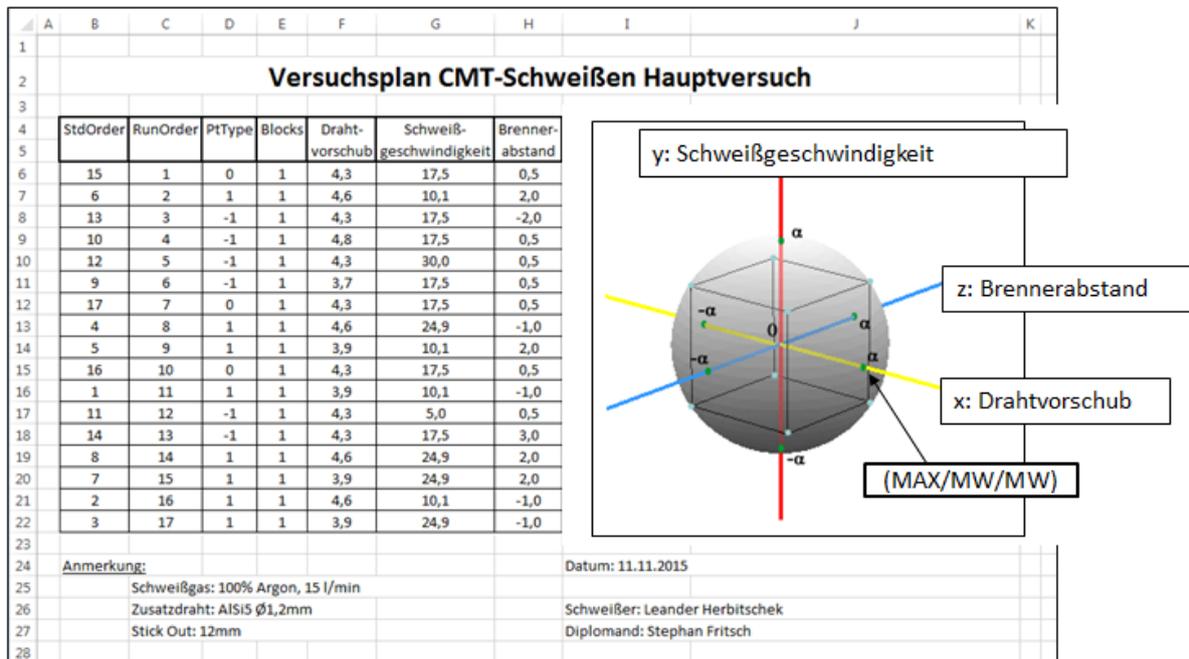


Abbildung 3-7: Versuchsplan für 1. Hauptversuchsreihe im EXCEL

Dieser Versuchsplan ergab eine Anzahl von 17 Schweißversuchen, siehe dazu Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4: Schweißparameter der 1. Hauptversuchsreihe

Versuchsnummer	Blechnummer	Grundwerkstoff	Beschriftung	Stromstärke in A	Spannung in V	Drahtvorschub in m/min	Schweißgeschw. in cm/min	Offset in mm
1	1	DC04 (elo)	①HV1 11.11.	77	12,3	4,3	105	0,6
2	2		②HV1 11.11.	79	12,4	4,6	61	2,0
3	3		③HV1 11.11.	77	12,3	4,3	105	-2,0
4	4		④HV1 11.11.	80	12,5	4,8	105	0,6
5	5		⑤HV1 11.11.	77	12,3	4,3	180	0,6
6	6		⑥HV1 11.11.	59	11,5	3,7	105	0,6
7	7		⑦HV1 11.11.	77	12,3	4,3	105	0,6
8	8		⑧HV1 11.11.	79	12,4	4,6	149	-1,0
9	9		⑨HV1 11.11.	66	11,8	3,9	61	2,0
10	10		⑩HV1 11.11.	77	12,3	4,3	105	0,6
11	11		11HV1 11.11.	66	11,8	3,9	61	-1,0
12	12		12HV1 11.11.	77	12,3	4,3	30	0,6
13	13		13HV1 11.11.	77	12,3	4,3	105	3,0
14	14		14HV1 11.11.	79	12,4	4,6	149	2,0
15	15		15HV1 11.11.	66	11,8	3,9	149	2,0
16	16		16HV1 11.11.	79	12,4	4,6	61	-1,0
17	17		17HV1 11.11.	66	11,8	3,9	149	-1,0

3.3.3 Referenzversuchsreihen

Für die erste Referenzversuchsreihe bei der Fa. Fronius International GmbH wurden nur jene 4 Schweißparametereinstellungen ausgewählt, welche bei der Auswertung der ersten Hauptversuchsreihe die höchsten Zugfestigkeitswerte erreichten. Tabelle 3-5 zeigt diese eingestellten Parameter.

Tabelle 3-5: Schweißparameter der 1. Referenzversuchsreihe

Versuchsnummer	Blechnummer	Grundwerkstoff	Beschriftung	Stromstärke in A	Spannung in V	Drahtvorschub in m/min	Schweißgeschw. in cm/min	Offset in mm
1	1	DC04 (elo)	①RV1 1.12.	77	12,3	4,3	105	0,6
2	2		②RV1 1.12.	77	12,3	4,3	180	0,6
3	3		③RV1 1.12.	77	12,3	4,3	60	0,6
4	4		④RV1 1.12.	79	12,4	4,6	78	0,6

Die zweite Referenzversuchsreihe wurde in weiterer Folge mit denselben Einstellungen wie im vorherigen Versuch, jedoch mit einer neu verpackten Rolle des Zusatzwerkstoffs geschweißt. Gestartet wurde diese Referenzversuchsreihe mit einem Probelauf, um sich einen Überblick über das Zusammenspiel der bei der Fa. INOCON Technologie GmbH erstmals verwendeten Einrichtungen zu verschaffen.

Aus der Tabelle 3-6 kann man die Schweißparameter für diese Versuchsreihe entnehmen.

Tabelle 3-6: Schweißparameter der 2. Referenzversuchsreihe

Versuchsnummer	Blechnummer	Grundwerkstoff	Beschriftung	Stromstärke in A	Spannung in V	Drahtvorschub in m/min	Schweißgeschw. in cm/min	Offset in mm
Probelauf	0	DC04 (elo)	RV2 Probelauf	77	12,3	4,3	105	0,6
1	1		①RV2 15.12.	77	12,3	4,3	105	0,6
2	2		②RV2 15.12.	77	12,3	4,3	180	0,6
3	3		③RV2 15.12. 1/3	77	12,3	4,3	60	0,6
4	4		④RV2 15.12. 2/3	77	12,3	4,3	60	0,6
5	5		⑤RV2 15.12. 3/3	77	12,3	4,3	60	0,6

3.3.4 2. Hauptversuchsreihe mit APS Verzinkung

In dieser Hauptversuchsreihe blieben die Parameter in weiterer Folge konstant. Lediglich das Beschichtungsverfahren wurde verändert (APS). Wie in Tabelle 3-7 ersichtlich wurden nur noch die Beschichtungsparameter variiert, vor allem in Bezug auf die Zinkschichtdicke.

Tabelle 3-7: Schweißparameter inklusive Beschichtungsparameter der 2. Hauptversuchsreihe

Versuchsnummer	Blechnummer	Grundwerkstoff	Beschriftung	Stromstärke in A	Spannung in V	Drahtvorschub in m/min	Schweißgeschw. in cm/min	Offset in mm
1	1	DC01 (APS)	①HV2 17.12.	77	12,3	4,3	105	0,6
2	2		②HV2 17.12.					
3	3		③HV2 17.12.					
4	4		④HV2 17.12.					
Beschichtung:								
Versuchsnummer	Blechnummer	Beschichtungsnummer	Beschichtungsüberfahrten	Aktivierung	Aktivierungsstromstärke in A	Beschichtungsstromstärke in A		
1	1	1	3	JA	200	85		
2	2	2	1	JA	200	85		
3	3	3	1	JA	200	85		
4	4	8	3	NEIN	-	85		

Der Unterschied der Beschichtungsparameter zwischen zweiter und dritter Beschichtung liegt nur in der Brennergeschwindigkeit. Diese betrug beim zweiten Beschichtungsvorgang, sowie beim ersten, 50 mm/s und beim dritten, sowie beim vierten Versuch 100 mm/s.

Beim Beschichten für den vierten Versuch wurde sogar auf die zeitlich kurz vor der Zinkbeschichtung erfolgende Aktivierung verzichtet. Abbildung 3-8 zeigt die geplante Beschichtung mit den 3 verschiedenen Schichtdicken.

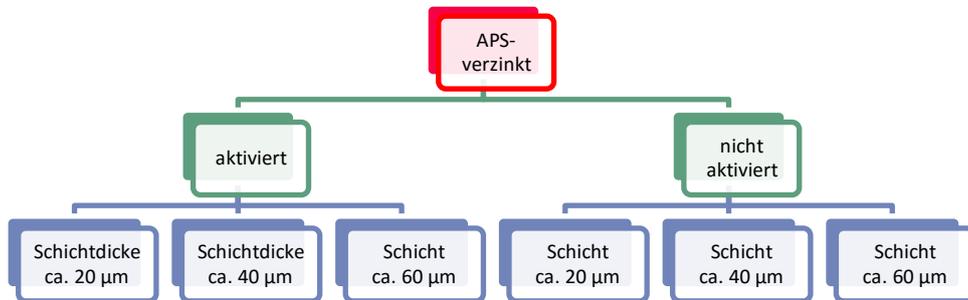


Abbildung 3-8: Beschichtungsplan für die 2. Hauptversuchsreihe

3.4 Probenentnahmeplan

Für die Charakterisierung der Schweißverbindungen war es notwendig Proben aus den geschweißten Blechen zu entnehmen. Diese Proben wurden nach den Versuchen jeweils laut dem einheitlichen Probenentnahmeplan, wie in Abbildung 3-9 gezeigt, entnommen. Es konnte somit die Vergleichbarkeit der einzelnen Proben sichergestellt werden.

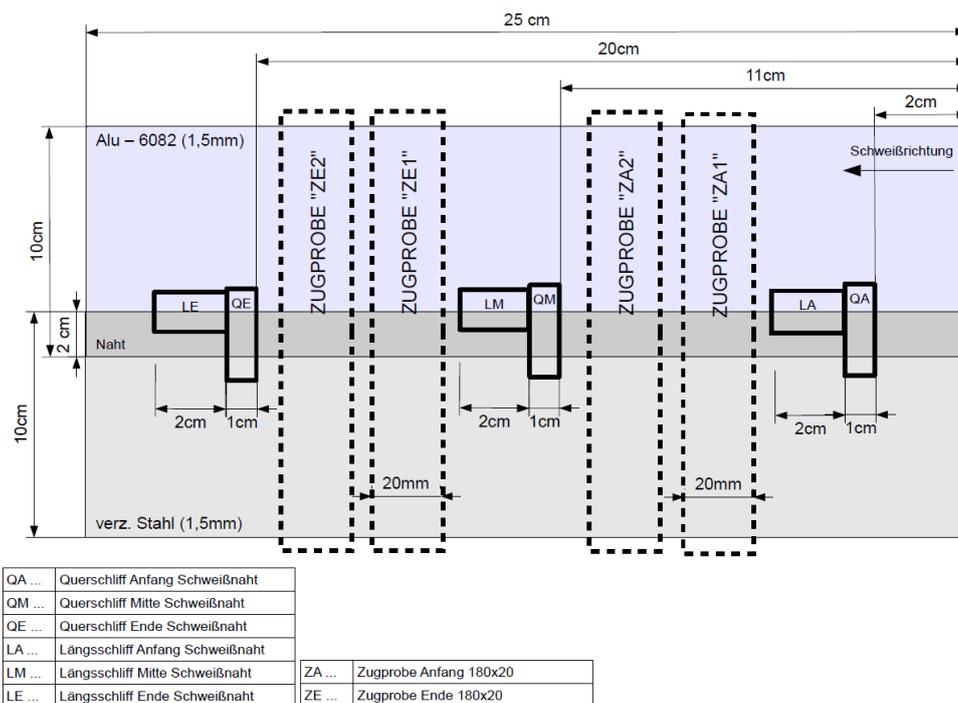


Abbildung 3-9: Probenentnahmeplan

Die Abbildung zeigt, dass jeweils ein Quer- und Längsschliff vom Anfang, der Mitte und vom Ende der Schweißnaht entnommen wurde. Auch bei den Proben für den Zugversuch nutze man die Länge der Schweißnaht aus und entnahm jeweils 2 Proben vom Anfang und vom Ende der Naht. Ein Zugversuch kann nicht wiederholt werden. Daher wurden die jeweils zweiten Zugproben („ZA2“ und „ZE2“) aufgrund von Bestätigungszwecken entnommen, um sicherzustellen, dass beim Durchführen des Zugversuchs keine Fehler beim Einstellen der Parameter unterlaufen sind. Nachdem die Schweißnaht nicht immer über die komplette Länge der Schweißkanten, visuell betrachtet, fehlerfrei war, war es teilweise nicht möglich diesen Probenentnahmeplan vollständig einzuhalten. Oft musste auch auf eine visuell besser haftende Stelle ausgewichen werden, um überhaupt ein Ergebnis aus den Untersuchungen erzielen zu können.

4 Ergebnisse

Ziel dieser Masterarbeit war es, eine APS-verzinkte Stahl-Aluminium Überlappverbindung mittels CMT-Prozess herzustellen, bei welcher

- die Schweißgeschwindigkeit aufgrund der Wirtschaftlichkeit möglichst hoch sein soll,
- die Zugfestigkeit der Verbindung einen möglichst hohen Wert erreichen soll,
- das Bauteilversagen aluminiumseitig im Grundwerkstoff liegt,
- die Porenbildung so gering wie möglich gehalten werden soll,
- die Größe der intermetallischen Phase den Grenzwert von 5 μm [44] nicht erreichen soll.

4.1 Brenneinstellungen

4.1.1 Schweißgeschwindigkeit

Bezüglich der Schweißgeschwindigkeit wurde beobachtet, dass diese einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat. Bei Geschwindigkeiten über ca. 120 cm/min fand keine Bindung vom Zusatzwerkstoff mit der Stahloberfläche statt. Die Zinkschicht konnte also in dieser kurzen Zeit nicht vollständig verdampfen, der Prozess war mit diesen Einstellungen also zu kalt.



Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 294,79mm| 52mm| 5,6| 1/125s| 620mm| 2mm

Bildname: [joinp1plasma15_q0076.jpg](#)



Abbildung 4-1: Schweißnahtaussehen des zweiten Versuchs der ersten Referenzversuchsreihe mit einer Geschwindigkeit von 180 cm/min

Abbildung 4-1 zeigt die Naht des zweiten Versuchs der ersten Referenzversuchsreihe. Diese wurde mit einer Geschwindigkeit von 180 cm/min geschweißt.

Eine Naht mit einer Geschwindigkeit von 60 cm/min zeigt die Schweißnaht des dritten Versuchs der ersten Referenzversuchsreihe in Abbildung 4-2. Die zu hohe Nahtbreite mit einer starken Nahtüberhöhung und einem hohen Volumen an Zusatzwerkstoff ist in dieser Abbildung zu erkennen.

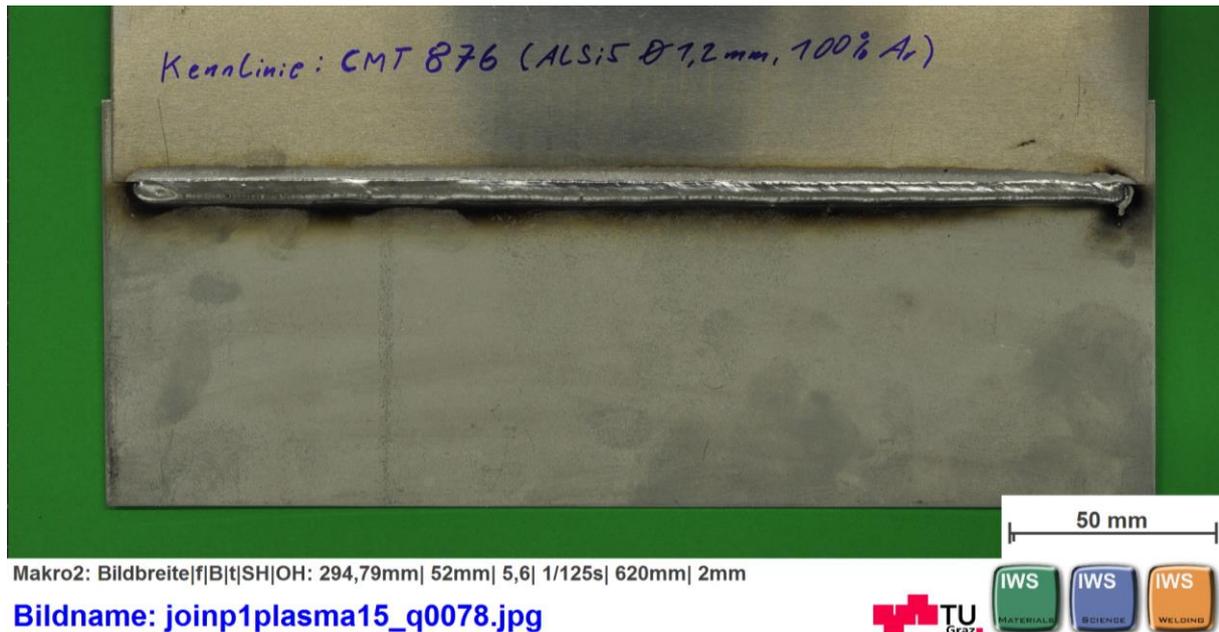


Abbildung 4-2: Schweißnahtaussehen des dritten Versuchs der ersten Referenzversuchsreihe mit einer Geschwindigkeit von 60 cm/min

Der Bereich des Optimums der Schweißgeschwindigkeit wurde bei einer Geschwindigkeit von ca. 100 cm/min festgestellt. Dies konnte sowohl bei den Referenzversuchsreihen mit den elektrolytisch verzinkten Stahlblechen, als auch bei der zweiten Hauptversuchsreihe mit den APS-verzinkten Blechen festgestellt werden. Optisch ist im Vergleich dieser beiden Versuchsreihen kein Unterschied erkennbar. Im Anhang ab Seite 73 zeigt die Abbildung 7-5 das Schweißnahtaussehen des dritten Versuchs der ersten Referenzversuchsreihe und die Abbildung 7-6 das des ersten Versuchs der zweiten Hauptversuchsreihe mit jeweils einer Geschwindigkeit von 105 cm/min.

4.1.2 Offseteinstellung

Zusätzlich wurde festgestellt, dass es enorm wichtig ist, eine exakte Positionierung des CMT-Schweißbrenners einzuhalten. Vor allem für die Reproduzierbarkeit ist dies

relevant. Es stellte sich auch heraus, dass der Schweißprozess bei Offsetwerten von größer als +1 mm und auch kleiner -1 mm keine gewünschten Ergebnisse mehr liefert. Er sollte somit unbedingt im nahen Bereich der Schweißkante liegen. In Abbildung 4-3 ist in der Mitte der Schweißnahtlänge die Auswirkung einer ungenauen Einstellung des Offsets beim dritten Versuch der zweiten Referenzversuchsreihe zu erkennen.



Abbildung 4-3: Ungenauere Offseteinstellung beim dritten Versuch der zweiten Referenzversuchsreihe

4.2 Zugversuch

Nach jeder Versuchsreihe wurde ein Zugversuch an der TU GRAZ durchgeführt. Exakterweise müsste dieser Versuch eigentlich Scher-Zugversuch genannt werden. Durch die Überlappverbindung greift an der Schweißnaht, zusätzlich zur Zugkraft, eine Scherkraft an, welche die Naht höher belastet. Nachdem sich diese Zusatzbelastung nur minimal auf das Ergebnis auswirkt und der Vergleich nur unter gleich belasteten Proben stattgefunden hat, verzichtete man auf eine erweiterte Auswertung. Es sei jedoch hier erwähnt, dass geringfügig niedrigere Zugspannungen gemessen wurden, als mit Berücksichtigung dieser Zusatzbelastung.

Nach dem Probenentnahmeplan wurden pro Blech je zwei Zugproben im Bereich des Prozessstarts und des Prozessendes, also insgesamt 4 Zugproben, herausgeschnitten. Wenn diese Position aufgrund einer extrem geringen oder stark überhö-

ten Schweißnahtbildung nicht für auswertbar gehalten wurde, wurde die Entnahmestelle verändert. Als Referenz- bzw. Zielwert wurde jener Zugfestigkeitswert des Werkstoffs mit der niedrigsten Festigkeit herangezogen. Bei dieser Schweißverbindung war dies der Zusatzwerkstoff AlSi5 mit einer Zugfestigkeit von ca. 160 N/mm², laut Datenblatt [24]. Der reine Aluminium-Grundwerkstoff hatte bei der Durchführung des Zugversuchs einen Zugfestigkeitswert von durchschnittlich 340 N/mm². Die Abbildung 4-4 zeigt die verschiedenen Zugfestigkeitswerte des Zusatzwerkstoffes AlSi5, der ersten und zweiten Referenzversuchsreihe mit elektrolytisch-verzinkten Stahlblechen und die der ersten, ebenfalls elektrolytisch verzinktem Blech, und zweiten Hauptversuchsreihe mit APS-Verzinkung.

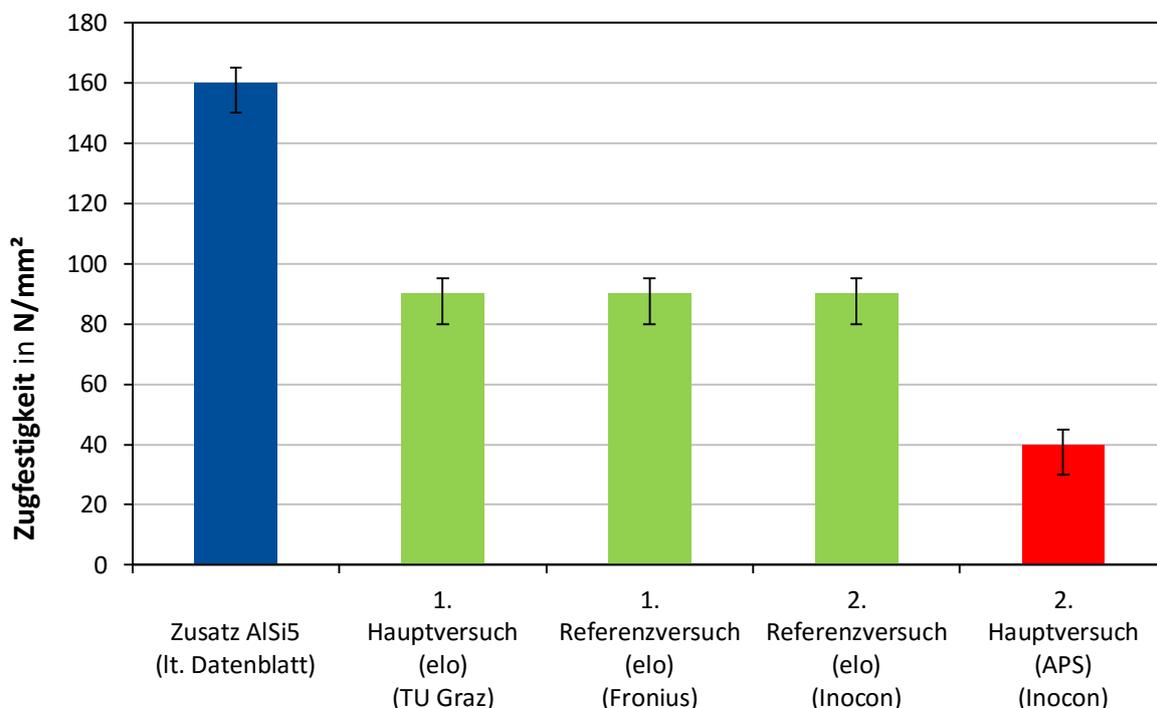


Abbildung 4-4: Zugfestigkeitsdiagramm der verschiedenen Versuche im Vergleich mit dem Zusatzwerkstoff

Die Zugfestigkeit des ersten Hauptversuchs liegt mit 90 N/mm² nur knapp über der Hälfte des Zusatzwerkstoffes AlSi5. Dieses Ergebnis wurde auch mit beiden Referenzversuchen bestätigt. Die Verbindung mittels elektrolytisch-verzinkter Schicht konnte somit den Mindestwert von 160 N/mm² nicht erreichen.

Der höchste erreichte Wert beim zweiten Hauptversuch mit plasmabeschichteter Schicht lag bei etwa 40 N/mm² und erreichte somit nur die Hälfte der anderen Versuche oder etwa ein Viertel des Festigkeitswertes des verwendeten Zusatzwerkstoffes. Das vollständige Prüfprotokoll mit allen detaillierten Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche, inklusive Zugfestigkeitsdiagramm, ist im Anhang ab Seite 73 ersichtlich.

4.2.1 Zugversuchsergebnisse aus Literatur

Im Vergleich zu Ergebnissen aus der Literatur, liegen die erreichten Ergebnisse nicht im zufriedenstellenden Bereich, denn diese ragen über die Streckgrenze des Aluminium-Grundwerkstoffes mit ca. 100 N/mm² hinaus. Verbindungen mit einem Aluminium-Grundwerkstoff aus der 6000er Legierungsgruppe und einem Stahlblech mit elektrolytischer Verzinkung erreichen eine Zugfestigkeit von 145 N/mm², wobei die Materialstärken bei nur 1 mm liegen. Die Zinkschichtdicke ist jedoch bei dieser Verbindung gleich hoch (Abbildung 4-5). [22]

Grundmaterial	Streckgrenze Al [N/mm ²]	Zugfestigkeit der Verbindung[N/mm ²]
AW 6016 (1mm) - DC 04 AZE75/75 03 (1 mm)	> 100	145
AW 6016 (1mm) - DX 51 Z 275 (1,5 mm)	> 100	166,7
AW 5754 (1mm) - DX 53 Z 140 (1 mm)	> 80	130,3
AW 5182 (1mm) - DX 53 Z 140 (1 mm)	>110	134,5

Abbildung 4-5: Zugfestigkeiten von Stahl-Aluminiumverbindungen [22]

4.2.2 Bruchstellen nach Zugversuch

Bei der Analyse der Bruchstellen nach den durchgeführten Zugversuchen konnten, hinsichtlich der Verzinkungsmethode, einheitliche Ergebnisse festgestellt werden. Bei allen Versuchsreihen mit den elektrolytisch-verzinkten Stahlblechen, liegen die Bruchstellen an der Aluminiumkante. Die Wärmeeinflusszone zwischen Schweißnaht und Aluminium-Grundwerkstoff ist somit die kritische Zone für den Bruch der Zugproben.

Bei den Stahlblechen, welche mittels atmosphärischen Plasmaspritzen beschichtet wurden (2. Hauptversuchsreihe), brach die Zugprobe im Interface, also an der Anbindungsstelle vom Stahl mit dem aufgeschmolzenen Aluminium und dem Zusatzwerkstoff. Die Festigkeit der Lötstelle kann somit hier als kritischer Bereich angesehen werden.

Die Abbildung 4-6 zeigt oben und links unten die Bruchstellen in der Wärmeeinflusszone der ersten Hauptversuchsreihe (HV1), sowie ersten (RV1) und zweiten (RV2) Referenzversuchsreihe. Der Bruch an der Stahlblechoberfläche der zweiten Hauptversuchsreihe (HV2) ist in der Abbildung rechts unten abgebildet.

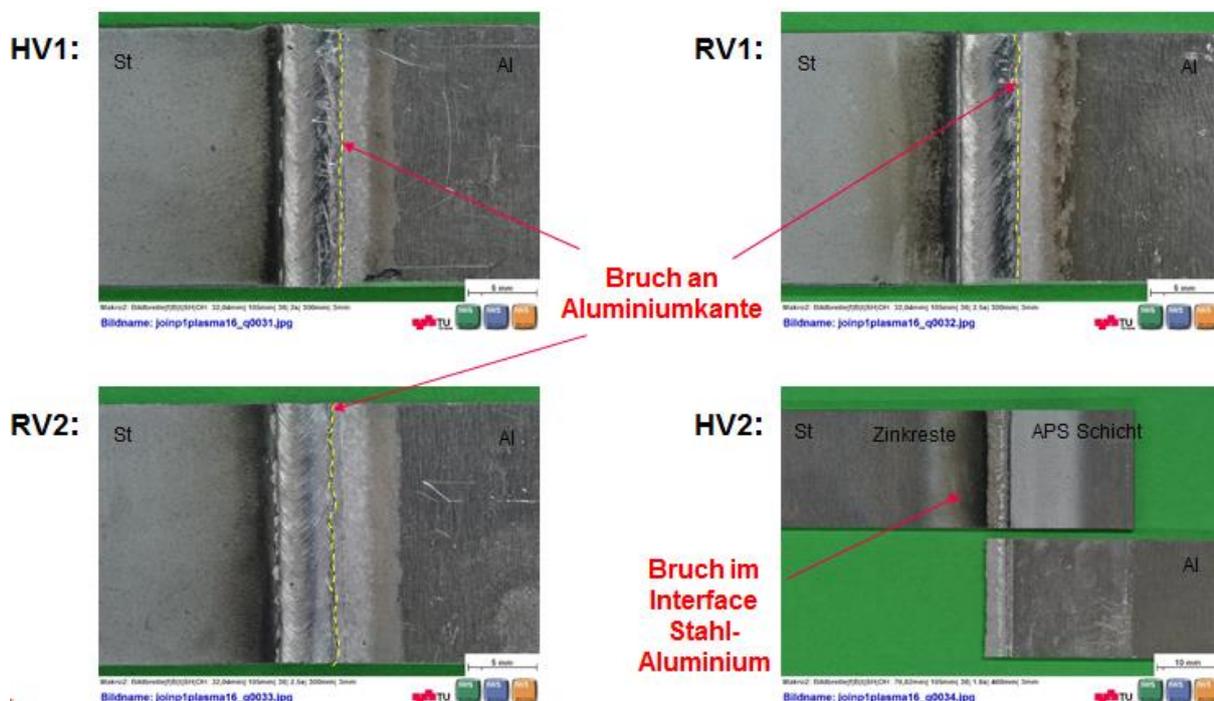


Abbildung 4-6: Bruchstellen nach Zugversuchen bei der 1. Hauptversuchsreihe (HV1), 1. Referenzversuchsreihe (RV1), 2. Referenzversuchsreihe (RV2) und 2. Hauptversuchsreihe (HV2)

4.3 Porenbildung

Die teilweise starke Bildung von Poren bei den Schweißversuchen veranlasste eine genauere Untersuchung. Dazu wurden diese unter dem Lichtmikroskop, unter dem Rasterelektronenmikroskop und unter der Zuhilfenahme der digitalen Computerradiographie analysiert.

4.3.1 Untersuchungen der Porenbildung

Lichtmikroskopische Untersuchung

Die Schweißnaht wurde anhand von Längs- und Querschliffen unter dem Lichtmikroskop näher betrachtet und analysiert. Dabei wurden zum Teil große Unterschiede am Ergebnis, eventuell durch die Verwendung verschiedener Schlauchpakete, festgestellt. Abbildung 4-7 zeigt die gemittelte Anzahl der Poren im Querschliff der verschiedenen Versuche.

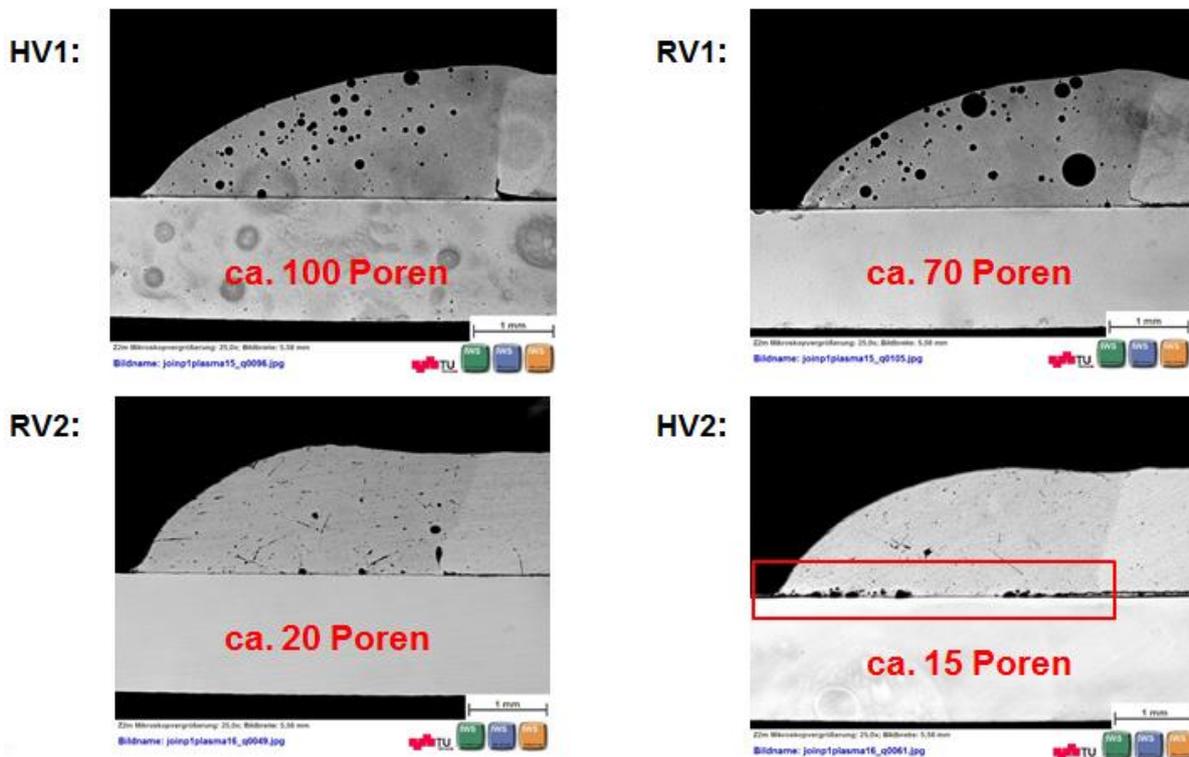


Abbildung 4-7: Lichtmikroskopische Untersuchung der Porenbildung beim Querschliff des 1. Hauptversuch (HV1), 1. Referenzversuch (RV1), 2. Referenzversuch (RV2) und 2. Hauptversuch (HV2)

Nach der ersten Hauptversuchsreihe (HV1) konnten etwa 100 verschieden große Poren im gesamten Querschnitt der Schweißnaht ermittelt werden. Mit der ersten Referenzversuchsreihe (RV1) bei der Fa. Fronius International GmbH konnte die Anzahl der Poren auf etwa 70 Poren reduziert werden. Die Verwendung eines neu verpackten Zusatzdrahtes bei der Fa. INOCON Technologie GmbH kann als Grund für die Minimierung der Poren mit der Anzahl von etwa 20 im Querschliff angegeben werden. Im Anschluss konnte dort nur durch die Verzinkung des Stahlblechs mittels APS-Beschichtung in der zweiten Hauptversuchsreihe (HV2) das Minimum der Po-

renanzahl mit ca. 15 Poren erreicht werden. Diese Porenbildung findet dabei fast zur Gänze im Bereich der verdampften Zinkschicht statt.

REM Untersuchung der Poren

Speziell die Porenbildung im Interface der geschweißten Proben des zweiten Hauptversuchs wurde mithilfe des Rasterelektronenmikroskop (REM) an der FH Wels untersucht. Die Abbildungen 4-8, 4-9 und 4-10 zeigen die Aufnahmen mit verschiedenen Vergrößerungen und den unterschiedlichen Aufnahmebereichen. In der ersten Abbildung ist gut erkennbar, dass die unerwünschten Poren besonders im unteren Bereich der Schweißnaht, nämlich an der Anbindung zum Stahlblech gebildet werden. Es scheint, als ob das Zink zwar verdampft, aber durch den schnell erstarrenden Zusatzwerkstoff nicht zur Gänze ausgasen kann und somit eingeschlossen wird.

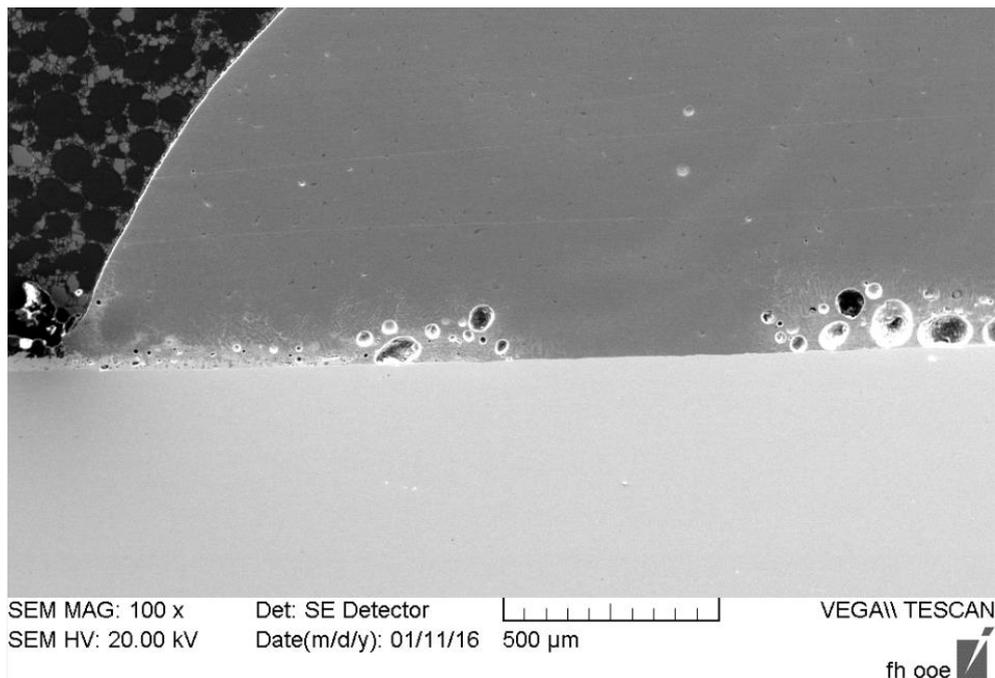


Abbildung 4-8: Überblick der Porenbildung des dritten Schweißversuchs des HV2 unter dem Rasterelektronenmikroskop

In Abbildung 4-9 ist die Mitte der in Abbildung 4-8 dargestellten Probe um den Faktor 5 vergrößert ersichtlich. Es zeigt einen Rest der nicht verdampften Zinkschicht mit darüber liegenden eingeschlossenen Poren.

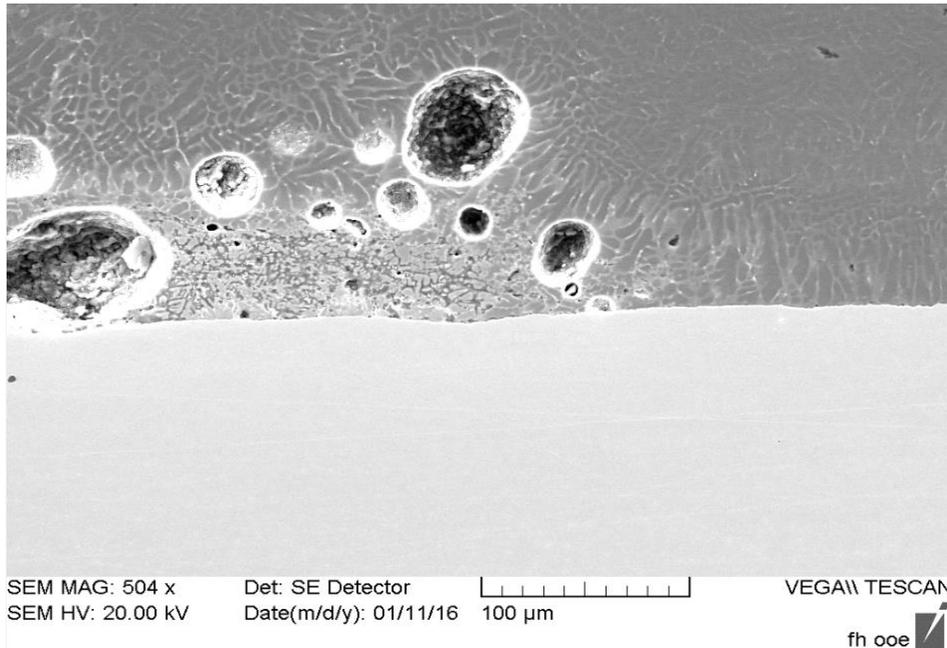


Abbildung 4-9: Zinkreste im Interface des dritten Schweißversuchs des HV2 unter dem Rasterelektronenmikroskop

Eine Anbindung der Schweißnaht über die gesamte Breite an die Stahloberfläche ist, wie in Abbildung 4-10 ersichtlich, nicht gegeben. Reste des Zinks sind auch in dieser Abbildung gut erkennbar.

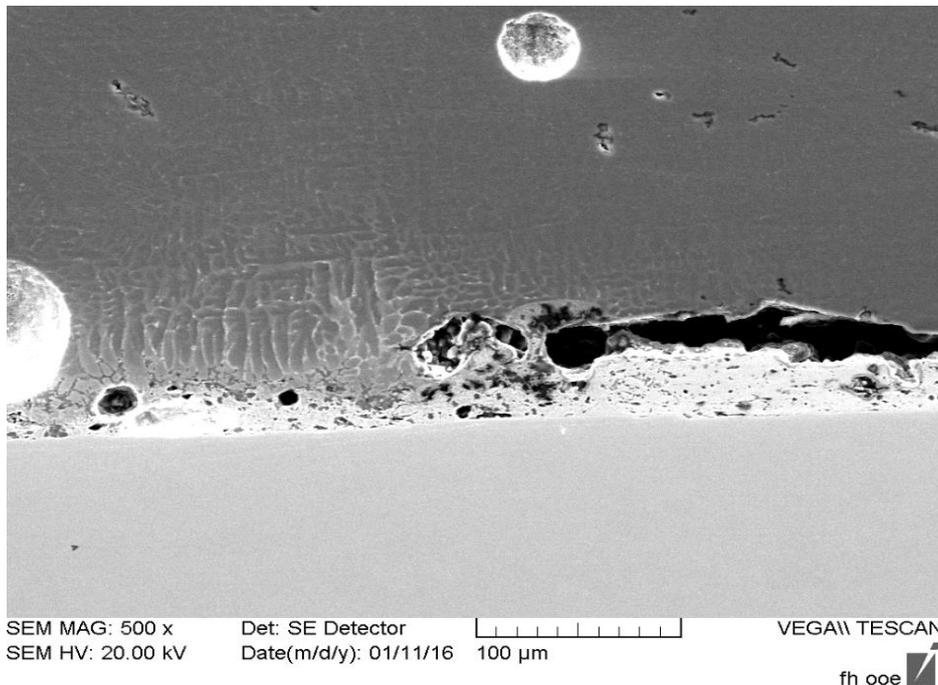


Abbildung 4-10: Unvollständige Anbindung der Schweißnaht mit der Stahloberfläche des ersten Schweißversuchs des HV2 unter dem Rasterelektronenmikroskop

Porenuntersuchung mittels digitaler Computerradiographie

Um einen Überblick der Poren über die gesamte Schweißnahtlänge zu bekommen, wurden ein Blech des zweiten Referenzversuchs und alle vier Bleche des zweiten Hauptversuchs mittels digitaler Computerradiographie bei der Fa. Kremsmüller Industrieanlagenbau KG in Steinhaus bei Wels geröntgt. Die Naht des ersten Schweißversuchs der Referenzversuchs (im Anhang in Abbildung 7-7) dient als Vergleich zu den Hauptversuchen. Die Schweißparameter waren bei beiden Versuchen identisch, nur das Beschichtungsverfahren und die Zinkschichtdicken wurden geändert.

Die Abbildungen 4-12 und im Anhang Abbildung 7-8 bis 7-10 zeigen die Schweißnähte der APS-verzinkten Stahlbleche. Beim ersten Schweißversuch ist die starke Porenbildung im Interface der Naht erkennbar, denn die Schweißnaht weist eine stark schuppige Struktur auf.

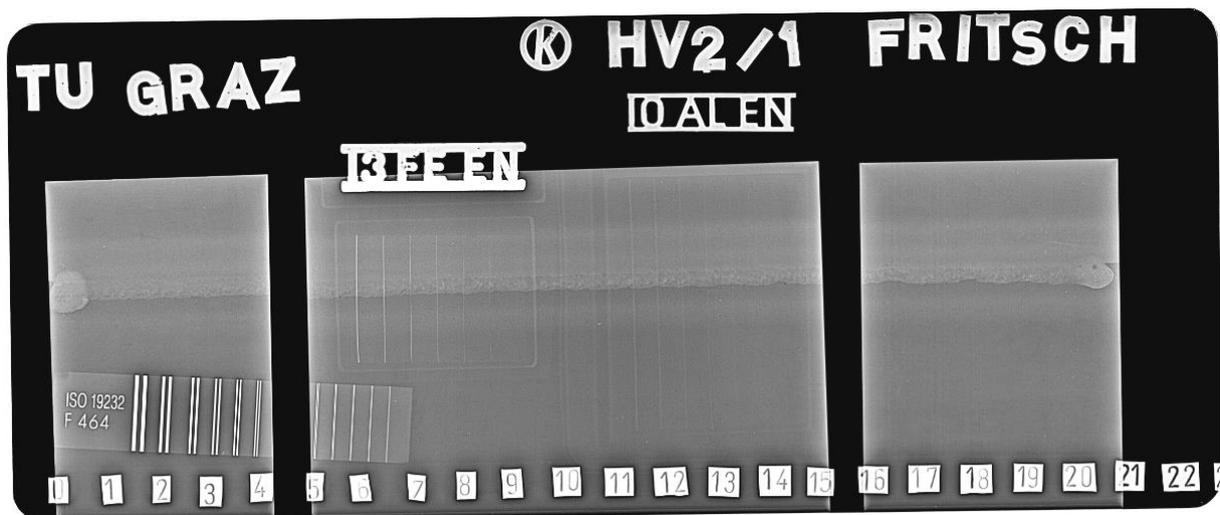


Abbildung 4-11: Digitales Röntgenbild des ersten Schweißversuchs des HV2

Bei den Abbildungen 7-8 und 7-9 fällt die unregelmäßige Schweißraupenform auf. Durch die dünnere Zinkbeschichtung konnte zwar die Porenbildung reduziert werden, jedoch verlief der Lichtbogen im Schweißprozess nicht konstant an der Schweißkante.

Die Abbildung 7-10 stellt den vierten Schweißversuch des zweiten Hauptversuchs dar. Gerade im rechten Teil der Schweißnaht, im Bereich 12 bis 21, konnte keine Bindung vom Aluminium mit dem Stahl erreicht werden. Ebenso ist wieder diese stark schuppige Struktur erkennbar.

4.3.2 Zinkanreicherung in der Schweißnaht

In Abbildung 4-16 ist die Anbindung der Schweißnaht eines Stahlblechs der zweiten Referenzversuchsreihe unter dem Rasterelektronenmikroskop ersichtlich. Man erkennt, dass das Zink der Beschichtung durch den Schweißprozess in die Schweißnaht gemischt wird (Zink wird in der Abbildung gelb dargestellt). Das Zink wird also in diesem Bereich vom Schweißprozess nicht vollständig verdampft und mindert die Haftung der Schweißnaht an der Stahloberfläche.

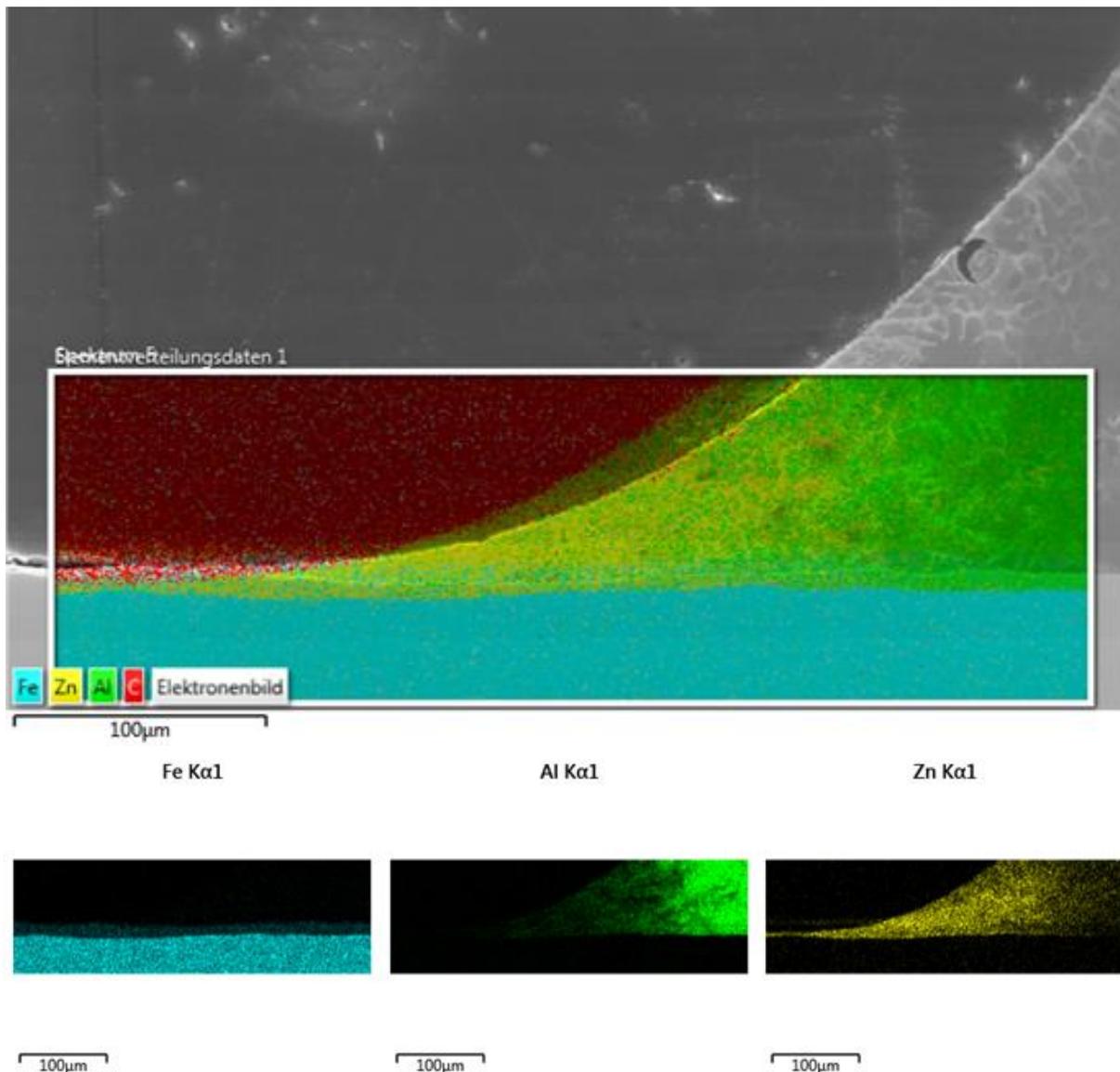


Abbildung 4-12: Zinkanreicherung im Nahtauslauf des ersten Schweißversuchs der zweiten Referenzversuchsreihe unter dem Rasterelektronenmikroskop

Abbildung 4-17 zeigt die Zinkanreicherung in der Schweißnaht des ersten Versuches der zweiten Hauptversuchsreihe. Durch die Farbunterschiede sind die Zinkrückstände sowohl an der Außenseite, als im Inneren der Naht an der Stahloberfläche erkennbar. Das Rasterelektronenmikroskop zeigt auch das Zink in den Poren knapp oberhalb des Stahlblechs in der Schweißnaht.

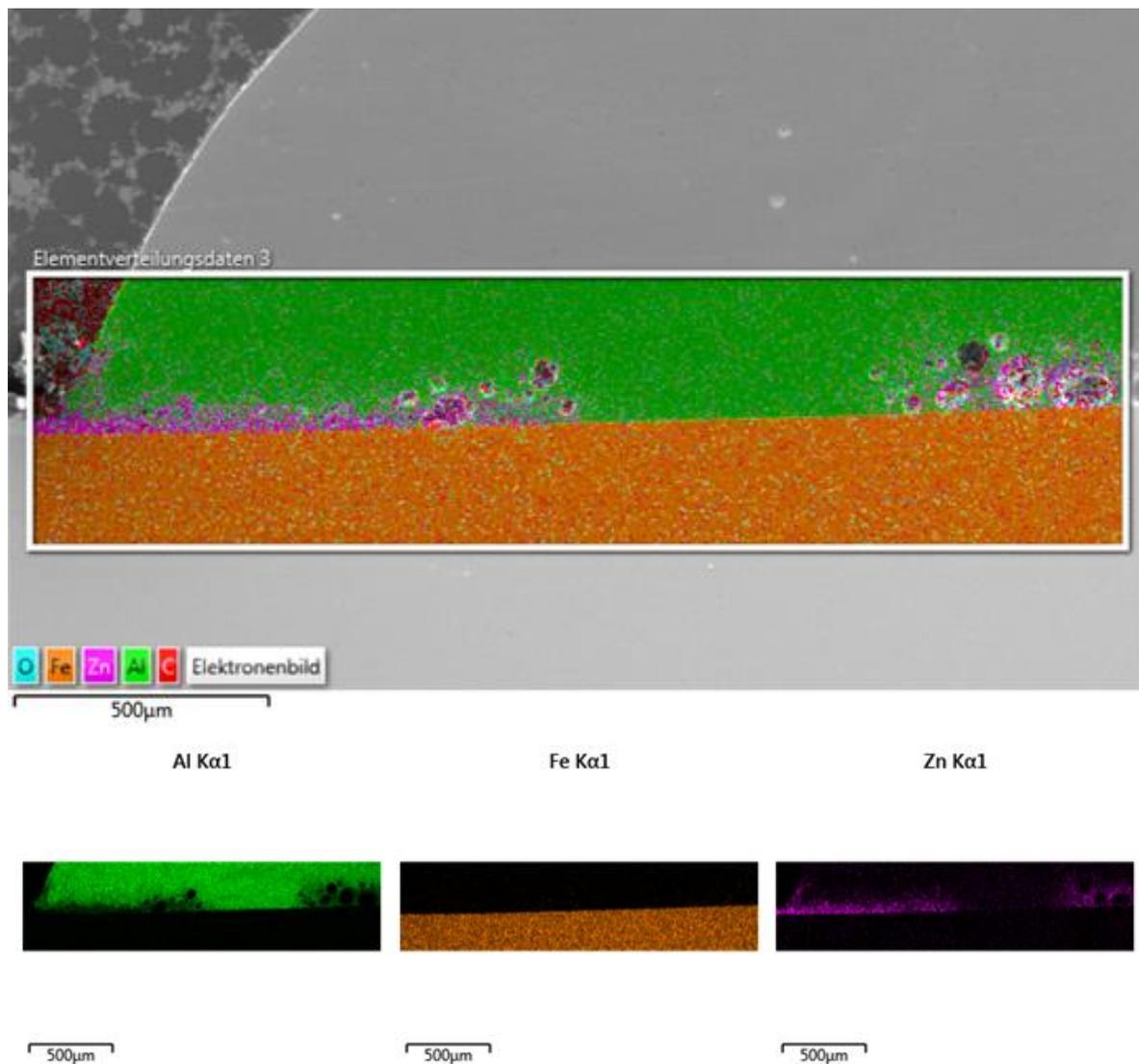


Abbildung 4-13: Zinkanreicherung in der Schweißnaht des ersten Versuches der zweiten Hauptversuchsreihe unter dem Rasterelektronenmikroskop

Bei der 5 fachen Vergrößerung in Abbildung 4-18 werden die Zinkreste in den Poren noch leichter erkennbar. Diese Abbildung zeigt den mittleren Ausschnitt der oberen Abbildung 4-17.

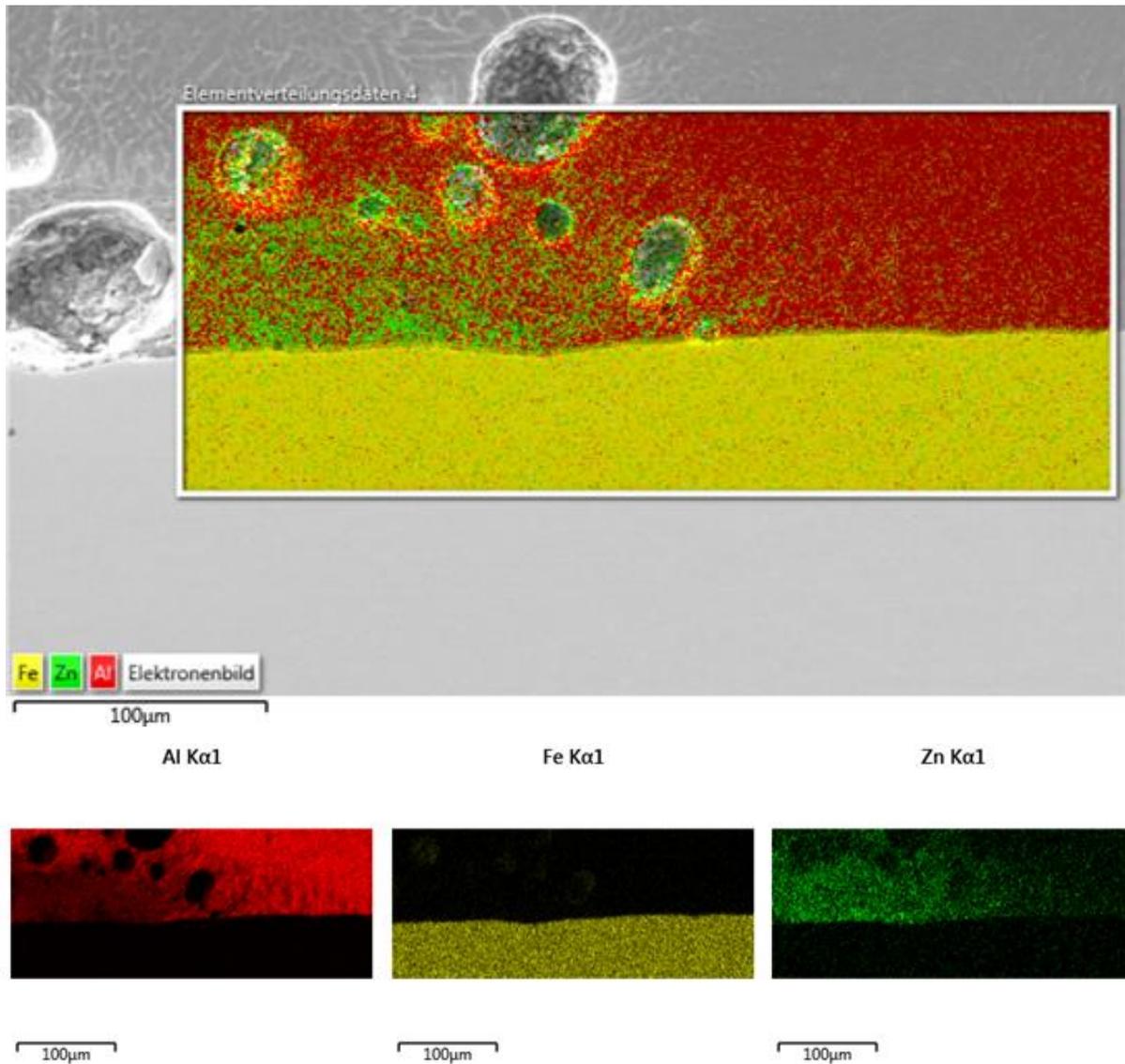


Abbildung 4-14: Zinkanreicherung in der Schweißnahtmitte des ersten Versuchs der zweiten Hauptversuchsreihe unter dem Rasterelektronenmikroskop

Im zentralen Bereich der Schweißnaht des ersten Versuchs der zweiten Hauptversuchsreihe kann eine große Fläche an Zinkresten erkannt werden. Diese Reste bedeckt auch eine hohe Ansammlung an eng nebeneinander liegenden Poren, die die Haftung der Schweißnaht an der Oberfläche stark reduzieren. Abbildung 4-19 veranschaulicht diese Problemzone beim ersten Schweißversuch der zweiten Hauptversuchsreihe.

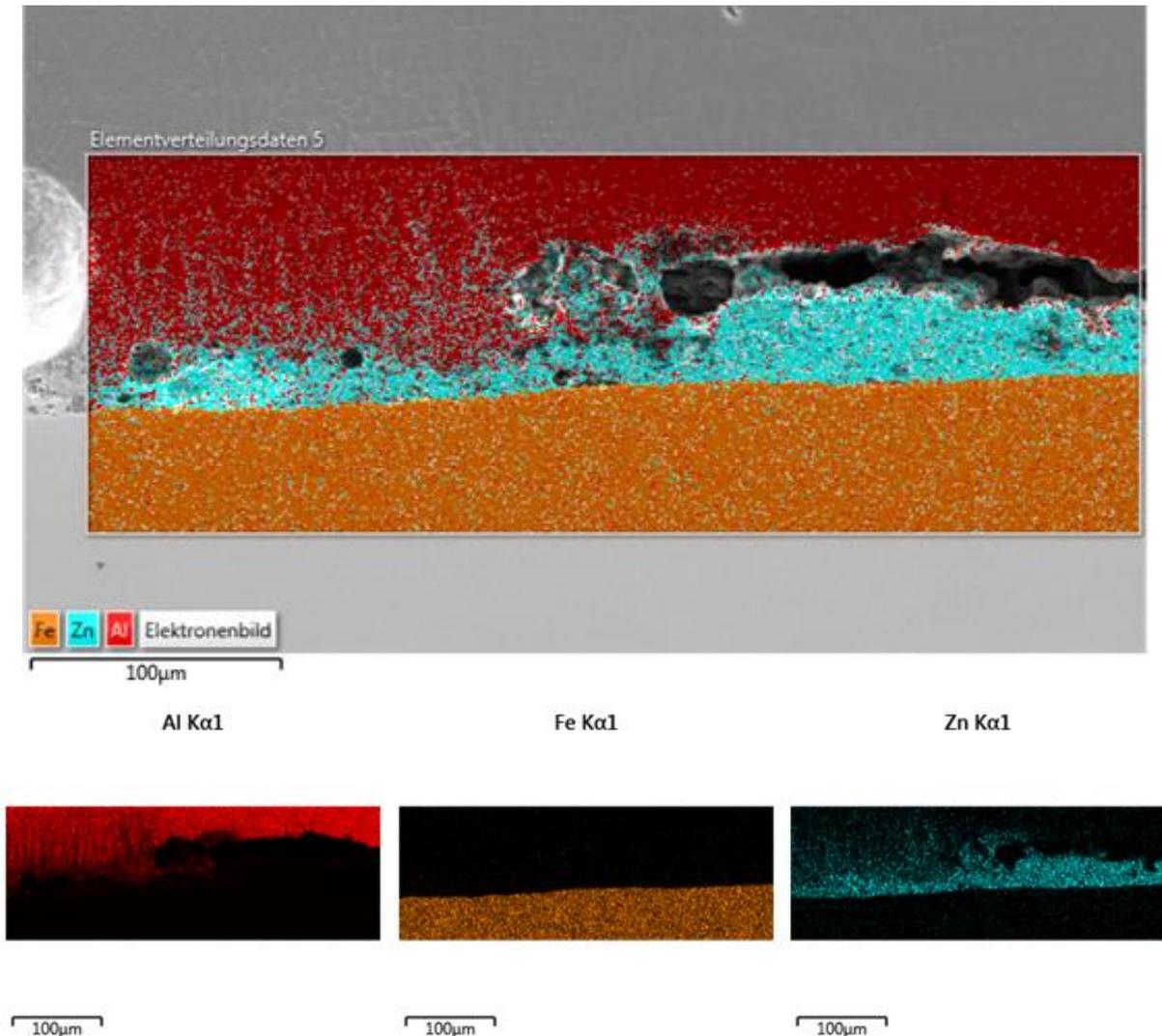


Abbildung 4-15: Zinkreste an der Stahloberfläche in der Schweißnahtmitte des ersten Versuchs der zweiten Hauptversuchsreihe unter dem Rasterelektronenmikroskop

4.4 Vergleich der intermetallische Phasenbildung

Bei allen Versuchen wurde über die Messfunktion des Lichtmikroskops die Breite der intermetallischen Phase gemessen. Als Grenzwert wurde der aus der Literatur recherchierte Wert von 5 μm angenommen [44]. Sowohl die Phasenbreiten der elektrolytisch-verzinkten Bleche, als auch die der APS-verzinkten Bleche blieben unter diesem Wert. Abbildung 4-20 zeigt eine repräsentative Messung der intermetallischen Phasenbreite des dritten Schweißversuchs der ersten Referenzversuchsreihe mit dem Lichtmikroskop. Das Messergebnis liegt in diesem Bereich bei 1,4 μm.

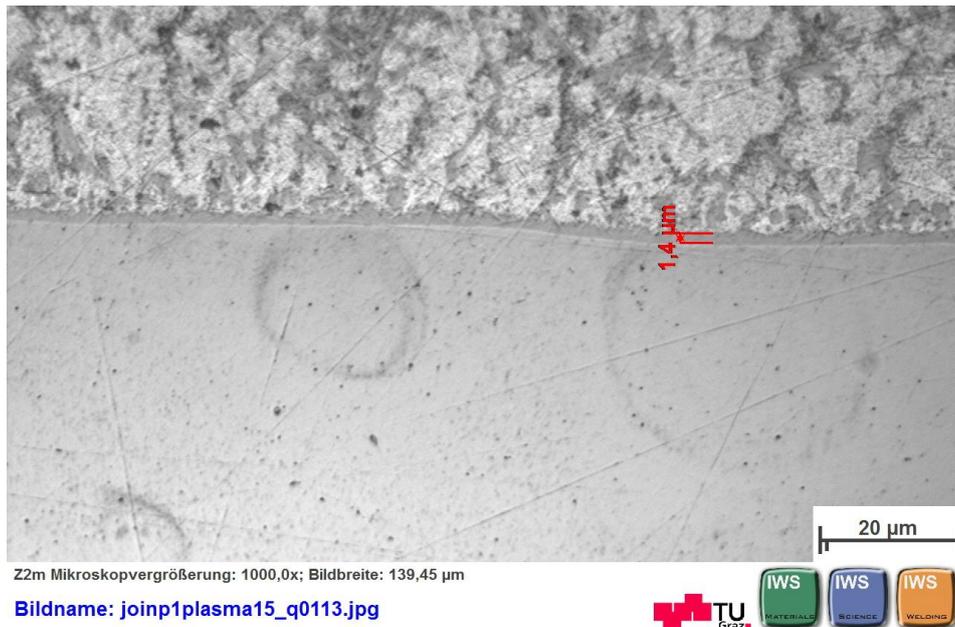


Abbildung 4-16: Repräsentative Messung der intermetallische Phasenbreite des dritten Schweißversuchs der ersten Referenzversuchsreihe

Bei der zweiten Hauptversuchsreihe konnte das Minimum von ca. 0,5 μm gemessen werden. Siehe dazu das Diagramm in Abbildung 4-21, wobei die Streuungen der unterschiedlichen Messungen bei ungefähr 0,1 μm liegen.

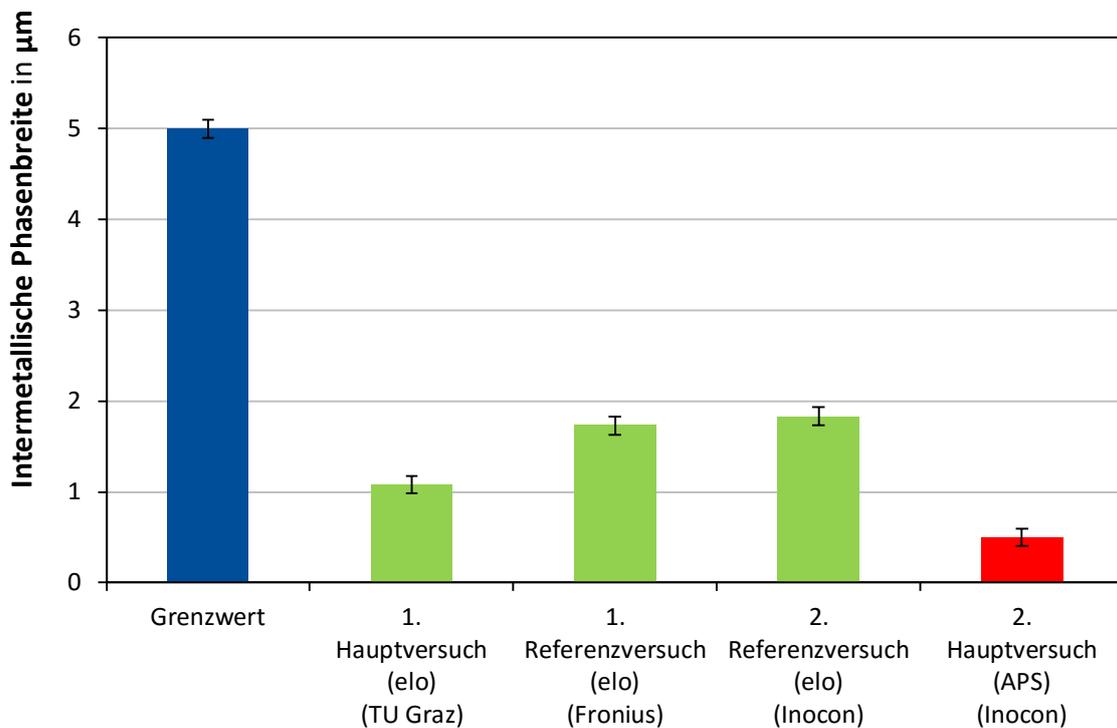


Abbildung 4-17: Intermetallische Phasenbreiten der verschiedenen Versuche

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend können die Ergebnisse der beiden Hauptversuchs- und Referenzversuchsreihen in einer Tabelle dargestellt werden. Dabei zeigt die Tabelle 5-1 durch die Farbe „grün“ positives Ergebnis, durch die Farbe „gelb“ ein weniger erfolgreiches Ergebnis und durch die Farbe „rot“ ein Nichterreichen des gesteckten Ziels.

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Ergebnisse

	1. Hauptversuch	1. Referenzversuch	2. Referenzversuch	2. Hauptversuch
Verzinkung	elektrolytisch	elektrolytisch	elektrolytisch	lokal APS
Schweißlabor	TU Graz	Fa. Fronius	Fa. Inocon	Fa. Inocon
Zugfestigkeit (N/mm²)	95	90	90	43
Bruchstelle	WEZ Alu	WEZ Alu	WEZ Alu	Interface
Porenbildung	hoch	hoch	wenig	wenig
Porenanzahl	100	70	20	15
Intermetallische Phase (µm)	1,08	1,73	1,83	<0,5

Die Tabelle zeigt, dass der Zugfestigkeitswert bei den APS-verzinkten Blechen mit 43 N/mm² am niedrigsten liegt. Obwohl das Ziel eine möglichst hohe Zugfestigkeit mit Ende der Versuche zu erreichen war, nahmen die Werte mit dem Ablauf der durchgeführten Versuche ständig ab. Die Festigkeit steht somit direkt im Zusammenhang mit der vorhandenen Zinkschicht.

Auch die Bruchstelle bei den Zugversuchen kann auf die Beschichtungsvariante zurückgeführt werden. Denn der Bruch in der Wärmeeinflusszone beim Aluminium-Grundwerkstoff trat nur bei den elektrolytisch-verzinkten Stahlblechen auf. Bei den Versuchen der zweiten Hauptversuchsreihe lag die Bruchstelle im Interface. Dies kann durch das Verbleiben von Zinkreste in der Schweißnaht erklärt werden.

Das Problem der Porenbildung bzw. die Anzahl der Poren in der Schweißnaht konnte mit dem Fortschritt der Versuche stark reduziert werden. Verantwortlich dafür könnte der neu verwendete Zusatzwerkstoff sein, denn die Poren konnten sowohl bei den elektrolytisch-, als auch bei den APS-verzinkten Stahlblechen reduziert werden.

Erfolgreich ist das Unterschreiten des Grenzwertes bei den intermetallischen Phasenbreiten. Diese liegen bei allen Versuchen im zulässigen Bereich.

Ausblick:

Um die Schweißverbindungen mit APS-verzinkten Schichten zu verbessern, liegt das Hauptaugenmerk eindeutig am Beschichtungsprozess. Um eine, mit Bandverzinkung vergleichbare, dünne und homogene Schicht zu erzeugen, müssen Prozessparameter beim atmosphärischen Plasmaspritzen neu definiert und optimiert werden.

Auch die Verwendung eines neu verpackten Zusatzwerkstoffs beim CMT-Prozess hilft stark die Porenbildung zu reduzieren. Die Fa. Fronius International GmbH empfiehlt bei der Verwendung des Zusatzwerkstoffs einen AlSi3Mn statt einen AlSi5 zu verwenden. Denn der Vorteil der Kornverfeinerung kann mit diesem Zusatzwerkstoff in Anspruch genommen werden. Wie sich das Ergebnis der Schweißversuche bei Verwendung des AlSi3Mn auf die Zugfestigkeit, Porenbildung und intermetallische Phase bei APS-verzinkten Stahlblechen auswirkt, müsste systematisch untersucht werden.

6 Verzeichnisse

6.1 Literaturverzeichnis

- [1] "Automobilindustrie," 2015. [Online]. Available: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Wirtschaft/branchenfokus,did=195924.html>. [Accessed: 25-Nov-2015].
- [2] "PKW-Hersteller erreichen EU-Emissionsziel vorzeitig," 2015. [Online]. Available: <http://de.statista.com/infografik/2196/co2-emissionen-von-neuwagen-in-der-eu/>. [Accessed: 25-Nov-2015].
- [3] M. Lesemann, "Fahrzeuggewicht - Kompaktklasse," Euroforum, Stahl im Auto, 2009.
- [4] M. Klein, "Werkstoffkunde Stahl - Leichtbaustähle, Kaltband," Linz, 2013.
- [5] N. Enzinger, *Skriptum zur Vorlesung: Fügetechnik*. Graz: Technische Universität Graz, 2013.
- [6] J. Bruckner and K. Himmelbauer, "CMT überholt etablierte Lehrmeinung - Hochwertigste thermische Verbindungen von Stahl mit Aluminium," p. 6.
- [7] C. Pohle, *Schweißen von Werkstoffkombinationen*, Fachbuchre. Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, 1999.
- [8] O. Pasic, *Skriptum zur Vorlesung: Schweißen von Nichteisenmetallen und Kunststoffen*. Graz: Technische Universität Graz.
- [9] H. Berns and W. Theisen, *Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen*, 3rd ed. Bochum: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [10] U. Fischer, R. Gomeriger, and M. Heinzler, *Tabellenbuch Metall*, 44th ed. Reutlingen: Europa-Lehrmittel, 2008.
- [11] K.-A. van Oeteren, *Feuerverzinkung: ein hochwertiger industrieller Korrosionsschutz*. Expert Verlag, 1988.
- [12] "Wärmebehandlung von Stahl," 2011. [Online]. Available: <http://www.dereirtschaftsingenieur.de/index.php/waermebehandlung-von-stahl/>. [Accessed: 02-Dec-2015].
- [13] H. Schuhmann and H. Oettel, *Metallographie*, 14th ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2005.
- [14] C. Horst, *Skriptum zur Vorlesung: Werkstoffkunde*. Graz, 2008.
- [15] voestalpine, "Blechwerkstoffe im Fahrzeugbau," 2013.
- [16] voestalpine, "Kaltgewalztes Stahlband - Technische Lieferbedingungen," p. 40, 2012.
- [17] "DIN EN 1780-1, Aluminium und Aluminiumlegierungen, Bezeichnung von legiertem Aluminium in Masseln, Vorlegierungen und Gussstücken, Teil 1: Numerisches Bezeichnungssystem," 2003.

- [18] “DIN EN 573-1, Aluminium und Aluminiumlegierungen, Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug, Teil 1: Numerisches Bezeichnungssystem,” 2004.
- [19] A. Kuduzovic, “Diplomarbeit: Untersuchung verschiedener Schweißverfahren zur Verbindung von Stahl Nirosta H400 mit Aluminium AlMg3,” Technische Universität Graz, 2007.
- [20] “Technisches Datenblatt: EN AW-6082 (AlMgSi1) T651,” 2002.
- [21] ASM International, *ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams*, vol. 7, no. 11. 2004.
- [22] Fronius International GmbH, *Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie*. Wels: WEKA MEDIA GmbH & Co. KG, 2013.
- [23] “Beschichtungswerkstoffe,” 2016. [Online]. Available: http://www.electrical-contacts-wiki.com/index.php/Galvanische_Beschichtung. [Accessed: 11-Oct-2016].
- [24] ALUNOX, “Technisches Datenblatt AX-4043 - AX-ALSi5,” 2009.
- [25] P. Maaß and P. Peißker, *Handbuch Feuerverzinken*, 3rd ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2008.
- [26] G. Angeli, “Metallische Schicht und Gradientenwerkstoffe,” Linz, 2012.
- [27] “Oberflächenveredlung von Bandstahl.” [Online]. Available: <http://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahltechnologie/oberflaechenveredelung/>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [28] “Forum Thermisches Spritzen,” 2016. [Online]. Available: <http://www.forum-thermisches-spritzen.de/allgemeines/was-ist-thermisches-spritzen/p30-1-grundlagen/>. [Accessed: 12-Apr-2016].
- [29] B. Rother and J. Vetter, *Plasma- Beschichtungsverfahren und Hartstoffschichten*, 1st ed. Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1992.
- [30] A. Sadovoy, “Doktorarbeit: Modeling and offline simulation of thermal spray coating process for gas turbine applications,” Technische Universität Darmstadt, 2014.
- [31] N. Enzinger, P. Loidolt, C. Wiednig, M. Stütz, and C. Sommitsch, “Electron beam welding of thick-walled copper components,” *Science and technology of welding and joining*, 2016.
- [32] “DIN 8528-1, Schweißbarkeit; metallische Werkstoffe, Begriffe,” 1973.
- [33] H. J. Herrmann, “Physikalische Eigenschaften Eisenwerkstoffe & NE-Metalle,” *ETH*, p. 103, 2015.
- [34] “Erklärungen zum Kohlenstoffäquivalent.” [Online]. Available: <http://www.erl-gmbh.de/home/fachwissen/berechnungen/kohlenstoffaequivalent/erklaerungen.html>. [Accessed: 30-Aug-2016].
- [35] V. R. Ryabov, “Aluminizing of Steel,” *Oxonion Press*, pp. 32–48, 1985.
- [36] “Hinweise zur Auswahl von Gasschläuchen für das Schutzgasschweißen - Merkblatt DVS 0971,” no. 02 11, pp. 2–5, 2012.

- [37] T. Weirather, "Diplomarbeit: Untersuchung einer mittels Lichtbogen-Schweißverfahrens (MIG/WIG) hergestellten Stahl-Aluminium-Überlappverbindung für den Karosseriebau," Technische Universität Graz, 2005.
- [38] F. Trommer, *CMT- und Impulslichtbogenprozess allein und in Kombination für einen erweiterten Leistungsbereich*. Düsseldorf: DVS-Verlag Düsseldorf, 2008.
- [39] B. Giger, "Einführung in die statistische Versuchsplanung - Einführung in Design of Experiments (DoE)," *TQU AG Winterthur*, p. 45, 2009.
- [40] W. Kleppmann, *Taschenbuch Versuchsplanung*, 3rd ed. Essingen: Carl Hanser Verlag München Wien, 2003.
- [41] "TransPuls Synergic 3200 CMT," 2016. [Online]. Available: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-491DF6D8-A0C351C6/fronius_international/hs.xsl/79_6073_DEU_HTML.htm#.V4_NI49OJaQ. [Accessed: 20-Jul-2016].
- [42] "Fernbedieneinheit RCU 5000i," 2016. [Online]. Available: https://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-A3D1A9B2-8DF66D79/fronius_international/hs.xsl/79_11526_DEU_HTML.htm#.V4_RB9OJaQ. [Accessed: 20-Jul-2016].
- [43] "ABB IRB 140," 2016. [Online]. Available: <http://new.abb.com/products/robotics/de/industrieroboter/irb-140>. [Accessed: 20-Jul-2016].
- [44] R. Cao, G. Yu, J. H. Chen, and P. C. Wang, "Cold metal transfer joining aluminum alloys-to-galvanized mild steel," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 10, pp. 1753–1763, 2013.

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Durchschnittliche CO ₂ -Emissionen in der EU verkaufter Neuwagen nach Antriebsart (in Gramm CO ₂ pro Kilometer) [2].....	1
Abbildung 1-2: Fahrzeuggewicht Kompaktklasse [3]	2
Abbildung 1-3: Zielsetzung.....	4
Abbildung 1-4: Variantenbaum.....	5
Abbildung 2-1: Verwendete Werkstoffe und deren Anordnung vor dem Schweißprozess.....	6
Abbildung 2-2: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm für stabile und metastabile Ausbildung des Kohlenstoffs [12]	8
Abbildung 2-3: Gefügeanteile verschiedener Stahlsorten [14]	10
Abbildung 2-4: Phasendiagramm Eisen-Aluminium [21].....	16
Abbildung 2-5: Arten der Feuerverzinkung [11].....	19

Abbildung 2-6: Temperaturdurchlauf bei der Glühbehandlung im Feuerverzinkungsprozess	20
Abbildung 2-7: Schichten nach dem Feuerverzinken [26]	21
Abbildung 2-8: Schematischer Aufbau der elektrolytischen Bandverzinkung [27]	22
Abbildung 2-9: Einteilung der Spritzverfahren [28]	23
Abbildung 2-10: Schematische Darstellung des thermischen Spritzens [28]	24
Abbildung 2-11: Bildung der intermetallischen Phase [6]	28
Abbildung 2-12: Wasserstofflöslichkeit von Aluminium und Stahl [8]	30
Abbildung 2-13: Probenwölbung durch unterschiedliche Materialeigenschaften [37]	31
Abbildung 2-14: Tropfenübergang beim CMT-Prozess [38]	32
Abbildung 2-15: Prozesskette der DoE [39]	34
Abbildung 2-16: Wechselwirkungsdiagramm einer chemischen Reaktion [39]	35
Abbildung 2-17: Konturdiagramm und Oberflächenschaubild einer chemischen Reaktion [39]	36
Abbildung 3-1: Experimenteller Ablauf	37
Abbildung 3-2: Probengeometrie der Vor-, Haupt- und Referenzversuchsreihe	38
Abbildung 3-3: Spannsituation der Versuche an der TU Graz	39
Abbildung 3-4: Spannsituation der Versuche bei der Fa. INOCON Technologie GmbH	40
Abbildung 3-5: Brennerstellung des CMT-Brenners während des Prozesses [37]	41
Abbildung 3-6: Offseterklärung CMT-Brenner	41
Abbildung 3-7: Versuchsplan für 1. Hauptversuchsreihe im EXCEL	44
Abbildung 3-8: Beschichtungsplan für die 2. Hauptversuchsreihe	47
Abbildung 3-9: Probenentnahmeplan	47
Abbildung 4-1: Schweißnahtaussehen des zweiten Versuchs der ersten Referenzversuchsreihe mit einer Geschwindigkeit von 180 cm/min	49
Abbildung 4-2: Schweißnahtaussehen des dritten Versuchs der ersten Referenzversuchsreihe mit einer Geschwindigkeit von 60 cm/min	50
Abbildung 4-3: Ungenaue Offseteinstellung beim dritten Versuch der zweiten Referenzversuchsreihe	51
Abbildung 4-4: Zugfestigkeitsdiagramm der verschiedenen Versuche im Vergleich mit dem Zusatzwerkstoff	52
Abbildung 4-5: Zugfestigkeiten von Stahl-Aluminiumverbindungen [22]	53

Abbildung 4-6: Bruchstellen nach Zugversuchen bei der 1. Hauptversuchsreihe (HV1), 1. Referenzversuchsreihe (RV1), 2. Referenzversuchsreihe (RV2) und 2. Hauptversuchsreihe (HV2)	54
Abbildung 4-7: Lichtmikroskopische Untersuchung der Porenbildung beim Querschleiff des 1. Hauptversuch (HV1), 1. Referenzversuch (RV1), 2. Referenzversuch (RV2) und 2. Hauptversuch (HV2)	55
Abbildung 4-8: Überblick der Porenbildung des dritten Schweißversuchs des HV2 unter dem Rasterelektronenmikroskop	56
Abbildung 4-9: Zinkreste im Interface des dritten Schweißversuchs des HV2 unter dem Rasterelektronenmikroskop	57
Abbildung 4-10: Unvollständige Anbindung der Schweißnaht mit der Stahloberfläche des ersten Schweißversuchs des HV2 unter dem Rasterelektronenmikroskop	57
Abbildung 4-12: Digitales Röntgenbild des ersten Schweißversuchs des HV2	58
Abbildung 4-16: Zinkanreicherung im Nahtauslauf des ersten Schweißversuchs der zweiten Referenzversuchsreihe unter dem Rasterelektronenmikroskop	59
Abbildung 4-17: Zinkanreicherung in der Schweißnaht des ersten Versuchs der zweiten Hauptversuchsreihe unter dem Rasterelektronenmikroskop	60
Abbildung 4-18: Zinkanreicherung in der Schweißnahtmitte des ersten Versuchs der zweiten Hauptversuchsreihe unter dem Rasterelektronenmikroskop	61
Abbildung 4-19: Zinkreste an der Stahloberfläche in der Schweißnahtmitte des ersten Versuchs der zweiten Hauptversuchsreihe unter dem Rasterelektronenmikroskop ..	62
Abbildung 4-20: Repräsentative Messung der intermetallische Phasenbreite des dritten Schweißversuchs der ersten Referenzversuchsreihe.....	63
Abbildung 4-21: Intermetallische Phasenbreiten der verschiedenen Versuche	63
Abbildung 7-1: Produktdatenblatt von Argon 4.8.....	74
Abbildung 7-2: Blechwerkstoffe im Fahrzeugbau	75
Abbildung 7-3: Datenblatt des Aluminiumwerkstoffs EN AW-6082	76
Abbildung 7-4: Datenblatt des Zusatzwerkstoffs AX-ALSi5	77
Abbildung 7-5: Schweißnahtaussehen des dritten Versuchs der ersten Referenzversuchsreihe mit einer Geschwindigkeit von 105 cm/min	78
Abbildung 7-6: Schweißnahtaussehen des ersten Versuchs der zweiten Hauptversuchsreihe mit einer Geschwindigkeit von 105 cm/min	78
Abbildung 7-7: Digitales Röntgenbild des ersten Schweißversuchs des RV2	79
Abbildung 7-8: Digitales Röntgenbild des zweiten Schweißversuchs des HV2	79

Abbildung 7-9: Digitales Röntgenbild des dritten Schweißversuchs des HV2	79
Abbildung 7-10: Digitales Röntgenbild des vierten Schweißversuchs des HV2	80
Abbildung 7-11: TU Graz Prüfprotokoll der Zugversuche	82

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Eigenschaften von reinem Eisen, Reinstaluminium und Zink bei 20°C und 1,013 bar [8]–[11]	7
Tabelle 2-2: Überblick Stahlsorten [15].....	11
Tabelle 2-3: Wirkung der Legierungselemente [14]	13
Tabelle 2-4: Serien von Aluminiumlegierungen [17], [18]	14
Tabelle 2-5: Eigenschaften der Aluminium Knetlegierung EN AW-6082 [20]	15
Tabelle 2-6: Mechanische Eigenschaften AISi5 [24]	17
Tabelle 2-7: Schichtdicken beim Feuerverzinken [11]	21
Tabelle 2-8: Vergleich der Zink-Beschichtungsverfahren	25
Tabelle 2-9: Verbindungen der intermetallischen Phasen [6]	29
Tabelle 3-1: Schweißparameter der 1. Vorversuchsreihe.....	43
Tabelle 3-2: Schweißparameter der 2. Vorversuchsreihe.....	43
Tabelle 3-3: Minima und Maxima der Schweißparameter für DoE der 1. Hauptversuchsreihe.....	44
Tabelle 3-4: Schweißparameter der 1. Hauptversuchsreihe.....	45
Tabelle 3-5: Schweißparameter der 1. Referenzversuchsreihe	45
Tabelle 3-6: Schweißparameter der 2. Referenzversuchsreihe	46
Tabelle 3-7: Schweißparameter inklusive Beschichtungsparameter der 2. Hauptversuchsreihe.....	46
Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Ergebnisse.....	64

6.4 Formelverzeichnis

Formel 2-1: Kohlenstoffäquivalent [34]	27
--	----

6.5 Abkürzungsverzeichnis

CMT Cold Metal Transfer

DoE	Design of Experiments
HV	Hauptversuch
IMP	Intermetallische Phase
Kfz	kubisch flächenzentriert
Krz	kubisch raumzentriert
MIG	Metallschutzgasschweißen mit inertem Gas
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
RV	Referenzversuch
VV	Vorversuch

7 Anhang

7.1 Produktdatenblatt Argon 4.8



THE LINDE GROUP
Linde

→ Produktdatenblatt

Argon 4.8

Reinheit, %: $\geq 99,998$

Nebenbestandteile, ppm:

O ₂	≤ 3
N ₂	≤ 10
H ₂ O	≤ 5
KW	≤ 0,5

Angaben sind als ideale Volumenanteile (= Molanteile) zu verstehen

Lieferarten: Stahlflaschen

Rauminhalt, [Liter]	Fülldruck, ca. [bar] ca. bar	Füllmenge ca. [m ³]
10	200	2,1
50	200	10,7

Flaschenbündel

Rauminhalt, [Liter]	Fülldruck, ca. [bar] ca. bar	Füllmenge ca. [m ³]
600	200	128,4

Sicherheit: EG-Sicherheitsdatenblatt

Umrechnungszahlen:

m ³ Gas (15°C, 1 bar)	l flüssig bei T _l	kg
1	1,197	1,669
0,835	1	1,394
0,599	0,717	1

Linde Gas GmbH
 Carl-von-Linde-Platz 1, A-4651 Stadl-Paura
 Telefon 050.4273, Fax 050.4273-1900, www.linde-gas.at

Änderungen vorbehalten
 Stand 24.07.2015

→ Argon 4.8		2 von 2						
Kennzeichnung:	Flaschenschulter: Dunkelgrün RAL 6001 Aufkleber: Argon 4.8 Ventilanschluss: Fülldruck 200 bar: W 21,80 x 1/14 nach DIN 477 Nr.6							
Eigenschaften:	Verdichtetes Gas, erstickend, chemisch inert MAK-Wert: nicht festgelegt Chemisches Zeichen: Ar Molare Masse: 39,948 g/mol Tripelpunkt: <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Temperatur</th> <th style="text-align: left;">Druck</th> <th style="text-align: left;">Schmelzwärme</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>83,8 K (-189,35 °C)</td> <td>687 bar</td> <td>29,3 kJ/kg</td> </tr> </tbody> </table> Kritische Temperatur: 150,75 K (-122,4 °C) Siedetemperatur bei 1,013 bar (Ts): 87,29 K (-185,86 °C) Relative Dichte bezogen auf trockene Luft (15°C, 1 bar): 1,380	Temperatur	Druck	Schmelzwärme	83,8 K (-189,35 °C)	687 bar	29,3 kJ/kg	
Temperatur	Druck	Schmelzwärme						
83,8 K (-189,35 °C)	687 bar	29,3 kJ/kg						
Anwendungen:	Schutzgas für alle Vorgänge, die schon durch Spuren von reaktionsfähigen Gasen gestört werden:							
Andere Lieferformen:	Ar - Gemisch mit N2, Argon , Argon 5.0, Argon 5.3, Argon 5.6, Argon 6.0, Argon 7.0, Argon f. Spektrometrie, Argon flüssig Gemische von Argon mit anderen Gasen in genau definierten Zusammensetzungen. z.B. Premixe für Excimer-Laser; Betriebsgase für die ECD-Analytik (P5 / P10 - Gas ECD); Betriebsgase für Proportionalzählrohre (P10-Gas für Spektrometrie); Schweißschutzgase. Prozessgas nach DIN EN ISO 14175:11							
								
Linde Gas GmbH Carl-von-Linde-Platz 1, A-4651 Stadl-Paura Telefon 050.4273, Fax 050.4273-1900, www.linde-gas.at Anderungen vorbehalten Stand 24.07.2015								

Abbildung 7-1: Produktdatenblatt von Argon 4.8

7.2 Blechwerkstoffe im Fahrzeugbau

Normbezeichnung		Benennung ältere Bezeichnungen		Gebrauchsbezeichnungen Handelsnamen	Norm	Zugfestigkeit R_m in N/mm ²
Tiefziehstähle, kaltgewalzt (Weichstähle)						
DC01	St12 / FeP01				EN 10130	270..410
DC03	RRSt13				EN 10130	270..370
DC04	St14 / FeP04				EN 10130	270..360
DC05					EN 10130	270..330
DC06	IF18				EN 10130	270..330
DC07					EN 10130	260..310
DC01+ZE	St12 / FeP01				EN 10162	270..410
DC03+ZE	RRSt13				EN 10162	270..370
DC04+ZE	St14 / FeP04				EN 10162	270..360
DC06+ZE					EN 10162	270..330
DC06+ZE	IF18				EN 10162	270..360
DC07+ZE					EN 10162	260..310
DX61D+Z					EN 10346	270..600
DX62D+Z					EN 10346	270..420
DX63D+Z					EN 10346	270..380
DX64D+Z					EN 10346	260..360
DX66D+Z					EN 10346	260..360
Tiefziehstähle, warmgewalzt						
DD11		alform 200 N			EN 10111	max. 440
DD12		alform 200 N			EN 10111	max. 420
DD13		alform 180 N			EN 10111	max. 400
DD14		alform 180 N			EN 10111	max. 380
Höherfeste phosphorlegierte Stähle, kaltgewalzt						
HC180P					EN 10268	280..360
HC220P /+ZE	H220P /+ZE	Z StE 220P /+ZE			EN 10268	320..400
HC260P /+ZE	H260P /+ZE	Z StE 260P /+ZE			EN 10268	360..440
HC300P /+ZE	H300P /+ZE	Z StE 300P /+ZE			EN 10268	400..480
HC220PD+Z	H220PD+Z	Z StE 220P+Z			EN 10292	320..400
HC260PD+Z	H260PD+Z	Z StE 260P+Z			EN 10292	370..450
HC300PD+Z	H300PD+Z	Z StE 300P+Z			EN 10292	400..480

voestalpine Giesserei Linz 2013

kein Anspruch auf Vollständigkeit! - Alle Angaben ohne Gewähr!

Abbildung 7-2: Blechwerkstoffe im Fahrzeugbau

7.3 Datenblatt EN AW-6082

EN AW-6082 (AlMgSi1) T651																				
Legierungsangaben																				
Bezeichnung numerisch					EN AW-6082															
Chemisches Symbol					EN AW-AISI1MgMn															
Werkstoff Nr. DIN					3.2315															
Chemische Zusammensetzung nach EN 573-3:																				
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	übrige	Ti	Rest										
0.7-1.3	0.50	0.10	0.40-1.0	0.6-1.2	0.25	-	0.20	0.15	0.10	Al										
Mechanische Eigenschaften																				
Zugfestigkeit	Rm	N/mm ²	275-300																	
Dehngrenze	Rp0,2	N/mm ²	240-255																	
Bruchdehnung	A5/A50	%	-/6-9																	
Brinellhärte	HB		84-91																	
Physikalische Eigenschaften																				
Zustand (in Wort/EN-Code)					warm ausgehärtet			T6/T651												
Spezifisches Gewicht					g/cm ³			2.7												
Elastizitätsmodul					kN/mm ²			69												
Lin. Wärmeausdehnungskoeffizient (20-100°C)					10 ⁻⁶			23.4												
Wärmeleitfähigkeit								165-185												
Spezifische elektrische Leitfähigkeit (20°C)								24-28												
Spezifischer elektrischer Widerstand (20°C)					nΩ x m			42-36												
Schmelzintervall					°C			585-650												
Spezifische Eigenschaften																				
Planheit der Ausgangsformate					mm/m nach EN-485-3/4															
Formstabilität					beriedigend															
Bearbeitbarkeit					gut															
Schweisbarkeit					gut															
Korrosionsbeständigkeit					sehr gut															
Eignung für anodische Oxidation					gut															
Eignung für dekorative anodische Oxidation					bedingt geeignet															
Eignung für Hartanodisierung					gut															
Eignung für Hartematerialierung					gut															
Verfügbare Dicken					6-350		mm													
Verfügbarkeit																				
Verfügbare Dicken in mm																				
Formate mm	6	8	10	12	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
1020 x 2020	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
1270 x 3020			•	•	•	•														
1520 x 3020	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	100	110	120	130	140	145	150	160	180	200	220	230	240	250	260	280	300	330	350	
1020 x 2020	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Anmerkung	Abmessungen ab 40 mm Dicke bei Lagermaterial nur mit Plus toleranzen																			
Legende	• verfügbar ab Lager Häuselmann										o verfügbar innert weniger Tage									
Typische Anwendungen																				
<ul style="list-style-type: none"> Allgemeiner Maschinen- und Apparatebau Seitenplatten (Führungsplatten). Elektrotechnik, Feinmechanik Konstruktionsteile Pumpenkörper 																				
Besondere Hinweise / Vorteile																				
<ul style="list-style-type: none"> 6082 ist eine Universal-Legierung für den Maschinenbau. Gute Kombinationsmöglichkeit mit Pressprodukten der gleichen Legierung, vor allem wenn der gleiche Farbton beim anodischen Oxidieren erwünscht ist. Gute Korrosionsbeständigkeit 																				

Abbildung 7-3: Datenblatt des Aluminiumwerkstoffs EN AW-6082

7.4 Zusatzwerkstoff AX-AISi5

							AX-4043 AISi5	
Norm								
DIN EN ISO 18273			S Al 4043 (AISi5 (A))					
Werkstoff-Nr.			3.2245					
AWS A 5-10			ER 4043					
Anwendung								
Schweißstab/Drahtelektrode aus einer Aluminium-Silizium-Legierung zum WIG- bzw. MIG-Schweißen von Aluminium-Silizium-Legierungen.								
Besondere Hinweise								
Der Schweißnahtbereich muss metallisch blank sein. Bei großen Werkstücken und Wanddicken über 15mm den Bereich der Schweißfuge auf 150-200°C vorwärmen. Beim Schweißen von aushärtbaren Legierungen die Schweißnaht nicht in die mechanisch hoch beanspruchten Bereiche legen.								
Richtanalyse in %								
Al	Si							
Basis	5,0							
Wichtige Grundwerkstoffe								
Aluminium-Silizium-Legierungen sowie artverschiedene Aluminium-Legierungen untereinander, z.B.: AlCuMg1 (3.1325), AlMgSi1 (3.2315), AlZn4,5Mg1 (3.4335).								
Werkstoffeigenschaften								
Schweißverfahren			WIG/MIG			Mechanische und physikalische Gütewerte des Schweißgutes nach DIN EN 1597-1		
Schutzgas			Schweiß-Argon					
Prüftemperatur			20°C					
0,2%-Dehngrenze Rp _{0,2}			[N/mm ²]			90		
Zugfestigkeit R _m			[N/mm ²]			160		
Dehnung A (L ₀ = 5d ₀)%			[%]			15		
Elektrische Leitfähigkeit			[S*m/mm ²]			24-32		
Wärmeleitfähigkeit			[W/(m*K)]			170-190		
Wärmeausdehnungskoeffizient			[1/K]			22,1*10 ⁻⁶		
Anwendbare Schutzgase gemäß DIN EN (ISO 14175)								
Schweiß-Argon								
Zulassungen								
(Aktuellen Umfang bei Bedarf anfordern)								
Lieferformen (gemäß EN ISO 544)								
Spule	Ø mm	0,8	1,0	1,2	1,6	2,4		
Stab	Ø mm	1,6	2,4	3,2	4,0	5,0		
	x1000mm							

Abbildung 7-4: Datenblatt des Zusatzwerkstoffs AX-AISi5

7.5 Schweißnahtaussehen der Schweißversuche



Abbildung 7-5: Schweißnahtaussehen des dritten Versuchs der ersten Referenzversuchsreihe mit einer Geschwindigkeit von 105 cm/min



Abbildung 7-6: Schweißnahtaussehen des ersten Versuchs der zweiten Hauptversuchsreihe mit einer Geschwindigkeit von 105 cm/min

7.6 Digitale Röntgenbilder der Schweißversuche

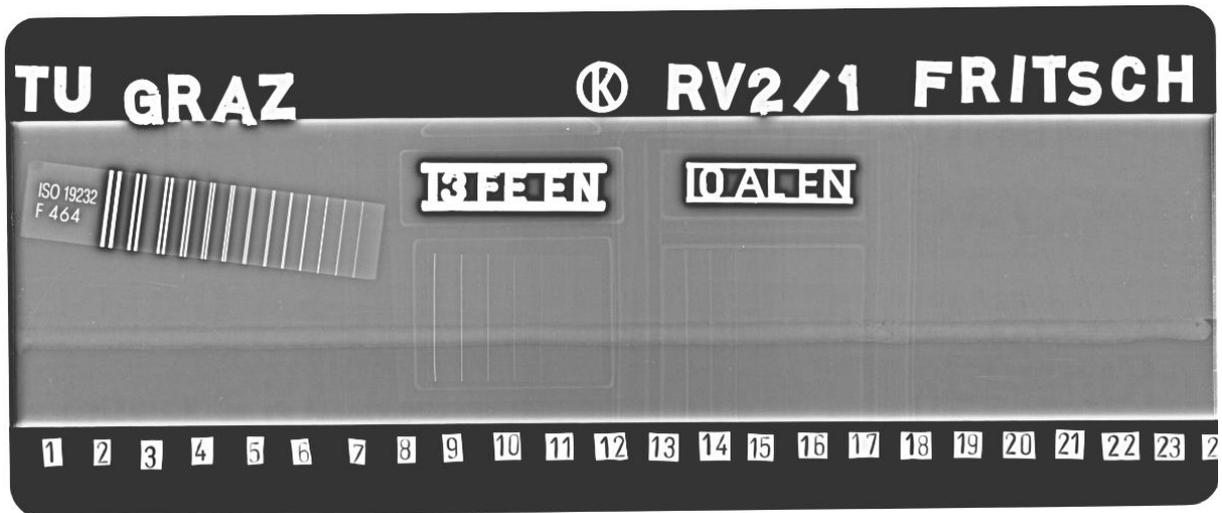


Abbildung 7-7: Digitales Röntgenbild des ersten Schweißversuchs des RV2

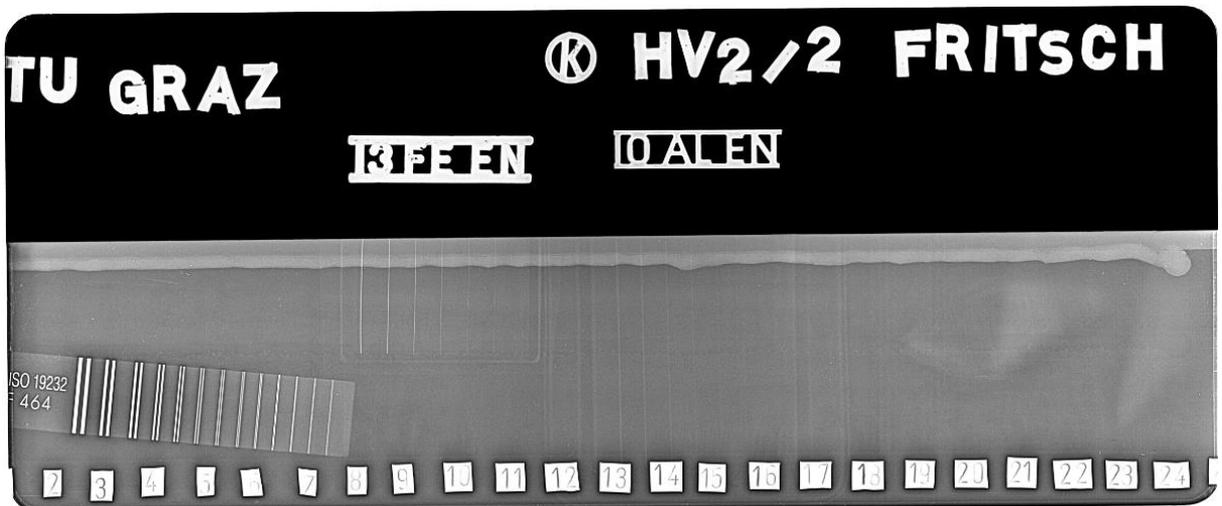


Abbildung 7-8: Digitales Röntgenbild des zweiten Schweißversuchs des HV2



Abbildung 7-9: Digitales Röntgenbild des dritten Schweißversuchs des HV2

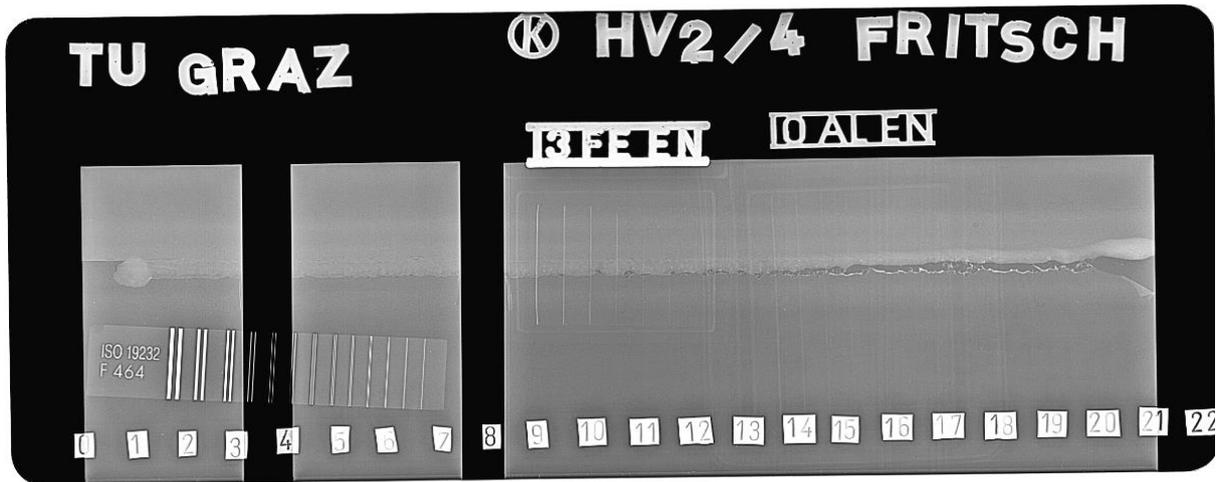


Abbildung 7-10: Digitales Röntgenbild des vierten Schweißversuchs des HV2

7.7 Datenblätter Zugversuch

  	20.01.16																																																																																																																																																																
<h3>TU Graz-Prüfprotokoll-Zugversuch</h3>																																																																																																																																																																	
Überschrift : TU Graz-Prüfprotokoll-Zugversuch Prüfnorm : DIN EN ISO 6892-1 Verfahren B (lagegesteuert) Probenotyp : Flachzugprobe Prüfer : Stephan Fritsch Bemerkung : GW Alu: 1-3, VV_2: 4-7, HV_1: 8-10 & 12, RV_1: 11 & 13-15, RV_2: 16-18, HV_2: 19-22																																																																																																																																																																	
Prüfgeschwindigkeiten : Verfahren B Geschwindigkeit Streckgrenze : 2 mm/min Vorkraft : 200 N Prüfgeschwindigkeit : 4 mm/min Geschwindigkeit E-Modul : 2 mm/min																																																																																																																																																																	
<h4>Prüfergebnisse:</h4>																																																																																																																																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">Legende</th> <th style="width: 5%;">Nr</th> <th style="width: 30%;">Art und Bezeichnung</th> <th style="width: 10%;">R_m MPa</th> <th style="width: 10%;">F_m kN</th> <th style="width: 10%;">a₀ mm</th> <th style="width: 10%;">b₀ mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="background-color: red;"></td><td>1</td><td>GW_AW6082_1</td><td>338</td><td>10.04</td><td>1.5</td><td>19.8</td></tr> <tr><td style="background-color: green;"></td><td>2</td><td>GW_AW6082_2</td><td>340</td><td>10.19</td><td>1.5</td><td>19.96</td></tr> <tr><td style="background-color: blue;"></td><td>3</td><td>GW_AW6082_3</td><td>339</td><td>10.11</td><td>1.5</td><td>19.91</td></tr> <tr><td style="background-color: orange;"></td><td>4</td><td>DX54/Alu_1</td><td>95</td><td>4.01</td><td>2.3</td><td>18.4</td></tr> <tr><td style="background-color: purple;"></td><td>5</td><td>DX54/Alu_2</td><td>99</td><td>4.12</td><td>2.22</td><td>18.82</td></tr> <tr><td style="background-color: cyan;"></td><td>6</td><td>DC04/Alu_1</td><td>107</td><td>4.23</td><td>2.2</td><td>17.9</td></tr> <tr><td style="background-color: yellow;"></td><td>7</td><td>DC04/Alu_2</td><td>127</td><td>4.62</td><td>1.85</td><td>19.58</td></tr> <tr><td style="background-color: brown;"></td><td>8</td><td>DC04/Alu_1</td><td>88</td><td>2.64</td><td>1.5</td><td>19.9</td></tr> <tr><td style="background-color: darkgreen;"></td><td>9</td><td>DC04/Alu_2</td><td>100</td><td>3.19</td><td>1.6</td><td>20</td></tr> <tr><td style="background-color: darkblue;"></td><td>10</td><td>DC04/Alu_3</td><td>70</td><td>2.08</td><td>1.53</td><td>19.3</td></tr> <tr><td style="background-color: gold;"></td><td>11</td><td>DC04/Alu_1_RV1_1</td><td>72</td><td>2.22</td><td>1.6</td><td>19.2</td></tr> <tr><td style="background-color: magenta;"></td><td>12</td><td>DC04/Alu_2_HV1_5</td><td>95</td><td>2.81</td><td>1.6</td><td>19.4</td></tr> <tr><td style="background-color: teal;"></td><td>13</td><td>DC04/Alu_3_RV1_2</td><td>111</td><td>3.19</td><td>1.54</td><td>18.7</td></tr> <tr><td style="background-color: olive;"></td><td>14</td><td>DC04/Alu_4_RV1_3</td><td>106</td><td>3.17</td><td>1.64</td><td>19.7</td></tr> <tr><td style="background-color: darkred;"></td><td>15</td><td>DC04/Alu_5_RV1_4</td><td>71</td><td>2.02</td><td>1.56</td><td>18.4</td></tr> <tr><td style="background-color: limegreen;"></td><td>16</td><td>DC04/Alu_1_RV2_1</td><td>82</td><td>2.59</td><td>1.56</td><td>19.77</td></tr> <tr><td style="background-color: darkcyan;"></td><td>17</td><td>DC04/Alu_2_RV2_2</td><td>90</td><td>2.84</td><td>1.53</td><td>19.74</td></tr> <tr><td style="background-color: orange;"></td><td>18</td><td>DC04/Alu_3_RV2_3</td><td>97</td><td>3.00</td><td>1.6</td><td>19.83</td></tr> <tr><td style="background-color: purple;"></td><td>19</td><td>DC01/Alu_4_HV2_1_1/2</td><td>39</td><td>1.17</td><td>1.5</td><td>19.72</td></tr> <tr><td style="background-color: cyan;"></td><td>20</td><td>DC01/Alu_5_HV2_1_2/2</td><td>41</td><td>1.31</td><td>1.5</td><td>19.9</td></tr> <tr><td style="background-color: yellow;"></td><td>21</td><td>DC01/Alu_6_HV2_4_1/2</td><td>38</td><td>1.13</td><td>1.5</td><td>19.82</td></tr> <tr><td style="background-color: darkred;"></td><td>22</td><td>DC01/Alu_7_HV2_4_2/2</td><td>48</td><td>1.43</td><td>1.5</td><td>19.77</td></tr> </tbody> </table>	Legende	Nr	Art und Bezeichnung	R _m MPa	F _m kN	a ₀ mm	b ₀ mm		1	GW_AW6082_1	338	10.04	1.5	19.8		2	GW_AW6082_2	340	10.19	1.5	19.96		3	GW_AW6082_3	339	10.11	1.5	19.91		4	DX54/Alu_1	95	4.01	2.3	18.4		5	DX54/Alu_2	99	4.12	2.22	18.82		6	DC04/Alu_1	107	4.23	2.2	17.9		7	DC04/Alu_2	127	4.62	1.85	19.58		8	DC04/Alu_1	88	2.64	1.5	19.9		9	DC04/Alu_2	100	3.19	1.6	20		10	DC04/Alu_3	70	2.08	1.53	19.3		11	DC04/Alu_1_RV1_1	72	2.22	1.6	19.2		12	DC04/Alu_2_HV1_5	95	2.81	1.6	19.4		13	DC04/Alu_3_RV1_2	111	3.19	1.54	18.7		14	DC04/Alu_4_RV1_3	106	3.17	1.64	19.7		15	DC04/Alu_5_RV1_4	71	2.02	1.56	18.4		16	DC04/Alu_1_RV2_1	82	2.59	1.56	19.77		17	DC04/Alu_2_RV2_2	90	2.84	1.53	19.74		18	DC04/Alu_3_RV2_3	97	3.00	1.6	19.83		19	DC01/Alu_4_HV2_1_1/2	39	1.17	1.5	19.72		20	DC01/Alu_5_HV2_1_2/2	41	1.31	1.5	19.9		21	DC01/Alu_6_HV2_4_1/2	38	1.13	1.5	19.82		22	DC01/Alu_7_HV2_4_2/2	48	1.43	1.5	19.77
Legende	Nr	Art und Bezeichnung	R _m MPa	F _m kN	a ₀ mm	b ₀ mm																																																																																																																																																											
	1	GW_AW6082_1	338	10.04	1.5	19.8																																																																																																																																																											
	2	GW_AW6082_2	340	10.19	1.5	19.96																																																																																																																																																											
	3	GW_AW6082_3	339	10.11	1.5	19.91																																																																																																																																																											
	4	DX54/Alu_1	95	4.01	2.3	18.4																																																																																																																																																											
	5	DX54/Alu_2	99	4.12	2.22	18.82																																																																																																																																																											
	6	DC04/Alu_1	107	4.23	2.2	17.9																																																																																																																																																											
	7	DC04/Alu_2	127	4.62	1.85	19.58																																																																																																																																																											
	8	DC04/Alu_1	88	2.64	1.5	19.9																																																																																																																																																											
	9	DC04/Alu_2	100	3.19	1.6	20																																																																																																																																																											
	10	DC04/Alu_3	70	2.08	1.53	19.3																																																																																																																																																											
	11	DC04/Alu_1_RV1_1	72	2.22	1.6	19.2																																																																																																																																																											
	12	DC04/Alu_2_HV1_5	95	2.81	1.6	19.4																																																																																																																																																											
	13	DC04/Alu_3_RV1_2	111	3.19	1.54	18.7																																																																																																																																																											
	14	DC04/Alu_4_RV1_3	106	3.17	1.64	19.7																																																																																																																																																											
	15	DC04/Alu_5_RV1_4	71	2.02	1.56	18.4																																																																																																																																																											
	16	DC04/Alu_1_RV2_1	82	2.59	1.56	19.77																																																																																																																																																											
	17	DC04/Alu_2_RV2_2	90	2.84	1.53	19.74																																																																																																																																																											
	18	DC04/Alu_3_RV2_3	97	3.00	1.6	19.83																																																																																																																																																											
	19	DC01/Alu_4_HV2_1_1/2	39	1.17	1.5	19.72																																																																																																																																																											
	20	DC01/Alu_5_HV2_1_2/2	41	1.31	1.5	19.9																																																																																																																																																											
	21	DC01/Alu_6_HV2_4_1/2	38	1.13	1.5	19.82																																																																																																																																																											
	22	DC01/Alu_7_HV2_4_2/2	48	1.43	1.5	19.77																																																																																																																																																											
DA Fritsch_Zugversuch.zs2	Seite 1/2																																																																																																																																																																



20.01.16

Seriengrafik:

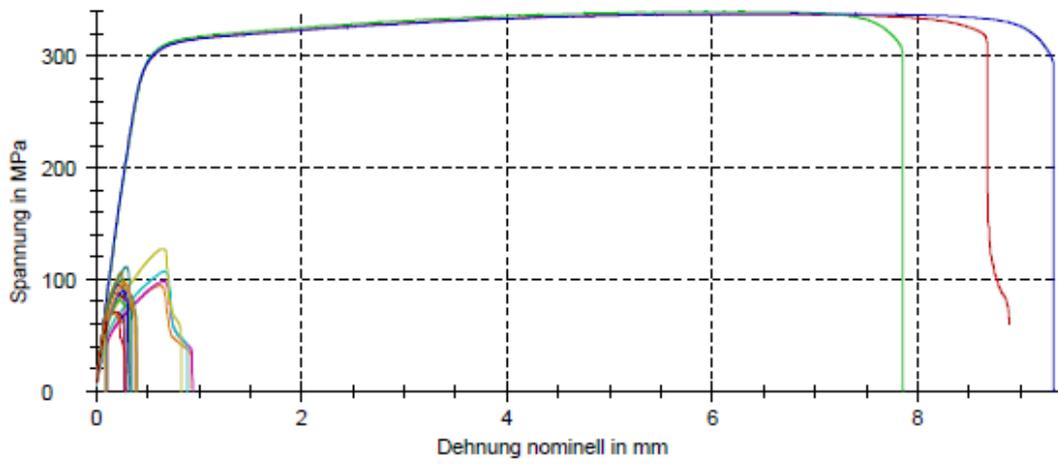


Abbildung 7-11: TU Graz Prüfprotokoll der Zugversuche