

Martin Schwald BSc

Magnetische Manipulation des Lichtbogens beim Engspalt- schweißen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Leonhard Weingrill Dipl.-Ing.

Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik

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.

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich fachlich und persönlich unterstützt haben und dadurch zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben. Ich möchte mich beim Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik, im Besonderen bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christof Sommitsch bedanken, der diese Masterarbeit ermöglicht hat. Auch möchte ich mich speziell bei meinem Beurteiler, Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Norbert Enzinger, bedanken, welcher durch seine fachliche Unterstützung wesentlich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ein großes Dankeschön gebührt meinem Betreuer, Dipl.-Ing. Leonhard Weingrill, für eine „ghörige“ Betreuung – trotz so manchen Verständigungsschwierigkeiten.

Des Weiteren gehören hier noch alle Mitarbeiter, speziell der Fügegruppe und des Labors, erwähnt, die mir stets in sämtlichen Belangen geholfen und für viele interessante Gespräche gesorgt haben. Hier möchte ich noch gesondert Dipl.-Ing. Dr. techn. Rudolf Vallant meinen Dank aussprechen, der mir beim ein oder anderen metallkundlichen Kolloquium stets mit großem Enthusiasmus geholfen hat alle Klarheiten zu beseitigen.

Mein größter Dank gilt meiner lieben Mutter Amanda und meinem Vater Hubert, für eine bedingungslose Unterstützung während all der Jahre und die Ermöglichung dieser Ausbildung. Ebenso bedanke ich mich bei meinen lieben Schwestern Daniela und Sabine, für all den Rückhalt den ich erhalten habe.

Zu guter Letzt gilt mein Dank meinen treuen Mitbewohnern Lukas und Sepp – für unvergessliche Jahre in Graz.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde das schweißtechnologisches Verbesserungspotential der magnetischen Lichtbogenmanipulation beim MAG-Wurzelschweißen von Eisenbahnschienen der Stahlgüte R260 untersucht. Hierzu wurde auf der Schweißanlage mit Linear-tisch des IMAT ein Versuchsaufbau mit engspalttauglichem Magnetjoch, unter Zuhilfenahme einer FE-Simulation, ausgelegt und erstellt. Während der Versuchsdurchführung wurde die Probengeometrie samt Positioniervorrichtung sukzessive der finalen Schweißaufgabe, einer Engspaltschweißung im Gleis, angenähert. Auswertungen durch makroskopische Querschnitte und Aufnahmen der Hochgeschwindigkeits-Kamera erlaubten eine iterative Anpassung aller Eingangsparameter bis hin zum bestmöglichen Parameterset hinsichtlich seitlichem Einbrand und Wurzelerschließung. Es stellte sich heraus, dass sich der seitlich ausgelenkte Sprühlichtbogen positiv auf das Einbrandbild in Form eines erhöhten seitlichen Einbrandes und einer stärkeren Flankenerschließung auswirkte, was in einer über die ganze Länge durchgeschweißten Wurzel resultierte. Die anschließende metallographische Untersuchung brachte hervor, dass statt dem, beim AT-Schweißen üblichen Härteabfall, ein durch ein feinperlitisches Gefüge bedingter Anstieg der Härte erreicht werden konnte. Zusätzlich ist die Breite der WEZ im Vergleich zu einer AT-Schweißung um in etwa 75% verringert worden.

Abstract

In this work, the welding potential of the magnetic arc-deflection during the GMA root welding of rails was investigated. For this purpose, an experimental setup was designed for the welding system and programmable linear axis at the IMAT laboratories. It included a narrow-gap magnetic yoke, which was designed with the help of a FE-simulation of the magnetic flux density in the welded area. During the experiments, the sample geometry and the positioning device was successively adapted to the final narrow gap rail-weld task. Results were evaluated by means of macroscopic cross-sections and images of the high-speed camera and allowed an iterative adaptation of all input parameters to the best possible parameter set with regard to sidewall fusion and root penetration. It turned out that the sidewise deflected spray arc had a positive effect on the root-welds, which was shown by an over the whole length continuously penetrated root. The following metallographic investigation showed that a better, hard and fine-pearlitic microstructure was achieved in the HAZ, and thus the elsewhere present (aluminothermic rail welding) drop in hardness could be avoided. In addition to the optimized geometry of the penetration the width of the HAZ was reduced by more than 75% in comparison to an aluminothermic rail weld.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Ausgangssituation und Aufgabenstellung.....	9
2	Literatur.....	11
2.1	Schienen	11
2.1.1	Schienenengeometrie	11
2.1.2	Schienenstahl	13
2.1.3	Schweißbeignung	18
2.2	Schienenschweißverfahren	19
2.2.1	Abbrennstumpfschweißen.....	19
2.2.2	Gaspressschweißen	19
2.2.3	Aluminothermisches Gießschmelzschweißen.....	19
2.2.4	Lichtbogenhandschweißen	20
2.3	Metallschutzgasschweißen.....	21
2.4	Der Schweißlichtbogen.....	25
2.4.1	Kräfte im Schweißlichtbogen.....	29
2.4.2	Elektromagnetische Grundlagen.....	31
2.4.3	Blaswirkung.....	33
2.5	Lichtbogenmanipulation zur Verbesserung der Schweißnaht beim Engspaltschweißen	34
2.5.1	Mechanische Lichtbogenmanipulation	34
2.5.2	Magnetische Lichtbogenmanipulation	35
3	Vorversuche.....	37
4	Auslegung des Magnetjochs	41
4.1	FE-Simulation des Magnetfeldes im Schweißspalt.....	42
4.1.1	Simulationsmodell.....	42
4.1.2	Simulationsergebnisse	44
4.1.3	Validierung der Simulation	48
4.1.4	Diskussion und Verwertung der Simulationsergebnisse	49
5	Schweißversuche.....	52
5.1	Versuchsdurchführung	52
5.1.1	Schweißanlage	52
5.1.2	Drahtzusatzwerkstoff	54

5.1.3	Schweißparameter-Variation.....	54
5.2	Versuchsserie 0 „Platte“	56
5.2.1	Ergebnisse der Versuchsserie	58
5.3	Versuchsserie 1 „Rippen“	59
5.3.1	Ergebnisse der Versuchsserie	62
5.4	Versuchsserie 2 „Engspalt mit Einlegeblech“	68
5.4.1	Ergebnisse der Versuchsserie	72
5.5	Versuchsserie 3 „Schienenfuß mit Einlegeblech“	79
5.5.1	Ergebnisse der Versuchsserie	82
6	Zusammenfassung.....	90
7	Ausblick.....	92
8	Abbildungsverzeichnis	97
9	Tabellenverzeichnis	102
10	Formelverzeichnis.....	103

1 Einleitung

Der spezifische CO₂ Ausstoß vom Warentransport durch LKW's ist in etwa fünfmal so hoch wie der durch die Eisenbahn. Allgemein kann 25% des weltweiten CO₂ Ausstoßes dem Transport zugerechnet werden. Gerade in Zeiten des fortschreitenden Klimawandels ist die wirtschaftliche und gesellschaftliche Relevanz einer gut funktionierenden und kosteneffizienten Eisenbahninfrastruktur somit sehr groß. [1]

Durch ständig zunehmende Personen- und Gütertransportleistungen müssen Schienen in modernen Eisenbahnstrecken hohen Ermüdungs- und Verschleißbelastungen standhalten. Diesen steigenden Anforderungen wird seitens der Schienenhersteller mit hochfesten und harten perlitischen und in letzter Zeit auch bainitische Schienenstahlgüten begegnet. [2]

In der Produktion, bei der Verlegung von Gleisen und bei der Reparatur und Instandhaltung werden Schienen geschweißt. Beim Schweißen von Schienen kommt es zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften im Bereich der Wärmeeinflusszone (WEZ), weshalb diese möglichst klein zu halten ist. Um im Werk bei der Produktion einzelne Schienensegmente zu verschweißen, kommt das Abbrennstumpfschweißen (ABS) zum Einsatz. Dieses Pressschweißverfahren führt zu nahezu keinem Verlust der mechanischen Eigenschaften moderner Schienen. [2]

Das aluminothermische (AT) Schweißen ist, nach dem ABS-Schweißen bei der Produktion, das weltweit am zweithäufigsten angewandte Verfahren mit etwa 2,5 Mio. Schweißungen pro Jahr. Dieses geschichtsträchtige Verfahren behauptet sich vor allem durch seine einfache Anwendbarkeit im Gleis bei der Verlegung und durch das über die Jahre gewonnene Knowhow. Prozessbedingt ergeben sich beim AT-Schweißen schlechte Eigenschaften durch die Entstehung eines Gussgefüges in der Schweißzone und der, im Vergleich zum ABS-Schweißen, sehr großen WEZ. Das Verfahren stößt insbesondere bei den modernen Schienenstählen und den damit verbundenen Qualitätsansprüchen vermehrt an seine Grenzen. [3]

Nicht zuletzt aufgrund der großen Fortschritte in den letzten Jahrzehnten im Bereich der digitalen Schweißstromquellen und der Automatisierungstechnik stellt ein automatisierter Hochleistungs-Metallschutzgasschweiß (MSG)-Prozess (Metallschutzgasschweißen) eine aussichtsreiche alternative Verfahrensvariante für das Verbindungsschweißen von modernen Schienenstahlgüten im Gleis dar.

Der automatisiert ablaufende MSG-Prozess würde folgende Vorteile bieten:

- I stark verringerte Größe der WEZ im Vergleich zu AT-Schweißung
- I kein Gussgefüge, daher bessere Zähigkeitseigenschaften des Schweißguts
- I kein Einfluss der Fertigkeiten des Schweißers und somit besser kontrollierbare Qualität und Reproduzierbarkeit
- I Schweißung Lage für Lage anpassbar (Schweißzusatz, Schweißparameter) und auch für unterschiedliche Schienenstahlgüten einstellbar

Für die Umsetzung müssen folgende Aspekte beachtet werden:

- I der Prozess soll für Verbindungsschweißungen im Gleis anwendbar und muss voll automatisiert sein
- I Wurzel- und Fülllagen sollen gesondert optimiert werden können
- I eine einfache parallele Engspalt-Anarbeitung soll als Nahtvorbereitung genügen
- I der schweißbare Toleranzbereich hinsichtlich Nahtvorbereitung sowie allgemein hinsichtlich der Schienenprofile soll möglichst groß sein
- I die Schweißung soll den heute gängigen Anforderungen gemäß den Normen für die Zulassung von Schienenschweißverfahren entsprechen. Dabei sind vor allem hohe Anforderungen an die Dauerfestigkeit in einem Biegeschwingversuch (5 Mio. Lastwechsel) zu erfüllen.

1.1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Im Rahmen des Forschungsprojekts metal JOINing P2, in dem diese Masterarbeit ausgeführt wurde, haben zuvor erprobte Schweißungen mit mechanischer Ablenkung des Schweißdrahts im parallelen Schweißspalt zu einer unzulänglichen Dauerfestigkeit geführt. Das verfrühte Versagen konnte vorrangig auf wurzelseitige Ungängen zurückgeführt werden.

In dieser Arbeit soll ein alternativer Lösungsansatz zur Verbesserung der Geometrie und Mikrostruktur der Wurzel, der angesprochenen MAG-Schienenschweißung, untersucht werden. Dabei wird der Lichtbogen durch ein externes Magnetfeld seitlich ausgelenkt. Außerdem soll die Wurzellage, anstatt als „single-pass-per-layer“ als „two-pass-per-layer“ ausgeführt werden. Anders als bei den bisherigen Versuchen soll die Wurzel also aus zumindest zwei sequentiell geschweißten Lagen hergestellt werden.

Anhand von systematischen Schweißversuchen der Wurzellagen soll das Potential dieser Methode, hinsichtlich einer Verbesserung der Wurzelgeometrie einer Schienenverbindungsschweißung, bewertet werden. Es soll ein weitgehend autonomer und magnetisch gestützter MSG-Prozess erarbeitet und erprobt werden, mit möglichst hoher Prozesssicherheit.

Die Aufgabenstellung beinhaltet folgende Teile:

- I Konzipieren und Umsetzen eines geeigneten Versuchsaufbaus. Dieser beinhaltet die geeigneten Proben-Geometrien, sowie notwendige Vorrichtungen zu deren Positionierung am Lineartisch. Ein wesentlicher Bestandteil dabei ist auch noch die Konzipierung, Auslegung und Umsetzung eines Jochs zur Erzeugung des externen magnetischen Feldes.
- I Erstellung eines Versuchsplans zur systematischen Identifizierung, Quantifizierung und Optimierung, mit schlussendlicher Findung eines geeigneten Fensters der relevanten Schweißparameter und zusätzlicher Einflussgrößen.
- I Durchführen von systematischen Schweißversuchen.
- I stufenweise Bewertung der Schweißungen anhand von geätzten Querschnitten und teilweise des Prozesses (Lichtbogen und Tropfenübergang) mithilfe von Hochgeschwindigkeits-Kameraaufnahmen.
- I Bewertung der Mikrostruktur mittels Lichtmikroskopie und Härteverlauf.

Die schweißtechnischen Vorgaben dabei sind:

- I keine Nahtanarbeitung – parallele Flanken durch Sägeschnitt
- I automatisiertes Schweißen

Die Ziele die dabei verfolgt werden sind:

- I eine durchgehend gute Flanken- und Wurzeleffassung
- I möglichst kerbfreie Nahtgeometrie am Übergang vom Grundwerkstoff zum Schweißgut
- I bestmögliches Nahtbild – keine Ungängen
- I möglichst geringe Wärmeeinbringung zwecks Reduzierung der WEZ-Breite

Als Endergebnis soll eine Schweißung der Wurzel an einer repräsentativen Eisenbahnschiene (perlitisches Stahlgüte, gängiges Vignolprofil) vorliegen, welches einen Vergleich zu den bisher im Projekt gemachten Schweißungen hinsichtlich Geometrie und Mikrostruktur der Schweißnaht und WEZ, und deren Größe, erlaubt.

2 Literatur

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten Themen kurz anwendungsnahe aufbereitet.

2.1 Schienen

Schienen haben die Aufgaben Radlasten zu übertragen, die Räder sicher zu führen und den Fahrzeugen eine möglichst glatte Fahrbahn zu bieten. Durch immer höhere Transportleistungen entstehen enorme Belastungen. Daraus ergeben sich eine Vielzahl an Anforderungen an moderne Schienenwerkstoffe:

- I Verschleißbeständigkeit
- I Rollkontaktermüdungssicherheit
- I Schlupfwellenbeständigkeit
- I Ermüdungs- bzw. Dauerfestigkeit
- I hohe Streckgrenze und Zugfestigkeit
- I Sprödbruchsicherheit
- I gute Schweißseignung

Der reibungsbehaftete Rad-Schiene-Kontakt bewirkt einen Verschleiß, welcher im Allgemeinen die Lebensdauer bzw. Liegedauer der Schiene bestimmt – ein hoher Verschleißwiderstand ist somit eine wichtige Gebrauchseigenschaft. [2] [4]

2.1.1 Schienengeometrie

Je nach Einsatzzweck gibt es unterschiedliche Schienenprofile. Dazu gehören die Vignolschienen, welche das Standardprofil im Eisenbahnverkehr repräsentieren, sowie Kranschienen und Rillenschienen, welche bei Hebezeugen und im innerstädtischen Verkehr zum Einsatz kommen. [5]

Vignolschienen oder auch Breitfußschienen stellen im europäischen Raum die gängigste Schienenform im Fernverkehr-Schwerlastsektor dar (insbesondere das Schienenprofil 60E1 bzw. UIC 60 nach EN 13674-1:2011). Dieses Schienenprofil 60E1 (Abbildung 1) zeichnet sich durch höhere ertragbare statische und schwellende Belastungen aus – verglichen mit tieferen und schmälere Schienenprofilen – was aber auch

2.1.2 Schienenstahl

Gemäß EN 13674-1:2011 kann folgender Überblick über alle gängigen Breitfuß-Schienen-Stahlgüten gegeben werden (Tabelle 1).

Tabelle 1 Schienen-Stahlsorten nach EN 13674-1:2011

Stahlsorte ^a		Härtebereich (HBW)	Beschreibung	Art der Walzzeichen
Bezeichnung	Werkstoff- nummer			
R200	1.0521	200 bis 240	Unlegiert (C-Mn) Nicht wärmebehandelt	Ohne Walzzeichen
R220	1.0524	220 bis 260	Unlegiert (C-Mn) Nicht wärmebehandelt	————
R260	1.0623	260 bis 300	Unlegiert (C-Mn) Nicht wärmebehandelt	—— ————
R260Mn	1.0624	260 bis 300	Unlegiert (C-Mn) Nicht wärmebehandelt	———— ————
R320Cr	1.0915	320 bis 360	Legiert (1 %Cr) Nicht wärmebehandelt	———— ———— ————
R350HT	1.0631	350 bis 390 ^b	Unlegiert (C-Mn) Wärmebehandelt	—— ———— ————
R350LHT	1.0632	350 bis 390 ^b	Unlegiert (C-Mn) Wärmebehandelt	—— ———— ———— ——
R370CrHT	1.0992	370 bis 410	Legiert (C-Mn) Wärmebehandelt	—— ———— ———— ————
R400HT	1.1254	400 bis 440	Unlegiert (C-Mn) Wärmebehandelt	———— ———— ————

^a Siehe Tabellen 5 a) und 5 b) zur chemischen Zusammensetzung bzw. zu den mechanischen Eigenschaften.
^b Siehe Tabelle 6 zu den Anforderungen an die Härte.

Die diversen Stahlsorten unterscheiden sich primär durch die Brinellhärte, welche vorrangig über den Kohlenstoffgehalt und, ab der R350HT-Güte, die Wärmebehandlung eingestellt wird. Auch geht ein größerer Prüfumfang mit den Stahlsorten ab der R350HT einher (EN 13674-1:2011).

In Anlehnung an EN 13674-1:2011 ist in Tabelle 2 der zunehmende bzw. in engeren Grenzen festgelegte Kohlenstoffgehalt über die Stahlgüten dargestellt. Um wasserstoffinduzierten Kaltrissen vorzubeugen, bei hohen Härten und Festigkeiten, wird lt. EN 13674-1:2011 der max. zulässige Wasserstoffgehalt sukzessive stärker eingeschränkt. Schwefel und Phosphor stellen ebenfalls unerwünschte Begleitelemente dar und sind lt. Norm bei höherfesten Stahlgüten auf 0,025% bzw. 0,020% begrenzt. [2]

Die Stahlsorten R320Cr bis R400HT müssen lt. EN 13674-1:2011 rein perlitisches Mikrogefüge aufweisen – Martensit, Bainit und Korngrenzenzementit sind nicht zugelassen. Bei der R260Mn ist Korngrenzenferrit zugelassen.

Verglichen mit der Standardgüte R260 für den Schwerlastsektor, weisen Schienen aus R350HT Schienenstahl eine um den Faktor fünf höhere Verschleißbeständigkeit hinsichtlich Spurranten-Verschleiß auf. [6]

Tabelle 2 Chemische Zusammensetzung der Stahlgüten in Anlehnung an EN 13674-1:2011

Stahlsorte		Massenanteile in %			max. Massenanteile in 10 ⁻⁴ % (ppm)		Zugfestigkeit R _m min. MPa	Bruchdehnung A min. %	Härte auf der Fahrfläche (Mittellinie) ^c HBW
Bezeichnung	Probe	C	Si	Mn	O ^a	H ^b			
R200	Schmelze	0,40 bis 0,60	0,15 bis 0,58	0,70 bis 1,20	20	3,0			
	Stück	0,38 bis 0,62	0,13 bis 0,60	0,65 bis 1,25	20	3,0	680	14	200 bis 240
R220	Schmelze	0,50 bis 0,60	0,20 bis 0,60	1,00 bis 1,25	20	3,0			
	Stück	0,48 bis 0,62	0,18 bis 0,62	0,95 bis 1,30	20	3,0	770	12	220 bis 260
R260	Schmelze	0,62 bis 0,80	0,15 bis 0,58	0,70 bis 1,20	20	2,5			
	Stück	0,60 bis 0,82	0,13 bis 0,60	0,65 bis 1,25	20	2,5	880	10	260 bis 300
R260Mn	Schmelze	0,55 bis 0,75	0,15 bis 0,60	1,30 bis 1,70	20	2,5			
	Stück	0,53 bis 0,77	0,13 bis 0,62	1,25 bis 1,75	20	2,5	880	10	260 bis 300
R320Cr	Schmelze	0,60 bis 0,80	0,50 bis 1,10	0,80 bis 1,20	20	2,5			
	Stück	0,58 bis 0,82	0,48 bis 1,12	0,75 bis 1,25	20	2,5	1 080	9	320 bis 360
R350HT	Schmelze	0,72 bis 0,80	0,15 bis 0,58	0,70 bis 1,20	20	2,5			
	Stück	0,70 bis 0,82	0,13 bis 0,60	0,65 bis 1,25	20	2,5	1 175	9	350 bis 390
R350LHT	Schmelze	0,72 bis 0,80	0,15 bis 0,58	0,70 bis 1,20	20	2,5			
	Stück	0,70 bis 0,82	0,13 bis 0,60	0,65 bis 1,25	20	2,5	1 175	9	350 bis 390
R370CrHT	Schmelze	0,70 bis 0,82	0,40 bis 1,00	0,70 bis 1,10	20	1,5			
	Stück	0,68 bis 0,84	0,38 bis 1,02	0,65 bis 1,15	20	1,5	1 280	9	370 bis 410
R400HT	Schmelze	0,90 bis 1,05	0,20 bis 0,60	1,00 bis 1,30	20	1,5			
	Stück	0,88 bis 1,07	0,18 bis 0,62	0,95 bis 1,35	20	1,5	1 280	9	400 bis 440

^a Siehe 9.1.3.3.
^b Siehe 9.1.3.2.
^c Siehe Bild 8.

Nachfolgend ist in Abbildung 2 das Gefüge einer R350HT Schienenstahlgüte gezeigt. Es wird in der Produktion in allen Bereichen vollperlitisch eingestellt. Durch die raschere Abkühlung finden sich im Kopfbereich feinere Lamellen und somit eine höhere Härte. Der Begriff „kopfgehärtet“ bedeutet bei Schienen also „feinperlitisiert“ und nicht wie im ursprünglichen Sinne das Erzeugen eines Härtegefüges. [2] [4]

Laut Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS) erhält man nach der metastabilen Fe-Fe₃C Ausbildung im eutektoiden Punkt bei 0,8 % C bei Abkühlung unter 723 °C (A_{r3}) ein vollperlitisches Gefüge (Abbildung 3). Somit würde, bei dem in der Norm für perlitische Schienenstähle vorgeschriebenen Kohlenstoffbereich von 0,72 - 0,80 %, sich unter 0,80 % eine untereutektoide Legierung mit geringen Anteilen an α-Ferrit (max. 12,5 % bei 0,70 % C) ausbilden. In der Realität kann auf Grund endlichen bzw. realen Abkühlgeschwindigkeiten und zusätzliche Begleitelemente auch bei Unterschreitung der Kohlenstoff-Untergrenze die Ferrit-Bildung unterdrückt werden und dadurch ein vollperlitisches Gefüge entstehen. [2] [7] [8]

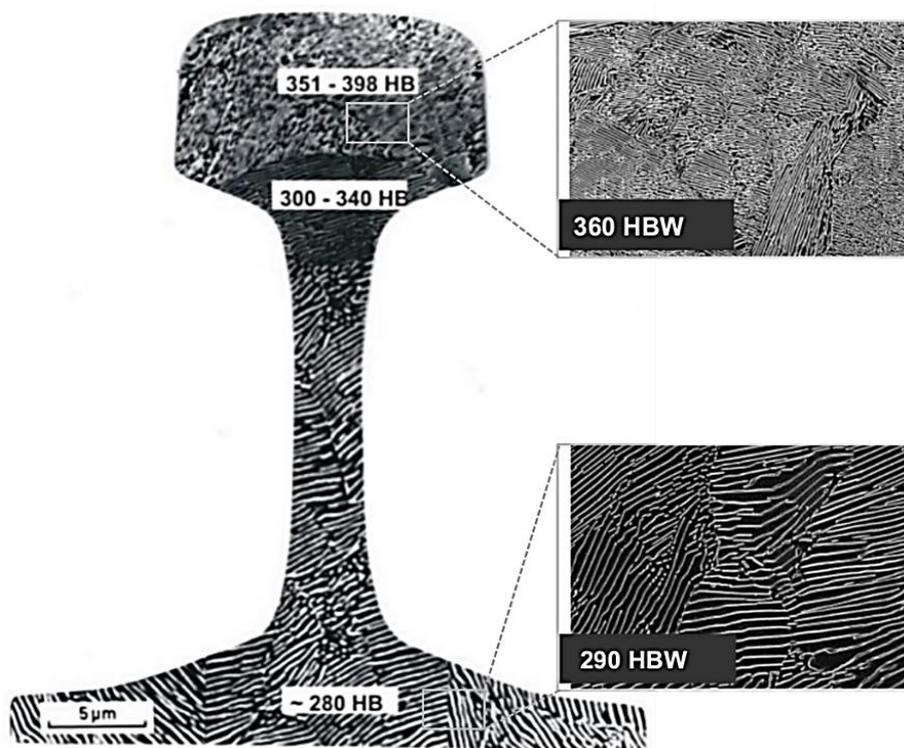


Abbildung 2 Mikrostruktur und Härtebereiche einer wärmebehandelten Schiene [6]

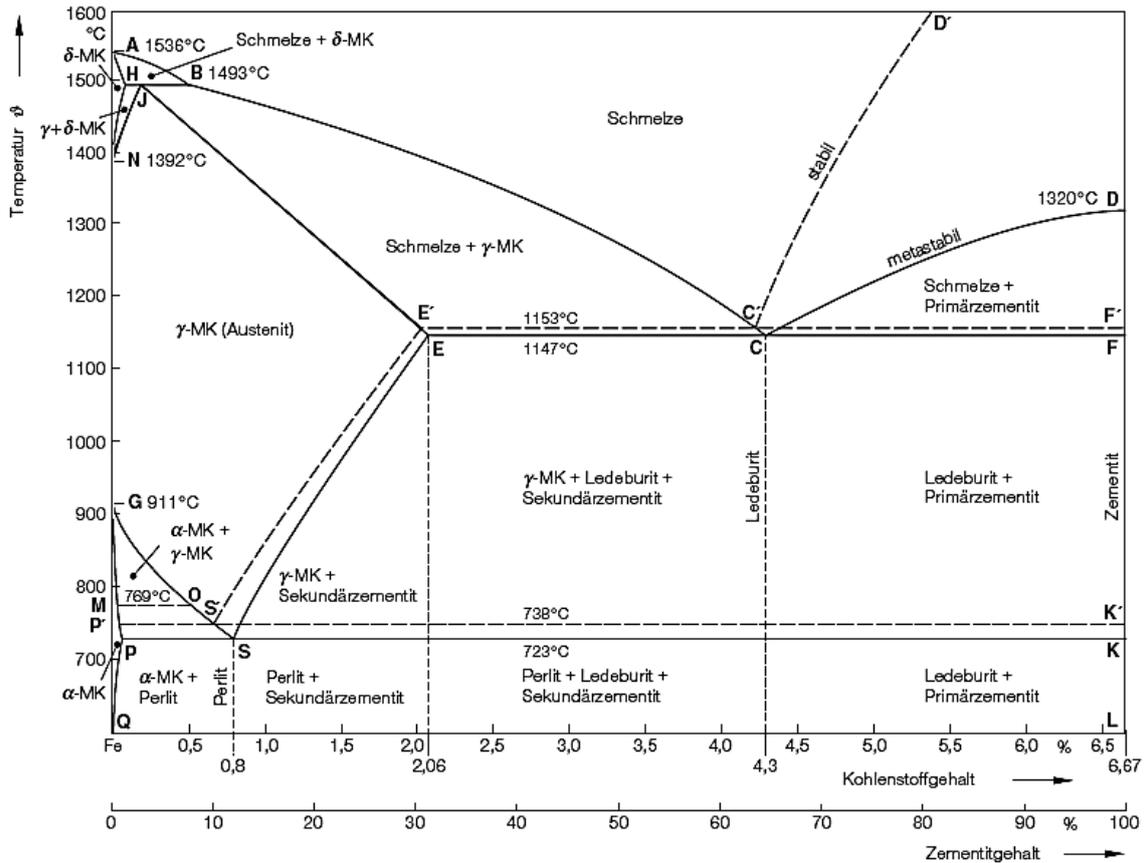


Abbildung 3 Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS) für die stabile (Fe-C) und metastabile (Fe-Fe₃C) Ausbildung des Kohlenstoffs [7]

Ein vollperlitisches Gefüge wirkt sich positiv auf die Verschleißbeständigkeit aus. Im Vergleich dazu weist ein Vergütungsgefüge bei gleicher Festigkeit einen wesentlich geringeren Verschleißwiderstand auf – dies betrifft vorrangig den abrasiven Verschleiß, wie er in engen Kurven und unter hoher spezifischer Flächenbelastung auftreten kann. Dieses bessere Verschleißverhalten lässt sich durch die eingelagerten feinen Zementitlamellen erklären, welche beim feinperlitischen Gefüge regelmäßig an der Lauffläche vorhanden sind. Im Vergleich zum sporadischen Vorkommen an der Oberfläche beim Vergütungsgefüge bietet das feinperlitisches Gefüge durchgehend harte Karbidnadeln, welche den Verschleiß verringern (Abbildung 4). [9] [10]

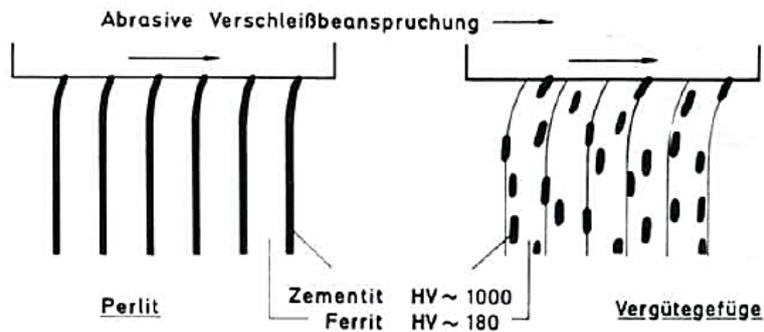


Abbildung 4 Schematische Darstellung des Verschleißverhaltens von vollperlitischem (li.) und von Vergütungsgefüge (re.) [10]

Nachfolgend ist ein ZTU-Schaubild (Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild) von drei Schienenstählen lt. Tabelle 3 dargestellt, mit den für die Perlitbildung relevanten Einflussgrößen und Einflusselementen (Abbildung 5). [2] [11]

Daraus ist ersichtlich, dass bestimmte Legierungselemente maßgeblich die Umwandlungskurven im ZTU-Schaubild verschieben – auch im zulässigen Schwankungsbereich lt. EN 13674-1:2011. Diese Abhängigkeit des Perlitbildungsbereichs ermöglicht auch bei niedrigeren und konstanten Temperaturgradienten – wie zum Beispiel beim Abkühlen aus der Walzhitze in einem Polymer – eine feinperlitische Gefügeausbildung durch Zugabe div. Legierungselemente.

Tabelle 3 Chemische Zusammensetzung von drei Schienenstahl-Legierungen (in Anlehnung an [4])

Legierung	C [Gew.%]	Si [Gew.%]	Mn [Gew.%]	Cr [Gew.%]
1	0,71	0,32	1,00	0,06
2	0,64	0,35	1,50	0,02
3	0,71	0,47	0,98	1,00

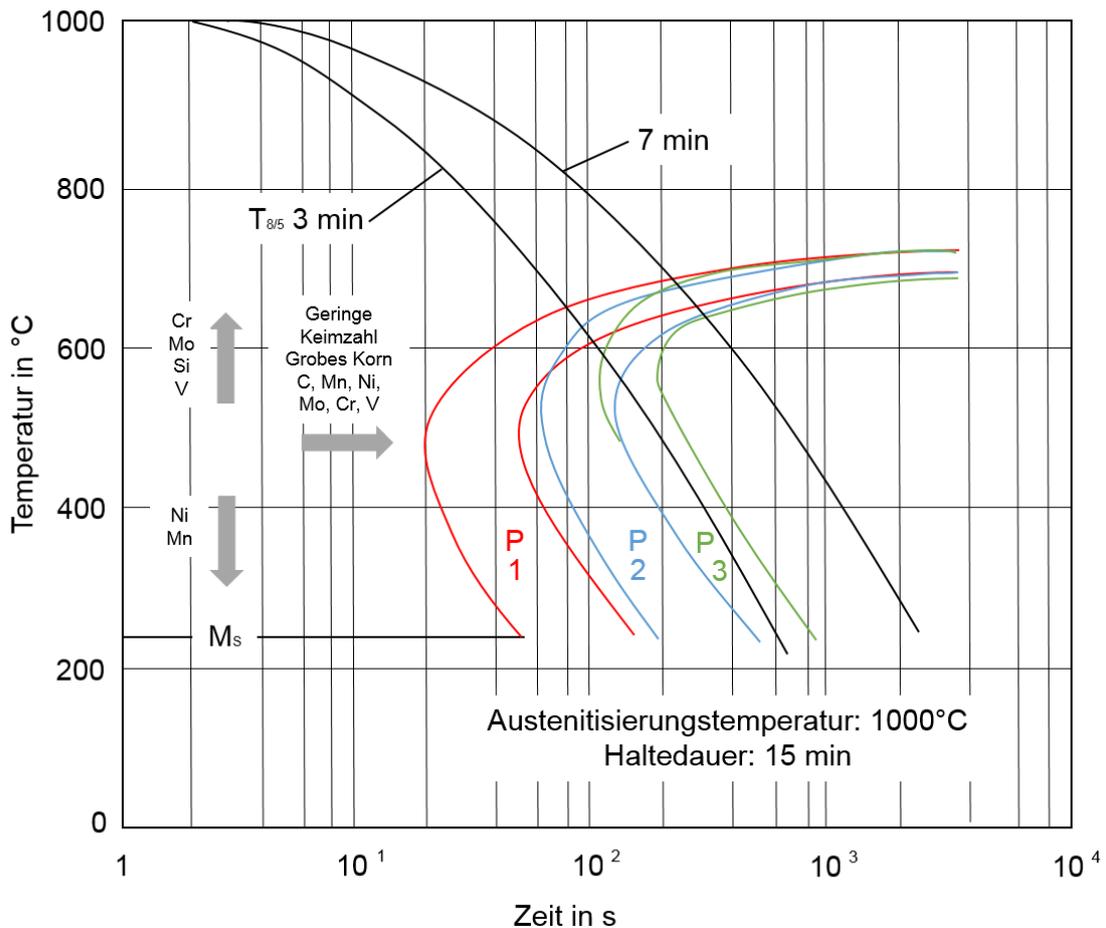


Abbildung 5 Kontinuierliches ZTU-Schaubild (in Anlehnung an [4] und [11])

2.1.3 Schweißbeignung

Durch den hohen Kohlenstoffgehalt verlangen Schienenstähle eine gesonderte Betrachtung hinsichtlich ihres Verhaltens während des Schweißens.

Gemäß Tabelle 2 unterscheiden sich die Stahlgüten ab R260 bis R370 kaum im maximal zulässigen Kohlenstoffgehalt. Er liegt bei etwa 0,8 %C. Derart hohe Kohlenstoffgehalte sind auf Grund der hohen Aufhärtungsneigung prinzipiell nur bedingt schweißgeeignet. Um dennoch eine brauchbare Verbindung mittels schmelzflüssigen Schweißverfahren herstellen zu können, bedarf es einer Vorwärmung der Fügepartner über die Martensit-Start (M_s) Temperatur. Dadurch werden die Abkühlraten in den perlitischen Umwandlungsbereich verschoben.

Beim Schweißen von Schienen sollte die Gefügeveränderung des feinperlitischen Grundgefüges in der WEZ möglichst gering gehalten werden. Eine schmale WEZ kann durch eine möglichst geringe Wärmeeinbringung erreicht werden. [3]

2.2 Schienenschweißverfahren

2.2.1 Abbrennstumpfschweißen

Das Abbrennstumpfschweißen zählt zu den Widerstandspressschweißverfahren und findet schienenspezifisch Anwendung beim Fügen der einzelnen Schienensegmente im Werk. Für dieses Verfahren sind sehr hohe Ströme (40 000 bis 100 000 A) bei niedrigen Spannungen von 6 bis 15 V charakteristisch. Während der Vorwärmung werden dabei die zu fügenden Teile 4- bis 10-mal miteinander in Berührung gebracht, wodurch auf Grund des Joule'schen Gesetzes punktuell hohe Erwärmungen herbeigeführt werden. Durch nur zum Teil schmelzflüssiges Material, welches auch teilweise aus dem Schweißspalt geschleudert wird, sowie der anschließend hohen Umformgrade erhalten abbrennstumpf-geschweißte Fügeverbindungen eine gute Festigkeit bei gleichzeitig hoher Zähigkeit. Aufgrund der niedrigen Temperatur und des Stauchens bleibt die Wärmeeinflusszone (WEZ) – verglichen mit Schmelzschweißverfahren – schmal. Durch ein gesteuertes Vorwärmen ist auch die Gefahr des Aufhärtens beim Abkühlen durch zu hohe Temperaturgradienten gering. Ein weiterer Vorteil sind Druckspannungen nach dem Fügen – was bei Pressschweißverfahren üblich ist. Als Nachteil sind die hohen aufzubringenden Kräfte und die Komplexität der Schweißanlage zu nennen. [2] [12]

2.2.2 Gaspressschweißen

Beim mittlerweile obsolet gewordenen Gaspressschweißen werden die Fügeteile unter einem Anpressdruck via Acetylen-Gasflamme erhitzt und damit über der Rekristallisationstemperatur verschweißt. Es ergeben sich ähnliche Vorteile wie beim zuvor genannten Abbrennstumpfschweißen, wobei hier auf eine gleichmäßige Erwärmung und planparallele Fügeflächen zu achten ist. [2]

2.2.3 Aluminothermisches Gießschmelzschweißen

Das aluminothermische Schweißen (AT-Schweißen) gilt seit den späten 1920er Jahren als Standardverfahren für die Verschweißung von Schienensträngen auf der Strecke. In einem Reaktionstiegel werden dabei die Schienenenden durch das nach Zündung exotherm reagierende Thermit®-Gemisch, das eine Mischung aus Aluminiumpulver und Eisenoxid ist, angeschmolzen. In weiterer Folge separiert sich dichtebedingt der dabei entstehende Flüssigstahl vom Aluminiumoxid (Schlacke) und erstarrt

im Bereich der Schienenstöße. Ein spanendes Abarbeiten des s.g. „Wulstes“ ist im Kopfbereich notwendig. [11] [12] [13]

2.2.4 Lichtbogenhandschweißen

Das Lichtbogenhandschweißen kommt vornehmlich beim Schienenauftrags- und Verbindungsschweißen bei geringer belasteten Gleisen zur Anwendung. Bei schwerlast Strecken wird dieser Prozess nur noch zum Regenerieren (Auftragsschweißen) verwendet. Ebenso wird das Fülldrahtschweißen als Verbindungsschweißen im Schwerlastsektor auf Grund sicherheitstechnischer Aspekte nicht praktiziert, da auch dieses Verfahren eine sehr hohe Handfertigkeit des Schweißers verlangt. [12]

2.3 Metallschutzgasschweißen

Das MSG-Schweißen zeichnet sich durch hohe Schweißgeschwindigkeiten, eine gute Automatisierbarkeit und einen tiefen Einbrand aus. Dieses wirtschaftliche Fügeverfahren findet sowohl bei un- und niedriglegierten Werkstoffen Anwendung, als auch bei Verbindungen aus Aluminium und höherfesten Baustählen. Es gibt beim MSG-Prozess mehrere Verfahrensabwandlungen wie etwa die Impuls-Lichtbogentechnik, alternierenden Strom und den CMT-Prozess (Cold Metal Transfer Fronius International GmbH). [11] [14]

Namensgebend für diese Verfahrensgruppe ist das Schutzgas, welches das flüssige Schmelzbad vor Zutritt atmosphärischer Gase schützen soll, welche nach Dissipation im Plasma zu Oxidation und Zubrand unerwünschter, bzw. Abbrand erwünschter Elemente im Schweißgut führen würden. Elemente wie Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff führen neben anderen Effekten zu einer Verminderung der Zähigkeit. [11] [12]

Um den schmelzflüssigen Zustand zu erreichen, brennt der Lichtbogen zwischen einem abschmelzenden und zugleich stromführenden Drahtelektrode und dem Werkstück (Abbildung 6). Grundsätzlich wird die Elektrode an den Pluspol gelegt und somit der Minuspol mit dem Werkstück kontaktiert. Aus dieser Standard-Kontaktierung resultiert eine hohe Abschmelzleistung, da der Pluspol aufgrund der hier hochenergetisch eintreffenden negativ geladen Elektronen heißer ist. [11]

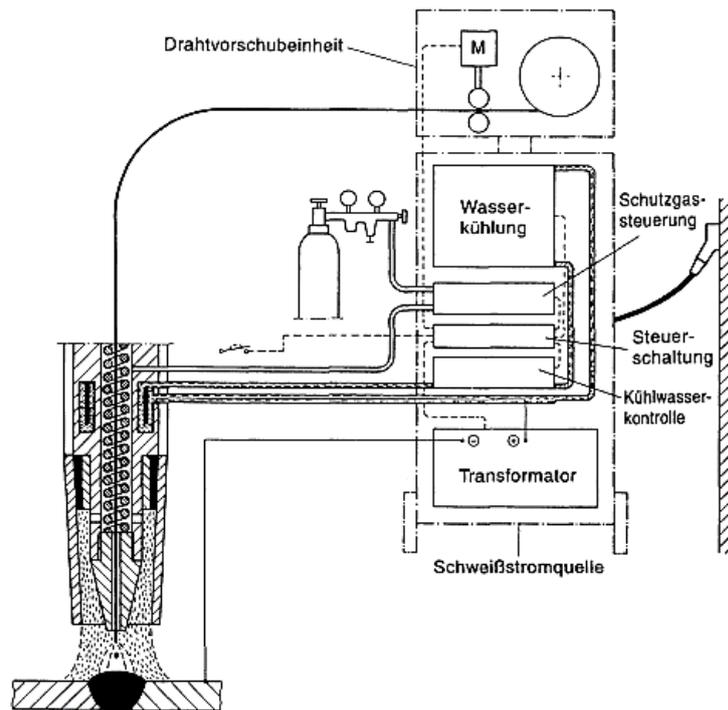


Abbildung 6 MSG-Schweißanlage [13]

Die Drahtelektrode kann als Massivdraht oder Fülldraht ausgeführt sein. Letzteres findet immer häufiger Anwendung aufgrund der vorteilhaften Möglichkeit, die Legierung des Schweißguts zu beeinflussen und schlackebildende Elemente beizugeben.

Der Brenner beim MSG-Schweißen ist bei kleineren Stromstärken bzw. kurzen Schweißzyklen durch den Schutzgasstrom in der Düse ausreichend gekühlt. Für höherer Stromstärken werden Brenner mit Wasserkühlung verwendet. [11] [12] [13] [15]

In Abhängigkeit vom Schutzgas lässt sich das Schweißverfahren weiter noch in Metall-Aktivgasschweißen (MAG) und Metall-Inertgasschweißen (MIG) unterteilen, wobei der Unterschied in der Aktivität bzw. Passivität des Schutzgases liegt. Als aktive Gase werden Sauerstoff, Kohlendioxid und Wasserstoff verwendet. Argon und Helium werden als passive (inerte) Gasen bzw. Stickstoff als reaktionsträge Gase verwendet. Das verwendete Schutzgas richtet sich vorwiegend nach dem zu schweißenden Werkstoff. Es werden vor allem auch Gemische von Gasen verwendet, welche der jeweiligen Anwendung angepasst sind. [11] [15]

Prinzipiell sind inerte Schutzgase für die meisten Verbindungen geeignet, da keinerlei Reaktionen mit dem Schweißgut auftreten. In Europa ist Argon das am meisten verwendete Gas. In den USA wird vor allem mit Helium geschweißt. Argon bietet den Vorteil einer höheren Dichte, was im Vergleich zu Helium ein geringerer Gasverbrauch

bedeutet. Andererseits bewirkt Helium durch eine höhere Ionisierungsenergie und besserer Wärmeleitfähigkeit einen stärkeren Einbrand. [11] [16]

Aluminiumwerkstoffe werden u.a. mittels MIG-Verfahren gefügt, da hier die Problematik der hochschmelzenden Oxidschichtbildung maßgebend ist und somit nur ein inertes Gas verwendet werden kann. Auch hochlegierte und höherfeste Stähle verlangen nach Schutzgasen mit geringsten aktiven Komponenten. Zum Ersten setzt ein Kohlenstoff-Zubrand die Korrosionsbeständigkeit herab, und zum Zweiten würden höherfeste Stähle durch Kohlenstoff-Zubrand verspröden. [11] [12] [15] [16]

Aktive Gase wie CO_2 , O_2 und H_2 reagieren im Lichtbogen und bringen via Dissoziation und Rekombination zusätzlich Energie in das Schmelzbad ein, was sich durch einen besseren Einbrand bemerkbar macht. Nachteilig wirken sich aktive Schutzgase durch Zubrand von C, O und H in das Schweißgut aus. Auch ist die grobe und spritzerbehaftete Tropfenablösung des reinen CO_2 -Lichtbogens oft schlecht geeignet. Bei den meisten industriellen Anwendungen bei un- und niedriglegierten Stählen wird deshalb ein 82% Ar und 18% CO_2 -Mischgas (M21) verwendet. [8] [11] [17]

Beim MSG-Schweißen findet eine Schweißstromquelle mit flach fallender Kennlinie (Konstantspannung-Kennlinie) Anwendung (Abbildung 7). Hierbei handelt es sich um eine innere Regelung (ΔI -Regelung), welche selbsttätig die Lichtbogenlänge regelt. Speziell bei automatischen Schweißprozessen ist eine innere Regelung aufgrund der konstanten Lichtbogenlänge von Vorteil. Der Spannungsabfall pro 100 A liegt bei 2 bis 8 V, was bei veränderlichen Lichtbogenlängen den Strom und damit die Abschmelzleistung so regelt, dass die ursprüngliche Lichtbogenlänge wiederhergestellt ist. [11] [12] [15]

Eine steil fallende Kennlinie kommt beim Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG-Schweißen), Elektrodenhandschweißen und bei dickeren Elektrodendurchmessern beim Unterpulverschweißen zum Einsatz. Beim nicht automatisierten WIG- und Elektrodenhand-Prozess entstehen naturgemäß Schwankungen der Lichtbogenlänge und damit Spannungsschwankungen, wobei eine nahezu konstant bleibende Stromstärke und damit Abschmelzleistung von Vorteil ist. Beim Unterpulverprozess bei Elektrodendurchmessern von größer 3 mm wird die äußere Regelung auf Grund der zusätzlichen Beeinflussbarkeit der Lichtbogenlänge bevorzugt – bei kleineren Elektrodendurchmessern ist die Schweißgeschwindigkeit zu hoch für eine äußere Regelung. [11] [12]

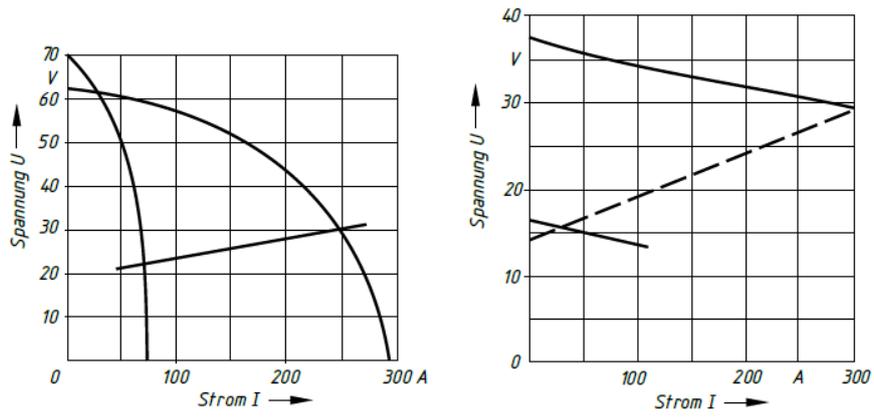


Abbildung 7 Statische Kennlinie einer Schweißstromquelle mit fallender (li.) und flach fallender (re.) Charakteristik [12]

2.4 Der Schweißlichtbogen

Beim Lichtbogenschweißen ist zwischen der Elektrode und der Massekontaktierung eine elektrische Spannung angelegt. Es bildet sich ein Lichtbogen mit einem nicht linearen Spannungsabfall aus (Abbildung 8).

Aus dem Spannungsverlauf lassen sich drei charakteristische Bereiche festlegen: Kathodenfall, Bogensäule und Anodenfall – wobei der Spannungsabfall in der Bogensäule dem Ohm'schen Gesetz folgt. Vor der Kathode kommt es zu einem Spannungsabfall auf Grund der positiven Raumentladung und anodenseitig durch die negative Raumentladung. Die negativ geladenen Elektronen gelangen dann von der Kathode über die Bogensäule zur Anode und transportieren dabei 99 % des Schweißstromes. Sowohl der Kathodenfall, als auch der Anodenfall, stellen recht dünne Schichten im Bereich von wenigen μm bis zu 0,1 mm dar. [11] [18]

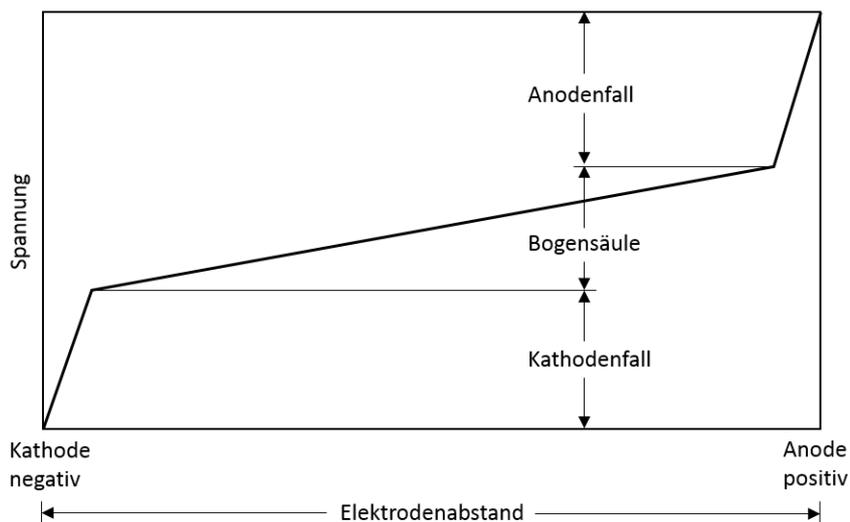


Abbildung 8 Spannungsverlauf am Lichtbogen (in Anlehnung an [18])

Während dem Schweißen erzeugt der Lichtbogen selbsttätig die benötigten Ladungsträger für den Stromtransport – also negativ geladene Elektronen und positiv geladenen Ionen. Dieses s.g. Plasma wird auch als der vierte Aggregatzustand bezeichnet. Es handelt sich um ein elektrisch leitfähiges heißes Gas, welches durch eine Sonderform der selbstständigen Gasentladung mit relativ großen Strömen (1 bis 1500 A) bei kleinen Spannungen (15 bis 50 V) erzeugt wird. Abhängig von der Stromstärke entsteht dabei ein Wärmeeintrag, welcher für das Schweißen genutzt wird. [11] [15] [18]

Um die fließenden Elektronen für den Strom zur Verfügung zu stellen, erfolgt an der Kathode eine thermische- bzw. eine Feldemission, oder eine Kombination beider. Unter einer thermischen Emission wird das begünstigen des Austretens von Elektronen bei einer Poltemperatur weit über 1000 K verstanden. Ein angelegtes elektrisches Feld erzeugt eine Feldemission. Je nach Pol-Material variiert die notwendige Austrittsarbeit, also die Temperatur und die angelegte Spannung. [18]

Um den Ladungstransport beim Zünden zu starten, erfolgt keine Anregung zum Elektronenaustritt über thermische Emission, da die Oberflächentemperatur zu Beginn bei Raumtemperatur liegt. Um dennoch ein Austreten von Elektronen zu erreichen, bedarf es einer Kontaktzündung (MSG-Schweißen) bzw. eine berührungslose Zündung mit Zündspannungsimpulsen im kV-Bereich. Bei Ersterem wird die Elektrodenspitze unmittelbar verdampft, auf Grund der hohen Stromdichte, was einen ionisierenden und damit leitenden Metaldampfbogen ausbildet. In weiterer Folge werden die freien Ladungsträger (Elektronen) im elektrischen Feld hin zur positiv geladenen Anode beschleunigt und treffen dabei auf Atome und/oder Moleküle, woraus weitere freie Elektronen und positiv geladene Ionen entstehen (Stoßionisation – Abbildung 9). Durch die Freisetzung von weiteren Ladungsträgern kommt es zu einem Lawineneffekt, wodurch der stromführende Kanal (Plasma) aufgebaut wird. Diese Zündungsart findet unter anderem beim Schutzgas-Schweißen mit abschmelzender Elektrode Anwendung. [11] [18]

Um einen Elektronenaustritt bei der berührungslosen Zündung zu erreichen, werden Zündspannungsimpulse um die 8 kV zwischen Anode und Kathode angelegt, was die Ausbildung eines ionisierenden Funkenkanals zur Folge hat. Die berührungslose Zündung findet heute Anwendung bei nichtabschmelzenden Wolfram-Elektroden (WIG-Schweißen). Eine Kontaktzündung beim WIG-Schweißen ist auf Grund von entstehenden Wolfram-Einschlüssen und starkem Elektroden-Verschleiß obsolet. [11] [18] [19]

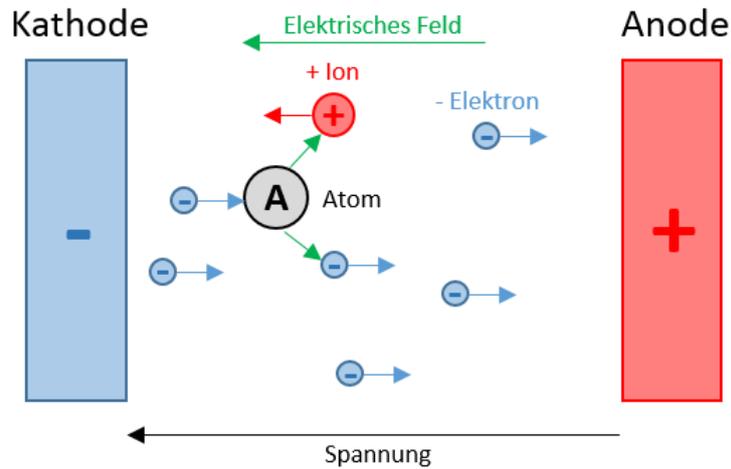


Abbildung 9 Stoßionisation (in Anlehnung an [11])

Die beschleunigten Elektronen erhitzen dann in weiterer Folge die Anode beim Eintreffen stark, wodurch in Abhängigkeit der entstehenden Temperatur und des Schmelzpunktes des Anodenmaterials Metalle zum Schmelzen bzw. Verdampfen gebracht werden können. Es kann also auch neben den vorhandenen Gasen das Anodenmaterial (Zusatzdraht beim MSG-Schweißen) in weiterer Folge zur Ionisierung beitragen. Die Bildung freier Ladungsträger hängt somit stark von der Bereitschaft ab, Elektronen aus dem Atomverband auszulösen. Ein Maß für die Auslösung eines Elektrons ist die Ionisierungsarbeit bzw. die Ionisierungsenergie. Hier besitzen Edelgase wie Argon und Helium Ionisierungsarbeiten von 12,1 und 24,5 eV und Kohlenstoffdioxid 15,8 eV. [11] [15] [18] [19]

Generell gilt, dass Ladungsträger die Pole nur dann erreichen, wenn sie die negative Raumladung vor der Anode bzw. die positive vor der Kathode überwinden – sprich genügend beschleunigt wurden. Beim Eintreffen der Elektronen in die Anode werden Temperaturen von 3000 bis 4000 K erreicht. In Abhängigkeit von der Stromstärke, Spannung, Schutzgas, Elektrodengeometrie und Elektrodenmaterial entsteht auf der Kathodenseite durch die niedrigere kinetische Energie der Ionen und einer Temperaturabnahme durch die Elektronenemission eine Temperatur von 2000 bis 3000 K. [11] [18]

Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung wird in der Lichtbogenkennlinie beschrieben. Hierbei sind Elektronenemission der Kathode, Ionisationsenergie des Gases, Elektrodenfälle, Leitfähigkeit der Lichtbogensäule und die geometrischen Bedingungen die maßgebenden Parameter. Im Bereich niedriger Ströme ist die Kennlinie stark fallend und wird als Ayrtonscher Bereich bezeichnet (Abbildung 10). Hier wären

hohe Spannungen zur Aufrechterhaltung des Lichtbogens notwendig, weshalb für schweißtechnische Anwendungen ausschließlich der Ohm'sche Bereich genutzt wird. Bei Änderung der Lichtbogenlänge kommt es zu einer Verschiebung dieser Lichtbogenkennlinie – ebenso bei Verwendung eines anderen Schutzgases (Abbildung 11). [18] [20]

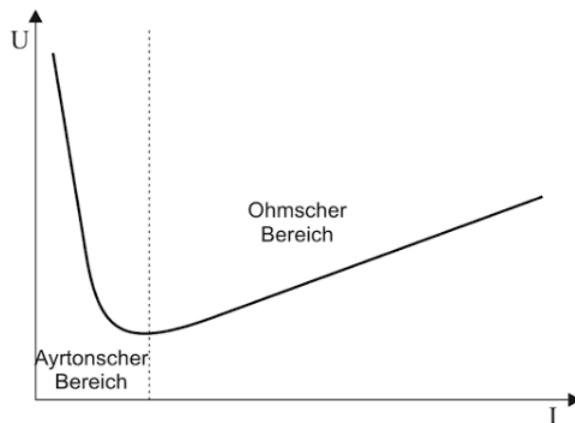


Abbildung 10 Lichtbogenkennlinie [20]

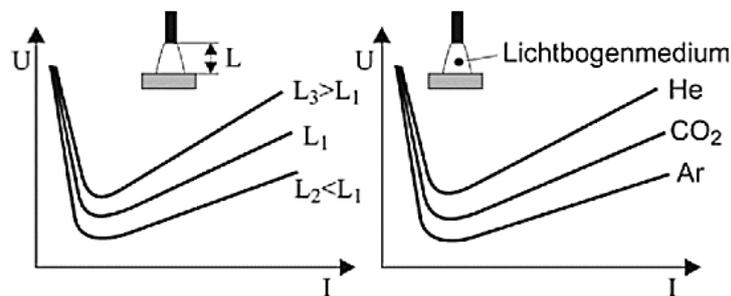


Abbildung 11 Lichtbogenkennlinie bei unterschiedlichen Lichtbogenlängen (li.) und Schutzgasen (re.) [20]

Wird die Lichtbogenkennlinie mit der Schweißstromquellenkennlinie überlagert ergeben sich Arbeitspunkte gemäß Abbildung 12 und Abbildung 13. Die Grafiken zeigen den wandernden Arbeitspunkt bei veränderlicher Spannung, durch Schwankungen der Lichtbogenlänge und der daraus resultierenden regulierenden Stromdifferenz. Dabei ist zu erwähnen, dass diese Änderung des Arbeitspunkts einerseits gezielt, durch die Einstellung an der Stromquelle (s.g. „Lichtbogenkorrektur“ in %), andererseits aber eben auch bei einer ungewollten bzw. durch die Geometrie des Werkstücks hervorgerufenen Änderungen des Abstandes zum Kontaktröhre hervorgerufen werden kann. Die Lichtbogenkorrektur bewirkt eine Verschiebung des Arbeitspunktes – wobei mit steigendem Wert die Schweißspannung bei gleichbleibender Schweißstromstärke zunimmt. [11] [16]

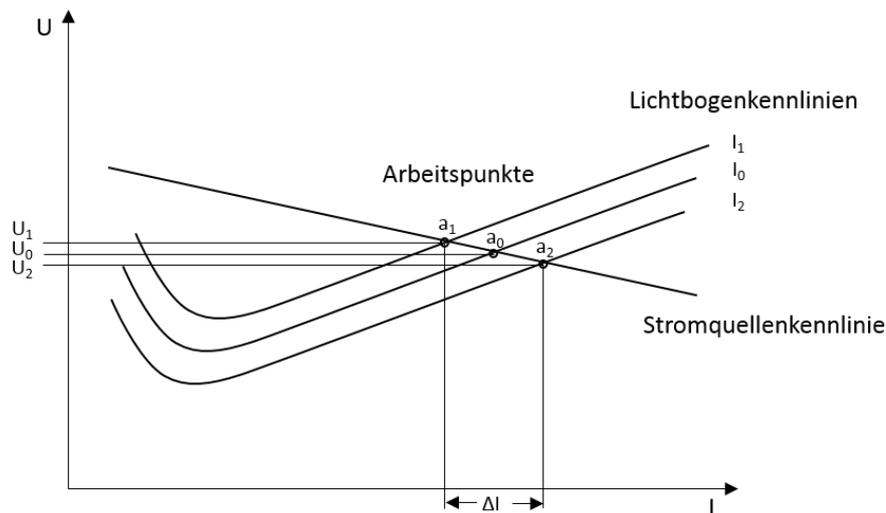


Abbildung 12 Innere- bzw. ΔI -Regelung bei veränderlicher Lichtbogenlänge bzw. Spannung (in Anlehnung an [11] und [16])

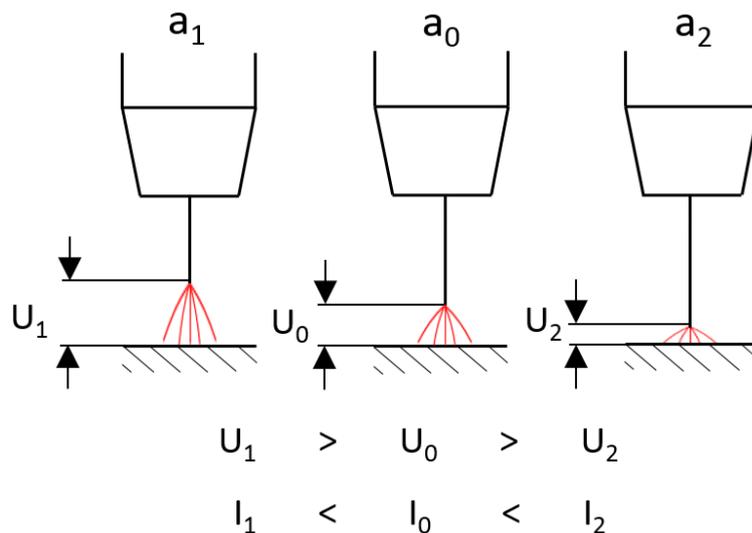


Abbildung 13 Änderung der Lichtbogenlänge bei den div. Arbeitspunkten (Änderung der Schweißspannung) (in Anlehnung an [11] und [16])

2.4.1 Kräfte im Schweißlichtbogen

Unter den u.a. für diese Arbeit besonders wichtigen elektromagnetischen Gesichtspunkten ist davon die Lorentzkraft hervorzuheben. Sie wird durch nachstehende Gleichung (1) beschrieben und wirkt somit orthogonal auf die vom Stromdichtevektor \vec{j} und dem magnetischen Flussdichtevektor \vec{B} aufgespannte Fläche mit dem Betrag des Produkts der beiden. Nach dieser Gesetzmäßigkeit wirkt die Lorentzkraft also radial und rotationssymmetrisch am zylindrischen Schweißdraht nach innen. [21]

$$\vec{F}_L = \vec{j} \times \vec{B} \quad (1)$$

Neben Strom und Magenfeld kommt speziell dem verwendeten Schutzgas bei Betrachtung der Lorentzkraft große Bedeutung zu. Bei Verwendung von CO_2 bzw. zum überwiegenden Teil CO_2 -haltigen Schutzgasen findet sich eine schmalere Lichtbogensäule – somit auch eine schmalere stromführende Säule. Nachstehende Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen auf, dass damit die Lorentzkraft den schmelzflüssigen Tropfen nicht einschnüren kann und somit diese bis zum Ausweichen und Ablösen des Tropfens entgegen wirkt. Ein grobtropfiger, unruhiger und damit spritzerbehafteter Werkstoffübergang ist die Folge. Aus diesem Verhalten ist auch abzuleiten, dass ein feiner Tropfenübergang bei derartigen Schutzgasen nicht möglich ist. [17]

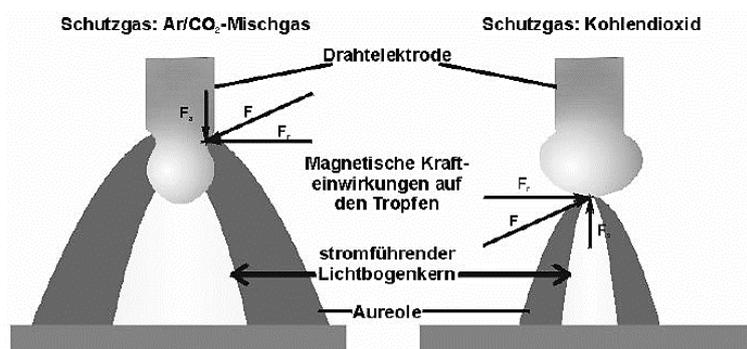


Abbildung 14 Schematische Darstellung der magnetischen Krafteinwirkung auf den Schweißtropfen bei Ar/CO_2 -Mischgas und CO_2 [17]



Abbildung 15 Tropfenablösung in CO_2 [11]

Bei argonhaltigen Schutzgasen hingegen vermag die Lorentzkraft den schmelzflüssigen Tropfen einzuschnüren und zwickt ihn schlussendlich ab – s.g. Pinch-Effekt. Die Begriffe Pinchkraft bzw. Pinch-Effekt sind schweißspezifische Begriffe für die einschnürende Lorentzkraft am schmelzflüssigen Tropfen („to pinch“ = einzwängen). [11] [21] [22]

Reines Argon erzeugt, durch die stark beschleunigende Pinchkraft bei Tropfenablösung und dem daraus resultierenden hochkinetischen feinen Tropfenstrahl in Kombi-

nation mit der Plasmaströmung einen fingerförmigen Einbrand (Abbildung 16). Bei mäßiger Zugabe von CO₂-Anteilen verringert sich dieses Einbrandbild, ohne dass die unruhige und spritzerbehaftete Tropfenablösung von reinem CO₂ auftritt. [11] [17]

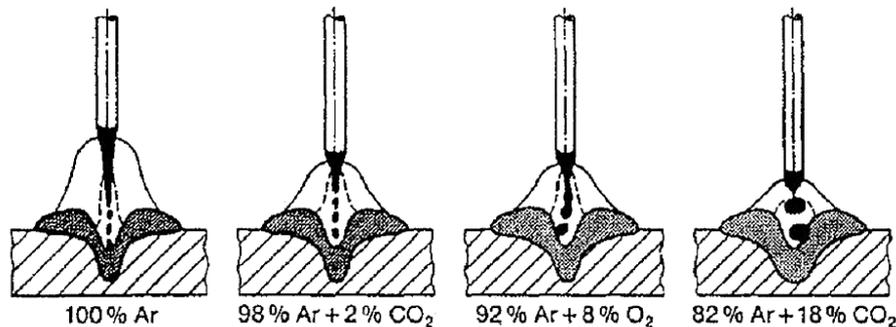


Abbildung 16 Schematische Tropfenablösung in Ar bei zunehmendem CO₂-Anteil [17]

Die kombinierte Betrachtung der Lichtbogenkennlinie und der Pinchkraft führt zu den typischen Werkstoffübergängen beim Schutzgas-Schweißen gemäß Abbildung 17.

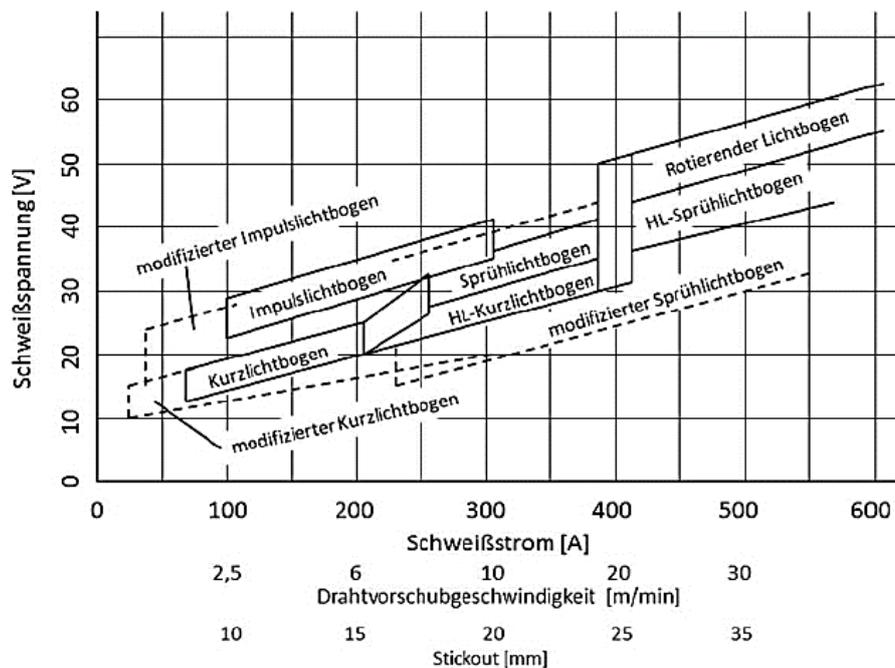


Abbildung 17 Werkstoffübergänge beim Schutzgas-Schweißen; Elektrodenndurchmesser 1.2 mm und überwiegend argonhaltiges Mischgas [12]

2.4.2 Elektromagnetische Grundlagen

Der Stromdichtevektor \vec{j} und der Vektor der magnetischen Flussdichte \vec{B} sind mit den mathematischen Beziehungen (2) und (3) gegeben, wobei die Einführung der Stromstärke I , des Leiterquerschnitts \vec{A} , der magnetischen Feldstärke \vec{H} und der absoluten magnetischen Permeabilität μ notwendig ist. [23] [24]

$$I = \vec{j} * \vec{A} \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu * \vec{H} \quad (3)$$

Weiter wird die absolute magnetische Permeabilität μ mit dem Produkt aus der relativen magnetischen Permeabilität μ_r und der magnetischen Feldkonstante μ_0 lt. Gleichung (4) beschrieben. [23] [24]

$$\mu = \mu_0 * \mu_r \quad (4)$$

Der Wert der magnetischen Feldkonstante μ_0 ist für Vakuum festgelegt, siehe (5). [24]

$$\mu_0 = 0,4 * \pi * 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \quad (5)$$

Für die relative magnetischen Permeabilität μ_r von ferromagnetischen Stählen finden sich abhängig von den Legierungselementen Werte von 200 bis 2000. Speziell die ferromagnetischen Elemente wie Eisen, Kobalt und Nickel bestimmen die relative magnetische Permeabilität. Typische Werte für Baustähle liegen im Bereich von 1000 und sind abhängig von der chemischen Zusammensetzung, der Korngröße, des Verformungsgrades, sowie der Temperatur und der magnetischen Feldstärke. Bei der Currietemperatur $T_c=769$ °C (β -Phase im Eisenkohlenstoff-Legierungssystem) geht die relative Permeabilität gegen 1 und es liegt die absolute magnetische Permeabilität von Vakuum vor mit μ_0 – man spricht dann von Paramagnetismus. Auch Werkstoffe mit austenitischem Gefüge sind paramagnetisch. [25] [26] [27] [28]

Für die Definition der magnetischen Feldstärke \vec{H} bei Zylinderspulen lt. Gleichung (6) ist weiter die Anzahl der Windungen mit N und die Länge des homogenen Magnetfelds \vec{l} festzulegen. [23] [24]

$$\vec{H} = I * \frac{N}{\vec{l}} \quad (6)$$

Gemäß den Zusammenhängen (3) und (6) gehen die Anzahl der Windungen und die Stromstärke linear mit der magnetischen Flussdichte einher. [11] [13]

Alle stromdurchflossenen Leiter – so auch der Lichtbogen – bilden ein rotationssymmetrisches Magnetfeld aus gemäß Abbildung 18.

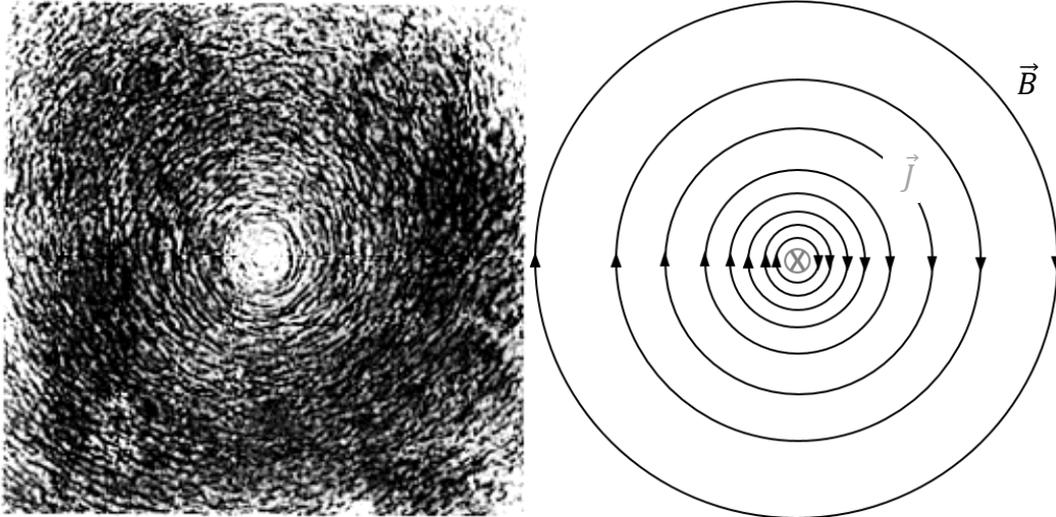


Abbildung 18 Feldbild und Feldlinien eines stromdurchflossenen Leiters (in Anlehnung an [23])

2.4.3 Blaswirkung

Elektromagnetische Lichtbogenmanipulationen sind als unerwünschte Effekte in Form der s.g. Blaswirkung bekannt. Eine unerwünschte magnetische Beeinflussung tritt dabei meist bei vormagnetisierten ferromagnetischen Bauteilen oder einer ungünstig gewählten Massenkontaktierung auf. Wechselstrom, sowie pulsierende-Schweißprozesse, sind wenig anfällig auf elektromagnetische Störeinflüsse. Nachstehende Abbildung 19 zeigt eine übliche einseitige Massenkontaktierung. Durch die gleich orientierte magnetische Flussdichte zwischen Elektrodenende und Werkstückoberfläche kommt es zu einer resultierenden Lorentzkraft nach rechts. Bei einem spitzeren Anstellwinkel verstärkt sich die Blaswirkung – demnach kann mit einem flachen Anstellwinkel der Blaswirkung entgegengewirkt werden. [29] [30]

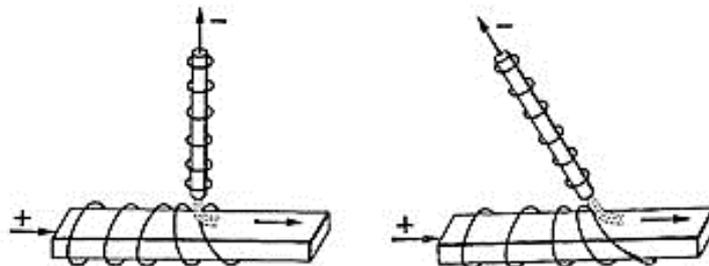


Abbildung 19 Magnetfeld einer Lichtbogen-Schweißung und Blaswirkung bei seitlicher Massenkontaktierung; 90° (li.); spitzer Winkel (re.) [29]

2.5 Lichtbogenmanipulation zur Verbesserung der Schweißnaht beim Engspaltschweißen

Engspaltschweißungen mit MSG-Schweißverfahren können verhältnismäßig größere schweißtechnische Herausforderungen mit sich bringen. Jedoch gehen sie, bei Beherrschung des Prozesses, auch mit einigen Vorteilen einher. Um den Lichtbogen im Engspalt zu manipulieren gibt es mehrere, im Folgenden aufgeführten, Möglichkeiten.

2.5.1 Mechanische Lichtbogenmanipulation

Beim Engspaltschweißen mit MSG-Schweißverfahren gibt es unterschiedliche mechanische Methoden, um den Lichtbogen im parallelen Engspalt zur Flanke hin abzulenken und somit die Flankenerfassung zu verbessern. Heute in der Schweißtechnik gängige Varianten werden in Abbildung 20 angeführt.

Prinzipiell basieren mechanische Engspalt-Schweißverfahren auf einer Ablenkung des, aus dem Kontaktrohr ragenden, Drahtstücks („stick out“) hin zur Engspalt-Flanke, was ein sicheres Aufschmelzen gewährleisten soll. Die Bewegung kann pendelnd („dynamisch“) oder in der Strichraupentechnik („statisch“) ausgeführt sein. [31] [32]

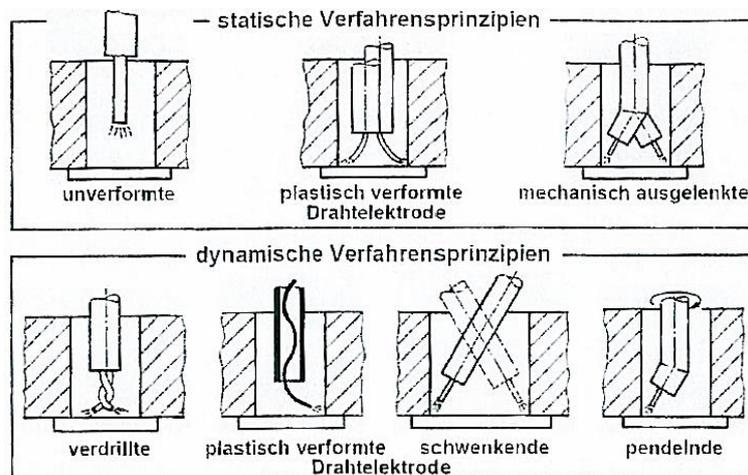


Abbildung 20 Verfahrensprinzipien des MAG-Engspaltschweißens [31]

Ein Beispiel eines am Markt verfügbaren dynamisch mechanisch ausgelenkten Engspaltschweiß-Systems der Fa. Carl Cloos Schweißtechnik GmbH wird erfolgreich im Schiffs-, Behälter- und Stahlbau eingesetzt. [32].

Im Rahmen des metal JOINing P2-Projekts wurden zwei der anderen gezeigten Verfahrensprinzipien für das Engspalt-Schienenschweißen versucht. Dies waren einerseits Tandem-MAG-Brenner, mit auf beiden Seiten statisch ausgelenktem Draht und

andererseits ein MAG-Engspaltbrenner mit einem bei der Förderung plastisch spiralförmig verformten Draht. Die Verfahren befinden sich für die Anwendung in der Erprobungsphase. Dadurch kann eine gute Flankenerfassung, bei allerdings nicht ganz gleichmäßiger bzw. nicht symmetrischer Nahtgeometrie erreicht werden. [33]

2.5.2 Magnetische Lichtbogenmanipulation

Da die Elektrode samt Lichtbogen einen stromdurchflossenen Leiter mit rotationssymmetrischem Magnetfeld darstellt, kann durch ein zusätzliches externes elektromagnetisches Feld der Schweißlichtbogen beeinflusst werden. Diese Art der Lichtbogenmanipulationen beruht auf einer Veränderung der Lorentzkraft bei der Überlagerung der Magnetfelder. Je nach Lage und Orientierung des zusätzlichen Magnetfeldes kann die Lorentzkraft verstärkt bzw. abgeschwächt werden, was dann zu einem Ausweichen der Plasmasäule führt, da diese um vieles leichter abzulenken ist als der Schweißdraht. [19] [23]

Um eine seitliche Ablenkung erreichen zu können, ist eine Anordnung der beiden Magnetfelder des Schweißlichtbogens und des externen Jochs nach folgender Abbildung 21 gefordert. Dem rotationssymmetrischen Feld des stromdurchflossenen Leiters bzw. Plasmas mit der magnetischen Flussdichte $\vec{B}(I)$ muss ein paralleles magnetisches Feld \vec{B}_A überlagert werden. Daraus ergeben sich eine Verstärkung der magnetischen Flussdichte auf einer Seite und eine Abschwächung der selbigen auf der Gegenseite, woraus eine Lorentzkraft \vec{F}_L in Richtung der verringerten magnetischen Flussdichte \vec{B} resultiert. [23]

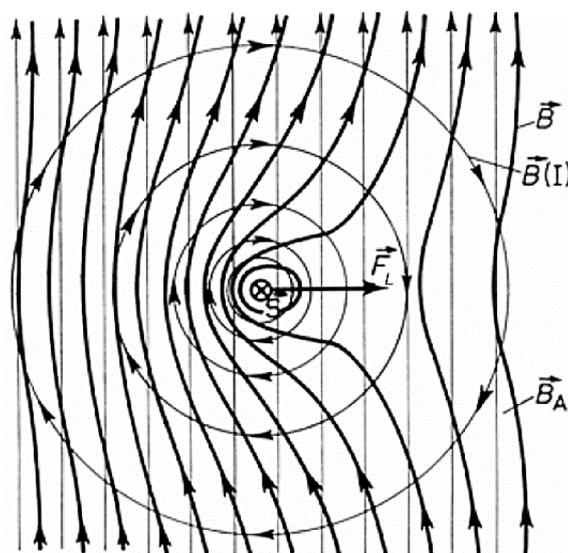


Abbildung 21 Stromdurchflossener Leiter überlagert mit externem parallelen Magnetfeld [23]

Magnetische Lichtbogenmanipulationen wurden bereits in einigen wissenschaftlichen Arbeiten untersucht. Dabei existieren umfangreiche Werke zu folgenden ähnlichen Themengebieten:

- I *„Characteristics of welding and arc signal in narrow groove gas metal arc welding using electromagnetic arc oscillation“* [34]
- I *„Effect of external magnetic field on weld pool flow conditions in high-speed gas metal arc welding“* [35]
- I *„Wirtschaftliches WIG-Fügen durch magnetisches Pendeln des Lichtbogens“* [36]
- I *„Study on the application for electromagnetic controlled molten pool welding process in overhead and flat position welding“* [37]
- I *„Optimization of magnetic arc oscillation system by using double magnetic pole to TIG narrow gap welding“* [38]

Bei den aufgezählten Arbeiten wurde unter anderem das Verhalten des oszillierenden MAG-Lichtbogens im ferromagnetischen Engspalt, aber auch bei stationär in Schweißrichtung abgelenktem MAG-Lichtbogen untersucht. [34] [35]

Auch existieren umfangreiche Abhandlungen zum magnetisch oszillierenden WIG-Lichtbogen im ferromagnetischen Engspalt, sowie im nicht-ferromagnetischen bzw. austenitischen Engspalt und bei statischer Ablenkung in Schweißrichtung bei ebenfalls nicht-ferromagnetischen Platten. [36] - [38]

3 Vorversuche

Im Vorfeld der eigentlichen Versuche wurde mittels Magnetspulen ein einfacher Elektromagnet mit zylindrischem Stahlkern gebaut, um damit grundlegende Plasmaablenkungs-Experimente in Form von „bead on plate“ Schweißungen durchzuführen. Der Magnet bestand aus drei magnetisch in Serie geschalteten handelsüblichen Spulen für Magnetventile, welche auf einen, als Eisenkern dienenden Rundstahl, aufgefädelt und verschraubt wurden.

Um die Richtung der resultierenden Lorentzkraft und die damit einhergehende Ablenkung zu demonstrieren, wurde der Elektromagnet in unterschiedlichen Orientierungen und Positionen zur Schweißnaht gelegt. Dabei war immer ein Teil der Naht ohne Beeinflussung und der andere Teil unter Beeinflussung des externen magnetischen Feldes. Im Anschluss wurde das entstehende Nahtbild in den beiden unterschiedlichen Bereichen bewertet und gegenübergestellt.

Bei den so durchgeführten Vorversuchen wurde der Spulenstrom und die grundsätzlichen Schweißparameter entsprechend Tabelle 4 gleich gehalten. Die Schweißparameter für diesen Drahtdurchmesser sind übliche Werte im Sprühlichtbogenbereich. Die Lichtbogenlänge wurde über die Lichtbogenspannung bzw. Lichtbogenkorrektur so eingestellt, bis eine sichtbare Ablenkung auftrat.

Tabelle 4 Parameter für Vorversuche

Schweißnaht	1	2	3
Schweißverfahren	MAG		
Kennlinie	Standard		
Stromart	DC +		
Zusatzdraht	EMK 6		
Führungsart	neutral		
Querbewegung	Strichraupentechnik		
Schutzgasmenge [l/min]	16		
Abstand Kontaktrohr [mm]	~ 10		
Min. Abstand Magnet [mm]	15	15	~ 15

Schweißnaht	1	2	3
Stahlsorte	S 235		
Vorwärmtemperatur [°C]	keine		
Schutzgas	82 % Ar 18 % CO ₂		
Drahtdurchmesser [mm]	1,2		
Dicke Einlegeblech [mm]	nicht anwendbar		
Schweiß-Strom [A]	291		
Drahtvorschub [m/min]	8,1		
Schweiß-Spannung [V]	29,9		
Lichtbogen-Korrektur [%]	20		
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	~ 50		
Streckenenergie [kJ/m]	1044,1		
Spulen-Strom [A]	0,9		
Min. magnetische Flussdichte [mT]	30	30	~ 10

Wie ersichtlich ist, wurde beim ersten Versuch „Schweißnaht 1“ ein quasiparalleles Magnetfeld in die Lichtbogenumgebung induziert, was eine orthogonale Nahtverwerfung durch die resultierende Lorentzkraft bewirkte. Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigt die Versuchsnaht 1, wobei die rote Linie die Nahtverwerfung in Polumgebung hervorhebt.

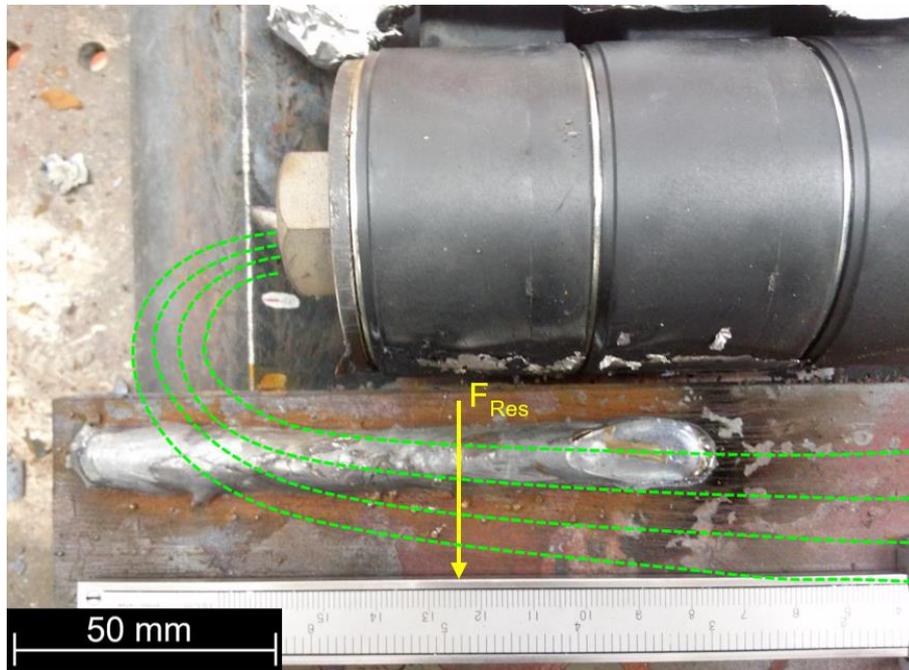


Abbildung 22 Vorversuch Schweißnaht 1 – Positionierung des Magneten und schematische Darstellung der Magnetfeldlinien und der resultierenden Lorentzkraft

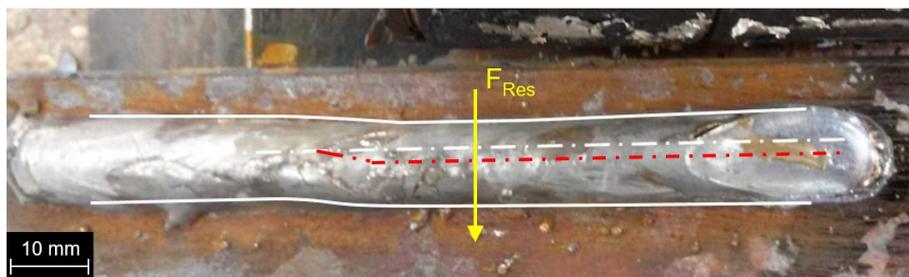


Abbildung 23 Vorversuch Schweißnaht 1 – Detail der Nahtverwerfung normal zur Schweißrichtung

Die zweite Schweißung „Schweißnaht 2“ erfolgte nach selbigem Prinzip, nur resultierte aus der größeren magnetischen Flussdichte unmittelbar vor dem Magnetpol eine zunehmende Nahtverwerfung bei Annäherung an diesen – wiederum durch die resultierende Lorentzkraft bedingt. Die rote Linie markiert die steigende Nahtverwerfung (Abbildung 24 und Abbildung 25).

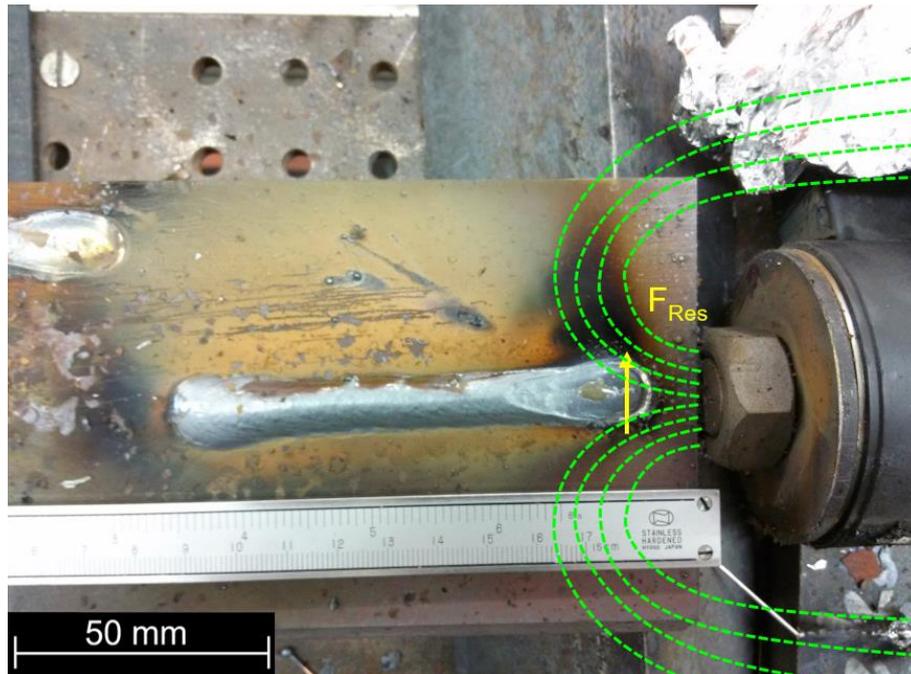


Abbildung 24 Vorversuch Schweißnaht 2 – Positionierung des Magneten und schematische Darstellung der Magnetfeldlinien und der resultierenden Lorentzkraft

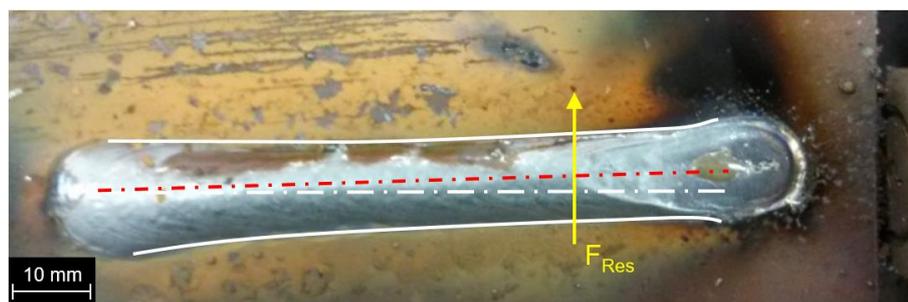


Abbildung 25 Vorversuch Schweißnaht 2 – Detail der zunehmende Nahtverwerfung normal zur Schweißrichtung

Die dritte Versuchsschweißung „Schweißnaht 3“ zeigt, entgegen den ersten beiden Schweißungen, einen gegen die Schweißrichtung verworfene Naht – sprich eine s.g. „schleppende“ Führung des Lichtbogens in der Polumgebung. Dies ist durch die Nahtverbreiterung in der Polumgebung sichtbar, gekennzeichnet durch die rote Markierung (Abbildung 26 und Abbildung 27). Eine derartige Anwendung wurde im Weiteren nicht näher Betrachtet – als mögliche Anwendungsfelder könnte hier eine Verbesserung des Einbrandbildes angedacht werden.



Abbildung 26 Vorversuch Schweißnaht 3 – Positionierung des Magneten und schematische Darstellung der Magnetfeldlinien und der resultierenden Lorentzkraft

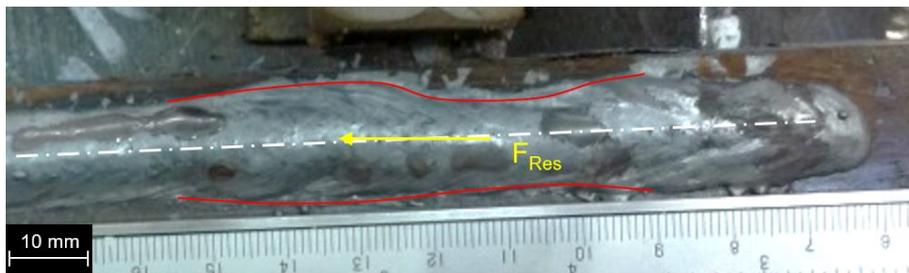


Abbildung 27 Vorversuch Schweißnaht 3 – Detail der Nahtverwerfung entgegen der Schweißrichtung

Zusammenfassend haben die Vorversuche folgende Erkenntnisse gebracht:

- I Der Schweißlichtbogen im gewählten Leistungsbereich und damit die schlussendliche Schweißnaht lassen sich durch das externe magnetische Feld beeinflussen bzw. ablenken.
- I Entscheidend hierbei ist die Orientierung des externen Magnetfeldes.

Aus den hieraus gewonnen Erkenntnissen folgte die spätere Versuchsanordnung und speziell die Geometrie des Engspalt-Magnetjochs.

4 Auslegung des Magnetjochs

Hier folgt die notwendige magnetische Versuchsanordnung. Um eine seitliche Auslenkung im Engspalt zu erreichen, wird die Anordnung lt. Abbildung 28 realisiert. Dabei wird ein gerichtetes magnetisches Feld der magnetischen Flussdichte \vec{B}_A im unmittelbaren Bereich des Schweißlichtbogen-Magnetfeldes $\vec{B}(I)$ anhand eines Magnetjochs und Spulen eingebracht. Damit das Magnetfeld parallel und symmetrisch im Engspalt verläuft, wurde ein U-förmiges Joch mit zwei Schenkeln, einer vor und einer nach dem Schweißbrenner, angedacht. Die Jochschenkel sind dabei direkt im Schweißspalt zwischen den Schienenfüßen positioniert. Während dem Schweißen mit dem Brenner bewegt sich so der Magnet mit, wodurch die Position des externen Magnetfeldes zum Lichtbogen-Magnetfeld während der Schweißung gleichbleibt. Durch den Tausch der magnetischen Pole kann der Lichtbogen gezielt auf die linke oder die rechte Seite des Schweißspalts ausgelenkt werden.

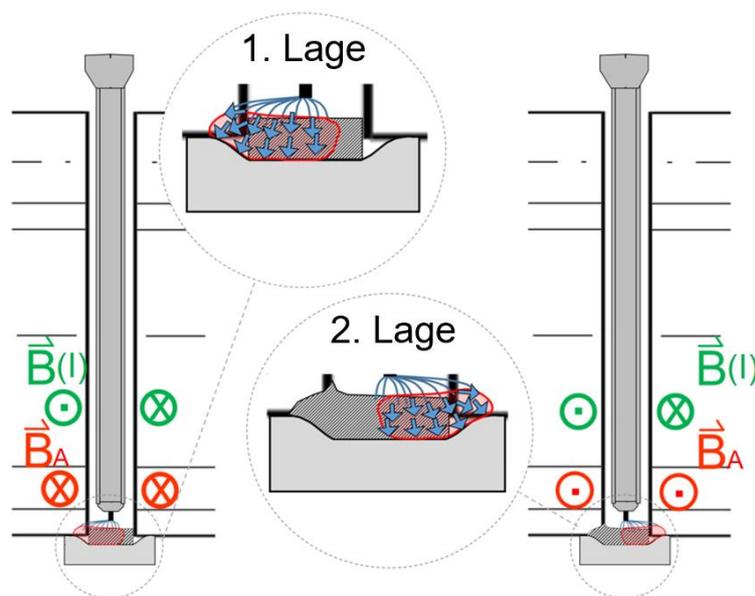


Abbildung 28 Prinzip der magnetischen Ablenkung im Engspalt

4.1 FE-Simulation des Magnetfeldes im Schweißspalt

Laut genannter Literatur erfolgt eine nennenswerte Ablenkung des MAG-Lichtbogens im Mittel bei einer nicht ferromagnetischen Engspaltumgebung bei ca. 5 mT konstanter magnetischer Flussdichte im Lichtbogenbereich. Im ferromagnetischen Engspalt werden in der Literatur Werte von ca. 20 mT für eine gute Ablenkung angegeben. [34] - [38]

Aufgrund folgender Aspekte wurde eine Übertragung der Daten aus der Literatur auf die durchgeführte Arbeit als schwierig angesehen:

- I grundsätzlich stark variierende Angaben in der Literatur
- I die in dieser Arbeit angestrebten Strichraupentechnik – um den Wärmeeintrag möglichst gering zu halten
- I die stark flussdichte-vermindernde Umgebung des ferritischen Engspalts
- I die völlig anderen geometrischen Gegebenheiten

Um die Auslegung des geplanten Aufbaus hinsichtlich des externen Magnetfeldes zu optimieren, wurde aus diesem Grund eine FE-Simulation durchgeführt.

4.1.1 Simulationsmodell

Das primäre Ziel der durchgeführten Simulation war es, festzustellen, ob die aus der Literatur bekannte notwendige Flussdichte bei der geplanten Anordnung mit genügend Sicherheit im richtigen Größenordnungsbereich erreicht werden kann. Hierzu wurde als erster Schritt ein Designvorschlag für das Joch überlegt. Dazu wurden anhand einer Internetrecherche passende und lieferbare Magnetspulen gesucht.

Konkrete Ziele der Simulation:

- I Optimierung Magnetjoch
- I Spulendesign (Wicklungsanzahl und Drahtdurchmesser)
- I Darstellung der Flussdichteverteilung in der Jochschenkelumgebung beim Schienenfuß und dem 15 mm Blech-Engspalt
- I etwa 20 mT magnetisch Flussdichte in Engspaltmitte bei 1 A Spulenstrom

Basierend auf diesem ersten Anhaltspunkt wurde ein Modell des Magnetjochs samt Spulen in der Engspaltumgebung in SolidWorks® entworfen (Abbildung 29) und daraus ein elektromagnetisches Modell mithilfe der FE-Software COMSOL Multiphysics 5.1 ® erstellt.

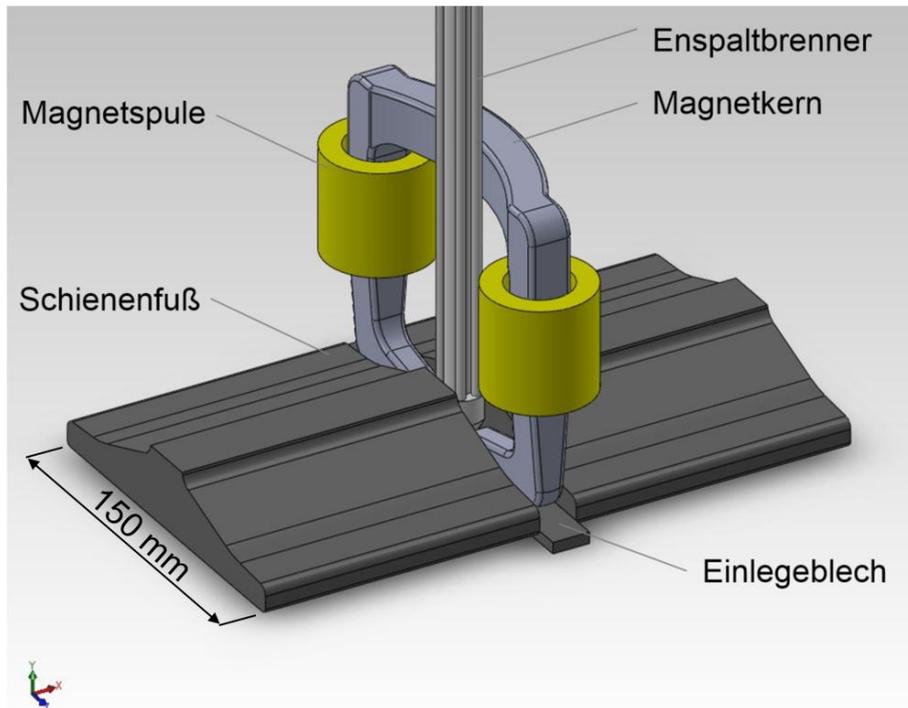


Abbildung 29 Modell der Versuchsanordnung

Die wichtigsten zusätzlichen Randbedingungen der Simulation waren: [27]

- I Stationäre Rechnung
- I Anzahl Spulen in Serie geschaltet: 2
- I Relative Permeabilität Magnetkern und Engspalt $\mu_r=1000$
- I Brenner nicht ferromagnetisch – austenitisch und damit eine relative Permeabilität von Vakuum mit $\mu_r=1$
- I Relative Permeabilität Luft ca. $\mu_r=1$
- I Engspaltbreite: 16 mm
- I Abstand Magnet zu Engspaltgrund: 8 mm

Alle Simulationen wurden einheitlich bei einer Spulenstromstärke von 1 A durchgeführt. Gemäß den im Kapitel „Elektromagnetische Grundlagen“ beschriebenen Zusammenhängen besteht eine lineare Korrelation zwischen der Stromstärke und der magnetischen Flussdichte. Die Überlegung war, dass dann nach Anpassung und Vali-

dierung des Simulationsmodells eine spezifische magnetische Flussdichte im Lichtbogenbereich pro 1 Ampere Spulenstrom festgelegt wird. Mit dieser erfolgt die Hochrechnung auf die, in Abhängigkeit des Spulenstroms, tatsächlich vorherrschende magnetische Flussdichte im Lichtbogenbereich.

Um später für die Validierung der Simulation ein stabileres Messergebnis mit weniger geometriebedingten Einflussgrößen zu haben, wurde die Simulation, neben dem Schienenfuß-Engspalt, auch für einen vereinfachten 15 mm Blech-Engspalt durchgeführt.

4.1.2 Simulationsergebnisse

Erste Simulationsergebnisse zeigen die Problematik beim ferritischen Engspalt auf. Durch die hohe magnetische Leitfähigkeit des umgebenden Materials wird die magnetische Flussdichte unmittelbar bei den Jochschenkeln im Engspalt stark vermindert und zum Einlegeblech gegen Null hin reduziert (Abbildung 30). Dies bedeutet, dass ein weitaus stärkeres magnetisches Feld eingebracht werden muss, um eine nennenswerte Ablenkung zu bewirken – verglichen mit einer paramagnetischen Umgebung. Mit zunehmender Lichtbogenlänge bzw. Schweißspannung ist somit eine bessere Ablenkbarkeit gegeben, durch die nicht lineare Zunahme der magnetischen Flussdichte vom Einlegeblech ausgehend.

In Engspaltmitte steigt die magnetische Flussdichte beim Schienenfuß-Engspalt, sowie beim vereinfachten Blech-Engspalt, auf etwa 18 mT an (bei 1 A und 500 Windungen pro Spule), wird somit durch die Vereinfachung in der Simulation nicht verändert (Abbildung 31 - Abbildung 33). Gemäß Angaben aus der Literatur genügt diese magnetische Flussdichte für eine nennenswerte Auslenkung.

Hier ist allerdings Vorsicht geboten, da die Angaben in diverser Literatur schwer vergleichbar sind, durch die starke Lageabhängigkeit der Messung im ferritischen Engspalt. Um genügend Spielraum nach oben zu haben erfolgte die Simulation bei 1 A – womit später die Möglichkeit besteht, die Stromstärke und damit die Flussdichte um den Faktor drei zu erhöhen (max. Spulenstromstärke). Sollte eine weitere Steigerung der magnetischen Flussdichte nötig sein, ist durch abnehmbare Jochschenkel die Montage stärkerer Spulen möglich.

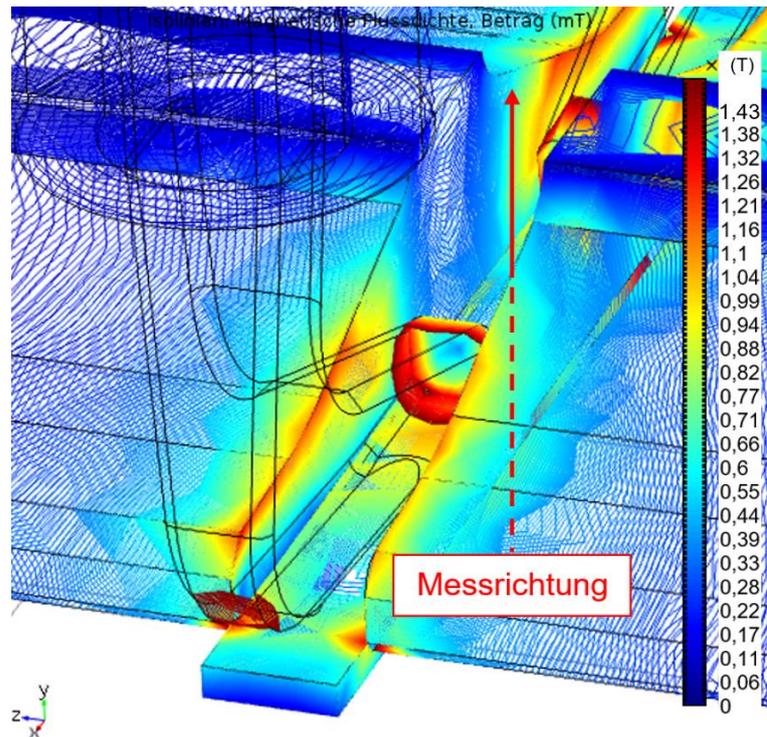


Abbildung 30 Simulation der magnetischen Flussdichte im Schienenfuß-Engspalt mit Isolinen

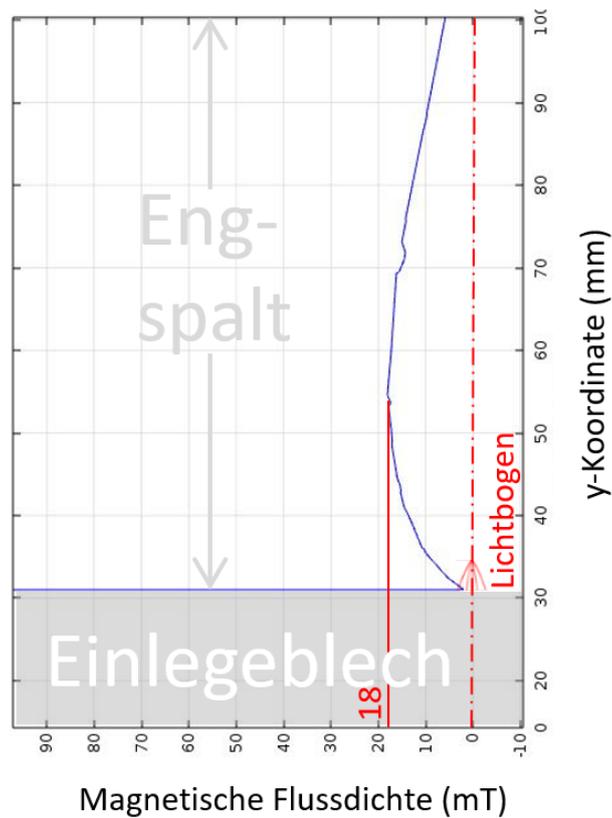


Abbildung 31 Simulierter Verlauf der magnetischen Flussdichte im Schienenfuß-Engspalt

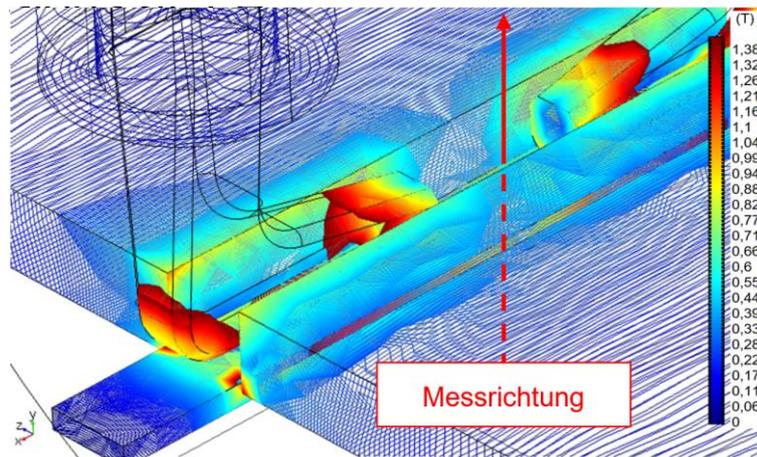


Abbildung 32 Simulation der magnetischen Flussdichte im vereinfachten Blech-Engspalt mit Isolines

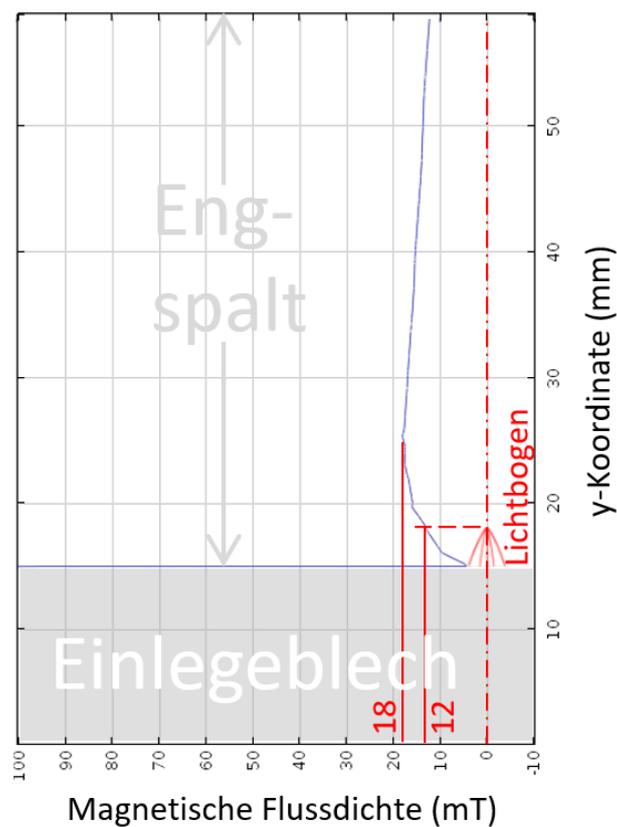


Abbildung 33 Simulierter Verlauf der magnetischen Flussdichte im vereinfachten Blech-Engspalt

Um bei der Vermessung den Magnet auch einzeln betrachten zu können, zeigt folgende Abbildung 34 die Simulationsergebnisse des Magnetjochs samt Spulen in einer nicht ferromagnetischen Umgebung – wiederum bei 1 Ampere Spulenstromstärke.

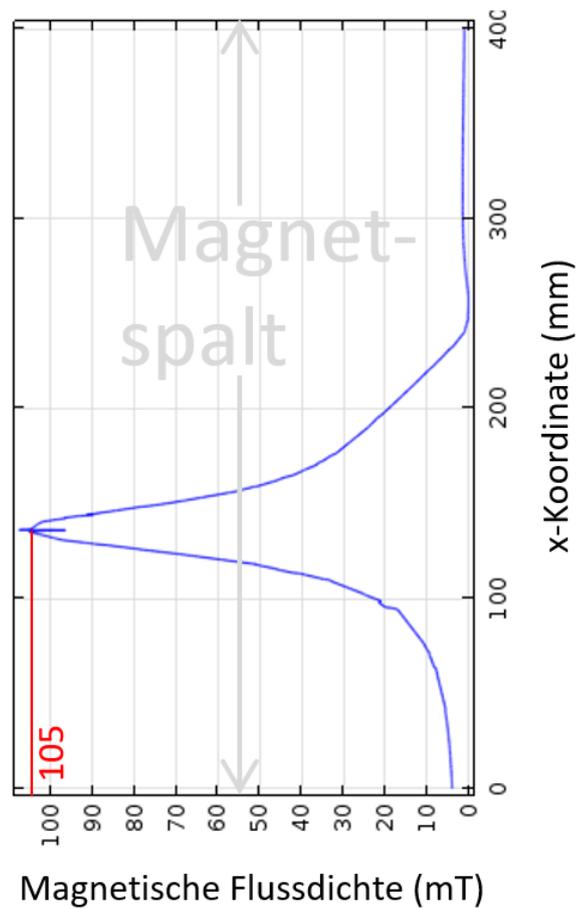
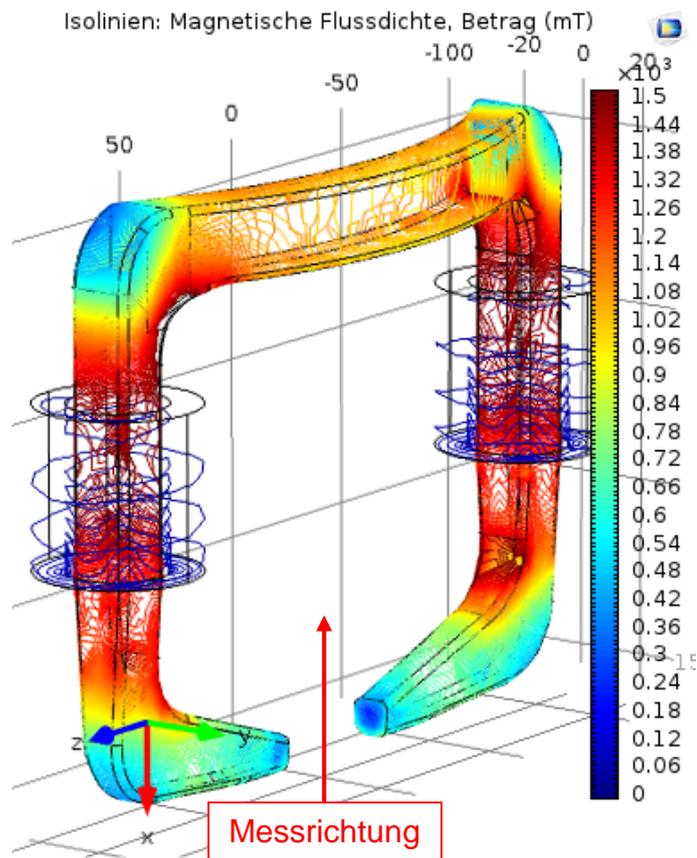


Abbildung 34 Simulation der magnetischen Flussdichte am Joch in nicht ferromagnetischen Umgebung mit Isolinien (o.); Simulierter Verlauf der magnetischen Flussdichte zwischen den Joch-Schenkeln (u.)

4.1.3 Validierung der Simulation

Um die Simulation zu validieren, wurde die magnetische Flussdichte via Gaußmeter gemessen und mit der Simulation gegenübergestellt. Dies im nachgebildeten vereinfachten ferritischen Engspalt mit 15 mm Blechplatten, aber auch außerhalb des Engspaltes in nicht ferromagnetischer Umgebung (Abbildung 35).

Die Messergebnisse sind den Simulationsergebnissen in Tabelle 5 gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Simulation ein Ergebnis in der richtigen Größenordnung liefert. Dennoch, im Engspalt wird die magnetische Flussdichte in der Simulation um etwa 45% unterschätzt. Im Gegenteil dazu wird die Flussdichte ohne Beeinflussung von ferromagnetischen Gegenständen in der Simulation um etwa 60% überschätzt.

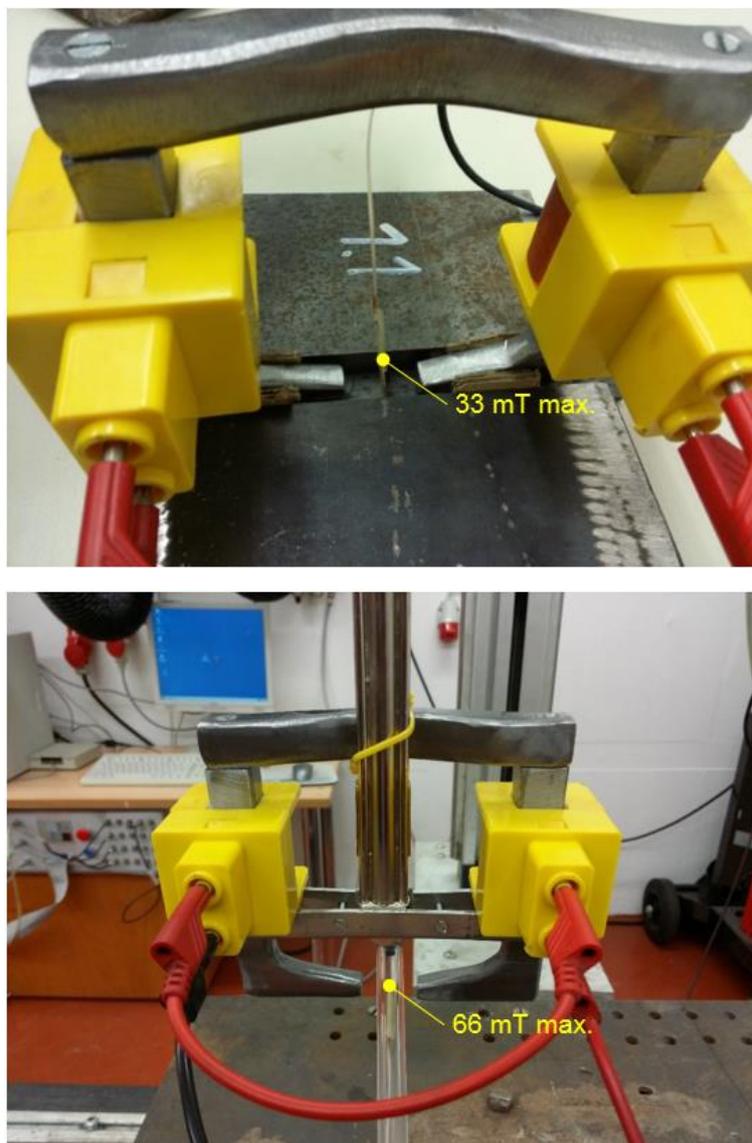


Abbildung 35 Vermessung Magnet im Blech-Engspalt (o.); nur Magnet (u.)

Tabelle 5 Vergleich Simulation mit Messung im vereinfachten Blech-Engspalt

Flussdichte	Simulation	Messung
Magnet max.	105 mT	66 mT
Magnet in Spaltmitte max.	18 mT	33 mT

Zusätzlich zur Messung der absoluten Größe der magnetischen Flussdichte, wurden mithilfe eines Versuchs die Ausrichtungen der Feldlinien im Bereich der Jochschenkel untersucht. Abbildung 36 zeigt das mittels Feilspänen sichtbar gemachte Magnetfeld.

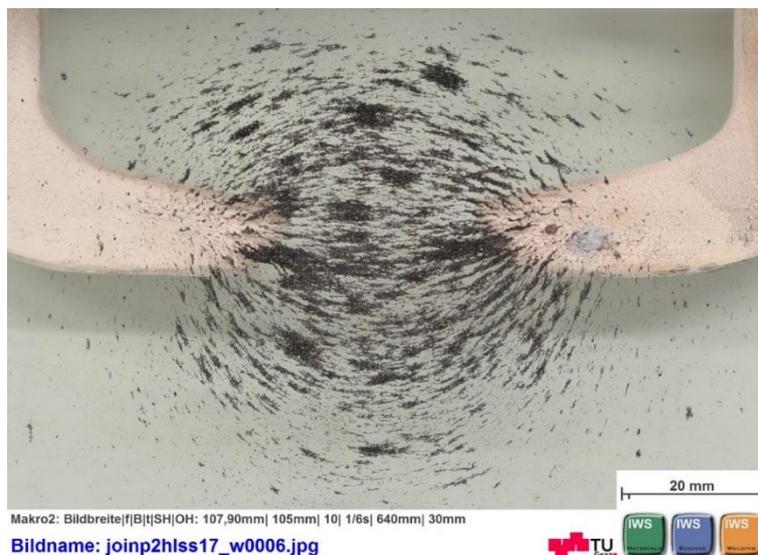


Abbildung 36 Mittels Feilspänen sichtbar gemachtes Magnetfeld

4.1.4 Diskussion und Verwertung der Simulationsergebnisse

Nach einer Gegenüberstellung der Simulations- und Messergebnisse ist eine Differenz festzustellen. Die Unterschiede wurden auf folgende Aspekte zurückgeführt:

- I Betrachtet man die simulierten Verläufe der magnetischen Flussdichte, so ist ersichtlich, dass sich diese als Funktion des Abstands relativ stark ändern. Betrachtet man dazu den Messaufbau mit Hallsensor, so kann abgeschätzt werden, dass dadurch eine Messungenauigkeit wahrscheinlich ist.
- I Die divergierenden Werte von Simulation und Messung im Blech-Engspalt resultieren vermutlich auch aus einer kleineren Abminderung des magnetischen Felds im nachgebildeten Engspalt bei der Messung. Es tritt eine Abschwächung um 50 % auf, wobei im simulierten Engspalt eine Abschwächung von ca. 80 % auftritt. Die Übertragung des magnetischen Flusses wird also in der Simulation

überschätzt, was durch abweichende Permeabilitäten von Magnetkern- und Engspalt-Material zu erklären ist.

- Ein weiterer Aspekt ist die nicht optimale Umsetzung des Magnet- und Engspaltmodells, die reale Geometrie weicht stets vom Modell ab.

Für die Abschätzung wird während den Versuchen die gemessene ampere-spezifische magnetische Flussdichte von 33 mT pro 1 A verwendet. Dies ist legitim, da die erste Schienenfuß-Simulation die gleichen Werte in der Mitte lieferte wie der Messwert für die Validierung und die gleichen Permeabilitäten angenommen wurden. Auf eine Neuauslegung der Simulation mit genauer ermittelten Permeabilitäten usw. wurde verzichtet, da dies den Fokus dieser Arbeit verzerren würde.

Nachfolgend wurde das Schienenfuß-Simulationsmodell mittels den Messwerten über einen linear eingehenden Korrekturfaktor angepasst. Das angepasste Modell weist nun in Engspaltmitte die gemessenen 33 mT maximale magnetische Flussdichte auf und im Lichtbogenbereich somit maximal 18 mT (Abbildung 37).

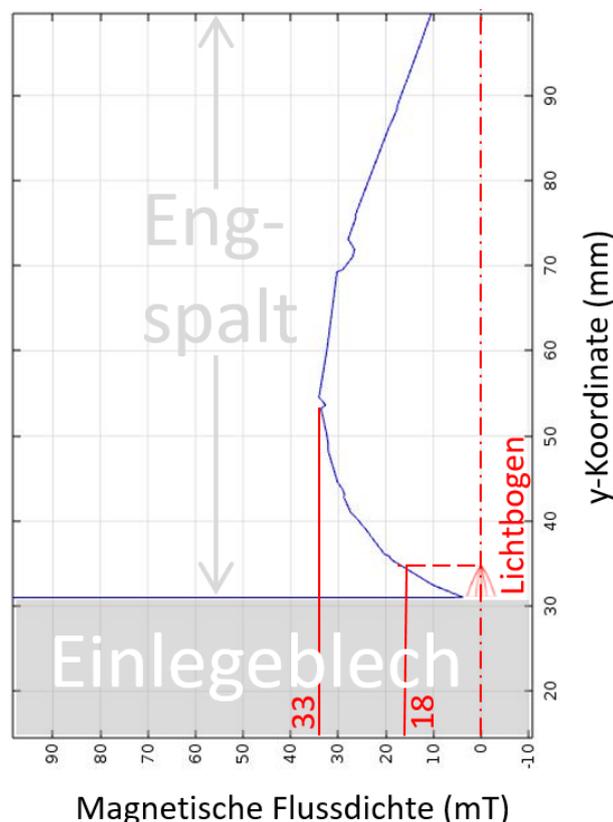


Abbildung 37 Magnetischer Flussdichte-Verlauf in Schienenfuß-Engspaltmitte nach Anpassung des Modells

Abbildung 38 zeigt die veränderliche magnetische Flussdichte in der Lichtbogenumgebung und die maximale magnetische Flussdichte im Engspalt bei Magnetdurchfahrt. Dazu wurde die abgeglichene stationäre Simulation mehrmals, mit jeweils verschobenem Magnetjoch, im Engspalt durchgeführt und ein Verlauf ermittelt.

Es zeigt sich, dass am Rand auf beiden Seiten des Schienenprofils die magnetische Flussdichte um das Fünffache ansteigt. Dieser Anstieg ist auf den nicht komplett im Engspalt befindlichen Magneten zurück zu führen. Um den Effekt der stark ansteigenden Flussdichte zu Beginn und am Ende abzumindern, wurden Ein- bzw. Auslaufbleche vorgesehen. Der sich dadurch geänderte Verlauf ist ebenfalls in Abbildung 38 aufgetragen – was die Flussdichteunterschiede abmindert.

Es soll hier noch festgehalten werden, dass angesichts dieser Ergebnisse und der daraus resultierenden stark lageabhängigen magnetischen Flussdichte eine alleinige Angabe der magnetischen Flussdichte während den Versuchen nicht sinnvoll ist. Abhängig von der Lichtbogenlänge und der Schweißposition wirkt eine andere maximale magnetische Flussdichte im Lichtbogenbereich. Während den Versuchen wird daher auch immer der Spulenstrom, neben der maximalen magnetischen Flussdichte in Engspaltmitte, angeführt.

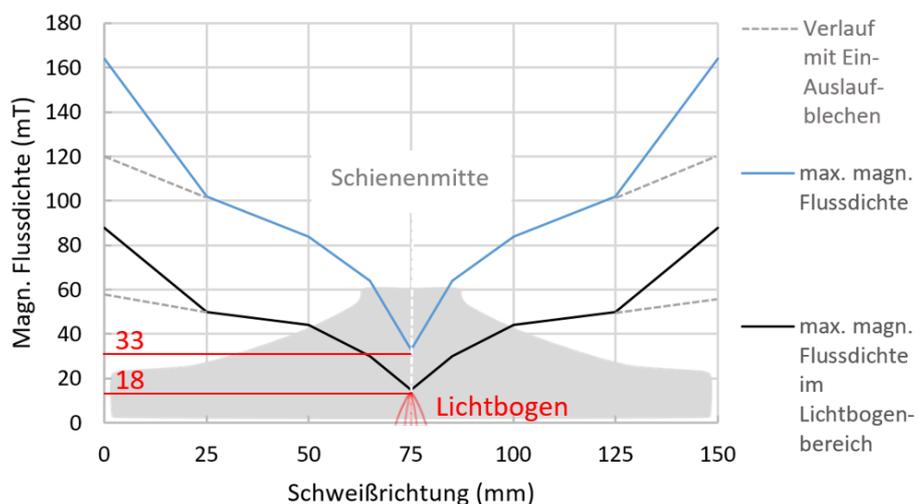


Abbildung 38 Verlauf der maximalen magnetischen Flussdichte bei Schienenfuß-Durchfahrt mit Magnet nach Anpassung des Modells

5 Schweißversuche

5.1 Versuchsdurchführung

Die Schweißversuche wurden in mehreren Serien, mit jeweils separater Bewertung der Ergebnisse, durchgeführt. Dadurch konnte das richtige Set an allen einflussnehmenden Parametern sukzessive identifiziert und ein optimales Parameterfenster eingegrenzt werden.

5.1.1 Schweißanlage

Alle Schweißversuche erfolgten auf einer Fronius MAG Transpuls Synergic 4000 CMT® Schweißanlage im Lichtbogen-Schweißlabor des IMAT an der TU Graz. Der Schweißbrenner wurde auf einem Stativ fest eingespannt. Auf einer programmierbaren Linearachse wurde zum Spannen der Schweißprobe eine Vorrichtung verwendet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 39 gezeigt. [39]

Es wurde die Standard-Kennlinie verwendet. Auf Impuls- und CMT-Prozess wurde, wegen des zu erwartenden kälteren Werkstoffübergangs und dem somit unvorteilhafteren geringeren Einbrand bei gleichzeitig mehr Nahtaufbau verzichtet.

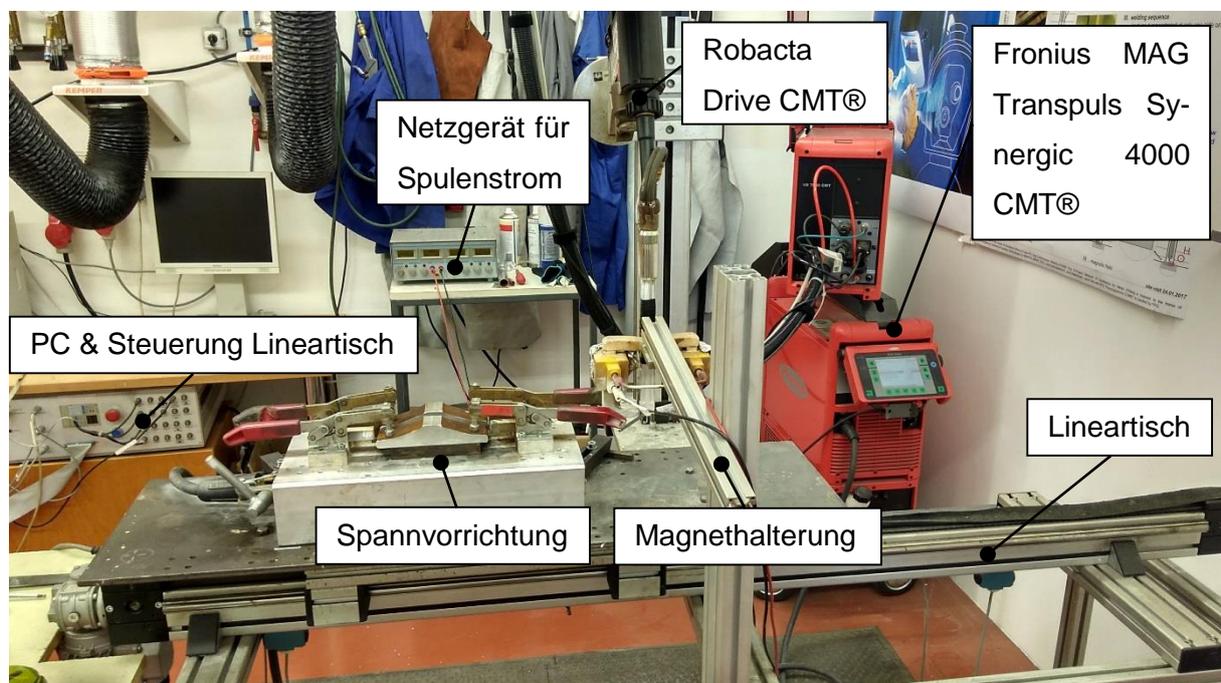


Abbildung 39 Versuchsanlage im Schweißlabor

Im Zuge der Schweißversuche wurden je nach Versuchsstück Vorrichtung, Brenner und Magnethalterung angepasst. Seitens der Klaus Fronius International GmbH wurde ein wassergekühlter Robacta 5000 Engspaltbrenner® zur Verfügung gestellt, welcher in Vorversuchen bzw. dann bei den finalen Versuchen zum Einsatz kam (Abbildung 40).

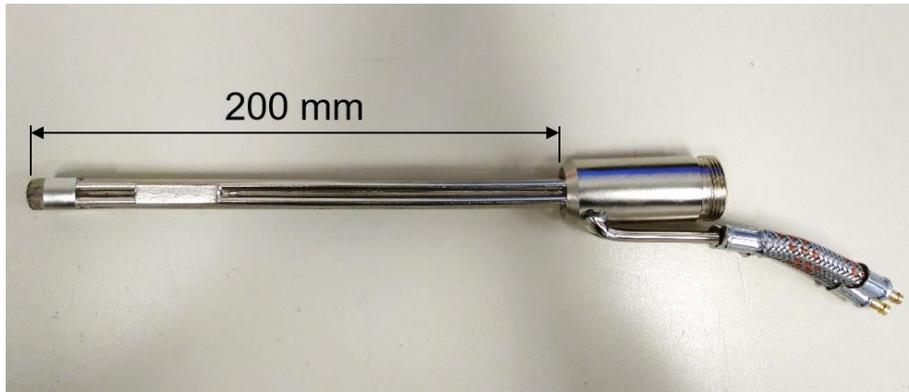


Abbildung 40 Fronius Robacta 5000 Engspaltbrenner® [mm]

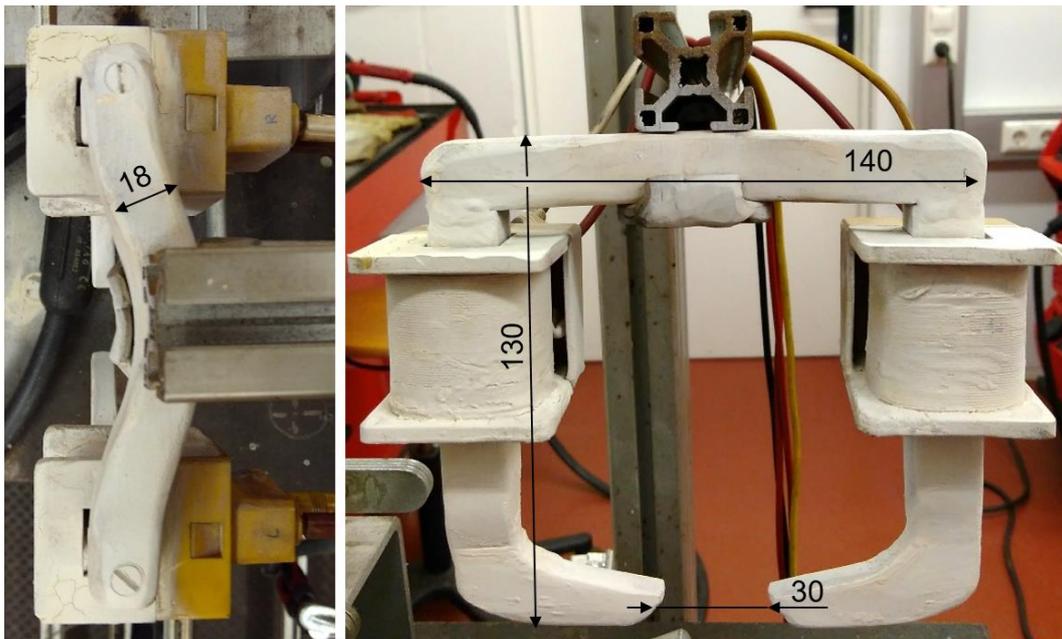


Abbildung 41 Magnetjoch mit Spulen [mm]

Abbildung 41 zeigt den gefertigten Magneten samt Halterung. Zur Fertigung des Magnetjochs wurden 18x18 mm Baustahlstäbe gefräst und abgelängt. Der Bogen des Magnetjochs wurde vorgeschmiedet und mittels Gewindebohrungen mit den Magnetjochschenkeln verschraubt. Durch Schweißen mit anschließendem Trennen und Verschleifen wurden die Magnetjochschenkel in die gewünschte Form gebracht. Eine aufsprühbare Keramikbeschichtung soll das Anhaften von Schweißspritzern vermei-

den. Mittels Aluminiumfolie wurden später die Magnetspulen vor einer zu großen thermischen Belastung geschützt – das Abschmelzen der Drahtisolierung würde zu einem Funktionsverlust der Spule führen.

5.1.2 Drahtzusatzwerkstoff

Als Schweißzusatz wurde einheitlich ein EMK 6® Draht von voestalpine Böhler Welding Austria GmbH verwendet. Hierbei handelt es sich um eine universell einsetzbare verkupferte Massivdrahtelektrode mit einem sowohl unter Mischgas, als auch unter CO₂ weitgehend spritzerfreiem Werkstoffübergang. Die Auswahl erfolgte auf Grund der div. verfügbaren Dimensionen von 0.8, 1.0, 1.2 und 1.6 mm. Gemäß Tabelle 6 hat dieser Zusatzdraht folgende chemische Zusammensetzung. [40]

Tabelle 6 Richtanalyse der Massivdrahtelektrode EMK 6 [40]

	C	Si	Mn
Gew.-%	0.08	0.9	1.45

5.1.3 Schweißparameter-Variation

Folgende Versuchparameter sind für die weiteren Versuche fixiert worden: Stromführungs-Kennlinie, Führungsart (stechend, schleppend oder neutral) und der Abstand des Magneten (Tabelle 7). Eine Abwägung bzw. Bestimmung aus einer Auswahl diverser Parameteroptionen oder frei variierbaren Größen soll im folgenden Versuchsteil getroffen werden (Tabelle 8).

Tabelle 7 Versuchparameter fixiert

Schweißverfahren	MAG
Kennlinie	Standard
Stromart	DC +
Zusatzdraht	EMK 6
Führungsart	neutral
Querbewegung	Strichraupentechnik
Schutzgasmenge [l/min]	16
Abstand Kontaktröhre [mm]	15
Abstand Magnet [mm]	8

Tabelle 8 Versuchsparameter optional bzw. variierend

Stahlsorte	S 235		R 260
Vorwärmtemperatur [°C]	keine		300
Schutzgas	82 % Ar 18 % CO ₂		100 % CO ₂
Drahtdurchmesser [mm]	1,0	1,2	1,6
Dicke Einlegeblech [mm]	1,5	6	8
Schweiß-Strom [A]	bis 400		
Drahtvorschub [m/min]	variierend		
Schweiß-Spannung [V]	variierend		
Lichtbogen-Korrektur [%]	variierend		
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	variierend		
Streckenenergie [kJ/m]	variierend		
Spulen-Strom [A]	0 bis 3		
Max. Flussdichte in Spaltmitte [mT]	0 bis 99		

5.2 Versuchsserie 0 „Platte“

Im Rahmen einfacher „bead on plate“ Versuche wurde, in Anlehnung an die Vorversuche, mit dem realisierten engspalttauglichen Magneten einfache Plasmaablenkungsversuche durchgeführt. Dabei wurden die Schweißnähte jeweils in einem Abschnitt ohne magnetische Auslenkung begonnen und dann, in etwa in der Mitte der Naht, das Magnetjoch eingeschaltet. Die Vorgehensweise ist schematisch in Abbildung 42 dargestellt. Die Bewertungskriterien waren hier der Versatz, das Spritzer-Aufkommen, die Nahtglättung und die erreichbare Nahthomogenität. Ziel der Versuche war eine grundlegende Funktionskontrolle des Verfahrensprinzips.

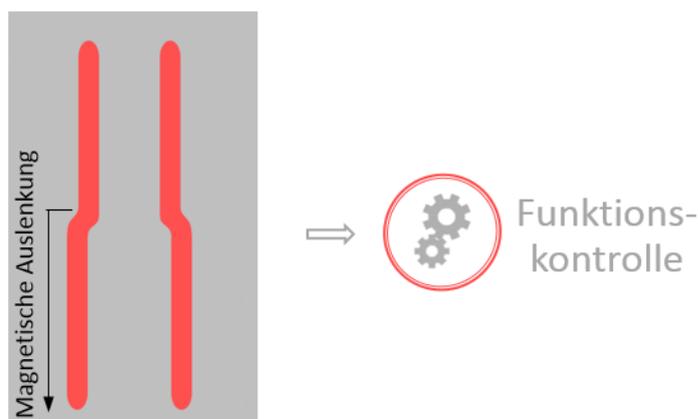


Abbildung 42 Schematische Darstellung zur Versuchsdurchführung der Versuchsserie 0 „Platte“

Die Versuchsreihe bestand aus zwei 20cm langen, auf einer 10 mm dicken ferritischen sandgestrahlten Blechplatte, geschweißten Nähten, welche in Wannennlage geschweißt wurden (Abbildung 43). Der Magnet wurde für die beiden Versuche jeweils entgegengesetzt gepolt. Nach dem Umpolen des Magnets erfolgt die Ablenkung in die entgegengesetzte Richtung.

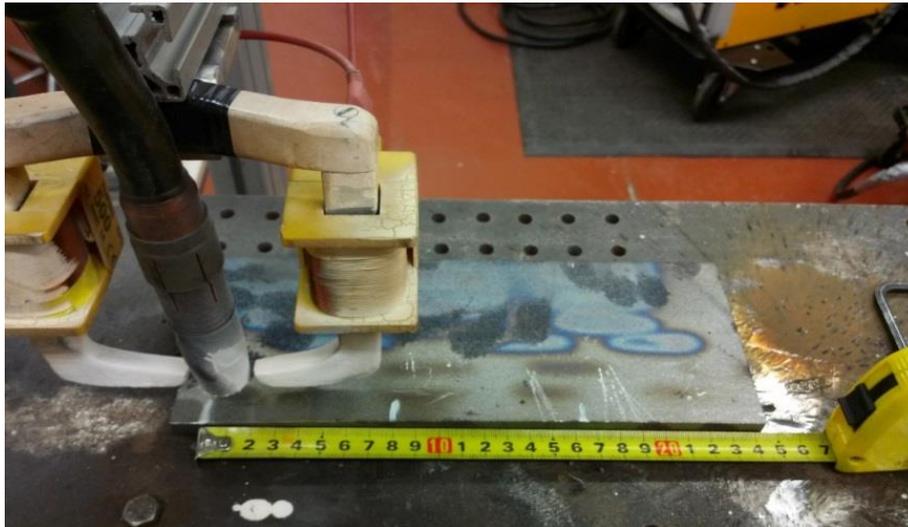


Abbildung 43 Versuchsaufbau der Versuchsserie 0 „Platte“

In Anlehnung an die Vorversuche wurden bei diesem Parameterset gemäß Tabelle 9 ähnliche Einstellungen verwendet, wobei bereits eine Optimierung in Richtung maximale Ablenkung bei moderatem Spritzeraufkommen erfolgt ist – was hier Bewertungskriterium war.

Tabelle 9 Gefundene Parameter für Versuchsserie 0

Stahlsorte	S 235
Vorwärmtemperatur [°C]	keine
Schutzgas	82 % Ar 18 % CO ₂
Drahtdurchmesser [mm]	1,2
Dicke Einlegeblech [mm]	nicht anwendbar
Schweiß-Strom [A]	293
Drahtvorschub [m/min]	8,4
Schweiß-Spannung [V]	28,8
Lichtbogen-Korrektur [%]	10
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	59
Streckenenergie [kJ/m]	858,1
Spulen-Strom [A]	2
Max. Flussdichte in Spaltmitte [mT]	0 > 66

5.2.1 Ergebnisse der Versuchsserie

Neben dem oben aufgezeigten Versatz von 3,4 bis 3,9 mm wurde eine Nahtverbreiterung ca. 12 auf 14 mm nachgewiesen (Abbildung 44). Die Naht zeigt im abgelenkten und nicht abgelenkten Bereichen eine ähnlich glatte Oberfläche. Auffällig ist vor allem auch das stärkere Spritzeraufkommen im Bereich der Ablenkung. Diese trat sehr deutlich in die Richtung der magnetischen Auslenkung auf, was somit neben der Auslenkung des Lichtbogens auch auf eine Auslenkung der Schweißtropfen durch das externe magnetische Feld hinweist. Mehrere Ansatzstellen zum Beginn der zweiten Schweißnaht sind einer Fehlermeldung der Schweißstromquelle geschuldet – was zum Abbruch der Schweißung führte.

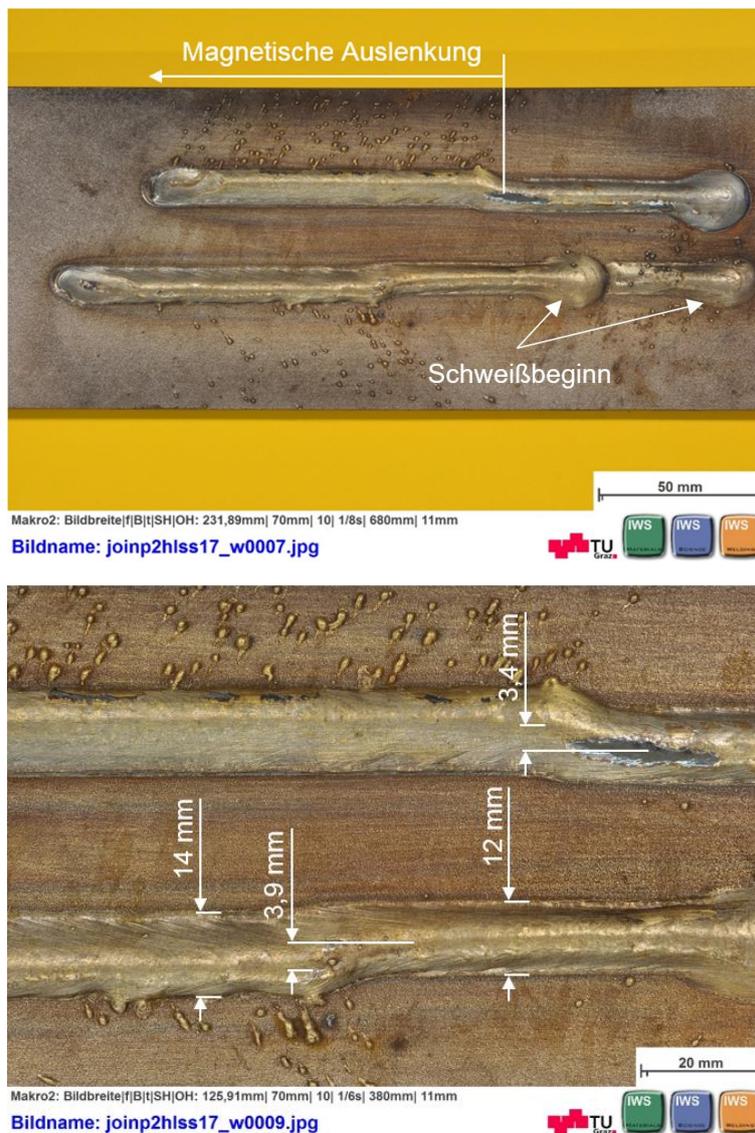


Abbildung 44 Draufsicht der beiden Schweißnähte der Versuchsserie 0; Überblick über die gesamte Schweißnahtlänge (o.); Vermessung der seitlichen Auslenkung und der Nahtbreite (u.)

5.3 Versuchsserie 1 „Rippen“

Bei dieser Versuchsserie wurden Schweißversuche mit einseitiger magnetischer Ablenkung im Engspalt durchgeführt. Um viele Versuche mit wenig Materialaufwand bei der Probenfertigung und einer raschen Auswertung durchführen zu können, wurde eine rippenförmige Probengeometrie gewählt, welche aus 15 mm dicken Stahlblechen gefertigt wurde. Die Schweißungen wurden einerseits optisch an der Oberfläche bewertet. Andererseits wurden der seitliche (a) und der diagonale Einbrand, sprich die Wurzelерfassung (c), vermessen.

Ziel dieser Versuchsserie war es zu allererst die eventuelle günstige Wirkung von reinem CO₂ als Schutzgas, durch die höhere Ionisierungsenergie, zu untersuchen. Des Weiteren sollte der Einfluss durch Verwendung von unterschiedlicher Schweißzusatzdrahtdurchmessern gegenübergestellt werden. Schlussendlich war das Ziel dann, eine erste Eingrenzung der grundlegenden Schweißparameter zu treffen. Insbesondere ging es darum, deren Wechselwirkungen zueinander fest zu stellen. Die Versuchsanordnung ist schematisch in Abbildung 45 dargestellt.

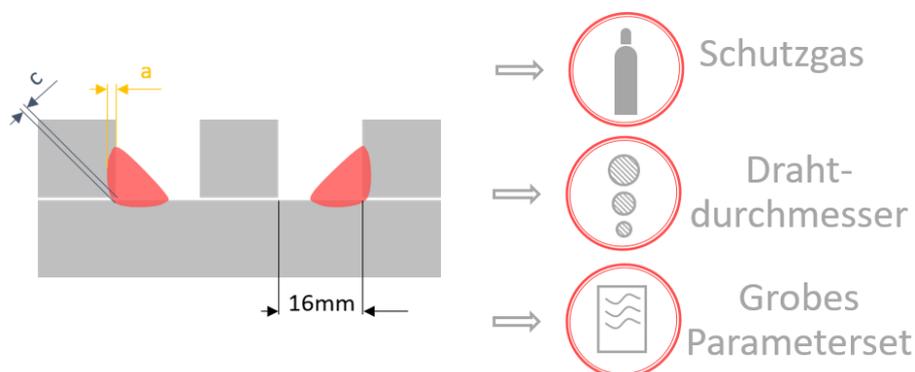


Abbildung 45 Schematische Darstellung zur Versuchsdurchführung der Versuchsserie 1 „Rippen“

Bei der verwendeten Probengeometrie bilden 15 mm dicke Rippen auf einer ebenfalls 15 mm dicken Stahlplatte mehrere Engspalte mit 16 mm Breite und 150 mm Länge (Abbildung 46). Die verwendeten Stahlbleche sind aus S235 Baustahl. Alle Rippen und Bleche wurden sandgestrahlt und mittels Heftnähten fixiert. Ein- bzw. Auslaufbleche sollen das Magnetfeld an den Enden homogenisieren. Die Massekontaktierung wurde mittig und gut leitend angebracht, um ungünstige Blaswirkungen zu unterbinden. Besonderer Sorgfalt bedurfte es bei der Positionierung um zu gewährleisten, dass der Brenner und das Magnetjoch mittig im Engspalt stehen (Abbildung 47). Die Versuchsparameter dieser Versuchsserie wurden iterativ optimiert (Tabelle 10). Die Schutzgas-

und Zusatzdrahtdurchmesser-Optionen sind bei gleichen Parametern gegenübergestellt worden. Hierzu war zu allererst die Findung eines gemeinsam verwendbaren Parametersets notwendig, da Abschmelzleistung, Lichtbogenart etc. stark von Schutzgas und Zusatzdrahtdurchmesser abhängig sind.



Abbildung 46 Versuchsaufbau der Versuchsserie 1 „Rippen“



Abbildung 47 Vorderansicht der Positionierung von Brenner und Magnet im Engspalt

Tabelle 10 Variierte Parameter für Versuchsserie 1

Stahlsorte	S 235		
Vorwärmtemperatur [°C]	keine		
Schutzgas	82 % Ar 18 % CO ₂	100 % CO ₂	
Drahtdurchmesser [mm]	1,0	1,2	1,6
Dicke Einlegeblech [mm]	nicht anwendbar		
Schweiß-Strom [A]	bis 400		
Drahtvorschub [m/min]	variierend		
Schweiß-Spannung [V]	variierend		
Lichtbogen-Korrektur [%]	variierend		
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	variierend		
Streckenenergie [kJ/m]	variierend		
Spulen-Strom [A]	0 bis 3		
Max. Flussdichte in Spaltmitte[mT]	0 bis 99		

Die Auswertung erfolgte anhand von einer optischen Beurteilung der Nahtoberseite und Wurzel, sowie über jeweils zwei Makro-Querschnitte. Dies jeweils bei 50 und bei 100 mm von Blechanfang, mit anschließender makroskopischer Ätzung nach Adler (Abbildung 48).



Abbildung 48 Draufsicht der Querschnitte für Auswertung

5.3.1 Ergebnisse der Versuchsserie

Schutzgas:

In Verwendung des 1.2 mm Zusatzwerkstoffs erfolgt im Folgenden eine Gegenüberstellung, welches Schutzgas sich günstig auf den seitlichen und diagonalen Einbrand auswirkt (Abbildung 49). Zur Auswahl steht neben 82 % Ar 18 % CO₂ Mischgas (M 21) reines CO₂.

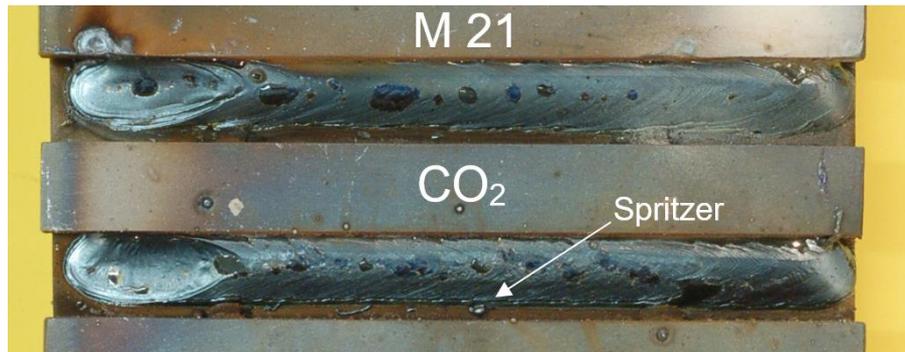


Abbildung 49 Draufsicht auf Nahtoberfläche bei Schweißung mit unterschiedlichem Schutzgas

Im Vergleich zur Referenznaht ohne magnetische Ablenkung in Abbildung 50 weist die mit M21 Mischgas geschweißte Naht mit magnetischer Ablenkung (Abbildung 51) keinen erkennbaren Argonfinger auf – was in diesem Fall günstig ist. An der Form des Einbrandes ist erkennbar, dass die magnetische Auslenkung den seitlichen Einbrand verstärkt.

Die Schweißung mit reinem CO₂ weist keinen signifikant erhöhten, seitlichen Einbrand auf. Sie zeigt auch, im Gegenteil zur M21 Naht, keinen diagonalen Einbrand auf. Der vertikale Einbrand ist im Vergleich zur Mischgasschweißung stärker, was durch die schmalere Ionisierungssäule gemäß Kapitel „Der Schweißlichtbogen“ zu erklären ist. Der erhöhte vertikale Einbrand ist hier eigentlich ungünstig, da ja das Ziel bei dieser Arbeit ist, den seitlichen Einbrand bzw. vor allem auch den diagonalen Einbrand zu erhöhen. Das Spritzeraufkommen war bei CO₂ deutlich größer, was ebenfalls auf bereits erläuterte Effekte im Kapitel „Der Schweißlichtbogen“ zurückgeführt werden kann. Zusammengefasst wurde kein positiver Einfluss von CO₂ als Schutzgas nachgewiesen und somit alle weiteren Versuche mit dem Standard M21-Schutzgas geschweißt.



Abbildung 50 Makro-Querschliff der Referenznaht bei gleichen Parametern ohne magnetische Ablenkung und M 21; Adler Ätzung

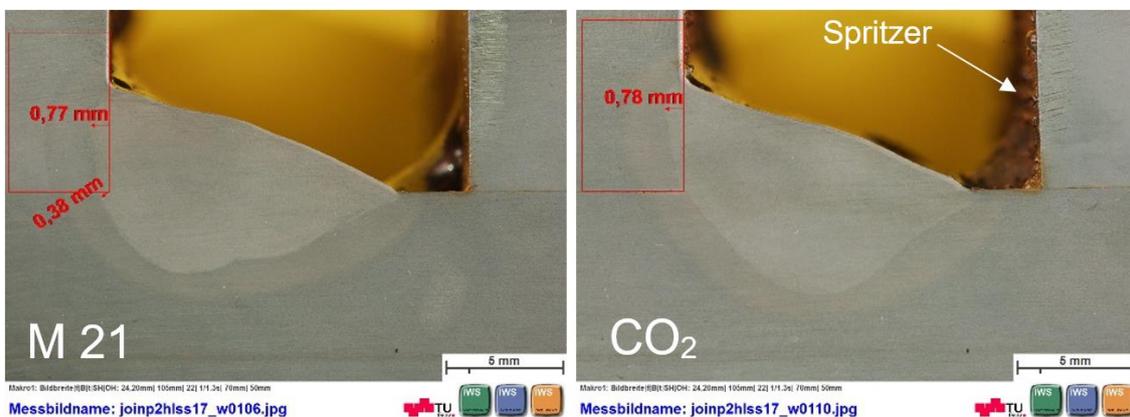


Abbildung 51 Makro-Querschliffe der Versuchsserie bei gleichen Parametern bei magnetischer Ablenkung und diversen Schutzgasen; Adler Ätzung

Schweißzusatzdurchmesser:

Die nachfolgende Bilderserie (Abbildung 52) zeigt drei Schweißnähte, welche mit einseitiger magnetischer Ablenkung bei gleichen Schweißparametern, allerdings unterschiedlichen Zusatzdurchmessern von 1.0, 1.2 und 1.6 mm geschweißt wurden.

Vergleicht man den maximalen seitlichen Einbrand der drei Nähte zueinander, so fällt einerseits auf, dass dieser bei der Schweißung mit 1.2 mm Draht am größten ist. Vergleicht man zusätzlich noch die relative vertikale Position des Auftretens des maximalen seitlichen Einbrandes, so fällt auf, dass diese mit zunehmendem Drahtdurchmesser nach unten wandert. Dieser Aspekt wird auch durch die immer tiefer in der Flanke „sitzende“ Schweißnaht wiedergegeben, und resultiert in der Tatsache, dass bei diesen Versuchen nur beim 1.6mm Draht ein diagonaler Einbrand gemessen werden konnte. Betrachtet man die Form des Einbrandes, so ist erkennbar, dass bei der Schweißung mit 1.0 mm Zusatzdraht der Argonfinger deutlicher und etwas außermittig

auftritt. Diese Form des Einbrandes wird dann mit zunehmendem Drahtdurchmesser runder und flacher.

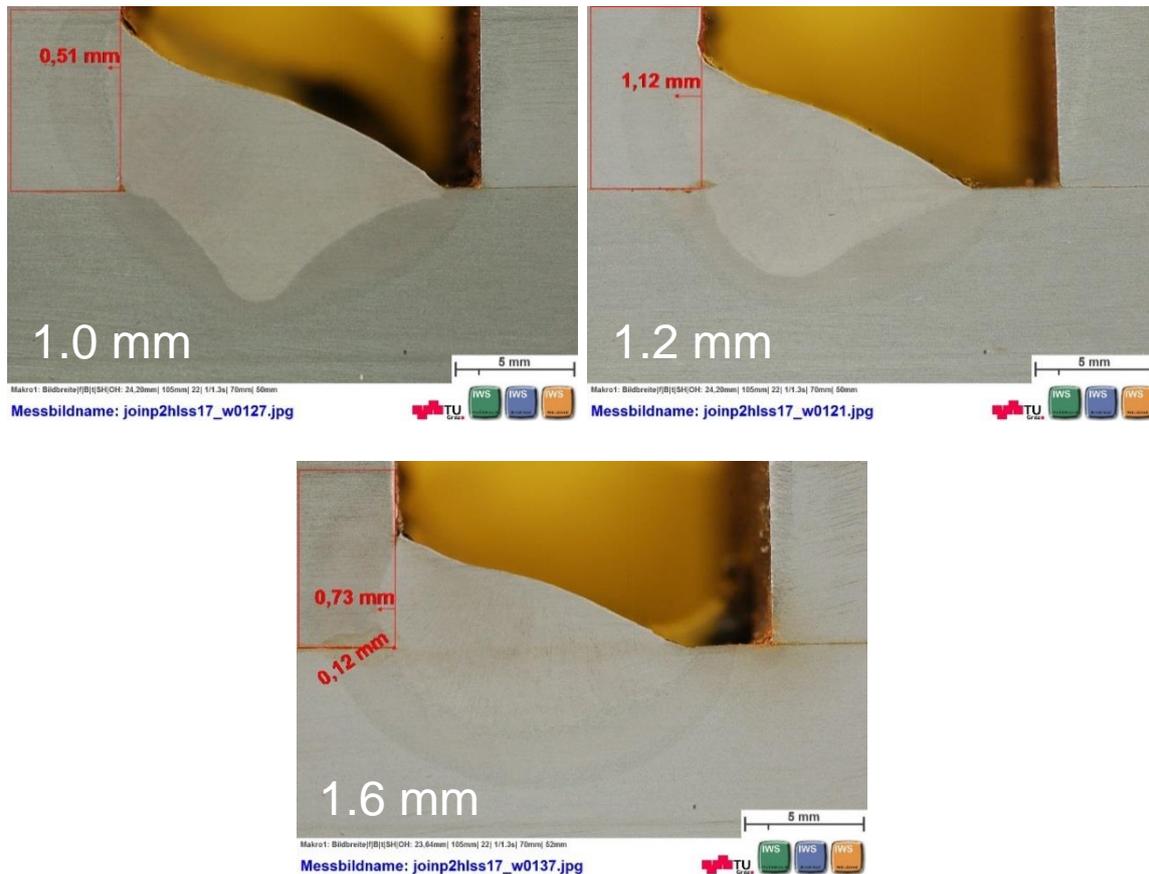


Abbildung 52 Makro-Querschliffe; Versuchsserie bei gleichen Parametern und diversen Zusatzdrahtdurchmessern; Adler Ätzung

Betrachtet man den Füllgrad als Verhältnis der durch die Schweißnaht aufgefüllten Querschnittsfläche zur gesamten Spaltquerschnittsfläche, so ist ersichtlich, dass dieser mit zunehmendem Drahtdurchmesser abnimmt (Abbildung 53). Dabei ist die relative Abnahme von 1.0 auf 1.2 mm deutlich größer als von 1.2 auf 1.6 mm. Es stellte sich so bei gleichem Schweißstrom beim dünneren Schweißzusatzwerkstoff eine höhere Abschmelzleistung bei weniger seitlichem Einbrand ein.

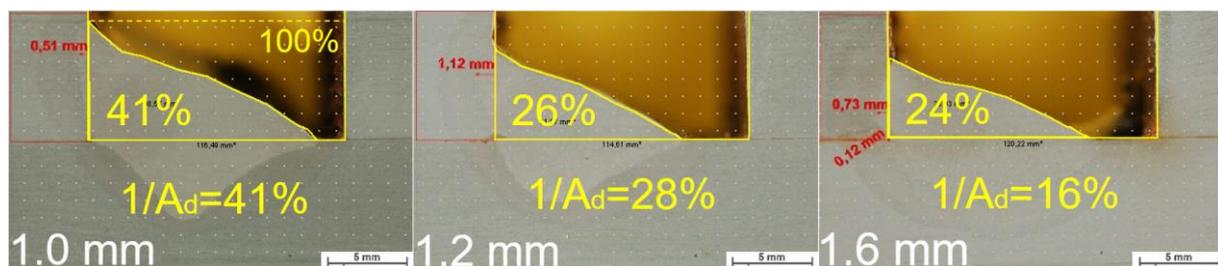


Abbildung 53 Makro-Querschliffe; Engspaltfüllgrad bei unterschiedlichen Schweißdrahtdurchmessern; Adler Ätzung

Die Ergebnisse können wie folgt erklärt werden: Aufgrund der höheren Stromdichte ist die Pinchkraft beim kleineren Drahtdurchmesser (1.0 mm Draht) und der Materialeintrag höher. Dies bewirkt durch den stärker beschleunigten Schweißtropfen auch einen ausgeprägter Argonfinger. Wird das Verhältnis von eins durch den Drahtquerschnitt dem Füllgrad gegenübergestellt, so bestätigt sich in etwa diese Annahme, da bei konstantem Strom dies der maßgebende Faktor für die Pinchkraft ist.

Demnach ist der 1.6 mm Zusatzdraht zu bevorzugen. Um eine spritzerarme Schweißnaht zu erhalten wurde der Sprühlichtbogenbereich angestrebt, welcher mit der verwendeten Stromstärke auch beim 1.6 mm Draht erreicht wurde.

Erstes Parameterset:

Bei dieser Versuchsserie lag das Augenmerk auch auf der Findung und Auslotung diverser Wechselwirkungen der Eingangsgrößen. Bei dieser Serie konnte während dem Schweißen, bei Überschreitung einer Grenzspannung, ein Lichtbogenüberschlag beobachtet werden. Dies resultiert in einer stark porösen Naht gemäß Abbildung 54 und Abbildung 55.



Abbildung 54 Draufsicht der Versuchsserie mit Überschlägen

Aus einer zunehmenden Spannung resultiert ein längerer Lichtbogen, welcher für die Ablenkung günstiger ist. Wird dieser längere Lichtbogen nun abgelenkt, findet der Strom einen Pfad mit geringerem Widerstand über die Engspaltkante und fließt hier, womit es zu einem Wandern bzw. Überschlagen auf die Engspaltkante kommt. Der

Lichtbogen brennt dann unruhig zwischen Einlegeblech und Engspaltkante. Der bereits diskutierte hohe Füllgrad, bei den verwendeten kleineren Drahtquerschnitten, verursacht zusätzlich einen instabilen Lichtbogen. Aus diesem unruhig brennenden Lichtbogen resultiert, durch die gestörte Schutzgasumgebung, das poröse Nahtbild.



Abbildung 55 Versuchsserie mit Überschlügen; Draufsicht (li.); Makro-Querschliff; Adler Ätzung (re.)

Bei Verwendung eines Engspaltbrenners führt dieser Effekt weiter zur Zerstörung des Brenners, da der Lichtbogen dann durch die Gasdüse via Stromleitung über die Engspaltkante oder das Magnetjoch brennt – „Überschlagen“ des Lichtbogens (Abbildung 56).

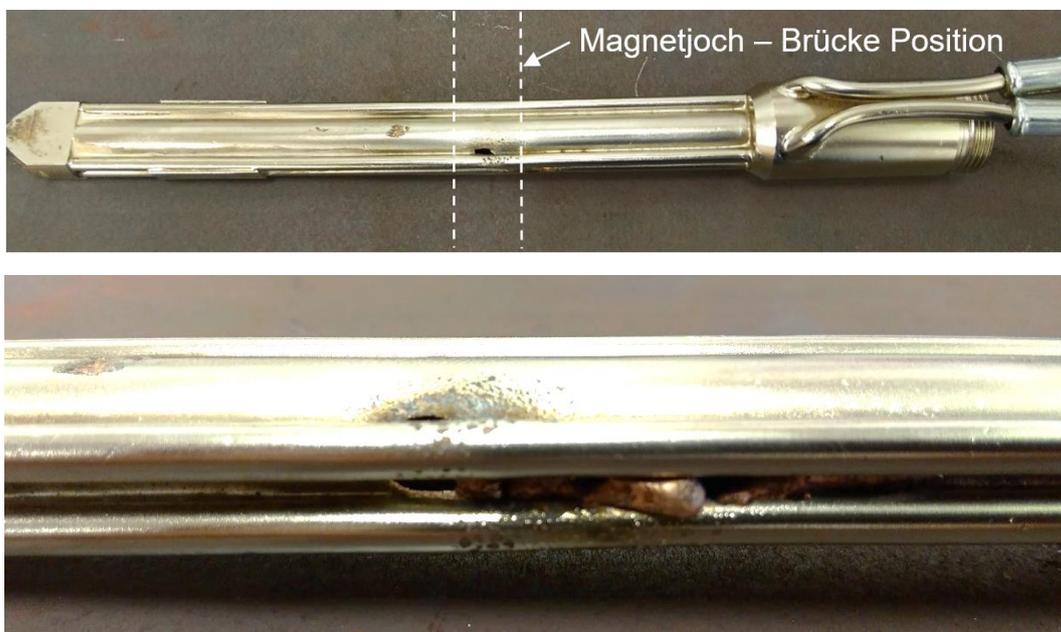


Abbildung 56 Draufsicht des zerstörten Engspaltbrenners durch Lichtbogenüberschlag über die Gasdüse

Um ein Überschlagen des Lichtbogens zu vermeiden, darf die Schweißspannung somit nicht über einen Grenzwert von etwa 32 V erhöht werden. Im folgenden Parameterset wird die Schweißspannung mit genügendem Abstand hin zur kritischen Schweißspannung gewählt und für alle weiteren Versuche festgelegt.

Des Weiteren, wurde des Magnetjoch vom Engspaltbrenner isoliert und eigens, am nicht im Schweißstromkreis befindlichen Gestell, aufgehängt. Bis zur finalen Versuchsserie wurde ein Standard-Brenner verwendet, um den Engspaltbrenner während der Parameterfindung zu schonen.

Ein erstes grobes Parameterset ist anhand mehrerer Versuche mit nachfolgender metallographischer Auswertung iterativ erstellt worden (Tabelle 11). Dies in Verwendung des 1.6 mm Zusatzdrahts und M 21 Schutzgas.

Tabelle 11 Gefundene Parameter für Versuchsserie 1 – erstes Parameterset

Stahlsorte	S 235
Vorwärmtemperatur [°C]	keine
Schutzgas	82 % Ar 18 % CO ₂
Drahtdurchmesser [mm]	1,6
Dicke Einlegeblech [mm]	nicht anwendbar
Schweiß-Strom [A]	317
Drahtvorschub [m/min]	5
Schweiß-Spannung [V]	29,5
Lichtbogen-Korrektur [%]	15
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	33
Streckenenergie [kJ/m]	1700
Spulen-Strom [A]	2,5
Max. Flussdichte in Spaltmitte[mT]	75

5.4 Versuchsserie 2 „Engspalt mit Einlegeblech“

Im Zuge dieser Versuchsserie wurde die Probengeometrie weiter an die finale Anwendung angepasst. Das bedeutet, dass anstelle der Rippen jetzt die Engspaltgeometrie durch zwei Blechstücke und einem, am Engspaltgrund platzierten, Einlegeblech nachgebildet wurde. Ziel sollte hierbei die Auffindung eines Parametersets, bei dem der seitliche (a) und diagonale (Wurzelerfassung c) Einbrand maximiert wird, sowie die dazu passende optimale Dicke des Einlegeblechs sein (Abbildung 57). Ein weiteres Ziel ist hier die beidseitige Schweißung im Engspalt. Neben diesen Zielen soll auch geklärt werden, ob ein Schweißen nur mit keramischer Badstütze bzw. mit aufschmelzendem dünnen Einlegeblech möglich ist. Auch sollen hier Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeits-Kamera Aufschluss über die Vorgänge im Lichtbogen liefern.

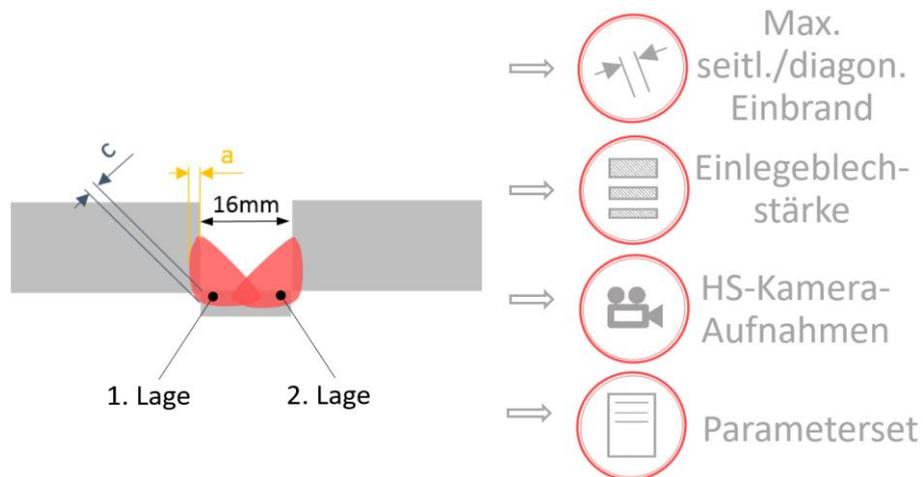


Abbildung 57 Schematische Darstellung zur Versuchsdurchführung der Versuchsserie 2 „Engspalt mit Einlegeblech“

Um Füge­teile, MAG-Brenner und Magnet präzise und reproduzierbar positionieren zu können, wurde für diese Versuchsserie eine einfache Spannvorrichtung gebaut. Diese ist in Abbildung 58 zu sehen. Über Spannhebel wird das Versuchsstück auf die leitende Unterlage gespannt. Zur Positionskontrolle im Schweißspalt wurde vor dem Schweißen das Einlegeblech während der Durchfahrt angekratzt. Abbildung 59 zeigt diese via Zusatzdraht eingekratzte Mittellinie. Wiederum bilden 15 mm dicke Baustahlbleche einen 16 mm Engspalt mit 150 mm Länge. Das Einlegeblech wurde mittels WIG-Heftpunkten im Engspaltgrund fixiert. Seitlich aufgeklebte Standard-Keramikbadstützen formten wurzelseitig das Schweißbad (Abbildung 60). Zylindrische Badstützen wären hier geeigneter gewesen (Form wie eingezeichnet), wurden aber auf Grund der Verfügbarkeit von Standard-Badstützen nicht verwendet. Ein- und Auslaufbleche an den

Schienenenden sollen große Schwankungen der magnetischen Flussdichte im Engspalt verhindern. Um die ungünstige Blaswirkung zu unterbinden, wurden die Versuchsstücke an der Unterseite blank geschliffen und dann über die Vorrichtung kontaktiert. Abbildung 61 zeigt den Aufbau mit Hochgeschwindigkeits-Kamera.

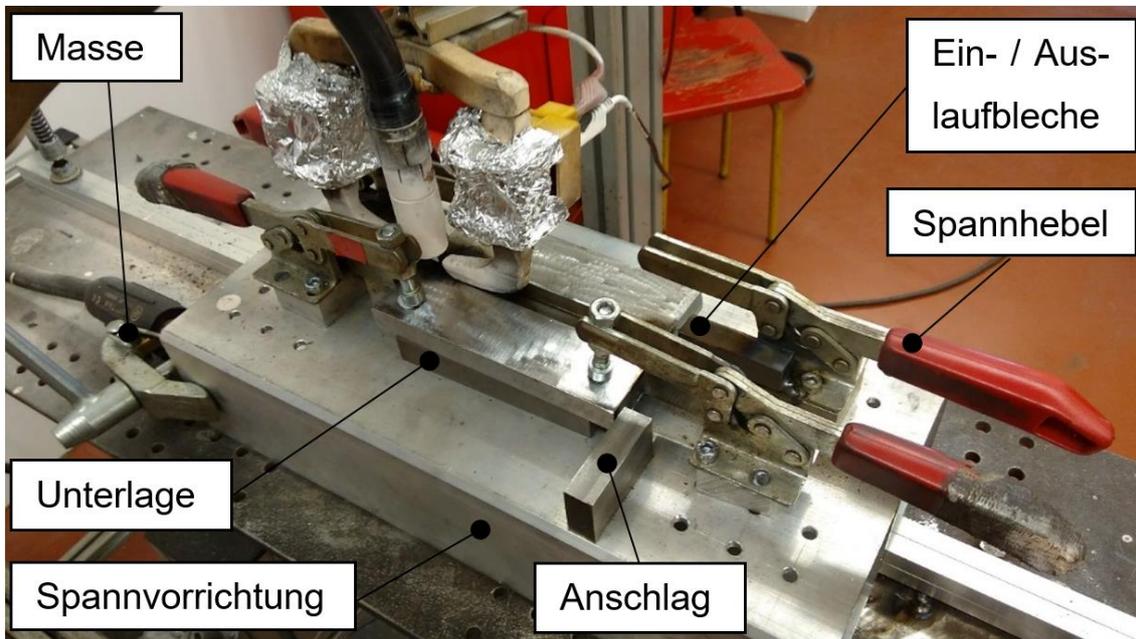


Abbildung 58 Versuchsaufbau der Versuchsserie 2 „Engspalt mit Einlegeblech“ auf Vorrichtung

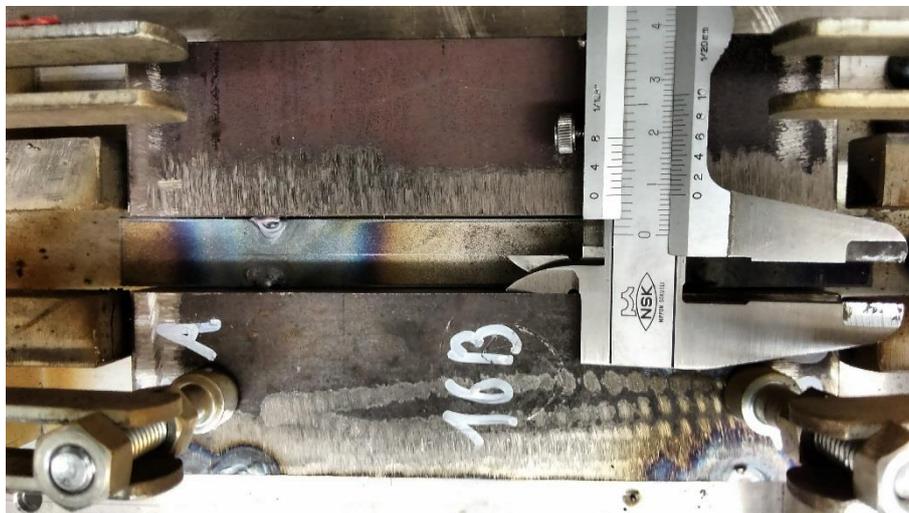


Abbildung 59 Draufsicht der eingekratzten Markierung durch Zusatzdraht in der Blechmitte

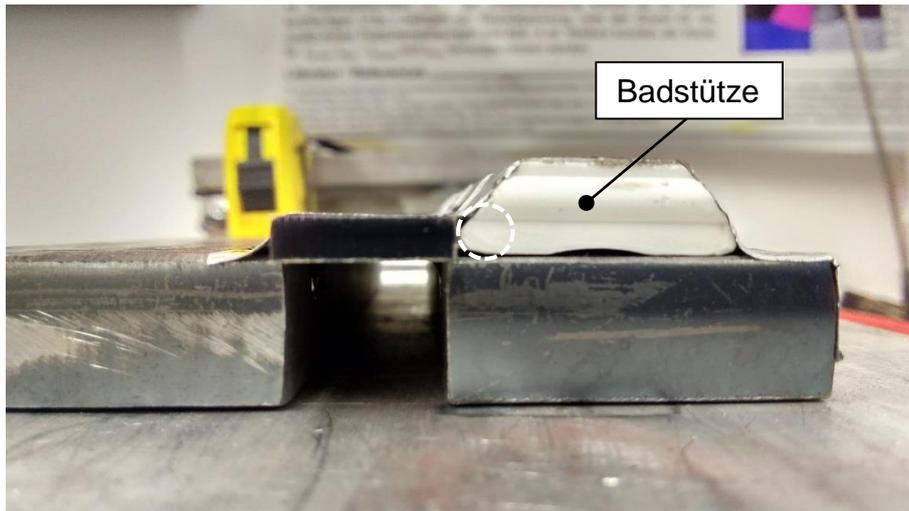


Abbildung 60 Vorderansicht des Versuchsstücks mit Einlegeblech und seitlicher Badstütze zur Bildung eines kerbarmen Übergangs.



Abbildung 61 Versuchsaufbau mit Hochgeschwindigkeits-Kamera

Unter Berücksichtigung der genannten Ziele sollte iterativ, durch Parametervariation nach Tabelle 12 ein optimaler Parametersatz gefunden werden. Die grundsätzliche Überlegung dabei war:

Aus der vorhergehenden Versuchsserie war bereits das Überschlagen des Lichtbogens bei einer zu hohen Schweißspannung (Lichtbogenlänge) bekannt. Dort konnte ermittelt werden, dass bei einer Spulenstromstärke von ca. 2,5 A und 31 V Schweißspannung ein stabiles und sicheres Ablenken möglich ist. Der Engspaltfüllgrad resultiert aus der Schweißgeschwindigkeit und der Stromstärke – bei festgelegtem Zusatzdrahtdurchmesser – und soll zwei Drittel nicht überschreiten.

Um den seitlichen und diagonalen Einbrand zu maximieren, bedarf es eines möglichst hohen Wärmeeintrages, bzw. einer möglichst hohen Streckenenergie. Dies kann einerseits durch eine möglichst hohe Stromstärke und Spannung erreicht werden. Dabei ist zu beachten, dass eine künstlich erhöhte Spannung zwar einen positiven Einfluss auf die Auslenkbarkeit des Lichtbogens hat, dass aber bei zu hohen Spannungen der Lichtbogen überspringen kann. Die maximale Stromstärke ist durch die Schweißanlage mit 400 A begrenzt.

Andererseits kann durch eine möglichst niedrige Schweißgeschwindigkeit die Streckenenergie erhöht werden. Allerdings muss diese auch so gewählt werden, dass der Materialeintrag nicht zu hoch ist – aus zuvor genannten Gründen eines zu hohen Füllgrades.

Tabelle 12 Variierte Parameter für Versuchsserie 2

Stahlsorte	S 235		
Vorwärmtemperatur [°C]	keine		
Schutzgas	82 % Ar 18 % CO ₂		
Drahtdurchmesser [mm]	1,6		
Dicke Einlegeblech [mm]	1,5	6	8
Schweiß-Strom [A]	bis 400		
Drahtvorschub [m/min]	variierend		
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	variierend		
Schweiß-Spannung [V]	variierend		
Lichtbogen-Korrektur [%]	variierend		
Streckenenergie [kJ/m]	variierend		
Spulen-Strom [A]	0 bis 3		
Max. Flussdichte in Spaltmitte[mT]	0 bis 99		

Die Auswertung erfolgte wiederum über eine makroskopische Beurteilung der Naht von oben und wurzelseitig, sowie über zwei Makro-Querschnitte bei 50 und 100 mm mit anschließender makroskopischer Ätzung nach Adler.

Zusätzlich wurden in dieser Serie Hochgeschwindigkeits-Kamera Aufnahmen dazu verwendet, die seitliche Auslenkung des Lichtbogens zu untersuchen.

5.4.1 Ergebnisse der Versuchsserie

Einlegeblechstärke:

Erste Versuche mit 1,5 mm dicken Einlegeblechen zeigten ein sehr unruhiges Nahtbild (Abbildung 62). Das Einlegeblech wurde bei den Versuchen völlig aufgeschmolzen. Durch die grobe Tropfenbildung auf der Schweißbadstütze kam es zu einem stark instabil brennenden Lichtbogen, der wechselnd zwischen der Flanke und nach hinten zum Schmelzbad brennt. Diese Versuchsanordnung mit abschmelzendem Blech auf der Badstütze ist somit unbrauchbar für eine gleichmäßige seitliche Ablenkung.

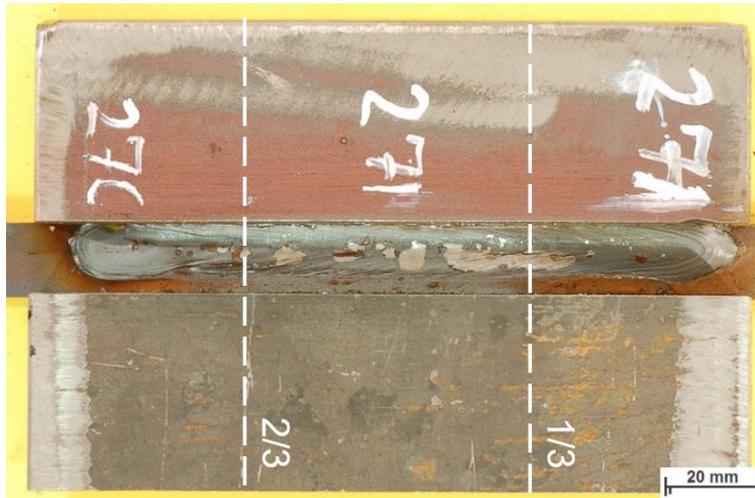


Abbildung 62 Draufsicht der Versuche mit durchgeschmolzenem 1,5 mm Einlegeblech

Im nächsten Schritt wurde die Dicke des Einlegeblechs somit erhöht. Die Versuche ergaben, dass es bei der maximal möglichen Stromstärke und der geeigneten Schweißgeschwindigkeit und Ablenkung eines min. 6 mm dicken Bleches bedarf.

Maximaler seitlicher bzw. diagonaler Einbrand:

Iterativ erfolgte die Findung des maximalen seitlichen und diagonalen Einbrandes durch Variation der Schweißgeschwindigkeit, der Spulenstromstärke (magnetischen Flussdichte) und der Lichtbogenkorrektur (Lichtbogenspannung). Beim besten Parameterset (Tabelle 13) konnte, wie in Abbildung 63 gezeigt ist, eine durchgehend geschweißte Wurzel erreicht werden – bis auf die Bereiche um die notwendigen Heftstellen an den Enden.



Makro1: Bildbreite|f|B|t|S|H|OH: 158,80mm| 105mm| 13| 1.6s| 600mm| 10mm

Bildname: joinp2hlss17_w0297.jpg



Makro1: Bildbreite|f|B|t|S|H|OH: 115,50mm| 105mm| 13| 1.6s| 450mm| 50mm

Bildname: joinp2hlss17_w0320.jpg



Abbildung 63 Versuch mit maximaler Ablenkung; Draufsicht (o.); durchgeschweißte Wurzel (u.)

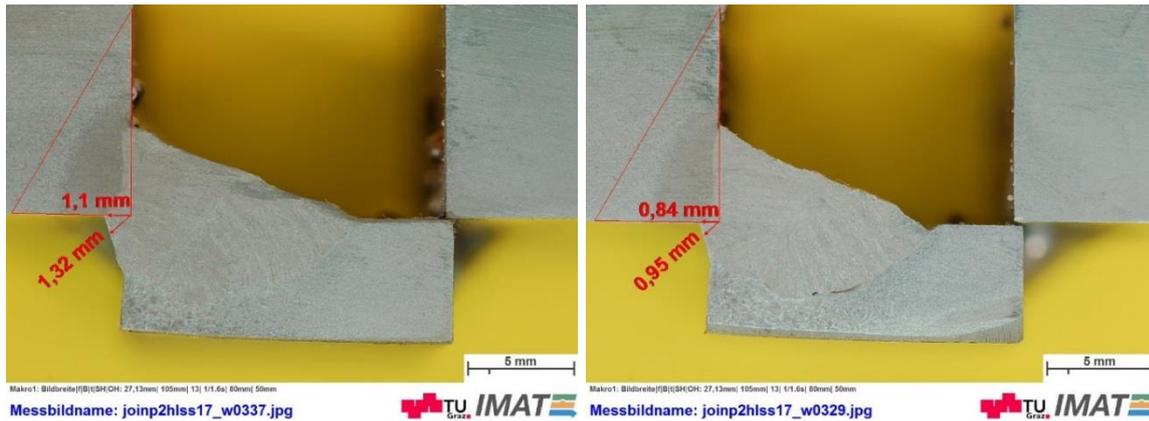


Abbildung 64 Makro-Querschliffe; Adler Ätzung; Querschnitt bei 1/3 (li.); Querschnitt bei 2/3 (re.)

Die metallographische Auswertung ergab einen seitlichen Einbrand von 1,1 mm im ersten Drittel und 0,84 mm im zweiten Drittel, bei einem diagonalen Einbrand von 1,32 und 0,95 mm (Abbildung 64). Der Füllgrad von ca. zwei Drittel im Einlegeblechgrund wurde erreicht.

Parameterset:

Tabelle 13 Gefundene Parameter für Versuchsserie 2 – Parameterset

Stahlsorte	S 235
Vorwärmtemperatur [°C]	keine
Schutzgas	82 % Ar 18 % CO ₂
Drahtdurchmesser [mm]	1,6
Dicke Einlegeblech [mm]	min. 6
Schweiß-Strom [A]	400
Drahtvorschub [m/min]	7
Schweiß-Spannung [V]	31,1
Lichtbogen-Korrektur [%]	7
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	64,5
Streckenenergie [kJ/m]	1157
Spulen-Strom [A]	2,5
Max. Flussdichte in Spaltmitte[mT]	83

Während der Versuche bildete sich ein optimales Parameterfenster ab. Das Pentagon-Diagramm stellt qualitativ die gewonnenen Erkenntnisse über die Wechselwirkungen aller Eingangsparameter dar. Das grüne Fünfeck in Abbildung 65 markiert quantitativ das ermittelte optimale Schweißparameter-Set dieser Versuchsserie.

Die magnetische Flussdichte hat den größten Einfluss auf die Ablenkbarkeit – ist jedoch durch die Steifigkeit des Magnetjochs samt Halterung und den maximalen Spulenstrom reglementiert. Bei einer zu hohen Spulen-Stromstärke (ab 3 A) und leicht außermittigem Magnet, kommt es zum Anhaften an der Engspaltwand, was zum unmittelbaren Abfallen der Flussdichte in Lichtbogenumgebung führt und durch den s.g. „Stick-Slip-Effekt“ den gesamten Aufbau stark in Mitleidenschaft zieht. Eine zu niedrige magnetische Flussdichte führt zu einer schwachen Nahtversetzung – was in einem geringen lateralen Einbrand resultiert. Im folgenden Diagramm ist die maximale magnetische Flussdichte in Engspalt-Mitte angegeben.

Aus der vorhergehenden Versuchsserie war bereits das Überschlagen des Lichtbogens bei einer zu hohen Schweißspannung (Lichtbogenlänge) von über 31 V bekannt. Die Schweißgeschwindigkeit resultiert aus dem Engspaltfüllgrad und soll ca. zwei Drittel des Spalts füllen – was bei ca. 64 cm/min bei 400 A Schweißstrom gegeben ist.

Aus zu geringen Stromstärken folgt generell ein geringer Einbrand mit einer geringen Ablenkbarkeit, wobei eine zu hohe wiederum zu Überschlägen und einer Füllung des Engspalts führen würde, was keinen Platz für die zweite Wurzellage bietet. Ebenso resultieren eine übermäßige Füllung des Engspalts und wenig Nahtversatz aus zu geringen Schweißgeschwindigkeiten, wobei eine zu hohe Schweißgeschwindigkeit den Einbrand verringert und den Temperaturgradienten erhöht. Der Sprühlichtbogen-Bereich ist von Vorteil und geht mit der Stromstärke, der Schweißspannung und dem Zusatzdrahtdurchmesser einher.

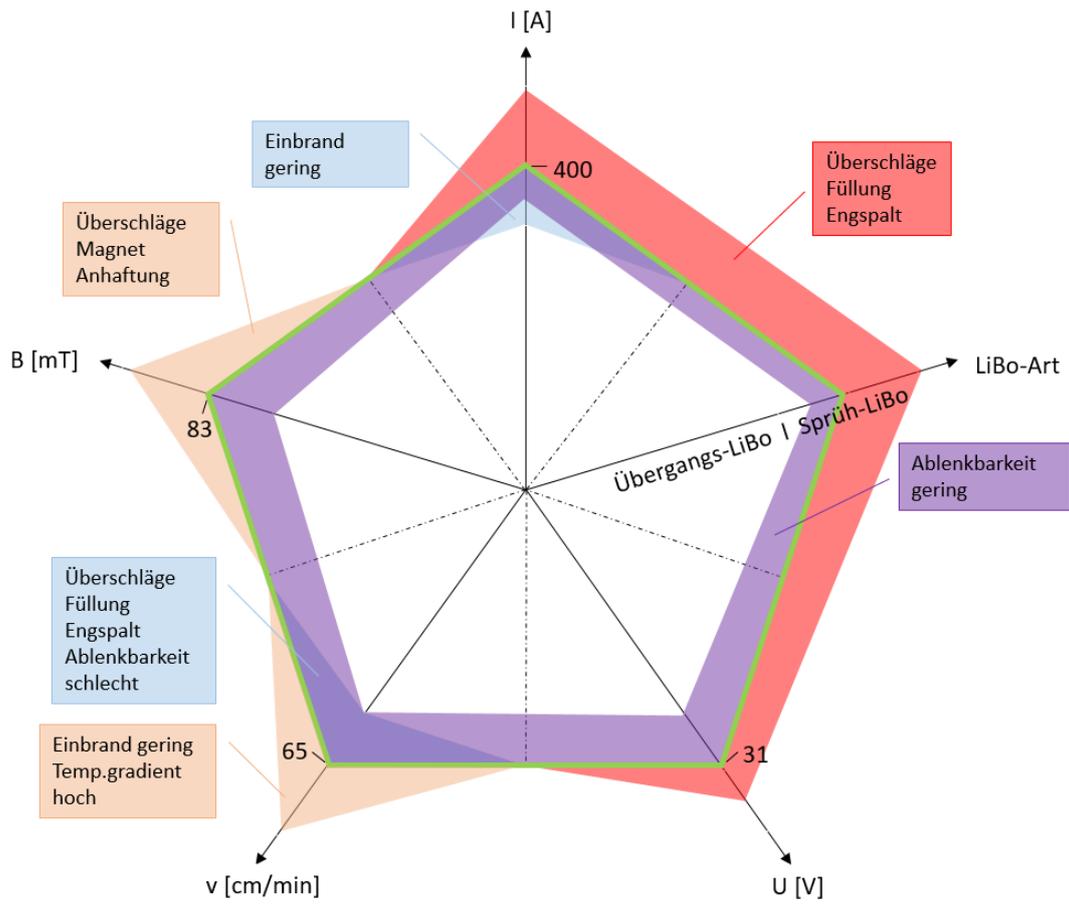


Abbildung 65 Pentagon Parameter-Bereiche – das grüne Fünfeck stellt das Optimum dar

Schweißung der zweiten Wurzellage:

In weiterer Folge wurde mit dem gefundenen Parameterset auch erstmals beidseitig geschweißt (Abbildung 66). Bei ähnlichem seitlichem und diagonalem Einbrand, wie bei der einseitigen Schweißung zuvor, findet sich hier bei der zweiten Lage ein stärkerer Einbrand, neben einer nicht ganz aufgeschmolzenen Flanke im ersten Abschnitt (Abbildung 67).

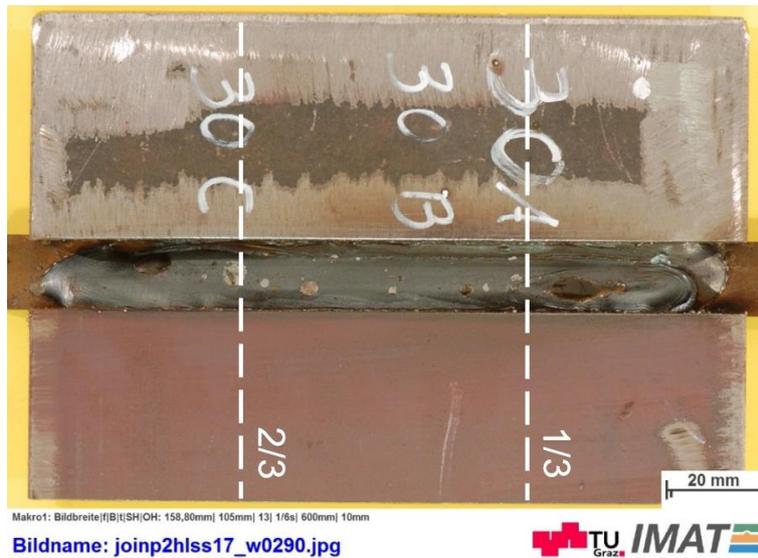


Abbildung 66 Draufsicht von Versuch mit maximaler beidseitiger Ablenkung - Oberseite Naht

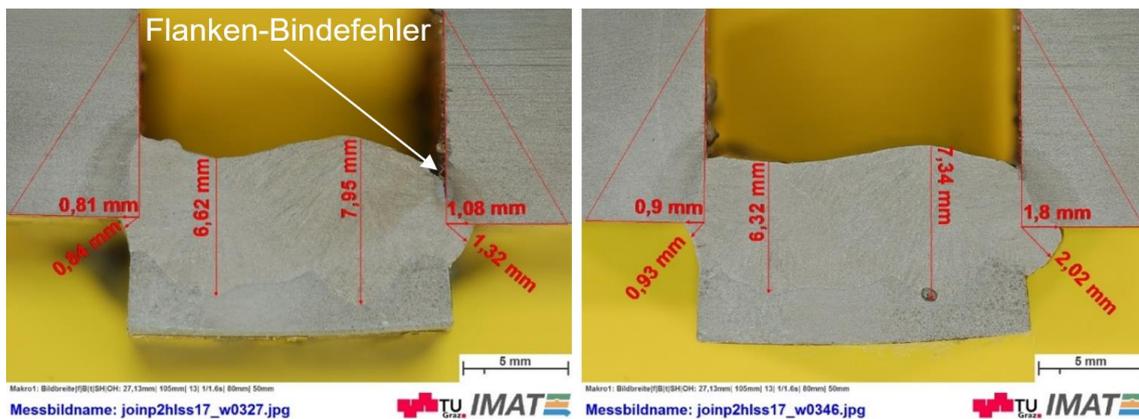


Abbildung 67 Makro-Querschliffe; Adler Ätzung; Querschnitt bei 1/3 (li.); Querschnitt bei 2/3 (re.)

Hochgeschwindigkeits-Kamera-Aufnahmen:

Aufnahmen der Hochgeschwindigkeits-Kamera zeigen in Abbildung 68 den abgelenkten und nicht abgelenkten Lichtbogen bei gleichem Parameterset. Die innere Regelung lt. Kapitel „Metallschutzgasschweißen“ sorgt für eine gleichbleibende Lichtbogenlänge durch Regelung der Stromstärke. Daraus resultiert eine vertikale Verkürzung der Lichtbogenlänge, wobei die diagonale Länge aber konstant bleibt.

Es lassen sich zwei positive Effekte auf den seitlichen/diagonalen Einbrand feststellen:

- 1) Erster ist das Ablenken der Plasmasäule durch den bereits beschriebenen Effekt der lokalen Abschwächung/Verstärkung der Magnetfelder, was zu einem lateralen Ausweichen des Lichtbogens durch die resultierende Lorentzkraft führt. Weiter führen dann die Entladungsprozesse thermische Emission und

Feldemission, über die eintreffenden positiv geladenen Ionen am Minuspol, zu einem flankenseitigen Schmelzbad – wie beim MSG-Prozess üblich.

- 2) Der zweite, durch den externen Magneten verursachte, günstige Effekt ist die grobtropfigere Werkstoffablösung am Pluspol. Durch die seitliche Störung, der üblicherweise symmetrischen Pinchkraft im Argon-Lichtbogen, kommt es zu keiner feintropfigen Werkstoffablösung. Eine solche feintropfige Ablösung würde durch das hochkinetische Eintreffen in das Schmelzbad einen Argonfinger verursachen, welcher einen starken vertikalen Einbrand erzeugt. Die groben Tropfen werden seitlich mit einem Drall weggeschleudert und gehen dann durch elektrostatische Kräfte wiederum flankenseitig in das Schmelzbad ein.

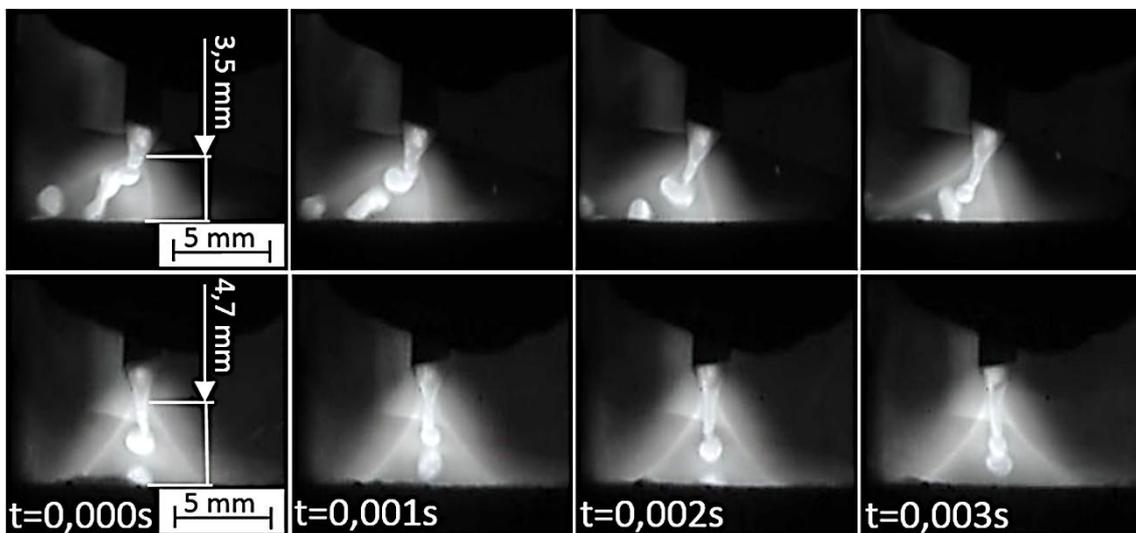


Abbildung 68 Hochgeschwindigkeits-Kamera Aufnahmen des Tropfenübergangs und des Plasmas; magnetisch abgelenkt (o.); nicht abgelenkt (u.)

5.5 Versuchsserie 3 „Schienenfuß mit Einlegeblech“

In der dritten und letzten Versuchsserie wurden Schienenfüße mit dem bereits ermittelten Parameterset und in Verwendung des Engspaltbrenners beidseitig verschweißt (Abbildung 69). Es sollte bewertet werden, wie sich das Nahtbild aufgrund der komplexen Schienenfußgeometrie über die Schweißlänge verändert. Ebenso soll der Einfluss der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung und deswegen auch der unterschiedlichen relativen Permeabilität des Schienenstahls auf die magnetische Ablenkbarkeit festgestellt werden. Hier sollen dann auch Vergleiche mit der Aluminiumthermit-Schweißung angestellt werden. Ziel bei den Versuchen war es dann auch wieder, den seitlichen (a) und diagonalen Einbrand (c) weiter und vor allem auch beidseitig zu erhöhen.

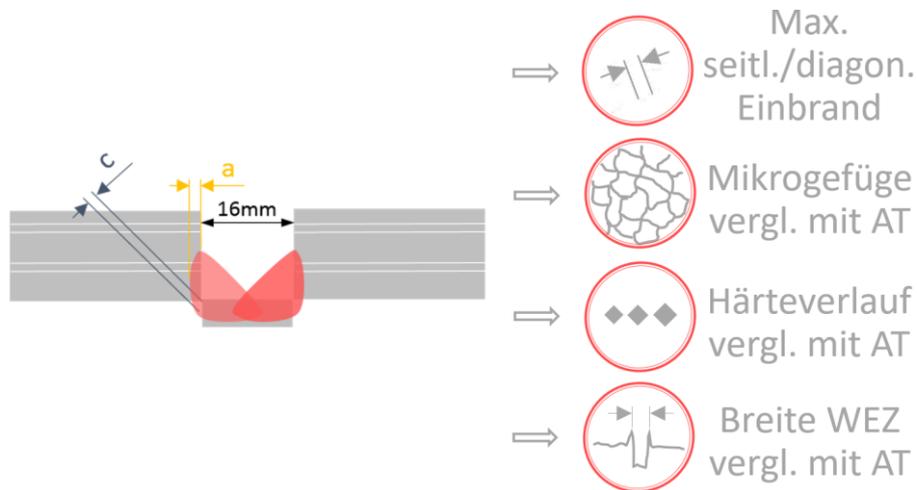


Abbildung 69 Schematische Darstellung zur Versuchsdurchführung der Versuchsserie 3 „Schienenfuß mit Einlegeblech“ (AT...aluminothermische Schweißung)

Zur Versuchsdurchführung wurde die gleiche Vorrichtung wie in der vorangegangenen Versuchsserie verwendet (Abbildung 70). R 260 Schienenfüße wurden via Heftnähte mit einem 8 mm Einlegeblech verschweißt (Abbildung 71). Wiederum formt eine Schweißbadsicherung das Schweißbad wurzelseitig (Abbildung 72). Um eine gute Massenkontaktierung zu gewährleisten, wurde auch hier die Unterseite blank geschliffen.

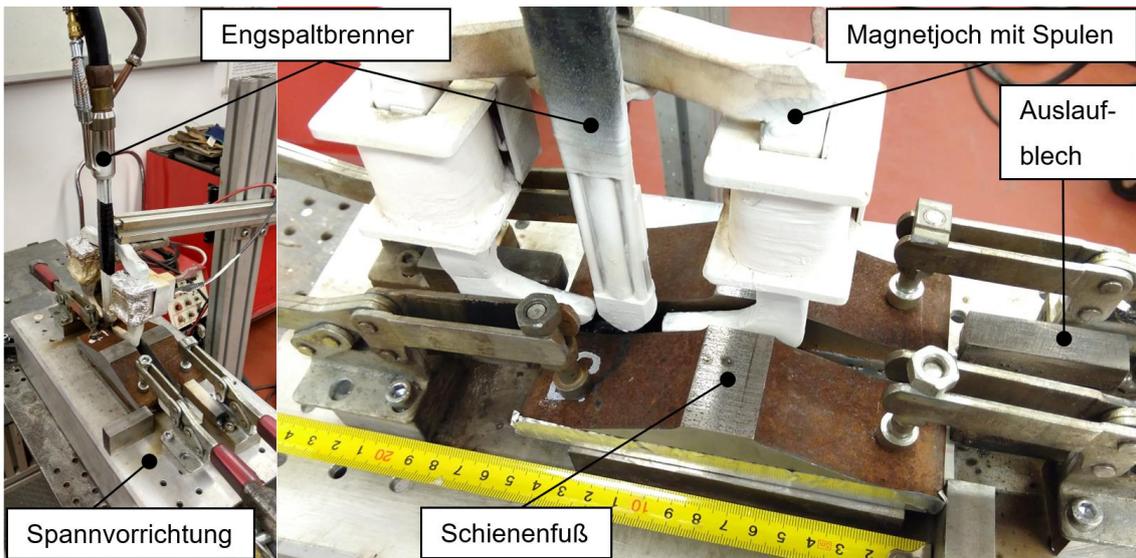


Abbildung 70 Versuchsaufbau der Versuchsserie 3 „Schienenfuß mit Einlegeblech“ auf Vorrichtung

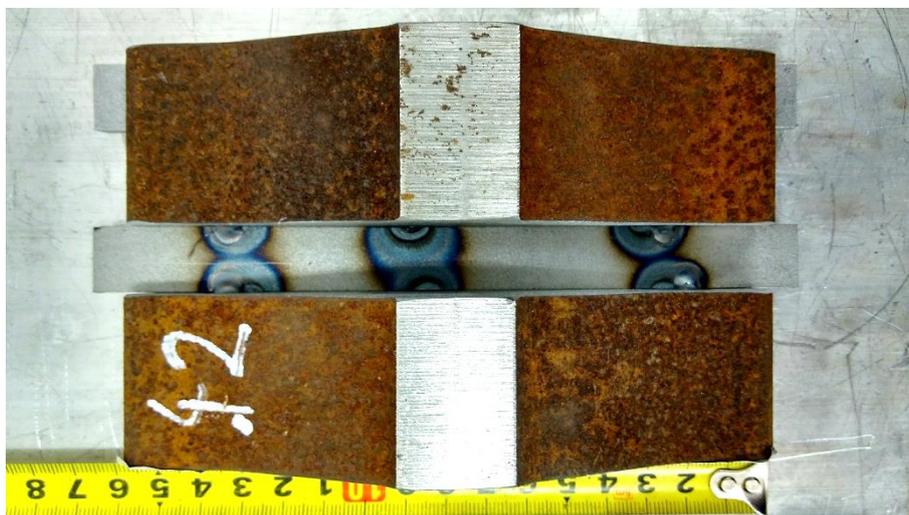


Abbildung 71 Draufsicht eines vorbereiteten Versuchsstücks mit eingekratzter Mitte

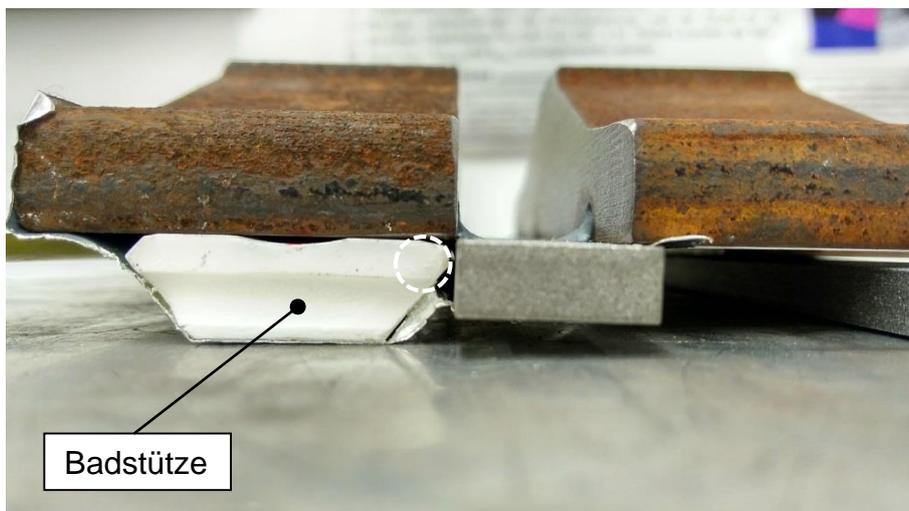


Abbildung 72 Vorderansicht des Versuchsstücks mit Einlegeblech und seitlicher Badstütze

In Anbetracht des hohen Kohlenstoffgehalts war ein Vorwärmen unumgänglich um eine exzessive Aufhärtung zu vermeiden. Die Vorwärmtemperatur von 300 °C wurde aus den vorangegangenen Schweißversuchen mit mechanischer Ablenkung übernommen und liegt lt. Kapitel „Schienen“ über der Martensit-Start Temperatur. Um die Vorwärmtemperatur zu erreichen, wurde mittels einem Bunsenbrenner die notwendige Wärme eingebracht – eine Ummantelung mit Schamottsteinen sorgt für eine gleichmäßige Erwärmung (Abbildung 73). Eine Vorwärmung via Ofen bzw. Induktionsplatte führte nicht zum Erfolg, da durch die längere Rüstzeit die Temperatur nicht gehalten werden konnte. [3]

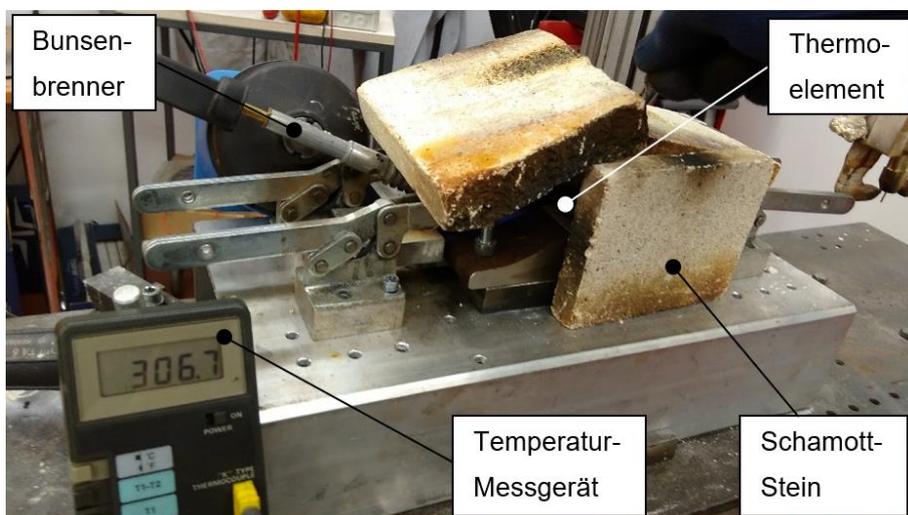


Abbildung 73 Vorwärmen mittels Bunsenbrenner

Durch den veränderlichen Schienenfußquerschnitt bedarf es hier nach mehreren Querschnitten für eine Auswertung – jeweils nach einem Viertel der Schienenfußbreite wurden deshalb die einzelnen Querschnitte makroskopisch und mit Ätzung nach Adler beurteilt.

Um den Einfluss des, durch das MSG-Verfahren eingebrachten, Wärmezyklus auf das sich ausbildende Gefüge beurteilen zu können, wurde ein Mikroschliff erstellt und untersucht. Diese metallographische Untersuchung umfasst Sichtbarmachung und Identifikation der diversen Gefügebereiche und eine anschließende Härteprüfung aus der die WEZ-Breite, verglichen mit der Aluminiumthermit-WEZ-Breite, herausgeht.

5.5.1 Ergebnisse der Versuchsserie

Maximaler seitlicher bzw. diagonalen Einbrand:

Die Flankenbindefehler aus der vorherigen Versuchsserie konnten hier nicht aufgefunden werden. Zudem zeigte sich, dass die aufgrund der Schienengeometrie vermeintlich variierende magnetische Flussdichte im Engspalt wenig Einfluss auf den seitlichen Einbrand hat, solange eine minimale magnetische Flussdichte von ca. 70 mT in Engspaltmitte überschritten wird. Mittels Ein- und Auslaufblechen wurde der Einfluss der stark steigenden magnetischen Flussdichte zu Beginn und an den Enden unterdrückt – was sich in einer gleichmäßig versetzten Naht widerspiegelt.

Auch der Einfluss der temperaturabhängigen magnetischen Permeabilität auf den Einbrand ist gering bzw. hebt sich durch Erwärmung von Magnetjoch und Engspaltumgebung auf. Die notwendige Vorwärmung beim Schienenstahl erlaubt einen höheren Spulenstrom, da die Gefahr des seitlichen Anhaftens des Magnets aufgrund der verringerten Permeabilität, durch die Vorwärmtemperatur und den höheren Kohlenstoffgehalt, geringer ist. Insgesamt stellte sich die Steifigkeit der Magnethalterung als der limitierende Faktor am Versuchsaufbau heraus.

Einen größeren Einfluss auf den Einbrand konnte durch das, sich während der Schweißung instationär ausbildende, Temperaturfeld und somit der unterschiedlich starken Wärmeableitung festgestellt werden. Der kleinste Einbrand war dabei am Anfang der Schweißnaht zu verzeichnen.

Generell ist hier – verglichen mit gleichartigen Versuchen an paramagnetischem (z.B. austenitischem) Grundmaterial – eine Aussage über die magnetische Flussdichte nicht sinnvoll. Dies durch die starke Abnahme der magnetischen Flussdichte hin zum Engspaltgrund und durch die Schwankung bei Schienendurchfahrt. Deshalb erfolgte während den Versuchen, neben der Spulenstromstärke, stets nur die Angabe der maximalen magnetischen Flussdichte im Engspalt – dieser Wert ist am aussagekräftigsten für eventuelle Vergleiche.

Die in Abbildung 74 - Abbildung 76 dargestellten Ergebnisse sind die final optimierten Schweißversuche dieser Versuchsserie. Sie zeigen beim optimierten Parametersatz (Tabelle 14) ein flaches und gleichmäßiges Nahtbild im Engspalt und eine beidseitig,

bis auf kurze Aussetzer an den Heftpunkten für das Einlegeblech durchgängige Wurzel. Bei der zweiten Wurzellage wurde die Schweißstromstärke auf Grund der Erkenntnisse aus der vorhergehenden Versuchsserie reduziert.



Abbildung 74 Draufsicht von Versuch mit optimiertem Parameterset



Abbildung 75 Linke Wurzel mit Heftpunkten



Abbildung 76 Rechte Wurzel mit Heftpunkten

Tabelle 14 Gefundene Parameter für Versuchsserie 3 – Parameterset

Schweißlage	1	2
Stahlsorte	R 260	
Vorwärmtemperatur [°C]	300	
Schutzgas	82 % Ar 18 % CO ₂	
Drahtdurchmesser [mm]	1,6	
Dicke Einlegeblech [mm]	8	
Schweiß-Strom [A]	400	379
Drahtvorschub [m/min]	7,0	6,4
Schweiß-Spannung [V]	31,1	30,7
Lichtbogen-Korrektur [%]	7	8
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	64,5	
Streckenenergie [kJ/m]	1157	1082
Spulen-Strom [A]	2,9	
Max. Flussdichte in Spaltmitte[mT]	96	

Die Auswertung durch Makroquerschliffe, jeweils nach einem Viertel des 150 mm langen Schienenfußes, zeigt mit Ätzung nach Adler den seitlichen Einbrand der einzelnen Querschnitte. Sowohl bei der ersten Wurzellage als auch bei der zweiten Lage ist ein durchgehender seitlicher und diagonaler Einbrand fest zu stellen. Um einen Vergleich anstellen zu können, ist in folgender Abbildung 77 auch eine Referenznaht ohne magnetische Ablenkung mit gleichem Parametersatz dargestellt.

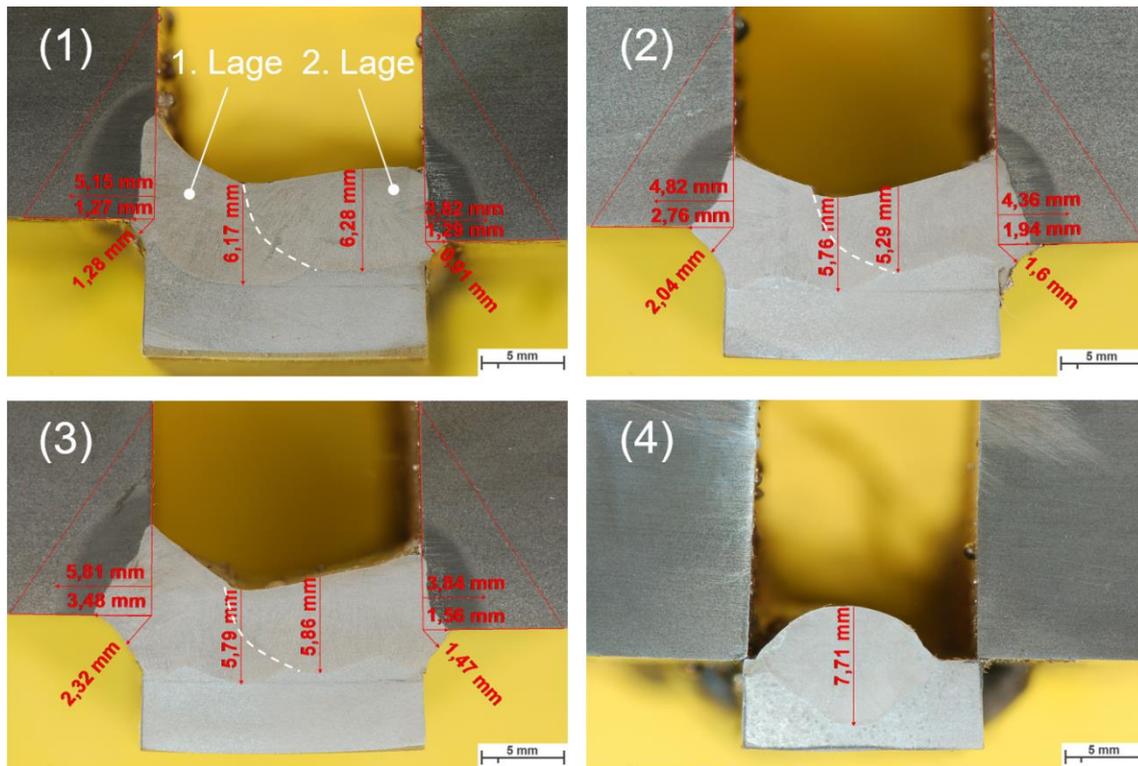


Abbildung 77 Makro-Querschliffe; Adler Ätzung; 1/4 (1); 2/4 (2); 3/4 (3) und ohne Ablenkung (4)

Mikrogefüge:

Ein von einer einseitig geschweißten Probe angefertigter Mikroschliff zeigt ein im Vergleich zum Grundmaterial feinkörnigeres, perlitisches Gefüge (Abbildung 78 - Abbildung 81). Verglichen mit der ursprünglichen Korngröße im Grundmaterial (GM) lässt sich diese Kornfeinung unmittelbar am Übergang von GM zur WEZ mit dem Faktor 5 abschätzen. Mit einer Kornfeinung geht eine Festigkeitssteigerung einher, was sich auch in einer Härtesteigerung widerspiegelt. Zudem finden sich im GM und in der WEZ Mangansulfid-Einschlüsse, welche produktionsbedingt aus der Schmelze entstehen. Im Übergangsbereich von der WEZ zum Schweißgut (SG) entsteht plattenförmiger Ferrit um die ehemaligen Austenit-Korngrenzen. Das vorliegende Gefüge im Schweißgut ist wie erwartet acicularer Ferrit – welcher sich üblicherweise bei Verwendung dieses Zusatzdrahtes ausbildet (Abbildung 82 und Abbildung 83).



Makro: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 32,41mm| 105mm| 16| 1,6s| 70mm| 22mm

Bildname: joinp2hlss17_w0393.jpg



Abbildung 78 Mikroschliff einseitig geschweißt; Nital Ätzung

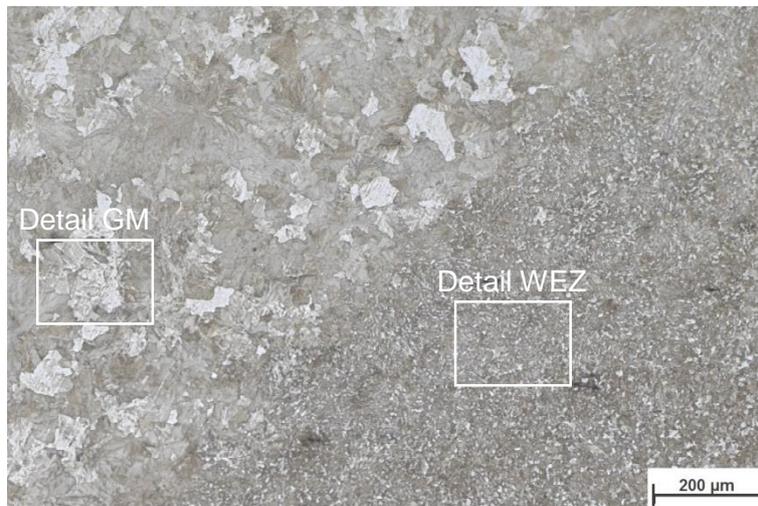


Mikroskopvergrößerung: 25,0x; Bildbreite: 5,58 mm

Bildname: joinp2hlss17_w0394.jpg



Abbildung 79 Detail GM – WEZ – SG; 25-fache Vergr.; Nital Ätzung



Mikroskopvergrößerung: 100,0x; Bildbreite: 1394,54 µm

Bildname: joinp2hlss17_w0395.jpg



Abbildung 80 Detail GM – WEZ; 100-fache Vergr.; Nital Ätzung

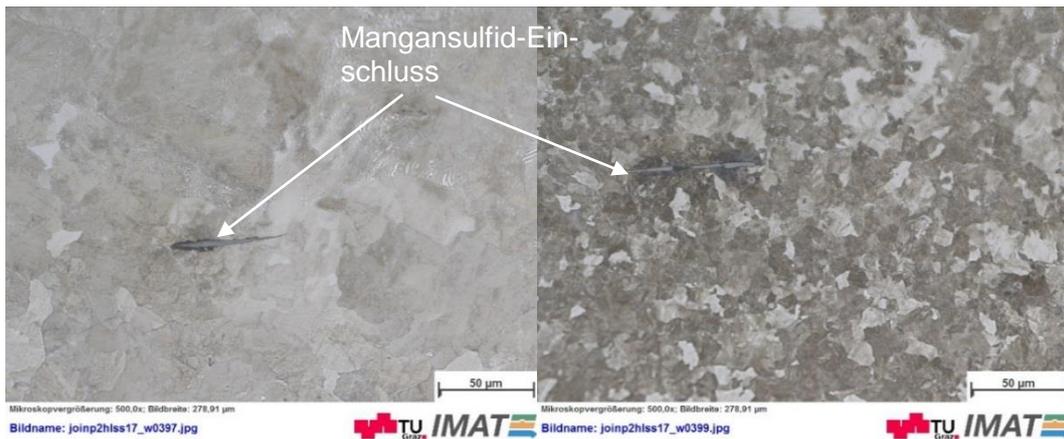


Abbildung 81 500-fache Vergr.; Nital Ätzung; Detail GM (li.); Detail WEZ (re.)



Abbildung 82 Detail Übergangsbereich WEZ – SG; 100-fache Vergr.; Nital Ätzung

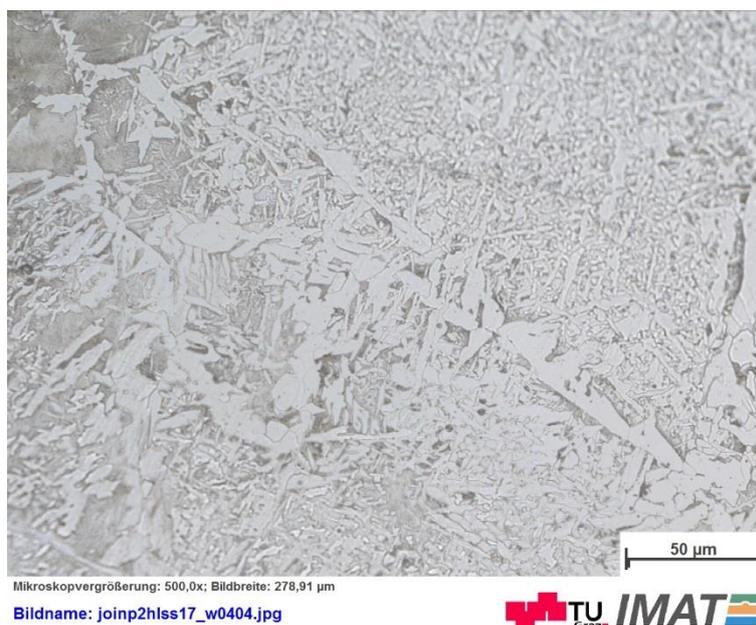


Abbildung 83 Detail SG; 500-fache Vergr.; Nital Ätzung

Härteverlauf und WEZ-Breite:

Gemäß EN 13674-1:2011 ist bei der R260 Stahlgüte eine Brinellhärte von 260 bis 300 HBW 2,5/187,5 gefordert. Der Härteverlauf über die einseitige und beidseitig geschweißte Wurzel zeigte im Schienengrundmaterial die zu erwartenden Härtewerte von etwa 330 HV10 – welche grob einer Brinellhärte von ca. 315 HBW lt. ISO 18265:2013 entsprechen (Abbildung 84 und Abbildung 85). Im Vergleich zur AT-Schweißung wird die Wärmeeinflusszone von 110 auf 25 mm reduziert und es tritt kein Härteabfall in der Wärmeeinflusszone auf. Über das Schweißgut und das Einlegeblech nimmt dann die Härte sukzessive zur Engspaltmitte hin ab. [41]

Die geringe Härte im Schweißgut ergibt sich aus dem für die Wurzel verwendeten EMK 6 Schweißzusatzwerkstoff. Im Bereich der Wärmeeinflusszone zeigt sich ein Härtesprung auf über 450 HV10.

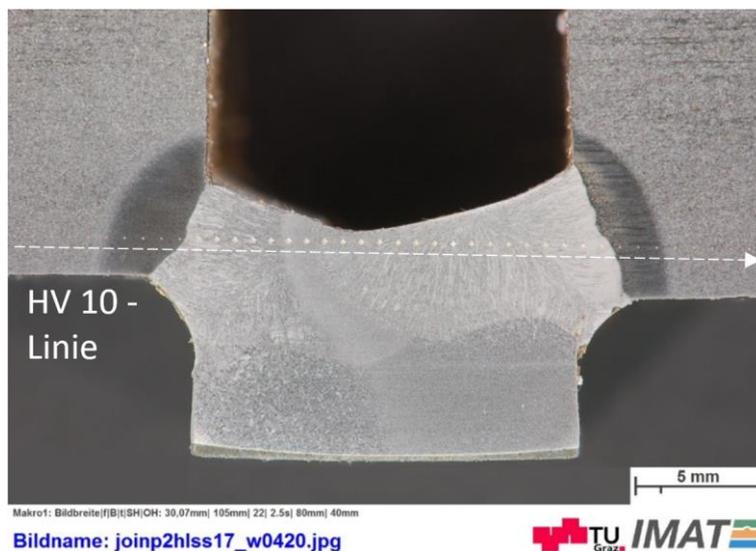


Abbildung 84 Querschliff für Härteverlauf beidseitig geschweißt; Nital Ätzung

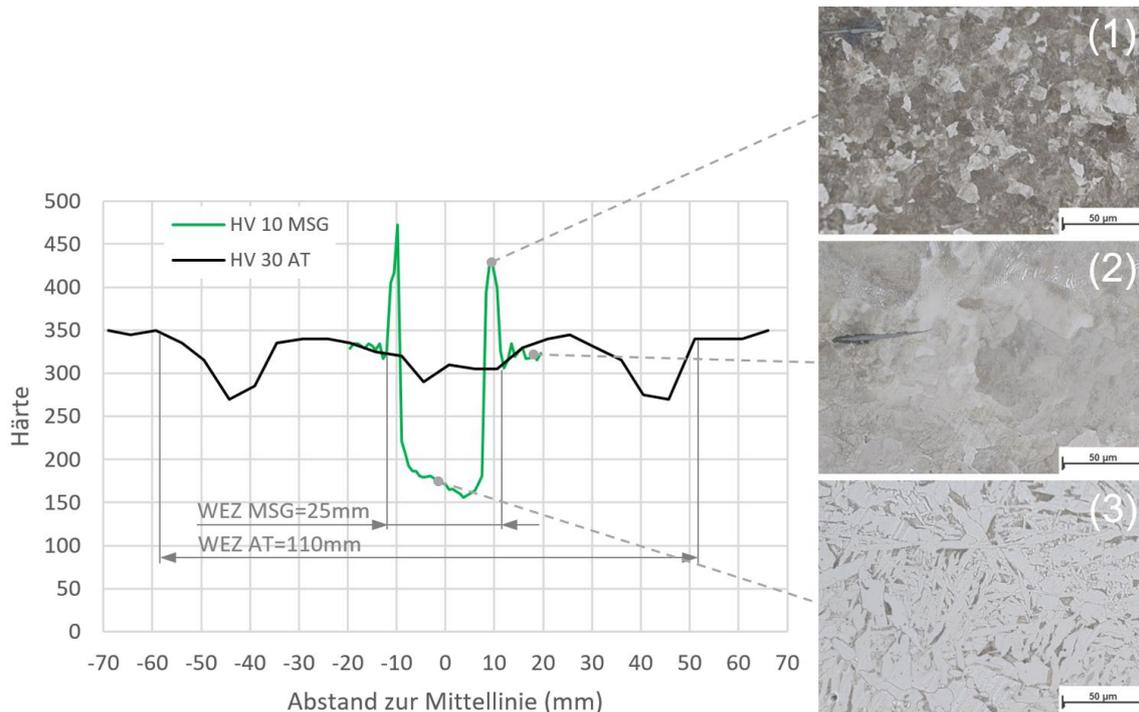


Abbildung 85 Härte und Gefüge magnetische MAG-Wurzellage und AT Schweißung; 500-fache Vergr.; Nital Ätzung; WEZ feinperlitisch (1); Grundmaterial perlitisch (2); Schweißgut acicular Ferrit (3) [41]

Das weiche Schweißgut ist wegen der großen Härte­differenz am Übergang von WEZ zum Schweißgut nicht optimal. Der EMK 6 Schweißdraht wurde allerdings in Ermangelung an einen besser geeigneten Schweißzusatzwerkstoff für die Versuche verwendet. Bei der Weiterentwicklung des MSG-Schweißprozesses für Schienen muss hier ein Zusatzdraht entwickelt werden, welcher ein ähnlich hartes Gefüge wie im Grundmaterial ausbildet.

Das Gefüge und damit auch die Härtespitzen am Rande der WEZ können sich durch weitere Fülllagen und der damit verbundenen Wärmebeeinflussung noch abändern. Jedoch sind keine weichen Zonen wie bei der AT-Schweißung zu erwarten, bedingt durch die schnellen und hochenergetischen Schweißzyklen was zu kurzen Abkühlzeiten führt.

6 Zusammenfassung

Inhalt dieser Arbeit war die Erarbeitung und Erprobung eines magnetisch gestützten MSG Engspaltschweiß-Prozesses für die Wurzellagen beim Fügen von Eisenbahnschienen. Dazu wurde zu allererst anhand von Vorversuchen eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Anschließend wurde ein Konzept für die Versuchsdurchführung erarbeitet. Aus einer elektromagnetischen FE-Berechnung folgte die magnetische Flussdichteverteilung im ferromagnetischen Engspalt, sowie die Flussdichteänderung bei Magnetdurchfahrt. Aus dieser ersten Simulation ging das Magnetjoch-Design hervor. Zur Validierung der Simulation wurde das Magnetjoch vermessen und das Simulationsmodell angepasst. Dies erlaubte später eine Hochrechnung auf die tatsächlich erzielte Flussdichte im Engspalt.

Ausgehend von diesen Ergebnissen erfolgte die anschließende Realisierung des Magnetjochs und einer entsprechenden Spannvorrichtung für den Versuchsaufbau im Schweißlabor des IMAT. Im Hauptteil der Arbeit wurden über 120 Versuchsschweißungen durchgeführt, wobei innerhalb von vier Versuchsserien sukzessive der Einfluss aller relevanten Parameter untersucht und optimiert wurde. Im Laufe der Versuchsserien fand stets eine Anpassung von Versuchsaufbau und Probengeometrie statt, was schlussendlich zur tatsächlichen Schienenschweißung führte. Neben den Standardeingangsparametern Schweißstrom, Schweißspannung und Schweißgeschwindigkeit, wurde vor allem der Einfluss der magnetischen Flussdichte und der spezifischen Geometrie, aufgrund des Engspalts und des Schienenprofils untersucht. Zusätzlich wurde auch noch der Einfluss unterschiedlicher Drahtdurchmesser (1.0, 1.2 und 1.6mm), sowie der von reinem CO₂ als Schutzgasalternative untersucht.

Das schlussendliche Ziel der durchgehenden Maximierung des seitlichen und diagonalen Einbrandes an der Wurzel bei einem stabilen Schweißprozess konnte erreicht werden. Die richtige Kombination aller Schweißmittel führte zu einem maximalen lateralen Einband bei einem geringen Engspalt-Füllgrad. Bei dem gefundenen optimierten Parameterset konnte mittels dem magnetisch manipulierten Lichtbogen eine über die ganze Länge beidseitig durchgeschweißte kerbarme Wurzel erzeugt werden.

Anhand von Hochgeschwindigkeits-Kamera-Aufnahmen konnte das Verhalten des Lichtbogens und der Tropfenablösung untersucht werden. Die günstige Beeinflussung des magnetisch gestützten Lichtbogens resultiert aus der lokalen Abschwächung und

Verstärkung des Schweißstrom-Magnetfelds, welches aus der stromdurchflossenen Elektrode resultiert, durch Überlagerung mit einem externen parallelen Magnetfeld von 96 mT in Engspaltmitte. Dies führt dann in weiterer Folge zur Ausbildung einer lateral wirkenden resultierenden Lorentzkraft, woraus eine Plasmaablenkung resultiert. Zudem wird die ursprüngliche feintropfige senkrechte Materialablösung im Mischgas-Lichtbogen dahingehend beeinflusst, dass gröbere, dennoch kurzschlussfreie Tropfen, flankenseitig in das Schmelzbad eingehen. Dadurch wird ein starker und schmaler vertikaler Einbrand unterbunden und der seitliche Einbrand maximiert.

Die hier vorgeschlagenen kurzen und hochenergetischen MSG-Schweißzyklen, in Strichraupentechnik ausgeführt, führen zu einer Reduzierung der WEZ-Breite von 110 auf 25 mm – verglichen mit einer konventionell geschweißten AT-Verbindung. Wiederrum im Vergleich zu einer AT-Schweißung entsteht keine weiche Zone am Rand der WEZ.

Die abschließende metallographische Charakterisierung der Wurzelschweißung zeigte, dass statt dem beim AT-Schienenenschweißen am Übergang vom GM in die WEZ auftretenden Härteabfall ein hartes feinperlitisches Gefüge entsteht. Neben dem optimierten Einbrandbild und der um mehr als 75% verringerten WEZ-Breite, ließ sich somit mit diesem magnetisch manipulierten MSG-Schweißprozess bei der Wurzellagenschweißung auch ein verbessertes Mikrogefüge in der WEZ erzeugen.

7 Ausblick

Eine weitere Steigerung der magnetischen Flussdichte würde den lateralen Einbrand vermutlich weiter erhöhen. Bedingt durch die maximale Spulenstromstärke und der Steifigkeit der aktuellen Magnethalterung wäre hier eine Neukonstruktion von Nöten. Ebenfalls bedarf es eines längeren Magnetjochs, wenn die geschweißte Schiene einer Dauerfestigkeits-Prüfung unterzogen werden soll. Des Weiteren ist ein oszillierender Lichtbogen für die Schweißung der weiteren Fülllagen vielversprechend und aktuell in der Erprobung am IMAT. Eine weitere vermeintliche Verbesserung des Einbrandes würde ein heliumhaltiges Schutzgas bieten – bedingt durch die höhere Ionisierungsenergie. Zudem muss für weitere Untersuchungen ein geeigneter Schweißzusatz gefunden werden, um den Härteabfall im Schweißgut zu vermeiden.

Da die Abschmelzleistung beim MSG-Schweißen mit der Stromstärke korreliert und damit zu Beginn der Schweißung kein geringerer Vorschub gewählt werden kann, wäre hier der magnetisch unterstützte WIG-Prozess mit Drahtzuführung eine vielversprechende Alternative. Neben der Unabhängigkeit von Stromstärke und Abschmelzleistung bietet die umgekehrte Polung (Elektrode am Minuspol) einen weiteren großen Vorteil mit einem heißeren Schmelzbad, was sich positiv auf den Einbrand auswirkt.

Literaturverzeichnis

- [1] DG TFG Transfracht, „TFG Transfracht,“ 2017. [Online]. Available: www.transfracht.com. [Zugriff am 17 Januar 2017].
- [2] L. Fendrich und W. Fengler, Handbuch Eisenbahn - Infrastruktur, Colmar/Dresden: Springer Vieweg, 2013.
- [3] voestalpine Schienen GmbH Competence Center Welding, Leoben/Donawitz, 2017.
- [4] Jäniche, Dahl, Klärner, Pitsch, Schauwinhold, Schlüter und Schmitz, Werkstoffkunde Stahl - Band 2: Anwendung, Berlin Heidelberg New York Tokyo: Springer, 1985.
- [5] „<http://www.gleisbau-welt.de>,“ [Online]. Available: http://www.gleisbau-welt.de/site/material/schienen_schienenprofile.htm. [Zugriff am 5 Dezember 2016].
- [6] L. Abdelrhani, „Voestalpine,“ [Online]. Available: <http://www.voestalpine.com/group/de/>. [Zugriff am 20 Februar 2017].
- [7] H. Bargel und G. Schulze, Werkstoffkunde, Karlsruhe: Springer, 2008.
- [8] Boese, Werner und Wirtz, Das Verhalten der Stähle beim Schweißen, Duisburg: DVS, 1980.
- [9] Jäniche, Dahl, Klärner, Pitsch, Schauwinhold, Schlüter und Schmitz, Werkstoffkunde Stahl - Band 1: Grundlagen, Berlin Heidelberg New York Tokyo: Springer, 1984.
- [10] A. Moser, P. Pointner und G. Prskawetz, „Herstellung von kopfgehärteten Schienen aus der Walzhitze,“ *BHM Springer-Verlag*, Bd. Heft 7, Nr. 133, pp. 321 - 326, 1988.
- [11] G. f. S. I. GmbH, Internationaler Schweissfachingenieur, Düsseldorf: GSI, 2015.

- [12] Fahrenwaldt, Schuler und Twrdek, Praxiswissen Schweißtechnik, Stuttgart: Springer, 2013.
- [13] Dilthey, Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1, Düsseldorf: Springer, 2005.
- [14] F. I. GmbH, „Fronius,“ [Online]. Available: <https://www.fronius.com/>. [Zugriff am 20 Februar 2017].
- [15] Munske, Handbuch des Schutzgasschweißens, Düsseldorf: DVS, 1975.
- [16] J. Ruge, Handbuch der Schweißtechnik: Band II Verfahren und Fertigung, Braunschweig: Springer, 2013.
- [17] S. Trube, C. I. GmbH, Herborn, E. Miklos und L. G. AG, „Schweißen im Anlagen und Behälterbau,“ in 29. *Sondertagung*, Unterschleißheim, 2001.
- [18] W. Conn, Die Technische Physik der Lichtbogenschweißung, Missouri: Springer Verlag, 1958.
- [19] A. Hagenbach, Der elektrische Lichtbogen, Basel: Springer, 1923.
- [20] K.-J. Matthes und W. Schneider, Schweißtechnik: Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen, Chemnitz: Hanser, 2016.
- [21] M. Bachmann, V. Avilov, A. Gumenyuk und M. Rethmeier, „Experimental and numerical investigation of an electromagnetic weld pool control for laser beam welding,“ Elsevier, 2014.
- [22] Y.-S. Kim und T. W. Eagar, „Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding,“ *Welding Journal*, pp. 269 - 278, Juni 1993.
- [23] H. Steffen und H. Bausch, Elektrotechnik Grundlagen, Hannover: Teubner, 2007.
- [24] H. Schremser und H. Bausch, Elektrotechnik für Fachschulen: Grundwissen, Hannover: Teubner, 2013.
- [25] UGITECH SA, „Ugitech,“ [Online]. Available: www.ugitech.com. [Zugriff am 6 Dezember 2016].

- [26] H. A. Wolfesperger, Elektromagnetische Schirmung: Theorie und Praxisbeispiele, Ottobrunn: Springer, 2008.
- [27] COMSOL 5.1 Multyphysics, *Werkstoffdatenbank*, 2017.
- [28] B. Halbedel, „Versuch MagMat: Magnetische Eigenschaften der Materialien (IGP),“ Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2014.
- [29] G. Bierett, E. Diepschlag, K. Klöppel, A. Matting und C. Stieler, Schweißtechnik im Stahlbau, Darmstadt: Springer, 1939.
- [30] R. Hesse, Praktische Regeln für den Elektroschweißer: Anleitungen und Winke aus der Praxis für die Praxis, Wien: Springer, 2013.
- [31] K. Gunzelmann, D. Götsch, W. Janssen und M. Metz, „Engspaltschweißen - Ein Prinzip für drei Verfahren,“ *Schweißen und Schneiden*, Nr. 60 Heft 5, pp. 270 - 278, 2008.
- [32] Carl Cloos Schweißtechnik GmbH, „Cloos,“ [Online]. Available: www.cloos.de. [Zugriff am 5 Dezember 2016].
- [33] Klaus Fronius International GmbH, „Schienenschweißversuche Projekt JOIN P2 HLSS,“ 2017.
- [34] Y. H. Kang und S. J. Na, „Characteristics of Welding and Arc Signal in Narrow Groove Gas Metal Arc Welding Using Electromagnetic Arc Oscillation,“ *Welding Journal*, Nr. MAY 2003, pp. 93 - 99, 2003.
- [35] C. S. Wu, F. Yang und J. Gao, „Effect of external magnetic field on weld pool flow conditions in high-speed gas metal arc welding,“ *Journal of Engineering Manufacture*, Bd. 230, pp. 188 - 193, 2016.
- [36] U. Füssel, „Wirtschaftliches WIG-Fügen durch magnetisches Pendeln des Lichtbogens,“ Dresden, 2013.
- [37] M. Shoichi, M. K. T. Yukio, T. Yasushi, M. Yukinori und M. Yusuke, „Study on the application for electromagnetic controlled molten pool welding process in

overhead and flat position welding," *Science and Technology of Welding and Joining*, Nr. 18, pp. 38 - 44, 2012.

[38] Q. Sun, J. Wang, C. Cai, Q. Li und J. Feng, „Optimization of magnetic arc oscillation system by using double magnetic pole to TIG narrow gap welding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Nr. 86, pp. 761 - 767, 2015.

[39] Klaus Fronius International GmbH, „Trans Puls Synergic 4000/5000/7200/9000," 2011. [Online]. Available: www.fronius.com. [Zugriff am 17 Januar 2017].

[40] Böhler Schweißtechnik Austria GmbH, Wissenswertes für den Schweißer, voestalpine Böhler Welding, 2010.

[41] I. Salehi, A. Kapoor und P. Mutton, „Multi-axial fatigue analysis of aluminothermic rail welds under high axle load conditions," *International Journal of Fatigue*, Nr. 33, pp. 1324 - 1336, 2011.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schienenprofil einer 60E1 Vignolschiene nach EN 13674-1:2011 (Maße in [mm]).....	12
Abbildung 2 Mikrostruktur und Härtebereiche einer wärmebehandelten Schiene [6]	15
Abbildung 3 Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS) für die stabile (Fe-C) und metastabile (Fe-Fe ₃ C) Ausbildung des Kohlenstoffs [7].....	16
Abbildung 4 Schematische Darstellung des Verschleißverhaltens von vollperlitischem (li.) und von Vergütungsgefüge (re.) [10]	17
Abbildung 5 Kontinuierliches ZTU-Schaubild (in Anlehnung an [4] und [11])	18
Abbildung 6 MSG-Schweißanlage [13].....	22
Abbildung 7 Statische Kennlinie einer Schweißstromquelle mit fallender (li.) und flach fallender (re.) Charakteristik [12]	24
Abbildung 8 Spannungsverlauf am Lichtbogen (in Anlehnung an [18])	25
Abbildung 9 Stoßionisation (in Anlehnung an [11]).....	27
Abbildung 10 Lichtbogenkennlinie [20]	28
Abbildung 11 Lichtbogenkennlinie bei unterschiedlichen Lichtbogenlängen (li.) und Schutzgasen (re.) [20]	28
Abbildung 12 Innere- bzw. ΔI -Regelung bei veränderlicher Lichtbogenlänge bzw. Spannung (in Anlehnung an [11] und [16])	29
Abbildung 13 Änderung der Lichtbogenlänge bei den div. Arbeitspunkten (Änderung der Schweißspannung) (in Anlehnung an [11] und [16]).....	29
Abbildung 14 Schematische Darstellung der magnetischen Krafterwirkung auf den Schweißtropfen bei Ar/CO ₂ -Mischgas und CO ₂ [17]	30
Abbildung 15 Tropfenablösung in CO ₂ [11]	30
Abbildung 16 Schematische Tropfenablösung in Ar bei zunehmendem CO ₂ -Anteil [17]	31
Abbildung 17 Werkstoffübergänge beim Schutzgas-Schweißen; Elektrodendurchmesser 1.2 mm und überwiegend argonhaltiges Mischgas [12]	31
Abbildung 18 Feldbild und Feldlinien eines stromdurchflossenen Leiters (in Anlehnung an [23])	33
Abbildung 19 Magnetfeld einer Lichtbogen-Schweißung und Blaswirkung bei seitlicher Massekontaktierung; 90° (li.); spitzer Winkel (re.) [29]	33
Abbildung 20 Verfahrensprinzipien des MAG-Engspaltschweißens [31]	34

Abbildung 21 Stromdurchflossener Leiter überlagert mit externem parallelen Magnetfeld [23].....	35
Abbildung 22 Vorversuch Schweißnaht 1 – Positionierung des Magneten und schematische Darstellung der Magnetfeldlinien und der resultierenden Lorentzkraft	38
Abbildung 23 Vorversuch Schweißnaht 1 – Detail der Nahtverwerfung normal zur Schweißrichtung.....	38
Abbildung 24 Vorversuch Schweißnaht 2 – Positionierung des Magneten und schematische Darstellung der Magnetfeldlinien und der resultierenden Lorentzkraft	39
Abbildung 25 Vorversuch Schweißnaht 2 – Detail der zunehmende Nahtverwerfung normal zur Schweißrichtung	39
Abbildung 26 Vorversuch Schweißnaht 3 – Positionierung des Magneten und schematische Darstellung der Magnetfeldlinien und der resultierenden Lorentzkraft	40
Abbildung 27 Vorversuch Schweißnaht 3 – Detail der Nahtverwerfung entgegen der Schweißrichtung.....	40
Abbildung 28 Prinzip der magnetischen Ablenkung im Engspalt.....	41
Abbildung 29 Modell der Versuchsanordnung.....	43
Abbildung 30 Simulation der magnetischen Flussdichte im Schienenfuß-Engspalt mit Isolinien	45
Abbildung 31 Simulierter Verlauf der magnetischen Flussdichte im Schienenfuß-Engspalt.....	45
Abbildung 32 Simulation der magnetischen Flussdichte im vereinfachten Blech-Engspalt mit Isolinien.....	46
Abbildung 33 Simulierter Verlauf der magnetischen Flussdichte im vereinfachten Blech-Engspalt	46
Abbildung 34 Simulation der magnetischen Flussdichte am Joch in nicht ferromagnetischen Umgebung mit Isolinien (o.); Simulierter Verlauf der magnetischen Flussdichte zwischen den Joch-Schenkeln (u.)	47
Abbildung 35 Vermessung Magnet im Blech-Engspalt (o.); nur Magnet (u.)	48
Abbildung 36 Mittels Feilspänen sichtbar gemachtes Magnetfeld	49
Abbildung 37 Magnetischer Flussdichte-Verlauf in Schienenfuß-Engspaltmitte nach Anpassung des Modells.....	50

Abbildung 38 Verlauf der maximalen magnetischen Flussdichte bei Schienenfuß-Durchfahrt mit Magnet nach Anpassung des Modells	51
Abbildung 39 Versuchsanlage im Schweißlabor.....	52
Abbildung 40 Fronius Robacta 5000 Engspaltbrenner® [mm].....	53
Abbildung 41 Magnetjoch mit Spulen [mm]	53
Abbildung 42 Schematische Darstellung zur Versuchsdurchführung der Versuchsserie 0 „Platte“	56
Abbildung 43 Versuchsaufbau der Versuchsserie 0 „Platte“	57
Abbildung 44 Draufsicht der beiden Schweißnähte der Versuchsserie 0; Überblick über die gesamte Schweißnahtlänge (o.); Vermessung der seitlichen Auslenkung und der Nahtbreite (u.).....	58
Abbildung 45 Schematische Darstellung zur Versuchsdurchführung der Versuchsserie 1 „Rippen“	59
Abbildung 46 Versuchsaufbau der Versuchsserie 1 „Rippen“	60
Abbildung 47 Vorderansicht der Positionierung von Brenner und Magnet im Engspalt	60
Abbildung 48 Draufsicht der Querschnitte für Auswertung	61
Abbildung 49 Draufsicht auf Nahtoberfläche bei Schweißung mit unterschiedlichem Schutzgas.....	62
Abbildung 50 Makro-Querschliff der Referenznaht bei gleichen Parametern ohne magnetische Ablenkung und M 21; Adler Ätzung	63
Abbildung 51 Makro-Querschliffe der Versuchsserie bei gleichen Parametern bei magnetischer Ablenkung und diversen Schutzgasen; Adler Ätzung.....	63
Abbildung 52 Makro-Querschliffe; Versuchsserie bei gleichen Parametern und diversen Zusatzdrahtdurchmessern; Adler Ätzung	64
Abbildung 53 Makro-Querschliffe; Engspaltfüllgrad bei unterschiedlichen Schweißdrahtdurchmessern; Adler Ätzung.....	64
Abbildung 54 Draufsicht der Versuchsserie mit Überschlägen	65
Abbildung 55 Versuchsserie mit Überschlägen; Draufsicht (li.); Makro-Querschliff; Adler Ätzung (re.)	66
Abbildung 56 Draufsicht des zerstörten Engspaltbrenners durch Lichtbogenüberschlag über die Gasdüse	66
Abbildung 57 Schematische Darstellung zur Versuchsdurchführung der Versuchsserie 2 „Engspalt mit Einlegeblech“	68

Abbildung 58 Versuchsaufbau der Versuchsserie 2 „Engspalt mit Einlegeblech“ auf Vorrichtung	69
Abbildung 59 Draufsicht der eingekratzten Markierung durch Zusatzdraht in der Blechmitte.....	69
Abbildung 60 Vorderansicht des Versuchsstücks mit Einlegeblech und seitlicher Badstütze.....	70
Abbildung 61 Versuchsaufbau mit Hochgeschwindigkeits-Kamera	70
Abbildung 62 Draufsicht der Versuche mit durchgeschmolzenem 1,5 mm Einlegeblech	72
Abbildung 63 Versuch mit maximaler Ablenkung; Draufsicht (o.); durchgeschweißte Wurzel (u.).....	73
Abbildung 64 Makro-Querschliffe; Adler Ätzung; Querschnitt bei 1/3 (li.); Querschnitt bei 2/3 (re.)	74
Abbildung 65 Pentagon Parameter-Bereiche – das grüne Fünfeck stellt das Optimum dar	76
Abbildung 66 Draufsicht von Versuch mit maximaler beidseitiger Ablenkung - Oberseite Naht	77
Abbildung 67 Makro-Querschliffe; Adler Ätzung; Querschnitt bei 1/3 (li.); Querschnitt bei 2/3 (re.)	77
Abbildung 68 Hochgeschwindigkeits-Kamera Aufnahmen des Tropfenübergangs und des Plasmas; magnetisch abgelenkt (o.); nicht abgelenkt (u.).....	78
Abbildung 69 Schematische Darstellung zur Versuchsdurchführung der Versuchsserie 3 „Schienenfuß mit Einlegeblech“	79
Abbildung 70 Versuchsaufbau der Versuchsserie 3 „Schienenfuß mit Einlegeblech“ auf Vorrichtung	80
Abbildung 71 Draufsicht eines vorbereiteten Versuchsstücks mit eingekratzter Mitte	80
Abbildung 72 Vorderansicht des Versuchsstücks mit Einlegeblech und seitlicher Badstütze.....	80
Abbildung 73 Vorwärmen mittels Bunsenbrenner.....	81
Abbildung 74 Draufsicht von Versuch mit optimiertem Parameterset.....	83
Abbildung 75 Linke Wurzel mit Heftpunkten	83
Abbildung 76 Rechte Wurzel mit Heftpunkten	84

Abbildung 77 Makro-Querschliffe; Adler Ätzung; 1/4 (1); 2/4 (2); 3/4 (3) und ohne Ablenkung (4)	85
Abbildung 78 Mikroschliff einseitig geschweißt; Nital Ätzung	86
Abbildung 79 Detail GM – WEZ – SG; 25-fache Vergr.; Nital Ätzung.....	86
Abbildung 80 Detail GM – WEZ; 100-fache Vergr.; Nital Ätzung	86
Abbildung 81 500-fache Vergr.; Nital Ätzung; Detail GM (li.); Detail WEZ (re.)	87
Abbildung 82 Detail Übergangsbereich WEZ – SG; 100-fache Vergr.; Nital Ätzung	87
Abbildung 83 Detail SG; 500-fache Vergr.; Nital Ätzung	87
Abbildung 84 Querschliff für Härteverlauf beidseitig geschweißt; Nital Ätzung.....	88
Abbildung 85 Härte und Gefüge magnetische MAG-Wurzellage und AT Schweißung; 500-fache Vergr.; Nital Ätzung; WEZ feinperlitisches (1); Grundmaterial perlitisches (2); Schweißgut acicular Ferrit (3) [41].....	89

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Schienen-Stahlsorten nach EN 13674-1:2011	13
Tabelle 2 Chemische Zusammensetzung der Stahlgüten in Anlehnung an EN 13674-1:2011.....	14
Tabelle 3 Chemische Zusammensetzung von drei Schienenstahl-Legierungen (in Anlehnung an [4])	17
Tabelle 4 Parameter für Vorversuche	37
Tabelle 5 Vergleich Simulation mit Messung im vereinfachten Blech-Engspalt.....	49
Tabelle 6 Richtanalyse der Massivdrahtelektrode EMK 6 [40].....	54
Tabelle 7 Versuchsparameter fixiert	54
Tabelle 8 Versuchsparameter optional bzw. variierend	55
Tabelle 9 Gefundene Parameter für Versuchsserie 0.....	57
Tabelle 10 Variierte Parameter für Versuchsserie 1	61
Tabelle 11 Gefundene Parameter für Versuchsserie 1 – erstes Parameterset.....	67
Tabelle 12 Variierte Parameter für Versuchsserie 2	71
Tabelle 13 Gefundene Parameter für Versuchsserie 2 – Parameterset	74
Tabelle 14 Gefundene Parameter für Versuchsserie 3 – Parameterset	84

10 Formelverzeichnis

(1) Lorentzkraft	29
(2) Stromstärke implizit	32
(3) Magnetische Flussdichte	32
(4) Absolute magnetische Permeabilität	32
(5) Magnetische Feldkonstante	32
(6) Magnetische Feldstärke einer Zylinderspule	32