

Jürgen Fuchs, BSc

**Drahtbasierte additive Fertigung  
mit dem Elektronenstrahl und einer  
unlegierten Massivdrahtelektrode  
(G4Si1)**

**DIPLOMARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur

eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer:

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

Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

Christopher Wiednig, Dipl.-Ing.

Christian Schneider, Dipl.-Ing.

Graz, Dezember 2016



# Vorwort

Die Idee, mich für diese Diplomarbeit zu bewerben, kam spontan bei einem Gespräch mit einem Freund. Dabei begeisterte mich der Gedanke, die faszinierende Technik des Elektronenstrahlschweißens mit dem aufstrebenden Forschungsfeld der additiven Fertigung zu verknüpfen. Damit bekam ich eine nicht alltägliche Gelegenheit geboten. Diese Entscheidung würde ich auch ein gutes Jahr und einige Schweißperlen später noch einmal treffen. Die gestellten Aufgaben kann ich als sehr spannend und herausfordernd zugleich bezeichnen. Eine für mich persönlich sehr wesentliche Erkenntnis ist, dass das Thema der additiven Fertigung, insbesondere in Kombination mit dem Elektronenstrahl, ein sehr weitläufiges ist. Umso mehr freut es mich, dass bereits ein Kollege auf den gewonnenen Erkenntnissen aufbauende Untersuchungen in Angriff genommen hat. Es ist mir ein großes Anliegen, an dieser Stelle auch einmal Danke zu sagen. Hier sind besonders Prof. Norbert Enzinger, Christian Schneider und Christopher Wiednig zu erwähnen. Deren profunde Betreuung weiß ich sehr zu schätzen. Auch Leander Herbitschek stand bei der Durchführung der Versuche immer mit Rat und Tat zur Seite. Mein größter Dank gebührt meiner Freundin Tina, meinen Eltern und Geschwistern für die moralische Unterstützung während des gesamten Studiums und vor allem in der für mich sehr bewegenden Zeit, in der ich diese Arbeit verfasst habe.



## 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 Diplomarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift



# Kurzfassung

Drahtbasierte additive Fertigungsprozesse bieten eine interessante Alternative zu den Pulverbettprozessen, um das Anwendungsgebiet der generativen Fertigung zu erweitern. Dabei lassen sich die Grenzen in Bezug auf die maximale Bauteilgröße verschieben und es können vergleichsweise hohe Bauraten erzielt werden. Zusätzlich können etablierte Schweißverfahren mit nur geringen Adaptionen für diese Aufgabe qualifiziert werden. Neben diversen Lichtbogenverfahren, wie beispielsweise Metallaktivgasschweißen oder Cold Metal Transfer (CMT), bieten sich dafür auch das Laser- oder das Elektronenstrahlschweißverfahren an. Der Elektronenstrahl stellt ein sehr vielfältiges Werkzeug dar, das höchsten Ansprüchen gerecht wird. Die funktionale Trennung von Energie- und Materialeinbringung und die große Flexibilität der Energiequelle eröffnen eine Reihe von Möglichkeiten zur Beeinflussung des Prozesses. Zudem können verschiedene Operationen, wie Vorwärmen und nachfolgende Oberflächen- oder Wärmebehandlungen, direkt in den Fertigungsprozess integriert werden. Das Hochvakuum in der Schweißkammer stellt auch bei der Verarbeitung hochreaktiver Materialien, wie Titan oder Molybdän, einen adäquaten Schutz vor den Einflüssen der Atmosphäre dar. In dieser Arbeit werden die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Fertigungsprozess untersucht. Aus den Erkenntnissen werden Parametersätze generiert, welche sich zum Fertigen einfacher Strukturen mittels Mehrlagenschweißungen eignen. Zur Basischarakterisierung werden Strukturen mit bis zu sechs Spuren in der Breite und zehn Lagen in der Höhe mit einer unlegierten Drahtelektrode auf Baustahlbleche geschweißt, um anschließend deren Mikrostruktur zu untersuchen und sie einer mechanischen Werkstoffprüfung zu unterziehen.



## Abstract

Many standard welding processes, such as gas metal arc-, laser- or electron beam welding, can be used for additive manufacturing (AM) with only slight adaptations. Wire based additive manufacturing provides an interesting alternative to powder based processes due to their simplicity and comparatively high deposition rates. The use of an electron beam as heat source for AM offers unique possibilities for construction of samples due to its inherent flexibility. It is possible to efficiently build bigger parts with fine features and high complexity. Furthermore, additional working steps such as preheating, surface modification, welding or heat treatments can be implemented into the additive manufacturing process and thereby alleviate the bottleneck of the evacuation of the vacuum chamber. Aside from this, the ultra high vacuum atmosphere can be beneficial, when working with reactive materials such as Ti or Mo. The intrinsic complexity of electron beam additive manufacturing (EBAM) can make a stable and reproducible process control quite challenging. In this study the influence of the main process parameters, such as heat input, energy distribution, wire feed and their complex interactions was investigated. Based on single beads on a mild steel substrate using an unalloyed metal core wire (G4Si1), the correlation between the process parameters such as beam current, acceleration voltage, speed, wire feed rate and position, and the resulting bead geometry, height, width and penetration was studied. These findings were used to successfully establish a multi pass layout consisting of 1 to 6 beads next to each other and up to 10 layers in height. For basic characterization Charpy V-notch tests, tensile tests as well as hardness measurements and metallographic analysis were performed.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>iii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Ziele . . . . .	3
1.3 Vorgehensweise . . . . .	3
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Die additive Fertigung im Überblick . . . . .	6
2.1.1 Begriffsabgrenzung . . . . .	6
2.1.2 Verfahrensübersicht . . . . .	7
2.1.3 Die Pulverbettverfahren . . . . .	9
2.1.4 Die Freiraumverfahren . . . . .	13
2.2 Die Schweißverfahren . . . . .	14
2.2.1 Anforderungen . . . . .	14
2.2.2 Die Lichtbogenverfahren . . . . .	15
2.2.3 Das Laserschweißverfahren . . . . .	17
2.2.4 Das Elektronenstrahlschweißverfahren . . . . .	17
2.3 Grundlegende Zusammenhänge beim additiven Fertigungsprozess . . . . .	19
2.3.1 Die Energiebereitstellung . . . . .	21
2.3.2 Die Bereitstellung des Zusatzmaterials . . . . .	23
2.3.3 Der Materialübergang . . . . .	24
2.3.4 Die Wärmeableitung . . . . .	27
2.3.5 Das Schmelzbad . . . . .	28

## Inhaltsverzeichnis

2.3.6	Die Erstarrung . . . . .	30
2.3.7	Die Ausbildung der Mikrostruktur . . . . .	31
2.3.8	Die Entstehung von Eigenspannungen . . . . .	31
2.3.9	Die resultierenden mechanischen Eigenschaften . . . . .	33
2.4	Der Werkstoff . . . . .	34
2.4.1	Chemische Zusammensetzung . . . . .	34
2.4.2	Metallurgische Eigenschaften . . . . .	35
2.4.3	Physikalische Eigenschaften . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Methoden</b>	<b>39</b>
3.1	Verwendete Werkstoffe . . . . .	39
3.2	Verwendete Ausrüstung . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Schweißversuche</b>	<b>41</b>
4.1	Parameterübersicht . . . . .	41
4.2	Finden einer Grundeinstellung . . . . .	45
4.3	Abstimmung Strahlstrom und Drahtzufuhr . . . . .	49
4.4	Verteilung der eingebrachten Energie . . . . .	52
4.4.1	Vergrößerung der Auftrefffläche mittels Verschiebung der Fokuslage . . . . .	53
4.4.2	Anwendung spezifischer Strahlfiguren . . . . .	56
4.5	Mehrlagenschweißungen . . . . .	60
4.5.1	Identifikation wesentlicher Kriterien . . . . .	60
4.5.2	Einspurige Aufbauten . . . . .	63
4.5.3	Parametersatz für ein- und mehrspurige Aufbauten . . . . .	65
4.6	Erhöhung der Abschmelzleistung . . . . .	67
4.7	Einfluss der Drahtzuführrichtung . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>73</b>
5.1	Makroskopische Betrachtung . . . . .	74
5.2	Untersuchung der Mikrostruktur . . . . .	75
5.3	Mechanische Werkstoffprüfung . . . . .	78
5.3.1	Härtmapping . . . . .	79
5.3.2	Zugprüfung nach DIN EN ISO 6892-1 . . . . .	80
5.3.3	Kerbschlagbiegeprüfung nach EN10045 . . . . .	81

<b>6 Diskussion</b>	<b>83</b>
6.1 Interpretation der Ergebnisse . . . . .	83
6.2 Vergleich zur additiven Fertigung mittels Cold Metal Transfer . . . . .	86
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>89</b>
7.1 Zusammenfassung . . . . .	89
7.2 Ausblick . . . . .	90
<b>Literatur</b>	<b>93</b>



# 1 Einleitung

„Drahtbasierte additive Fertigung mit dem Elektronenstrahl und einer unlegierten Massivdrahtelektrode“ - hinter diesem Titel steckt die Intention, ein anspruchsvolles Schweißverfahren für die additive Fertigung zu qualifizieren. Diese Arbeit widmet sich der Erprobung eines solchen Fertigungsprozesses. Wesentliche Einflussfaktoren sollen ermittelt und Herausforderungen für weitere Forschungen erkannt werden. Nicht zuletzt erfolgt der Vergleich der zu erwartenden Ergebnisse mit jenen aus vergleichbaren Verfahren, um mögliche Anwendungsfelder aufzuzeigen.

## 1.1 Motivation

In den Zeiten von Industrie 4.0 wird gefordert, flexibel auf Produktionsänderungen reagieren zu können. Die werkzeuglose Generierung individueller Bauteile, unmittelbar aus einem 3D-Datensatz, ist ein wesentlicher Treiber für die Entwicklung generativer Fertigungsverfahren. Deutlich verkürzte Entwicklungszeiten bringen entscheidende Vorteile für den Markteintritt neuer Produkte.

Der Wegfall von Einschränkungen aus der konventionellen Fertigung eröffnet neue Wege zur Optimierung von Produkten. Die Möglichkeit zur Herstellung komplexer Geometrien bringt enormes Potential, Bauteile maßgeschneidert auf ihre eigentliche Aufgabe zu entwickeln. Spezifische Leichtbaukonzepte, in Kombination mit der Minimierung spanabhebender Bearbeitungen, tragen we-

## 1 Einleitung

sentlich zur Ressourcenschonung bei.

In den heute gängigen Industrieanwendungen zur generativen Herstellung metallischer Bauteile finden hauptsächlich die sogenannten Pulverbettverfahren Anwendung. Auf etablierten Schweißprozessen basierte Verfahren, bei denen der Werkstoff in Form von einem Draht eingebracht wird, stellen eine interessante Alternative dar. Sie können die Einsatzgebiete der additiven Fertigung deutlich erweitern.

Drahtbasierte Prozesse sollen die Möglichkeit bieten, auch größere Bauteile endabmessungsnah, in bester Qualität und wirtschaftlich fertigen zu können. Gegenüber den Pulverbettprozessen werden bezüglich der Größe realisierbarer Bauteile und den erzielbaren Bauraten Verbesserungen erwartet. Des Weiteren besteht die Möglichkeit zur Hybridfertigung in Kombination mit subtraktiven Fertigungsverfahren.

Das Elektronenstrahlschweißen ist ein sehr leistungsfähiges Verfahren, das höchsten Qualitätsansprüchen in vielfältigsten Anwendungen gerecht wird. Durch die neu auf der Elektronenstrahlschweißanlage der TU Graz installierte Hubachse wird es ermöglicht, die möglichen Anwendungsfelder des Elektronenstrahlschweißens um jenes der additiven Fertigung zu erweitern. Es ist naheliegend, dass das Ziel besteht, die Vorzüge dieses Verfahrens auch hierfür zu nutzen. Dankend zu erwähnen ist die von-Dobeneck-Technologiestiftung, welche sich im Rahmen eines Projektes für die Finanzierung der Hubachse verantwortlich zeigt.

## 1.2 Ziele

Zentrales Ziel ist die Herstellung definierter Proben und deren Analyse. Die Ergebnisse sollen mit jenen aus einer parallel durchgeführten Arbeit zum Thema „Additives Fertigen mittels CMT-Prozess“ vergleichbar sein.

Zum Ersten sind die Mechanismen bei der Herstellung dieser Proben zu verstehen. Wesentliche Zusammenhänge sollen erkannt und Herausforderungen für vertiefte Forschungen detektiert werden.

Zum Zweiten folgt die Analyse. Hierbei stehen die zu erwartenden Eigenschaften im Fokus. Dies betrifft die Mikrostruktur und in weiterer Folge die mechanischen Eigenschaften. Mögliche Fehler sind zu erkennen.

## 1.3 Vorgehensweise

Zu Beginn des Lösungswegs steht eine Literaturstudie zu den betreffenden Themen. Eine Vorstellung der physikalischen Grundlagen bildet die Basis für die folgenden Untersuchungen. Hierfür ist das Zusammenspiel der bauteil-, werkstoff- und prozessabhängigen Vorgänge zu verstehen. Anhand der Erkenntnisse aus dieser Studie werden die weiteren Zielsetzungen und Vorgehensweisen präzisiert.

In einer Reihe von Vorversuchen werden mögliche Einstellparameter identifiziert und deren Einfluss auf den Prozess untersucht. Die Ergebnisse daraus sind insofern von großer Bedeutung, dass eine stabile Prozessführung mit einem reproduzierbaren Output realisiert werden kann. Grundlegende Erkenntnisse für weitere Forschungen werden erwartet.

## 1 Einleitung

Nach Erfüllung dieser Aufgaben gilt es, die gewonnenen Erkenntnisse anzuwenden und auf ihre Tauglichkeit zur Realisierung von Bauteilen zu prüfen. Bei der Erstellung von einfachen Strukturen werden die Besonderheiten bei der Umsetzung von Mehrlagenschweißungen erforscht.

Den Schlussteil bildet die Charakterisierung der Prozessergebnisse. Bei der Untersuchung der Mikrostruktur sollen mögliche Fehler erkannt werden. Des Weiteren wird hier ein Aufschluss über die Eigenschaften des Bauteils erwartet. Damit einher geht die mechanische Prüfung der Proben. Die ermittelten mechanischen Eigenschaften bringen einen direkte Vergleichbarkeit zu den Daten konventionell hergestellter Erzeugnisse aus ähnlichen Werkstoffen.

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen erörtert. Zu Beginn wird die additive Fertigung (AM) in groben Zügen vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf den Verfahren, die für die Herstellung metallischer Bauteile geeignet sind.

Die drahtbasierte additive Fertigung stützt sich auf Schweißprozesse, die für diese Anwendung adaptiert werden. Es folgt eine Beschreibung der Verfahren, welche für diesen Zweck herangezogen werden können. Im Vordergrund stehen die jeweiligen Vorzüge. Diese lassen auf mögliche Kerneinsatzbereiche schließen und können als Auswahlkriterien dienen.

Nach dieser allgemein gehaltenen Einführung wird zum Kernthema der vorliegenden Arbeit übergegangen. Die grundlegenden Zusammenhänge beim electron beam additive manufacturing (EB-AM) werden erläutert. Schlüsselpunkte werden identifiziert und mit Ansätzen aus der Literatur zur Bewältigung dieser Herausforderungen verknüpft. Ebenso wird eine Verbindung zu den Einstellparametern hergestellt, welche zur Fertigung eines Bauteils nötig sind. Die Möglichkeiten zur Beurteilung der erhaltenen Ergebnisse runden das Kapitel ab.

Den Abschluss der theoretischen Grundlagen bilden die Informationen über den verwendeten Werkstoff. Dabei wird auf die aus schweißtechnischer Sicht relevanten Gesichtspunkte eingegangen.

## 2.1 Die additive Fertigung im Überblick

An dieser Stelle wird ein Einblick in den Stand der Technik auf dem Gebiet der additiven Fertigung gegeben. Nach einer Begriffsdefinition wird das Grundprinzip erläutert. Es folgen eine Gegenüberstellung der Verfahrensgruppen und eine kurze Beschreibung der zugeordneten Verfahren.

### 2.1.1 Begriffsabgrenzung

Ein generatives Fertigungsverfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass ein physisches Modell schichtweise aufgebaut wird. Die Kontur der Schichten wird in der Regel direkt aus einem CAD-Datensatz auf das Bauteil übertragen. Demgegenüber stehen die subtraktiven Verfahren, wie Drehen oder Fräsen sowie die formativen Verfahren, wie beispielsweise Schmieden.

Für die Gruppe dieser Verfahren existieren mehrere Bezeichnungen [1]:

- „3D Druck“  
ist eine gängige Bezeichnung aus dem allgemeinen Sprachgebrauch für die gesamte Verfahrensgruppe. Im eigentlichen Sinne bezeichnet dieser Begriff ein spezielles Verfahren, das Binderjetting.
- „Rapid Prototyping“  
bezeichnet den Bau von Geometrie-, Design-, Konzept- oder Funktionsmodellen. Die Eigenschaften wie Festigkeit oder Oberflächenqualität entsprechen in der Regel nicht den Anforderungen an das Endbauteil.
- „Rapid Tooling“  
ist die Herstellung von Werkzeugen, Vorrichtungen und Formen.

## 2.1 Die additive Fertigung im Überblick

- „Rapid Manufacturing“  
steht für die Fertigung kundenspezifischer Endprodukte in Kleinstserie.
- „Additive Manufacturing“  
ist die Serienfertigung mittels generativer Verfahren.

### 2.1.2 Verfahrensübersicht

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Vielzahl an generativen Fertigungsverfahren zu gruppieren. Wichtige Unterscheidungsmerkmale sind dabei die Art und der (Aggregat-) Zustand des zu verarbeitenden Werkstoffs, der Mechanismus zur Einbringung des Baumaterials, als auch der Mechanismus zur Einbringung der notwendigen Energie, um eine stoffschlüssige Verbindung zu erreichen.

Abbildung 2.1 zeigt die gängigen Verfahren, welche zur Herstellung metallischer Bauteile geeignet sind. Diese können den beiden Hauptgruppen Pulverbettverfahren und Freiraumverfahren zugeordnet werden. Ergänzend sei die dritte Hauptgruppe, jene der Flüssigmaterialverfahren, erwähnt. Diese hat ihre Bedeutung in der Verarbeitung von Kunststoffen erlangt. Weitere Verfahren sind verfügbar, deren Anwendung in vielfältigen Bereichen erfolgt [3].

Im Gegensatz zu den Pulverbettverfahren lässt die Bezeichnung der Freiraumverfahren noch offen, in welcher Form das Zusatzmaterial eingebracht wird. Neben pulver- oder drahtförmigen Werkstoffen kann auch auf metallische Folien zurückgegriffen werden. Die für diese Arbeit besonders relevanten Verfahren sind in der Gruppe der Freiraumverfahren mit Schweißzusatz in der Form von Draht angesiedelt.

## 2 Grundlagen

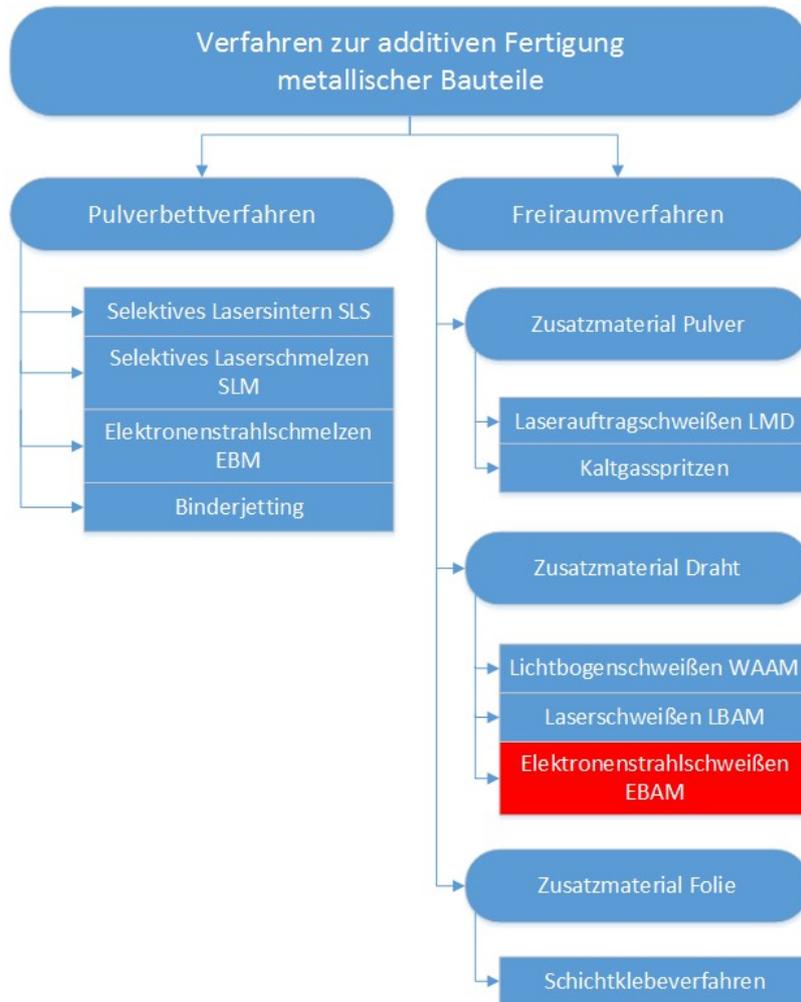


Abbildung 2.1: Verfahren zur additiven Fertigung metallischer Bauteile [2]

### 2.1.3 Die Pulverbettverfahren

Die Pulverbettverfahren erfahren die größte Verbreitung auf dem Gebiet der generativen Fertigung metallischer Bauteile. Sie stellen derzeit die einzige Möglichkeit dar, komplexe Geometrien zu verwirklichen. So werden sie in verschiedensten Anwendungsbereichen, beginnend bei der Herstellung von Prototypen, über Luft- und Raumfahrt, Motorsport bis hin zur Medizintechnik eingesetzt.

Folgende Verfahren werden dieser Gruppe zugeordnet:

- Selektives Lasersintern SLS
- Selektives Laserschmelzen SLM
- Selektives Elektronenstrahlschmelzen EBM
- Binderjetting

In Abbildung 2.2 ist das Prinzip der Pulverbettverfahren am Beispiel des Selektiven Lasersinterns illustriert. Allen diesen Verfahren ist gemein, dass ein pulverförmiger Werkstoff Schicht für Schicht in eine Kammer mit einer absenkbaren Bauplattform eingebracht wird. Dort wo das Bauteil entsteht, wird eine Verbindung zwischen den Pulverpartikeln hergestellt. Anschließend wird das bereits generierte Element um eine Schichthöhe abgesenkt, um diesen Vorgang zu wiederholen. Dabei nimmt das überschüssige Pulver eine Stützfunktion ein, wodurch überhängende Geometrien realisiert werden können.

Eine Sonderstellung nimmt das Binderjetting ein. Hier wird keine stoffschlüssige Verbindung hergestellt, sondern lediglich die Pulverteilchen mittels eines Klebers verbunden. Für Prototypen und Urmodelle kann, abgesehen von allfälligen Nacharbeiten, auf eine weitere Behandlung verzichtet werden. Zur Erzielung eines belastbaren Bauteils sind jedoch weitere Bearbeitungen, wie z.B. Sintern, erforderlich.

## 2 Grundlagen

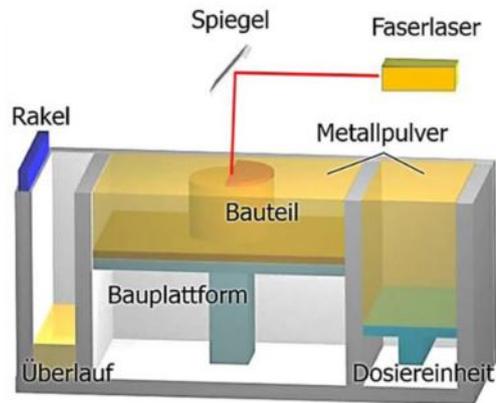


Abbildung 2.2: Funktionsprinzip des Selektiven Lasersinterns SLS [4]

Zur Herstellung eines Funktionsbauteils ist eine stoffschlüssige Verbindung der Partikel erforderlich. Bewährte Quellen zur Einbringung der nötigen Energie sind der Laser- und der Elektronenstrahl. So kommt es beim Selektiven Lasersintern zur Anschmelzung der Körner mittels Laserstrahl, beim Selektiven Laserschmelzen zum vollständigen Aufschmelzen mittels Laserstrahl und beim Selektiven Elektronenstrahlschmelzen ebenfalls zum vollständigen Aufschmelzen mittels Elektronenstrahl.

Das Elektronenstrahlschmelzen EBM findet seine Hauptanwendung vor allem in der Medizintechnik sowie in der Luft- und Raumfahrt. Speziell in der Herstellung von Implantaten mit porösen Strukturen liegen die Stärken dieses Verfahrens. Entsprechend dieser Anwendungen werden vom Hersteller Arcam [5] TiAl-, CoCr- sowie NiCr-Legierungen als Standardwerkstoffe genannt. Eine dem Werkstoff angepasste Wärmebehandlung wird im Anschluss an den Fertigungsprozess empfohlen.

Weiter verbreitet ist die industrielle Anwendung des Selektiven Lasersinterns SLS. Der Hersteller EOS [6] sieht seine Anwenderbranchen und -märkte über sämtliche Industriebereiche verteilt. Für eine Vielzahl von Werkstoffen, wie martensitische Stähle, Ni-,

## 2.1 Die additive Fertigung im Überblick

TiAl-, AlMgSi- und CoCr-Legierungen werden verschiedene Parametersätze zur Verfügung gestellt. Diese sind entweder zur Erreichung einer bestmöglichen Oberflächenqualität oder einer maximalen Aufbaurrate optimiert.

Die Laserschmelzanlage mit dem größten Bauraum verfügt laut Herstellerangaben von Concept Laser GmbH [7] über ein Bauvolumen von 160 Litern. Dieser bewirbt ein modulares Anlagenkonzept, welches einen weiteren wichtigen Schritt auf dem Weg zur Serienproduktion mittels additiver Fertigung darstellen soll.

Zusammenfassend kann über die Pulverbettverfahren gesagt werden, dass sich mit den erläuterten Verfahren sehr komplexe Geometrien verwirklichen lassen und für sämtliche gängigen Werkstoffe bereits Parametersätze vorhanden sind. Dabei ist die maximale Bauteilgröße durch den vorhandenen Bauraum limitiert, ebenso sind die erzielbaren Auftragsraten durch die Verwendung von Pulver als Zusatzwerkstoff beschränkt. Abhängig von Verfahren, Werkstoff und Verwendungszweck wird eine thermische Nachbehandlung der Produkte empfohlen. Die erzielbaren Materialkennwerte weisen eine Anisotropie in Bezug auf die Fertigungsrichtung auf.

Repräsentativ für die Pulverbettverfahren wird in Tabelle 2.1 ein Auszug aus den Prozess- und Materialdaten des Selektiven Lasersinterns wiedergegeben. Diese sind unter Anwendung des Parametersatzes „Performance“ bei der Verarbeitung der Legierung Inconel 718 auf der Anlage EOSINT M 280 der Firma EOS ohne nachfolgende Wärmebehandlung erzielt worden [6]. Zum Vergleich dienen die Daten des Grundwerkstoffs im lösungsgeglühten und ausgehärteten Zustand [8].

## 2 Grundlagen

Tabelle 2.1: Auszug aus Prozess- und Materialdaten beim SLS von Iconel 718 auf der Anlage EOSINT M 280

<b>Prozessdaten</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Bauraum	250*250*325	mm
Yb-Laser-Leistung	200/400	W
Scangeschwindigkeit	bis 7	m/s
Leistungsaufnahme	bis 8	kW
Bauteilgenauigkeit	40-60	$\mu\text{m}$
Mindestwandstärke	0,3-0,4	mm
Volumenrate	14,4	$\text{cm}^3/\text{h}$
<b>Materialdaten wie gebaut</b>		
Zugfestigkeit hor.	1060 $\pm$ 50	MPa
Zugfestigkeit vert.	980 $\pm$ 50	MPa
Streckgrenze hor.	780 $\pm$ 50	MPa
Streckgrenze vert.	634 $\pm$ 50	MPa
Bruchdehnung hor.	27 $\pm$ 5	%
Bruchdehnung vert.	31 $\pm$ 5	%
E-Modul	160 $\pm$ 20	GPa
Härte	ca. 30	HRC
<b>Vergleich Grundwerkstoff</b>		
Zugfestigkeit	1280	MPa
Streckgrenze	1030	MPa
Bruchdehnung	12	%

### 2.1.4 Die Freiraumverfahren

Eine größere Variantenvielfalt ist bei den Freiraumverfahren vorhanden. Dies ist bedingt durch den Umstand, dass das Zusatzmaterial nicht nur in Pulverform vorliegen kann.

Eine interessante Alternative zu den pulverbasierten Prozessen bieten die Drahtprozesse. Hier werden endabmessungsnahe Konturen mittels Auftragsschweißungen generiert. Da diese Gruppe den Kern dieser Arbeit darstellt, werden die Grundlagen in Kapitel 2.2 ausführlicher behandelt.

Eine verbreitete Anwendung ist das Laserschweißen mit Pulver als Zusatzmaterial, auch bekannt unter dem Begriff laser metal deposition (LMD). Hierzu wird von Thompson [9] und Shamsei [10] eine sehr detaillierte Zusammenfassung über den Stand der Technik, die physikalischen Grundlagen bis hin zur Prozesstechnik gegeben. Der Vorteil von Auftragsschweißungen mit pulverförmigem Zusatz liegt in der geringen Menge an benötigter Energie. Verglichen zu den Drahtprozessen lassen sich äußerst geringe Aufmischraten erzielen und der Bauteilverzug kann sehr klein gehalten werden. Dies macht das Verfahren für den Einsatz in der Hybridfertigung in Kombination mit konventionellen Methoden interessant.

Eine eher untergeordnete Rolle kommt dem Kaltgasspritzen und dem Schichtklebeverfahren zu. Beim Kaltgasspritzen werden Partikel duktiler Werkstoffe mittels eines Trärgases auf mehrfache Schallgeschwindigkeit beschleunigt, um beim Auftreffen auf die Bauteiloberfläche eine Bindung einzugehen. Somit ist es eher für den Zweck des Beschichtens geeignet als für die additive Fertigung im eigentlichen Sinne. Das Schichtklebeverfahren kann durch Verwendung entsprechender Folien auch zur Generierung metallischer Bauteile verwendet werden, findet aber seine Hauptanwendung im Prototypenbau.

## 2.2 Die Schweißverfahren

Die Grundlage der drahtbasierten generativen Fertigungsverfahren bilden Schweißprozesse. Unterscheidungsmerkmale für Schweißverfahren und die sich ergebenden Anforderungen werden hier erläutert und anschließend ausgewählte Verfahren diskutiert. In erster Linie wird dabei auf drei Gruppen der drahtbasierten additiven Fertigung eingegangen, diese sind:

- wire and arc additive manufacturing (WAAM)
- laser beam additive manufacturing (LBAM)
- electron beam additive manufacturing (EBAM)

### 2.2.1 Anforderungen

Für das Schweißen gibt es mehrere Definitionen. Kernaussage ist, dass gleiche oder artfremde Werkstoffe unter Einwirkung von Kraft und/oder Wärme unlösbar miteinander verbunden werden. Dies kann mit oder ohne Zusatzwerkstoff geschehen.

Für die vorliegende Aufgabenstellung liegt der Zweck des Verfahrens nicht im Fügen von Bauteilen, sondern im Auftragsschweißen. Es ist also nötig, metallische Kontinuität zwischen dem Grundwerkstoff und dem hier drahtförmig eingebrachten Zusatzmaterial herzustellen. Das spricht für die Gruppe der Schmelzschweißverfahren. Weiters sollen sich mit den angewendeten Verfahren möglichst alle Metalle verarbeiten lassen und dabei wird eine vollautomatisierte Fertigung vorausgesetzt.

Diese Merkmale werden zum Einen innerhalb der Gruppe der Lichtbogenverfahren erfüllt. Ebenso kommen die beiden Strahlschweißverfahren Laser- und Elektronenstrahlschweißen der Erfüllung dieser Grundanforderungen nach.

In Bezug auf die additive Fertigung sind aus technischer Sicht folgende Stoßrichtungen vorgegeben:

- Minimierung der eingebrachten Energie
- Minimierung der Aufmischung
- Maximierung der Aufbaurate
- Erzielung geringer Mindestwandstärken
- Erzielung definierter Gefügeeigenschaften

### 2.2.2 Die Lichtbogenverfahren

Diese Gruppe, insbesondere die Untergruppe der Metall-Schutzgas-Schweißverfahren, sind von größter Bedeutung. Auf die beiden Verfahren MIG und MAG entfallen weltweit ca. 70 % aller Schweißaufgaben [11], was ihre Wirtschaftlichkeit eindrucksvoll bestätigt. Auch die zweite Untergruppe der Lichtbogenverfahren, jene der Wolfram-Schutzgas-Schweißverfahren kommen zum Einsatz [12], [13].

Von besonderem Interesse ist für diese Arbeit das Schweißen mittels Cold-Metal-Transfer-Prozess (CMT-Prozess). Die Ergebnisse dieser Arbeit werden mit jenen aus einer parallel durchgeführten Arbeit mit dem Thema „Additives Fertigen mittels CMT-Prozess“ verglichen. Wesentliche Inhalte dieser Arbeit sind veröffentlicht [14]. Dieser Prozess stellt eine Weiterentwicklung des MIG- bzw. MAG-Verfahrens dar und wurde in erster Linie zum Verbinden von Stahl und Aluminium entwickelt [15]. Dabei werden folgende Vorzüge gegenüber der Standardprozesse angeführt:

- geringe Wärmeeinbringung
- reduzierte Aufmischung
- verringerter Schweißverzug
- hohe Prozessstabilität
- hohe Schweißgeschwindigkeit

## 2 Grundlagen

- minimierte Spritzerbildung

Erreicht werden diese Vorteile durch einen speziellen Mechanismus für den Materialübergang. Die Schlüsselrolle kommt der verbesserten Tropfenablöse zu, wodurch der Wärmeeintrag minimiert werden kann. In Abbildung 2.3 sind die drei Phasen des Materialübergangs dargestellt:

- Zuführung des Lichtbogens zum Schmelzbad während der Brennphase
- Erlöschen des Lichtbogens und Absenken des Schweißstroms während des Eintauchens des Zusatzmaterials in das Schmelzbad
- Tropfenablöse während des Kurzschlusses, unterstützt durch die Rückbewegung des Zusatzdrahtes

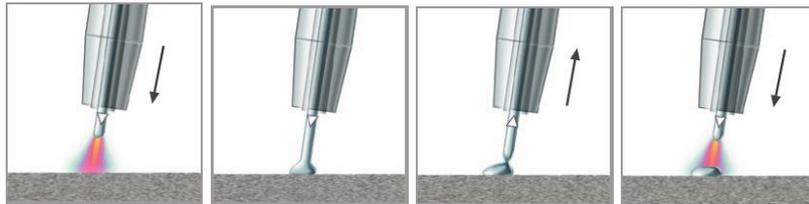


Abbildung 2.3: Materialübergang beim CMT-Prozess [15]

Für das Auftragsschweißen mittels CMT-Prozess spricht die große Stabilität des Prozesses über weite Bereiche der Parameter. Durch die hohen Auftragsraten und die vergleichsweise geringen Anschaffungskosten ergeben sich auch wirtschaftliche Vorteile.

### 2.2.3 Das Laserschweißverfahren

Sehr verbreitet ist die Anwendung des Laserschweißverfahrens für die additive Fertigung. Neben einer Vielzahl an Metallen können auch Kunststoffe verarbeitet werden. Vorteilhaft sind hierfür ein hoher Absorptionsgrad sowie eine geringe Wärmeleitfähigkeit des Materials.

Typische Anwendungsgebiete für das Laserschweißen ergeben sich, wenn hohe Qualitätsansprüche gestellt werden [16]. Durch seine hohe Energiedichte können Schweißungen sehr präzise umgesetzt und gleichzeitig hohe Auftragsraten erzielt werden. Die funktionale Trennung von Energieeinbringung und Materialzuführung bringt zusätzliche Einflussmöglichkeiten auf den Prozess.

Für das Auftragsschweißen optimiert ist der sogenannte Hot wire Prozess [17]. Durch das Vorwärmen des Zusatzdrahtes lassen sich die Leistungsparameter erhöhen, die Prozessstabilität verbessern und die Aufmischung deutlich verringern.

### 2.2.4 Das Elektronenstrahlschweißverfahren

Das Elektronenstrahlschweißen ist dem Laserschweißen sehr ähnlich. Es zeichnet sich durch eine äußerst hohe Energiedichte aus und wird dadurch vielfältigsten Anforderungen gerecht. Voraussetzung zur Schweißbarkeit eines Werkstoffs ist hier eine elektrische Leitfähigkeit. Im Strahlerzeuger der Anlage ist ein Hochvakuum zwingend erforderlich, in der Schweißkammer ermöglicht dieses die Fokussierung des Elektronenstrahls. Damit wird zugleich auch der Schutz der Schweißzone vor dem Einfluss der Atmosphäre erreicht.

Durch diese Charakteristika ist das Elektronenstrahlschweißen prädestiniert für die Verarbeitung nahezu aller Metalle, besonders

## 2 Grundlagen

hochreaktiver Werkstoffe, wie Titan oder Molybdän. Durch Anwendung der dynamischen Strahlablenkung ist es möglich, die Energieeinbringung maßgeschneidert an die jeweilige Aufgabe anzupassen. Verschiedene Prozesse, wie Additive Manufacturing, Schweißen, Oberflächen- oder Wärmebehandlungen lassen sich auf derselben Anlage umsetzen.

Große Unterschiede bestehen, was den Grad der Energieumsetzung bei den erläuterten Verfahren anbelangt. Angaben des thermischen Wirkungsgrads für das Elektronenstrahlschweißen reichen von 15-20% [18], über 60-70% [19] bis hin zu 95% [20]. Eine mögliche Erklärung dafür liegt in der sehr starken Werkstoff- und Prozessabhängigkeit. Ein grundsätzlicher Vergleich der Energieströme beim Laser- und Elektronenstrahlschweißen ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

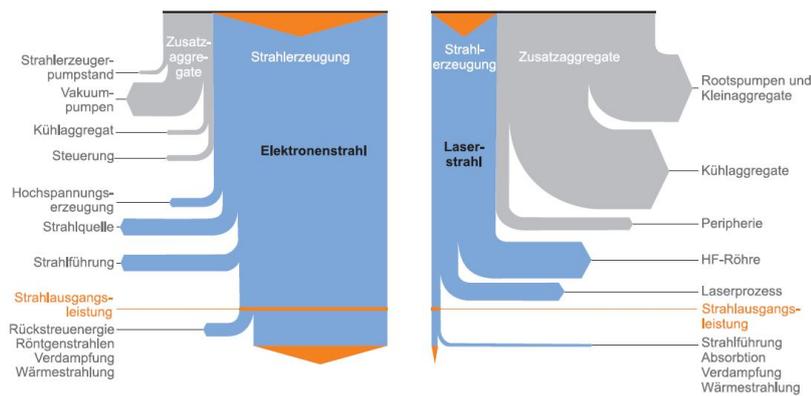


Abbildung 2.4: Vergleich der Energieumsetzung beim Laser- und Elektronenstrahlschweißen [19]

## **2.3 Grundlegende Zusammenhänge beim additiven Fertigungsprozess**

Bei der additiven Fertigung mittels Elektronenstrahlschweißen laufen eine Reihe komplexer physikalischer Vorgänge ab. Dabei treten starke Wechselwirkungen zwischen den Teilprozessen auf.

In Abbildung 2.5 ist die Prozesskette ersichtlich. Den wesentlichen Hauptvorgängen ist jeweils ein Unterpunkt zugeordnet. Diese Grafik bildet auch die Gliederung für die folgenden Unterkapitel. Es ist anzumerken, dass diese Punkte sehr allgemein gehalten sind. Zu praktisch jedem Unterpunkt laufen weitere Teilvorgänge ab, welche sehr detaillierter Untersuchungen bedürfen und nur schwer zu beschreiben beziehungsweise zu messen sind.

Die gleichzeitige Einbringung von Energie und Zusatzmaterial resultiert in der Ausbildung eines Schmelzbades. Dabei findet ein Materialübergang vom abschmelzenden Drahtende zum Schmelzbad statt. Neben der Beeinflussung durch diese Größen nimmt auch die Wärmeableitung im Substrat Einfluss auf die Ausbildung des Schmelzbades und die anschließende Erstarrung. Abhängig von den thermischen Bedingungen bildet sich eine charakteristische Mikrostruktur aus. Ebenso bauen sich auch Eigenspannungen auf. Als Resultat dieses Prozesses stellt sich ein Bauteil mit bestimmten mechanischen Eigenschaften ein.

Jedem Vorgang sind charakteristische Merkmale zugeordnet. Hier liegt der Fokus auf den Größen, welche gemessen werden können. Dazu findet sich ebenfalls eine detailliertere Beschreibung in den folgenden Unterkapiteln.

## 2 Grundlagen

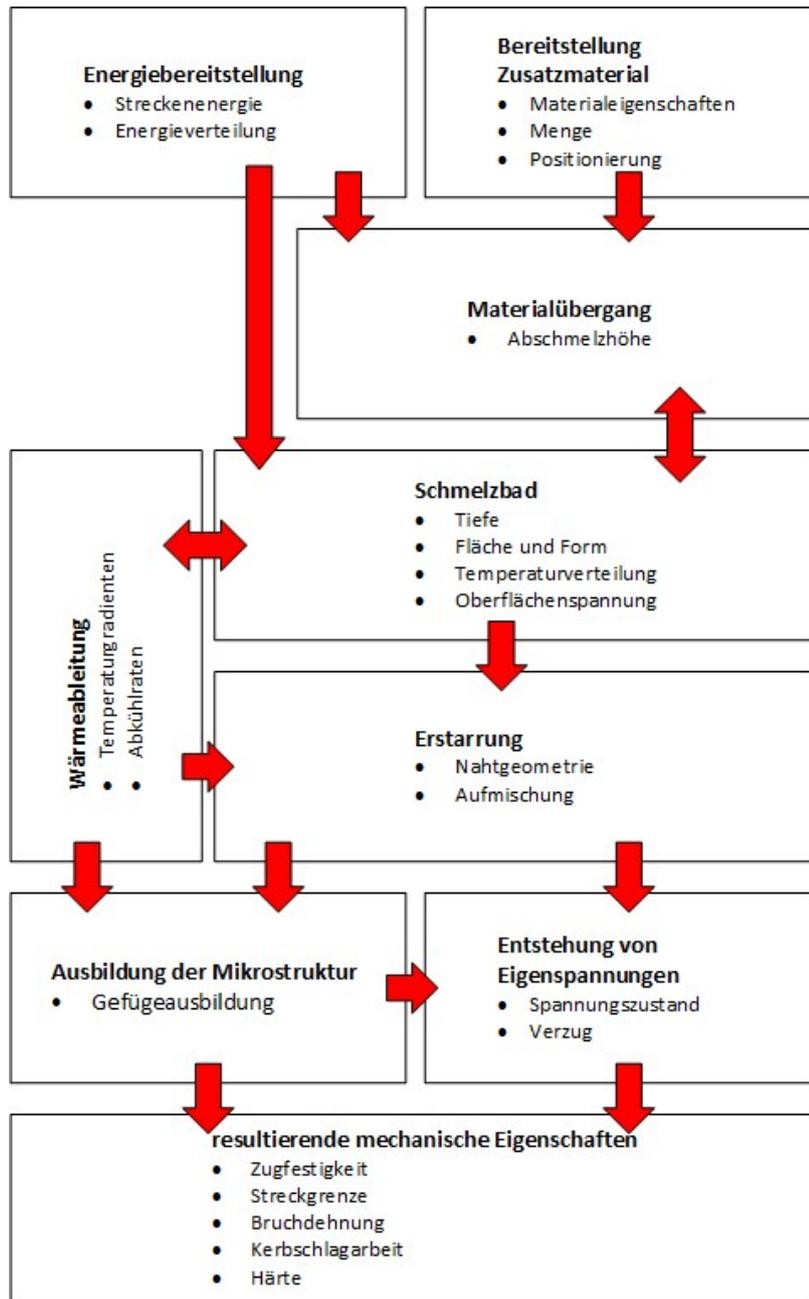


Abbildung 2.5: Grundlegende Zusammenhänge beim EBAM nach [9]

## 2.3 Grundlegende Zusammenhänge beim additiven Fertigungsprozess

### 2.3.1 Die Energiebereitstellung

Die Bildung eines Elektronenstrahls zur Energieeinbringung setzt das Vorhandensein freier Elektronen voraus, welche im Strahlerzeuger aus der Kathode herausgelöst werden. Es erfolgt die Formung zu einem Strahl. Damit geht die Beschleunigung auf bis zu zwei Drittel der Lichtgeschwindigkeit einher. Beim Auftreffen auf die Oberfläche eines Bauteils oder des Zusatzmaterials wird der Großteil der kinetischen Strahlenergie in Wärme umgewandelt. Dadurch findet ein lokales Aufschmelzen des Materials statt. Verglichen mit anderen Verfahren kann hier eine außerordentlich hohe Energiedichte erzielt werden, wodurch auch Materialverdampfung auftreten kann.

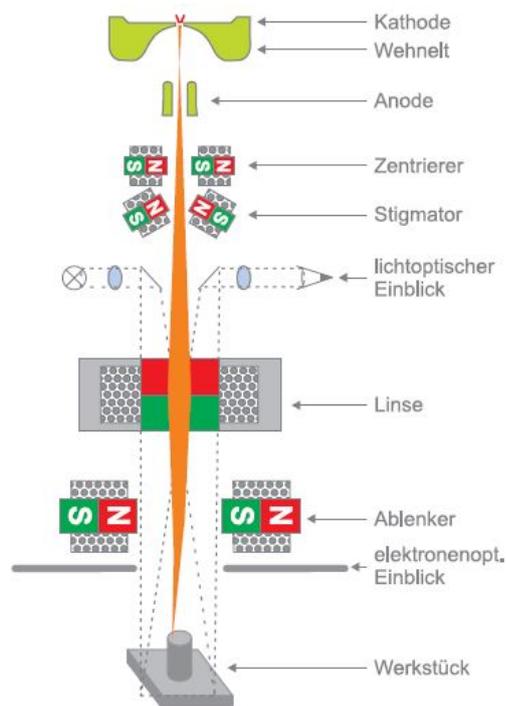


Abbildung 2.6: Schematischer Aufbau einer Strahlerzeugersäule [19]

## 2 Grundlagen

Das Prinzip der Strahlerzeugung ist in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt. Die Strahlquelle wird durch die Kathode, den Wehnelt Zylinder und die Anode gebildet. Die Kathode ist in der Regel aus Wolfram oder Tantal gefertigt. Über die Beaufschlagung mit einem Heizstrom wird diese aufgeheizt, was die Bildung freier Elektronen ermöglicht. Durch die zwischen Anode und Kathode anliegende Beschleunigungsspannung werden die freien Elektronen in Richtung der Anode beschleunigt. Die erreichte Geschwindigkeit ist proportional zur angelegten Spannung und beträgt etwa zwei Drittel der Lichtgeschwindigkeit bei einer Beschleunigungsspannung von 150 kV. Die Steuerelektrode, auch Wehnelt Zylinder, erfüllt den Zweck der Regulierung des Strahlstroms. Damit können Änderungen des Strahlstroms wesentlich rascher realisiert werden, als es durch eine Änderung des Heizstromes möglich wäre.

Zur Ablenkung des Elektronenstrahls werden Magnetfelder genutzt. Durch die Anordnung von zwei Spulen quer zum Strahl können über die Steuerung der Spulenströme 2-dimensionale Strahlablenkungen realisiert werden. Die erreichbare Ablenkfrequenz beträgt mehrere Kilohertz und ermöglicht damit die Bildung komplexer Strahlfiguren. Ebenfalls über die Anordnung von mehreren Magnetspulen erfolgt im Stigmator die Optimierung des Elektronenstrahls hinsichtlich seiner runden Form. Als Linse fungiert eine stromdurchflossene Spule. Abhängig vom Aufbau der Spule, der Energie der Elektronen und vom Spulenstrom lässt sich hiermit die Brennweite einstellen. Auch hier sind hochdynamische Änderungen möglich.

Beim Auftreffen auf eine Oberfläche erfolgt ein Eindringen der Elektronen unter die Werkstückoberfläche. Dabei kommt es zu vielfältigen Wechselwirkungen. Maßgeblich für die Eindringtiefe sind die Dichte des Materials und die Energie der Elektronen, wo vor allem die Beschleunigungsspannung relevant ist. Der Großteil der Energie wird in Wärme umgewandelt, ein Teil der Elektronen wird rückgestreut und kann für Beobachtungszwecke genutzt werden. Es entsteht auch Röntgenstrahlung, was eine Abschirmung der Anlage erforderlich macht.

## 2.3 Grundlegende Zusammenhänge beim additiven Fertigungsverfahren

### 2.3.2 Die Bereitstellung des Zusatzmaterials

Weitaus einfacher als die Energiebereitstellung gestaltet sich die Bereitstellung des Zusatzmaterials. Hierfür ist aus der Schweißtechnik eine große Vielfalt an Werkstoffen in Drahtform qualitätsgesichert verfügbar. Einen wesentlichen Faktor stellen die Eigenschaften des Werkstoffs dar. Auf den in dieser Arbeit verwendeten Werkstoff wird in Kapitel 2.4 eingegangen.

Abbildung 2.7 zeigt schematisch die Zuführung des Drahtes. Der Schweißvorschub wird mittels Verfahren des Maschinentisches realisiert, somit steht in der Regel die Drahtdüse während der Schweißoperation still. Zuvor ist die Position der Drahtdüse zu bestimmen. Hierfür sind die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Koordinate, sowie der Winkel  $\alpha$  zwischen der Drahtdüse und der Horizontalen einzustellen. Des Weiteren ist zu wählen, ob der Draht von vorne, von hinten oder seitlich zum Schmelzbad zugeführt wird.

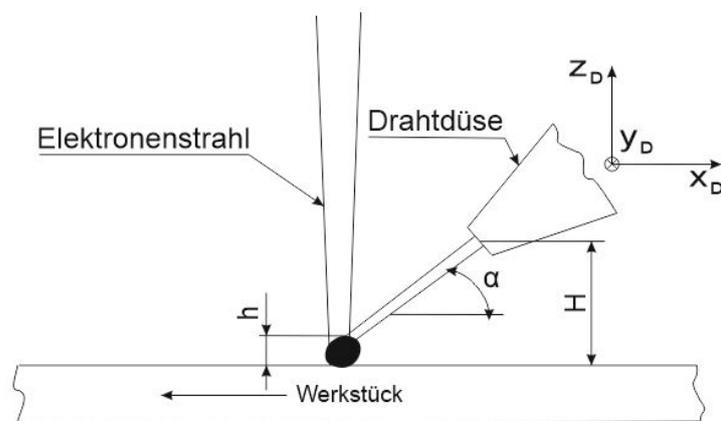


Abbildung 2.7: Die Bereitstellung des Zusatzmaterials

## 2 Grundlagen

### 2.3.3 Der Materialübergang

Eine Schlüsselrolle kommt dem Materialübergang zu. Hier liegt der Grundstein für die Ausbildung eines stabilen Schmelzbades und in weiterer Folge einer reproduzierbaren Schweißnaht mit einem entsprechenden Erscheinungsbild. Es geht insbesondere darum, die Vorgänge beim Abschmelzen des Zusatzdrahtes zu verstehen, um die richtigen Einstellparameter ableiten zu können.

Ähnlich wie beim Schutzgasschweißen, wo der Vorgang der Tropfenbildung am Drahtende sehr ausgiebig untersucht ist, wird für das Elektronenstrahlschweißen ein Modell vorgestellt, welches zur Abschätzung einer kritischen Tropfengröße in Bezug auf die Ablösung vom Draht dienen soll [21]. Aus den Berechnungen und deren experimenteller Validierung wird abgeleitet, dass der Abstand  $H$  zwischen dem abschmelzenden Drahtende und dem Grundmaterial beziehungsweise dem Schmelzbad entscheidend ist.

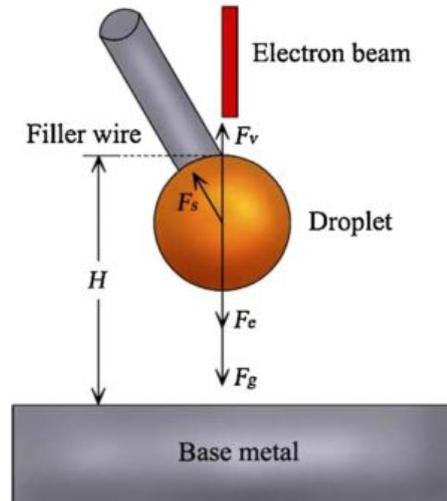


Abbildung 2.8: Kräfte am abschmelzenden Drahtende [21]

### 2.3 Grundlegende Zusammenhänge beim additiven Fertigungsprozess

Abbildung 2.8 stellt das Kräftegleichgewicht an einem Tropfen am abschmelzenden Drahtende dar. Hierbei steht  $F_G$  für die Erdanziehungskraft,  $F_S$  für die Kraft zufolge der Oberflächenspannung, deren Vertikalkomponente hier mit  $F_{Sz}$  bezeichnet wird.  $F_V$  beschreibt die Auftriebskraft und  $F_E$  die Kraft, welche durch den Strahldruck verursacht wird.

Die Autoren berechnen über das Kräftegleichgewicht

$$F_G + F_E = F_V + F_{Sz} \quad (2.1)$$

eine kritische Tropfengröße  $r_{krit}$ , bei deren Erreichung sich der Tropfen vom Drahtende löst. Neben dem Einsetzen weiterer Zusammenhänge ist die Kenntnis oder Abschätzung der maximalen Temperatur im Schmelzbad erforderlich. Zur Validierung der Ergebnisse erfolgen Schweißversuche. Dabei wird die Höhe  $H$  variiert. Für den ersten Versuch gilt:

$$H > 2 * r_{krit} \quad (2.2)$$

Mit dieser Einstellung wird keine gleichmäßige Schweißraupe erzielt, das eingebrachte Zusatzmaterial verteilt sich wahllos in Tropfenform über das Grundmaterial. Als Begründung wird angegeben, dass hier die Auftriebskraft eine sehr dominante Rolle spielt. Diese soll auch eine horizontale Komponente aufweisen, welche den wachsenden Tropfen zum Schwingen bringt und auch eine Ablenkung zur Seite bewirken kann.

Bei einer zweiten Versuchsreihe mit

$$4mm < H < 2 * r_{krit} \quad (2.3)$$

## 2 Grundlagen

soll erwirkt werden, dass der wachsende Tropfen vor dem Erreichen einer kritischen Größe abgestreift wird. Diese bringt ebenfalls noch kein zufriedenstellendes Ergebnis.

Aus der dritten Versuchsreihe werden Bedingungen für einen geordneten Materialübergang abgeleitet, welcher zu einem stabilen Schweißergebnis führt. Demzufolge muss das abschmelzende Drahtende ständig über flüssiges Metall mit dem Schmelzbad verbunden sein. Dies wird durch eine Verringerung der Höhe  $H$  erreicht, wodurch sich das abschmelzende Drahtende knapp über der Oberfläche des Schmelzbades befindet. Ein exakter, in eine Formel gefasster, Zusammenhang wird in der Literatur nicht gegeben. Als weitere Bedingung wird vorausgesetzt, dass durch eine entsprechende Wahl des Drahtvorschubs und der Leistungsparameter das vollständige Abschmelzen des Drahtes gesichert ist.

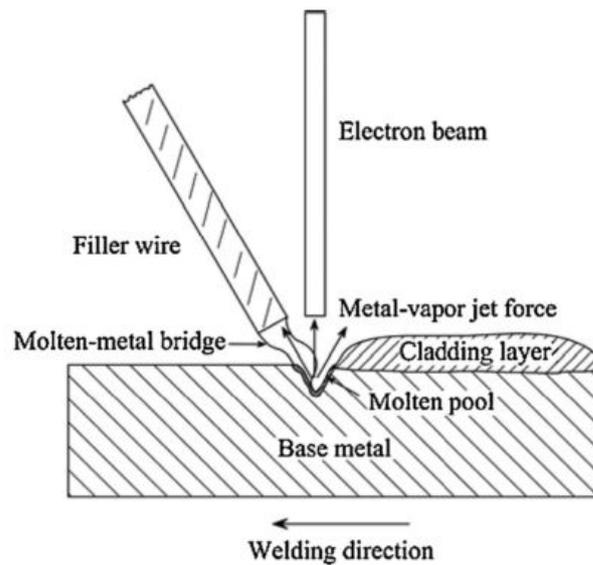


Abbildung 2.9: Schema des Materialübergangs [21]

In Abbildung 2.9 ist der Materialübergang schematisch dargestellt. Es bleibt zu erwähnen, dass unter den erläuterten Kriterien das

## 2.3 Grundlegende Zusammenhänge beim additiven Fertigungsverfahren

Abschmelzen des Drahtes nicht allein durch die Wechselwirkung zwischen Elektronenstrahl und Draht, sondern auch durch die stetige metallische Verbindung von Schmelzbad und Draht passiert. Dabei tritt neben Wärmestrahlung auch Wärmeleitung vom Schmelzbad hin zum zugeführten Draht auf.

Als Quintessenz dieses Kapitels geht hervor, dass die Höhe  $H$  einen sehr markanten Einfluss auf das Erscheinungsbild der Schweißnaht hat. Diese bleibt aufgrund verschiedener Effekte für einen bestimmten Parametersatz experimentell zu ermitteln. Der Berechnung einer kritischen Tropfengröße kommt somit keine besondere Bedeutung zu.

### 2.3.4 Die Wärmeableitung

Sämtliche der in den folgenden Kapiteln beschriebenen Vorgänge sind abhängig von der Temperaturführung beim Schweißen, welche durch das Verhältnis von Wärmeeinbringung und -ableitung bestimmt wird. Durch die Anhäufung von Einzelnähten werden an einem Punkt des Werkstücks spezifische Temperaturzyklen immer wieder durchlaufen. Dabei ändern sich die Randbedingungen mit jeder Raupe.

Die beiden Mechanismen für die Wärmeableitung beim Elektronenstrahlschweißen sind:

- Wärmeleitung
- Wärmestrahlung

Zur Abschätzung der Wärmeleitung sind neben der stoffabhängigen Wärmeleitfähigkeit die Geometrie des Werkstücks sowie die Temperaturdifferenz zwischen heißester und kühler Zone erforderlich. Die Autoren einer Studie zum Thema Wärmemanagement beim additiven Fertigen [12] führen einen geometrischen Faktor ein,

## 2 Grundlagen

um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass sich beim Herstellen eines Werkstücks mittels Schweißen die Bedingungen für die Wärmeableitung ständig ändern. Mittels diesem Faktor wird die Energieeinbringung reduziert, je weniger bereits erstarrtes Material die zu schweißende Raupe umgibt.

Weiters verringert sich die Wärmeableitung mit steigender Zwischenlagentemperatur. Durch die Wahl des Pfades beim Schweißen eines Bauteils kann ebenfalls Einfluss auf die Temperaturführung und die damit verbundenen Eigenschaften genommen werden [22].

Vergleichsweise gering ist der Einfluss der durch Strahlung abgegebenen Energie. Dabei ist der von der Schweißzone abgegebene Wärmestrom abhängig von der Stephan-Boltzmann-Konstante, der Fläche des Bauteils, sowie dessen Temperaturverteilung.

Ein prädestiniertes Werkzeug für die Vorhersage der Temperaturentwicklung beim Schweißen ist die numerische Berechnung [23], [24], [25].

### 2.3.5 Das Schmelzbad

Bei der Bildung des Schmelzbades spielen alle schon erläuterten Vorgänge zusammen. Es treten vielfältige Effekte auf, welche die Geometrie und die Eigenschaften der sich bildenden Schweißnaht maßgeblich beeinflussen. Ziel vieler Untersuchungen ist es, die Vorgänge im Schmelzbad und deren Auswirkung auf das spätere Ergebnis zu verstehen. Somit stellt die Kontrolle des Schmelzbades einen wichtigen Mechanismus zur Prozesskontrolle und -steuerung dar [9], [23], [25].

Die Vorgänge im Inneren des Schmelzbades sind sehr komplex und noch nicht vollständig verstanden [25]. Bedingt durch die sehr intensive Energieeinbringung, hohe thermische Gradienten und

### 2.3 Grundlegende Zusammenhänge beim additiven Fertigungsverfahren

den Eintrag von flüssigem Zusatzmaterial können sämtliche Phasenumwandlungen, wie Schmelzen, Erstarren, Verdampfen und Kondensieren, gleichzeitig auftreten. Daneben treten Strömungen, abhängig vom Auftrieb der Metaldämpfe und dem Einfluss des zufließenden Zusatzmaterials auf.

Die sich später ausbildende Geometrie der Schweißraupen wird durch die Umstände im Schmelzbad festgelegt. Konkret sind dies die Einbrandtiefe, die Breite des Schmelzbades, der Flankenwinkel und die Oberflächenspannung in der Schmelze. Ziel ist die Erreichung einer definierten Geometrie und die Erzielung einer möglichst geringen Aufmischung.

Die bereits erwähnte Prozesssteuerung kann auf Basis der Schmelzbadkontrolle erfolgen. Die damit verbundene Methode des sogenannten „Process mapping“ basiert auf der Erkenntnis, dass sich für bestimmte Kombinationen aus Schweißgeschwindigkeit und Leistungseintrag die Ausprägung der Schmelzbadgröße konstant verhält [26]. Eine konstante Schmelzbadgröße führt wiederum zu konstanten Erstarrungsraten und auch zu gleich bleibenden Merkmalen in der Mikrostruktur. Beispielhaft ist ein solches Diagramm zur Vorhersage der Schmelzbadgröße bei der Schweißung von Einzelnähten mit einer Titan-Legierung in Abbildung 2.10 dargestellt.

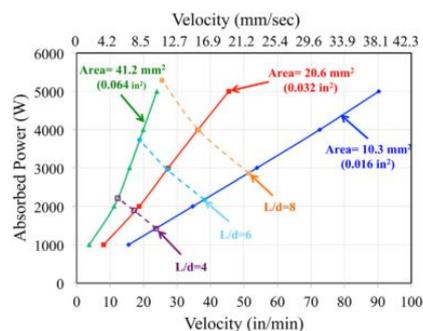


Abbildung 2.10: Process map zur Bestimmung der Schmelzbadgröße in Abhängigkeit von Leistung und Schweißgeschwindigkeit [23]

### 2.3.6 Die Erstarrung

Unmittelbar nach der Bildung eines Schmelzbades findet die Erstarrung des Schweißguts statt. Die Anzahl der Effekte, welche die Nahtform beeinflussen, erschweren eine Vorhersage der Geometrie. Wanjara [27] bestimmt experimentell die Höhenzunahme in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit und liefert ein maximal zu erreichendes Verhältnis von Nahthöhe zu Nahtbreite. Bei Unterschreiten der optimalen Geschwindigkeit ist die Streckenenergie zu hoch, was die Ausbildung flacherer Nähte mit sich zieht. Bei Überschreitung wird aufgrund des abnehmenden Verhältnis von Drahtvorschub zu Schweißgeschwindigkeit der zu erwartende Nahtquerschnitt, und damit auch die Höhenzunahme, geringer.

Die Kenntnis des Nahtprofils kann zur Berechnung eines optimalen Nahtabstands in Querrichtung genutzt werden [28], [29], [30]. Dabei wird die Einzelnahtheometrie vermessen und mittels einer mathematischen Funktion angenähert, um anschließend eine Überlappung zu berechnen, die zu einer möglichst glatten Oberfläche führt. Sowohl Nahtüberhöhungen aufgrund eines zu geringen Abstands, als auch tiefe Rillen wegen eines zu großen Abstands sollen vermieden werden.

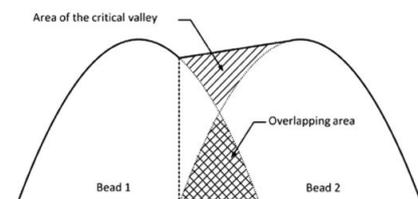


Abbildung 2.11: Ermittlung des Überlappungsabstands [28]

Der von Ding [28] für eine parabelförmige Einzelnahthe ermittelte optimale Nahtabstand von etwa 74% der Einzelnahthebreite kann als Anhaltspunkt für eine experimentelle Bestimmung des Nahtabstands dienen.

## 2.3 Grundlegende Zusammenhänge beim additiven Fertigungsprozess

### 2.3.7 Die Ausbildung der Mikrostruktur

Nach der Erstarrung des Schweißguts laufen Vorgänge ab, welche die Ausbildung der Mikrostruktur beeinflussen. Abhängig von thermischen Gegebenheiten finden werkstoffspezifische Phasenumwandlungen statt. Die Eigenschaften der Mikrostruktur nehmen direkten Einfluss auf die mechanischen Kennwerte des Bauteils. Eine Beschreibung der Gefügeausbildung beim für diese Arbeit verwendeten Werkstoff findet sich in Kapitel 2.4.

Aus dem prozesstechnischen Gesichtspunkt ist die Temperaturführung maßgeblich für die Entwicklung einer Mikrostruktur. Das Schweißgut und das Grundmaterial werden mit einer bestimmten Aufheizrate erhitzt und erreichen ihre Spitztemperatur. Daraufhin stellt sich ein Abkühlverlauf ein. Dieser wiederum ist abhängig von den Gegebenheiten der Wärmeableitung.

Die Ausbildung der Mikrostruktur wird dadurch bestimmt, welche Vorgänge diese Temperaturzyklen im Werkstoff auslösen. Ähnlichkeiten zeigen sich innerhalb spezifischer Gruppen, wie beispielsweise Werkstoffe mit allotropen Phasenumwandlungen, umwandlungsfreie (Nichteisen-)Metalle, aushärtbare oder hochreaktive Legierungen.

### 2.3.8 Die Entstehung von Eigenspannungen

Zwingend mit den thermischen Gegebenheiten des Schweißens verbunden ist die Bildung von Eigenspannungen. Diese wirken im geschweißten Bauteil ohne Einwirkung äußerer Kräfte und Momente. Mit dem Auftreten der Eigenspannungen gehen Verformungserscheinungen einher. Es werden drei Formen von Eigenspannungen unterschieden, die sich überlagern.

Eigenspannungen erster Art erstrecken sich über große Bereiche

## 2 Grundlagen

des Werkstücks. Wird ein eingespanntes Bauteil lokal erhitzt, so werden durch die Materialausdehnung Druckspannungen im Bereich der Schweißzone aufgebaut. Die freie Ausdehnung wird durch die Einspannung und durch die Stützwirkung des restlichen Bauteils behindert. Ab Erreichen der temperaturabhängigen Streckgrenze setzt plastische Verformung ein. Bei der Abkühlung schrumpft der erhitzte Bereich. Wenn diese Schrumpfung wiederum behindert wird, treten innere Spannungen auf. Eigenspannungen zweiter Art erstrecken sich über einzelne Körner oder Kornbereiche und treten bei allotropen Phasenumwandlungen auf. Eigenspannungen dritter Art liegen im Inneren eines Kornes, beispielsweise hervorgerufen durch Versetzungen.

Einfluss auf die Ausbildung von Eigenspannungen kann bei gegebenen Leistungsparametern über die Wahl des Schweißpfades und die Wahl der Zwischenlagentemperatur genommen werden. Vergleiche zeigen, dass bei Versuchen mit der allotropen Legierung Ti6Al4V das Eigenspannungsniveau mit längeren Wartezeiten zwischen den Einzelnähten zunimmt, wogegen Versuche mit der Legierung Inconel625 ein gegengleiches Bild liefern [22].

Zur Minimierung der Spannungen durch geeignete Wahl des Schweißpfades werden folgende Methoden vorgeschlagen [31]:

- Symmetrischer Aufbau  
Falls im Bauteil eine Symmetrieebene vorhanden ist, soll diese genutzt werden, um die Schweißpfade alternierend um diese Ebene aufzubauen. Eigenspannungen welche aufgrund von Schweißungen auf einer Bauteilseite auftreten, werden durch jene auf der Gegenseite kompensiert.
- „Rücken-an-Rücken-Aufbau“  
Diese Methode sieht vor, dass zwei idente Bauteile auf die Vorder- und auf die Rückseite von derselben Grundplatte aufgebaut werden. Dadurch treten auch Wärmebehandlungseffekte auf, welche das Ergebnis positiv beeinflussen. Die Grundplatte wird später entfernt.

## 2.3 Grundlegende Zusammenhänge beim additiven Fertigungsprozess

- Optimierte Ausrichtung des Bauteils  
Hier wird der Umstand ausgenutzt, dass kürzere Schweißraupen niedrigere Eigenspannungen hervorrufen, als längere.

### 2.3.9 Die resultierenden mechanischen Eigenschaften

Die schlussendliche Bewertung eines additiv gefertigten Bauteils erfolgt anhand dessen mechanischen Eigenschaften. Zum Vergleich dienen dabei die Eigenschaften konventionell hergestellter Produkte oder die vom Hersteller einer Schweißelektrode angegebenen Werte für das reine Schweißgut. In Zugversuchen werden die Streckgrenze und die Zugfestigkeit ermittelt. Kerbschlagbiegeversuche geben Aufschluss über das Zähigkeitsverhalten und mittels Härtemessungen lassen sich durch den Mehrlagenaufbau hervorgerufene Anlasseffekte über den gesamten Querschnitt einer Probe detektieren.

Es ist damit zu rechnen, dass die mechanischen Eigenschaften eine Anisotropie aufweisen. In Schweißrichtung werden bessere Kennwerte erwartet, als quer dazu und in Baurichtung. Die Gründe dafür sind unter anderem prozesstechnischer Natur. In Schweißrichtung erfolgt der Materialeintrag kontinuierlich, die gesamte Bauteillänge wird aus einem Schmelzbad gefertigt. In Quer- und Baurichtung sind die zu erreichenden Zugfestigkeiten durch den lagenweisen Aufbau eingeschränkt. Bedingt durch die bereits erläuterten Unterschiede der Temperaturgradienten und Abkühlraten bilden sich ebenfalls richtungsabhängige Effekte in der Mikrostruktur aus. Ebenso sind die der eigentlichen Belastung überlagerten Eigenspannungen richtungsabhängig.

Es besteht die Möglichkeit einer zumindest teilweisen Kompensation dieser Effekte durch nachfolgende Wärmebehandlungen. Wie bei den Pulverbettprozessen, wo zusätzlich auch die Gefahr der Porenbildung vorhanden ist, werden die Eigenschaften durch das Heißisostatische Pressen (HIP) verbessert [24], [32], [33].

## 2.4 Der Werkstoff

Neben den prozesstechnischen Grundlagen spielen die Eigenschaften des Werkstoffs eine wichtige Rolle. Durch die auftretenden Effekte, welche vor allem durch die Wärmeeinbringung bedingt sind, bestehen Wechselwirkungen zwischen Werkstoff und Prozessführung. Dies bedeutet, dass die Prozessparameter auf den vorhandenen Werkstoff abzustimmen sind.

Vorrangig wird nun die Schweißseignung des Werkstoffs erläutert, welche durch folgende Merkmale bestimmt wird:

- Chemische Zusammensetzung
- Metallurgische Eigenschaften
- Physikalische Eigenschaften

### 2.4.1 Chemische Zusammensetzung

Für die Untersuchungen im Zuge dieser Arbeit wird die unlegierte Massivdrahtelektrode G4Si1 verwendet. Dessen chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 2.2 ersichtlich.

Tabelle 2.2: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Schweißzusatzwerkstoffes G4Si1 in Gew.-% [34]

C	Mn	Si	Fe
0.1	1.0	1.7	Rest

Das Hauptanwendungsgebiet findet diese Massivdrahtelektrode zum Schweißen von Baustählen mit einer Zugfestigkeit bis 460 MPa im Behälter-, Kessel- und Konstruktionsbau.

## 2.4.2 Metallurgische Eigenschaften

Durchläuft dieser Werkstoff einen bestimmten Temperaturzyklus, so finden allotrope Phasenumwandlungen statt. Die Umwandlungspunkte sind im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, Abbildung 2.12 dargestellt. Abhängig vom Kohlenstoffgehalt können die auftretenden Gefüge beziehungsweise die Umwandlungstemperaturen abgelesen werden. Allerdings setzt die Anwendung des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms zur Gefügebestimmung vollständig ablaufende Diffusionsvorgänge, erreichbar durch sehr langsame Abkühlung, voraus. In der Schweißtechnik ist dieser Umstand nicht gegeben.

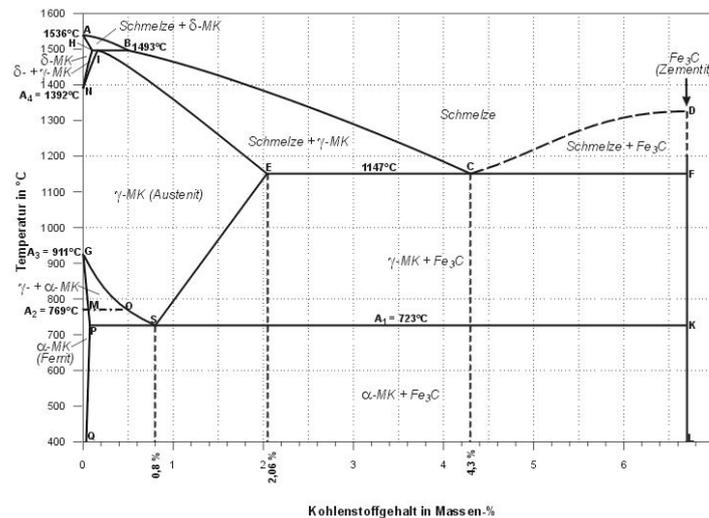


Abbildung 2.12: Das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild [35]

Besser geeignet ist die Anwendung eines Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilds (SZTU-Schaubild). In Abbildung 2.13 ist ein solches für einen Werkstoff mit ähnlicher chemischer Zusammensetzung dargestellt. Für verschiedene Temperaturverläufe sind hier die sich einstellenden Gefügeanteile aufgetragen. Ist der Abkühlverlauf nicht bekannt, so kann eine Abschätzung anhand

## 2 Grundlagen

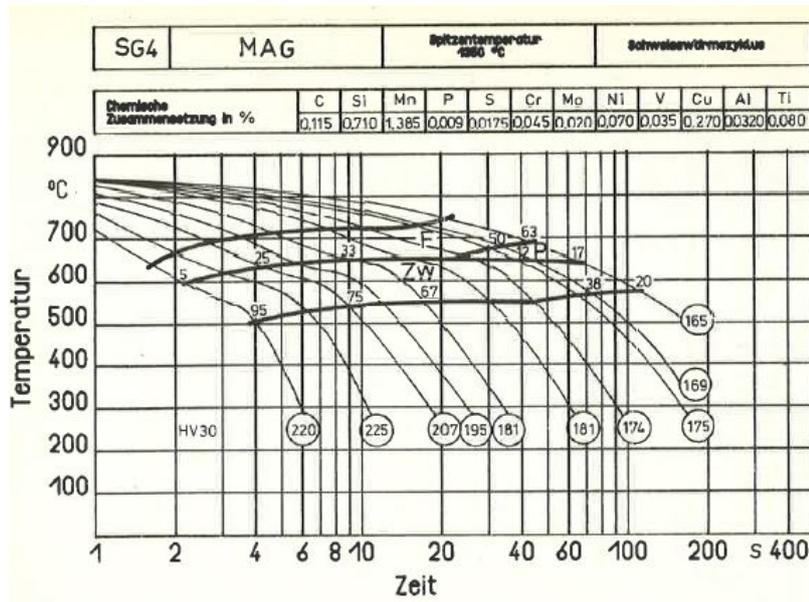


Abbildung 2.13: Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild [36]

der  $t_{8/5}$ -Zeit erfolgen. Dies ist die Zeit, in welcher der Werkstoff von 800 °C auf 500 °C abkühlt. Bei bekannten Bedingungen für die Wärmeeinbringung und -ableitung kann diese berechnet werden. In eine vereinfachte Formel zur Errechnung dieser Größe für unlegierte Baustähle finden neben Konstanten die Blechdicke, die Grundtemperatur und die Energieeinbringung Eingang. Ebenfalls ersichtlich ist die meist unerwünschte Aufhärtung der Werkstoffs.

Abhängig von der ausgebildeten Mikrostruktur stellen sich die mechanischen Kennwerte ein. In Tabelle 2.3 sind die Mindestwerte aufgelistet, welche beim MAG-Schweißen ohne eine weitere Wärmebehandlung für das reine Schweißgut erzielt werden.

Tabelle 2.3: Mechanische Kennwerte des reinen Schweißgutes G4Si1 [34]

Merkmal	Wert	Einheit
Streckgrenze	$\geq 460$	MPa
Zugfestigkeit	530-680	MPa
Bruchdehnung	$\geq 20$	%
Kerbschlagarbeit ISO-V (-20 °C)	$\geq 47$	J

### 2.4.3 Physikalische Eigenschaften

Zur Abschätzung der erforderlichen Energieeinbringung und dem Verhalten der Bauteile bei thermischer Beanspruchung sind die physikalischen Eigenschaften von Interesse. Ein Auszug dieser ist in Tabelle 2.4 für einen niedrig legierten Stahl ersichtlich. Diese Werte sind als Größenordnung zu sehen, eine gegebene Temperaturabhängigkeit ist nicht berücksichtigt.

Tabelle 2.4: Physikalische Eigenschaften eines niedrig legierten Stahles [1]

Eigenschaft	Wert	Einheit
Schmelzbereich	1500-1530	mm
Wärmeleitfähigkeit	33,5-50,5	W/mK
Ausdehnungskoeffizient	$11,4 \cdot 10^{-6}$	1/K



## 3 Methoden

In diesem Kapitel folgt eine kurze Beschreibung der verwendeten Werkstoffe sowie eine Beschreibung der verwendeten Ausrüstung bei der Durchführung der Versuche.

### 3.1 Verwendete Werkstoffe

Für die Versuche wird eine unlegierte Massivdrahtelektrode verwendet. Die chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften sind bereits in Kapitel 2.4 erläutert. Der Drahtdurchmesser  $d_{\text{Draht}}$  beträgt 1,2 mm.

Als Grundmaterial dienen Bleche aus dem thermomechanisch gewalzten Feinkornstahl S 500 MC mit einer Dicke von 10 beziehungsweise 15 mm und einer Breite von 125 mm. Die Länge wird an die jeweilige Schweißaufgabe angepasst. Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 3.1 ersichtlich.

Tabelle 3.1: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Grundmaterials S 500 MC in Gew.-% [37]

C	Si	Mn	P	S	Nb
≤0.1	≤0.4	≤2.0	≤0.02	≤0.005	≤0.09
V	Ti	Cr	Ni	Cu	Mo
≤0.05	≤0.02	≤0.3	≤0.7	≤0.3	≤0.25

## 3.2 Verwendete Ausrüstung

Folgendes Equipment wird zur Durchführung der beschriebenen Versuche und Auswertungen verwendet:

- Elektronenstrahlschweißanlage
  - Anlage ProBeam EBG45-150 K14
    - \* Strahlleistung 45 kW
    - \* Kammervolumen 1,4 m<sup>3</sup>
    - \* Beschleunigungsspannung bis 150 kV
    - \* Strahlstrom bis 300 mA
    - \* Steuerung Sinumerik
  - Entmagnetisierungseinrichtung Wagner 211-17/40 S-1
- Metallografie
  - Lichtmikroskop Zeiss Observer.Z1m
    - \* Vergrößerung 25-, 50-, 100-, 200-, 500-, 1000fach
  - Makrokamera Nikon
    - \* Objektiv Nikon AF-S Micro-Nikkor 105mm1:2,8GVR
  - Einbettmaschine Struers CitoPress-20
  - Einbettmittel Multifast black
  - Schleifmaschine Struers Tegramin-30
  - Schleifscheiben Körnung 80, 180, 320, 500, 800, 1200, 2400, 5000
  - Poliermittel 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$
  - Ätzmittel Nital 3 %
    - \* 100 ml Ethanol 96%ig
    - \* 3 ml Salpetersäure 65%ig
- Mechanische Prüfung
  - Zugprüfmaschine Zwick Roell ZMART.PRO
  - Kerbschlaghammer Otto Wolpert-Werke

## 4 Schweißversuche

Den Anfang dieses Kapitels macht die Vorstellung der variierten Parameter. Im Anschluss geht es darum, eine solide Grundeinstellung zu finden. Nachdem die Parameter für die Energieeinbringung und jene für die Drahtzufuhr aufeinander abgestimmt sind, wird die Energieverteilung optimiert. Die gewonnenen Erkenntnisse werden angewendet, um zwei Parametersätze zur Erstellung von Mehrlagenschweißungen zu generieren.

### 4.1 Parameterübersicht

Die während sämtlicher Schweißversuche variierten Parameter sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Diese werden drei Gruppen „Hauptparameter“, „Beeinflussung der Energieeinbringung“ und „Lage der Drahtzuführung“ zugeordnet.

Dabei sind die Beschleunigungsspannung, der Strahlstrom, die Schweißgeschwindigkeit und der Drahtvorschub die Hauptparameter. Über die Größen Fokuslage, Strahlfigur, Ablenkamplitude und Ablenkfrequenz kann die Energieverteilung gesteuert werden. Zur Einstellung der Drahtzufuhr sind die Höhe der Drahtdüse, der Winkel der Drahtzufuhr und die Koordinaten der Drahtzuführeinrichtung vorgesehen.

Eine Sonderstellung nimmt der Parameter „Abschmelzhöhe“ ein. Damit ist der Abstand in z-Richtung zwischen Werkstückoberfläche



#### 4.1 Parameterübersicht

ben sind, eingesetzt. Deshalb fließen auch Zahlenverhältnisse zur Einheitenkorrektur in die Gleichungen ein.

Die Streckenenergie  $E$  bildet sich wie folgt:

$$E = \frac{U_B * I_S}{v_S} \quad (4.1)$$

Das Verhältnis von Drahtvorschub zu Schweißgeschwindigkeit  $\lambda$  errechnet sich zu

$$\lambda = \frac{v_D * 1000}{v_S * 60} \quad (4.2)$$

Eine Abschätzung der Nahtgeometrie gibt der Nahtquerschnitt:

$$A = \frac{d_{Draht}^2 * \pi * \lambda}{4} \quad (4.3)$$

Um eine Relation zwischen der eingebrachten Energie und dem zugeführten Material herzustellen, wird die Größe der volumensbezogenen Energie  $E_V$  eingeführt:

$$E_V = \frac{U_B * I_S * 4 * 60}{d_{Draht}^2 * \pi * v_D * 1000} = \frac{E}{A} \quad (4.4)$$

Die theoretische Abschmelzleistung  $X$  ergibt sich aus:

$$X = \frac{A * v_S * 3600}{1000} \quad (4.5)$$

Hierbei sind allfällige Nebenzeiten nicht berücksichtigt.

## 4 Schweißversuche

Tabelle 4.1: Übersicht über die Einstellparameter und Prozesskennzahlen

<b>Hauptparameter</b>	<b>Einstellbereich</b>	<b>Einheit</b>
Beschleunigungsspannung $U_B$	90...120	kV
Strahlstrom $I_S$	8...40	mA
Schweißgeschwindigkeit $v_S$	10	mm/s
Drahtvorschub $v_D$	1,0...4,5	m/min
<b>Beeinflussung der Energieeinbringung</b>		
Fokuslage $f_L$	-40...+20	mm
Strahlfigur	O, konzentr. O	-
Strahlblenkenamplitude a	1,0...5,0	mm
Strahlblenkenfrequenz f	1...2	kHz
<b>Lage der Drahtzuführung</b>		
Höhe Drahtdüse H	12	mm
Winkel Drahtzufuhr $\alpha$	35	°
Hilfsgröße $h_1$	0,3...5,0	mm
<b>Prozesskennzahlen</b>		
Streckenenergie E	92...360	J/mm
Draht-/Schweißvorschub $\lambda$	1,7...7,5	-
errechneter Nahtquerschnitt A	1,9...8,5	mm <sup>2</sup>
volumsbezogene Energie $E_V$	29...64	J/mm <sup>3</sup>
Abschmelzleistung X	68...305	cm <sup>3</sup> /h

## 4.2 Finden einer Grundeinstellung

Im ersten Schritt geht es darum, eine solide Grundeinstellung zu finden. Diese gilt als Anhaltspunkt für die Abstimmungen bestimmter Größen in den folgenden Versuchen. Als Grundlage zur Generierung erster Einstellwerte für die Hauptparameter dienen sowohl Erfahrungswerte aus dem Durchschweißen von Blechen, als auch Werte aus der Literatur. Die Anpassung an die hier vorzufindenden Randbedingungen erfolgen über den Vergleich der beschriebenen Kennzahlen.

- Durch eine zu hohe Energiedichte verursachte negative Effekte, wie Materialverdampfung und Spritzerbildung sind zu vermeiden.
- Die Drahtdüse ist so zu positionieren, dass die Mündung einen genügend großen Abstand zum Schmelzbad aufweist, um ein Verkleben des Drahtes mit der Düse, bedingt durch Wärmeentwicklung, zu verhindern.
- Von der Abstimmung der Abschmelzhöhe hängt ab, ob ein Parametersatz optisch ansprechende oder unbrauchbare Ergebnisse liefert.

Geschweißt werden Einzelnähte mit einer Länge von 80 mm in schleppender Richtung. Dabei bleibt die Schweißgeschwindigkeit konstant. Die Beschleunigungsspannung kann mit der auf der Anlage eingebauten Kathode zwischen 80 und 150 kV gewählt werden. Während eines Schweißversuches bleibt diese in der Regel ebenfalls konstant. Damit bleibt für die Regulierung der Menge an eingebrachter Energie die Verstellung des Strahlstroms. Mittels Variation des Drahtvorschubs wird die Materialzuführung mit der Energieeinbringung abgestimmt. Die Energieverteilung geschieht anhand von Anpassungen der Amplitude der Strahlfigur „Kreis“, sowie über die Verschiebung der Fokuslage. Die Höhe der Drahtdüse und der Zuführwinkel werden aus Erfahrungswerten übernommen. Somit ist die z-Koordinate der Drahtzufuhr fixiert,

#### 4 Schweißversuche

die Einstellung der Abschmelzhöhe erfolgt über die x-Koordinate der Drahtzufuhr.

Aus diesen Versuchen geht, als erste funktionierende Grundeinstellung zur Herstellung von Einzelschweißnähten, der Parametersatz nach Tabelle 4.2 hervor.

Tabelle 4.2: Parameter für eine Grundeinstellung

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Beschleunigungsspannung $U_B$	120	kV
Strahlstrom $I_S$	15	mA
Schweißgeschwindigkeit $v_S$	10	mm/s
Drahtvorschub $v_D$	1,5	m/min
Fokuslage $f_L$	-20	mm
Strahlfigur	Kreis	-
Strahlblenkamplitude a	2,2	mm
Strahlblenkfrequenz f	1	kHz
Höhe Drahtdüse H	12	mm
Winkel Drahtzufuhr $\alpha$	35	°
Hilfsgröße $h_1$	1,6	mm
<b>Prozesskennzahlen</b>		
Streckenenergie E	180	J/mm
Draht-/Schweißvorschub $\lambda$	2,5	-
errechneter Nahtquerschnitt A	2,8	mm <sup>2</sup>
volumsbezogene Energie $E_V$	64	J/mm <sup>3</sup>
Abschmelzleistung X	102	cm <sup>3</sup> /h

## 4.2 Finden einer Grundeinstellung

Hiermit wird als erstes Zwischenergebnis dieser Arbeit eine Grundeinstellung gegeben, welche weitere Untersuchungen ermöglicht. Hierbei sind die Energieeinbringung und die Drahtzufuhr insofern abgestimmt, dass ein stabiles und reproduzierbares Schweißergebnis erwartet werden kann.

Die in den Abbildungen 4.2 und 4.3 ersichtlichen Schweißungen sind mit diesen Einstellungen durchgeführt worden. Vorerst sind nur das Erscheinungsbild und die äußere Nahtgeometrie von Bedeutung. Hier steht eine Nahthöhe von 1,1 mm einer Nahtbreite von 3,0 mm gegenüber.

Als zweiter Teil dieses Ergebnisses können die korrekte Einstellung der Drahtzufuhr und die Beobachtungen, welche zur Findung dieser gemacht worden sind, genannt werden. Es wird an dieser Stelle vorweggenommen, dass sich die dafür vorgesehene Einstellgröße  $h_1$  bei einer Änderung der Hauptparameter ebenfalls verändern wird. Des Weiteren können der reale und der eingestellte Wert aufgrund der Positionstoleranzen der Drahtzufuhr voneinander abweichen. Aus diesem Grund ist eine experimentelle Anpassung bei jeder neuen Schweißung unumgänglich. Hierfür werden an dieser Stelle die auftretenden Effekte bei einer ungünstigen Einstellung beschrieben. Für diesen und jeden weiteren beschriebenen Parametersatz wird die beim jeweiligen Versuch eingestellte Größe  $h_1$  als Anhaltswert angegeben.

Bei den drei in Abbildung 4.2 ersichtlichen Schweißnähten gilt die eingestellte Abschmelzhöhe als Unterscheidungsmerkmal. Die Abschmelzhöhe von 0,3 mm verursacht ein seitliches Abdrängen des Drahtes und ist damit zu tief, siehe linkes Bild. Im rechten Bild ist das Schweißergebnis mit der als zu hoch eingestufte Abschmelzhöhe von 3,2 mm zu sehen. Ein optisch entsprechendes Erscheinungsbild der Schweißnaht liefert der Wert von 1,6 mm, ersichtlich im mittleren Bild.

#### 4 Schweißversuche



Abbildung 4.2: zu tiefe Drahtzufuhr (links), korrekte Drahtzufuhr (Mitte), zu hohe Drahtzufuhr (rechts)

Auf dieser Basis erfolgt eine Feinabstimmung der Abschmelzhöhe, ersichtlich in Abbildung 4.3. Bei einem Wert von 2,8 mm bilden sich Schuppen, welche bei einem Wert von 2,5 mm weniger ausgeprägt sind und bei Werten von 2,3 mm und 2,1 mm nicht mehr auftreten.



Abbildung 4.3: Feinabstimmung der Drahtzufuhr

Die Sicherstellung einer korrekt eingestellten Drahtzuführung birgt eine große Herausforderung, ist aber notwendig zur Gewährleistung der Prozessstabilität. Dem vergleichsweise geringen Einstellfenster für die Abschmelzhöhe stehen die Positionstoleranzen der Drahtzuführung gegenüber.

### 4.3 Abstimmung Strahlstrom und Drahtzufuhr

Nachdem mit den bereits untersuchten Einstellungen reproduzierbare und optisch entsprechende Ergebnisse erzielt werden, folgt nun eine detaillierte Betrachtung zur Abstimmung der Energieeinbringung und der Drahtzuführung. Hierfür werden bei konstanter Grundeinstellung die beiden Größen Schweißstrom und Drahtvorschub auf jeweils drei Stufen variiert. Geschweißt werden 50 mm lange Schweißnähte in schleppender Richtung mit einem Nahtabstand von jeweils 10 mm zwischen den Einzelnähten.

Basis für diese Versuchsreihe ist die vorgestellte Grundeinstellung, somit entsprechen die Einstellwerte für die in Tabelle 4.3 nicht angeführten Parameter jenen aus Tabelle 4.2. Die Eingrenzung des Parameterfensters wird anhand von Nebenversuchen vorgenommen. Ziel ist die Erreichung einer sicheren Verbindung zwischen Schweißgut und Grundmaterial bei möglichst niedrigem Energieeintrag.

Tabelle 4.3: Abstimmung Strahlstrom und Drahtvorschub

Nr.	$I_S$	$v_D$	E	$\lambda$	A	$E_V$	X
-	mA	m/min	J/mm	-	mm <sup>2</sup>	J/mm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup> /h
1	10,0	1,5	120	2,5	2,8	43	102
2	10,0	1,8	120	3,0	3,4	35	122
3	10,0	2,1	120	3,5	4,0	30	143
4	12,5	1,5	150	2,5	2,8	54	102
5	12,5	1,8	150	3,0	3,4	44	122
6	12,5	2,1	150	3,5	4,0	38	143
7	15,0	1,5	180	2,5	2,8	64	102
8	15,0	1,8	180	3,0	3,4	53	122
9	15,0	2,1	180	3,5	4,0	45	143

#### 4 Schweißversuche

In Abbildung 4.4 sind die Schweißungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei den Schweißungen Nr. 1-4 das Profil des Einbrands eine stark asymmetrische Form aufweist.



Abbildung 4.4: Abstimmung von Strahlstrom und Drahtzufuhr, Tabelle 4.3 und 4.2, Nr. 1-3 (links), 4-6 (Mitte), 9-7 (rechts)

Die Auswertung dieser Versuche findet sich in Tabelle 4.4. Dabei sind die Breite  $b$ , sowie Höhe  $h$  und Einbrandtiefe  $t$  der Einzelnähte, ebenso wie der Aufmischungsgrad  $AG$  von Interesse. Die prozentuelle Abweichung  $x\%$  von theoretischem Nahtquerschnitt  $A_{th}$  und realem Querschnitt  $A_r$  bringt eine Kontrolle, ob der reale und der eingestellte Drahtvorschub übereinstimmen.

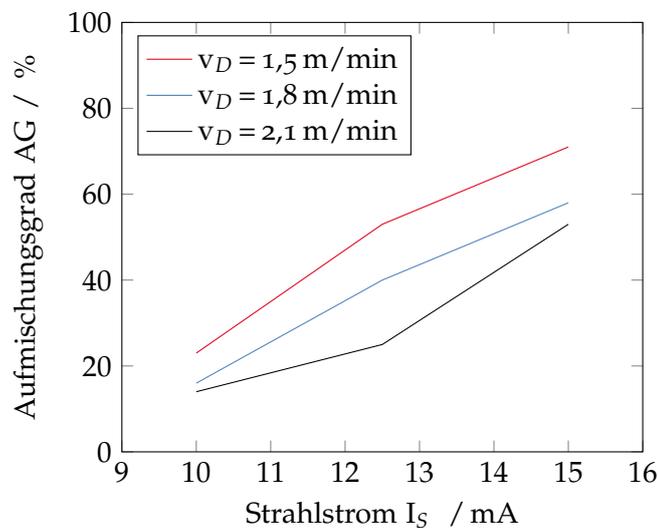
Tabelle 4.4: Auswertung der Abstimmung von Strahlstrom und Drahtzufuhr

Nr.	$I_S$ mA	$v_D$ m/min	$b$ mm	$h$ mm	$t$ mm	$AG$ %	$A_{th}$ $mm^2$	$A_r$ $mm^2$	$x\%$ %
1	10	1,5	1,4	3,4	0,5	23	2,8	2,1	33
2	10	1,8	1,4	3,3	0,7	16	3,4	2,7	26
3	10	2,1	1,7	3,3	0,8	14	4,0	3,3	21
4	12,5	1,5	1,3	3,5	1,3	53	2,8	2,2	27
5	12,5	1,8	1,6	3,5	1,1	40	3,4	2,8	21
6	12,5	2,1	1,7	3,5	0,9	25	4,0	3,4	18
7	15	1,5	1,0	3,4	2,3	71	2,8	1,7	65
8	15	1,8	1,4	3,4	2,3	58	3,4	2,9	17
9	15	2,1	1,6	3,6	2,0	53	4,0	3,3	21

### 4.3 Abstimmung Strahlstrom und Drahtzufuhr

Im Zusammenhang mit dem Ziel der minimierten Energieeinbringung steht ein möglichst geringer Aufmischungsgrad. In Abbildung 4.5 ist dieser in Abhängigkeit der Stromstärke für drei verschiedene Drahtvorschübe aufgetragen. Dabei steigt dieser mit der Stromstärke und verringert sich mit zunehmendem Drahtvorschub.

Abbildung 4.5: Aufmischungsgrad in Abhängigkeit von Stromstärke und Drahtvorschub



Die in den Versuchen mit einer Stromstärke 15 mA auftretenden Aufmischungsgrade sind durchwegs sehr hoch. Nach dem Kriterium einer minimierten Aufmischung sollte für weitere Versuche die Wahl auf eine Stromstärke von 10 mA bei einem Drahtvorschub von 2,1 m/min fallen. Allerdings zeigt sich hier kein regelmäßiger Einbrand. So ist eine Hälfte der Schweißnaht sehr tief eingebrannt, während auf der anderen kaum ein Eindringen des Zusatzmaterials in das Grundmaterial zu verzeichnen ist. Aufgrund dieser Ergebnisse wird die Einstellung mit einem Strahlstrom von 12 mA weiterverfolgt. Auch hier ist der Einbrand unregelmäßig, jedoch ist über die gesamte Nahtbreite ein Einbrand zu verzeichnen. Optimierungspotential besteht also in der Art der Energieverteilung.

#### 4.4 Verteilung der eingebrachten Energie

Die Versuche zur Verteilung der eingebrachten Energie folgen dem Hintergrund, die Auftrefffläche des Elektronenstrahls zu vergrößern. In der Fokusslage beziehungsweise nahe der Fokusslage weist der Strahl einen sehr kleinen Durchmesser auf. Das heißt, die Energie kann sehr konzentriert in ein Bauteil eingebracht werden. Zur Realisierung von Auftragsschweißungen, wo eine möglichst geringe Aufmischung angestrebt wird, bringt dieser Umstand jedoch nachteilige Effekte. Die Vergrößerung des Strahldurchmessers geschieht hier indirekt anhand der Strahlfigur und der Fokusslage, es ist kein direkter Einstellparameter zur Einstellung eines bestimmten Strahldurchmessers vorhanden.

In den Versuchen zur Findung einer Grundeinstellung wird eine Modifikation mit einem Strahlfigurdurchmesser von 2,2 mm und einer Fokusslage von -20 mm angewendet. Schematisch ist die Figur in Abbildung 4.6 dargestellt. Bedingt durch den vergleichsweise geringen Abstand der Fokusslage zur Werkstückoberfläche rotiert hier ein Strahl mit einem relativ kleinen Durchmesser auf einer Kreisbahn mit einem verglichen dazu wesentlich größeren Durchmesser. Im Zentrum der Kreisbahn findet also keine direkte Bestrahlung der Draht- beziehungsweise Werkstückoberfläche statt.

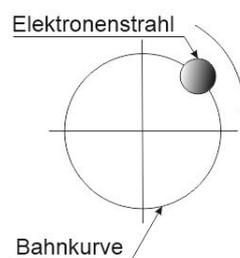


Abbildung 4.6: Schema der Strahlableitung auf der Strahlfigur Kreis

#### 4.4.1 Vergrößerung der Auftrefffläche mittels Verschiebung der Fokusslage

Als Alternative zu der beschriebenen Modifikation wird angestrebt, die Auftrefffläche des Elektronenstrahls durch Verlagerung der Fokusslage weg von der Bauteiloberfläche zu vergrößern. Dadurch soll verglichen zu Abbildung 4.6 das Verhältnis der beiden Durchmesser zueinander umgekehrt werden, sodass der Strahldurchmesser größer als der Durchmesser der Bahnkurve wird.

Der folgende Versuch findet ohne die Zuführung von Draht statt und dient dem Zweck, den Einfluss der Fokusslage auf die Breite der Schmelzzone festzustellen. Dabei wird eine Einstellung gesucht, bei der die Breite der Schmelzzone jener aus der vorgestellten Grundeinstellung entspricht. Als Durchmesser der Bahnkurve werden der Durchmesser des Zusatzdrahtes als auch die bisherige Strahlablenkungsamplitude eingesetzt. Negative Fokusslagen werden erprobt, weil hier bei den Versuchen zur Findung einer Grundeinstellung bessere Ergebnisse eintraten, als bei positiven Fokusslagen. Beurteilt wird die Breite der aufgeschmolzenen Zone und das Erscheinungsbild der Oberfläche. Die im Versuch verwendeten Wertekombinationen von Strahlablenkungsamplitude  $a$  und Fokusslage  $f_L$  sind in Tabelle 4.6 aufgelistet. Die gewählten Hauptparameter sind in Tabelle 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.5: Konstante Parameter beim Aufweiten des Elektronenstrahls durch Verschieben der Fokusslage bei der Strahlfigur Kreis

Parameter	Wert	Einheit
Beschleunigungsspannung $U_B$	120	kV
Strahlstrom $I_S$	10	mA
Schweißgeschwindigkeit $v_S$	10	mm/s
Strahlfigur	Kreis	-
Strahlablenkfrequenz $f$	1	kHz

#### 4 Schweißversuche

Tabelle 4.6: Aufweiten des Elektronenstrahls durch Verschieben der Fokusslage bei der Strahlfigur Kreis

Nr.	$f_L$	a
-	mm	mm
1	-20	2,2
2	-25	2,2
3	-30	2,2
4	-35	2,2
5	-40	2,2
6	-20	1,2
7	-25	1,2
8	-30	1,2
9	-35	1,2
10	-40	1,2

In Tabelle 4.7 sind die Ergebnisse der Schweißungen ohne Draht dargestellt. Diese sind in der Abbildung 4.7 zu sehen. Erfasst sind die Breite der Schmelzzone  $b$  und ihr Erscheinungsbild. Eine glatte Oberfläche mit weichen Einbrandkerben wird hierbei als Indiz für eine flache Energieverteilung gesehen. Besonders in den Versuchen 1-5 mit einer Strahlablenkungsamplitude von 2,2 mm zeigt sich keine systematische Zunahme der Schmelzbadbreite mit dem Verschieben der Fokusslage. In den Versuchen 6-10 ist eine Zunahme der Breite festzustellen, es kann dabei aber keine Systematik abgeleitet werden.

Dieser Versuch führt zu einer Einstellung, bei der eine Schmelzzone mit ähnlicher Breite und einem weicheren Einbrand als bei der in der Grundeinstellung verwendeten Kombination verzeichnet wird. Eine Systematik für die Zunahme der Breite der Schmelzzone durch die Änderung der Fokusslage kann nicht festgestellt werden.

#### 4.4 Verteilung der eingebrachten Energie



Abbildung 4.7: Schweißungen ohne Drahtzufuhr: Par. 1-5 links, Par. 6-10 rechts, jeweils von oben nach unten

Tabelle 4.7: Variation der Fokusslage

Nr.	$f_L$ mm	a mm	b mm	Oberfläche -
1	-20	2,2	3,3	rau
2	-25	2,2	3,6	rau
3	-30	2,2	3,6	rau
4	-35	2,2	3,6	rau
5	-40	2,2	3,6	rau
6	-20	1,2	2,7	rau
7	-25	1,2	2,9	rau
8	-30	1,2	3,1	glatt
9	-35	1,2	3,1	glatt
10	-40	1,2	3,2	glatt

In diesem aufwändigen Vorgehen liegt der große Nachteil dieser Variante. Zudem ist die Energieverteilung über den Strahlradius außerhalb der Fokusslage nicht bekannt. In Kapitel 4.7 wird die Einstellung Nr. 10 mit Drahtzufuhr angewendet.

#### 4.4.2 Anwendung spezifischer Strahlfiguren

Als zweite Alternative wird versucht, eine Verbesserung in Bezug auf die Energieeinbringung über die Änderung des Typs der Strahlablenkfigur zu erwirken. Von besonderem Interesse hierfür ist die Figur der „Konzentrischen Kreise“, welche durch eine Verzerrung auch in „Konzentrische Ellipsen“ umgewandelt werden kann. Das grundsätzliche Muster dieser Strahlfigur ist in Abbildung 4.8 skizziert. Bei der Anwendung dieser Strahlfigur werden 1000 Punkte, welche auf konzentrischen Kreisen liegen, nacheinander von innen nach außen abgefahren. Auf jedem dieser Punkte verweilt der Elektronenstrahl gleich lange. Die Radius- und Winkelabstände zwischen den Punkten sind konstant.

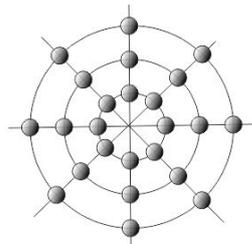


Abbildung 4.8: Strahlfigur „Konzentrische Kreise“

Als Vergleich zum vorigen Versuch werden mit den Hauptparametern nach Tabelle 4.9 ebenfalls Schweißungen ohne Draht durchgeführt. Dabei soll die Breite der Schweißzone über einen einzigen Parameter, den Durchmesser der Strahlfigur, bestimmt werden. Durch die großflächige Bestrahlung kann auf die Verschiebung der Fokusslage verzichtet werden, diese bleibt konstant auf der Bauteiloberfläche. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird die Breite der Strahlfigur quer zur Schweißrichtung, hier bezeichnet mit  $a_y$ , auf 3 mm festgesetzt. Die Länge der Strahlfigur in Schweißrichtung  $a_x$  wird variiert. Ergänzend zu den Figuren „Konzentrische Kreise“ und „Konzentrische Ellipsen“ werden die Bahnkurven „Parabel schleppend“ und „Parabel stechend“ erprobt. Die ausgeführten Versuche sind in Tabelle 4.8 ersichtlich. Von den in Tabelle 4.9 an-

#### 4.4 Verteilung der eingebrachten Energie

gegebenen Stromstärken wird beim Schweißen ohne Drahtzufuhr der Strahlstrom  $I_S$  auf 10 mA eingestellt, die angegebenen Daten zur Einstellung der Drahtzufuhr sind für diese ersten Versuche nicht relevant.

Tabelle 4.8: Anwendung spezifischer Strahlfiguren

Nr.	$f_L$	Strahlfigur	$a_x$	$a_y$
-	mm	-	mm	mm
11	0	Konz. Kreise	3,0	3,0
12	0	Konz. Ellipsen	6,0	3,0
13	0	Konz. Ellipsen	4,5	3,0
14	0	Parabel schleppend	4,5	3,0
15	0	Parabel stechend	4,5	3,0

Die Schweißungen werden anschließend unter Zuführung von Draht durchgeführt. Bezüglich der Hauptparameter wird auf bewährte Werte zurückgegriffen, welche ebenfalls in Tabelle 4.9 dargestellt sind. Die Parameter werden auch zur Erstellung von einspurigen Mehrlagenschweißungen bis zu einer Höhe von fünf Lagen herangezogen. Bei der Schweißung mit der Nummer 11 wird die Hilfsgröße  $h_1$  angepasst, daher werden mehrere Raupen mit diesem Parameter gefertigt.

Dass für die Stromstärke ein Bereich von 8 mA bis 12 mA angegeben wird, versteht sich so, dass die Stromstärke mit zunehmender Bauhöhe reduziert wird. Die erste Lage wird mit einer Stromstärke von 12 mA geschweißt. Bei jeder weiteren Lage wird die Stromstärke um 1 mA verringert.

Die Schweißungen ohne Draht zeigen, sowohl mit konzentrischen Kreisen, als auch mit konzentrischen Ellipsen, ein sehr ähnliches Bild. Des Weiteren korreliert die Breite der Schmelzzone durchwegs mit dem Durchmesser der Strahlfigur und weist dabei nur sehr schwach ausgeprägte, glatte Einbrandkerben auf.

#### 4 Schweißversuche

Tabelle 4.9: Konstante Parameter bei der Anwendung spezifischer Strahlfiguren

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Beschleunigungsspannung $U_B$	120	kV
Strahlstrom $I_S$	8...12	mA
Schweißgeschwindigkeit $v_S$	10	mm/s
Drahtvorschub $v_D$	1,8	m/min
Strahlablenkfrequenz $f_L$	2	kHz
Höhe Drahtdüse $H$	12	mm
Winkel Drahtzufuhr $\alpha$	35	°
Hilfsgröße $h_1$	1,3	mm
<b>Prozesskennzahlen</b>		
Streckenenergie $E$	108...144	J/mm
Draht-/Schweißvorschub $\lambda$	3,0	-
errechneter Nahtquerschnitt $A$	3,4	mm <sup>2</sup>
Volumsbezogene Energie $E_V$	36...48	J/mm <sup>3</sup>
Abschmelzleistung $X$	122	cm <sup>3</sup> /h

Die anschließend erfolgten Schweißungen mit Drahtzufuhr weisen ebenfalls ein sehr ähnliches Bild auf. Repräsentativ werden in Abbildung 4.9 die Ergebnisse dargestellt, welche mit dem Parameter Nr. 11 erreicht worden sind. Im linken Bild ist die Anpassung der Abschmelzhöhe zu sehen. Die eingestellte Hilfsgröße ist hier mit  $h_1=1,3$  mm kleiner als bei vergleichbaren Nahtquerschnitten, welche mit den Strahlfiguren der vorgestellten Grundeinstellung geschweißt worden sind. Die Abmessungen der Einzelnähte betragen 1,2 mm in der Höhe und 3,0 mm in der Breite. In Abbildung 4.10 der wird die Eignung dieser Einstellung zur Herstellung von dünnwandigen Aufbauten gezeigt und damit dem folgenden Kapitel etwas vorgegriffen. Hier steht bei fünf Lagen eine Höhe von

#### 4.4 Verteilung der eingebrachten Energie

5,5 mm einer Breite von 3,2 mm gegenüber.



Abbildung 4.9: Schweißungen mit der Strahlfigur der konzentrischen Kreise, Anpassung der Abschmelzhöhe

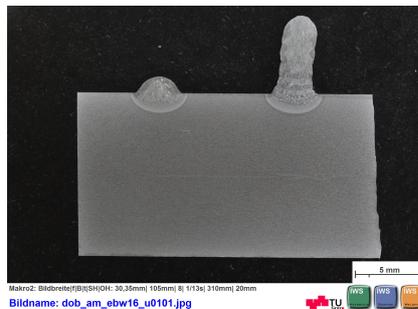


Abbildung 4.10: Erprobung einer einspurigen Mehrlagenschweißung mit fünf Lagen

Bei dieser Alternative lässt sich die gewünschte Schmelzbadbreite direkt über den Durchmesser der Figur einstellen. Eine Variation der Fokusslage ist nicht nötig. Dadurch entfällt ein Parameter. Auch diese Einstellung zeigt bei der Schweißung ohne Draht eine sehr glatte Oberfläche und einen sehr geringen Einbrand. Als Tauglichkeitsprüfung für diese Einstellung dient die Erstellung einer sauberen einspurigen Mehrlagenschweißung mit einer Wandstärke von etwa 3 mm. Aufgrund dieser Vorteile kommt die Strahlfigur der konzentrischen Kreise für die weiteren Versuche zur Anwendung.

## 4.5 Mehrlagenschweißungen

Um den Zweck der additiven Fertigung zu erfüllen, ist es erforderlich, mehrere Schweißnähte gezielt nebeneinander beziehungsweise übereinander positionieren zu können. Dementsprechend sind Untersuchungen zu anderen Schwerpunkten immer mit dem Anfertigen von Mehrlagenschweißungen verbunden. Die Eignung zum Mehrlagenschweißen bildet demnach ein Testkriterium für verschiedene Parametersätze.

Aus den zu diesem Thema gemachten Versuchen wird die Entwicklung zur finalen Version anhand von drei markanten Entwicklungsstufen wiedergegeben.

1. Bei der Anwendung der in Kapitel 4.2 beschriebenen Einstellungen werden die kritischen Punkte zur Realisierung von mehrlagigen Aufbauten identifiziert.
2. Die Anpassungen, welche zum Gelingen eines einspurigen Aufbaus mit einer Höhe von zehn Lagen führen, werden beschrieben.
3. Durch weitere Optimierungen werden sowohl bei dick- als auch bei dünnwandigen Bauteilen ansprechende Ergebnisse erzielt.

### 4.5.1 Identifikation wesentlicher Kriterien

Gemäß dem ersten Aufzählungspunkt werden die kritischen Punkte in Bezug auf Mehrlagenschweißungen ermittelt. Dafür werden die Parametersätze aus den Tabellen 4.11 und 4.10 angewendet. Ziel ist die Erstellung von einspurigen Aufbauten und von Aufbauten mit mehreren Spuren nebeneinander. Dazu wird ein optimaler Überlappungsabstand der Einzelnähte in Querrichtung ermittelt, um die Oberflächenunebenheiten zu minimieren. Dieser wird bei einem Wert für den Nahtabstand in Querrichtung von 2,6 mm

#### 4.5 Mehrlagenschweißungen

gefunden, dies entspricht etwa 87% der Einzelnahtbreite. Somit werden vierspurige Aufbauten mit dieser Einstellung realisiert. Weiters werden einspurige Aufbauten geschweißt. Hier wird beim Schweißen der zweiten Lage die Hilfsgröße  $h_1$  von 1,6 mm auf 0,9 mm reduziert.

Tabelle 4.10: Konstante Parameter bei der Erprobung von ein- und mehrspurigen Mehrlagenschweißungen auf Basis der Grundeinstellungen

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Beschleunigungsspannung $U_B$	120	kV
Schweißgeschwindigkeit $v_S$	10	mm/s
Drahtvorschub $v_D$	1,5	m/min
Fokusslage $f_L$	-20	mm
Strahlfigur	Kreis	(-)
Strahlablenkamplitude $a$	2,2	mm
Strahlablenkfrequenz $f$	1	kHz
Höhe Drahtdüse $H$	12	mm
Winkel Drahtzufuhr $\alpha$	35	°
Hilfsgröße <sup>1</sup> $h_1$	1,6	mm
Nahtabstand quer	2,6	mm
<b>Prozesskennzahlen</b>		
Draht-/Schweißvorschub $\lambda$	2,5	-
errechneter Nahtquerschnitt $A$	2,8	mm <sup>2</sup>
Abschmelzleistung $X$	102	cm <sup>3</sup> /h

<sup>1</sup>Reduzierung auf  $h_1=0,9$ mm ab der zweiten Lage bei einspurigem Aufbau.

## 4 Schweißversuche

Tabelle 4.11: Mehrlagenschweißungen auf Basis der Grundeinstellungen

Nr.	$I_S$	E	$E_V$
-	mA	J/mm	J/mm <sup>3</sup>
1	10	120	43
2	13	156	56
3	15	180	64

Anhand der ersten Versuche zum Thema der Mehrlagenschweißungen stellt sich die Erstellung von dünnwandigen Aufbauten als kritisch heraus. In Abbildung 4.11 sind die Ergebnisse der Versuche mit den Parametern nach den Tabellen 4.11 und 4.10 dargestellt. Auf den Bildern ersichtlich sind jeweils eine Einzelnäht, eine Anordnung von drei Lagen übereinander und vier Nähte nebeneinander. Bei den einspurigen Aufbauten zeigt sich, dass bei der Schweißung der dritten Lage die beiden darunterliegenden sehr stark aufgeschmolzen wurden. Bei den Schweißungen mit mehreren Einzelnähten nebeneinander lassen sich mit den angewendeten Parametern drei Schichten übereinander realisieren.



Abbildung 4.11: Mehrlagenschweißungen mit Parametersätzen 1-3 nach den Tabellen 4.11 und 4.10 v.l.n.r.

### 4.5.2 Einspurige Aufbauten

Aus den Beobachtungen vorangegangener Versuche folgt, dass die Abstimmung der Parameter bei dünnen Wänden am sensibelsten ist. Im folgenden Versuch wird ein Aufbau von einer Raupe in der Breite und zehn Lagen in der Höhe gebildet. Die Energieeinbringung wird mit wachsender Bauhöhe stufenweise reduziert.

Bei Vorversuchen ist eine Abnahme der Höhenzunahme in der zweiten und dritten Lage festgestellt worden. Die lagenweise Nachstellung der z-Achse erfolgt anhand der aus diesen Versuchen ermittelten Werte und bleibt ab der dritten Lage konstant. Ebenso wird die Abschmelzhöhe ab der zweiten Lage reduziert. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 4.13 aufgelistet, Tabelle 4.12 gibt die Stromstärke abhängig von der Bauhöhe, die Nachstellung der z-Achse  $\Delta z$ , die Anpassung der Hilfsgröße  $h_1$  und die dazugehörigen Kennzahlen wieder.

Tabelle 4.12: Stufenweise Parameteranpassung

Lage	$I_S$	$\Delta z$	$h_1$	E	$E_V$
-	mA	mm	mm	J/mm	J/mm <sup>3</sup>
1	12	0	1,7	144	38
2	12	1,2	1,1	144	38
3	10	1,0	0,5	120	32
4	10	1,0	0,5	120	32
5	10	1,0	0,5	120	32
6	9	1,0	0,5	108	28
7	9	1,0	0,5	108	28
8	9	1,0	0,5	108	28
9	9	1,0	0,5	108	28
10	9	1,0	0,5	108	28

#### 4 Schweißversuche

Tabelle 4.13: Realisierung eines Aufbaus mit einer Spur und zehn Lagen

Parameter	Wert	Einheit
Beschleunigungsspannung $U_B$	120	kV
Schweißgeschwindigkeit $v_S$	10	mm/s
Drahtvorschub $v_D$	2,0	m/min
Fokusslage $f_L$	-20	mm
Strahlfigur	Kreis	-
Strahlablenkamplitude $a$	2,2	mm
Strahlablenkfrequenz $f$	1	kHz
Höhe Drahtdüse $H$	12	mm
Winkel Drahtzufuhr $\alpha$	35	°

In Abbildung 4.12 ist ein einspuriger Aufbau mit dem Parametersatz nach den Tabellen 4.12 und 4.13 ersichtlich. Die Breite des Querschnitts beträgt 3,6 mm. Der gemessenen Höhe von 9,8 mm steht eine Nachstellung der z-Achse von 9,4 mm gegenüber. Dies ergibt eine Abweichung der realen Bauteilhöhe und der Einstellung der z-Koordinate von 0,4 mm. Zu erkennen ist eine Schiefstellung sowie eine unregelmäßige Struktur des Querschnitts, welche durch Materialübertrag aus dem Schmelzbad verursacht worden ist.

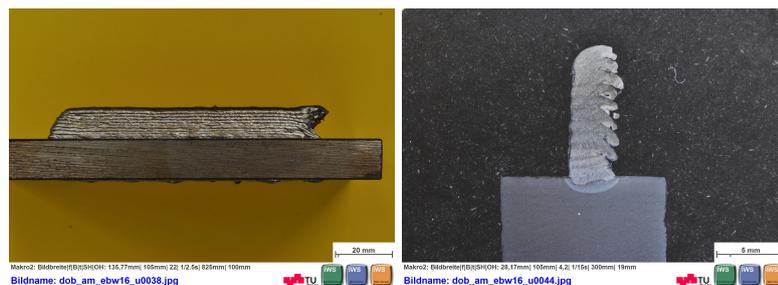


Abbildung 4.12: 10-Lagen-Aufbau mit Parametersatz aus Tabelle 4.13, Seitenansicht (li), Querschliff (re)

Zum Optimierungspotential dieser Einstellung wird an dieser Stelle auf die einspurigen Mehrlagenversuche verwiesen, welche im Kapitel 4.4 bei der Erprobung der Strahlfigur „Konzentrische Kreise“ beschrieben sind. Mit der Parameterwahl nach Tabelle 4.9 werden verbesserte Aufbauten erzielt.

### 4.5.3 Parametersatz für ein- und mehrspurige Aufbauten

Die Ergebnisse der bereits beschriebenen Versuche führen zur Umsetzung des finalen Versuchs zum Thema der Mehrlagenschweißungen. Geschweißt werden Aufbauten, welche für die Herstellung mechanischer Proben herangezogen werden können. Zur Erzielung einer Breite und Höhe von mindestens jeweils 12 mm ist mit dem gewählten Parametersatz nach Tabelle 4.14 eine Anordnung von sechs Spuren und neun Lagen erforderlich. Folgende Punkte finden Berücksichtigung:

- Schweißung in schleppender Richtung
- Erste Spur einer neuen Lage wird alternierend an den beiden Rändern gesetzt
- Energieverteilung über „Konzentrische Kreise“
- Beschleunigungsspannung 90 kV für geringere Eindringtiefe
- Anpassung der Stromstärke in den Randnähten aufgrund geringerer Wärmeableitung
- Nahtabstand in Querrichtung 80 % der Einzelnahtbreite

Um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass in den Randnähten weniger umgebendes Material zur Wärmeableitung vorhanden ist, wird hier die Stromstärke verringert. Die Grundstromstärke beträgt 16 mA. Die erste und die letzte Raupe einer neuen Lage werden mit einer Stromstärke von 15 mA geschweißt.

#### 4 Schweißversuche

Tabelle 4.14: Realisierung eines Aufbaus mit sechs Spuren und zehn Lagen

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Beschleunigungsspannung $U_B$	90	kV
Strahlstrom $I_S$	15/16	mA
Schweißgeschwindigkeit $v_S$	10	mm/s
Drahtvorschub $v_D$	1,8	m/min
Fokuslage $f_L$	0	mm
Strahlfigur	Konzentrische Kreise	-
Strahlablenkamplitude $a$	3,0	mm
Strahlablenkfrequenz $f$	2	kHz
Höhe Drahtdüse $H$	12	mm
Winkel Drahtzufuhr $\alpha$	35	°
Hilfsgröße $h_1$	1,3	mm
Nahtabstand quer	2,0	mm
<b>Prozesskennzahlen</b>		
Streckenenergie $E$	135/143	J/mm
Draht-/Schweißvorschub $\lambda$	3,0	-
errechneter Nahtquerschnitt $A$	3,4	mm <sup>2</sup>
Volumsbezogene Energie $E_V$	40/42	J/mm <sup>3</sup>
Abschmelzleistung $X$	122	cm <sup>3</sup> /h

## 4.6 Erhöhung der Abschmelzleistung

Ein nach den vorangegangenen Beobachtungen optimierter Aufbau mit sechs Spuren und zehn Lagen wird in Abbildung 4.13 dargestellt. Im rechten Bild ist der Lagenaufbau im Querschliff zu erkennen (Schweißrichtung aus dem Bild heraus). Das linke Bild zeigt die Ansicht der Struktur, geschweißt wurde dabei von links nach rechts. Es zeigen sich teilweise Unregelmäßigkeiten, die vor allem in den Randbereichen auftreten. Am Nahtende bildet sich ein schiefes Auslaufstück aus. Zudem wird beim Überschweifen dieser Zone das Zusatzmaterial beim Überschreiten einer kritischen Abschmelzhöhe unregelmäßig abgetropft. Aus den 60 Einzelraupen wird eine Struktur gebildet, welche 12 mm in der Breite und 14 mm in der Höhe misst. In Bezug auf die Eignung dieses Parametersatzes zur Herstellung von einspurigen Aufbauten wird auf das Kapitel 4.4.2 verwiesen. Dort ist eine Struktur mit einer Spur und fünf Lagen beschrieben.

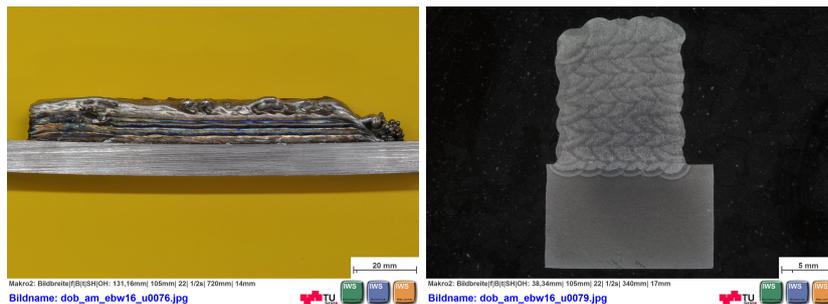


Abbildung 4.13: 6-spuriger 10-Lagen-Aufbau mit Parametersatz aus Tabelle 4.14, Seitenansicht (li), Querschliff (re)

## 4.6 Erhöhung der Abschmelzleistung

Zur Erhöhung der Abschmelzleistung wird ein Parametersatz generiert, welcher jenem aus Tabelle 4.14 sehr ähnlich ist. Der Drahtvorschub wird erhöht. Damit verbunden ist die Erhöhung der Stromstärke, hierbei wird die volumsbezogene Energie konstant gehalten.

#### 4 Schweißversuche

Tabelle 4.15: Realisierung eines Aufbaus mit drei Spuren und sieben Lagen

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Beschleunigungsspannung $U_B$	90	kV
Strahlstrom $I_S$	38/40	mA
Schweißgeschwindigkeit $v_S$	10	mm/s
Drahtvorschub $v_D$	4,5	m/min
Fokuslage $f_L$	0	mm
Strahlfigur	Konzentrische Kreise	-
Strahlablenkamplitude $a$	5,0	mm
Strahlablenkfrequenz $f$	2	kHz
Höhe Drahtdüse $H$	12	mm
Winkel Drahtzufuhr $\alpha$	35	°
Hilfsgröße $h_1$	2,5	mm
Nahtabstand quer	3,6	mm
<b>Prozesskennzahlen</b>		
Streckenenergie $E$	342/360	J/mm
Draht-/Schweißvorschub $\lambda$	7,5	-
Nahtquerschnitt $A$	8,5	mm <sup>2</sup>
Volumsbezogene Energie $E_V$	40/42	J/mm <sup>3</sup>
Abschmelzleistung $X$	305	cm <sup>3</sup> /h

In der Abbildung 4.14 ist ein Aufbau zu sehen, dessen Abmessungen etwa jenen des Aufbaus in Abbildung 4.13 entsprechen sollen. Für die Erzielung einer Struktur mit einer Breite von 13 mm und einer Höhe von 14 mm sind hier 21 Einzelraupen erforderlich.

Die Ansicht im linken Bild (Schweißrichtung von rechts nach

## 4.7 Einfluss der Drahtzuführrichtung

links) zeigt ein regelmäßiges Erscheinungsbild ohne größere Unregelmäßigkeiten. Das hier abgeschnittene Nahtende weist ebenfalls eine Abschrägung auf. Die Probe ist bereits an den Enden für die Fertigung von zwei Zugproben zugeschnitten. Das unbrauchbare Nahtende beschränkt sich hierbei auf eine Länge von etwa 5 mm. Im rechten Bild ist der Lagenaufbau zu sehen (Schweißrichtung aus dem Bild heraus).

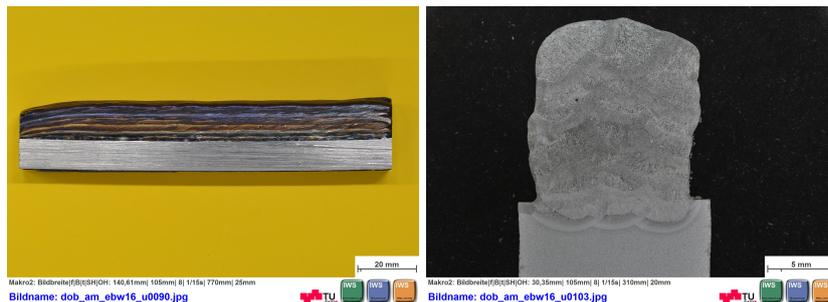


Abbildung 4.14: 3-spuriger 7-Lagen-Aufbau mit Parametersatz aus Tabelle 4.15, Seitenansicht (li), Querschliff (re)

## 4.7 Einfluss der Drahtzuführrichtung

Zur Feststellung eines Einflusses der Drahtzuführrichtung werden drei Richtungen untersucht. Dies sind zum Ersten die stechende und zum Zweiten die schleppende Schweißrichtung mit der Drahtzuführung zum Schmelzbad von vorne beziehungsweise von hinten. Zum Dritten erfolgt das Schweißen mit der Drahtzuführrichtung quer zur Schweißrichtung. Nach der Schweißung von Einzelnähten werden 3-lagige Nähte geschweißt und dann in Bezug auf Geometrie und optisches Erscheinungsbild verglichen. Die Parameter sind in der Tabelle 4.16 aufgelistet. Wiederum wird von einer Grundstromstärke von 12 mA ausgegangen und mit fortschreitender Lagennummer um jeweils 1 mA reduziert.

#### 4 Schweißversuche

Tabelle 4.16: Parameter bei der Erprobung verschiedener Drahtzuführrichtungen

<b>Hauptparameter</b>	<b>Einstellbereich</b>	<b>Einheit</b>
Beschleunigungsspannung $U_B$	120	kV
Strahlstrom $I_S$	10...12	mA
Schweißgeschwindigkeit $v_S$	10	mm/s
Drahtvorschub $v_D$	1,8	m/min
<b>Beeinflussung der Energieeinbringung</b>		
Fokusslage $f_L$	-40	mm
Strahlfigur	Kreis	-
Strahlablenkamplitude a	1,2	mm
Strahlablenkfrequenz f	1	kHz
<b>Lage der Drahtzuführung</b>		
Höhe Drahtdüse H	12	mm
Winkel Drahtzufuhr $\alpha$	35	°
Hilfsgröße $h_1$	1,3	mm
<b>Prozesskennzahlen</b>		
Streckenenergie E	120...144	J/mm
Draht-/Schweißvorschub $\lambda$	3,0	-
errechneter Nahtquerschnitt A	3,4	mm <sup>2</sup>
volumsbezogene Energie $E_V$	36...48	J/mm <sup>3</sup>
Abschmelzleistung X	122	cm <sup>3</sup> /h

#### 4.7 Einfluss der Drahtzuführrichtung

Damit wird die grundsätzliche Eignung zum Schweißen mit der Drahtzufuhr aus verschiedenen Richtungen gezeigt. In Tabelle 4.17 sind die Abmessungen von Einzelnähten und einspurigen Mehrlagenaufbauten gegenübergestellt. Bezüglich der Einstellung der Lage der Drahtzufuhr sind dabei keine Änderungen gemacht worden. Optisch zeigen die verschiedenen Einstellungen ein ähnliches Erscheinungsbild. In schleppender Schweißrichtung steht aufgrund von Fehlermeldungen auf der Anlage kein Aufbau mit drei Lagen zur Verfügung.

Tabelle 4.17: Einfluss der Drahtzuführrichtung

Nr.	Drahtzufuhr	$b_{\text{Einzelnaht}}$ mm	$h_{\text{Einzelnaht}}$ mm	$b_{3\text{Lagen}}$ mm	$h_{3\text{Lagen}}$ mm
1	von vorne	3,0	1,3	3,0	3,3
2	von hinten	3,1	1,1	-	-
3	quer	3,1	1,2	3,0	3,5



## 5 Ergebnisse

In diesem Kapitel folgt eine Gegenüberstellung zweier Probensätze, welche nach den Parametersätzen der Kapitel 4.5.3 und 4.6 gefertigt sind. Dieser Vergleich und die damit verbundene Charakterisierung der Proben ist als zentrales Ergebnis dieser Arbeit zu sehen. Die im Rahmen der Vorversuche fortlaufend präsentierten Zwischenergebnisse werden an dieser Stelle nicht mehr behandelt.

Der erste dieser beiden Probensätze führt zu einem Schweißergebnis mit einem vergleichsweise feinen Lagenaufbau. Demgegenüber steht ein zweiter Probensatz, welcher mit höherer Abschmelzleistung gefertigt ist und dementsprechend zu einem gröberen Lagenaufbau führt. Nach einer makroskopischen Betrachtung folgt die Untersuchung der Mikrostruktur und eine mechanische Charakterisierung.

Für die folgenden Untersuchungen werden je ein Schliff aus den Proben der Versuche aus den Tabellen 4.14 und 4.15 herangezogen. Die Länge der geschweißten Struktur beträgt 140 mm, der betrachtete Querschnitt wird 100 mm nach Nahtanfang entnommen. Zur Vorbereitung werden die Proben bis zu einer Körnung von 4000 geschliffen, mit einer 3  $\mu\text{m}$ - und einer 1  $\mu\text{m}$ -Scheibe poliert und anschließend einer Tauchätzung mit „Nital“ unterzogen.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Makroskopische Betrachtung

Da die makroskopischen Beobachtungen dieser beiden Proben bereits in den Kapiteln 4.5.3 und 4.6 beschrieben sind, erfolgt an dieser Stelle nur eine kurze Gegenüberstellung.

Die Makroaufnahmen der beiden Proben werden in Abbildung 5.1 gezeigt. Das linke Bild zeigt eine Struktur mit einem feinen Lagenaufbau, welche mit dem Parametersatz aus Tabelle 4.14 gefertigt ist. Im gesamten Kapitel wird diese mit „Probe A“ bezeichnet. Hier werden mit sieben Raupen nebeneinander und neun Lagen eine Breite von 14 mm und eine Höhe von 14 mm erzielt. Dem gegenüber steht im rechten Bild eine Probe, welche mit dem Parametersatz aus Tabelle 4.15 gefertigt worden ist. Diese wird mit „Probe B“ bezeichnet. Hier wird mit drei Raupen nebeneinander und sieben Lagen Höhe eine Breite von 13 mm und eine Höhe von 14 mm erzielt.



Abbildung 5.1: Makrobild Probe A nach Tabelle 4.14 (li), Probe B nach Tabelle 4.15 (re)

Bei beiden Proben zeigt die Schweißrichtung aus dem Bild heraus. Abwechselnd sind die ersten Raupen einer neuen Lage auf der linken beziehungsweise auf der rechten Seite gesetzt worden. Dabei ist die erste Raupe der ersten Lage jeweils auf der rechten Seite der Bilder ersichtlich.

## 5.2 Untersuchung der Mikrostruktur

Im Fokus steht dabei der direkte Vergleich der Gefügeausbildung beim Schweißen mit einem Parametersatz, welcher zu feinen Lagenaufbauten führt, gegenüber einem Parametersatz mit erhöhter Abschmelzleistung. Eventuell auftretende Schweißfehler sollen detektiert werden.

Dabei liegt der Fokus auf drei charakteristischen Stellen. Diese sind zum Ersten Schweißraupen, welche nicht an einer Außenkante des Bauteils liegen, zum Zweiten die Übergangszone zwischen zwei Raupen und zum Dritten die letzte geschweißte Raupe einer Struktur.

Hierbei stellt das linke Bild der Abbildung 5.2 eine Übersicht dar. Man erkennt den Lagenaufbau, welcher über den gesamten Querschnitt ein ähnliches Bild zeigt. Dabei werden die Zonen sichtbar, welche bedingt durch die Wärmeerbringung beim Schweißen von weiteren Lagen eine Gefügeumwandlung erfahren. Es sind eine Stelle in der Raupenmitte (Ausschnitt I) und eine Stelle in der Anlasszone zwischen zwei Raupen (Ausschnitt II) gekennzeichnet, wo detailliertere Betrachtungen folgen. Im rechten Bild ist Ausschnitt I etwas größer zu sehen. Es treten Mikroporen auf, welche gleichmäßig über den Querschnitt verteilt sind.

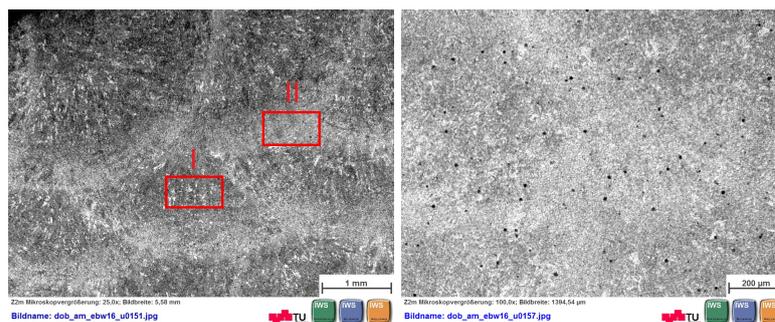


Abbildung 5.2: Innenlagen Probe A, Übersicht (li), Mikroporen Ausschnitt I (re)

## 5 Ergebnisse

In der Abbildung 5.3 sind Ausschnitt I und Ausschnitt II der Probe A dargestellt. Im linken Bild ist der Ausschnitt I aus der Raupenmitte zu sehen. Die über weite Bildbereiche ausgeprägten nadeligen Strukturen weisen auf ein Gefüge mit einem hohen Martensitanteil hin. Des Weiteren sind Ferritflecken vorhanden. Die Größe der sichtbaren Poren lässt sich auf einige  $\mu\text{m}$  abschätzen. Das rechte Bild zeigt den Ausschnitt II aus der Übergangszone zwischen zwei Raupen. Hier ist durch den Anlasseffekt der Martensit in globularen Ferrit umgewandelt worden. Das Gefüge ist dabei sehr feinkörnig.

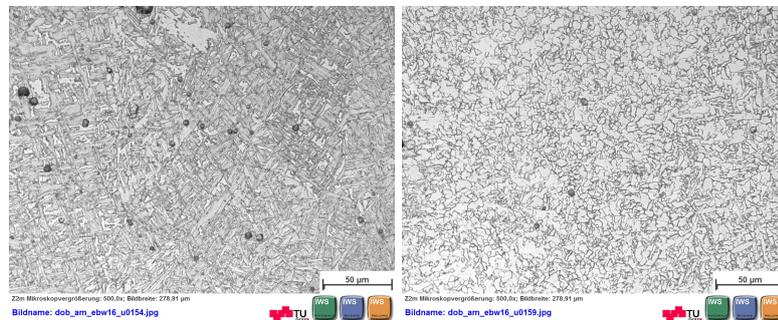


Abbildung 5.3: Gefüge Innenlage Probe A: Ausschnitt I (li), Ausschnitt II (re)

In Abbildung 5.4 ist die letzte geschweißte Raupe dargestellt. Neben der Übersicht im linken Bild zeigt das rechte Bild den Ausschnitt III mit einem ähnlichen Gefüge wie Ausschnitt I.

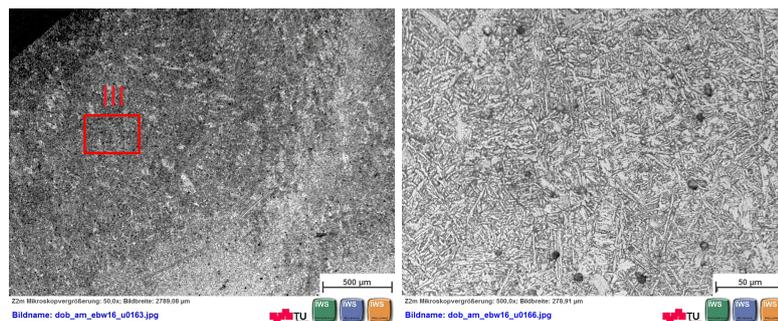


Abbildung 5.4: Außenlage Probe A, Übersicht (li), Ausschnitt III (re)

## 5.2 Untersuchung der Mikrostruktur

Analog zu den Ausschnitten aus Probe A werden in den Abbildungen 5.5 bis 5.7 Gefügebilder aus der Probe B dargestellt.

Hierbei zeigt das linke Bild der Abbildung 5.5 eine Übersicht aus der Mitte der Struktur. Hier ist im Vergleich zur Probe A die wärmebeeinflusste Zone zwischen den einzelnen Schweißraupen wesentlich größer ausgeprägt. Es sind eine Stelle in der Raupenmitte (Ausschnitt IV) und eine Stelle in der Anlasszone zwischen zwei Raupen (Ausschnitt V) gekennzeichnet, wo detailliertere Betrachtungen folgen. Auch hier treten Mikroporen auf, siehe rechtes Bild. Dabei ist die Anzahl verglichen zur Probe A geringer, die Größenordnung der Poren ist ähnlich.

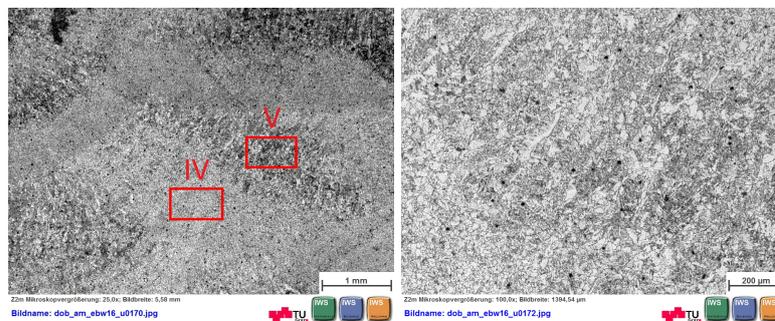


Abbildung 5.5: Innenlage Probe B, Übersicht (li), Mikroporen Ausschnitt IV (re)

Im linken Bild der Abbildung 5.6 ist der Ausschnitt IV zu sehen. Hier tritt ein sehr grobkörniges Gefüge auf. Es weist Ähnlichkeiten zu einem Widmannstätten-Gefüge auf. Das rechte Bild zeigt den Ausschnitt V. Durch den Anlassseffekt verändert sich die Struktur ebenfalls. Die Körner sind feiner ausgeprägt, als in der unbeeinflussten Zone und weisen auf globularen Ferrit hin. Verglichen zur Probe A ist das Korn deutlich gröber.

## 5 Ergebnisse

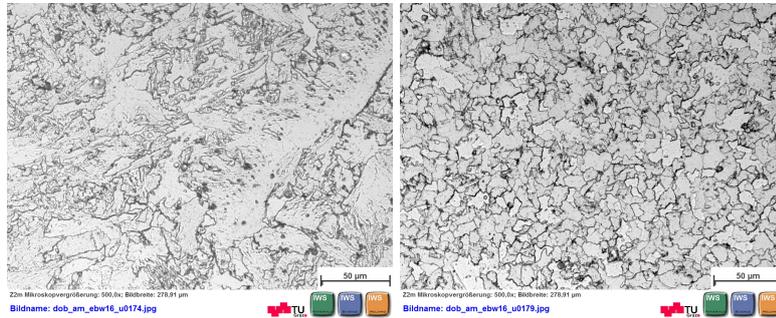


Abbildung 5.6: Gefüge Innenlage Probe B: Ausschnitt IV (li), Ausschnitt V (re)

In Abbildung 5.7 sind eine Übersicht der letzten Schweißraupe (links) und der darin gekennzeichnete Ausschnitt VI (rechts) dargestellt. Das Gefüge weist an dieser Stelle wiederum große Ähnlichkeit zu jenem in Ausschnitt IV auf.

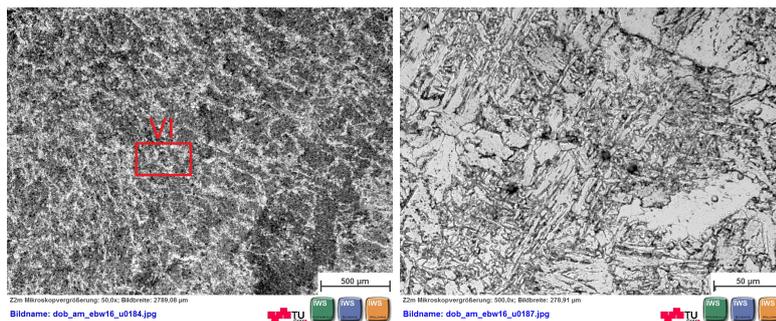


Abbildung 5.7: Außenlage Probe B, Übersicht (li), Ausschnitt VI (re)

### 5.3 Mechanische Werkstoffprüfung

Zur mechanischen Werkstoffprüfung erfolgen ein Härtemapping, eine Zugprüfung nach DIN EN ISO 6892-1 und eine Kerbschlagbiegeprüfung nach EN10045. Die hier gemessenen Werte ermöglichen einen Vergleich mit den in Kapitel 2.4.2 aufgelisteten Werte für das reine Schweißgut.



## 5 Ergebnisse

Tabelle 5.1: Gegenüberstellung der Härtewerte der Proben A und B

Nr.	min	max	Ø	$\Delta HV_1$
-	HV <sub>1</sub>	HV <sub>1</sub>	HV <sub>1</sub>	HV <sub>1</sub>
A	188	297	239	109
B	158	252	194	94

### 5.3.2 Zugprüfung nach DIN EN ISO 6892-1

Zur Ermittlung der Zugfestigkeit werden zwei Zugproben für einen Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1 entnommen. Hierfür werden Mehrlagenschweißungen mit dem Parametersatz nach Tabelle 4.15 mit einer Länge von 140 mm hergestellt. Dabei handelt es sich um jenen Parametersatz, welcher zu gröberen Strukturen führt und mit dem Buchstaben B gekennzeichnet ist. Beim Parametersatz für die feineren Strukturen konnten aufgrund von Unregelmäßigkeiten nicht ausreichend viele Proben hergestellt werden. In diesem Bereich des Prozessfensters ist die Prozesssicherheit nicht vollständig erfüllt. Die Längsrichtung der Proben entspricht hierbei der Schweißrichtung. Die Abmessungen der Rundzugproben nach DIN EN ISO 6892-1 betragen  $\text{Ø}6 \times 60$  mm. Die Prüftemperatur beträgt  $+20$  °C.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 aufgelistet, das vollständige Prüfprotokoll ist im Anhang ersichtlich. Es zeigt sich eine ausgeprägt Streckgrenze. Neben der oberen Streckgrenze  $R_{eH}$  werden hier die Zugfestigkeit  $R_m$ , Bruchdehnung A und das Streckgrenzenverhältnis  $R_{eH}/R_m$  angeführt.

### 5.3 Mechanische Werkstoffprüfung

Tabelle 5.2: Ergebnisse des Zugversuchs nach DIN EN ISO 6892-1

Nr.	$R_{eH}$	$R_m$	A	$R_{eH}/R_m$
-	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	-
B1	514	568	33	0,90
B2	508	572	37	0,90
Ø	511	570	35	0,89

#### 5.3.3 Kerbschlagbiegeprüfung nach EN10045

Für die Kerbschlagbiegeprüfung werden drei Proben herangezogen, welche ebenfalls aus dem Parametersatz nach Tabelle 4.15 gefertigt sind. Die Abmessungen ISO-V-Proben betragen 10x10x55 mm, die Kerbtiefe beträgt 2 mm. Die Kerblage befindet sich auf der, in Schweißrichtung gesehen, rechten Seitenwand. Die Kerbschlagbiegeprüfung erfolgt bei -20 °C.

In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse dargestellt. Ausgewertet werden die Bruchform, die Kerbschlagarbeit  $A_V$ , sowie deren Mittelwert  $\mu$  und deren Standardabweichung  $\sigma$ .

Tabelle 5.3: Ergebnisse des Kerbschlagbiegeversuchs nach EN10045 bei -20 °C

Nr.	$A_V$	Bruchform
-	J	-
B1	152	Mischbruch
B2	166	Mischbruch
B3	144	Mischbruch
$\mu$	154	-
$\sigma$	9	-



## 6 Diskussion

Die im vorangegangenen Kapitel dargestellten Ergebnisse werden nun diskutiert. Nach der Interpretation der Inhalte dieser Arbeit folgt ein Vergleich zu den Resultaten aus der analogen Arbeit zum Thema „Additives Fertigen mittels CMT-Prozess“.

### 6.1 Interpretation der Ergebnisse

Nachdem aus den Ergebnissen der Vorversuche direkt bei den entsprechenden Kapiteln Schlussfolgerungen gezogen worden sind, erfolgt hier eine Diskussion der Ergebnisse aus Kapitel 5.

Der im Kapitel der Mehrlagenschweißungen erarbeitete Parametersatz eignet sich zur Herstellung von vergleichsweise feinen Lagenaufbauten. Mit den beschriebenen Anpassungen in der Stromstärke lassen sich dick- und dünnwandige Strukturen fertigen. Hier liegt nach dem aktuellen Stand die Grenze, was die Feinheit der erzielbaren Strukturen betrifft. Sehr zufriedenstellend sind die Ergebnisse bei der Übertragung dieser Einstellungen auf größere Strukturen bei konstant gehaltener volumsbezogener Energie. Das Prozessfenster für die Abschmelzhöhe vergrößert sich, was die Prozessstabilität signifikant verbessert. Für die Herstellung von etwa 12 mm dicken und 12 mm hohen Strukturen, welche als Rohteile für mechanische Proben dienen, sind hier 21 Schweißraupen zu fertigen. Hierbei sind kaum manuelle Nachjustierungen für die Position der Drahtzuführung erforderlich und alle geschweißten

## 6 Diskussion

Bauteile können zur Fertigung von Proben herangezogen werden. Beim Parametersatz für feine Strukturen sind für die selbe Aufgabe 63 Schweißraupen erforderlich, bei denen die Position der Drahtzuführung laufend nachjustiert werden muss. Hier konnten aufgrund von Unregelmäßigkeiten nur 40 % der angefangenen Strukturen fertiggestellt werden.

Der Vergleich der Mikrostruktur der nach den beiden Parametersätzen gefertigten Mehrlagenstrukturen zeigt ein in sich geschlossenes Bild. Die beim Parametersatz zur Erzielung feiner Strukturen ausgebildete Mikrostruktur lässt auf hohe Abkühlraten schließen. Die  $t_{8/5}$ -Zeit kann auf wenige Sekunden abgeschätzt werden. Dies steht im Zusammenhang mit einer geringen Aufheizung des Bauteils, da mit wesentlich geringerer Streckenenergie geschweißt wird und aber trotzdem ähnlich viel Zeit zum Abkühlen bleibt. Zudem sind die rekristallisierten Zonen zwischen den Lagen sehr gering ausgebildet. Im Gegensatz zu der feinkörnigen Struktur beim feinen Parametersatz bildet sich beim gröberen Parametersatz eine Struktur mit deutlich größerem Korn aus. Die rekristallisierten Zonen dominieren hier das Erscheinungsbild. Das vermehrte Auftreten von Mikroporen beim Parametersatz für feine Strukturen gegenüber dem für gröbere kann damit erklärt werden, dass bei der schnelleren Abkühlung weniger Zeit für das Entweichen der Poren an die Oberfläche bleibt.

Die Härtemessungen bestätigen das Bild der Mikrountersuchungen. Die Härtewerte sind beim Parametersatz für feine Strukturen deutlich höher als bei jenem für die gröberen. Die Differenzen zwischen Minimal- und Maximalwert innerhalb der Querschnitte verhalten sich dabei ähnlich. Die hohe Bruchdehnung und die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeprüfung weisen auf ein zähes Werkstoffverhalten hin. Die Werte für Streckgrenze und Bruchdehnung liegen höher als im Werkstoffdatenblatt für das reine Schweißgut angegeben, die Zugfestigkeit liegt im unteren Bereich des vorgegebenen Intervalls. Somit ergibt sich ein relativ hohes Streckgrenzenverhältnis.

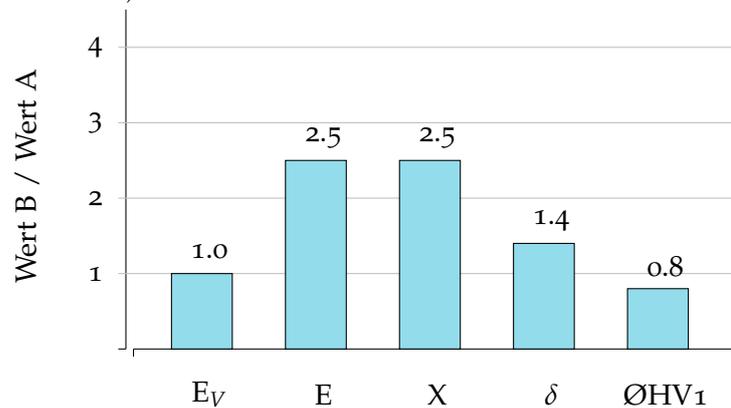
## 6.1 Interpretation der Ergebnisse

In Tabelle 6.1 werden ausgewählte Kennzahlen der verglichenen Parametersätze gegenübergestellt. In Abbildung 6.1 werden diese Größen in Relation zueinander dargestellt. Hierbei gilt der jeweilige Wert des Parametersatzes zur Erzielung feiner Strukturen als Referenzwert. Die Säulen beschreiben das Verhältnis des analogen Werts aus dem Parametersatz mit erhöhter Abschmelzleistung zum jeweiligen Referenzwert aus dem anderen Parametersatz.

Tabelle 6.1: Vergleich ausgewählter Kennzahlen des Parametersatzes für feinere Strukturen (Probe A) und jenem für höhere Abschmelzleistungen (Probe B)

Kennzahl	Probe A	Probe B	Einheit	B / A
volumsbez. Energie $E_V$	42	42	J/mm <sup>3</sup>	1,0
Streckenenergie E	360	143	J/mm	2,5
Abschmelzleistung X	305	122	cm <sup>3</sup> /h	2,5
Schichtdicke $\delta$	1,45	2,0	mm	1,4
Ø-Härte	239	194	HV <sub>1</sub>	0,8

Abbildung 6.1: Relation spezifischer Merkmale zwischen dem Parametersatz zur Erzielung feiner Strukturen (Probe A) als Referenz und dem Parametersatz zur Erzielung höherer Abschmelzleistungen (Probe B)



## 6.2 Vergleich zur additiven Fertigung mittels Cold Metal Transfer

Bei einer analogen Arbeit zum additiven Fertigen mittels CMT-Prozess (AM CMT) werden vier Parametersätze zur Generierung von Mehrlagenschweißungen erprobt [14]. Das verwendete Zusatzmaterial ist hier ein Werkzeugstahl UTP A73 G3. Ausgeführt werden Mehrlagenschweißungen mit drei und vier Spuren nebeneinander und bis zu dreißig Lagen Höhe. Das Abschlussstück bildet ein Hohlquader mit einer Wandstärke von 18 mm und einer Bauhöhe von 100 mm.

Bei allen Schweißungen ist die Brennerhaltung vertikal. Jede Lage wird beginnend an einem Rand des Bauteils in umgekehrter Richtung zur vorhergehenden Lage geschweißt. Eine Anpassung der Parameter mit zunehmender Bauhöhe bei einspurigen Aufbauten ist hier nicht erforderlich. Die Schweißungen verlaufen sehr stabil.

Von vier untersuchten Parametersätzen werden in Tabelle 6.2 die Kennzahlen von jenem vorgestellt, welcher in Bezug auf die Abschmelzleistung am besten mit dem größeren Parametersatz dieser Arbeit übereinstimmt.

Tabelle 6.2: Vergleich ausgewählter Kennzahlen von EBAM und AM CMT

Kennzahl	EBAM	AM CMT	Einheit
Streckenenergie E	360	218	J/mm
Draht-/Schweißvorschub $\lambda$	7,5	8,0	-
errechneter Nahtquerschnitt A	8,5	9,0	mm <sup>2</sup>
Volumsbezogene Energie $E_V$	42	24	J/mm <sup>3</sup>
Abschmelzleistung X	305	326	cm <sup>3</sup> /h

## 6.2 Vergleich zur additiven Fertigung mittels Cold Metal Transfer

Beim Vergleich dieser Kennzahlen mit jenen aus dieser Arbeit stellt man fest, dass die Energieeinbringung bei ähnlicher Abschmelzleistung beim additiven Fertigen mittels CMT-Prozess deutlich niedriger ausfallen kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der verwendete Werkzeugstahl eine Vorwärmung des Bauteils auf 400 °C erfordert und somit beim Schweißen weniger Energie eingebracht werden muss. Nichtsdestotrotz wird demonstriert, dass das CMT-Verfahren einen sehr effizienten und stabilen generativen Fertigungsprozess ermöglicht.

Weiters muss bei diesem Vergleich angeführt werden, dass das CMT-Verfahren im Gegensatz zum Elektronenstrahlschweißen für das Schweißen mit Draht entwickelt worden ist und sich auch die Prozessüberwachung einfacher gestaltet. Somit ist der Forschungsaufwand zur Qualifizierung des Elektronenstrahlschweißens für die Aufgabe des additiven Fertigens höher. Durch die Vorteile des Schweißens im Vakuum, als auch durch die sich eröffnenden Möglichkeiten zur maßgeschneiderten Energieeinbringung wird eine starke Motivation gegeben, diesen Aufwand zu betreiben.



## **7 Zusammenfassung und Ausblick**

Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit werden nun in zusammengefasster Form wiedergegeben. Ein Ausblick rundet das Kapitel ab.

### **7.1 Zusammenfassung**

Der Prozess des additiven Fertigen mittels Elektronenstrahlschweißen wird im Rahmen dieser Arbeit erprobt. Es werden Basiserkenntnisse gefunden und auf die Herstellung von einfachen Strukturen angewendet. Dabei werden kritische Faktoren ermittelt und Lösungswege aufgezeigt.

Zusammenfassend kann über den Prozess gesagt werden, dass der Schlüssel in einer optimalen Abstimmung der Draht- und Energieeinbringung liegt. Dies betrifft sowohl die Menge als auch die Verteilung der eingebrachten Energie. Zur Verteilung der eingebrachten Energie bietet das Werkzeug des Elektronenstrahls vielfältige Möglichkeiten. Eine korrekt eingestellte Drahtzufuhr ist notwendig für einen geordneten Materialübergang und damit für Schweißergebnisse mit reproduzierbaren Eigenschaften.

Es ist zu berücksichtigen, dass sich beim Erstellen von Mehrlagenschweißungen die äußeren Prozessbedingungen abhängig von

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

der Geometrie des Bauteils ändern und damit die Parameter angepasst werden müssen. Des Weiteren lassen sich durch die Parameteranpassungen auch die Eigenschaften der Mikrostruktur beeinflussen.

Im Vergleich zu anderen Verfahren, welche auf Drahtprozessen basieren, eignet sich das EBAM zur Herstellung von feinen Strukturen. Es bietet aber auch die Möglichkeit zur Erhöhung der Abschmelzleistungen. Hierbei wird festgestellt, dass die Prozessstabilität bei der Fertigung von größeren Strukturen deutlich verbessert wird. Das Hochvakuum garantiert dabei besten Schutz vor den Einflüssen der Atmosphäre. Dadurch ist das Verfahren besonders für die Verarbeitung reaktiver Materialien prädestiniert. Bedingt durch das Arbeiten im Vakuum gestaltet sich jedoch die Überwachung des Prozesses aufwändig.

### 7.2 Ausblick

Auf dem Weg zur Fertigung eines realen Bauteils gilt es noch einen hohen Forschungsaufwand zu betreiben. Einige der zu bewältigenden Herausforderungen sind:

- Verbesserung der Positioniergenauigkeit der Drahtzufuhr
- Prozessüberwachung
  - Temperaturmessungen
  - Höhenkontrolle
- Erprobung von Schweißpfaden komplexerer Geometrie
- Übertragung der Ergebnisse auf weitere Werkstoffe

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Verfahren zur additiven Fertigung metallischer Bauteile [2] . . . . .	8
2.2	Funktionsprinzip des Selektiven Lasersinterns SLS [4]	10
2.3	Materialübergang beim CMT-Prozess [15] . . . . .	16
2.4	Vergleich der Energieumsetzung beim Laser- und Elektronenstrahlschweißen [19] . . . . .	18
2.5	Grundlegende Zusammenhänge beim EBAM nach [9]	20
2.6	Schematischer Aufbau einer Strahlerzeugersäule [19]	21
2.7	Die Bereitstellung des Zusatzmaterials . . . . .	23
2.8	Kräfte am abschmelzenden Drahtende [21] . . . . .	24
2.9	Schema des Materialübergangs [21] . . . . .	26
2.10	Process map zur Bestimmung der Schmelzbadgröße in Abhängigkeit von Leistung und Schweißgeschwindigkeit [23] . . . . .	29
2.11	Ermittlung des Überlappungsabstands [28] . . . . .	30
2.12	Das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild [35] . . . . .	35
2.13	Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild [36]	36
4.1	Einführung der Hilfsgröße $h_1$ zur Einstellung der Abschmelzhöhe . . . . .	42
4.2	zu tiefe Drahtzufuhr (links), korrekte Drahtzufuhr (Mitte), zu hohe Drahtzufuhr (rechts) . . . . .	48
4.3	Feinabstimmung der Drahtzufuhr . . . . .	48
4.4	Abstimmung von Strahlstrom und Drahtzufuhr, Tabelle 4.3 und 4.2, Nr. 1-3 (links), 4-6 (Mitte), 9-7 (rechts)	50
4.5	Aufmischungsgrad in Abhängigkeit von Stromstärke und Drahtvorschub . . . . .	51
4.6	Schema der Strahlablenkung auf der Strahlfigur Kreis	52

## Abbildungsverzeichnis

4.7	Schweißungen ohne Drahtzufuhr: Par. 1-5 links, Par. 6-10 rechts, jeweils von oben nach unten . . . . .	55
4.8	Strahlfigur „Konzentrische Kreise“ . . . . .	56
4.9	Schweißungen mit der Strahlfigur der konzentrischen Kreise, Anpassung der Abschmelzhöhe . . .	59
4.10	Erprobung einer einspurigen Mehrlagenschweißung mit fünf Lagen . . . . .	59
4.11	Mehrlagenschweißungen mit Parametersätzen 1-3 nach den Tabellen 4.11 und 4.10 v.l.n.r. . . . .	62
4.12	10-Lagen-Aufbau mit Paramtersatz aus Tabelle 4.13, Seitenansicht (li), Querschliff (re) . . . . .	64
4.13	6-spuriger 10-Lagen-Aufbau mit Parametersatz aus Tabelle 4.14, Seitenansicht (li), Querschliff (re) . . .	67
4.14	3-spuriger 7-Lagen-Aufbau mit Parametersatz aus Tabelle 4.15, Seitenansicht (li), Querschliff (re) . . .	69
5.1	Makrobild Probe A nach Tabelle 4.14 (li), Probe B nach Tabelle 4.15 (re) . . . . .	74
5.2	Innenlagen Probe A, Übersicht (li), Mikroporen Ausschnitt I (re) . . . . .	75
5.3	Gefüge Innenlage Probe A: Ausschnitt I (li), Ausschnitt II (re) . . . . .	76
5.4	Außenlage Probe A, Übersicht (li), Ausschnitt III (re)	76
5.5	Innenlage Probe B, Übersicht (li), Mikroporen Ausschnitt IV (re) . . . . .	77
5.6	Gefüge Innenlage Probe B: Ausschnitt IV (li), Ausschnitt V (re) . . . . .	78
5.7	Außenlage Probe B, Übersicht (li), Ausschnitt VI (re)	78
5.8	Härtmapping HV <sub>1</sub> , Probe A (li), Probe B (re) . . .	79
6.1	Relation spezifischer Merkmale zwischen dem Parametersatz zur Erzielung feiner Strukturen (Probe A) als Referenz und dem Parametersatz zur Erzielung höherer Abschmelzleistungen (Probe B) . . . . .	85

## Literatur

- [1] A. H. Fritz, *Fertigungstechnik*. Schulze, 2015, S. 527.
- [2] G. Schöpf, »Additive Fertigung«, *X-Technik*, Bd. 1, S. 30, 2015.
- [3] J. Gardan, »Additive manufacturing technologies: state of the art and trends«, *International Journal of Production Research*, Bd. 7543, S. 1–15, 2015.
- [4] B. Buchmayr und G. Panzl, »Eine SWOT-Analyse zum Einsatz der additiven Fertigung für metallische Bauteile«, *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, Bd. 160, Nr. 1, S. 15–20, 2014.
- [5] Arcam, *Ebm electron beam melting - in the forefront of additive manufacturing*, 2016. Adresse: <http://www.arcam.com> (besucht am 20.07.2016).
- [6] EOS GmbH, *Systeme und Zubehör zur additiven Fertigung von Metallteilen*, 2016. Adresse: <http://www.eos.info> (besucht am 20.07.2016).
- [7] Concept Laser GmbH, *Concept Laser*, 2016. Adresse: <http://www.concept-laser.de> (besucht am 20.07.2016).
- [8] VDM-Metals, *Vdm Alloy 718 Nicrofer 5219 Nb*, 2016. Adresse: <http://www.vdm-metals.com> (besucht am 20.11.2016).
- [9] S. M. Thompson, L. Bian, N. Shamsaei und A. Yadollahi, »An overview of direct laser deposition for additive manufacturing part I: transport phenomena, modeling and diagnostics«, *Additive Manufacturing*, Bd. 8, S. 36–62, Juli 2015.

## Literatur

- [10] N. Shamsaei, A. Yadollahi, L. Bian und S. M. Thompson, »An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; part II: mechanical behavior, process parameter optimization and control«, *Additive Manufacturing*, Bd. 8, S. 12–35, 2015.
- [11] G. Posch, F. Kalchgruber und H. Chladil, »Manufacturing of turbine blades by shape giving CMT welding«, *Metal Additive Manufacturing Conference (2014)*, S. 10, 2015.
- [12] Z. Jandric und R. Kovacevic, »Heat management in solid free-form fabrication based on deposition by welding«, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Bd. 218, Nr. 11, S. 1525–1540, 2004.
- [13] E. A. Alberti, B. M. P. Bueno und A. S. C. M. D'Oliveira, »Additive manufacturing using plasma transferred arc«, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. in press, S. 1861–1871, 2015.
- [14] J. Stockinger, C. Wiednig, N. Enzinger, D. Huber und M. Stockinger, »Additive manufacturing via cold metal transfer«, *Metal Additive Manufacturing Conference (2016)*, 2016.
- [15] Fronius, »Cold Metal Transfer«, S. 16, 2014. Adresse: <http://www.fronius.com>.
- [16] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri und H. Li, »Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests«, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. 81, Nr. 1-4, S. 465–481, 2015.
- [17] M. Kottman, S. Zhang, J. McGuffin-Cawley, P. Denney und B. K. Narayanan, »Laser hot wire process: a novel process for near-net shape fabrication for high-throughput applications«, *JOM*, Bd. 67, Nr. 3, S. 622–628, 2015.
- [18] K. Karunakaran, »Rapid manufacturing of metallic objects«, *Rapid Prototyping Journal*, Bd. 18, Nr. 4, 2012.
- [19] V. Adam, U. Clauß, D. h. c. D. v. Dobeneck, D. T. Krüssel und D. T. Löwer, *Elektronenstrahl-Schweißen - Grundlagen einer faszinierenden Technik*. 2011, S. 102.

- [20] K. M. B. Taminger und R. A. Hafley, »Electron beam freeform fabrication: a rapid metal deposition process«, in *Proceedings of the 3rd Annual Automotive Composites Conference, September*, Hampton, VA: NASA Langley Research Center, 2003.
- [21] J. Zhao, B. Zhang, X. Li und R. Li, »Effects of metal-vapor jet force on the physical behavior of melting wire transfer in electron beam additive manufacturing«, *Journal of Materials Processing Tech.*, Bd. 220, S. 243–250, 2015.
- [22] E. R. Denlinger, J. C. Heigel, P. Michaleris und T. A. Palmer, »Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys«, *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 215, S. 123–131, 2015.
- [23] J. Gockel, J. Beuth und K. Taminger, »Integrated control of solidification microstructure and melt pool dimensions in electron beam wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V«, *Additive Manufacturing*, Bd. 1-4, S. 119–126, 2014.
- [24] S. Hongbo, C. Zheyuan, L. Jianrong, G. Shuili und X. Jianzhong, »Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V by electron beam rapid manufacturing«, *Rare Metal Materials and Engineering*, Bd. 43, Nr. 4, S. 780–785, 2014.
- [25] Q. Tang, S. Pang, B. Chen, H. Suo und J. Zhou, »A three dimensional transient model for heat transfer and fluid flow of weld pool during electron beam freeform fabrication of Ti-6-Al-4-V alloy«, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 78, S. 203–215, 2014.
- [26] J. Gockel, J. Fox, J. Beuth und R. Hafley, »Integrated melt pool and microstructure control for Ti-6Al-4V thin wall additive manufacturing«, *Materials Science and Technology*, Bd. 31, Nr. 8, S. 912–916, Juni 2015.
- [27] P. Wanjara, M. Brochu und M. Jahazi, »Electron beam freeforming of stainless steel using solid wire feed«, Bd. 28, S. 2278–2286, 2007.

## Literatur

- [28] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri und H. Li, »A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)«, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Bd. 31, S. 101–110, 2015.
- [29] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, S. Van Duin und N. Larkin, »Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing«, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Bd. 39, S. 32–42, 2016.
- [30] S. Suryakumar, K. Karunakaran, A. Bernard, U. Chandrasekhar, N. Raghavender und D. Sharma, »Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing«, *Computer-Aided Design*, Bd. 43, Nr. 4, S. 331–344, 2011.
- [31] F. Martina, S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal und P. Colegrove, »Wire + arc additive manufacturing«, Bd. 0836, Nr. MAY, S. –7, 2015.
- [32] P. Edwards, A. O’Conner und M. Ramulu, »Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance«, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Bd. 135, Nr. 6, S. 061 016, 2013.
- [33] L. E. Murr, »Metallurgy of additive manufacturing: examples from electron beam melting«, *Additive Manufacturing*, Bd. 5, S. 40–53, 2015.
- [34] Böhler, *Böhler EMK 8*, 2013. Adresse: <http://www.boehler-welding-service.com> (besucht am 18.04.2016).
- [35] Nitriertechnik, *Eisen-Kohlenstoff-Diagramm*, 2016. Adresse: <http://nitriertechnik.de/> (besucht am 08.10.2016).
- [36] P. Seyffarth, *Großer Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder*. DVS Media, 1992.
- [37] Voestalpine, *Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle*, 2016. Adresse: [www.voestalpine.com/grobblech](http://www.voestalpine.com/grobblech).

# Anhang



# Prüfprotokoll-Zugversuch

Überschrift : Prüfprotokoll-Zugversuch    Prüfer : Herbert Penker  
 Prüfnorm : DIN EN ISO 6892-1    Maschinendaten :  
 Probenotyp : Rundzugprobe

Prüfgeschwindigkeiten : Verfahren B    Geschwindigkeit Streckgrenze : 1 mm/min  
 Vorkraft : 200 N    Prüfgeschwindigkeit : 1 mm/min  
 Geschwindigkeit E-Modul : 1 mm/min

## Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Art und Bezeichnung	L0 SW mm	m <sub>E</sub> GPa	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	F <sub>m</sub> kN	A <sub>g</sub> %	A <sub>10</sub> %	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	L <sub>0</sub> mm	L <sub>u</sub> mm
<span style="background-color: red; color: black;"> </span>	1	Zugprobe 01	30	213	-	568	15.79	20.29	30.0	27.81	30	40
<span style="background-color: green; color: black;"> </span>	2	Zugprobe 02	30	207	-	572	15.90	18.87	27.6	27.81	30	41

Legende	Nr	A <sub>manuell</sub> %	d <sub>1u</sub> mm	d <sub>2u</sub> mm	Z %
<span style="background-color: red; color: black;"> </span>	1	33.3	2.85	2.85	77
<span style="background-color: green; color: black;"> </span>	2	36.7	2.7	2.8	79

## Seriengrafik:

