



Johannes Stockinger, BSc

# Additive Fertigung mittels CMT-Prozess für Reparaturarbeiten an Schmiedegesenken

## **MASTERARBEIT**

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik

Betreuer

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. NorbertENZINGER

Dipl.-Ing. Christopher Alois WIEDNIG

Dipl.-Ing. Leonhard Andreas WEINGRILL

Graz, Februar 2017



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

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

---

Datum

---

Unterschrift



# Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit war die Herstellung, das Untersuchen und die Applikation von generativ gefertigten dreidimensionalen Strukturen mittels Roboter gestütztem Cold-Metal-Transfer Schweißverfahren zur Reparatur von Schmiedegesenken.

Am Beginn dieser Arbeit stand das Erwerben der theoretischen Grundlagen: Einerseits die Erläuterung der Grundlagen der metallischen additiven Fertigungsverfahren und andererseits die Beschreibung des Cold Metal Transfer (CMT) Schweißverfahrens als solches.

Im experimentellen Teil wurden Testgeometrien aus warmfesten Werkzeugstahl (UTP 73 G3) mit dem CMT Verfahren generativ gefertigt. Als Grundmaterial kam, wie bei den zu reparierenden Werkzeugen, der Warmarbeitsstahl W302 (X40CrMoV5-1) zum Einsatz.

Vor der Schweißung einer Testgeometrie wurden Vorversuche zur Bestimmung von praxistauglichen Parametern unternommen. Hierbei mussten, ebenso wie für die endgültige Geometrie, Untersuchungen zu Materialkennwerten und Strukturuntersuchungen durchgeführt werden.

Alle Schweißungen wurden mit einem programmierten Industrieroboter durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit und Positioniergenauigkeit der Versuche zu gewährleisten.

Die Mikrostruktur der generativ erstellten Schweißgeometrien wurde mittels Lichtmikroskopie untersucht. Die mechanischen Eigenschaften wurden mittels Kerbschlagbiegeprüfung, Härteprüfung und Zugversuch ermittelt und mit denen des Grundwerkstoffs verglichen. Die Untersuchungen wurden normal und quer zur Fertigungsrichtung durchgeführt, um die Anisotropie des Gefüges zu beschreiben. In Kombination mit einer angepassten Wärmenachbehandlung wurden Materialkennwerte erreicht, die denen des Grundwerkstoffes entsprechen.

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die automatisierte additive Fertigung mittels CMT Prozess einen vielversprechenden Ansatz für Reparaturschweißungen darstellt.



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	12
1.1	Aufgabenstellung.....	13
1.2	Vorgehensweise .....	13
1.3	Zielsetzung .....	14
2	Theoretische Grundlagen.....	15
2.1	Additive Fertigung (AM).....	15
2.1.1	Metallische additive Verfahren (MAM) .....	16
2.1.2	Schichtweise Materialeinbringung.....	16
2.1.3	Selektive Verfahren.....	19
2.1.4	Vergleich draht- und pulverbasierte Verfahren.....	22
2.2	Cold Metal Transfer (CMT).....	23
2.2.1	Abgrenzung zu konventionellen Verfahren .....	23
2.2.2	CMT Prozessvarianten .....	24
2.2.3	CMT als AM Verfahren .....	25
2.3	Warmarbeitsstahl.....	26
2.3.1	Schweißen von Warmarbeitsstahl.....	28
2.3.2	Schäfflerdiagramm.....	29
2.4	Charakterisierung der Schweißungen .....	29
2.4.1	Härtemessung nach Vickers .....	29
2.4.2	Zugversuch nach DIN 50125:2009-07 .....	30
2.4.3	Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy .....	30
2.4.4	Metallographie .....	30
3	Versuchsaufgaben und Durchführung.....	32
3.1	Equipment und Methoden .....	32
3.1.1	Schweißanlage .....	32
3.1.2	Temperaturmessung.....	33
3.1.3	Vorwärmeinrichtung.....	34
3.1.4	Roboterprogrammierung.....	35
3.1.5	Verwendete Werkstoffe.....	36
3.1.6	Wärmebehandlung.....	38
3.1.7	Härtemessung.....	39
3.1.8	Zugversuch .....	39

3.1.9	Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy .....	40
3.1.10	Metallographische Untersuchungen .....	40
3.1.11	Vorgehensweise Schweißversuche .....	41
3.1.12	Schweißparameter.....	42
3.1.13	Sonstige Schweißparameter.....	42
3.2	Schweißstudien .....	43
3.2.1	Bezeichnungssystem Vorversuche .....	44
3.2.2	Einspurige Mehrlagenschweißungen .....	44
3.2.3	Mehrspurige Mehrlagenversuche.....	45
3.2.4	Handprogrammierte Schweißungen: VV01.....	46
3.2.5	Offline programmierte Schweißungen VV02.....	46
3.2.6	Vorab-Probenfertigung VV03.....	47
3.3	Bauteilversuch .....	48
3.3.1	Schweißgeometrie .....	48
4	Ergebnisse .....	51
4.1	Ergebnisse Vorversuche .....	51
4.1.1	Einfluss Programmiermethode.....	51
4.1.2	Einfluss der Schweißparameter auf den Lagenaufbau .....	52
4.1.3	Härtemessungen.....	55
4.1.4	Kerbschlagbiegeversuch.....	57
4.1.5	Zugversuch .....	57
4.1.6	Metallographie .....	58
4.2	Ergebnisse Versuchsbauteil .....	59
4.2.1	Geometrie .....	60
4.2.2	Temperaturmessung.....	61
4.2.3	Härtemessung und Makrountersuchung .....	62
4.2.4	Zugversuch .....	65
4.2.5	Kerbschlagbiegeversuch.....	66
5	Diskussion.....	67
5.1	Programmiermethode.....	67
5.2	Geometrie des Lagenaufbaus .....	67
5.3	Härte.....	68
5.4	Kerbschlagarbeit.....	68
5.5	Zugversuch.....	69
6	Zusammenfassung.....	71



7	Ausblick.....	73
8	Anhang.....	75
9	Literaturverzeichnis .....	81



## Abstract

The aim of this work was to examine generatively manufactured, three-dimensional structures using a robot-based cold-metal transfer welding process and to apply this method for the repair of forging dies. At the beginning was the elaboration of the theoretical foundations: On the one hand the explanation of the basic principles of the metallic additive manufacturing processes on the other hand the description of the cold metal transfer (CTM) welding process itself.

In the experimental part, test geometries made of heat-resistant tool steel (UTP 73 G3) were generatively manufactured using the CTM method. The hot-working steel W302 (X40CrMoV5-1) was used as base material, which is the typical forging die material. Before welding a test geometry, preliminary tests were performed for the determination of practical parameters. In this case as well as for the final geometry, investigations had to be carried out on material characteristics and structural investigations. All welds were carried out with a CNC-programmed industrial robot to ensure the reproducibility and positioning accuracy of the tests.

The microstructure of the generatively constructed welding geometries were examined using light microscopy. The mechanical properties were determined using notch impact test, hardness test and tensile test and compared with those of the base material. The investigations were carried out normal and transverse to the manufacturing direction in order to examine the anisotropy of the microstructure.

In combination with an adapted heat treatment, material characteristics, corresponding to those of the base material were achieved.

# 1 Einleitung

Die Generative Fertigung (GF) bzw. das Additive Manufacturing (AM) oder auch der sogenannte 3D Druck hat sich zu einer modernen und vielversprechenden Fertigungsgruppe entwickelt [1].

Heute gängige Technologien erlauben es, metallische, endkonturnahe Bauteilgeometrien zu erstellen. Dabei werden in Abhängigkeit des gewählten Verfahrens, bereits dem Grundwerkstoffen ähnliche – teilweise auch bessere – Eigenschaften erzielt [2].

Es ergeben sich immer mehr technologische und wirtschaftliche Einsatzbereiche der additiven Fertigung auch außerhalb des Prototypensegments. Die Kombination aus Cold Metal Transfer (CMT) - Verfahren und der Automatisierung des Prozesses durch einen Schweißroboter stellt den Brückenschlag zwischen der klassischen Schweißtechnik hin zur additiven Fertigung dar.

In Anlehnung an das klassische Auftragsschweißen (Cladding) können CMT basierte Verfahren mittlere bis große Geometrien mit geringeren Ansprüchen an die Fertigungstoleranz (Near net shape manufacturing) generieren. Durch den Einsatz der „hybriden Fertigung“ lassen sich die Vorteile des AM mit großen Materialausbringung und die subtraktive Fertigung mit engsten Toleranzen kombinieren [3], [4].

Bisher wurden Reparaturen von Schmiedegesenken bei *Böhler Schmiedetechnik GmbH & Co KG* manuell durchgeführt. Da diese zeitintensiven Schweißungen unter schwierigen Bedingungen stattfinden, wurde untersucht, ob sich das robotergestützte CMT Schweißverfahren für diese Reparaturen eignet. Aus diesem Grund wurden mehrlagige Volumina generiert, die über die flächigen Geometrien einer Auftragschweißung hinausgehen.

## 1.1 Aufgabenstellung

Im Zuge dieser Masterarbeit soll ein, mit dem CMT-Verfahren und unter Verwendung eines Industrieroboters, additiv gefertigtes Bauteiles hergestellt und untersucht werden. Bei der bewusst simpel gehaltenen Geometrie handelt es sich um ein hohles, gerades Prisma mit quadratischer Grundfläche, kleinem Kantenradius und verhältnismäßig geringer Wandstärke, um kritische Reparaturarbeiten nachstellen zu können. Die Abmessungen erlauben es, Proben für Zugversuche und Kerbschlagbiegeversuche in mehreren Lagen und Ausrichtungen aus dem Probenkörper zu fertigen.

Es werden die Werkstoffe verwendet, die für die Gesenke und deren Reparatur zum Einsatz kommen.

## 1.2 Vorgehensweise

Im ersten Schritt soll ein System für die Versuchsdurchführung aufgesetzt und getestet werden. Für reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse der Schweißungen muss mit Beginn der Versuche ein Programm für die Robotersteuerung erstellt werden.

In einem weiteren Schritt soll ein mögliches Verbesserungspotential für die in der Industrie verwendeten Schweißparameter gefunden werden. Mittels systematischer Versuchsanordnung und verschiedenen Auswertungsmethoden sollen diese anschließend validiert und systematisch optimiert werden.

Um den Transfer von den Versuchsergebnissen in die Praxis zu gewährleisten, soll eine Dokumentation erstellt werden, die eine lückenlose Reproduktion der Ergebnisse erlaubt. Dazu sollen Temperaturmessungen und eine Videodokumentation durchgeführt werden, um Schweißfolgen, Lagenaufbau und Temperaturverlauf festzuhalten.

Zur Charakterisierung sollen die Eigenschaften des additiv gefertigten Bauteils mit denen des Grundmaterials verglichen werden. Dazu sollen Proben aus dem Schweißgut mittels Metallographie (Lichtmikroskop) und mechanischen Prüfungen (Zugversuch, Kerbschlagbiegeprüfung, Härtemessung nach Vickers) untersucht werden. Insbesondere sollen bei den Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften mögliche Anisotropien in Bezug auf die Schweißrichtung Gegenstand der Untersuchungen sein.

Es sollen zusätzlich die Einflüsse auf die Ergebnisse bei verschiedenen Parametersätzen und Wärmebehandlungen untersucht werden.

## **1.3 Zielsetzung**

Diese Masterarbeit hat zum Ziel das CMT Verfahren als ergänzende Reparaturmethode für Schmiedegesenke aus X40CrMoV5-1 Warmarbeitsstahl einzusetzen. Der Nachweis soll anhand folgender Punkte geführt werden:

### **Machbarkeitsstudie**

Mittels einer Parameterstudie und nachfolgenden metallurgischen Untersuchungen soll eine Parameterkonfiguration gefunden werden, mit der eine repräsentative Geometrie mit ausreichenden Materialeigenschaften generiert werden kann.

### **Reproduzierbarkeit**

Für die Automatisierung des Schweißprozesses ist es entscheidend, dass die Reproduzierbarkeit sowohl der Geometrie jeder einzelnen Lage als auch jene der Materialkennwerte gegeben ist. Diesem Punkt kommt hinsichtlich der Geometrie besondere Bedeutung zu, da die Positionierung des Brenners nicht mittels einer Regelung, sondern einer Steuerung erfolgt.

### **Grenzen des Prozesses**

Es sollen die obere und die untere Grenze des Leistungsbereichs der Schweißparameter abgesteckt werden, welcher für die erfolgreiche Durchführung einer Reparaturschweißung, folglich einer definierten repräsentativen Geometrie erforderlich ist.

### **Wärmebehandlung**

Der Einfluss einer präferierten, vorgegebenen Wärmebehandlung auf das Schweißgut soll untersucht werden.

### **Homogenität**

Der Aufbau des Werkstücks (Halbzeug) erfolgt schichtweise und ist somit anisotrop. Für eine belastungsgerechte Reparatur von Werkzeugen werden daher die makroskopischen Materialkennwerte, die aufgrund des Lagenaufbaus beeinflusst sind, untersucht.

### **Gefüge**

Das geschweißte Gefüge soll sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch auf Auffälligkeiten und Schweißfehler untersucht werden.

# 2 Theoretische Grundlagen

## 2.1 Additive Fertigung (AM)

„Als Generative Fertigungsverfahren werden alle Fertigungsverfahren bezeichnet, die Bauteile durch Auf- oder Aneinanderfügen von Volumenelementen (...), vorzugsweise schichtweise, automatisiert herstellen.“ [5]

Schon seit den achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts werden AM Verfahren verwendet um Prototypen herzustellen. Mittlerweile können bereits „einbaufertige“ Bauteile generiert bzw. sogar Produkte in Kleinserienmengen erstellt werden [5]. Additive Manufacturing muss als Fertigungstechnologie begriffen werden, die je nach Verwendungszweck der Bauteile, in Prototyping bei Prototypengenerierung, Tooling bei der Herstellung von Werkzeugen oder Manufacturing bei einsatzfähigen Bauteilen, eingeteilt wird (s.Abbildung 1)[6].

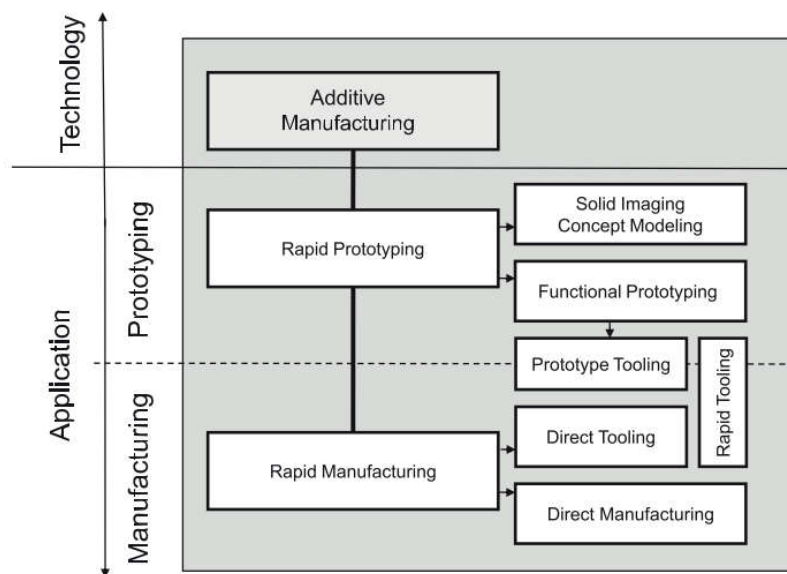


Abbildung 1: Begriffsübersicht Generative Fertigung (Additive Manufacturing) [6]

Der Bauvorgang der einzelnen Schichten erfolgt direkt aus dem CAD-Modell über Surface Tessellation Language (SLT) als Standardschnittstellendatenformat für alle AM-Maschinen. Das direkte Drucken der Bauteile bzw. integraler Baugruppen vom Arbeitsplatz aus ist mitunter ein Grund, warum der 3D Druck gerne im Zusammenhang mit Industrie 4.0 gebracht wird [7].

Der gezielte Aufbau von Material reduziert den Einsatz von spanenden Fertigungsschritten wie Bohren oder Fräsen inklusive deren Werkzeuge auf ein Minimum. Im

Vergleich zu modernen Gussverfahren lassen sich komplexere und auch mit Guss nicht oder nur sehr schwer realisierbare Geometrien (Hinterschneidungen, Hohlstrukturen, usw.) erstellen. Außerdem werden keine Gussformen benötigt [7].

Die Bandbreite an verwendeten Materialien ist ebenso vielfältig wie die Anwendungsbereiche von AM. Diese reichen von Lebensmitteln über biologisches Gewebe bis hin zu klassischen Werkstoffen wie Kunststoffen und Metallen [8], [9].

### 2.1.1 Metallische additive Verfahren (MAM)

Dieses Kapitel soll einen Überblick über Verfahren geben, die sich zur generativen Fertigung metallischer Werkstoffe eignen.

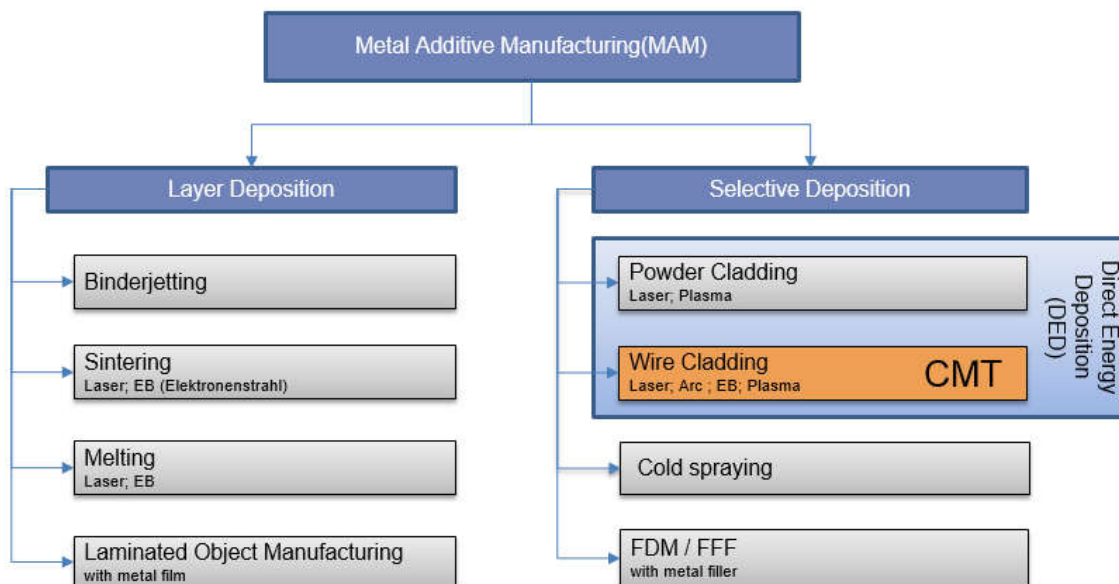


Abbildung 2: Unterteilung metallischer additiver Fertigungsverfahren [10]

In Abbildung 2 sind die additiven Fertigungsverfahren nach der Art der Einbringung des zu verarbeitenden Metalls unterteilt. Diese Aufteilung in schichtweise und selektive Verfahren wurde vom Autor auf Grund fertigungstechnischer Gesichtspunkte getroffen.

### 2.1.2 Schichtweise Materialeinbringung

Bei dieser Verfahrensgruppe wird das Werkstück durch wiederholtes, gezieltes Verfestigen bzw. Verbinden von zuvor schichtweise eingebrachtem Zusatzmaterial generiert. Wobei immer das gesamte konstante Schichtvolumen aufgetragen wird. Alle



gleichförmigen Schichten zusammen ergeben ein meist quaderförmiges oder auch zylindrisches Pulverbettvolumen [5], [11].

Vorteile dieser Gruppe sind die theoretisch beliebigen Pulverzusammensetzungen und der Wegfall bzw. die Minimierung zusätzlicher Stützstrukturen. Alleinstellungsmerkmal und somit ein weiterer großer Vorteil dieser Verfahren ist die Möglichkeit der Herstellung komplexer Geometrien bis hin zur Generierung ganzer integraler Baugruppen [5], [11].

Nachteilig sind die geringen Bauraten, die Kosten der Anlagen und des Materials. Die Integrierbarkeit in bestehende automatisierte Fertigungsabläufe ist nur bedingt gegeben. Hohlräume in Geometrien müssen zur Umgebung offen bleiben, da die nicht verfestigten Pulverreste sonst nicht mehr entfernt werden können [11], [5].

Im Folgenden werden die gängigen Verfahren aus dieser ersten Untergruppe im Detail beschrieben.

### **Selektives Sintern (Laser; Elektronenstrahl)**

Bei diesen Methoden kommen Sande, Kunststoffe und Metalle zur Anwendung. Dabei wird eine zuvor mit einer Walze oder Rakel aufgetragene Pulverschicht mithilfe eines Lasers bzw. eines Elektronenstrahls direkt und schichtweise gesintert. Hierbei wird per Laser-Scanner-Prinzip das Material selektiv angeschmolzen, welches nach der Erstarrung eine Schicht bildet. Diese Prozessschritte werden bis zum Fertigstellen des Bauteils wiederholt [5].

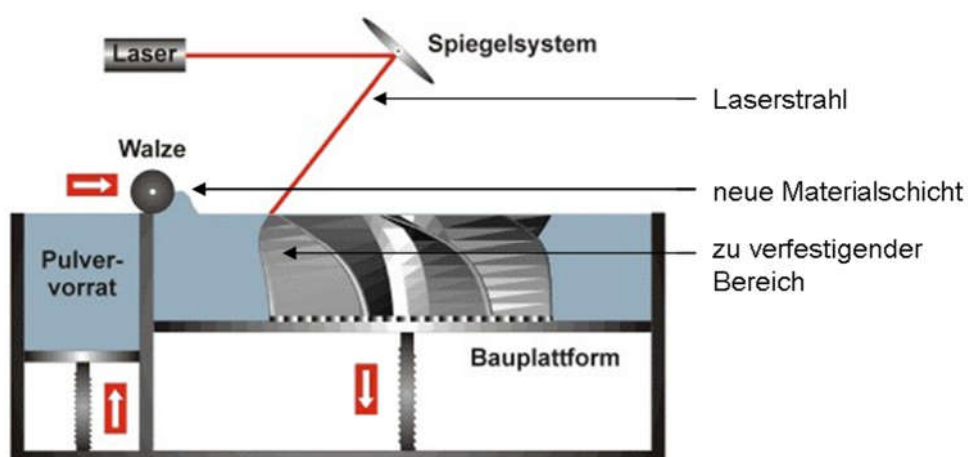


Abbildung 3: Schema Selektives Sintern/Schmelzen mit Laser [12]

Durch den Sinterprozess bleibt eine Restporosität bei den erstellten Bauteilen erhalten. Diese meist unerwünschte Porosität kann durch Infiltration eines niedriger schmelzenden Werkstoffes entgegengewirkt werden [5].

Typische Bauzeiten beim SLS sind 24mm/h bis 35mm/h in Baurichtung bzw. 0,5-55mm<sup>3</sup>/s [5]

### **Selektives Schmelzen (mit Laser; Elektronenstrahl)**

Bei diesen Methoden kommen Sande, Kunststoffe und Metalle zur Anwendung. Beim selektiven Schmelzen wird, wie zuvor beim Selektiven Sintern, eine zuvor mit einer Walze oder Rakel aufgetragene Pulverschicht mithilfe eines Lasers bzw. eines Elektronenstrahls direkt und schichtweise aufgeschmolzen bzw. verschweißt. Hierbei wird eine zuvor aufgetragene Pulverschicht nach dem Laser-Scanner-Prinzip, im Gegensatz zu Sinterprozessen, aufgeschmolzen und nicht nur angeschmolzen. Daraus ergeben sich theoretisch porenfreie und rissfreie Strukturen mit der Dichte des Ausgangsmaterials [5], [11].

Die maximal möglichen Bauraten entsprechen denen des selektiven Sinterns [10].

### **Binderjetting**

Bei dieser Methode kommen Sande, Kunststoffe und Metalle zur Anwendung. Dabei wird eine zuvor aufgetragene Pulverschicht mittels eines Binders selektiv, der mit einer Düse eingebracht wird, verklebt. Dieser Prozess kommt ohne Einbringung von Hitze aus. Durch das Einfärben des Bindemittels können mehrfarbige Modelle erstellt werden [10].

Die Bauraten bei Binderjetting Systemen reichen von 5mm/h bis 25mm/h bzw. 60-85 mm<sup>3</sup>/s [10].

### **Laminated Object Manufacturing (LOM, mit Metallfolien)**

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Verfahren werden bei den LOM Verfahren die Schichten nicht in Pulverform, sondern als Folie eingebracht. Die Folien aus Kunststoff, Keramik, Papier oder Metall mit appliziertem Kleber werden durch eine beheizte Rolle miteinander verklebt. Danach wird die gewünschte Form dieser Lage ausgeschnitten. Dies erfolgt meist mittels Laser.

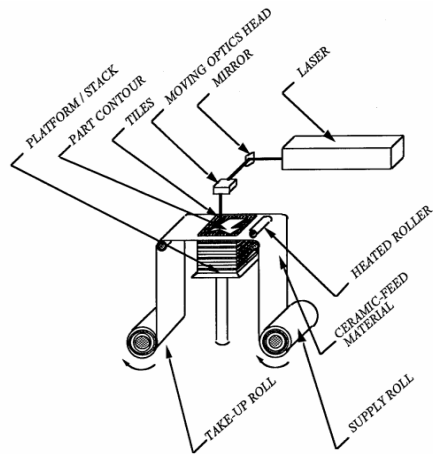


Abbildung 4: LOM Schema [13]

### 2.1.3 Selektive Verfahren

Diese Verfahren zeichnen sich durch einen Aufbau des Bauteils durch selektives, gleichzeitiges Auftragen und Verbinden des Werkstoffes aus. Hierbei wird nicht der vollständige Bauraum mit Material beschickt [5].

#### **Drahtauftragsschweißen (Cladding)**

Drahtauftragsschweißen ist eines der ältesten additiven Fertigungsverfahren. Hierbei wird zur Reparatur oder zum Verschleißschutz Zusatzmaterial formgebend in Drahtform mit dem Grundmaterial verschweißt.

Es kommen unterschiedliche Wärmequellen zum Einsatz. Neben den klassischen Verfahren mit Gasflamme und Lichtbogen, eignen sich auch Elektronenstrahl- und Laseranlagen für Auftragsschweißungen.

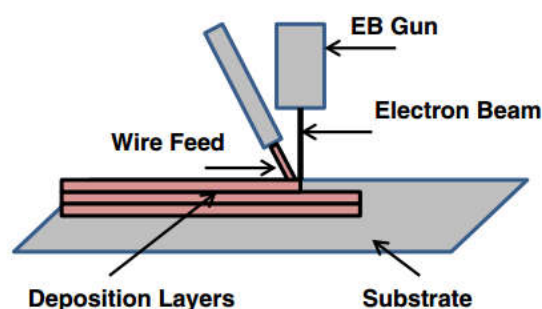


Abbildung 5: Prinzip Drahtauftragsschweißen mittels Elektronenstrahl [14]

Letztere zeichnen sich durch einen geringeren Wärmeeintrag aus und haben dadurch eine kleiner ausfallende Wärmeeinflusszone und ein kleineres Schweißbad. Dadurch lassen sich feinere Konturen erstellen, die nur einer minimalen Nachbearbeitung bedürfen.

Nachteilig für diese hochtechnologischen Verfahren sind die hohen Kosten für Anschaffung und Betrieb [10], [15].

## Pulverauftragsschweißen

Pulverauftragsschweißen unterscheidet sich zu dem Drahtauftragsschweißen durch die Form des Zusatzmaterials. Der pulverförmige Schweißzusatz wird in ein Schmelzbad eingeblasen, welches durch einen Laser oder durch einen Plasmastrahl erzeugt wird [16].

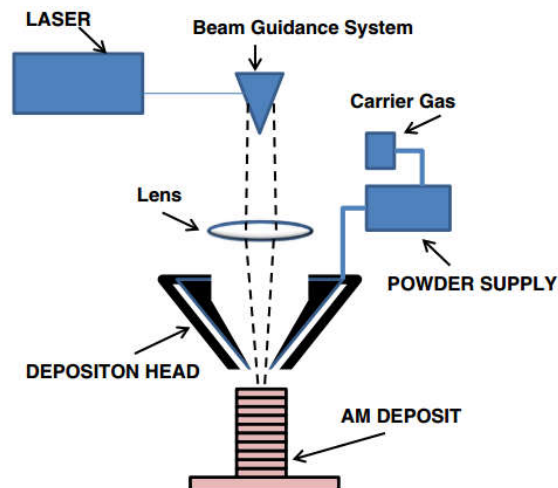


Abbildung 6: Prinzip Pulverauftragsschweißen [14]

## Kaltgasspritzen

Bei diesem Verfahren werden Partikel mitsamt des Fördergases vorgewärmt und auf mehrfache Schallgeschwindigkeit beschleunigt. Die Partikel gehen beim Auftreffen auf das Grundmaterial eine Bindung mit jenem ein. Dieses Verfahren kommt vor allem bei duktilen Werkstoffen zum Einsatz [10].

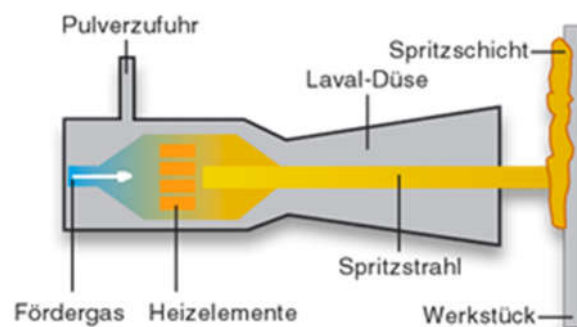


Abbildung 7: Prinzip Kaltspritzen [17]

## Schmelzschtichtung (FDM, FFF)

Bei der Schmelzschtichtung wird ein thermoplastischer Kunststoff von einer Spule abgerollt, in einem Heizelement verflüssigt und mit einer Düse auf das Grundmaterial aufgetragen. In das Filament können Metalle als Substrat eingebettet werden [10].

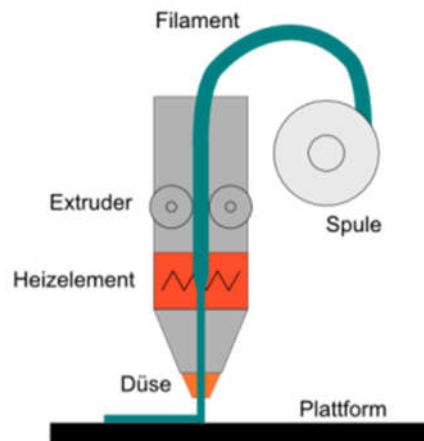


Abbildung 8: Prinzip FFF Druck [18]

## 2.1.4 Vergleich draht- und pulverbasierte Verfahren

Pulverbasierte AM-Verfahren sind die führende Technologie im Hinblick auf Bauteilkomplexität und Oberflächenqualität [19].

Im Vergleich zu drahtbasierten Verfahren kommt es beim Pulver wegen der großen Oberfläche des Zusatzmaterials vermehrt zum Auftreten von Reaktionen mit der Atmosphäre.

Abseits des eigentlichen Schweißprozesses ist die Handhabung des Schweißzusatzes in Drahtform einfacher. Der Umgang mit Pulver muss mit Vorsicht in Bezug auf Feuchtigkeit (Pulververarbeitbarkeit), Staubentwicklung (Gesundheitsgefährdung) und Arbeitssicherheit (Feuer- und Explosionsgefahr) erfolgen [20], [21]. Die Vielfalt der verarbeitbaren Materialien ist bei pulverbasierten Verfahren theoretisch größer, aber die Auswahl an verfügbaren Drahtsorten ist derzeit ungleich höher [22], [23].

Für den industriellen Einsatz haben drahtgebundene Prozesse stärker Einzug gehalten [24], [25]. Dies ist vor allem auf die Bedienbarkeit und Einfachheit bewährter Methoden in Kombination mit Technologien wie Laser, Elektronenstrahl, Robotik oder digitalen Stromquellen zurückzuführen [24], [25].

Bei einem drahtgebundenen Schweißprozess wird der Schweißzusatz zu 100% umgesetzt, unabhängig von Schweißlage und Bauteilgeometrie [26]. Bei Pulverbettbasierten Prozessen wird zwar das lose gebliebene Pulver wiederverwendet, aber die Pulvereigenschaften (z. B. Schüttdichte, Fließfähigkeit) verschlechtern sich oftmals mit mehrfachem Einsatz [24], [25]. Bei selektiver Pulveraufbringung geht der nicht aufgeschmolzene Anteil des Pulvers verloren (overspraying).

Die konstante Geometrie und Zufuhr des Drahts erleichtern die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen [27].

## 2.2 Cold Metal Transfer (CMT)

CMT beschreibt ein Metallschutzgasschweißverfahren (MSG) mit reduziertem Wärmeeintrag der Firma *Fronius International GmbH*.

Dieses Verfahren wurde ursprünglich entwickelt um Stahl mit Aluminium mittels eines MSG-Verfahrens zu fügen. Hierzu ist es notwendig, das Vermischen von Stahl und Aluminium in der flüssigen Phase zu verhindern. Gewährleistet wird dies durch eine geringere Wärmeeinbringung, bei der nur das Aluminium aufgeschmolzen wird.

Die gute Steuerbarkeit von Energieeinbringung und Aufmischung des CMT- Prozesses verspricht eine kontinuierliche Anlagerung des Zusatzmaterials, bei der die Gefahr des „burn through“ minimiert werden kann [3].

### 2.2.1 Abgrenzung zu konventionellen Verfahren

Hauptunterscheidungsmerkmal ist der kontrollierte Tropfenübergang und die Wiederezündung des Lichtbogens [28]. Dies wird durch eine mechanische Vor- und Rückwärtsbewegung des Schweißdrahts durch einen Elektromotor im Brenner bewerkstelligt. Die Tropfenablösung wird, im Gegensatz zu herkömmlichen MSG-Verfahren, durch die pulsierende Rückwärtsbewegung des Schweißzusatzdrahtes in der Kurzschlussphase zusätzlich begünstigt. Dadurch wird weniger Energie ins Material eingebracht und somit auch die thermische Belastung verringert [3].

Der Ablauf beim Tropfenübergang ist schematisch in Abbildung 9 dargestellt.

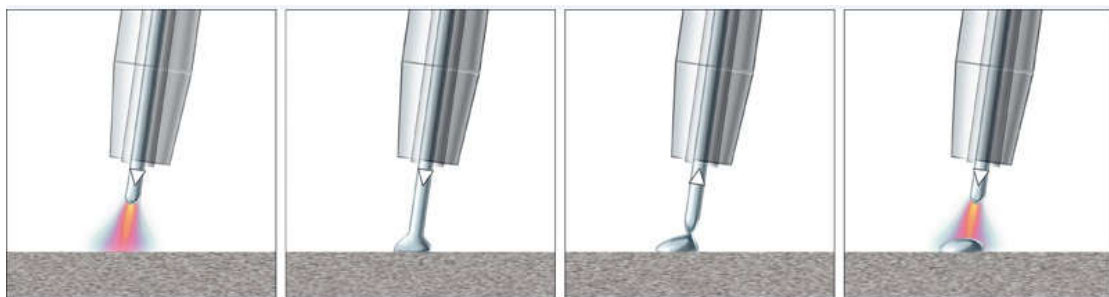


Abbildung 9: Prinzip der Tropfenablöse bei CMT [28]

Der Tropfenübergang und die Wiederezuführung der Drahtelektrode erfolgen fast stromlos. Dies hat zusätzlich eine Reduktion von Schweißspritzer zur Folge [28].

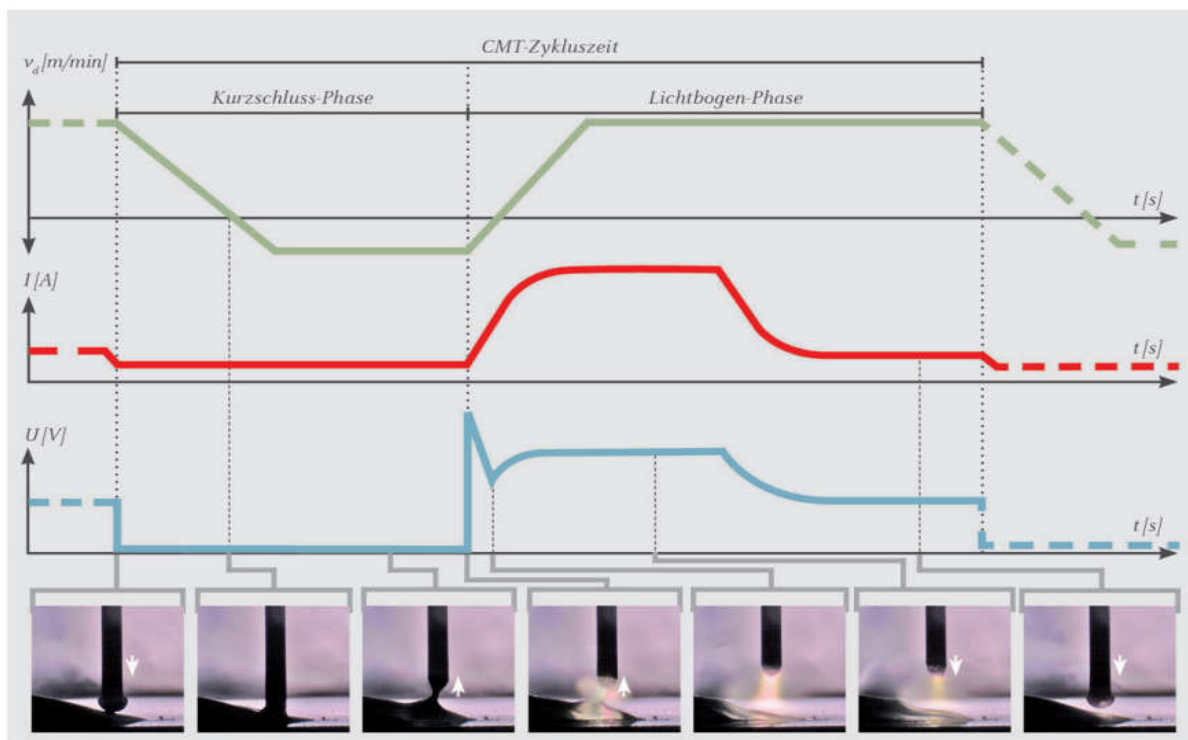


Abbildung 10: Drahtvorschub  $v_d$ , Schweißstrom  $I$ , Schweißspannung  $U$  während CMT Zyklus [28]

Die Lichtbogenlängenregelung erfolgt über ein mechanisches Wegmesssystem der Drahtelektrode, da aus wiederkehrenden Kurzschlüssen und definierter Rückbewegung auf die Länge des Lichtbogens geschlossen werden kann [28].

## 2.2.2 CMT Prozessvarianten

### CMT Synchronpuls

Der CMT Synchronpuls ist eine Prozessvariante bei der zwei Leistungsbereiche in einem Prozess kombiniert werden. Hier folgt auf eine Phase mit geringer Leistung und Drahtvorschub ein Zyklus mit hoher Leistung und großem Drahtvorschub [28].

Dies hat ein Schwingen des Schweißbades zur Folge. Es entsteht eine geschuppte Nahtoberfläche und es soll eine bessere Benetzung des Werkstückes erfolgen [28].

### CMT Pulse

CMT Pulse stellt eine Kombination aus Impulslichtbogen- und CMT Schweißprozess dar. Dabei werden zeitlich hintereinander CMT Zyklen mit Impulslichtbogen-Zyklen kombiniert. Der Übergang der Zyklen erfolgt in der Drahtrückzugsphase bzw. in der Kurzschlussphase des Impulslichtbogens. Die Kombination mit dem Impulslichtbogen führt zu einem erhöhten Wärmeeintrag bzw. erhöhter Streckenenergie [28].



## CMT Advanced

Bei dieser Verfahrensvariante wird der reversierende Drahtvorschub des CMT Verfahrens mit Polaritätswechsel der Elektrode kombiniert. Dieser Polaritätswechsel führt bei gleichem Wärmeeintrag zu einer erhöhten Abschmelzleistung der Elektrode.

Die Phase der positiven Elektrodenpolung ist für den Wärmeeintrag in den Grundwerkstoff und die Reinigung der Werkstückoberfläche verantwortlich, während in der Phase der negativen Elektrodenpolung die Abschmelzleistung im Verhältnis zur Wärmeeinbringung eingestellt wird [28].

## CMT Pulse Advanced

Stellt wiederum eine Kombination aus CMT Pulse und CMT Advanced dar, welche sich vom Standard CMT Prozess durch eine größere Wärmeeinbringung ins Werkstück mit zusätzlich größerer Abschmelzleistung der Elektrode hervorhebt [28].

### 2.2.3 CMT als AM Verfahren

Unter Direct Energy Deposition (DED) werden jene Verfahren zusammengefasst, bei denen gebündelte Energie, erzeugt von Laser, Elektronenstrahl, Plasma oder Lichtbogen, auf einen begrenzten Bereich des Grundmaterials einwirkt und bei dem der Schweißzusatz beim Aufbringen aufgeschmolzen wird [26], [29].

DED mit Metall in Pulver- oder Drahtform erlaubt die Produktion von Formen nahe der Endgeometrie. Für Schmiedegesenke ist eine nachgeschaltete CNC Bearbeitung unabdingbar, um geforderte Fertigungstoleranzen einzuhalten [20], [30].

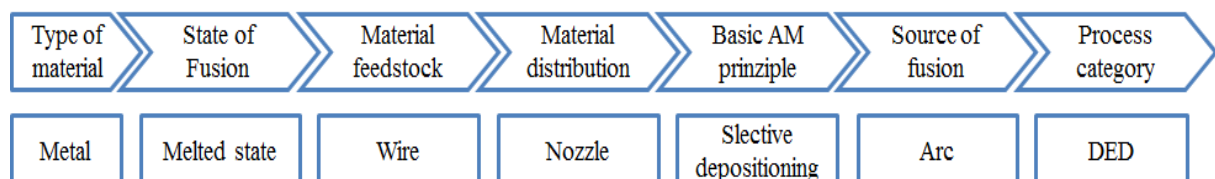


Abbildung 11: Klassifizierung CMT als AM Verfahren

## 2.3 Warmarbeitsstahl

Warmarbeitsstähle sind legierte Werkzeugstähle, die für Werkzeuge und Formen mit Einsatztemperaturen der Oberfläche im Allgemeinen von über 200°C konzipiert sind (DIN EN ISO 4957:1999). Bei Kontakt mit den heißen Werkstücken können dennoch Temperaturen von weit über 200°C auftreten [31].

Diese Stähle müssen sich neben den allgemeinen Eigenschaften eines Werkzeugstahls mitunter auch durch gute Warmfestigkeit, hoher Warmverschleißfestigkeit, guter Zähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Brandrissbeständigkeit und geringer Wärmeausdehnung hervorheben.

Gängige Legierungselemente für Warmarbeitsstähle sind neben Kohlenstoff, Chrom, Wolfram, Silizium, Nickel, Molybdän, Mangan, Vanadium und Kobalt [32].

### **Kohlenstoff**

Kohlenstoff, als wichtigstes Legierungselement, führt zu einer Erhöhung der Festigkeit und Härtebarkeit des Stahls. Steigender Kohlenstoffgehalt wiederum vermindert Dehnung, Schmiedbarkeit, Bearbeitbarkeit und Schweißbarkeit [33]–[36].

### **Chrom**

Durch Chrom wird Stahl luft- bzw. ölhärtbar. Die kritische Abkühlgeschwindigkeit wird herabgesetzt und somit die Härtebarkeit verbessert. Die Karbide des Chroms steigern Verschleißfestigkeit und Schnitthaltigkeit. Günstig für den Einsatz bei Warmarbeitsstählen ist die positive Auswirkung auf Warmfestigkeit und Zunderbeständigkeit [33]–[36].

### **Wolfram**

Mit Wolfram steigen die Zugfestigkeit, Streckgrenze und Zähigkeit der Legierung. Wolfram bildet harte Karbide, die bei Werkzeugstählen erwünscht sind. Steigende Verschleißfestigkeit und Warmfestigkeit durch Wolfram sind die Gründe für die Verwendung in Warmarbeitsstählen [33]–[36].

## **Silizium**

Silizium hat neben Mangan und Aluminium eine hohe Affinität zu Sauerstoff und wird daher als Desoxidationsmittel eingesetzt. Mit Silizium steigen Festigkeit und Verschleißfestigkeit der Legierung. Bei hohen Anteilen erhöht sich auch die Zunderbeständigkeit und Säurebeständigkeit [33]–[36].

## **Nickel**

Nickel findet vor allem als Austenitbildner Anwendung. Mit einem hohem Nickelgehalt können Stähle mit besonders kleiner Wärmeausdehnung eingestellt werden (Invar) [33]–[36].

## **Molybdän**

Molybdän wird meist in Kombination mit anderen Elementen legiert. Es unterstützt die Feinkornbildung und wirkt sich positiv auf die Schweißbarkeit aus. Bei hohen Molybdänanteilen wird zwar die Warmfestigkeit gesteigert, aber die Zunderbeständigkeit nimmt ab [33]–[36].

## **Mangan**

Mangan erhöht die Härbarkeit und Einhärtbarkeit. Streckgrenze und Festigkeit nehmen zu. Zusätzlich hat Mangan einen positiven Einfluss auf die Schmiedbarkeit und die Schweißbarkeit [33]–[36].

## **Vanadium**

Vanadium bindet Stickstoff und bildet bevorzugt Karbide. Diese Vanadiumkarbide stellen neben den Wolframkarbiden die thermisch stabilsten Karbide dar. Dadurch erhöhen sich die Warmfestigkeit und die Anlassbeständigkeit. Vanadium ist daher in vielen Legierungen, die als Warmarbeitsstahl, hochwarmfesten Stahl und Schnellarbeitsstahl verwendet werden [33]–[36].

## **Kobalt**

Kobalt hemmt das Kornwachstum, aber bildet dabei keine Karbide. Es wird die Warmfestigkeit stark verbessert und wird daher, wie Vanadium, gerne im Warmarbeitsstahl, hochwarmfesten Stahl und Schnellarbeitsstahl eingesetzt [33]–[36].

## Titan

Titan ist ein Karbidbildner und ein starkes Desoxidationsmittel. Es wird ebenfalls als Stabilisator in korrosionsbeständigen Stählen eingesetzt [33]–[36].

### 2.3.1 Schweißen von Warmarbeitsstahl

Beim Schweißen von warmfesten Werkzeugstählen ist darauf zu achten, dass das Werkstück vorgewärmt wird. Im Allgemeinen wird durch eine Vorwärmung die Abkühlgeschwindigkeit der Schweißnaht verringert. Wegen der Härbarkeit des Materials und dem Wärmeeintrag durch die Schweißung wird das betroffene Material in der Wärmeinflusszone gehärtet. Dies führt zu Spannungen und in weiterer Folge zu einer erhöhten Gefahr der Rissbildung. Diese Aufhärtung kann nun durch eine verminderte Abkühlgeschwindigkeit reduziert werden [37].

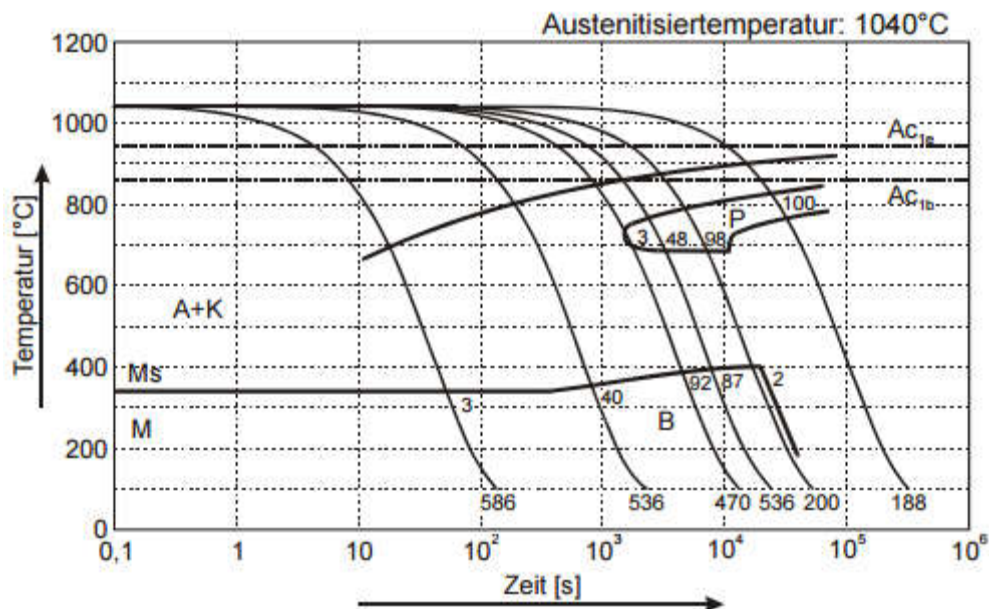


Abbildung 12: kontinuierliches ZTU Schaubild Grundmaterial (X40CrMoV5-1) [38]

Bei Vorwärmung über Martensitstart-Temperatur (Ms) kann die Ausbildung von Martensit während des Schweißvorganges vermieden werden [37].

Wie bei allen Schweißungen sollte die Schweißstelle gründlich bis auf das blanke Metall von Öl, Schmutz und Rost befreit werden, um somit die Gefahr von Verunreinigungen, Einschlüssen oder Wasserstoffversprödung zu minimieren [39].

## 2.3.2 Schöfflerdiagramm

Vor den Untersuchungen an den Proben kann mittels des Schöfflerdiagramms (Abbildung 13) das zu erwartende Gefüge abgeschätzt werden [40], [41].

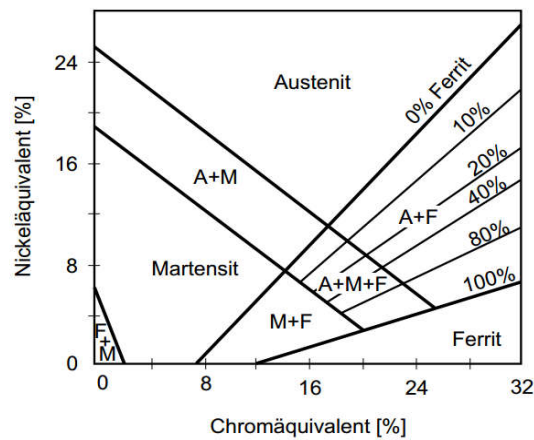


Abbildung 13: Schöfflerdiagramm [42]

Das Diagramm findet neben dem ZTU Diagramm vor allem bei Schweißanwendungen von nichtrostenden Stählen Anwendung.

Auf der Abszisse wird das Chromäquivalent und auf der Ordinate das Nickeläquivalent aufgetragen, beides berechnet nach Formel 1. Anhand des sich ergebenden Punktes kann das zu erwartende Gefüge abgelesen werden. Kennt man das Gefüge, kann man auf mögliche Problemen beim Schweißen schließen [42]. Die hier beschriebenen Formeln basieren auf Erfahrungswerten [43].

Formel 1: Berechnung Ni- und Cr- Äquivalent

$$\text{Ni- Äquivalent} = \% \text{ Ni} + 30 \% (\text{C} + \text{N}) + 0.5 \% \text{ Mn}$$

$$\text{Cr- Äquivalent} = \% \text{ Cr} + 1.4 \% \text{ Mo} + 1.5 \cdot \% \text{ Si} + 0.5 \cdot \% \text{ Nb} + 2 \cdot \% \text{ Ti}$$

## 2.4 Charakterisierung der Schweißungen

Zur Charakterisierung von Schweißverbindungen ist es üblich unterschiedliche Prüfungen einzusetzen. Dabei kann der Umfang der Prüfungen je nach Anwendungsgebiet bzw. geltenden Normen variieren.

### 2.4.1 Härtemessung nach Vickers

Die Härte ist definiert als der Widerstand, den ein Werkstoff dem Eindringen eines härteren Prüfkörpers entgegensetzt [44].

Ein Diamanteindringkörper in Form einer regelmäßigen Pyramide mit quadratischem Grundriss wird in die Oberfläche einer Probe mit vorgegebener Prüfkraft und Prüfdauer eingedrückt. Der entstandene Abdruck in der Prüffläche und die eingestellte Prüfkraft lassen einen Rückschluss auf die Härte des Prüflings zu [45].

Zur Versuchsdurchführung werden Proben mit glatter, metallisch blanker, sauberer und ebener Fläche benötigt [44], [45].

#### 2.4.2 Zugversuch nach DIN 50125:2009-07

Bei diesem Versuch wird eine Probe durch eine Zugbeanspruchung, im Allgemeinen, bis zum Bruch gedehnt, um eine oder mehrere definierte mechanische Eigenschaftswerte zu bestimmen. Die Zugversuche finden bei einer vorgegebenen Temperatur statt [46].

#### 2.4.3 Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy

Im Gegensatz zu statischen Werkstoffprüfverfahren können mit dem Kerbschlagbiegeversuch künstlich dreidimensionale Spannungszustände hervorgerufen werden. Dies erlaubt Aussagen über das Verhalten des Werkstoffes bei mehrachsigen Spannungen und schlagartigen Beanspruchungen [47].

Es werden die Kerbschlagarbeit und das Bruchverhalten bestimmt [48].

#### 2.4.4 Metallographie

Bei den metallographischen Untersuchungen der Schweißproben wird zwischen makroskopischen und mikroskopischen Methoden unterschieden [44].

Bei der Beurteilung des Makrogefüges werden vorwiegend größere Fehlstellen wie Lunker, Risse, Poren, bzw. typische Schweißcharakteristika wie Lagenaufbau und Ausdehnung von Wärmeeinflusszonen, untersucht [44].

Bei der mikroskopischen Betrachtung können, meist unter Zuhilfenahme von Ätzmitteln, sowohl der Gefügebau, die Phasengrenzen, die Gefügebestandteile, die Korngestalt, die Anordnung der Kristalle untersucht als auch Untersuchungen zur Aushärtung, Stahlhärtung, Diffusion, Verformung, Rekristallisation, Subkornbildung und Versetzungen durchgeführt werden [44].

In der Praxis werden mikroskopische Untersuchungen zur Beurteilung von Fehlstellen kleineren Ausmaßes verwendet (z. B. Inhomogenitäten, Zeilen, Einschlüssen, Rissen).

Das Mikroskop bietet weites die Möglichkeit zur Messung der Mikrohärté und der KorngröÙe [44].

# 3 Versuchsaufgaben und Durchführung

In den ersten Unterkapiteln werden die Durchführung der Schweißversuche zur Herstellung der Bauteilgeometrien und die daraus gefertigten Proben beschrieben.

Zuerst wird das für den Versuchsaufbau verwendete Equipment aufgelistet. Anschließend wird die Versuchsabfolge beschrieben und das Vorgehen begründet.

Abschließend werden die zur Charakterisierung der Ergebnisse angewendeten Untersuchungsmethoden, sowie die experimentelle Vorgehensweise vorgestellt.

## 3.1 Equipment und Methoden

### 3.1.1 Schweißanlage

Für die Experimente stand der in Abbildung 14 im Prinzip dargestellte Schweißaufbau mit der in Tabelle 1 angeführten Komponenten zur Verfügung.

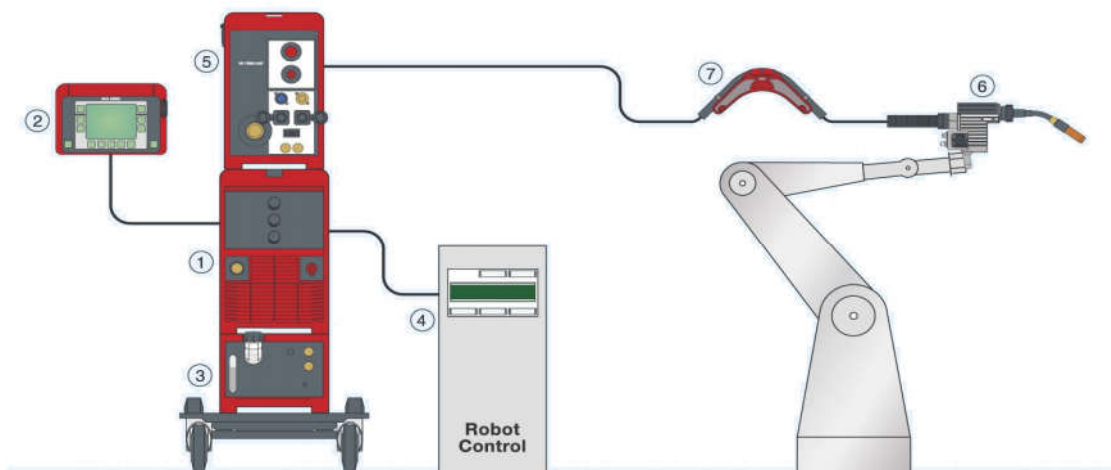


Abbildung 14: Schweißanlage (Quelle: [www.fronius.com](http://www.fronius.com))



Tabelle 1: Komponenten Schweißanlage

NR.	BEZEICHNUNG	BESCHREIBUNG
1	TPS 4000 CMT	digitale Stromquelle
2	RCU 5000i	Handbediengerät Schweißstromquelle
3	FK 4000 R	Kühleinheit
4	ABB IRC5	Roboter Schnittstelle
5	VR 7000 CMT	Drahtvorschub
6	Robacta Drive CMT	Roboterschweißbrenner mit Schlauchpaket
7		Drahtpuffer

Abbildung 15 zeigt die Anlage, wie sie im Schweißlabor des Institutes für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik für die Durchführung der Versuche zur Verfügung stand.

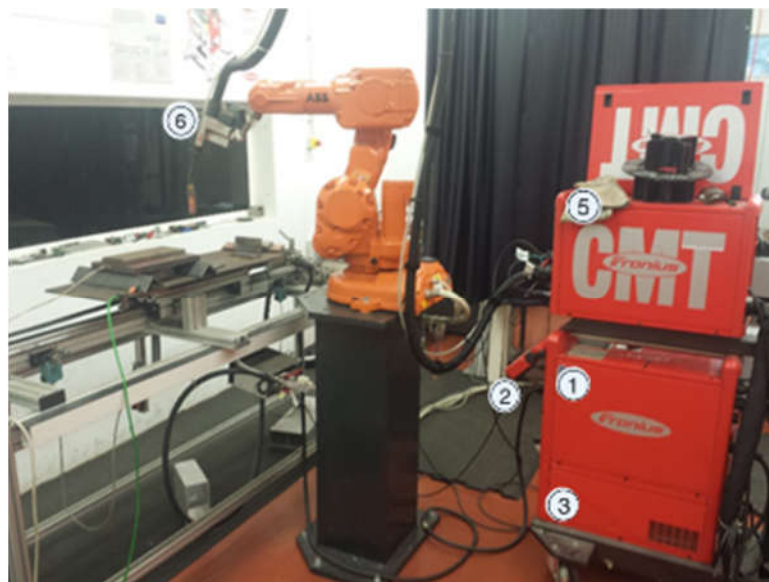


Abbildung 15: Schweißanlagenkonfiguration am IWS

Für die Versuche stand ein ABB IRB 140-6/0.8 Industrieroboter zur Verfügung. Der Aktionsradius des 6 Achsen Roboters liegt bei 0,8m und die Nutzlast beträgt 6kg. Die Kommunikation mit der Schweißstromquelle erfolgte über die Roboter Schnittstelle ABB IRC5.

### 3.1.2 Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung der Versuche kamen Thermoelemente Typ K zum Einsatz. Es wurden die Temperaturen des Grundmaterials bei der Vorwärmung und einzelne Lagentemperaturen der Schweißgeometrie (Abbildung 16) gemessen.

Das Element für die Temperaturmessung der Grundplatte wurde per Kondensatorentladungsschweißung geheftet. Die Thermoelemente für die Messung der Lagentemperatur wurden manuell während der Schweißung in das Schweißbad getaucht.

Thermoelemente Lage 23

Thermoelemente Lage 18

Thermoelemente Lage 14



Abbildung 16: Lage der Thermoelemente bei Schweißgut

Bei einer maximalen Einsatztemperatur bei NiCr-Ni (NiCr-NiAl) Elementen von 1200°C [49], ist das Ziel der Messung nicht die Bestimmung der Schweißbadtemperatur, sondern das Aufzeichnen der Temperaturkurve, die durch die Erwärmung der benachbarten und der darüber liegenden Schweißspuren entsteht. Die Messung und Speicherung der Temperaturen erfolgte mit 1Hz.

### 3.1.3 Vorwärmeinrichtung

Für die Vorwärmung stand eine Heizplatte mit einer effektiven Heizfläche von 300 x 200mm zur Verfügung (Abbildung 17). Die Heizfläche wird von einem stufenlos einstellbaren Gleichspannungsnetzteil mit einer maximalen Leistung von 1,5kW versorgt.



Abbildung 17: Heizplatte und Gleichspannungsnetzteil

Für alle Versuche war eine Vorwärmung des Grundwerkstoffes mittels Heizelement von mindestens 350°C notwendig [38]. Die Temperaturmessung erfolgte mit dem Thermoelement das auf der Oberseite der Grundplatte angeschweißt war. Der hier verwendete Aufbau lässt keine Regelung zu.

### 3.1.4 Roboterprogrammierung

Um den Brenner in der vorgesehenen Schweißfolge und der angestrebten Konturverfahren zu lassen, wird ein Programm mit den notwendigen Fahrbefehlen und dazugehörigen Koordinaten benötigt.

Ab der Vorversuchsserie VV02 wurde diese Programmierung offline in einem Standardtexteditor durchgeführt. Für den zu Verfügung stehenden Industrieroboter der Firma ABB musste die herstellereigene Programmiersprache RAPID verwendet werden. Zusätzlich zu der ABB Syntax sind die Befehle für die Ansteuerung der Fronius Anlage notwendig. Beispiel dafür ist die Vorgabe eines an der Schweißstromquelle voreingestellten Parametersatzes. Die Werte für Anlauf, Auslauf, Spülzeiten für Schutzgas und die Einzelparameter des Vorwahlparametersatzes werden an der Schweißstromquelle eingestellt.

Die so erstellten Textfiles müssen mit der Endung .mod abgespeichert werden. Das Programm kann dann direkt ohne Kompilierung auf die Robotersteuerung übertragen werden. Die Programme wurden im konkreten Fall per USB-Stick von der Arbeitsstation auf die Steuerung des Roboters übertragen.

Von der Verwendung der ABB Programmierumgebung ABB RobotStudios wurde bei der Programmierung abgesehen, da die Fronius spezifischen Befehlssätze in der ABB Programmbibliothek nicht enthalten waren und somit kein Mehrwert generiert werden konnte.

#### **MultiLage.mod**

Für die einspurigen (Abbildung 20, S.45) und mehrspurigen (Abbildung 21, S.45) Multilagenversuche der Vorversuchsreihen wurde das Programm MultiLage.mod erstellt. Mit diesem Programm ist es möglich, die Anzahl und die Abmessungen der Spuren und Lagen beliebig vorzugeben. Die Schweißrichtung der Lagen kann deckungsgleich oder alternierend erfolgen. Die Höhe der einzelnen Lagen wird nicht während der Schweißung ermittelt, sondern muss vorher im Programm angegeben werden. Es ist eine Wartezeit zwischen den Lagen vorgesehen (s. Anhang Abbildung 46, S.75).

## **Rechteck.mod**

Bei der finalen Geometrie (Abbildung 23, S.49) kam das Programm Rechteck.mod zum Einsatz. Die Maße der Außenkontur (Breite und Tiefe) können separat vorgegeben werden. Die Maße, der von der Außenkontur umrandeten Spuren, leiten sich von der eingestellten Breite der Einzelnähte und deren Anzahl ab. Wie bei MultiLage.mod muss die Höhe einer Lage und die Breite einer Spur bekannt sein und im Programm angegeben werden.

Die Lagen werden spiralförmig, ohne Absetzen des Brenners erstellt. Ungerade Lagennummern werden gegen den Uhrzeigersinn von außen nach innen geschweißt. Gerade Lagennummern im Uhrzeigersinn von innen nach außen.

Auch bei diesem Programm ist eine Wartezeit zwischen jeder Lage einstellbar (s. Anhang Abbildung 47, S.76).

### **3.1.5 Verwendete Werkstoffe**

Der Grundwerkstoff (GM) ist der Warmarbeitsstahl X40CrMoV5-1 mit der Böhler Produktbezeichnung W302. Es handelt sich hierbei um einen Warmarbeitsstahl mit der Werkstoffnummer 1.2344.

Er findet vor allem Anwendung in Gesenken bis zu größten Abmessungen, Werkzeugen für das Rohr- und Strangpressen, Formteilpressgesenken, Biegewerkzeugen, Prägwerkzeugen und Kunststoffformen [50].

Aufgrund des Chromgehalts ist der Stahl zwar bedingt korrosionsbeständig aber nicht rostfrei.

Die angelieferten Grundplatten haben eine Dicke von  $t=24\text{mm}$ . Für eine bessere Handhabung und eine erleichterte Vorwärmung wurden alle Bleche auf ein rechteckiges Maß von ca.  $250 \times 120\text{mm}$  zurechtgeschnitten. Die 250mm ergaben sich aus den Anlieferungsabmessungen und die 120mm aus der 100mm Katenlänge für das Versuchsbauteil plus Überstand (s. Abbildung 23, S.49). Die Bleche wurden im weichgeglühtem Zustand angeliefert.

Der verwendete Schweißzusatz (SZ) UTP A 73 G 3 eignet sich aufgrund seiner hohen Festigkeit, Zähigkeit und Wärmebeständigkeit für den Einsatz bei erhöhten Temperaturen. Dieser Werkstoff wird zur Reparatur und zum Auftragen von Verschleißschich-

ten bei Warmarbeitswerkzeugen verwendet. Die Härte des Schweißgutes liegt laut Datenblatt bei 412-459 HV10 [51]. Basierend auf DIN EN180 18265 (2004-02) entspricht die Härte einer gerechneten Zugfestigkeit von 1327 MPa bis 1481 MPa.

Der Schweißzusatz stand als 15kg Rolle mit einem Drahtdurchmesser von 1,2mm zur Verfügung.

Tabelle 2: Nominelle Zusammensetzung der Materialien in Gew.% [38], [51].

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ti
<b>W302 (GM)</b>	0,39	1,1	0,4	5,2	1,4	0,95	-
<b>UTP A73 G3 A (SZ)</b>	0,25	0,5	0,7	5,0	4,0	-	0,6

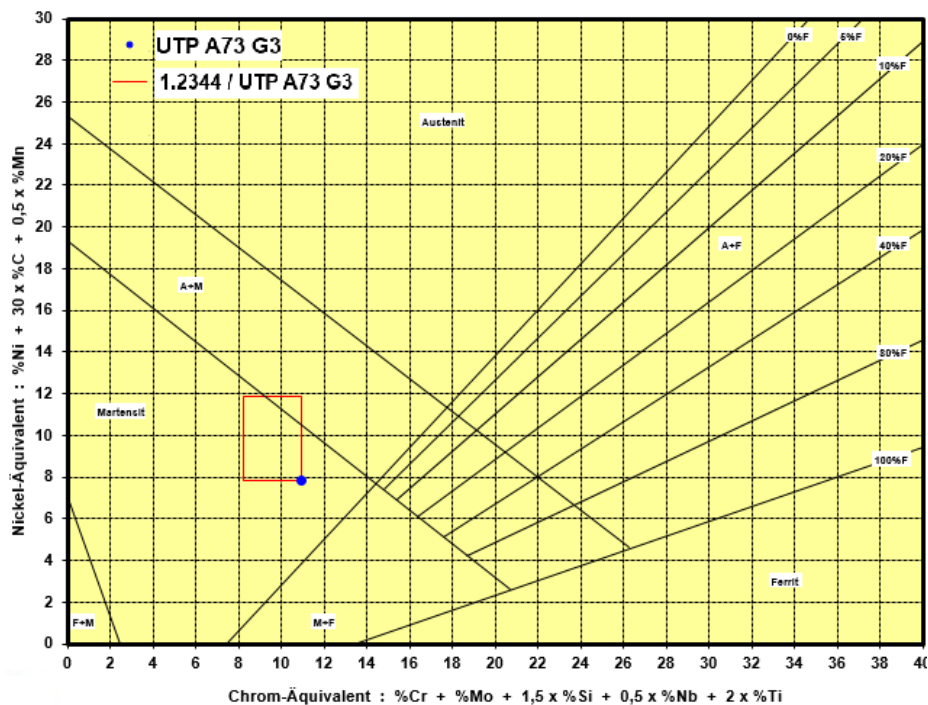


Diagramm 1: Gefüge nach Schöffler Quelle: [www.metallograf.de](http://www.metallograf.de)

Tendeziell liegt das Schweißgefüge und somit das Gesamtgefüge der Schweißprobe im martensitischen Gefügebereich (siehe rotes Rechteck in Diagramm 1). In diesem Bereich neigt das Material zu Warm- und zu Härterissen [52].

Mit zunehmender Lagenzahl kann von reinem Schweißzusatz in der Schweißung ausgegangen werden. Dieses Gefüge wird von dem blauen Punkt in Diagramm 1 dargestellt.

### 3.1.6 Wärmebehandlung

Bei allen Schmiedewerkzeugen wird bei der Fa. Böhler Schmiedetechnik nach einer Reparaturschweißung eine Wärmebehandlung durchgeführt. Daher wurden alle, im Zuge dieser Arbeit gefertigten Bauteile und Proben derselben Wärmebehandlung (Diagramm 2) unterzogen. Um den Einfluss der Wärmebehandlung auf die Härte nachzuvollziehen, wurden Härtemessungen vor und nach den Wärmebehandlungen durchgeführt.

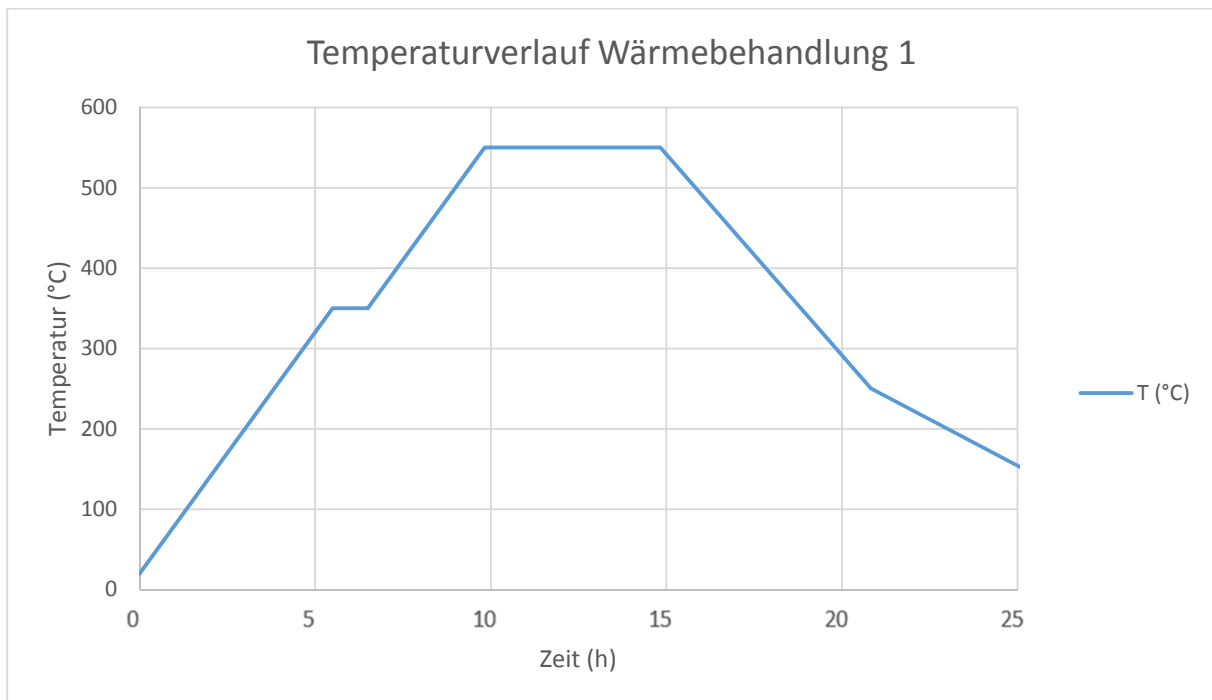


Diagramm 2: Wärmebehandlung 1 bei Vorversuchen

Die Hauptversuchsprobe (Abbildung 23, S.49) wurde einer anderen Wärmebehandlung (Diagramm 3) unterzogen als die Proben der Vorversuche. Die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten beider Verläufe unterscheiden sich deutlich.

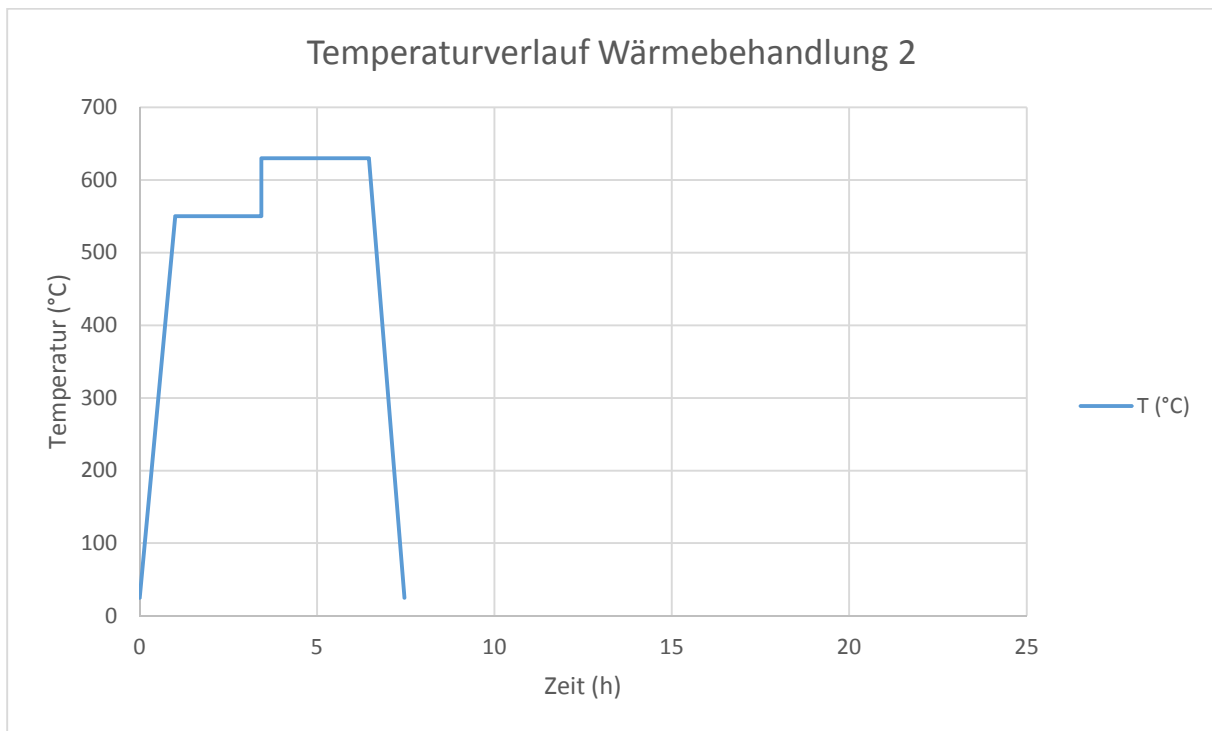


Diagramm 3: Wärmebehandlung 2 für Hauptversuch

Bei der angepassten Wärmebehandlung 2 wurden bei beiden Haltepunkten die Halte-temperaturen angehoben.

### 3.1.7 Härtemessung

Es wurden Härtemessungen nach Vickers mit einer Prüfkraft von 1kp (HV1) und mit 10kp (HV10) durchgeführt.

Zur Versuchsdurchführung wurden Proben mit glatter, metallisch blanker, sauberer ebener Fläche benötigt [44], [45]. Daher wurden für diese Untersuchungen die Proben der Mikrostrukturuntersuchungen der VV02 und VV03 herangezogen. Es wurde die Vickershärten mit einer Prüfkraft entsprechend 1HV entlang von Prüflinien bestimmt. Der Abstand zwischen den Prüfpunkten beträgt 0,5mm. Die Anzahl der Messpunkte richtet sich nach der Höhe der jeweiligen Schweißungen.

### 3.1.8 Zugversuch

Die Zugversuche wurden nach DIN 50125:2009-07 bei Raumtemperatur durchgeführt.

Um die zu erstellende Geometrie des Schweißversuchs klein zu halten, wurden Rundproben mit Gewindeköpfen nach DIN 50125 – B6x30 [53] gewählt. Die Länge dieser Proben ist mit 60mm um 5mm länger als die Kerbschlagbiegeprobe und ist somit als

größte zu erstellende Probe ausschlaggebend für die Gesamtabmessungen der im Versuch herzustellenden Geometrie.

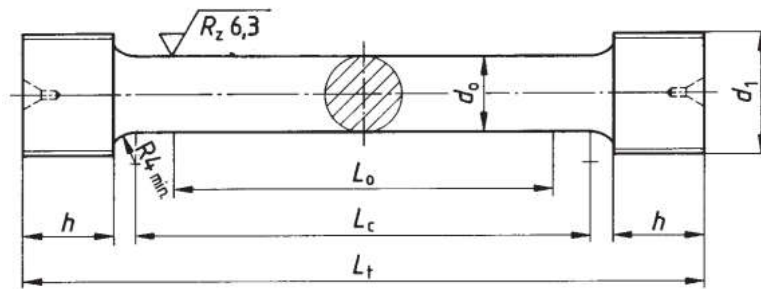


Abbildung 18: Zugprobe Form B [53]

$d_0$	$L_0$	$D_1$	$R$	$H$	$L_c$	$L_t$
6	30	M10	5	8	36	60

Tabelle 3: Maße in mm Zugprobe Form B6x30 [53]

Die Zugversuche wurden mit einer Kraft von 200N vorgespannt und mit einem konstanten Vorschub von 1mm/min bis zum Bruch gezogen.

### 3.1.9 Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy

Für die Versuche kommen V-Kerbproben nach DIN EN ISO 148-1:2011-01 zur Anwendung. Die Proben werden bei der niedrigsten noch erlaubten Einsatztemperatur der Schmiedewerkzeuge von 210°C geschlagen. Hier ist sichergestellt, dass der Werkstoff nicht mehr in der Tieflage geschlagen wird.

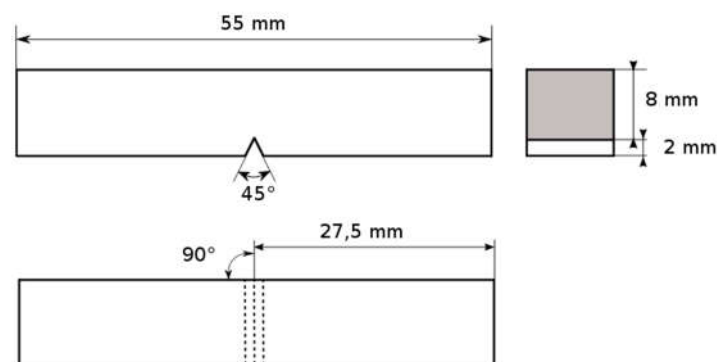


Abbildung 19: V-Kerbprobe [48]

### 3.1.10 Metallographische Untersuchungen

Für jede angeführte Schweißung aller Vorversuchsreihen wurde eine Probe für die metallographischen Untersuchungen angefertigt. Es wurde dafür Sorge getragen,



dass die verwendeten Querschliffe aus einem Bereich außerhalb der An- und Auslaufstrecken entnommen wurde.

Für die Untersuchungen der Hauptprobe kamen die dafür vorgesehenen Mikrostrukturproben zum Einsatz (s. Abbildung 24).

Die entnommenen Proben wurden im schwarzen MultiFast Warmeinbettmittel der Fa. Struers GmbH eingebettet, danach geschliffen und poliert.

Für die Makroaufnahmen wurden die Proben mit einem 5%-igen Nital Ätzmittel für ca. 2 Minuten behandelt. Für die Mikrostrukturuntersuchungen kam ebenfalls 5%-iges Nital zur Anwendung. Die Ätzdauer beschränkte sich dabei auf ca.15s.

Für die mikroskopischen Untersuchungen stand ein Zeiss Axio Observer Inverted Auflichtmikroskop mit einer maximalen Vergrößerung von 1250 zur Verfügung.

### 3.1.11 Vorgehensweise Schweißversuche

Die durchgeführten Schweißungen in dieser Arbeit teilen sich in Vorversuchsreihen (VV01-VV03, s. 3.2.1) und die eigentliche Fertigung der schlussendlich charakterisierten Proben des Hauptversuches (HV, s 3.3.1).

Tabelle 4: Übersicht Versuchshistorie

<b>KÜRZEL</b>	<b>BESCHREIBUNG</b>	<b>PRIMÄRER ZWECK</b>
<b>VV01</b>	Vorversuchsreihe 01	Machbarkeit überprüfen
<b>VV02</b>	Vorversuchsreihe 02	Parameterstudie
<b>VV03</b>	Vorversuchsreihe 03	Probenerstellung für Werkstoffkennwerte
<b>HV</b>	Hauptschweißung	Umsetzung repräsentative Geometrie

Die Nummerierung und Anordnung der in Tabelle 4 angeführten Versuche bildet auch die zeitliche Reihenfolge der Schweißungen ab.

### 3.1.12 Schweißparameter

Für alle Schweißungen gelten die Schweißparametersätze aus Tabelle 5. Die Parameter decken den Leistungsbereich der Schweißstromquelle ab.

Tabelle 5: Schweißparameterkonfigurationen der CMT Schweißstromquelle

Satz	Strom (A)	Spannung (V)	Drahtvorsch. (m/min)	Streckenenergie (kJ/cm)	Theoretische Abschmelzleistung	
					(mm <sup>3</sup> /s)	(kg/h)
A	100	11.2	2.2	1.1	41	1.2
B	160	13.6	4.8	2.1	90	2.5
C	223	14.7	7.2	3.2	134	3.8
D	250	20.0	8.3	5.0	156	4.4

Da prozessbedingt von einer 100%igen Umsetzung des Schweißzusatzes ausgegangen werden kann, ist die Abschmelzleistung mit der Baurate gleichzusetzen.

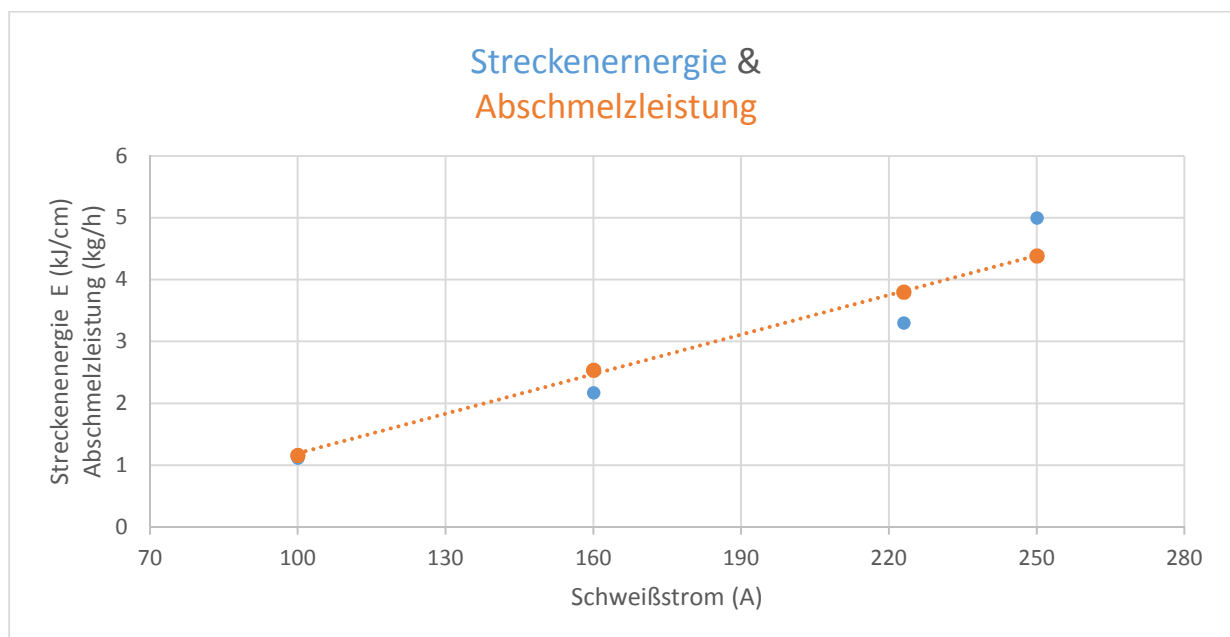


Diagramm 4: Energie und Baurate über Leistungsbereich Stromquelle

### 3.1.13 Sonstige Schweißparameter

Um die Anzahl der beeinflussenden Parameter zu verringern und die Vergleichbarkeit zu erleichtern, wurden die verbleibenden hier angeführten Schweißparameter bei allen Versuchen (Vorversuche und Probenfertigung) gleich belassen.

- Verwendung des CMT-Standard Prozesses. Von einer Beeinflussung des Lichtbogens mittels CMT Lichtbogenkorrektur und CMT Lichtbogendynamik wurde abgesehen.
- Entsprechend der Schweißanweisung für den gewählten Schweißzusatzdraht wurde eine neutrale Brennerstellung gewählt [51]. Diese Stellung, bei der der Brenner normal auf die Arbeitsebene steht, erleichtert auch die Programmierung und Versuchsdurchführung, da keine Nachführung des Brenners bei einem Richtungswechsel angedacht werden muss.
- Konstante Schweißgeschwindigkeit ( $v_s$ ) von 10mm/s.
- Um die Einflüsse von An- und Auslaufstrecke abzumindern, wurden die Lagen ab VV02 in alternierender Richtung geschweißt.
- Ab VV02 wurde eine Abkühlzeit von 60 Sekunden nach jeder Lage eingehalten (automatischer Schweißablauf). Zwischen den Spuren war neben den Positionierzeiten des Brenners keine Abkühlzeit vorgesehen.
- Das Grundmaterial wurde mithilfe der gezeigten Heizung auf 400°C vorgewärmt. Nach Erreichen der Zieltemperatur des Grundmaterials wurde die Zusatzheizung bis zum Ende der Schweißung abgestellt. Die Abkühlung der Versuche erfolgte an der Luft.
- Als Schutzgas kam CORGON 18 mit einer Durchflussmenge von 15l/min zum Einsatz. Es handelt sich dabei um Argon Prozessgas mit einem 18%igem Kohlendioxidanteil.

## 3.2 Schweißstudien

Die ersten Schweißungen in dieser Arbeit wurden wie folgt mit entsprechender Zielsetzung durchgeführt:

- Vorversuchsreihen 01 – 02 (VV01, VV02):
  - Vertraut machen mit der Anlage und dem Prozess
  - Machbarkeitsstudien
  - Relevante Einflussgrößen und Prozessparameter identifizieren
  - Feststellen der Geometrie bei unterschiedlichen Lagenbildern und Schweißparametern
    - Lagenhöhe
    - Spurbreite
  - Eingrenzen von Schweißparametersätzen aufgrund von:

- Ungeeignetem Wärmeeintrag  
(Kriterien: unzureichende Benetzung bzw. zu starkes Ausfließen)
- Ungeeignetem Lagenaufbau hinsichtlich Geometrie
- Vorversuchsreihe 03 (VV03)
  - Fertigung einfacher Wände für Vorab-Probenerstellung mit verbliebenen Parametersätzen
  - Identifizierung des optimalen Parametersatzes anhand eines Vergleichs der mechanischen Eigenschaften der gefertigten Proben

Für die möglichst erfolgreiche Erreichung dieser Zielsetzungen, wurden auch die Vorversuche in einzelne Serien unterteilt. Der Hintergedanke dabei war, die eigentliche Probenfertigung erst nach Erarbeitung des notwendigen Prozess-Know-Hows und der Eruierung eines optimalen Parametersatzes zu beginnen.

Es wurde eine Versuchsreihe VV01 mit online Teach-in, sowie Versuchsreihen VV02 und VV03 mit offline Programmierung, mit dazugehöriger Parameterwahl durch Analyse der Geometrie und der Materialkennwerte, durchgeführt.

### 3.2.1 Bezeichnungssystem Vorversuche

Für die Dokumentation wurde folgende systematische Bezeichnungsform festgelegt:

Tabelle 6: Nomenklatur Vorversuche (VV)

#### **VVXX-A-NxM/YY**

<b>VV</b>	Vorversuch
<b>XX</b>	Nummer der Vorversuchsreihe
<b>A</b>	Parameterkonfiguration (Tabelle 4)
<b>NxM</b>	geometrische Konfiguration N...Anzahl Spuren M...Anzahl Lagen
<b>YY</b>	Laufende Nr. bei mehrmaligem Versuch mit gleichen Konfiguration

### 3.2.2 Einspurige Mehrlagenschweißungen

Die einspurigen Schweißungen wurden durchgeführt, um den Einfluss der Schweißparameter auf den Höhenzuwachs und die Änderung der Breite der übereinanderliegenden Lagen zu vergleichen.

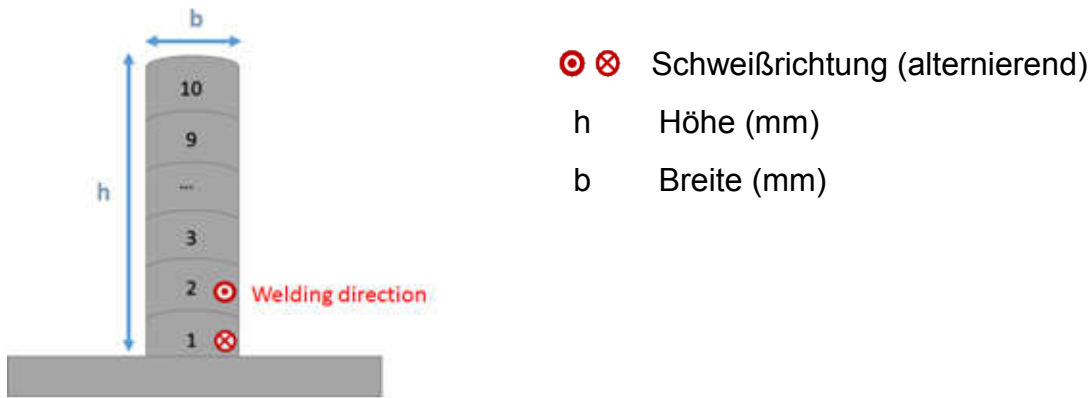


Abbildung 20: Lagenaufbau Vorversuche einspurig mehrlagig (1x10)

### 3.2.3 Mehrspurige Mehrlagenversuche

Die mit einer Spur erreichbaren Breiten der Schweißung reichen nicht für angestrebte Reparaturanwendungen, daher sind Versuche mit einer mehrspurigen Konfiguration unabdingbar. Neben den allgemeinen Schweißparametern beeinflussen verschiedene Spurabstände die Abmessungen der mehrspurigen Schweißung.

Die Spurabstände müssen so gewählt werden, dass sich ein schnellstmögliches Wachstum der Geometrie in Kombination mit einer vollständigen Benetzung des Grundmaterials und der benachbarten Schweißspuren einstellt. Das Ziel ist ein dichter und homogener Aufbau des geschweißten Materials.

Für die ersten Anläufe wurden Spurabstände im Bereich von ca. 2/3 bis zu 3/4 der Einzelspurbreite angestrebt [54].

Aus dem Material der mehrspurigen Versuche sollen auch Kerbschlagbiege- und Zugproben generiert werden.

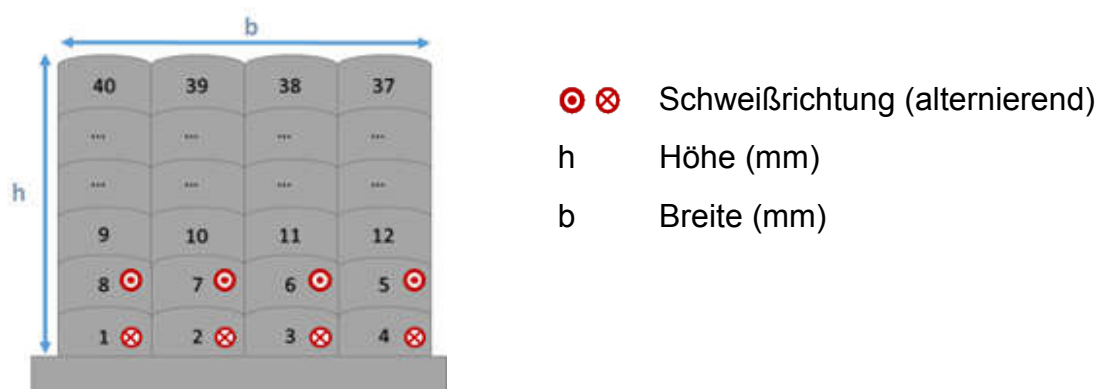


Abbildung 21: Lagenaufbau Vorversuche mehrspurig und mehrlagig (4x10)

### 3.2.4 Handprogrammierte Schweißungen: VV01

Die ersten mehrlagigen Schweißungen wurden mit dem Handbedienterminal des Roboters „geteacht“ (online Programmierung). Dabei wurde der Roboterkopf mit dem Brenner nach jeder Schweißspur manuell zur Startposition der neuen Spur geführt. Eine exakte Einhaltung der gleichen Startposition der vorangegangenen Spur ist hier nicht möglich.

Um den Einfluss der Positioniergenauigkeit und der Unterschiede bei einer online und offline Programmierung (PC) aufzuzeigen, wurde beim zweiten Durchgang (VV01-C-3x6/02) von Schweißung VV01-C-3x6/01 bereits das ‚Wand Programm‘ (MultiLage.mod, s. Anhang Abbildung 46) verwendet.

Tabelle 7: Konfigurationen der VV01- Schweißungen

	einspurig	mehrspurig
	VV01-C-1x6	VV01-C-3x6/01
	VV01-B-1x6	VV01-C-3x6/02

### 3.2.5 Offline programmierte Schweißungen VV02

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus VV01 wurde für die Vorversuchsreihe VV02 ein offline erstelltes Programm für die Roboterschweißanlage verwendet. Dabei wurden sowohl die Abmessungen als auch die Wartezeiten zwischen einzelnen Schweißraupen und Schweißlagen voreingestellt (MultiLage.mod).

Die Schweißparameter wurden aus der Vorversuchsreihe VV01 übernommen und erweitert, um die Grenzen des Leistungsspektrums der Schweißstromquelle zu identifizieren.

Die Spuren-Lagenkonfigurationen von VV02 sind in der Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Konfigurationen der VV02- Schweißungen

	einspurig	mehrspurig
	VV02-A-1x10	VV02-A-3x10
	VV02-B-1x10	VV02-B-4x10
	VV02-C-1x10	VV02-C-3x10
	VV02-D-1x10	

### 3.2.6 Vorab-Probenfertigung VV03

Bei der finalen Vorversuchsreihe VV03 sind alle Parameter und Einstellungen gleich wie bei VV02.

Bei diesen Versuchen wurde, mit den nicht disqualifizierten Parametersätzen, jeweils eine Wand so aufgebaut, dass genug Volumen für Kerbschlagbiegeproben und Zugversuchsproben mit Gewindeköpfen vorhanden ist.

Tabelle 9: Konfigurationen der VV03- Schweißungen

	mehrspurig
	VV03-B-4x35
	VV03-C-3x35

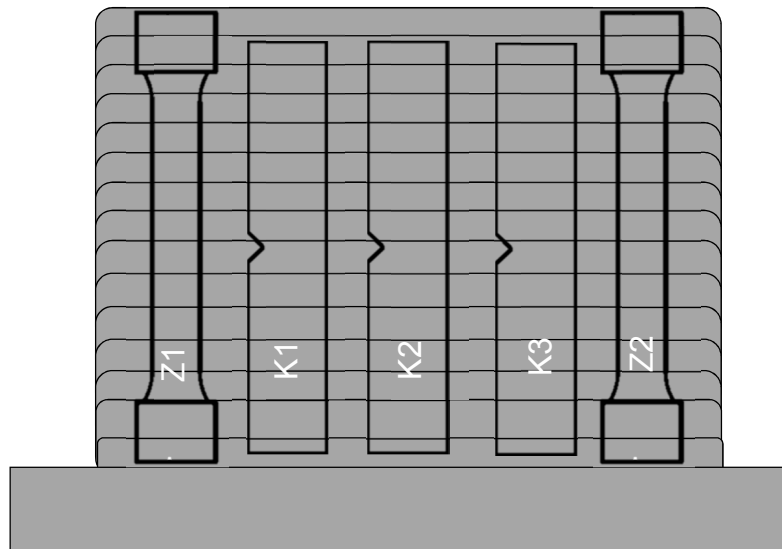


Abbildung 22: Probenplan für VV03-B-4x35 und VV03-C-3x35

Das Ziel der Vorversuchsreihen war es, neben den geometrischen Unterschieden der Schweißungen bzgl. verschiedener Parametersätze, auch potentielle Abweichungen der Materialkennwerte festzustellen. Anhand der gesammelten Daten soll eine Entscheidung getroffen werden, mit welcher Konfiguration die entscheidende Geometrie gefertigt werden soll. Die Intention war, aufgrund der Materialkennwerte des Kerbschlagversuches und/oder Zugversuches eine qualifizierte Aussage treffen zu können.

### **3.3 Bauteilversuch**

Bei dieser zweiten Serie an Schweißungen war die Zielsetzung die Fertigung der Proben für die schlussendliche Charakterisierung. Die Geometrie wurde so festgelegt, dass ausreichend Schweißgutvolumen vorhanden ist, um die Anzahl der gewünschten Versuchsproben fertigen zu können.

Zusätzlich soll die Form und Größe der Schweißprobe dem Anspruch eines additiven gefertigten Bauteils gerecht werden.

#### **3.3.1 Schweißgeometrie**

Als Probenform hat sich ein Quader mit äußeren Kantenlängen von mindestens 100 x 100mm und einer Höhe von 70mm ergeben. Die Wände müssen eine konstante Dicke von min. 10mm haben, um die geplanten Proben fertigen zu können. Daher wurde eine Wandstärke von ca. 15mm angestrebt. Die Grund- und Deckfläche sind offen.



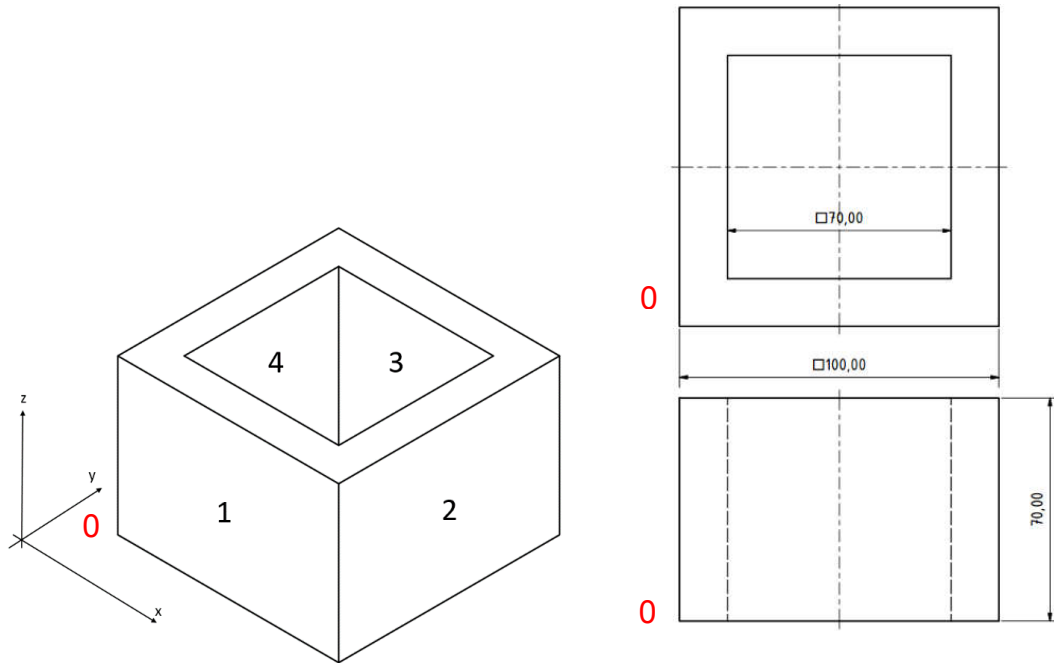


Abbildung 23: Schweißgeometrie mit Seitennummerierung und Abmessungen

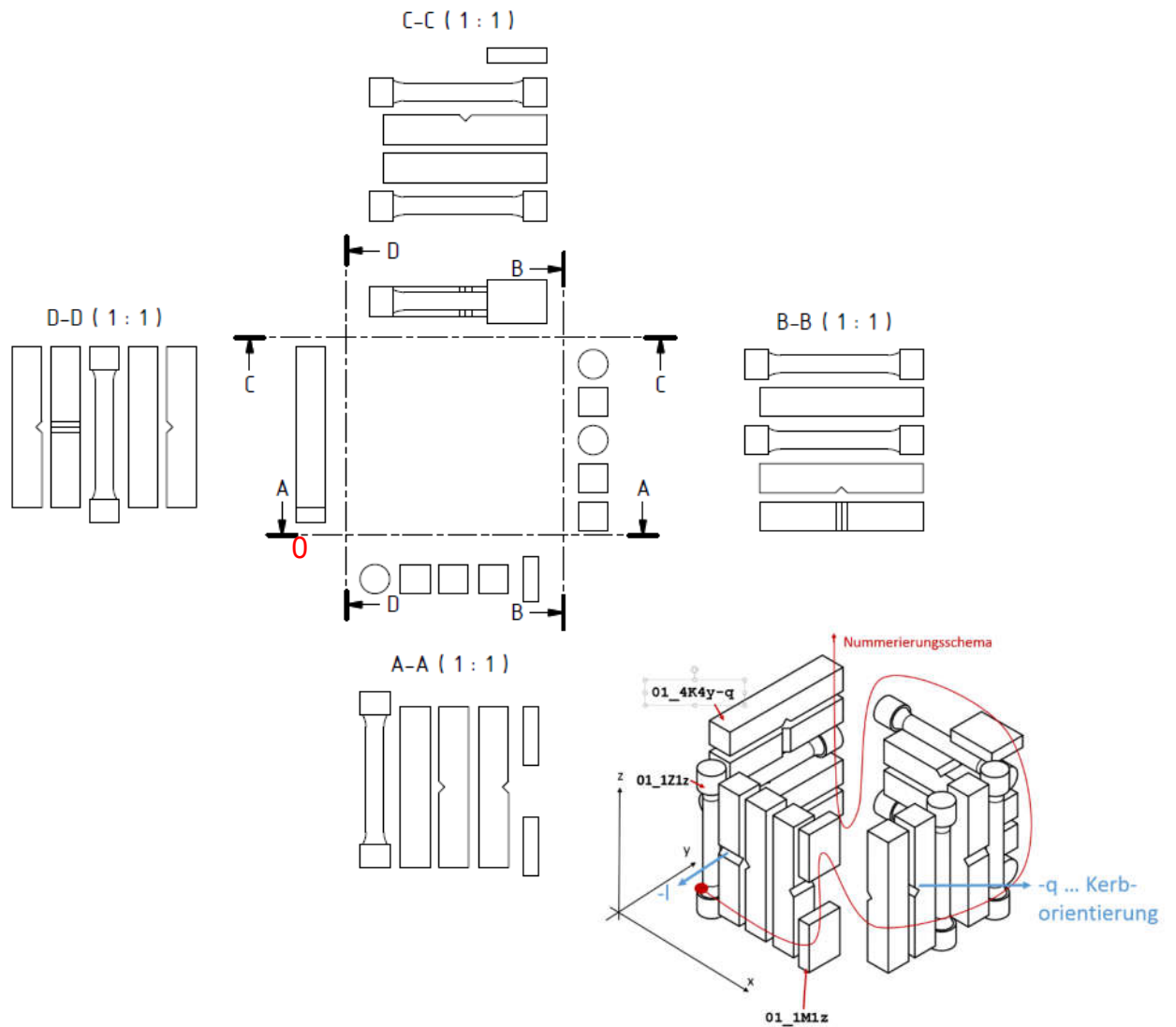


Abbildung 24: Beprobungsplan

Tabelle 10: Benennung Versuchsproben

PROBENUMMER	BEZEICHNUNG	SCHWEIßUNG	SEITE	PRÜFUNG	NR.	LÄNGS-AUSRICHTUNG	KERBORIENTIERUNG
1	01_1Z1z	01	1	Zug	1	z	
2	01_1K1z-l	01	1	Kerbschlag	1	z	-l
3	01_1K2z-q	01	1	Kerbschlag	2	z	-q
4	01_1K3z-q	01	1	Kerbschlag	3	z	-q
5	01_1M1z	01	1	Mikro	1	z	
6	01_1M2z	01	1	Mikro	2	z	
7	01_2K1z-l	01	2	Kerbschlag	1	z	-l
8	01_2K2z-q	01	2	Kerbschlag	2	z	-q
9	01_2Z1z	01	2	Zug	1	z	
10	01_2K3z-l	01	2	Kerbschlag	3	z	-l
11	01_2Z2z	01	2	Zug	2	z	
12	01_3Z1x	01	3	Zug	1	x	
13	01_3K1x-n	01	3	Kerbschlag	1	x	-n
14	01_3K2x-q	01	3	Kerbschlag	2	x	-q
15	01_3Z2x	01	3	Zug	2	x	
16	01_3M1x	01	3	Mikro	1	x	
17	01_4K1y-q	01	4	Kerbschlag	1	y	-q
18	01_4K2y-n	01	4	Kerbschlag	2	y	-n
19	01_4Z1y	01	4	Zug	1	y	
20	01_4K3y-n	01	4	Kerbschlag	3	y	-n
21	01_4K4y-q	01	4	Kerbschlag	4	y	-q

# 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Vorversuchsreihen und die, des schluss-  
endlichen Bauteiles, des Hauptversuches aufgeführt.

## 4.1 Ergebnisse Vorversuche

### 4.1.1 Einfluss Programmiermethode

Bei dem Versuch das Ergebnis auf eine Schweißung einer Mehrfachspur (C-3x6/01)  
zu übertragen, bewirkte die ungenaue manuelle Positionierung einen Versatz der ein-  
zelnen Spuren und Lagen. Das führte zu einer unzureichenden Benetzung und einer  
unstetigen Geometrie.



Abbildung 25: Stirnflächen Schweißungen VV01



Abbildung 26: Seitenansicht VV01-C3x6/02

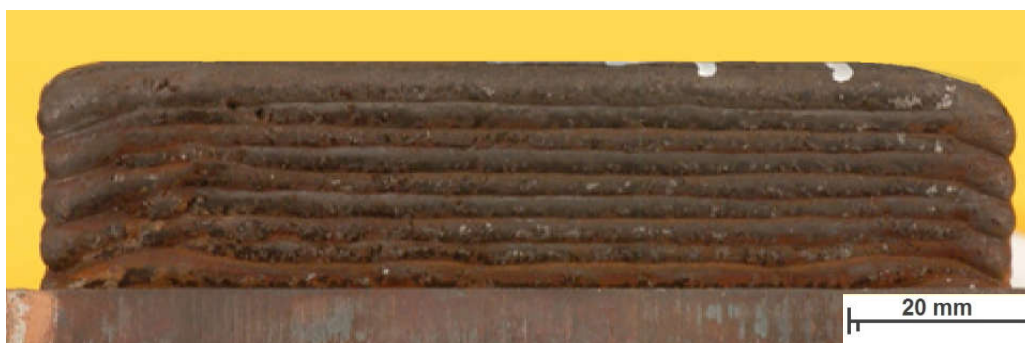


Abbildung 27: Seitenansicht VV02-C3x10

Bei VV01-C1x6/2 (Abbildung 25) wurde bereits von der manuellen Programmierung abgesehen und der Schweißablauf inklusive der Positionierung des Brenners in einem vorher erstelltem RAPID Programm festgehalten (MultiLage.mod).

Die Verbesserung des Schweißbildes mittels exakter Positionierung wird bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse der manuellen Positionierung (Abbildung 25, VV01-C-3x6/01) mit der rechts daneben gezeigten Schweißung der automatischen Positionierung (Abbildung 25, VV01-C-3x6/02) deutlich.

VV01-C3x6/02 (Abbildung 26) war die letzte Schweißung bei der die Lagen identisch aufgebracht wurden. Die Spuren wurden alle in die gleiche Richtung und immer in gleicher Reihenfolge aufgetragen.

Das Zünden des Lichtbogens erfolgte bei stillstehendem Schweißbrenner. Diese Verzögerung im Bewegungsablauf führte zu einer Materialanhäufung am Beginn jeder Spur (Abbildung 26 rechts). Am Ende jeder Naht wird der Schweißprozess nicht abrupt, sondern entlang einer Schweißstromrampe gestoppt. Dies führt wiederum zu einem verminderten Materialauftrag und damit zu einer Absenkung des Schweißaufbaus (Abbildung 26 links).

Beide Phänomene könnten einzeln durch Anpassung der Parameter für die Start- und Auslauframpe eliminiert werden. Durch das gegengleiche Aufbringen der Lagen hoben sich die Effekte auf (Abbildung 27).

#### 4.1.2 Einfluss der Schweißparameter auf den Lagenaufbau

Für alle vier Parametersätze konnten erfolgreich einspurige mehrlagige Schweißungen erstellt werden (Abbildung 28).

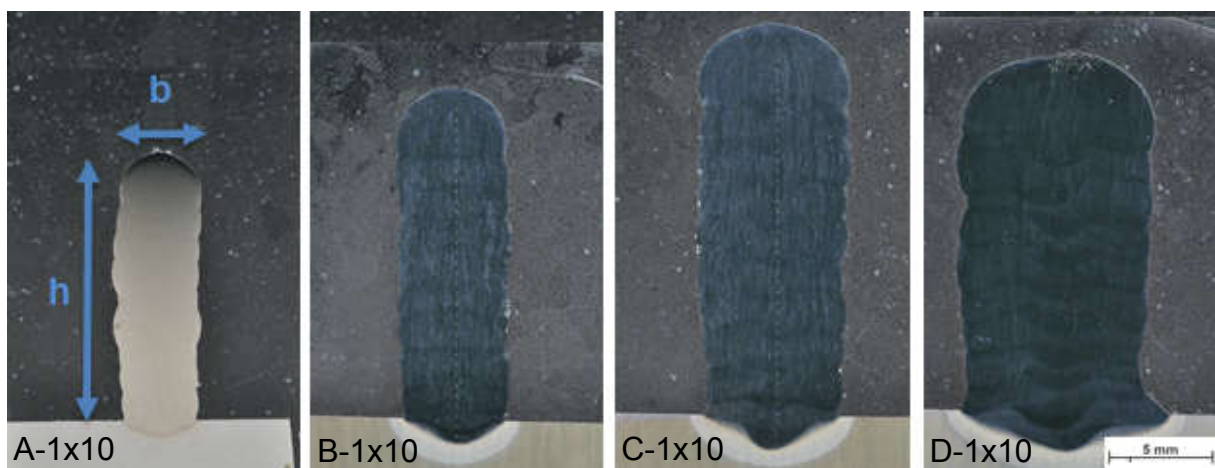


Abbildung 28: Querschnitte einspuriger mehrlagiger Schweißungen von VV02

Die Bilder in Abbildung 28 lassen bereits die quasi-lineare Zunahme der Höhe mit zunehmender Streckenenergie erkennen. Erst bei einem Schweißstrom von 250A nimmt die akkumulierte Höhe wieder ab.

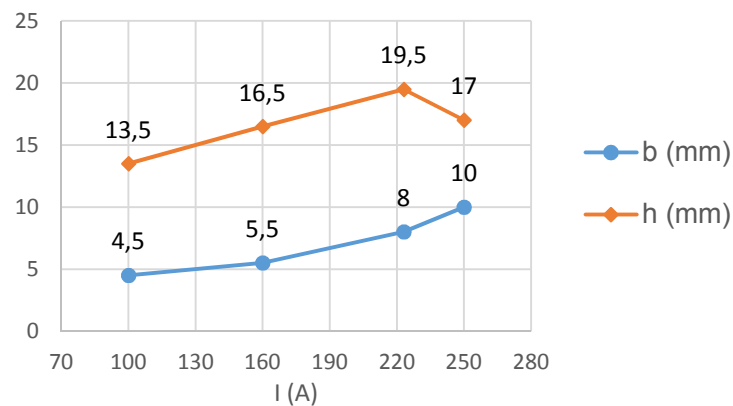


Diagramm 5: Höhe und Breite 1x10 Schweißungen

Der Verlauf der Höhe und Breite für einspurige Schweißungen ist in Diagramm 5 dargestellt. Auf Grund der Reduktion der erzielten Höhe wurde Parameter Set D von weiteren Untersuchungen ausgenommen. Die folgenden Versuche konzentrierten sich auf den linearen Bereich der Höhenzunahme.

Bei den mehrspurigen Versuchen mit Parameterkonfiguration A konnte keine erfolgreiche Schweißung erzielt werden. Bei den ersten Anläufen zeigte sich, dass die nebeneinanderliegenden Spuren gar nicht oder zumindest nicht über die volle Länge miteinander verbunden werden konnten (Abbildung 29).



Abbildung 29: Unvollständige Benetzung zwischen den Spuren bei Schweißungen mit Parametersatz A.

Anstelle einer gleichzeitigen Benetzung der darunterliegenden Lage und der nebenliegenden Spur fingen die Spuren an sich zu stapeln (Abbildung 30).

Dieses Stapeln führte zu einem treppenförmigen Aufbau der eigentlich mehrspurigen, mehrlagigen Schweißgeometrie.

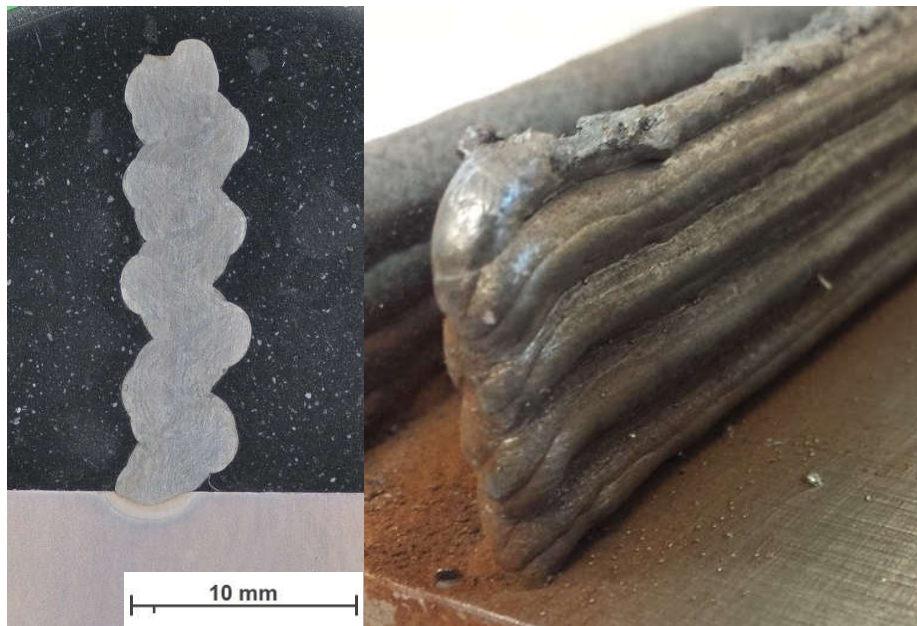


Abbildung 30: Querschnitt und Schweißbild mehrspurige Schweißung Parameter A  
Es konnte kein passender Abstand der Spuren eruiert werden, bei dem keines der beiden beschriebenen Phänomene auftrat.

Bei den mehrspurigen Versuchen konnten mit Parameterkonfiguration C und D erfolgreiche Proben generiert werden. Der Zusammenhang von Höhe bzw. Breite der beiden in Abbildung 31 gezeigten Schweißungen ist in Diagramm 6 dargestellt.

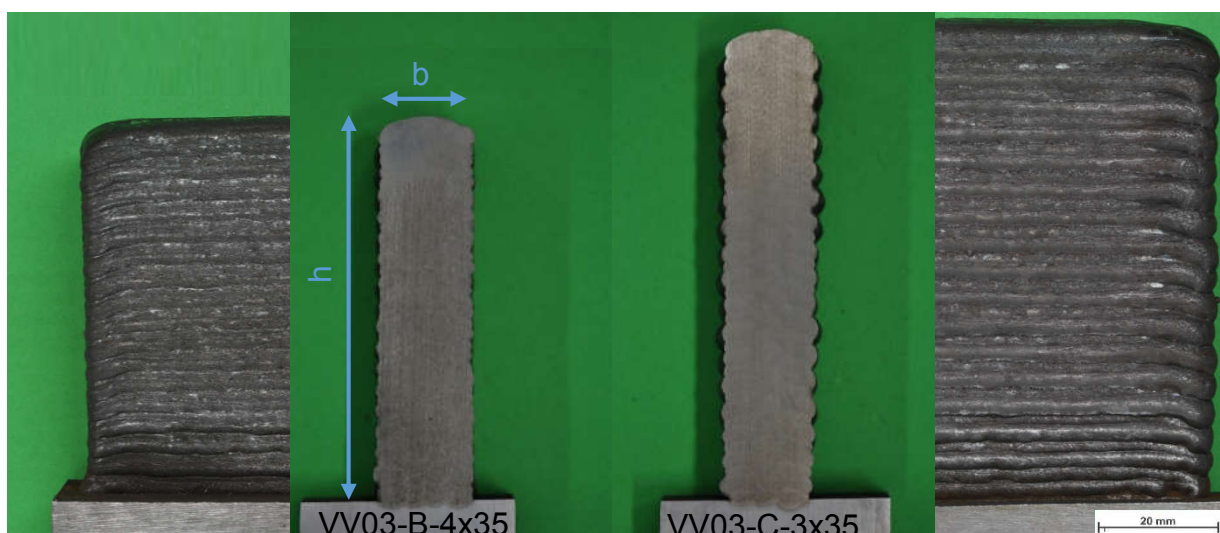


Abbildung 31: Querschnitte mehrspuriger mehrlagiger Schweißung

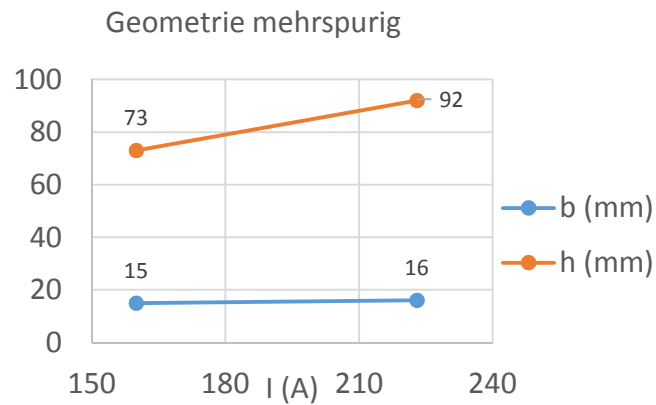


Diagramm 6: Geometrie mehrspurige Schweißungen

Beim Vergleich der verschiedenen Breiten muss die unterschiedliche Anzahl an Spuren berücksichtigt werden. Trotz einer Spur weniger bei Schweißung C-3x35 im Vergleich zu B-4x35 und identem Spurabstand weisen beide Proben vergleichbare Breiten auf.

#### 4.1.3 Härtemessungen

An den eingebetteten Schliffen der VV02 und VV03 für die Mikrostrukturuntersuchungen wurden Härtemessungen durchgeführt. Es wurde die Vickershärten mit einer Prüfkraft entsprechend HV1 entlang von Prüflinien bestimmt. Der Abstand zwischen den Prüfpunkten beträgt 0,5mm. Die Anzahl der Messpunkte richtet sich nach der Höhe der Schweißungen.

Für einen Vergleichswert wurden die hier angeführten Härtemessungen der VV03-Reihe an Proben durchgeführt, die noch keiner Wärmebehandlung unterzogen wurden.

Die Wärmeeinflusszonen aller Schweißungen waren von einer Aufhärtung betroffen. Auch bei der letzten Lage aller Schweißungen stiegen die Härtewerte wieder an.

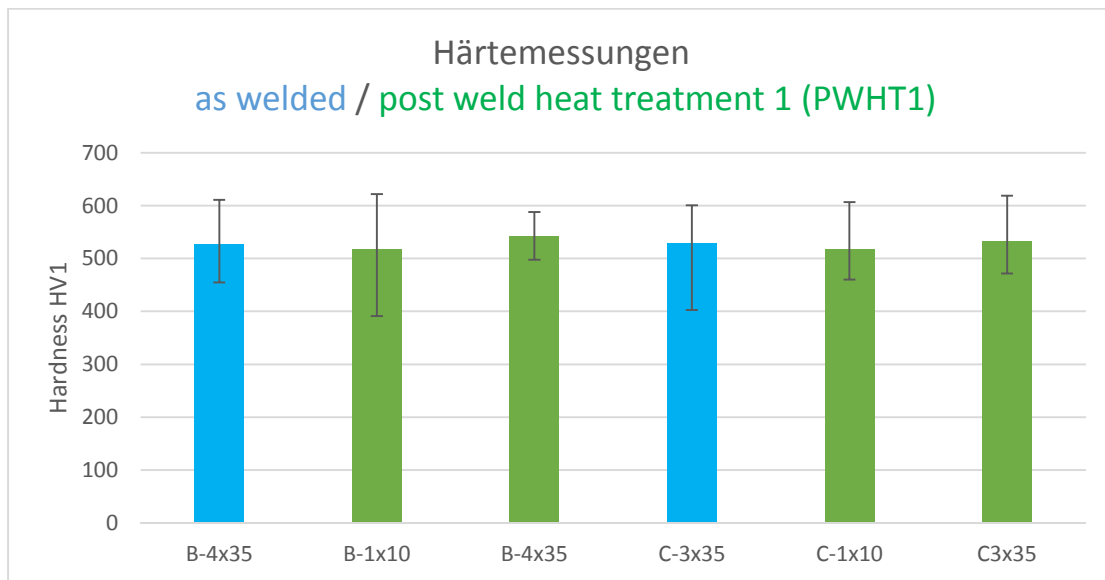


Diagramm 7: Auswertung Härtemessungen Vorversuche

Aus den Härtemessungen, zusammengefasst in Diagramm 7, ergaben sich keine Unterschiede in den HV 1 Werten. Weder die Wärmebehandlung noch die Anzahl der Spuren hatte eine merkliche Änderung der Härtewerte zur Folge.

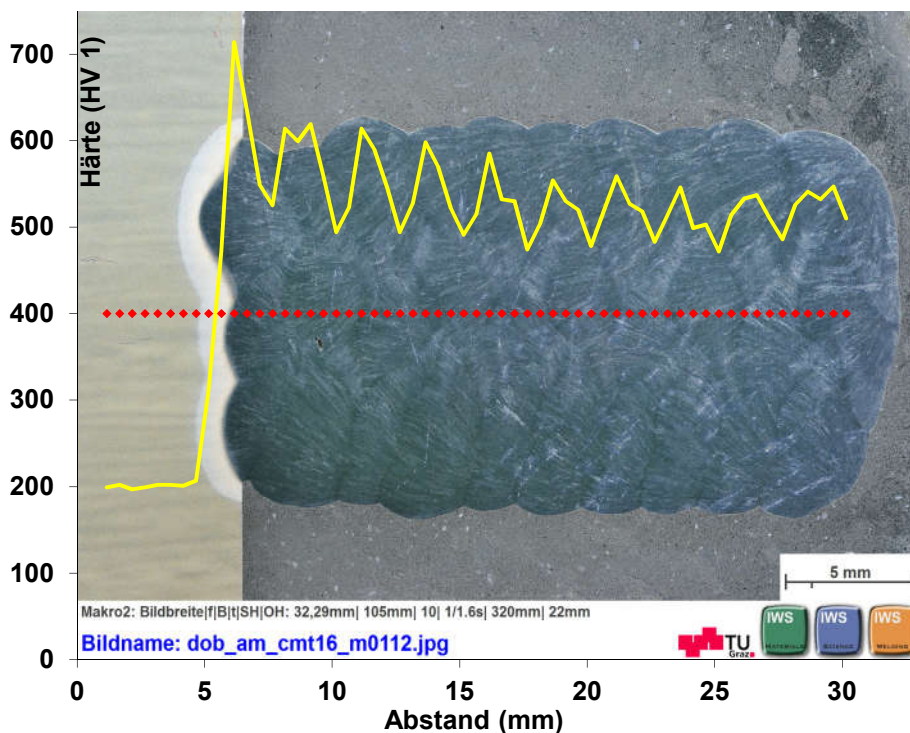


Abbildung 32: Härtemessung VV02-C-3x10

Repräsentativ für die Härtemessungen aller Vorversuchsreihen ist hier in Abbildung 32 die Messung an einer Probe von VV02-C-3x10 angeführt. Es sind die Härtespitzen an den Schmelzlinien der einzelnen Lagen, sowie die Härteminima im inneren



der Schweißnähte erkennbar. Die Aufhärtung der Wärmeeinflusszone ist am ersten steilen Anstieg der Messung zu erkennen (bei ca. 6mm).

#### 4.1.4 Kerbschlagbiegeversuch

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeprüfung für die Proben der VV03 gezeigt.

Tabelle 11: Kerbschlagbiegearbeit (J) Proben VV03

VERSUCH	K1	K2	K3
B-4X35	6	6	6
C-3X35	6	6	6

Alle Proben hatten die gleiche Kerbschlagarbeit von 6 J (Tabelle 11). Die Bruchflächen zeigten ein vollständig sprödes Bruchbild und es gab keine laterale Breitung.

#### 4.1.5 Zugversuch

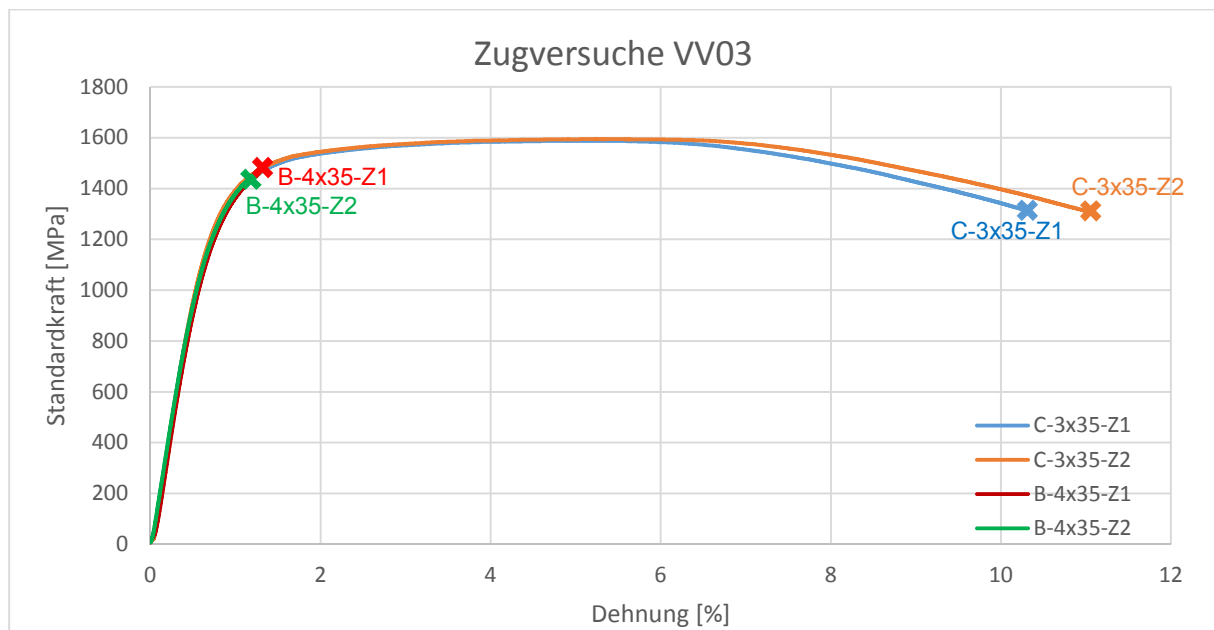


Diagramm 8: Spannungs-Dehnungsdiagramm Proben VV03

Wie in Diagramm 8 dargestellt, versagten beide Proben der Schweißung mit Parameter B vor den Proben von Parameter C.

Tabelle 12: Kennzahlen Zugversuche VV03

Probe	$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_{eH}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$F_m$ (kN)	$A_g$ (%)	$A_{10}$ (%)	$L_u$ (mm)	$A_{manuell}$ (%)	$Z$ (%)
B-4x35-Z1	1262		1455	41,1	0,54	0,54	30,5	1,67	
B-4x35-Z2	1281		1427	40,4	0,43	0,43	30,5	1,67	
C-3x35-Z1	1275	1588	1587	44,9	4,72	7,18	34,0	13,33	30,56
C-3x35-Z2	1291	1595	1594	45,1	5,25	7,82	34,0	13,33	30,56

Die Proben der Schweißungen mit Parametersatz C wiesen eine höhere Zugfestigkeit auf. Bei den Proben von den B-Schweißungen kam es bereits vor einer Einschnürung zum Bruch beider Proben.

#### 4.1.6 Metallographie



Abbildung 33: Schliff VV02-B-4x10



Abbildung 34: Einschluss VV02-B-4x10



Abbildung 35: Gefüge WEZ VV02-B-4x10



Abbildung 36: Detail Gefüge VV02-B-4x10

Bei den mikroskopischen Untersuchungen der Vorversuchsproben wurden Fehler im Schweißgut festgestellt. Wie in Abbildung 33 erkennbar ist, treten diese Fehler mehrfach und in Eckbereichen auf, wo einzelne Schweißspuren aufeinandertreffen. In Abbildung 34 ist erkennbar, dass es sich nicht um Hohlräume, sondern um Einschlüsse handelt. Diese Art der Einschlüsse konnten in allen mehrspurigen Schweißungen festgestellt werden. Es liegt der Verdacht nahe, dass es sich dabei um Schlackenreste handelt.

In Abbildung 35 und Abbildung 36 ist die Mikrostruktur des Schweißguts dargestellt. Das Gefüge ist martensitisch wobei auch die ehemaligen Austenitkorngrenzen wahrgenommen werden [55].

## **4.2 Ergebnisse Versuchsbauteil**

Den Vorversuchen folgte die Erstellung des Hauptversuchsbauteils. Die Schweißung wurde automatisiert mit Parameterset C (Tabelle 5) durchgeführt, was sich anhand der Ergebnisse aus den Vorversuchen als die vielversprechendste Variante erwiesen hatte. Bei der Herstellung des Bauteils wurde außerdem eine Schweißfolge angewendet, welche ebenso auf den Erkenntnissen aus den Vorversuchen hinsichtlich eines stetig geschlossenen und hinsichtlich Maßhaltigkeit konstanten Geometrieaufbaus beruht. Die Lagen wurden spiralförmig alternierend von innen nach außen und von außen nach innen aufgebaut. Dabei wurde Lage für Lage abwechselnd im und gegen den Uhrzeigersinn geschweißt.

Das Schweißbauteil wurde als Ganzes vor der Generierung der Versuchsproben der Wärmebehandlung 2 (PWHT2) unterzogen.

## 4.2.1 Geometrie

Abbildung 37 zeigt den Grundriss des fertig geschweißten Versuchsbauteils. Das Bauteil wurde im Anschluss an die Schweißung sandgestrahlt.

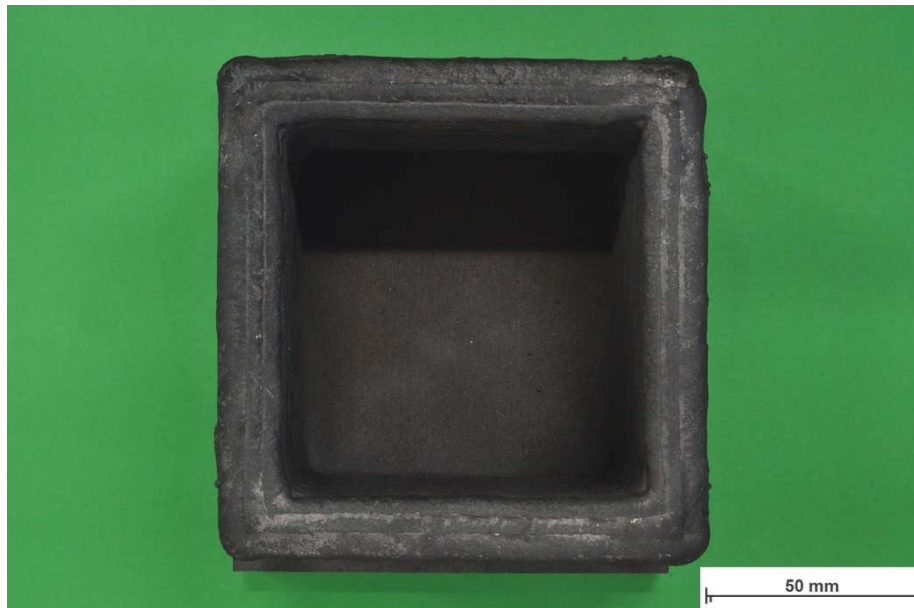


Abbildung 37: Draufsicht fertiges Bauteil

In Abbildung 37 sind die drei spiralförmig angeordneten Spuren zu erkennen. Der Start und Endpunkt aller Lagen ist im rechten oberen Eck der Probe zu erkennen. Da es sich bei der letzten Lage um die dreißigste Lage handelt (gerade Zahl), wurde diese nach rechts (im Uhrzeigersinn) von innen nach außen geschweißt.



Abbildung 38: Seite 4 und 1 von Hauptversuch

Die Lagenhöhe war mit 2,6mm pro Lage ident mit denen der Vorversuche mit gleichen Parametern. Die Kante, die in Abbildung 38 im Vordergrund gezeigt wird, ist jene, wo Start- und Endpunkte der einzelnen Lagen liegen. Auch an dieser Kante war die Lagenhöhe konstant. Die Höhe der 30 Schweißlagen lag bei 79mm.

Die gesamte Schweißzeit für diesen Hauptversuch betrug 1h20min. Diese Bruttoschweißzeit inkludiert eine Abkühlpause von 30s nach jeder Lage. Die Abkühlzeiten summieren sich zu einer Gesamtabkühlphase von 14,5min. Die Nettoschweißzeit des 3,7kg schweren Bauteils betrug in etwa 1h5min.

#### 4.2.2 Temperaturmessung

Mit den in Abbildung 16 gezeigten Thermoelementen konnten während der Schweißung des Hauptversuches die in Diagramm 9 dargestellten Kurven aufgenommen werden. Anhand dieser Messung lässt sich der Schweißablauf rekonstruieren.

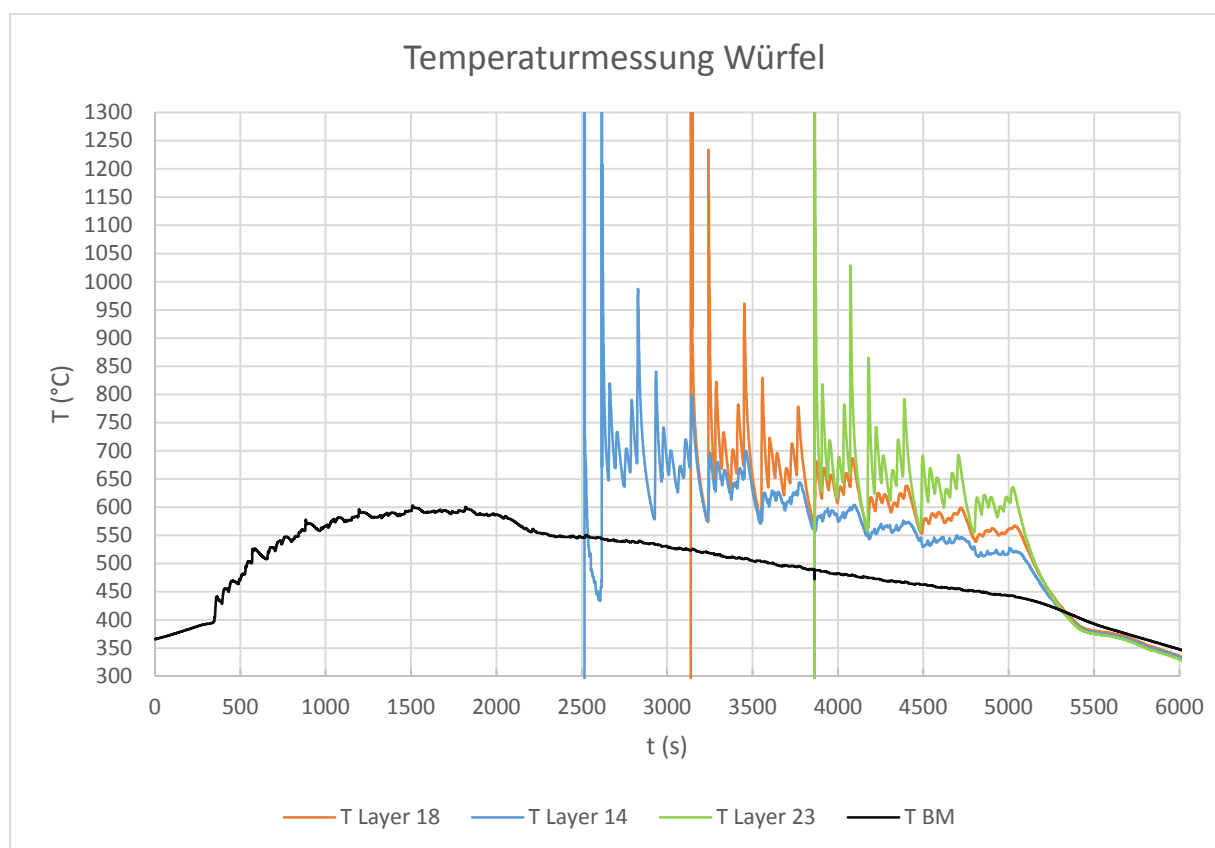


Diagramm 9: Temperaturmessung gesamter Hauptversuch

Der lineare Temperaturanstieg des Grundmaterials (T BM) auf 400°C ist durch das Heizelement verursacht. Der erste steile Anstieg der schwarzen Linie markiert den Start des Schweißversuches mit der ersten Spur der ersten Lage. Die weiteren immer kleiner ausfallenden Temperaturspitzen markieren jeweils eine geschweißte Spur. Der

Verlauf von T<sub>BM</sub> ist mehreren Faktoren geschuldet. Zum einen der Trägheit des Systems, denn die Heizung befindet sich auf der Unterseite des Versuchsbleches und die Messung auf der Oberseite. Die Zusatzheizung wurde vor Schweißbeginn ausgeschaltet. Zu diesem Zeitpunkt war aber die Unterseitentemperatur des Basisblechs schon höher als 400°C.

Zum anderen wirkt der Wärmeeintrag durch die Schweißung, deren Einfluss mit der Anzahl der Lagen und somit steigendem Abstand zum Blech sinkt. Dieser Zusammenhang wird bei t = 2000s bis 2300s sichtbar. In diesem Zeitraum trat eine außerplanmäßige Unterbrechung des Schweißablaufs auf und somit fand keine Wärmezufuhr durch die Schweißung statt. Daher zeigt diese Neigung der Kurve die Abkühlung ohne Wärmeeinbringung.

Die farbigen Kurven stellen die Temperatur des Schweißgutes dar. Hier markieren die Spitzen wieder einzelne Spuren.

Da die Thermoelemente immer außen an der Kontur in der äußersten Spur eingebracht wurden, repräsentieren die größten Ausschläge die äußeren Spuren. Die scheinbare Sechser Gruppierung rührt von der Lage der Messpunkte her. Die Messstellen werden bei ungeraden Lagen 30s und bei geraden Lagen 10s nach der Abkühlphase erneut passiert.

Nach Abschluss der Schweißung bei t ~ 5000s kühlt das Schweißgut bei t~5300s unter die Temperatur des BM ab.

Festzuhalten ist, dass bei den drei Messstellen des Schweißgutes die Temperatur bis zum Ende der Schweißung nicht unter 500°C gefallen ist.

#### 4.2.3 Härtemessung und Makrountersuchung

Für die Messungen der Härte des Hauptversuchs wurden die Proben 01\_1M1z, 01\_1M2z und 01\_3M1z der Mikrostrukturuntersuchungen herangezogen.

In Abbildung 39 sind die ersten 10 Lagen des 30-lagigen Hauptversuches sichtbar. Die erste Lage ist auf der rechten Seite im Bild.

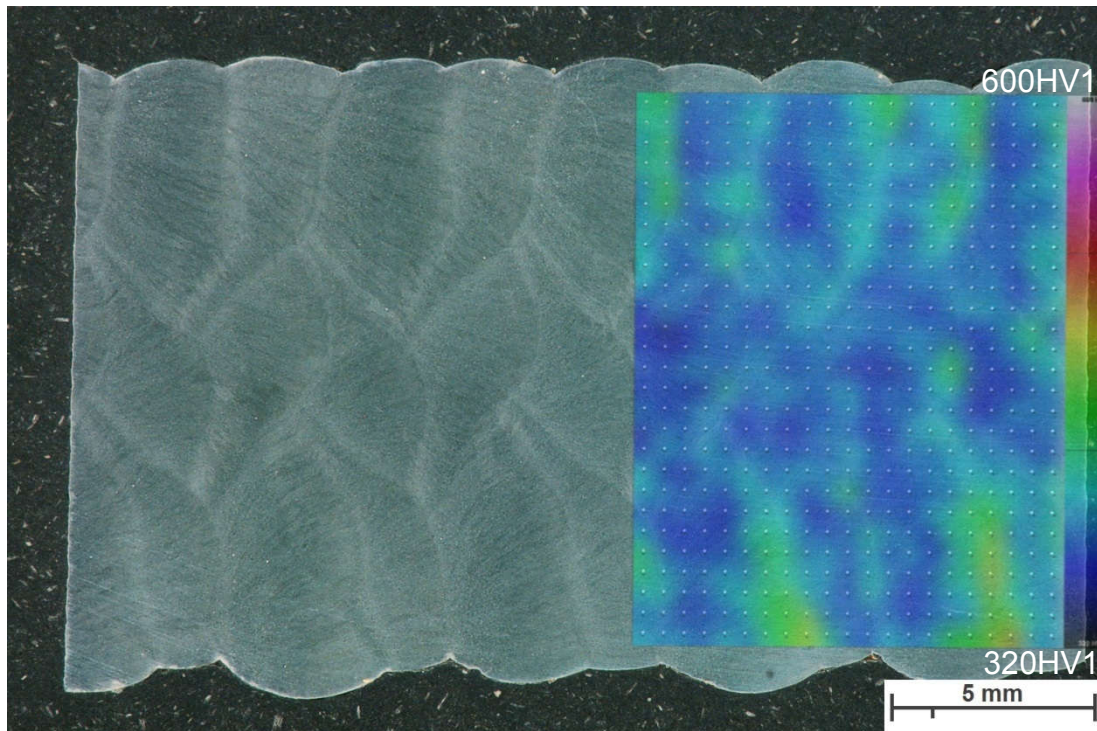


Abbildung 39: Lagenaufbau und Härtemessung 01\_1M1z

Wie bei den Härtemessungen der Vorversuche waren die Bereiche mit der niedrigeren Härte im Inneren einer Schweißnaht von den Übergangsbereichen zwischen den einzelnen Spuren mit höheren Härtewerten begrenzt.

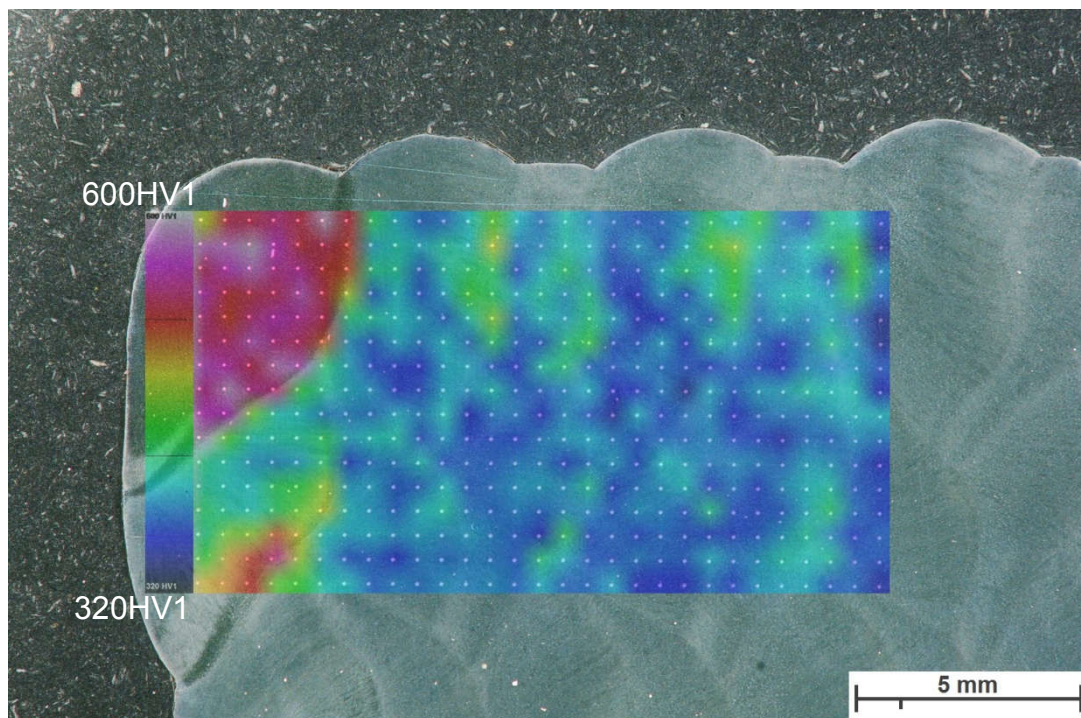


Abbildung 40: Lagenaufbau und Härtemessung 01\_1M2z

Die letzte Spur des Versuchs stellt mit den Härtewerten mit bis zu 600 HV1 eine Ausnahme dar.

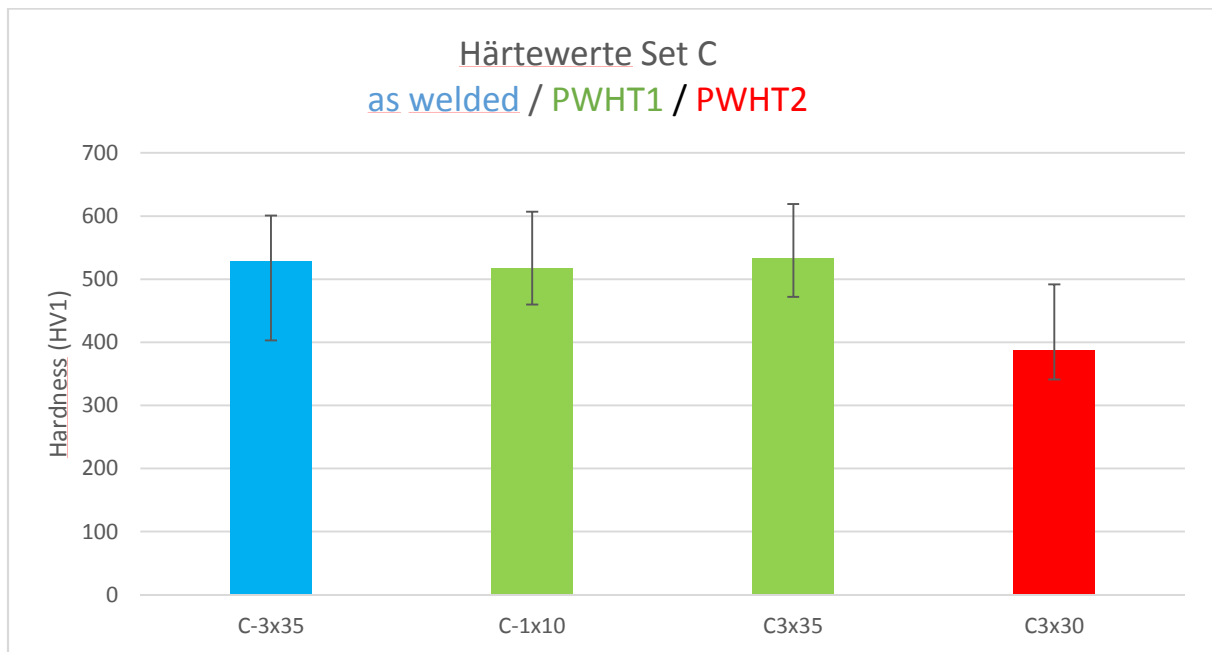


Diagramm 10: Gegenüberstellung Härtewerte PWHT1 und PWHT2

In Diagramm 10 sind die gemessenen Härten der Vorversuche mit Parameter Set C denen des Hauptversuches gegenübergestellt. C3x30 stellt die Messungen des Hauptversuches dar. Bei allen Auswertungen wurden die Werte der Decklage nicht in das Ergebnis mit aufgenommen. Es zeigt sich, dass sich die Härte, wie zuvor auch schon erwähnt, trotz Wärmebehandlung PWHT1 bei den Vorversuchen im Vergleich zu den „as welded“ Proben nicht ändert. Die für das Versuchbauteil angewendete Wärmebehandlung PWHT2 hat einen deutlichen Einfluss auf die Härte. Diese sinkt im Mittel auf unter 400 HV1 ab.



## 4.2.4 Zugversuch

Die Ergebnisse der Zugversuche der aus dem Versuchsbauteil entnommenen Proben sind in Diagramm 11 dargestellt.

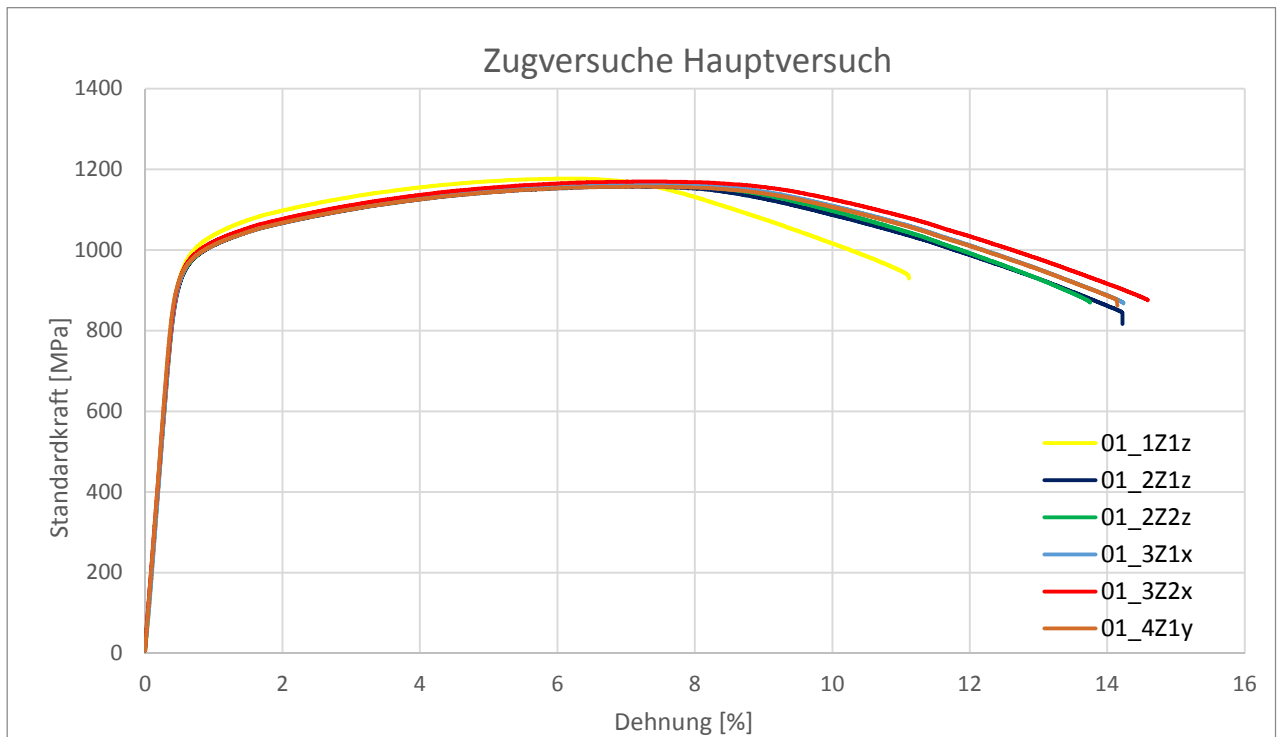


Diagramm 11: Spannungs-Dehnungsdiagramm Hauptversuch

Der Spannungs-Dehnungsverlauf der Proben zeigt, mit Ausnahme von einer geringen Abweichung von 01\_1Z1z, für alle Zugversuche einen identen Verlauf. Die in Schweißrichtung ausgerichteten (horizontale Lage im Hauptbauteil, Bezeichnung mit x und y) Proben zeigten die gleichen Ergebnisse, wie die Proben in vertikaler Richtung.

Tabelle 13: Ergebnisse Zugversuch Hauptschweißung (PWHT2)

Probe	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>eH</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>g</sub> %	A <sub>10</sub> %	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	A <sub>manuell</sub> %	Z %
01_1Z1Z	989	1177	1177	5,8	8,3	28,3	13,3	38,6
01_2Z1Z	968	1157	1157	6,6	10,2	28,3	15,0	43,8
01_2Z2Z	968	1160	1160	7,0	10,2	28,3	15,0	41,2
01_3Z1X	971	1164	1164	6,9	10,4	28,3	15,0	43,8
01_3Z1X	975	1170	1169	7,1	10,7	28,3	15,0	43,8
01_4Z1Y	967	1157	1157	7,0	10,4	28,3	15,0	43,8

## 4.2.5 Kerbschlagbiegeversuch

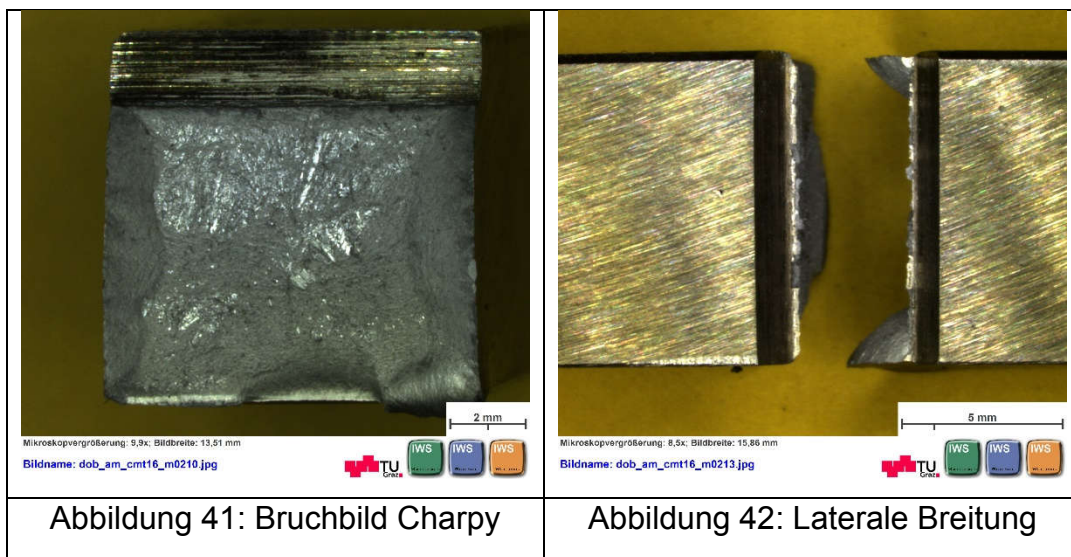
Die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeprüfung sind in dargestellt.

Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Ergebnisse Kerbschlagversuch Hauptschweißung

Nr.	Probe	Längs-ausrichtung	Kerb-orientierung	Kerbschlagarbeit (J)
2	01_1K1Z-L	Z	-L	44
3	01_1K2Z-Q	Z	-Q	44
4	01_1K3Z-Q	Z	-Q	42
7	01_2K1Z-L	Z	-L	52
8	01_2K2Z-Q	Z	-Q	50
10	01_2K3Z-L	Z	-L	49
13	01_3K1X-N	X	-N	39
14	01_3K2X-Q	X	-Q	40
17	01_4K1Y-Q	Y	-Q	34
18	01_4K2Y-N	Y	-N	41
20	01_4K3Y-N	Y	-N	38
21	01_4K4Y-Q	Y	-Q	42

Im Mittel liegt die Kerbschlagarbeit aller Proben bei 43J.



Die Bruchbilder (Abbildung 41) und die laterale Breitungen (Abbildung 42) aller geschlagenen Proben des Hauptversuches, waren in etwa identisch.

# 5 Diskussion

## 5.1 Programmiermethode

Bereits bei den manuell „geteachten“ einspurigen Versuchen ließen sich mehrere Lagen erfolgreich übereinanderlegen (VV01-B-1x6; VV01-C-1x6). Für mehrspurige Schweißungen konnten allerdings gezeigt werden, dass ein gutes Ergebnis nur durch volle Automatisierung erzielt werden kann. Diese Verbesserung des Schweißbildes mittels exakter Positionierung wird beim Vergleich der manuellen Positionierung (teach in, Abbildung 25 VV01-C-3x6/01) mit der rechts daneben gezeigten automatischen Positionierung (offline, Abbildung 25 VV01-C-3x6/02) deutlich. Mit der manuellen Schweißung gelang es nicht eine geschlossene, mehrspurige Schweißung mit einer Lagenzahl größer 3, mit zufriedenstellenden Ergebnissen herzustellen.

## 5.2 Geometrie des Lagenaufbaus

Die Höhe der Schweißung nahm im Bereich 100A bis 223A mit zunehmendem Schweißstrom bei gleicher Lagen Zahl linear zu. Bei einer Stromstärke von 250A nahm die aufgebaute Höhe bei gleicher Lagenzahl ab. Die Abnahme ergibt sich aufgrund der höheren Streckenenergie, bei der das Schweißbad breiter war, dadurch seitlich mehr verronnen ist und deshalb verflachte. Die bei höherem Strom auch vorliegende erhöhte Drahtzufuhr und damit erhöhte Einbringung an Zusatzmaterial führte bei 250A Schweißstrom trotzdem zu keiner weiteren Erhöhung der Lagenhöhe.

In Korrelation mit den einspurigen Versuchen nahm die Höhe der Lagen mit steigender Streckenenergie und Drahtvorschub auch bei den mehrspurigen Versuchen zu.

Für den Abstand zwischen den Spuren hat sich bei der Konfiguration B ein Spurabstand von 3,5 mm bewährt. Das entspricht in etwa  $\frac{2}{3}$  der Einzelspurbreite.

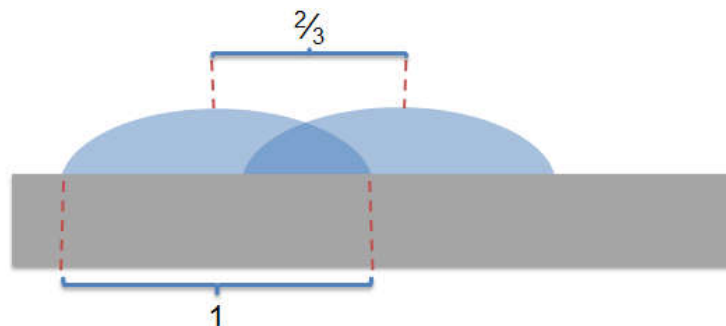


Abbildung 43: Programmierter Abstand zwischen den Spuren

Schweißungen mit Parameter Set C waren auch mit größeren Spurbständen durchaus erfolgreich. Da im Verlauf der Untersuchungen Parameter Set B und C, unter Berücksichtigung aller wichtigen Aspekte, als die vielversprechendsten Varianten übrig blieben, wurde der Spurbstand für alle verbleibenden Mehrspurschweißungen dennoch auf 3,5mm festgelegt. Dadurch sollte eine bessere Vergleichbarkeit erreicht werden.

### **5.3 Härte**

Die unterschiedlichen Schweißparameter B und C hatten bei einem Mittel von ~530HV1 keinen signifikanten Einfluss auf die Härte des aufgetragenen Schweißguts. Des Weiteren hatte auch die Anzahl der Spuren keinen Einfluss auf die Härte der Proben. Die zu erwartenden Werte des Grundwerkstoffes mit 510 – 515HV10 nach dem Härten und den 440 – 525HV10 des Zusatzwerkstoffes liegen im Bereich der erzielten Härten.

Wie in Diagramm 10 dargestellt, hatte Wärmebehandlung PWHT1 keinen erkennbaren Einfluss auf die Härtewerte. Wärmebehandlung PWHT2 hatte einen deutlichen Einfluss auf die gemessenen Härtewerte. Die Härtewerte des Hauptversuches haben merkbar abgenommen. Die um 100°C höhere Haltedauer bei der hier angewendeten Wärmebehandlung zieht also eine deutliche Veränderung der Eigenschaften des Schweißguts mit sich.

Die letzte Lage aller Schweißungen wies aufgrund der fehlenden Vergütungslage erhöhte Härtewerte auf.

### **5.4 Kerbschlagarbeit**

Die mit Parametersätzen B und C geschweißten Proben der Vorversuche wiesen trotz Wärmebehandlung PWHT 1 und erhöhter Versuchstemperatur von 210°C sehr niedrige Kerbschlagwerte von nur 6 J auf.

Dieses Ergebnis ist hinsichtlich des angestrebten Einsatzes in Schmiedewerkzeugen ungeeignet. Somit ist die Wärmebehandlung PWHT1 nicht für den Einsatz bei derartigen Schweißungen geeignet. Die schlechten Ergebnisse der Proben der Vorversuchsreihen könnten auf eine Versprödung durch die langsame Abkühlung zwischen 600 – 400°C zurückzuführen sein. Durch eine erhöhte Abkühlgeschwindigkeit während dieses Temperaturbereiches bzw. durch eine Erhöhung der Spitztemperatur sollte sich

eine Verminderung dieser Versprödung einstellen. Dieser Aspekt wurde allerdings nicht näher untersucht.

Die Proben des Hauptversuches wurden mit PWHT2 wärmebehandelt. Die erzielten Kerbschlagarbeiten liegen bei 34J bis 53J und liegen in einem für diese Werkstoffe typischen Bereich [56]. Somit hatte die 100°C höhere Haltetemperatur bzw. die höhere Abkühlgeschwindigkeit hier einen deutlich positiven Einfluss.

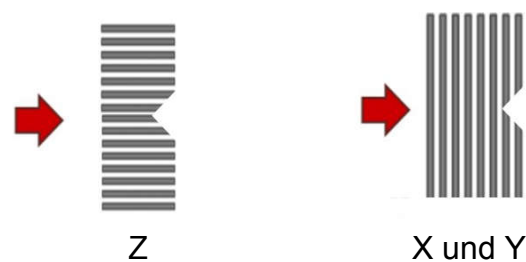


Abbildung 44: Kerbe und Lagenaufbau Kerbschlagbiegeproben

Die Proben die stehend aus der Hauptprobe (Z) entnommen wurden, hatten im Mittel mit 47J signifikant bessere Werte als die liegend entnommenen Proben (X und Y) mit einer mittleren Kerbschlagarbeit von 39J.

Die Ergebnisse des Hauptversuches lassen also den Schluss zu, dass eine geringe Anisotropie des Schweißgutes hinsichtlich der Kerbschlagzähigkeit vorliegt.

## 5.5 Zugversuch

Für die ersten Zugversuche standen Proben von Vorversuchsreihen der Parameter B und C zur Verfügung. Die Proben der Schweißung VV03-B-4x35 versagten vor einer sichtbaren Einschnürung kurz nach Verlassen des elastischen Bereichs. Die Proben der Schweißung VV03-C-4x35 durchliefen ohne Versagen den Verfestigungsbereich bis hin zum Einschnürungsbereich mit einer gemessenen Bruchdehnung von 15 %.

Die Ursache für den verfrühten Bruch der B Proben wurde nicht weiter untersucht.

Aufgrund des besseren Abschneidens der Versuchsproben beim Zugversuch wurde Parameter Set C für die Schweißung des Versuchsbauteils der Vorzug gegeben. Zusätzlich zu den besseren Kennzahlen in den Zugversuchen fällt durch die kleinere nötige Anzahl an Spuren und Lagen die Bauzeit des Bauteils geringer aus.

Erstaunlich ist, dass im Gegensatz zu den Kerbschlagbiegeproben bei den Zugversuchen keine Anistoropie festgestellt werden konnte, d.h. es gibt keinen Einfluss des Lagenaufbaus auf die Kennwerte des Zugversuchs. Die Spannungs- Dehnungskurven

aller 12 gezogenen Proben des Hauptversuches waren fast deckungsgleich. Nur die Probe 01\_1Z1z wich leicht ab. Diese Probe wurde im Bereich der An- und Auslaufstrecke der Schweißlagen entnommen und war somit einem anderen Temperaturprofil ausgesetzt.

Verglichen mit den Vorversuchen, hatten die Zugproben eine erhöhte Bruchdehnung bei verringerter Streckgrenze und Zugfestigkeit. Dies ist auf die geänderte Wärmebehandlung mit erhöhten Haltetemperaturen zurückzuführen.

# 6 Zusammenfassung

Diese Arbeit hatte zum Ziel, die Eignung einer robotergestützte CMT Schweißung als Reparaturmethode von Schmiedegesenken festzustellen.

Dazu wurde im Schweißlabor des Instituts für Werkstoffkunde, Füge- und Umformtechnik anhand von Versuchsbauteilen untersucht, ob sich mehrlagige, dreidimensionale volle Konturen generieren lassen, welche die notwendigen geometrischen Anforderung, und die mechanischen Eigenschaften für den Einsatz als Schmiedegesenke erfüllen. Die erstellten Geometrien gingen über jene von flächigen Auftragsschweißungen hinaus.

Mittels einer Schweißparameterstudie wurde eine systematische Vorgehensweise bestimmt, welche die Fertigung unterschiedlicher Aufbauten mit zunehmender Geometriekomplexität ermöglichte. Die erstellten Schweißungen wurden charakterisiert, indem einerseits die Geometrie beurteilt und andererseits die mechanischen Eigenschaften des aufgetragenen Schweißguts gemessen und das Gefüge metallografisch untersucht wurden.

Eingangs konnte gezeigt werden, dass für eine erfolgreiche mehrlagige Schweißung eine manuelle Programmierung unbrauchbar ist. Es wurden entsprechende Roboterprogramme offline implementiert und danach vollautomatisiert geschweißt.

Anhand der durchgeführten Parameterstudien konnte im Anschluss der geeignete Bereich des Wärmeeintrags abgegrenzt werden. Am oberen Ende dieses Leistungsreichs kann mit einer Steigerung der Streckenenergie der Drahtvorschub und somit das aufgebrachte Volumen erhöht werden.

Ab einer Streckenenergie von ca.  $3,2\text{kJ/cm}$  bei einem Schweißstrom von  $223\text{A}$  und einer Schweißgeschwindigkeit von  $10\text{mm/s}$  beginnt die Schweißnaht zu zerfließen und wird dadurch flacher. D.h. die Höhe der aufgebauten Geometrie verringert sich bei gleicher Lagenzahl. Dies ist für die geplanten Anwendungen nachteilig.

Die untere Parametergrenze für die benötigte Wärmeeinbringung für mehrspurige Schweißungen liegt bei einer Streckenenergie von ca.  $1\text{kJ/cm}$ , einem Schweißstrom von  $100\text{A}$  und einer Schweißgeschwindigkeit von  $10\text{mm/s}$ .

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Höhe des zu schweißenden Bauteils keinen limitierenden Faktor bei der Verwendung des CMT-Prozesses als Additive Fertigungsmethode darstellt.

Der vollautomatisierte Schweißprozess führte zu einer konstanten Lagenhöhe und einer konstanten Geometrie. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Schweißungen war gegeben.

Im Gegensatz zur Streckenenergie hatte die räumliche Orientierung der Versuchsproben in Bezug auf die Schweißrichtung keinen Einfluss auf die Materialkennwerte des Zugversuchs. Die Kerbschlagbiegearbeiten der stehenden und liegenden Proben wiesen eine leichte Anisotropie auf.

Das geschweißte Gefüge ist martensitisch mit einer Anzahl an Poren, die der des Grundmaterials entspricht. In allen mehrspurigen Schweißungen mussten Einschlüsse (Abbildung 33) festgestellt werden.

Basierend auf den Vorversuchen konnte sowohl ein großvolumiges Versuchsbauteil mit 30 übereinander gelegten Schweißlagen, als auch eine weitere mehrlagige Schweißungen mit einer Höhe von in etwa 90mm erfolgreich erstellt werden.

Insgesamt erfüllte das aufgeschweißte Material die notwendigen Eigenschaften des Grundwerkstoffs eines Schmiedegesenks.

Diese grundlegende Machbarkeitsstudie des CMT-Prozesses als additives Fertigungsverfahren zur Reparatur von Schmiedegesenken lieferte somit ein positives Ergebnis. Darüber hinaus konnte in dieser Arbeit schweißtechnisches Know-How hinsichtlich Parametern, Schweißfolge und Lagenabfolge generiert werden.

Zusätzlich wurden die Einflüsse der eingesetzten Wärmebehandlungen untersucht und beschrieben.



# 7 Ausblick

## Ausmerzung der Schweißfehler

Wie in den Ergebnissen beschrieben, kommt es bei dieser Werkstoffkombination und bisheriger Prozessführung noch zu Einschlüssen. Für den industriellen Einsatz müssen die in den Versuchen noch regelmäßigen Schweißfehler ausgemerzt werden. Der Einsatz eines inerten Gases als Schutzgas könnte bereits zu besseren Ergebnissen führen.

## Transfer des Prozesses

Neben den grundlegenden weiterführenden Untersuchungen zu Verbesserungen des CMT Prozesses als additives Fertigungsverfahren sollen die Ergebnisse dieser Arbeit in bestehenden Reparaturabläufe der *Fa. Böhler Schmiedetechnik GmbH & Co KG* einfließen.



Abbildung 45 gebrochenes Schmiedewerkzeug (Böhler W302)

Die bisherigen manuellen Reparaturschweißungen bei Schmiedegesenken größter Abmessungen (Abbildung 45) sollen durch den robotergestützten CMT Prozess erweitert werden. Die Reproduzierbarkeit und die Vermeidung von händischen Schweißungen unter den schwierigen Bedingungen (Vorwärmung) soll die Fehlerhäufigkeit senken und zu längeren Standzeiten der Werkzeuge führen.

Für den Einsatz robotergestützter Reparaturmethoden sind trotz bisheriger Untersuchungen weitere Anstrengungen zu unternehmen. Dazu gehören z.B. die Schweißvorbereitung mit Ausschleifen der Formen und dem Auffüllen um eine gleichbleibende Ausgangssituation für einen automatisierten Prozess zu schaffen.

## **Schrägen**

Bei den bisherigen Schweißungen waren Schrägen und Überhänge nicht Teil der Untersuchungen. Der treppenförmige Aufbau der mehrspurigen Versuche bei geringer Leistung waren zwar zum Zeitpunkt der Versuche nicht erwünscht, zeigten aber bereits vielversprechende Ansätze für Überhänge auch ohne Stützstruktur.

# 8 Anhang

## RAPID Programm Vorversuche

```
PROC main()
  != Geometrie feststlegen =!
  lagen:= 10;
  spuren:= 4;
  l_x:= 100;
  l_y:= 3.5;
  l_z:= 1.5;
  != Geometrie feststlegen Ende =!

  MoveL p_start, v1000, z50, toSchweissbrenner;
  != Schweißbrenner auf Ausgangspunkt fahren

  FOR i FROM 0 TO (lagen-1) DO
    IF (i mod 2) = 0 THEN
      x_start:= 0;
      x_end:= l_x;
    ELSE
      x_start:= l_x;
      x_end:= 0;
    ENDIF
  ENDIF
  != Lagen Schleife
  != Start und Endpunkt x bei geraden Lagen
  != Start und Endpunkt x bei ungeraden Lagen

  FOR j FROM 0 TO (spuren-1) DO
    IF (i mod 2) = 0 THEN
      y:= l_y*j;
    ELSE
      y:= l_y*(spuren-1) - l_y*j;
    ENDIF
  ENDIF
  != Spure Schleife
  != Position Y bei geraden Lagen
  != Position Y bei ungeraden Lagen

  ArcLStart offs(p_start,x_start,y,z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;
  != Starte Schweißung Startpunkt
  ArcLEnd offs(p_start,x_end,y,z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;
  != Beende Schweißung Endpunkt
  MoveL Offs(p_start,x_end,y,z+50), v1000, z50, toSchweissbrenner;
  != Brenner 50mm hoch fahren
  ENDFOR

  z:= z + l_z;
  y:= 0;
  != neue z Position Berechnen

  WaitTime 60;
  != Wartezeit zwischen den Lagen in s
  ENDFOR
  MoveL Offs(p_start,0,100), v1000, z50, toSchweissbrenner;
  ENDPROC
```

Abbildung 46: Programm MultiLage.mod

## RAPID Programm Hauptversuch

```

PROC main()
  != Geometrie feststlegen !=
  lagen:= 30; != Anzahl Lagen
  spuren:= 3; != Anzahl Spuren
  l_x:= 110; != Länge in x(mm) außen
  l_y:= 110; != Länge in y(mm) außen
  Spurhoehe z:= 2.6; != Lagenhöhe z (mm)
  Spurbreite_y:= 3.5; != Spurbreite bei Schweißrichtung x
  Spurbreite_x:= 3.5; != Spurbreite bei Schweißrichtung y

  != Geometrie feststlegen Ende !=

  MoveL p_start, v10, z50, toSchweissbrenner; != Schweißbrenner auf Ausgangspunkt fahren

  FOR j FROM 0 TO (lagen - 1) DO
    IF (j mod 2) = 0 THEN
      != Lagen Schleife
      != Gerade Lagen
      x_start:= 0;
      x_end:= l_x;
      y_start:= 0;
      y_end:= l_y;

      ArcLStart offs(p_start,x_start ,y_start,d_z), v10, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;

      FOR i FROM 0 TO (spuren - 1) DO
        d_x:= i*Spurbreite_x;
        d_y:= i*Spurbreite_y;

        ArcL Offs (p_start, (x_end - d_x), (y_start + d_y), d_z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;
        ArcL Offs (p_start, (x_end - d_x), (y_end - d_y), d_z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;
        ArcL offs (p_start, (x_start + d_x), (y_end - d_y), d_z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;

        IF (i < (spuren - 1)) THEN
          ArcL offs (p_start, (x_start + d_x), (y_start + (d_y + Spurbreite_y)), d_z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;
        ELSE
          ArcLEnd offs (p_start, (x_start + d_x), (y_start + (d_y + Spurbreite_y)), d_z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;
        ENDIF
      ENDFOR
    ELSE
      != ungerade Lagen

```

Abbildung 47: Programm Rechteck.mod Teil 1

```

ELSE
    !:= ungerade Lagen
    x_start:= (Spurbreite_x)*(spuren-1) ;
    x_end:=  l_x -((Spurbreite_x)*(spuren-1));
    y_start:= (Spurbreite_y)*(spuren) ;
    y_end:=  l_y - (Spurbreite_y)*(spuren-1);
    ArcLStart offs(p_start,x_start,y_start, d_z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;

    FOR i FROM 0 TO (spuren -1) DO
        d_x:= i*Spurbreite_x;
        d_y:= i*Spurbreite_y;
        ArcL Offs (p_start, (x_start - d_x), (y_end + d_y), d_z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;
        ArcL Offs (p_start, (x_end + d_x), (y_end + d_y), d_z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;
        ArcL offs (p_start, (x_end + d_x), (y_start - (d_y + Spurbreite_y)), d_z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;

        IF (i < (spuren - 1)) THEN
            ArcL offs (p_start, (x_start - (d_x + Spurbreite_x)), (y_start - (d_y + Spurbreite_y)), d_z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;
        ELSE
            ArcLEnd offs (p_start, (x_start - d_x), (y_start - (d_y + Spurbreite_y)), d_z), v1000, seam1, weld2, fine, toSchweissbrenner;
        ENDIF
    ENDFOR

    ENDIF

    d_z:= d_z + Spurbreite_z ;
    MoveL Offs (p_start, 0, d_z + 50), v1000, z50, toSchweissbrenner;
    WaitTime 5;
ENDFOR

MoveL Offs (p_start, 0, 0, d_z + 100), v1000, z50, toSchweissbrenner;

ENDPROC

```

Abbildung 48: Programm Rechteck.mod Teil 2

## Härtemessungen Vorversuche

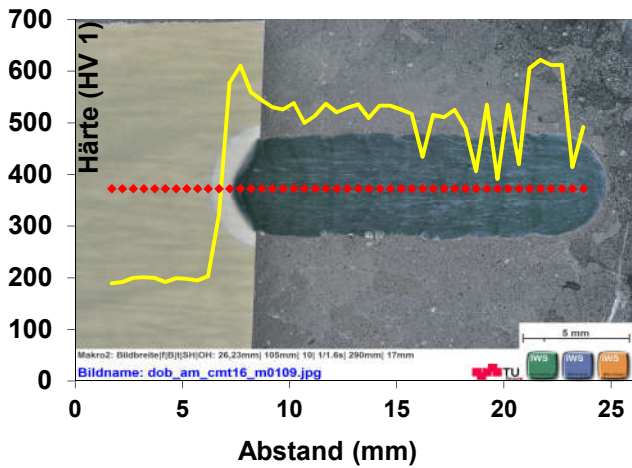


Abbildung 49: Härtemessung VV02-B-1x10

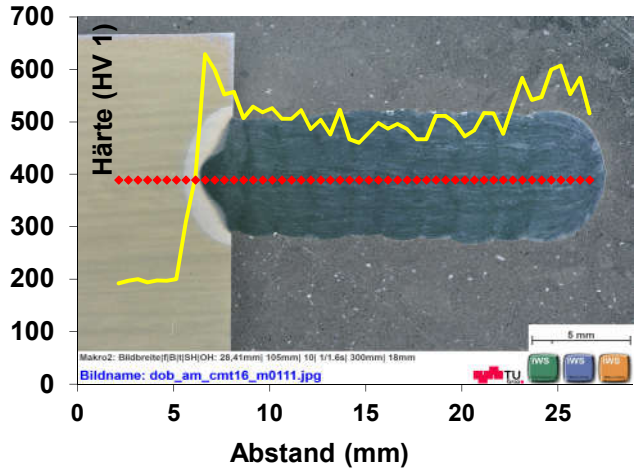


Abbildung 50: Härtemessung VV02-C-1x10

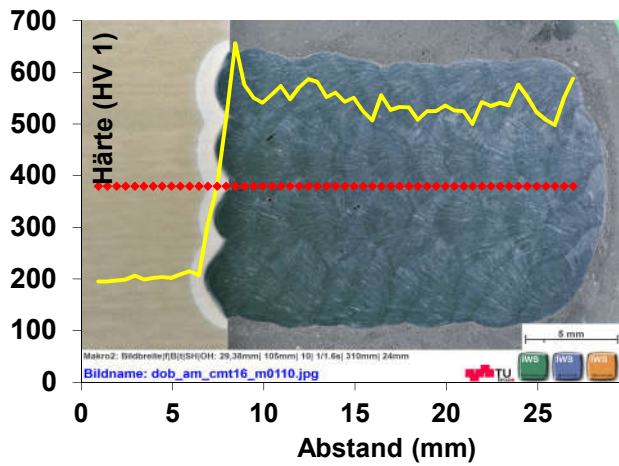


Abbildung 51: Härtemessung VV02-B-4x10

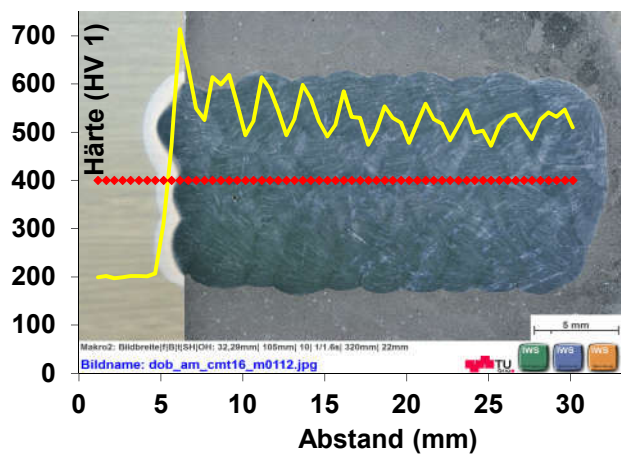


Abbildung 52: Härtemessung VV02-C-3x10

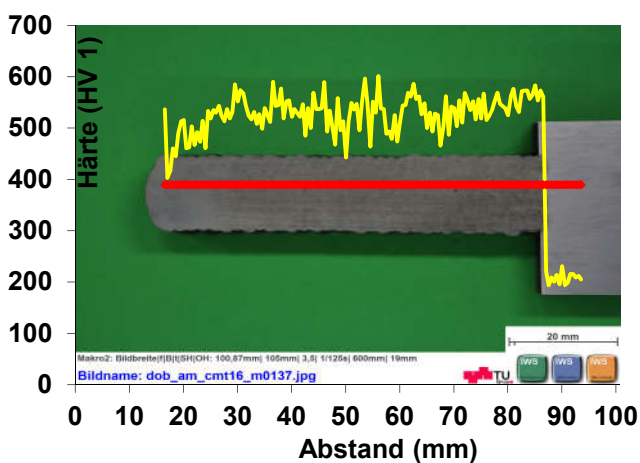


Abbildung 53: Härtemessung VV03-B-4x35

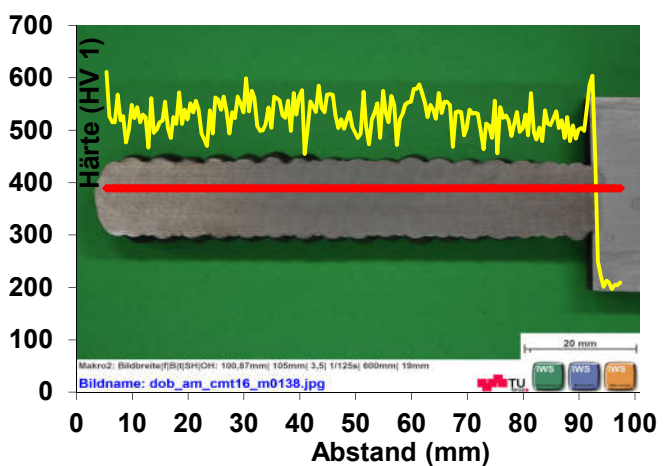


Abbildung 54: Härtemessung VV03-B1x35

Abbildung 1: Begriffsübersicht Generative Fertigung (Additive Manufacturing) [6]	15
Abbildung 2: Unterteilung metallischer additiver Fertigungsverfahren [10]	16
Abbildung 3: Schema Selektives Sintern/Schmelzen mit Laser [12]	17
Abbildung 4: LOM Schema [13]	19
Abbildung 5: Prinzip Drahtauftragsschweißen mittels Elektronenstrahl [14]	19
Abbildung 6: Prinzip Pulverauftragsschweißen [14]	20
Abbildung 7: Prinzip Kaltspritzen [17]	20
Abbildung 8: Prinzip FFF Druck [18]	21
Abbildung 9: Prinzip der Tropfenablöse bei CMT [28]	23
Abbildung 10: Drahtvorschub $v_d$ , Schweißstrom I, Schweißspannung U während CMT Zyklus [28]	24
Abbildung 11: Klassifizierung CMT als AM Verfahren	25
Abbildung 12: kontinuierliches ZTU Schaubild Grundmaterial (X40CrMoV5-1) [38]	28
Abbildung 13: Schöfflerdiagramm [42]	29
Abbildung 14: Schweißanlage (Quelle: <a href="http://www.fronius.com">www.fronius.com</a> )	32
Abbildung 15: Schweißanlagenkonfiguration am IWS	33
Abbildung 16: Lage der Thermoelemente bei Schweißgut	34
Abbildung 17: Heizplatte und Gleichspannungsnetzteil	34
Abbildung 18: Zugprobe Form B [53]	40
Abbildung 19: V-Kerbprobe [48]	40
Abbildung 20: Lagenaufbau Vorversuche einspurig mehrlagig (1x10)	45
Abbildung 21: Lagenaufbau Vorversuche mehrspurig und mehrlagig (4x10)	45
Abbildung 22: Probenplan für VV03-B-4x35 und VV03-C-3x35	47
Abbildung 23: Schweißgeometrie mit Seitennummerierung und Abmessungen	49
Abbildung 24: BeprobungsplanTabelle 10: Benennung Versuchsproben	49
Abbildung 25: Stirnflächen Schweißungen VV01	51
Abbildung 26: Seitenansicht VV01-C3x6/02	51
Abbildung 27: Seitenansicht VV02-C3x10	51
Abbildung 28: Querschnitte einspuriger mehrlagiger Schweißungen von VV02	52
Abbildung 29: Unvollständige Benetzung zwischen den Spuren bei Schweißungen mit Parametersatz A.	53
Abbildung 30: Querschnitt und Schweißbild mehrspurige Schweißung Parameter A54	54
Abbildung 31: Querschnitte mehrspuriger mehrlagiger Schweißung	54
Abbildung 32: Härtemessung VV02-C-3x10	56
Abbildung 33: Schliff VV02-B-4x10	58
	79

Abbildung 34: Einschluss VV02-B-4x10	58
Abbildung 35: Gefüge WEZ VV02-B-4x10	58
Abbildung 36: Detail Gefüge VV02-B-4x10	58
Abbildung 37: Draufsicht fertiges Bauteil	60
Abbildung 38: Seite 4 und 1 von Hauptversuch	60
Abbildung 39: Lagenaufbau und Härtemessung 01_1M1z	63
Abbildung 40: Lagenaufbau und Härtemessung 01_1M2z	63
Abbildung 41: Bruchbild Charpy	66
Abbildung 42: Laterale Breitung	66
Abbildung 43: Programmierter Abstand zwischen den Spuren	67
Abbildung 44: Kerbe und Lagenaufbau Kerbschlagbiegeproben	69
Abbildung 45 gebrochenes Schmiedewerkzeug (Böhler W302)	73
Abbildung 46: Programm MultiLage.mod	75
Abbildung 47: Programm Rechteck.mod Teil 1	76
Abbildung 48: Programm Rechteck.mod Teil 2	77
Abbildung 49: Härtemessung VV02-B-1x10	78
Abbildung 50: Härtemessung VV02-C-1x10	78
Abbildung 51: Härtemessung VV02-B-4x10	78
Abbildung 52: Härtemessung VV02-C-3x10	78
Abbildung 53: Härtemessung VV03-B-4x35	78
Abbildung 54: Härtemessung VV03-B1x35	78



## 9 Literaturverzeichnis

- [1] B. Valnion, “Neue Ära des Digital Manufacturing”, *Addit. Fert.*, vol. 2, pp. 14–17, 2015.
- [2] P. Almeida and S. Williams, “Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT)”, in *Proceedings of the 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2010, p. 11.
- [3] P. Gerhard, K. Ferdinand, and C. Harald, “Manufacturing of turbine blades by shape giving CMT Welding”, in *Metal Additive Manufacturing Conference*, 2014, p. 10.
- [4] Jan Larsson, “Additive und hybride Produktion mit 3D-Druck”, *Addit. Fert.*, vol. 1, pp. 26–29, 2015.
- [5] A. Gebhardt, *Generative Fertigungsverfahren*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013.
- [6] A. Gebhardt, *Understanding Additive Manufacturing*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.
- [7] M. Schmid, “Additive Fertigung”, 2015.
- [8] S. V Murphy and A. Atala, “3D bioprinting of tissues and organs”, *Nat Biotech*, vol. 32, no. 8, pp. 773–785, Aug. 2014.
- [9] S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. G. F. Gibb, and T. Thorpe, “Developments in construction-scale additive manufacturing processes”, *Autom. Constr.*, vol. 21, pp. 262–268, Jan. 2012.
- [10] G. Schöpf, “Die Verfahren im Überblick,” *Addit. Fert.*, vol. 1, pp. 30–31, 2015.
- [11] P. Fastermann, *3D-Drucken*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [12] Medfab, “Selektives Lasersintern (SLS)/ Selektives Laserschmelzen (SLM)”, 2017. [Online]. Available: <http://medfab.de>.
- [13] J. Park, M. J. Tari, and H. T. Hahn, “Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process”, *Rapid Prototyp. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 36–50, Mar. 2000.
- [14] W. E. Frazier, “Metal additive manufacturing: A review”, *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928, 2014.
- [15] A. Volker, U. Clauß, D. Dr. h. c. v. Dobeneck, T. Dr. Klüssel, and T. Dr. Löwer, *Elektronenstrahlschweißen, Grundlagen einer faszinierenden Technik*, 1. Auflage. pro-beam AG & Co. KGaA, Eigendruck im Selbstverlag, 2011.
- [16] S. Krause and D. Trend, “Ein fortschrittliches Reparaturverfahren: Laser-Pulver-Auftragsschweißen”, *Sulzer Tech. Rev.*, vFol. 4, pp. 4–6, 2001.
- [17] NewSpray GmbH, “Schema: Kaltgasspritzen.” [Online]. Available: [www.newspray.ch](http://www.newspray.ch).
- [18] 3ddruckerkaufen.info, “Fused Deposition Modeling (FDM)”, 2016. [Online]. Available: <http://3ddruckerkaufen.info>.
- [19] P. Wanjara, M. Brochu, and M. Jahazi, “Electron beam freeforming of stainless

- steel using solid wire feed”, *Mater. Des.*, vol. 28, no. 8, pp. 2278–2286, 2007.
- [20] B. Baufeld, E. Brandl, and O. Van Der Biest, “Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition”, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 6, pp. 1146–1158, 2011.
- [21] E. Brandl, F. Palm, V. Michailov, B. Viehweger, and C. Leyens, “Mechanical properties of additive manufactured titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by a solid-state laser and wire”, *Mater. Des.*, vol. 32, no. 10, pp. 4665–4675, 2011.
- [22] “Direkter Metallauftrag durch Laserauftragschweißen mit Draht”, *stahl und eisen*, vol. 135, no. 3, p. 1, 2015.
- [23] D. S. Nowotny, “Generatives Laser-Draht-Auftragschweißen”, *Fraunhofer Inst. für Werkstoff- und Strahltechnik - Jahresbericht 2012*, vol. 1, p. 143, 2012.
- [24] E. Brandl, B. Baufeld, C. Leyens, and R. Gault, “Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: Comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications”, *Phys. Procedia*, vol. 5, no. PART 2, pp. 595–606, 2010.
- [25] L. E. Murr, “Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting”, *Addit. Manuf.*, vol. 5, pp. 40–53, 2015.
- [26] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. New York, NY: Springer New York, 2015.
- [27] J. Gockel, J. Beuth, and K. Taminger, “Integrated control of solidification microstructure and melt pool dimensions in electron beam wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V”, *Addit. Manuf.*, vol. 1–4, pp. 119–126, 2014.
- [28] J. Bruckner and S. Egerland, *Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie*. WEKA MEDIA GmbH & Co. KG, 2013.
- [29] R. Bott, “A Review of Hybrid Manufacturing”, *Igarss 2014*, no. 1, pp. 1–5, 2014.
- [30] K. P. Karunakaran, S. Suryakumar, V. Pushpa, and S. Akula, “Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing”, *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 26, no. 5, pp. 490–499, 2010.
- [31] Böhler, “Hot work tool steel”, *Met. Sci. Heat Treat.*, vol. 2, no. 12, pp. 1251–1254, 2011.
- [32] A. Kopecky and R. Schamschula, *Mechanische Technologie*. Vienna: Springer Vienna, 1977.
- [33] E. Folkhard, F. Rabensteiner, and E. Perteneder, *Metallurgie der Schweissung nichtrostender Stähle*. Springer Wien; New York, 1984.
- [34] R. Laska and C. Felsch, *Werkstoffkunde für Ingenieure*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1981.
- [35] E. Roos and K. Maile, *Werkstoffkunde für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [36] “<http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/stahl-eisen/38-einfluss-legierungselemente-stahl>.” .
- [37] Uddeholm, “Schweißen von Werkzeugstahl”, *Behandlung von Werkzeugstahl*.

- [38] Boehler, "Boehler W302 - Hot work tool steel." BÖHLER Edelstahl GmbH, p. 12, 2011.
- [39] I. C. Stieler, "Die Metallurgie des Schweißens", in *Schweißtechnik im Stahlbau*, Springer, 1939, pp. 22–32.
- [40] H. Berns and W. Theisen, *Eisenwerkstoffe-Stahl und Gusseisen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [41] H. Ornig and G. B. und C. (Düsseldorf), *Das Schaeffler-Diagramm. Aufbau - Anwendung - Genauigkeit*. Stahleisen, 1969.
- [42] H. Berns and W. Theisen, *Eisenwerkstoffe-Stahl und Gusseisen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [43] H. Ornig and G. B. und C. (Düsseldorf), *Das Schaeffler-Diagramm. Aufbau - Anwendung - Genauigkeit*. Stahleisen, 1969.
- [44] G. Wassermann, *Praktikum der Metallkunde und Werkstoffprüfung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1965.
- [45] Norm, "Din EN ISO 6507-1:2005 - Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren," p. 29, 2006.
- [46] Norm, "DIN EN 10002-5:1992-02 - Metallische Werkstoffe - Zugversuch Teil 5: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur." 1992.
- [47] Norm, "DIN EN ISO 14556:2009-09 Stahl - Kerbschlagbiegeversuch Charpy (V-Kerb) -Instrumentiertes Prüfverfahren." p. 26, 2006.
- [48] Norm, "DIN EN ISO 148-1:2011-01 - Metallische Werkstoffe — Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy — Teil 1: Prüfverfahren", vol. 1, no. Jänner. p. 35, 2011.
- [49] M. Nau, *Elektrische Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern (FAS 146)*. 2007.
- [50] Boehler, "W500 - Hot work tool steel," *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 2, no. 12. 2011.
- [51] Böhler Welding Voestalpine, "UTP A73 G3", vol. 3, no. 0, pp. 382–385, 2014.
- [52] H. Mühlböck and E. Engelbrechtsmüller-strauß, "Was uns längst alltäglich erscheint", *weld+vision, Fronius Mag.*, vol. 12, pp. 1–24, 2004.
- [53] Norm, "DIN 50125:2009-07 - Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben." pp. 1–14, 2009.
- [54] D. Ding and D. Cuiuri, "A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)", *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 31, pp. 101–110, 2015.
- [55] S. Mayer *et al.*, "Gefügecharakterisierung eines Warmarbeitsstahls mit martensitisch- bainitischem Mischgefüge", *Pract. Metallogr.*, vol. 44, no. 4, pp. 182–192, Apr. 2007.
- [56] I. Siller and H. Schweiger, "Einfluss von thermomechanischen und physikalischen Werkstoffeigenschaften auf die Brandrissbeständigkeit von Warmarbeitsstählen für Druckgussanwendungen", *Gießerei Rundschau*, vol. 53, pp. 44–46, 2006.

