



# **DIPLOMARBEIT**

Kornformbeeinflussung durch ultraschallunterstütztes  
Laser-Draht-Auftragschweißen

vorgelegt von: Jacob-Florian Mätje

geboren: 07.03.1996

Matrikel: 4538059

Hochschullehrer: Dr.-Ing. Axel Marquardt (TU Dresden, IfWW)

Betreuer: Dipl.-Ing. Conrad Samuel (Fraunhofer IWS)

Datum der Abgabe: 22.09.2022



## Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

im Studiengang Werkstoffwissenschaft

Name des Diplomanden: Jacob-Florian Mätje

Thema: Kornformbeeinflussung durch ultraschallunterstütztes Laser-Draht-Auftragschweißen

### Zielsetzung:

Im Rahmen der Diplomarbeit sollen Möglichkeiten analysiert und getestet werden, gezielt Ultraschallschwingungen durch das Schmelzbad eines Laser-Draht-Auftragschweiß-Prozess zu leiten. Beabsichtigt wird damit eine Kornfeinung des entstehenden Gefüges im Vergleich zum LDA-Prozess ohne zusätzliche Ultraschallbeaufschlagung. Im ersten Schritt der Arbeit soll eine geeignete Versuchsanordnung entwickelt und gebaut werden, die das additive Fertigen von Proben unter Einbringen von Ultraschallschwingungen in das Schmelzbad ermöglicht. Anhand verschiedener drahtförmiger Zusatzwerkstoffe soll im zweiten Schritt die Ultraschallübertragung in das Schmelzbad getestet werden. Anschließend zu fertigende LDA-Proben mit und ohne Ultraschallbeeinflussung sollen analysiert und charakterisiert werden. Abschließend sollen auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse prozessrelevante Handlungsempfehlungen erarbeitet und ein Prozesskopfkonzzept auf Grundlage vorhandener Prozessköpfe abgeleitet werden.

### Arbeitsumfang:

- Literaturrecherche zur Ermittlung vom Stand der Forschung und Technik mit Patentrecherche im Hinblick auf in situ Ultraschallbeeinflussung bei der additiven Fertigung
- Wahl einer geeigneten Methode zum gezielten Einbringen von Ultraschall in das Schmelzbad z.B. global über das Substrat oder lokal über eine Sonde oder den drahtförmigen Zusatzwerkstoff beim LDA
- Entwicklung und Bau einer Versuchsanordnung zur in situ Einbringung von Ultraschall in das Schmelzbad
- Fertigung von Proben mit und ohne Ultraschalleinbringung
- Analyse und Charakterisierung gefertigter Proben und werkstoffwissenschaftliche Interpretation der Ergebnisse mit Fokus auf Korngröße und -form
- Ableitung prozessrelevanter Handlungsempfehlungen und erarbeiten eines Konzeptes zur Integration des Versuchsaufbaues in vorhandene Prozessköpfe

Betreuer: Dr.-Ing. Axel Marquardt (TU Dresden, IfWW)

Dipl. Ing. Conrad Samuel (Fraunhofer IWS)

Ausgehändigt am: 23.03.2022

Einzureichen am: 23.08.2022

Die von der Studienrichtung erlassenen Richtlinien zur Anfertigung der Diplomarbeit sowie die Diplomprüfungsordnung sind zu beachten.

Studiengangsleiter

Prof. Dr. rer. medic. H.-P. Wiesmann

Betreuender Hochschullehrer

Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens

---

# SELBSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich an Eides statt, die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der von mir angegebenen Quellen angefertigt zu haben. Alle aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche gekennzeichnet. Die Arbeit wurde noch keiner Prüfungsbehörde in gleicher oder ähnlicher Form vorgelegt.

Dresden, den            22.09.2022

Unterschrift            Jacob-Florian Mätje

.....

# INHALTSVERZEICHNIS

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Selbständigkeitserklärung .....                           | I  |
| Inhaltsverzeichnis.....                                   | II |
| Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....                   | IV |
| Symbole.....                                              | IV |
| Abkürzungen.....                                          | V  |
| 1    Einleitung.....                                      | 1  |
| 2    Stand der Technik .....                              | 2  |
| 2.1    Additive Fertigung von metallischen Bauteilen..... | 2  |
| 2.1.1    Grundlagen.....                                  | 2  |
| 2.1.2    Das Laser-Draht-Auftragschweißen.....            | 3  |
| 2.2    Ultraschall .....                                  | 19 |
| 2.2.1    Kavitation .....                                 | 21 |
| 2.2.2    Ultraschallbehandlung von Metallschmelzen.....   | 24 |
| 2.2.3    Ultraschall in der additiven Fertigung .....     | 26 |
| 3    Systemtechnik und Werkstoffe.....                    | 32 |
| 3.1    Systemtechnik.....                                 | 32 |
| 3.1.1    Fertigungsanlage.....                            | 32 |
| 3.1.2    Prozessüberwachung.....                          | 33 |
| 3.1.3    Optik und Prozesskopf .....                      | 33 |
| 3.1.4    Strahlenquelle .....                             | 34 |
| 3.1.5    Drahtfördereinheit.....                          | 35 |
| 3.1.6    Ultraschallprozessor .....                       | 35 |
| 3.2    Werkstoffe.....                                    | 37 |
| 3.2.1    Substrat.....                                    | 37 |
| 3.2.2    Zusatzwerkstoff .....                            | 37 |
| 4    Systemintegration und Vorbetrachtung .....           | 38 |
| 4.1    Wahl der Ultraschalleinkopplung.....               | 38 |

---

|       |                                                                       |      |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|------|
| 4.1.1 | Anregung des gesamten Substrates.....                                 | 38   |
| 4.1.2 | Elektromagnetisch induzierte Kavitation .....                         | 40   |
| 4.1.3 | Lokale Sonotrode .....                                                | 42   |
| 4.1.4 | Einleitung über den Draht .....                                       | 43   |
| 4.2   | Auslegung, Beschaffung und Integration .....                          | 44   |
| 4.3   | Versuchsplanung .....                                                 | 49   |
| 4.3.1 | Probengeometrie .....                                                 | 49   |
| 4.3.2 | Prozessparameter und Verfahrensstrategie .....                        | 50   |
| 5     | Versuchsdurchführung und Auswertung .....                             | 54   |
| 5.1   | Amplitudenspektrum anhand von Einzelspuren .....                      | 54   |
| 5.1.1 | Durchführung und makroskopische Auswertung .....                      | 54   |
| 5.1.2 | Resonanzfrequenzverlauf .....                                         | 58   |
| 5.1.3 | Mikroskopische Auswertung.....                                        | 61   |
| 5.2   | Amplitudenspektrum anhand von Wänden.....                             | 63   |
| 5.2.1 | Durchführung und makroskopische Auswertung.....                       | 63   |
| 5.2.2 | Resonanzfrequenzverlauf .....                                         | 66   |
| 5.2.3 | Mikroskopische Auswertung.....                                        | 69   |
| 5.3   | Ansätze zur Prozessstabilisierung.....                                | 81   |
| 5.3.1 | Stärkere Defokussierung .....                                         | 82   |
| 5.3.2 | Dreispurige Wände .....                                               | 85   |
| 5.3.3 | Wände mit verzögertem Einschalten des Ultraschalls.....               | 89   |
| 5.3.4 | Quader .....                                                          | 92   |
| 5.3.5 | Parameteroptimierung anhand von Wänden mit Infrarotkamera .....       | 93   |
| 6     | Zusammenfassung, Ausblick und abgeleitete Handlungsempfehlungen ..... | 96   |
|       | Literaturverzeichnis .....                                            | VI   |
|       | Tabellenverzeichnis.....                                              | XIII |
|       | Abbildungsverzeichnis.....                                            | XIV  |
|       | Anhänge .....                                                         | XVII |

# ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

## SYMBOLE

| Symbol         | Bedeutung                              | SI-Einheit         |
|----------------|----------------------------------------|--------------------|
| $P_L$          | Laserleistung                          | W                  |
| $I_L$          | Leistungsdichte                        | W/mm <sup>2</sup>  |
| $v_L$          | Vorschubgeschwindigkeit                | mm/min             |
| $E_S$          | Streckenenergie                        | J/mm               |
| $v_D$          | Drahtvorschubgeschwindigkeit           | mm/min             |
| $\dot{m}_D$    | Streckenmasse                          | g/mm               |
| $d_L$          | Laserspot                              | mm                 |
| $d_D$          | Drahtdurchmesser                       | mm                 |
| $T$            | Temperatur                             | K                  |
| $\rho$         | Dichte                                 | Kg/m <sup>-3</sup> |
| $Q_{BD}$       | Brennfleck-Drahtverhältnis             | –                  |
| $s_{DE}$       | Drahteinlaufstrecke                    | mm                 |
| $s_{DA}$       | Drahtauslaufstrecke                    | mm                 |
| $s_{LE}$       | Lasereinlaufstrecke                    | mm                 |
| $s_{LA}$       | Laserauslaufstrecke                    | mm                 |
| $b_S$          | Spurbreite                             | µm                 |
| $h_S$          | Spurhöhe                               | µm                 |
| $F_E$          | Einbrandfläche                         | –                  |
| $F_A$          | Auftragsfläche                         | –                  |
| $AG$           | Aufmischungsgrad                       | –                  |
| $\dot{m}_{SG}$ | Schutzgasstrom                         | l/min              |
| $A_{KF}$       | Ausdehnung des Korrekturfeldes         | mm                 |
| $V_{KF}$       | Verlangsamungsrate des Korrekturfeldes | %                  |

| Symbol       | Bedeutung                                       | SI-Einheit                         |
|--------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|
| $c$          | Schallgeschwindigkeit                           | m/s                                |
| $f$          | Frequenz                                        | Hz                                 |
| $A$          | Amplitude                                       | $\mu\text{m}$                      |
| $I$          | Ultraschallintensität                           | $\text{W}/\text{mm}^2$             |
| $R$          | Universelle Gaskonstante                        | $\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$ |
| $M$          | Molare Masse                                    | $\text{kg}/\text{mol}$             |
| $T_m$        | Schmelzpunkt                                    | K                                  |
| $f_R$        | Resonanzfrequenz                                | Hz                                 |
| $\Delta f_R$ | Resonanzdifferenz                               | Hz                                 |
| $l_i$        | mittlere Kornlänge in einer Richtung            | $\mu\text{m}$                      |
| $L_i$        | Länge einer Linie in einer Richtung             | $\mu\text{m}$                      |
| $z_i$        | Anzahl der von einer Linie geschnittenen Körner | –                                  |
| $\tau$       | Auftragsrate                                    | $\text{g}/\text{min}$              |
| $\varphi$    | Nahtformkoeffizient                             | –                                  |

## ABKÜRZUNGEN

|      |                                           |
|------|-------------------------------------------|
| AF   | additive Fertigung                        |
| LDA  | Laser-Draht-Auftragschweißen              |
| LPA  | Laser-Pulver-Auftragschweißen             |
| CNC  | Computerized Numerical Control            |
| CAM  | Computer-aided Manufacturing              |
| REM  | Rasterelektronenmikroskop                 |
| EBSD | Elektronen-Rückstreubeugung               |
| MUD  | Multiple of Uniform Density               |
| IR   | Infrarot                                  |
| IWS  | Institut für Werkstoff- und Strahltechnik |

# 1 EINLEITUNG

Im Verlauf der letzten Jahre hat sich die additive Fertigung (AF) als Bestandteil mehrerer Industriezweige etablieren können. Angetrieben durch Fortschritte in Technologien, verarbeitbaren Materialien und Möglichkeiten der Nachbehandlung ist die Verwendung von additiven Verfahren kontinuierlich gewachsen. Im Rahmen der COVID-19-Pandemie ist davon auszugehen, dass dieser Trend anhält, wenn Unternehmen nach Möglichkeiten suchen, unabhängiger von anfälligen Lieferketten und globalen Zulieferern zu werden.

Trotz oder gerade aufgrund dieses Trends ist es notwendig, das Leistungsspektrum der additiven Fertigung weiter auszubauen. Ein bestehendes Problem ist die Fertigung von einsatzbereiten, mechanisch beanspruchbaren Bauteilen. Durch die kleinen Schmelzvolumina und hohen Abkühlraten, die für alle schmelzbasierten AF-Verfahren gegeben sind, entsteht eine charakteristische Mikrostruktur der gefertigten Bauteile. Es bilden sich vorrangig kolumnare Kornstrukturen, die sich makroskopisch in einer Anisotropie der mechanischen Eigenschaften äußern. Die Möglichkeiten diese Mikrostruktur durch geschickte Prozessführung oder Ändern der Legierungszusammensetzung positiv zu beeinflussen, sind begrenzt. Die Alternative stellen energieintensive und somit teure Wärmebehandlungsverfahren dar, die jedoch nach aktuellem Stand zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften notwendig sind.

In dieser Arbeit wird eine Methode zur in situ Erstarrungsbeeinflussung beim Laser-Draht-Auftragschweißen (LDA) untersucht. Bei diesem handelt es sich um ein etabliertes Verfahren des direkten Energieeintrages. Der Zusatzwerkstoff wird in Drahtform in die Prozesszone eingebracht. Mittels Hochleistungsschall soll im Erstarrungsprozess durch Erzeugung von Kavitation in der Metallschmelze die Formation von feinen gleichachsigen Körnern angeregt werden.

Die Verwendung von Schall zur Kornfeinung bei der Erstarrung von Metallschmelzen ist keinesfalls neu, sondern wird seit geraumer Zeit immer wieder untersucht und auch angewendet. Limitierender Faktor ist dabei die Anregung großer Schmelzvolumina. Dieses Problem besteht für die AF aus weiter oben bereits genannten Gründen nicht. Von verschiedenen Forschungsgruppen wurden bereits erfolgreich Untersuchungen zur Kornfeinung mittels Schall in der additiven Fertigung durchgeführt.

## 2 STAND DER TECHNIK

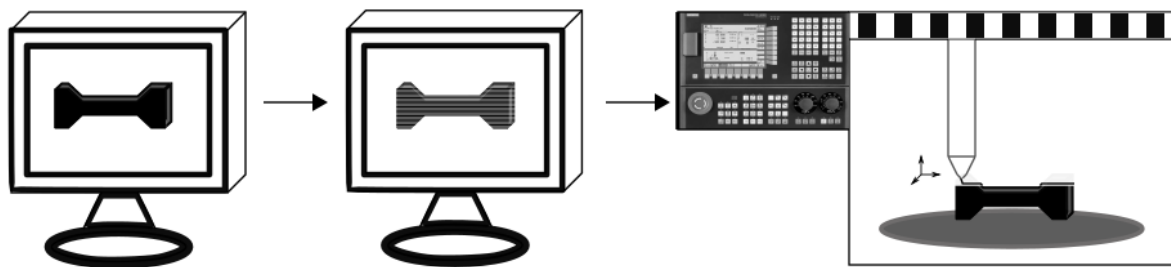
Dieses Kapitel behandelt die additive Fertigung von Metallen im Allgemeinen und geht näher auf das Verfahren des Laser-Draht-Auftragschweißens sowie die Verwendung von Ultraschall zur Behandlung von Metallschmelzen ein.

### 2.1 ADDITIVE FERTIGUNG VON METALLISCHEN BAUTEILEN

#### 2.1.1 Grundlagen

Die additive Fertigung (Englisch „additive manufacturing“) umfasst alle Fertigungsverfahren, bei denen durch schichtweisen Auftrag von Einzellagen ein Bauteil hergestellt wird. Damit grenzt sich die AF von konventionellen Fertigungsverfahren ab, welche die gewünschte Geometrie durch Materialabtrag erreichen [1, S. 3]. Es ist jedoch notwendig zu betonen, dass die additive Herstellung eines Bauteils eine Nachbehandlung oder Kombination mit abtragenden Verfahren nicht ausschließt, sondern oftmals fester Teil der Produktionskette ist [2].

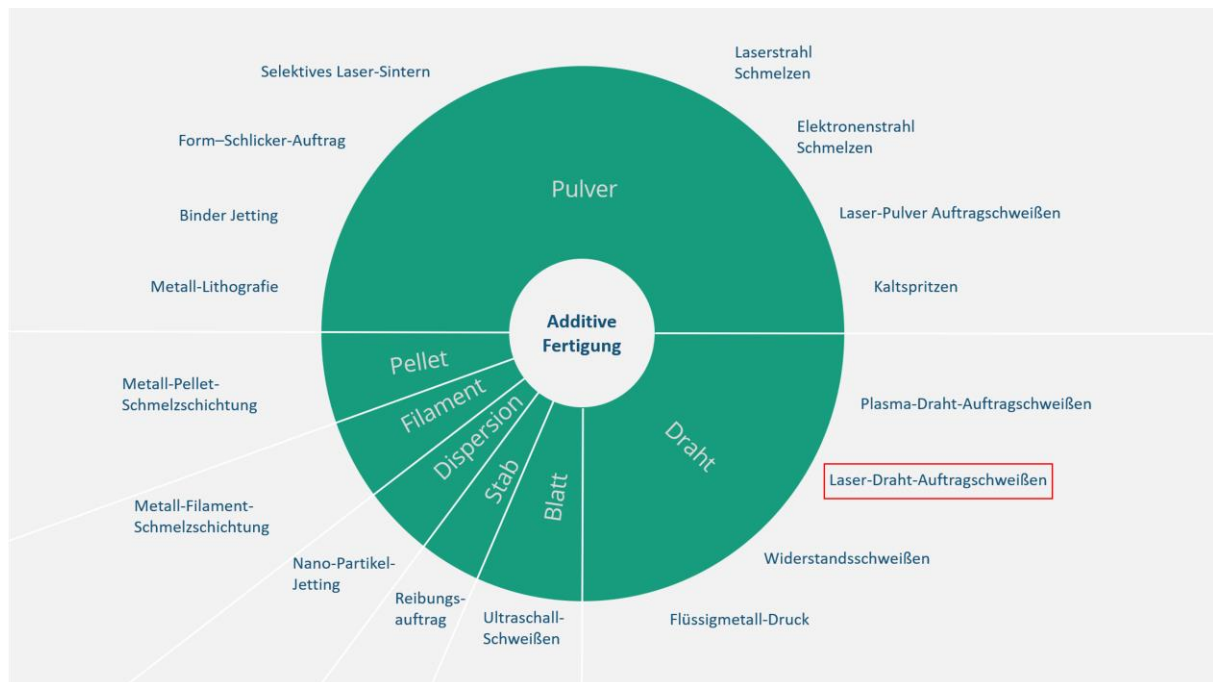
Jeder komplexere Körper, der mittels AF generiert werden soll, muss zunächst als 3D-CAD-Modell vorliegen. Dieses wird mittels Computer-aided Manufacturing (CAM) Software in einzelne Schichten zerlegt (slicing). Auf Basis der erstellten Schichten werden anschließend Werkzeugbahnen erzeugt (hatching). Diese lassen sich als Datei ausgegeben und in die Steuersoftware der jeweiligen Fertigungsanlage übertragen. Das Bauteil wird dann durch schichtweisen Auftrag aufgebaut. Dabei muss der Zusatzwerkstoff durch Wärme, Druck und oder chemische Zusatzstoffe an die vorgegebene Position gebracht werden. Eine allgemeine Darstellung des Prinzips zeigt Abbildung 1. [3, S. 64–78]



**Abbildung 1: Allgemeines Prinzip der additiven Fertigung**

Für die additive Fertigung von Metall stehen inzwischen über 18 unterschiedliche Verfahren zur Verfügung [4]. Eine Übersicht, eingeteilt nach dem Zustand des Zusatzwerkstoffes, zeigt Abbildung 2. Oftmals abgeleitet von bereits etablierten Technologien bieten die Verfahren unterschiedliche Auftragsraten, Genauigkeiten sowie weitere individuelle Vor- und

Nachteile. Somit kann abhängig von der geplanten Anwendung die passende Technologie gewählt und genutzt werden.



**Abbildung 2: Verfahrensübersicht additive Fertigung [4]**

Für diese Arbeit kommt das in Abbildung 2 rot markierte Laser-Draht-Auftragschweißen zum Einsatz.

### 2.1.2 Das Laser-Draht-Auftragschweißen

Das LDA ist ein Verfahren des direkten Energieeintrages. Das Generieren von dreidimensionalen Komponenten erfolgt durch das vollständige Aufschmelzen des Zusatzwerkstoffes unter Verwendung der durch einen Laserstrahl bereitgestellten Energie. Das LDA bietet einige Vorteile gegenüber anderen additiven Fertigungsverfahren, die eine Anwendung für bestimmte Aufgaben attraktiv machen. Verglichen mit den häufig genutzten pulverbettbasierten Verfahren [5, S. 8] bietet es höhere Auftragsraten und deutlich größere maximale Bauteildimensionen, jedoch auf Kosten der Genauigkeit [6, S. 119]. Eine Gegenüberstellung der Parameter von pulverbettbasierten Verfahren und den Verfahren des direkten Energieeintrages zeigt Tabelle 1.

**Tabelle 1: Gegenüberstellung ausgewählter üblicher Parameter für pulverbettbasierte Verfahren und Verfahren des direkten Energieeintrages [6, S. 119]**

| Verfahren                             | Pulverbett      | direkter Energieeintrag  |
|---------------------------------------|-----------------|--------------------------|
| Laserleistung in W                    | 50–1000         | 100–3000 (10000 möglich) |
| Vorschubgeschwindigkeit in mm/min     | 600–60000       | 300–1200                 |
| Maximale Bauteilgröße in mm           | 500 x 280 x 320 | 2000 x 1500 x 750        |
| Maximale Auftragsrate in g/min        | Keine Angabe    | 6–60                     |
| Genauigkeit in mm                     | 0,04–0,2        | 0,5–1,0                  |
| Oberflächenrauigkeit in $\mu\text{m}$ | 7–20            | 4–10                     |

Das Laser-Pulver-Auftragschweißen (LPA) ist ein weiteres wichtiges Verfahren des direkten Energieeintrages. Die beiden Verfahren stehen nicht in direkter Konkurrenz, sondern bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile, die für jede potenzielle Anwendung abgewogen werden müssen. Trotz der Ähnlichkeit in der allgemeinen Funktionsweise der Verfahren gibt es spezielle Anwendungen, für die eines der beiden deutliche Vorteile bietet. Für das LPA zum Beispiel die in situ Legierung mit unterschiedlichen Pulvern [7], für das LDA das Schweißen in Schwerelosigkeit [8].

Zu den allgemeinen Vorteilen des LDA gehört vor allem eine Materialausnutzung von bis zu 100 % [9, S. 2]. Besonders für teure Zusatzwerkstoffe ist eine vollständige Materialausnutzung erstrebenswert. Hinzu kommt der generell niedrigere Preis für Werkstoffe in Drahtform, verglichen mit Metallpulvern, die in der Herstellung deutlich aufwändiger sind. Auch aus gesundheitlicher Sicht ist die Abwesenheit von Partikeln, die als kleiner 100  $\mu\text{m}$  sind, erstrebenswert. Materialien wie Cobalt, Chrom und Nickel in Pulverform sind gesundheitsschädlich und machen die Nutzung von persönlicher Schutzausrüstung notwendig [10, S. 6].

Ein anhaltendes Problem der pulverbasierten additiven Fertigung ist die stark schwankende Pulverqualität, nicht nur zwischen Herstellern, sondern auch zwischen Chargen desselben Herstellers [11]. Partikelgrößenverteilung und Partikelform bestimmen maßgeblich die Fließfähigkeit und das Schüttverhalten [12, S. 1], was sich in den Eigenschaften des fertigen Bauteils widerspiegelt. Drahtwerkstoffe sind im Vergleich einfacher in

gleichbleibender Qualität erhältlich. Auch bedeutet die 100-prozentige Materialausnutzung, dass sich die exakte Auftragsrate bei bekannter Drahtgeometrie und Fördergeschwindigkeit leicht bestimmen lässt.

Mit den genannten Vorteilen gehen jedoch entsprechende Nachteile einher. Im Allgemeinen haben mit Draht generierte Teile eine geringere Genauigkeit, im Vergleich zu LPA-gefertigten. Der Draht sorgt für einen deutlicher ausgeprägten „Treppenstufeneffekt“ und somit eine schlechtere Oberflächenqualität. Die Verwendung von Mikrodraht (Durchmesser  $< 0,3 \text{ mm}$ ) kann zwar die Detailgenauigkeit verbessern, steigert jedoch den technischen Aufwand und reduziert die erreichbaren Auftragsraten [9, S. 9].

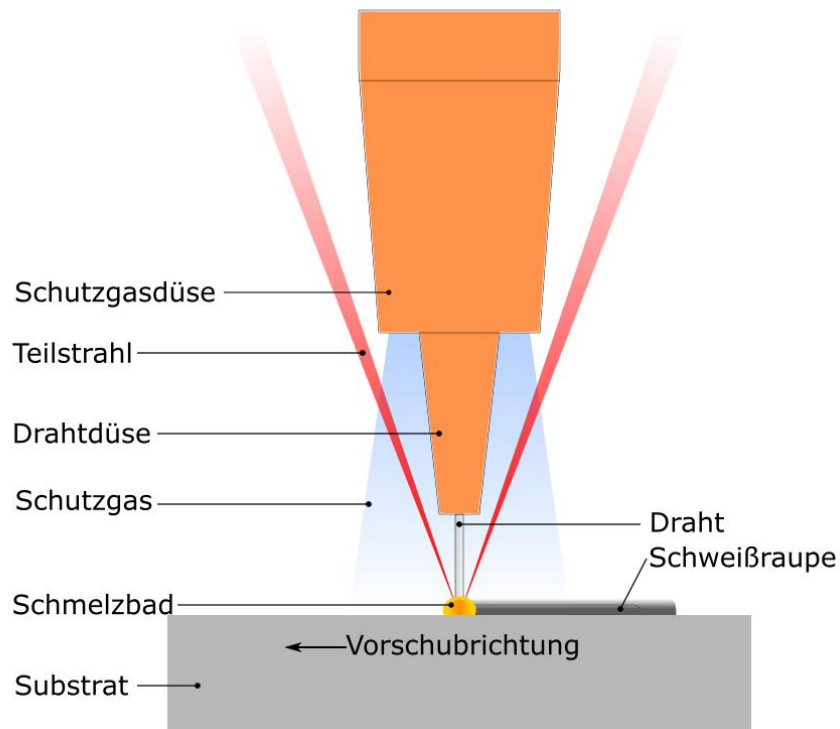
Die Aufrechterhaltung der Prozessstabilität ist für das LDA schwieriger als beim LPA. Beim LPA führt eine mangelhaft zentrierte Materialzuführung zu einer geringeren Materialausnutzung, Gleiches gilt für das Arbeiten außerhalb des optimalen Arbeitsabstandes. Besteht hingegen beim LDA ein Versatz von Laser und Draht, kommt es zum unregelmäßigen Aufschmelzen des Drahtes, was den gesamten Prozess destabilisiert. Die Folge sind Schweißfehler oder der vollständige Prozessabbruch [13, S. 15]. Für gute Schweißergebnisse sind somit sorgfältiges Arbeiten und die Berücksichtigung der durch Draht als Zusatzwerkstoff gegebenen Besonderheiten notwendig. Das bedeutet einen Mehraufwand bei Programmierung und Anlagenbedienung.

Als Material kommen für das LDA generell alle Werkstoffe in Frage, die in Drahtform verfügbar und schweißbar sind. Dies beinhaltet Reinstoffe ebenso wie Legierungen. Häufig eingesetzte Werkstoffe sind Edelstähle, Titanlegierungen, Nickelbasislegierungen, Aluminiumlegierungen und weitere [14, 15]. Obwohl die Materialbandbreite für das LDA generell gut ist, hat das LPA hier mehrere Vorteile. Zum einen ist es möglich, durch Mischen von Pulvern die Legierungszusammensetzung anzupassen, zum anderen können mittels in situ Legierung Komposite und Gradientenwerkstoffe [16] hergestellt werden.

### 2.1.2.1 Verfahrensprinzip und Anlagenaufbau

Ein Laserstrahl, erzeugt durch einen Scheiben-, Dioden- oder Faserlaser, wird durch eine Lichtleitfaser zum Prozesskopf geleitet. Typische Laserleistungen liegen zwischen 0,5 und 3 kW mit einer Wellenlänge im nahen Infrarotbereich [17, S. 2]. Dort wird er kollimiert und induziert auf der Oberfläche eines Substratwerkstoffes ein Schmelzbad. Der Brennfleckdurchmesser des Lasers ist relativ klein und liegt zwischen 0,3 und 3 mm. Entsprechend verhält sich die Größe des erzeugten Schmelzbades. Der drahtförmige Zusatzwerkstoff wird durch die Drahtfördereinheit kontinuierlich und geregelt in die Prozesszone transportiert [18, S. 251–252]. Dort taucht er in das vom Laserstrahl erzeugte Schmelzbad ein, wird aufgeschmolzen und es kommt zu einer partiellen Mischung mit dem

Substratmaterial. Anschließend kommt es zu einer schnellen Abkühlung (bis zu 5500K/s [19, S. 12] ) und Erstarrung. Dies resultiert in einer festen metallurgischen Bindung. Um eine Oxidation der Schmelze zu verhindern, wird ein kontinuierlicher Strom aus inertem Schutzgas eingesetzt [18, S. 245–252]. Dieses strömt gleichachsig zum Draht aus einer Düse und schirmt die Prozesszone von der umgebenden Atmosphäre ab. Zum Einsatz kommen hauptsächlich Argon, Stickstoff und Helium sowie Gemische dieser Gase. Eine allgemeine Verfahrensübersicht für das LDA mit koaxialer Drahtzufuhr zeigt Abbildung 3.



**Abbildung 3: Verfahrensprinzip des LDA mit koaxialer Drahtzufuhr [13, S. 9]**

Das Generieren der Zielgeometrie erfolgt über eine Relativbewegung des Prozesskopfes gegenüber dem Substrat. Realisiert wird die Bewegung in der Regel durch eine mehrachsige Computerized Numerical Control-Anlage (CNC). Die Bewegungsabfolge wird, durch die in Maschinencode übersetzten, durch CAM-Software berechneten Werkzeugbahnen vorgegeben [18, S. 247–248]. Verglichen mit pulverbettbasierten Verfahren müssen hier große Massen beschleunigt und abgebremst werden. Dies führt zu einer entsprechend geringeren Genauigkeit.

Der Materialauftrag beim LDA erfolgt somit spurweise. Durch Überlappen der Einzelspuren lassen sich Flächen erzeugen, welche schichtweise aufeinander aufgetragen werden können, um Volumenkörper zu generieren. Es können also Punkte, Einzelspuren, Flächen und Volumenkörper aufgetragen werden. Mit höherer Dimensionalität steigt hierbei der Aufwand der Programmierung und der Anspruch an eine stabile Prozessführung. Die

Geometrie der Schmelzraupe ist gleichzeitig die kleinste abbildbare Struktur und entscheidet somit über die mögliche erreichbare Genauigkeit [18, S. 251–252].

Die Drahtzufuhr in die Prozesszone lässt sich auf zwei Arten realisieren: lateral oder koaxial. Für die laterale Zufuhr wird weiterhin unterschieden, ob der Draht in Vorschubrichtung vor dem Laser (stechend) oder nach dem Laser (schleppend) zugeführt wird [13, S. 8]. Die Konsequenz ist eine Richtungsabhängigkeit des Prozesses. Diese ist für reine Beschichtungsprozesse akzeptabel, für das Generieren dreidimensionaler Strukturen mit höherem Anspruch an die Genauigkeit wird jedoch eine Konfiguration mit koaxialer Drahtführung benötigt, wie in Abbildung 3 dargestellt. Die technische Umsetzung ist entsprechend schwieriger, da der Laserstrahl für eine vollständige Richtungsunabhängigkeit ebenfalls zentrisch geführt werden muss [17, S. 2]. Die praktikabelste Lösung stellen Mehrstrahlenoptiken dar. Entweder wird ein Einzelstrahl aufgespalten und im Brennfleck wieder zusammengeführt oder es sind mehrere Strahlenquellen integriert, die durch die Optik entsprechend fokussiert werden [20, S. 7]. Diese Lösung schließt jedoch eine geringfügige Richtungsabhängigkeit nicht aus. Je nach Anordnung und Anzahl der Teilstrahlen kann es zur Abschattung eines Teilstrahls kommen. Weiterhin reagiert die Konfiguration empfindlich auf das Verlassen der exakten Arbeitsebene durch suboptimale Prozessführung.

Unabhängig von der realisierten Drahtzufuhrkonfiguration wird der Drahtförderer in der Regel nach der Push-Push-Methode [21, S. 297] betrieben. Eine Antriebseinheit in Nähe der Drahtlagerung fördert ein kontinuierliches Drahtvolumen. Eine zweite Antriebseinheit möglichst nah an der Prozesszone stellt die gewünschte Drahtförderergeschwindigkeit ein. Die Methode ermöglicht den Drahttransport über relativ lange Strecken und den Platzbedarf im Bauraum gering zu halten. Der Draht selbst liegt meist auf Rollen gewickelt vor und lässt sich mit relativ geringem Aufwand austauschen. Durch diese Art der Lagerung behält der Draht beim Abwickeln eine gewisse Krümmung bei. Diese ist unerwünscht, da sie die Zentrierung des Drahtes erschwert. Mit abnehmendem Drahtdurchmesser wird das Problem ausgeprägter. Zur Begradigung des Drahtes werden Rollenrichtapparate eingesetzt. Der Draht wird durch versetzt angeordnete Richtrollen in wechselnde Richtungen gebogen. Durch die Verformung und das anschließende Rückfedern wird beim Durchlaufen der Apparatur schrittweise die lagerungsbedingte Drahtkrümmung abgebaut.

Zusätzlich kann das Transportsystem mit einer Induktiv- oder Widerstandsheizung ausgestattet sein. In diesem Fall spricht man von Heißdrahtförderung [22]. Die Vorwärmung des Drahtes kann die benötigte Laserleistung reduzieren und so lassen sich höhere Auftragsraten realisieren [23, S. 4].

Ein wichtiger Unterschied zum LPA ist die vergleichsweise höhere Komplexität der Startroutine. Beim LPA wird zuerst die Pulverförderung eingeschaltet. Anschließend kann zu einem beliebigen Zeitpunkt der Prozess durch Hinzuschalten des Laserstrahls begonnen werden. Für das LDA ist eine Drahtförderung ohne eingeschalteten Laser nicht möglich, da der Draht sich beim Auftreffen auf das kalte Substrat verbiegt oder abbricht. Der Beginn der Drahtförderung und das Einschalten des Laserstrahls müssen also korrekt aufeinander abgestimmt sein [13, S. 50–57].

Zur Realisierung dieser Abstimmung existieren zwei mögliche Startroutinen: stationärer Start und fliegender Start. Für den stationären Start wird die Drahtdüse über dem Startpunkt positioniert, der Draht zentriert und die Förderung beginnt. Bevor der Draht mit dem Substrat kollidiert, erfolgt das Einschalten des Laserstrahls, der den Draht aufschmilzt. Anschließend beginnt der Prozesskopf sich auf den vorgegebenen Bahnen zu bewegen. Das Zuschalten des Laserstrahls erfolgt zeitgesteuert, da keine Einlaufstrecke für eine wegabhängige Steuerung vorhanden ist. Der stationäre Start wird gewählt, wenn aus Platzgründen im Bauraum keine Einlaufstrecke realisierbar ist oder auf die Genauigkeit des Startpunktes besonders Wert gelegt wird. Der Nachteil des stationären Starts liegt in der Trägheit der Achsenbeschleunigung. Die Anlage erreicht nicht sofort nach Beginn der Bewegung die geforderte Vorschubgeschwindigkeit und die entstehenden Schweißraupen können Unregelmäßigkeiten in ihrer Geometrie aufweisen. [13, S. 50–54]

Ist im Bauraum der nötige Platz vorhanden, wird meistens der fliegende Start gewählt. Der Prozess beginnt mit einer Bewegung des Prozesskopfes, gefolgt vom Einschalten der Drahtförderung und dem anschließenden Zuschalten des Laserstrahls. Somit befindet sich der Prozesskopf bei Beginn des eigentlichen Schweißprozesses bereits in Bewegung und die gesamte Schweißraupe wird mit identischen Prozessparametern aufgetragen. Der Ablauf der Startroutine kann dabei zeit- oder weggesteuert erfolgen. Letzteres lässt sich in der Regel einfacher programmtechnisch implementieren. [13, S. 53–54]

Der fliegende Start erschwert jedoch durch den zusätzlichen Parameter Einlaufstrecke die genaue Positionierung des Startpunktes. Deshalb ist es notwendig, die Drahteinlaufstrecke  $s_{DE}$  exakt zu kennen. Ist  $s_{DE}$  zu groß gewählt, trifft der Draht vor dem Laser auf das Substrat und wird geknickt. Bei zu kleinem  $s_{DE}$  trifft der Draht verspätet auf das Substrat, der Schweißprozess startet verzögert und nicht im eigentlich vorgesehen Startpunkt. Auch kann es hierbei zum Aufschmelzen des Drahtes vor Erreichen des Substrates kommen. Um die Oberflächenspannung zu minimieren, bildet die Schmelze eine Kugel unterhalb der Drahtdüse. Dieses Fehlerbild wird „Balling“ genannt und führt fast immer zu einem Prozessabbruch [13, S. 82].

### 2.1.2.2 Prozessparameter und Kennwerte

Sowohl die Geometrietreue als auch die Qualität der Mikrostruktur des Schweißergebnisses werden durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die miteinander in Wechselwirkung stehen. Die primären Prozessparameter sind über die Programmierung oder Maschinensteuerung direkt zugänglich und lassen sich, dem individuellen Prozess entsprechend, anpassen. Andere Einflussgrößen sind durch die vorhandene Systemtechnik oder den zu verarbeitenden Werkstoff vorgegeben. Eine Übersicht über die relevanten Einflussfaktoren bietet Abbildung 4.

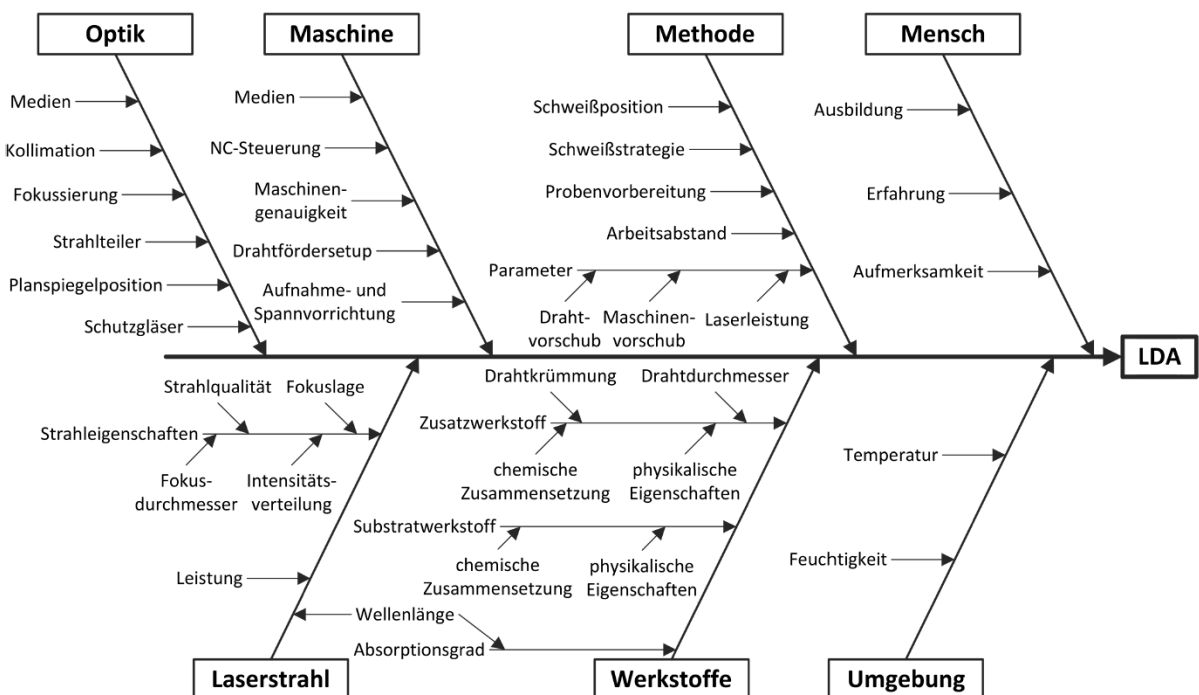


Abbildung 4: Ishikawa-Diagramm der Einflussfaktoren beim LDA [24]

Aus den Prozessparametern lassen sich eine Reihe von Kenngrößen ableiten. Mit diesen ist es möglich, die Qualität des Schweißergebnisses bis zu einem gewissen Grad vorherzusagen oder das Schweißergebnis zu bewerten. Sie haben ihren Ursprung in der DIN 1910-100, die allgemein schweißtechnisch relevante Kenngrößen definiert [25].

#### Laserleistung

Die Laserleistung  $P_L$  bestimmt die im Prozess zum Aufschmelzen von Substrat und Zusatzwerkstoff verfügbare Energie. Es steht jedoch nicht die gesamte Ausgangsleistung auch tatsächlich zur Verfügung. Abhängig vom Absorptionsgrad des Substratmaterials für die entsprechende Wellenlänge wird ein Teil der Leistung reflektiert. Ein weiterer Teil wird transmittiert. Nur der absorbierte Anteil trägt zur Substraterwärmung bei. Dieser wird wiederum teilweise durch Wärmeleitung aus der Prozesszone in das umliegende

Substratmaterial abgeführt. Die Laserleistung muss also so gewählt werden, dass trotz der beschriebenen Leistungsverluste noch genügend Energie in der Prozesszone vorhanden ist, um ein stabiles, ausreichend großes Schmelzbad zu erzeugen. [26, S. 62–67]

Ziel ist, die Verlustleistung möglichst geringzuhalten. Dafür sollte die Substratoberfläche gereinigt, entfettet und sandgestrahlt vorliegen. Für den Großteil der technisch relevanten Werkstoffe ist ein Laser mit Wellenlänge im nahen Infrarotbereich (ca. 0,8 bis 1,4  $\mu\text{m}$ ) aufgrund seines Absorptionsverhaltens geeignet. Nur für Sonderfälle wie Kupfer oder Gold ist es sinnvoll, einen anderen Wellenlängenbereich zu wählen [27].

Da die Laserleistung über die Schmelzbadgeometrie entscheidet, wirkt sie sich ebenfalls auf die Geometrie der entstehenden Schweißspuren aus. Mit steigender Laserleistung vergrößert sich das Schmelzbad, die resultierende Spur wird breiter und verliert leicht an Höhe, da unabhängig von der Laserleistung die gleiche Menge Zusatzwerkstoff zur Verfügung steht.

### Strahlintensität

Mit der Laserleistung verknüpft ist die Kenngröße Strahlintensität  $I_L$  (auch als Leistungsdichte bezeichnet). Sie ist ein Maß für die eingebrachte Energie pro Flächeneinheit. In die Berechnung fließen die Laserleistung  $P_L$  und der Spotdurchmesser  $d_L$  ein.

$$I_L = \frac{4 * P_L}{\pi * d_L^2} \quad (1)$$

### Vorschubgeschwindigkeit

Die Relativbewegung zwischen Prozesskopf und Substrat findet mit der vorgegebenen Vorschubgeschwindigkeit  $v_L$  statt [25, S. 10]. Ebenso wie die Laserleistung wirkt sie sich entscheidend auf die Spurgeometrie aus. Dies begründet sich aus dem Einfluss auf die Form des Schmelzbades. Bei konstanter Laserleistung und Drahtvorschubgeschwindigkeit führt eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit zu einer Reduktion der pro Streckenabschnitt verfügbaren Leistung und Zusatzwerkstoffmasse. Die resultierende Schweißspur ist sowohl schmaler als auch flacher. Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine hohe Vorschubgeschwindigkeit wünschenswert, da das Abfahren der zur Herstellung des Bauteils benötigten Werkzeugbahnen entsprechend schneller erfolgt. Gleichzeitig muss eine Erhöhung von  $v_L$  durch die Anpassung bzw. Erhöhung anderer Parameter ausgeglichen werden. Es werden also Prozessstabilität und Wirtschaftlichkeit gegeneinander abgewogen. [26, S. 77–86]

## Streckenenergie

Aus der Verknüpfung von Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit geht die Kenngröße Streckenenergie  $E_s$  hervor [25, S. 12].

$$E_s = \frac{P_L}{v_L} \quad (2)$$

Sie beschreibt den Energieeintrag pro Streckeneinheit und ist damit sowohl für die Schmelzbadgeometrie als auch für den Temperaturverlauf während des Schweißvorganges wichtig. Bei sehr kleinen Streckenenergien reicht die eingebrachte Energie nicht aus, um ein ausreichend großes Schmelzbad zu erzeugen, das eine Verbindung von Draht und Substrat garantiert. Wird die Streckenenergie dagegen sehr hoch gewählt, entsteht ein breites und tiefes Schmelzbad. Hier kann es zu einer starken Aufmischung oder dem Verdampfen von Substratmaterial kommen. Beides ist für einen optimierten Prozess unerwünscht und muss durch die korrekte Abstimmung von Vorschubgeschwindigkeit und Laserleistung vermieden werden [13, S. 19–20].

## Drahtvorschubgeschwindigkeit

Die Drahtvorschubgeschwindigkeit  $v_D$  gibt an, wie viel Zusatzwerkstoff pro Zeiteinheit aus der Drahtdüse in die Prozesszone gefördert wird [25, S. 10]. Sie entscheidet zusammen mit der Vorschubgeschwindigkeit darüber, wie viel Draht pro Streckeneinheit zur Verfügung steht. Eine Erhöhung von  $v_D$  resultiert sowohl in einer breiteren als auch in einer höheren Schweißspur. Der Drahtvorschub darf jedoch relativ zur bereitgestellten Energie nicht zu hoch gewählt werden. Kann der Draht vom Schmelzbad nicht mehr vollständig aufgeschmolzen werden, kommt es zur Kollision mit dem Substrat und daraus resultierend zum Drahtstau und Prozessabbruch. Ist der Drahtvorschub, verglichen mit der vorhandenen Energie, zu klein, wird der Draht bereits oberhalb des Substrates aufgeschmolzen und es kommt zum Balling. [13, S. 13–14]

### Auftragsrate

Anders als beim LPA lässt sich die exakte Masse an Zusatzwerkstoff, die pro Zeiteinheit in den Prozess eingebracht wird, exakt berechnen [25, S. 13]. In die Auftragsrate  $\tau$  fließen der Drahtdurchmesser  $d_D$ , die Dichte des Drahtes  $\rho_D$  und die Drahtvorschubgeschwindigkeit  $v_D$  ein [13, S. 19].

$$\tau = \frac{\pi}{4} * d_D^2 * \rho_D * v_D \quad (3)$$

Die Auftragsrate entscheidet darüber, wie viel Zeit zum Aufbau eines Volumens mit bestimmter Masse benötigt wird. Um höhere Auftragsraten zu realisieren, müssen andere Systemgrößen entsprechend angepasst oder die Drahtgeometrie geändert werden [26, S. 88–89].

### Streckenmasse

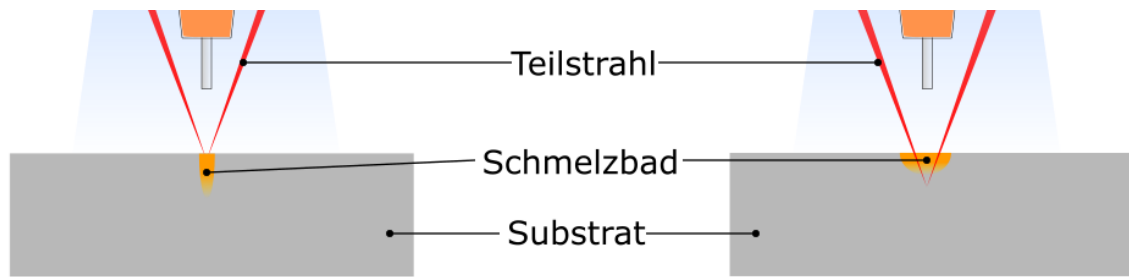
Analog zur Streckenenergie beschreibt die Streckenmasse  $\dot{m}_D$  die Masse an Zusatzwerkstoff, die pro Streckeneinheit in den Prozess eingebracht wird. Eine höhere Streckenmasse resultiert in einer höheren Schweißspur, umgekehrt führt eine niedrige Streckenmasse zu einer geringeren Spurhöhe. Die Streckenmasse ist der Quotient aus Auftragsrate  $\tau$  und Vorschubgeschwindigkeit  $v_L$  [13, S. 19].

$$\dot{m}_D = \frac{\tau}{v_L} = \frac{\frac{\pi}{4} * d_D^2 * \rho_D * v_D}{v_L} \quad (4)$$

### Laserspotdurchmesser und Defokussierung

Der Laserstrahl hat einen durch die Optik vergebenen Spot mit dem Durchmesser  $d_L$ . Dieser wird auf dem Substrat als Brennfleck abgebildet. Damit ist der Laserspotdurchmesser entscheidend für die Schmelzbadgeometrie und somit auch für Breite und Höhe der entstehenden Spur. [26, S. 89–90]

Zusammen mit der Laserleistung entscheidet der Spotdurchmesser über die Energiedichte. Ein größerer Spotdurchmesser bei gleichbleibender Leistung resultiert in einer geringeren Energiemenge pro Flächeneinheit. Der Durchmesser wird durch Lichtleitfaser und Optik vorgegeben. Für Mehrstrahlenoptiken ist es jedoch möglich, durch Defokussierung des Laserstrahls die Größe des resultierenden Brennflecks zu verändern, wie in Abbildung 5 zu sehen ist.



**Abbildung 5:** Schmelzbadgeometrie mit fokussiertem (links) und defokussiertem (rechts) Laserstrahl.

Die Fokusebene lässt sich durch Anpassung des Abstandes zwischen Laseroptik und Substratoberfläche einstellen. Wird die Fokusebene in Richtung des Substrates verschoben, ergibt sich ein breiteres, flacheres Schmelzbad (in Abbildung 5 auf der rechten Seite dargestellt). Im Schweißergebnis spiegelt sich die Defokussierung in einer breiteren, flacheren Spur wider. Ein wichtiger Effekt ist die Verbesserung der Prozessstabilität, da die Interaktion der Teilstrahlen mit dem Draht oberhalb der Werkstückoberfläche reduziert wird. Mit Balling verbundene Prozessabbrüche treten entsprechend seltener auf [13, S. 15]. Weiterhin verhindert ein flacherer Spot den Tiefschweißeffekt, der beim LDA unerwünscht ist. Bei diesem verdampft ein Teil des Materials durch die hohe Energiedichte und es bildet sich ein laserinduziertes Plasma [28, S. 12–13]. Übliche Defokussierungen liegen je nach Werkstoff zwischen 1 und 3 mm.

### Laserspot-Drahtverhältnis

Das Verhältnis zwischen Laserspotdurchmesser  $d_L$  und Drahtdurchmesser  $d_D$  erlaubt eine Abschätzung der Querschnittsgeometrie der entstehenden Spur.

$$Q_{BD} = \frac{d_L}{d_D} \quad (5)$$

Typische  $Q_{BD}$  liegen zwischen 1,4 und 2 [13, S. 18]. Für kleine  $Q_{BD}$  ergibt sich eine Spur mit ausgeprägter Wölbung der Oberfläche. Mit kleineren Drahtdurchmessern bei gleichem  $d_B$  wird die Spur zunehmend flacher und breiter.

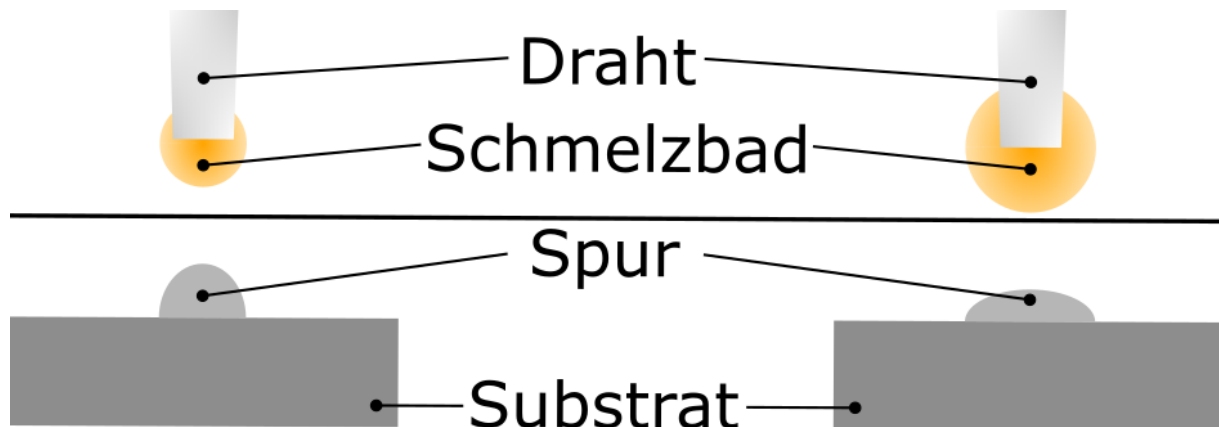


Abbildung 6: Resultierende Spurgeometrie für kleine  $Q_{BD}$  (links) und große  $Q_{BD}$  (rechts)

Ein großes  $Q_{BD}$  wirkt sich positiv auf die Prozessstabilität aus, da durch das große Schmelzbad leichte Abweichungen in der Drahtpositionierung besser ausgeglichen werden können.

### Arbeitsabstand

Die Distanz zwischen Drahtdüse und Substratoberfläche ist der Arbeitsabstand. Er bestimmt, wie viel Strecke der Draht ungeführt überbrücken muss, bevor er in das Schmelzbad eintaucht. Die lagerungsbedingte Krümmung des Drahtes wirkt sich mit steigendem Arbeitsabstand stärker aus, der Draht trifft nicht exakt coaxial zur Drahtdüse auf dem Substrat auf. In Folge kann es zu einer Verschlechterung des Schweißergebnisses kommen oder in extremen Fällen auch dazu, dass der Draht außerhalb des Schmelzbades auf das Substrat trifft, was einen Prozessabbruch zur Folge hat. Zur Korrektur kann die Drahtdüse so ausgerichtet werden, dass der Draht unter Berücksichtigung der Krümmung in das Schmelzbad eintaucht. Generell wirkt sich ein größerer Arbeitsabstand negativ auf die Prozessstabilität aus. Er muss jedoch gleichzeitig groß genug sein, dass es nicht zu einer Absorption von Laserenergie durch die Drahtdüse kommt. Die absorbierte Energie stände nicht für den Schweißprozess zur Verfügung, sondern würde stattdessen die Abnutzung der Drahtdüse beschleunigen. Die Wahl des optimalen Arbeitsabstandes ist somit für einen stabilen Schweißprozess mit guten Ergebnissen unabdingbar [13, S. 15-16].

### Schutzgasstrom

Der Schutzgasstrom  $\dot{m}_{SG}$  spielt beim LDA (im Vergleich zum LPA) eine eher untergeordnete Rolle. Er muss so gewählt werden, dass die Prozesszone ausreichend von der umgebenden Atmosphäre abgeschirmt wird. Das Lösen von Gasen, im Besonderen von Sauerstoff, im flüssigen Metall muss vermieden werden. Der Schutzgasstrom kann jedoch nicht beliebig hoch gewählt werden, da auch das Schutzgas selbst in der Schmelze gelöst werden

kann und dies in Gasporosität resultiert. Sehr hohe Schutzgasströme können das Schmelzbad flach drücken und sich somit auf die Spurgeometrie auswirken. Nicht zu vernachlässigen ist der Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit. Reine Inertgase sind teuer und es ist deshalb erstrebenswert, den Verbrauch nach Möglichkeit gering zu halten. Übliche  $\dot{m}_{SG}$  liegen je nach geforderten Restsauerstoffgehalt zwischen 7 und 30 l pro Minute [13, S. 64–67].

### Nahtkenngrößen

Der Quotient aus Spurbreite  $b_s$  und Spurbhöhe  $h_s$  wird als Nahtformkoeffizient bezeichnet [29, S. 286].

$$\varphi = \frac{b_s}{h_s} \quad (6)$$

Dieser ist eine wichtige Kenngröße für die Bewertung und Charakterisierung des Schweißergebnisses von Einzelspuren. Abhängig von der Zielgeometrie werden die Prozessparameter so gewählt, dass der Nahtformkoeffizient zwischen 2 und 3 für Stegaufbauten bzw. zwischen 2 und 5 für Flächen- und Volumenauftrag liegt [30, S. 35–50]. Weitere Nahtkenngrößen sind die Einbrandfläche  $F_E$  und Auftragsfläche  $F_A$ . Der Quotient aus  $F_E$  und der Summe von  $F_E$  und  $F_A$  ist der Aufmischungsgrad  $AG$  [31, S. 181].

$$AG = \frac{F_E}{F_E + F_A} \quad (7)$$

Er stellt ein Maß dafür dar, wie stark sich Substrat- und Zusatzwerkstoff vermischt haben. Ein hoher Aufmischungsgrad hat meistens auch eine gute Haftung der aufgetragenen Schicht zur Folge. Wird jedoch mit zwei unterschiedlichen Werkstoffen gearbeitet, deren individuelle Eigenschaften genutzt werden sollen, ist es notwendig, den Aufmischungsgrad unter Gewährleistung der Schichtanbindung möglichst gering zu halten [31, S. 181].

#### 2.1.2.3 Defekte

Im laufenden Prozess können sich eine Reihe von Defekten in dem zu fertigenden Bauteil bilden. Diese lassen sich nach ihrem Entstehungsmechanismus klassifizieren und unterscheiden sich stark in ihrer Auswirkung auf das Schweißergebnis. In Tabelle 2 werden typische Defekte in der additiven Fertigung, angepasst an das LDA, aufgelistet.

Tabelle 2: Häufige Bauteildefekte beim LDA und ihr Entstehungsmechanismus [32, S. 4]

| Defekt                                               | Entstehungsmechanismus                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Gasporosität</b>                                  | Prozessgase werden in der flüssigen Schmelze gelöst und können durch die schnelle Abkühlung mit resultierender, stark reduzierter Diffusionsfähigkeit nicht entweichen.                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Schlüssellöcher</b>                               | Verdampfen von Legierungskomponenten mit hohem Dampfdruck bei hoher Energiedichte.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Delamination und unvollständiges Aufschmelzen</b> | Unzureichende Energie, um den Zusatzwerkstoff oder das Substrat vollständig aufzuschmelzen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Raue Oberfläche</b>                               | <p>Metallische Kugeln z.B. durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe thermische Gradienten beim Auftragen der ersten Spur</li> <li>• Kapillare Instabilität der Schmelze bei niedriger Viskosität</li> <li>• Hydrodynamische Instabilität durch die Marangoni-Strömung</li> </ul> <p>Ausscheidung von Schmelztropfen bei hoher Schmelzoberflächentemperatur oder hoher Fließgeschwindigkeit</p> |
| <b>Risse und Verzug</b>                              | Aufgebaute Eigenspannungen durch starke Temperaturgradienten, thermische Ausdehnung und anschließendes Zusammenziehen oder anisotrope Verformung bei Erwärmung.                                                                                                                                                                                                                                                |

Weitere mögliche Defekte sind oxidierte Spuren aufgrund unzureichender Abschirmung durch das Schutzgas oder wellige Oberflächen durch einen zu hohen Schutzgasstrom. Unregelmäßigkeiten der Spur können auf ein falsch gewähltes Verhältnis von Drahtvorschub zu Laserleistung zurückgeführt werden oder werden durch nichtzentrische Drahtzufuhr verursacht. Starke Abweichungen des Nahtformkoeffizienten vom gewünschten Bereich deuten auf eine zu niedrige oder zu hohe Streckenmasse hin [13, S. 62].

Das beim LDA häufig auftretende Fehlerbild des Ballings soll an dieser Stelle nicht besprochen werden, da es fast immer zu einem sofortigen Prozessabbruch führt und für die Betrachtung fertiger Bauteile keine Rolle spielt.

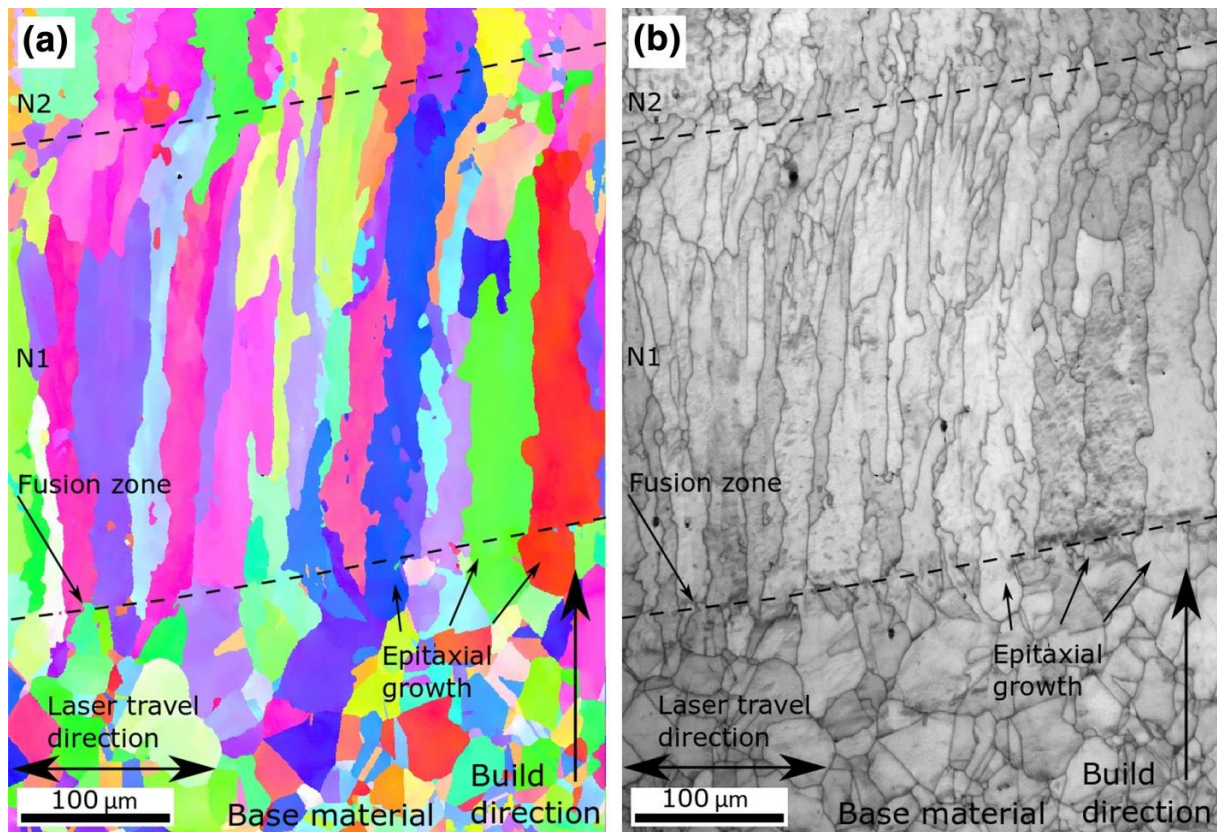
Ziel ist es, das Auftreten der in Tabelle 2 und im voranstehenden Absatz gelisteten Defekte möglichst zu minimieren. Eine raue Oberfläche lässt sich durch angemessene

Nachbearbeitung korrigieren. Risse, mangelnde Anbindung oder Schlüssellochformation hingegen machen das Bauteil in der Regel zu Ausschuss. Es ist daher notwendig, die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern sowie die Interaktion von Laser und Material so umfassend wie möglich zu verstehen [17, S. 39].

#### 2.1.2.4 Mikrostruktur

Die makroskopisch messbaren und für die Anwendung ausschlaggebenden mechanischen Eigenschaften werden durch die vorliegende Mikrostruktur bestimmt. Beim LDA bildet sich eine werkstoffabhängige, charakteristische Mikrostruktur aus, die sich durch verfahrensbedingte Besonderheiten von herkömmlich gefertigten Bauteilen unterscheidet.

Sobald der Laser weiterbewegt wird, beginnt das Schmelzbad zu erstarren. Die genaue Erstarrungsgeschwindigkeit hängt von mehreren Faktoren ab. Zum einen vom Zusammenwirken der in 2.1.2.2 beschriebenen Parameter, zum anderen von der vorliegenden Substrattemperatur [26, S. 43]. Die resultierende Erstarrungsgeschwindigkeit bestimmt die Ausprägung der entstehenden Mikrostruktur. Die Aufmischung mit dem Substratwerkstoffs bzw. der Grad der erneuten Aufschmelzung bereits aufgetragener Lagen hängen ebenfalls von der Erstarrungsgeschwindigkeit ab. Neben den prozessbedingten Größen sind auch der Zusatzwerkstoff und in geringerem Maß der Substratwerkstoff entscheidend. In der Regel sorgen das sehr kleine Schmelzvolumen und die relativ dazu hohe Laservorschubgeschwindigkeit für schnelle Abkühlung und entsprechend rapide Erstarrung [33, S. 2]. Unter normalen Umständen würde eine hohe Erstarrungsgeschwindigkeit ein feines, globulares Gefüge begünstigen. Durch die vorliegenden starken thermischen Gradienten und das Wiederaufschmelzen der Schweißspuren durch überlappende Spuren oder nachfolgende Lagen bildet sich jedoch eine komplexe Mikrostruktur aus [33–35]. Für den initialen Auftrag auf eine kalte Substratoberfläche agiert diese als Quelle von Kristallisationskeimen. Aus diesen wachsen die Körner der aufgetragenen Spur. Die kristallographische Orientierung ist somit durch die der Substratwerkstoffoberfläche vorgegeben, die entstehenden Körner sind epitaktisch [26, S. 43]. Ausbreitungsrichtung und Geschwindigkeit der Erstarrungsfront werden weiterhin durch die Wärmeleitung bestimmt [34, S. 4–6]. Für eine einzelne Spur, die auf ein kaltes Substrat aufgebracht wird, erfolgt die Wärmeleitung nahezu ausschließlich über das kalte Substrat, das durch das Massenverhältnis eine Wärmesenke darstellt [26, S. 43]. Es kommt zu einem ausgeprägten thermischen Gradienten und es bildet sich ein feines Gefüge mit Wachstumsrichtung der Körner vom Substrat zum Zentrum der Spur hin [35, S. 4]. Abbildung 7 zeigt die Mikrostruktur einer mittels LPA hergestellten 316L Probe in der Fügezone, anhand von EBSD-Aufnahmen.



**Abbildung 7:** EBSD-Bilder der Fügezone einer mittels LPA generierten 316L Probe ((a) inverse Pole figure, (b) image quality mapping) [36].

Betrachtet man stattdessen das Auftragen einer zweiten Lage in einem kontinuierlichen Prozess, ändern sich die Ausgangsbedingungen. Statt auf das Substrat wird nun auf die darunterliegenden Spuren geschweißt. Das kann abhängig von den verwendeten Werkstoffen eine Änderung der Zusammensetzung in der Fügezone bedeuten. Die Wärmeleitung erfolgt zwar weiterhin über das Substrat, abhängig von der aufgebauten Geometrie ändern sich aber der verfügbare Querschnitt und somit auch die Geschwindigkeit des Wärmetransports. Weiterhin wird unter realen Bedingungen die Substrattemperatur durch den Wärmeeintrag der vorherigen Lage deutlich erhöht. Abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs und der gewählten Geometrie verstärken sich diese Effekte mit steigender Anzahl der Lagen. Einen hypothetischen Extremfall stellt ein dünner Zylinder aus einem schlecht wärmeleitenden Material dar, z. B. zur Fertigung einer Zugprobe. Durch den dünnen Querschnitt und die mangelnde Wärmeleitung wird der Temperaturgradient so flach, dass der Wärmetransport durch das Volumen nicht mehr dominiert. Strahlung und Konvektion werden zu relevanten Wärmetransportmechanismen. Die resultierende Abkühlgeschwindigkeit ist deutlich niedriger, die Wachstumsrichtung der Körner ist ungleichmäßig [35, S. 5]. Abbildung 8 zeigt die Mikrostruktur oberhalb der Fügezone einer mittels LPA hergestellten 316L Probe, anhand von EBSD-Aufnahmen.

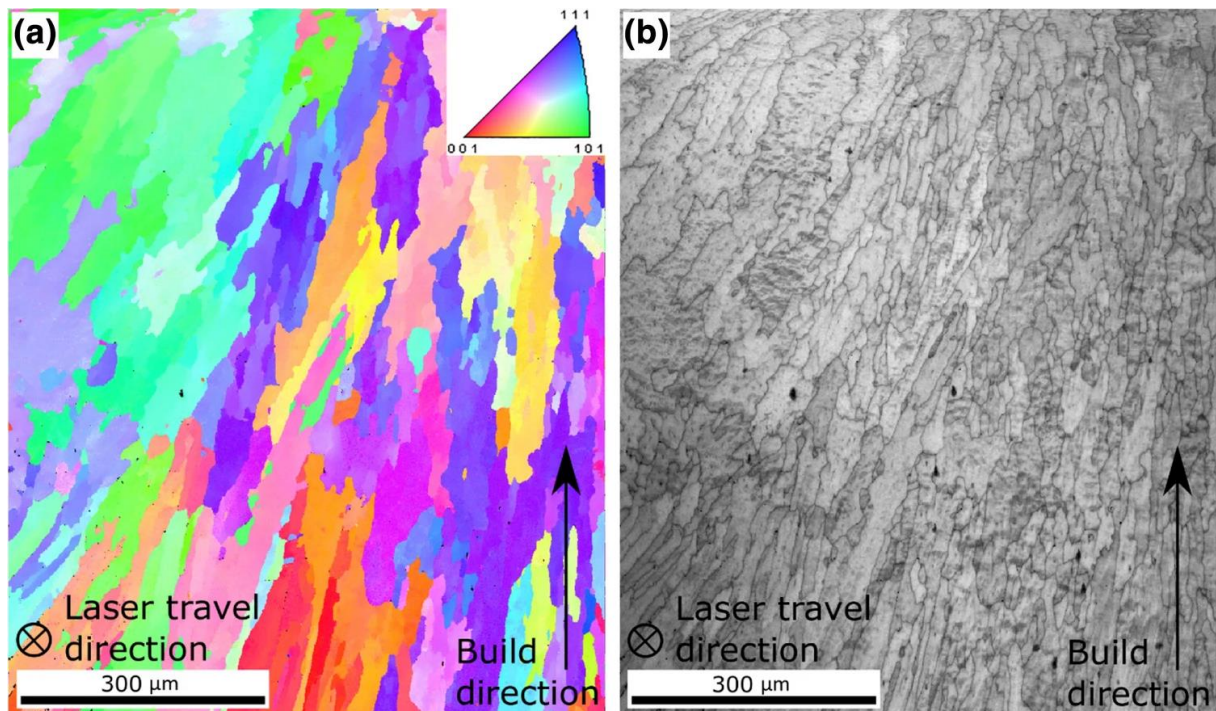


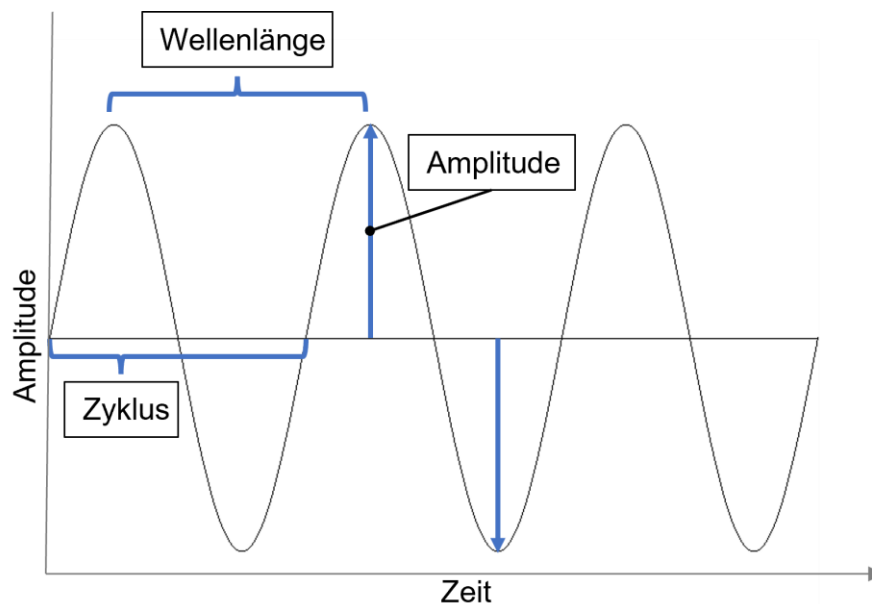
Abbildung 8: EBSD-Bilder oberhalb der Fügezone einer mittels LPA generierten 316L Probe ((a) inverse Pole figure, (b) image quality mapping) [36].

Zusammenfassend kann eine allgemeine Tendenz beschrieben werden, wie sich die Mikrostruktur in auftraggeschweißten Volumen verhält. Die Fügezone ist auf Substratseite dominiert durch globulare Körner, deren Größe mit Abstand von der Wärmeeinflusszone abnimmt. Auf Seite des Zusatzwerkstoffes liegen epitaktische Körner mit klarer, vom Wärmestrom vorgegebener Orientierung vor. Folgende Lagen sind von einer groben kolumnaren Kornstruktur geprägt. Wird eine Auftragshöhe erreicht, in der Strahlung und Konvektion eine relevante Rolle spielen, wird das Kornwachstum unregelmäßig und richtungsunabhängig. In der Realität sorgt die Vielzahl der möglichen, sich überlagernden Einflussfaktoren dafür, dass unterschiedliche Mikrostrukturen nebeneinander vorliegen können und Abweichungen von beschriebenen Trends möglich sind. Eine mehr oder weniger starke Orientierung sowie ein hohes Aspektverhältnis sind jedoch in den meisten Fällen zu erwarten.

## 2.2 ULTRASCHALL

Von Ultraschall spricht man bei Schallwellen, deren Frequenz oberhalb dessen liegt, was das menschliche Gehör im Normalfall wahrnehmen kann. In der Fachliteratur finden sich für den abgrenzenden Schwellwert unterschiedliche Angaben zwischen 16 kHz [37, S. 690] und 20 kHz [38, S. 751]. Eine definitive Abgrenzung ist jedoch nicht zwingend nötig, da keine schlagartige Änderung der Schalleigenschaften mit Erreichen des Schwellwertes erfolgt. Abbildung 9 stellt die Ausbreitung einer ungedämpften Schallwelle als Funktion der

Zeit dar. Die Frequenz gibt die Anzahl der Zyklen an, die die Schallwelle pro Zeiteinheit durchläuft. Die Amplitude beschreibt die maximale Entfernung (Auslenkung) vom arithmetischen Mittelwert während eines Zyklus.



**Abbildung 9: Ausbreitung einer ungedämpften Schallwelle als Funktion der Zeit**

Wie auch der Hörschall benötigt Ultraschall ein Ausbreitungsmedium. Mit Ausnahme von Festkörpern, in denen auch Transversalwellen auftreten können, breitet er sich überwiegend als longitudinale Materialwelle aus [38, S. 751]. Die Materialinteraktionen verhalten sich analog zu niedrig frequentem Schall. An Grenzflächen kommt es zu Reflexion und Brechung. Hindernisse führen zur Beugung und oder Streuung der Ultraschallwellen. Mit steigender Frequenz gewinnt die Dämpfung zunehmend an Bedeutung, während Beugung und Streuung unterdrückt werden [38, S. 751].

Die eben beschriebenen Materialinteraktionen werden bei der diagnostischen Anwendung von Ultraschall ausgenutzt. Diese wird durch geringe Schallintensitäten charakterisiert und hat das Ziel, Informationen über den beschallten Körper zu gewinnen, ohne dessen Eigenschaften zu verändern. Auf diese Verwendung soll hier nicht weiter eingegangen, da für diese Arbeit ausschließlich die Leistungsanwendung von Ultraschall relevant ist. Bei dieser kommen hohe akustische Leistungen zum Einsatz, um an dem beschalltem Körper mechanische Arbeit zu verrichten [38, S. 751]. Abbildung 10 zeigt an zwei Beispielen schematisch den Vergleich von diagnostischem Ultraschall und Leistungultraschall.

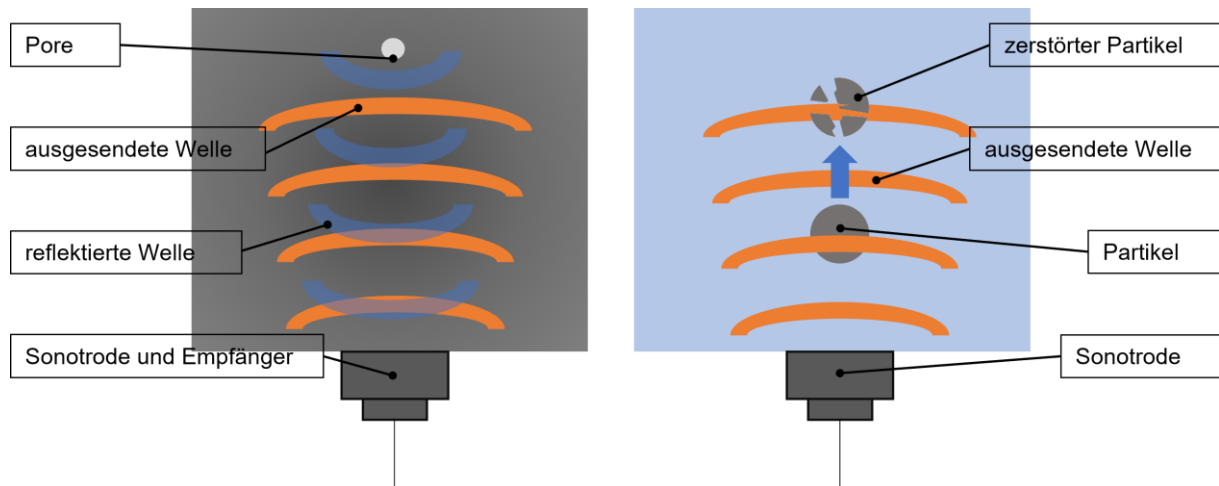


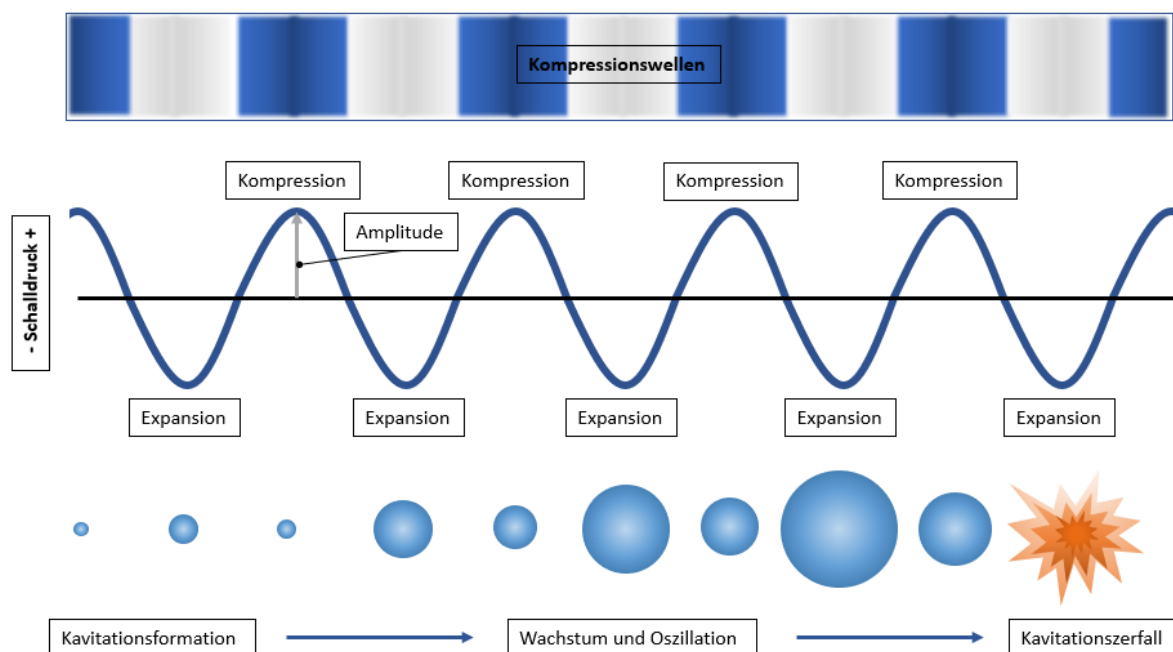
Abbildung 10: Schematische Darstellung von diagnostischem Ultraschall (links) und Leistungsl- ultraschall (rechts)

### 2.2.1 Kavitation

Von besonderem Interesse für die Leistungsanwendung von Ultraschall in Flüssigkeiten ist die Kavitation. In einem flüssigen Medium lässt sich Ultraschall als Druck- und Dichtewellen beschreiben, die den statischen Druck der Flüssigkeit überlagern. Die Auslenkung der Teilchen führt zu einem Zyklus aus Expansion und Kompression. Erstere übt einen positiven Druck auf die Flüssigkeit aus, letztere einen negativen. Wird ein flüssigkeitsspezifischer Schwellwert des Schalldrucks überschritten, kommt es zur Formation von oszillierenden Blasen, auch Kavitäten genannt. Verunreinigungen, gelöste Gase oder Fest-Flüssig-Grenzflächen können als Keim für die Kaviationsbildung wirken und senken den theoretischen Schwellwert [37, S. 691]. Die entstehenden Kavitäten können unterschiedlich gefüllt sein: entweder mit Gas, Dampf oder einer Gas-Dampfmischung. Leere Kavitäten sind theoretisch möglich, werden jedoch meistens schnell durch in der Flüssigkeit gelöste Gase gefüllt [39, S. 3]. Für Kavitation in Metallschmelzen ist durch den hohen Siedepunkt das Auftreten von Dampfkavitäten unwahrscheinlich.

Der „Lebenszyklus“ einer Kavitation lässt sich grob in drei Teilbereiche gliedern: Formation, Oszillation und Kollaps. Die Formation wurde bereits kurz beschrieben, ist jedoch in der Realität ein komplexes Phänomen [37, S. 691–696], auf das hier nicht ausführlich eingegangen wird. Nach der initialen Formation oszilliert die Kavitation für einen Zeitraum, der zwischen mehreren Amplitudendurchläufen und sofortigem Kollaps liegen kann. Einflussgrößen sind die Oberflächenspannung, die Viskosität der Flüssigkeit, der Polytropenexponent des Gases sowie der Kavitationsradius in Ruhe [37, S. 694–696]. Die charakteristische Zeit für den Kavitationskollaps wird als Rayleigh-Zeit bezeichnet [39, S. 38]. Der abschließende Kollaps der Kavitation kann entweder als langsame Auflösung erfolgen,

durch Lösen der Füllung in der umgebenden Flüssigkeit oder als gewaltsamer, spontaner Zusammenbruch unter Aussendung einer Druckwelle mit Formation neuer, kleinerer Kavitationen [37, S. 691]. Die letztere Form des Kollapses ist die für technische Anwendungen relevante. Für diesen spontanen Zerfall ist sowohl ein höherer Schalldruck nötig (als allein für die Kavitationsformation) als auch das Erreichen eines kritischen Radius. Dieser sinkt mit steigender Frequenz [37, S. 693]. Abbildung 11 zeigt schematisch das Prinzip der ultraschallinduzierten Kavitation und den Lebenszyklus einer Kavität mit sphärischem Kollaps.



**Abbildung 11: Prinzip der durch Ultraschall induzierten Kavitation [40]**

Die durch den spontanen Kollaps entstehende Druckwelle verursacht eine Reihe von Effekten in der umgebenden Flüssigkeit. Auf die für diese Arbeit relevanten wird nachfolgend eingegangen.

### Nicht sphärischer Kollaps

Befinden sich in der Umgebung einer Kavitation Grenzflächen, statische Festkörper oder andere Objekte, die eine sphärische Oszillation behindern, kann es zu einem nicht sphärischen Kollaps kommen. Dabei kommt es während des Kollapsprozesses zu einem über hundert Meter pro Sekunde schnellen, flüssigen Mikrostrahl, der die Kavitationswand in Richtung des Störelementes durchbricht. Der aus diesem Phänomen resultierende Druck auf das Störelement reicht, um weiche Metalle zu schmelzen oder Gruben in härteren zu erzeugen [37, S. 696]. Abbildung 12 zeigt schematisch den nicht sphärischen Kollaps und die Bildung eines flüssigen Mikrostrahls einer Kavität in der Nähe eines Partikels größer 100  $\mu\text{m}$ .

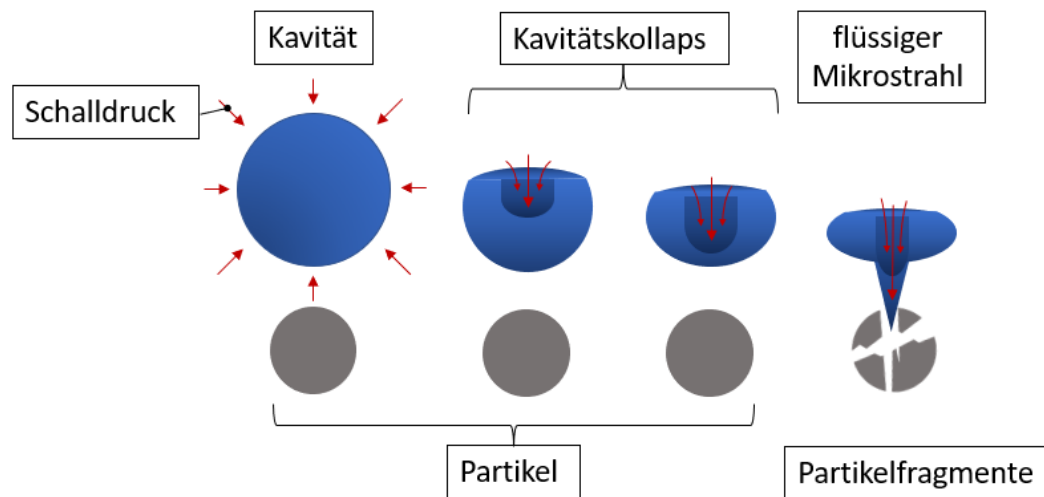


Abbildung 12: Schematische Darstellung des nicht sphärischen Kollaps einer Kavität in der Nähe eines Partikels größer 100 µm [41]

### Akustische Strömung

Eine Schallwelle, die ein Medium durchquert, wird partiell absorbiert. Dabei wird ein Moment parallel zur Ausbreitungsrichtung der Schallwelle auf das absorbierende Medium übertragen. Im Fall einer Flüssigkeit äußert sich dieses in einer Strömung in die entsprechende Richtung. Lokal können diese Strömungen im Bereich von mehreren Zentimetern pro Sekunde liegen [37, S. 697].

### Wirkung auf kleine Partikel

Die Schockwelle, die beim spontanen Kollaps einer Kavität ausgesendet wird, beschleunigt Partikel, deren Radius kleiner als der der kollabierten Kavität ist. Die Partikel erreichen Geschwindigkeiten von bis zu 500 km/h. Resultierende Kollisionsereignisse zwischen Partikeln oder anderen festen Objekten können Oxidschichten zerstören und Partikel verschmelzen. Bereits die Anwesenheit einer oszillierenden Blase beschleunigt Partikel in ihrer Umgebung, die Beschleunigung ist jedoch um Größenordnungen geringer als die durch eine Schockwelle verursachte [37, S. 697–698].

### Lokale Druck- und Temperaturerhöhung

Der Kollaps einer Kavität erzeugt lokal eine starke Erhöhung von Temperatur und Druck. In Experimenten wurden für das Kavitätsinnere Temperaturen von 5200 K festgestellt [42, S. 2]. Die Erwärmungs- und Abkühlgeschwindigkeit beträgt ca.  $10^5$  K/s [37, S. 699]. Der lokale Druck erreicht Werte von bis zu 50 MPa [43, S. 4].

Die am weitesten verbreitete technische Anwendung der Kavitation ist die Reinigung von Objekten in Ultraschallbädern. Die beschriebenen Schockwellen und Mikrostrahlen entfernen Oberflächenablagerungen und Verschmutzungen gründlich. Der Effekt wird seit

über 60 Jahren genutzt und ist ein Industriestandard [37, S. 690]. In der Sonochemie wird die Kavitation genutzt, um die chemische Aktivität in einem Medium zu erhöhen [37, S. 701]. In vielen Laboren sowie in der Lebensmittelindustrie [44, S. 1] wird der Kavitationseffekt zur Homogenisierung, Dispersion oder Emulsion von Flüssigkeiten verwendet [45].

### 2.2.2 Ultraschallbehandlung von Metallschmelzen

Die Anwendung von Ultraschall, um auf die Eigenschaften einer Metallschmelze Einfluss zu nehmen, wird bereits seit langer Zeit untersucht und für einen möglichen industriellen Einsatz bewertet.

Die Hindernisse und Anforderungen für die Anwendung von Ultraschall für metallurgische Prozesse werden von Eskin [46, S. 6] folgendermaßen beschrieben:

- Eine Ultraschallquelle, die in der Lage ist, genügend Leistung in Form von Frequenz und Amplitude zur Verfügung zu stellen, um die Kavitationsschwelle zu überschreiten.
- Generator und Wandler müssen in der Lage sein, die Resonanzfrequenz des gesamten Systems zu modellieren, um variable Bedingungen während des Prozesses zu kompensieren.
- Das Wellenleitsystem muss so ausgelegt sein, dass der Leistungsverlust an Schnittstellen und die Wellenausbreitung in ungewünschte Richtungen minimiert werden.
- Die Sonotrode muss, bei gleichzeitig guter Benetzung, ihre akustischen und mechanischen Eigenschaften auch bei erhöhter Temperatur beibehalten und darf nicht chemisch mit dem geschmolzenen Material interagieren.
- Der akustische Wandler muss gegen Wärme und Dampf aus der Prozesszone geschützt sein.

Neben der Kornfeinung war und ist das ultraschallgestützte Entgasen von Metallschmelzen von technischem Interesse. Die Funktionsweise der Ultraschallentgasung beruht auf der in 2.2.1 beschriebenen Kavitation [47, S. 2–3]. Die durch Beschallung über einem Grenzwert entstehenden Kavitationen in der Schmelze füllen sich mit Gas, z. B. Wasserstoff, der aus dem die Blase umgebenden flüssigen Metall eindiffundiert. Erreicht eine gefüllte Kavitation die nötige Größe, steigt sie zur Oberfläche empor, wo das enthaltene Gas entweichen kann. Die Ultraschallleistung muss entsprechend so gewählt sein, dass Kavitationen entstehen können, darf aber nicht so hoch sein, dass der spontane Kavitationszerfall dominiert. Die Effizienz der Entgasung ist primär abhängig von der

Ausgangskonzentration der gelösten Gase sowie der eingebrachten Ultraschallleistung und der Beschallungszeit [48, S. 3–6].

Obwohl die Zielstellung sich deutlich von der Kornfeinung unterscheidet, bleibt eine Kernproblematik bestehen, nämlich die Leistungsübertragung in das Schmelzbad. Nennenswert ist hier ein von der Europäischen Union gefördertes Projekt namens „ULTRAGASSING“. Zwischen 2011 und 2013 wurden zwei Prototypen für die reine Ultraschallentgasung von größeren Schmelzvolumina Aluminium (kleiner 500 kg) entwickelt. Ebenfalls wurden die Zusammenhänge zwischen Entgasungsparametern, Schmelzqualität und Gussparametern etabliert. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Verfahren in gleichen oder besseren mechanische Eigenschaften und Porositäten resultiert, im Vergleich zu herkömmliche Verfahren, bei gleicher Behandlungszeit [49, S. 3]. Die entwickelten Prototypen wurden in zwei Gießereien erfolgreich getestet. Das Ultraschallsystem bestand aus einem 5 kW magnetostriktiven Wandler sowie einer Niob-Sonotrode, die mittels eines Roboterarms kreisförmig im Schmelzbad bewegt werden kann [48, S. 8–9].

Kornfeinung durch mechanische Schwingungen wurde bereits im 19. Jahrhundert durch Tschernow vorhergesagt. Für die gezielte Anwendung von Ultraschall waren jedoch Erkenntnisse über Piezoelektrika, Akustik, Kavitation und Kristallisation aus dem 20. Jahrhundert notwendig [46, S. 1–2]. Seit 1935 wurden verschiedenste Arbeiten von Wissenschaftler\*innen aus unterschiedlichen Ländern zum Einfluss von Ultraschall auf die Erstarrung von Metallschmelzen veröffentlicht. Eine signifikante Kornfeinung für unterschiedliche Werkstoffe konnte von Seemann et al. nachgewiesen werden, darunter Kupfer, Zinn, Komposite und gängige Gießereilegierungen. Nachfolgende Arbeiten beschäftigten sich vornehmlich mit der Erklärung der beobachteten Effekte. Einen großen Beitrag zum Verständnis von Kavitation und Nukleation lieferten Experimente mit transparenten Metallanalogen wie z. B. Ammoniumchlorid [46, S. 3]. Von Frawley and Childs konnte experimentell die Ursache der erhöhten Nukleation dem Kollaps der Kavitationsblasen zugeordnet werden [46, S. 4].

Weitere Arbeiten wiesen eine Kornfeinung ebenfalls für kommerziell genutzte Aluminium- und Manganlegierungen sowie für Magnesiumlegierungen, Zink und Zinn nach [46, S. 3]. Untersuchungen von Messing und Stahl zeigten eine starke Limitierung bezüglich des Sonotrodenmaterials durch den hohen Schmelzpunkt. Besonders für Stahl ist eine direkte Einbringung des Ultraschalls schwer zu realisieren. Als Lösungsansätze wurden indirekte Einbringungsmethoden untersucht, erfolgreich unter anderem mit einer Oszillation der Gussform oder über die Schlackeschicht. [46, S. 4]. Die Vielzahl der beschriebenen und weiterer unerwähnter Labor-skalierter Versuche schafften die Grundlage für die industrielle Anwendung von Ultraschall gestützter Kornfeinung.

Die zu Beginn des Kapitels wiedergegebenen Kriterien für die erfolgreiche Ultraschallbehandlung von Metallschmelzen stellen besondere Anforderungen an den Ultraschallwandler. Als geeignet identifiziert Eskin magnetostriktive Schallwandler. Für den Großteil aktueller technischer Anwendungen von Ultraschall sind piezoelektrische Schallwandler der Stand der Technik. Ihre Vorteile liegen in der größeren realisierbaren Frequenzspanne von 20 bis 200 kHz sowie der höheren Effizienz. Mit magnetostriktiven Schallwandlern lassen sich nur Frequenzen kleiner 50 kHz realisieren und die Effizienz liegt unter 50 %. Für die metallurgische Anwendung relevante Vorteile sind jedoch die Möglichkeit der Wasserkühlung und die generelle höhere Toleranz gegen hohe Temperaturen. Ebenfalls ist der Frequenzbereich, in dem die Resonanzfrequenz des Schwingensystems eingestellt werden kann, größer als für piezoelektrische Schallwandler. Erwähnenswert ist, dass alle erfolgreichen Versuche der Ultraschallbehandlung von Metallschmelzen in industriellem Maßstab mit magnetostriktiven Schallwandlern durchgeführt wurden [46, S. 7].

Mit der Verfügbarkeit von Ultraschallsystemen, die in der Lage waren, ausreichende Leistung auf eine Metallschmelze zu übertragen, folgte eine Periode von großem Interesse an der technologischen Adaption. Keines der Pilotprojekte konnte sich jedoch als Industriestandard etablieren. Konkurrierende Verfahren wurden aus Kostengründen oder durch einfachere technologischer Umsetzung bevorzugt verwendet und weiterentwickelt. Erst mit steigendem Bedarf an klimafreundlichen Verfahren sowie der Nachfrage von immer reineren Legierungen rückt die Ultraschallbehandlung wieder in den Fokus. Der Stand der Technik ist somit teilweise Jahrzehnte alt und durch seine anderen technologischen Rahmenbedingungen nur begrenzt aussagekräftig. Es ist jedoch eindeutig nachgewiesen, dass Ultraschall sowohl für die Kornfeinung als auch das Entgasen von Metallschmelzen geeignet und anwendbar ist.

## 2.2.3 Ultraschall in der additiven Fertigung

### 2.2.3.1 Literatur

In der additiven Fertigung wurde Ultraschall schnell als mögliches Werkzeug für in situ Mikrostrukturbeeinflussung identifiziert. Mehrere bereits veröffentlichte Arbeiten haben diese Beeinflussung untersucht und nachgewiesen. Dabei kamen unterschiedliche Verfahren und Werkstoffe zum Einsatz.

Ning et al. konnten 2017 für das LPA mit der Legierung Inconel 718 zeigen, dass sich unter Ultraschalleinfluss die Porosität sowie die mittlere Korngröße reduzieren lassen. Eine aus der veränderten Mikrostruktur resultierende Steigerung der Mikrohärtigkeit konnte nachgewiesen werden [50, S. 5]. Im gleichen Jahr untersuchten Tilita, Chen et al. die Ultraschallanregung für das selektive Laserstrahl-Schmelzen von X2CrNi18-9. Nachgewiesen werden

konnte ein deutlicher Einfluss auf die resultierende Mikrostruktur mit einer Reduktion der mittleren Korngröße um ca. 20 % und einer Reduktion des Aspektverhältnisses um mehr als 50 % [51, S. 4–5]. Xu und Zhou untersuchten 2018 den Einfluss von Hochleistungsschall auf die Verschleißigenschaften von mittels LPA generierten eisenbasierten Beschichtungen. Die Formation kolumnarer Dendrite konnte erfolgreich unterbrochen werden und der Anteil an gleichachsigen Körnern erhöht werden. Die Mikrohärtigkeit konnte um 5,5 % gesteigert werden und ultraschallunterstützte Beschichtungen wiesen eine höhere Verschleißfestigkeit auf [52, S. 1]. Zhang et al. verglichen 2019 gegossene AlSi12-Proben mit ultraschallunterstützten LPA-Proben. Dabei konnten ähnliche Dichten bei deutlich höherer Festigkeit für die LPA-Proben festgestellt werden [53, S. 12]. 2020 gelang Gorunov das ultraschallunterstützte Generieren von Turbinenschaufeln mittels LPA im Labormaßstab. Es konnten erfolgreich Bauteilregionen mit gleichachsiger Kornstruktur generiert werden. Durch Variation von Frequenz und Leistung war es möglich, die Position der gleichachsigen Bereiche anzupassen. Es wurde eine Härtesteigerung von ca. 10 % erreicht [54, S. 10–11]. Durch Todaro, Easton et al. wurde das ultraschallunterstützte LPA von Ti6Al-4V untersucht. Dabei konnte die mittlere Korngröße von  $500 \pm 354 \mu\text{m}$  auf  $117 \pm 61 \mu\text{m}$  reduziert werden. Das Aspektverhältnis wurde von  $4,0 \pm 2,2$  auf  $2,1 \pm 0,9$  gesenkt. Die erreichte Reduzierung dieser Kenngrößen bedeutet eine deutliche Transformation des Gefüges von groben kolumnaren Körnern zu feineren, gleichachsigen.

Diese Gefügeveränderung resultierte in einer Steigerung der Zugfestigkeit und der Fließspannung um jeweils 12 % [55, S. 3–6]. Yao, Wang et al. reproduzierten das ultraschallunterstützte LPA für 316L Stahl. Die mittels Elektronenrückstreubeugung (EBSD) angefertigten Aufnahmen der generierten Proben zeigen eine deutliche Kornfeinung und Reduktion des Aspektverhältnisses [56, S. 3]. Für das LDA wurde der Einsatz von Ultraschall erstmal 2021 durch Yuan, Shao et al. adaptiert. Verarbeitet wurde Ti-6Al-4V als Zusatzwerkstoff und Substrat. Die Einleitung des Ultraschalls erfolgte über eine mit konstantem Druck auf das Substrat gepresste Sonotrode, die in einem definierten Abstand zum Prozesskopf mitgeführt wurde. Auf diese Weise wurde eine streckenweise Beschallung der Prozesszone in der aktuell obersten Lage realisiert. In der letzten auf diese Weise generierten Lage konnte im ultraschallunterschützten Bereich eine mittlere Korngröße von  $152 \pm 93 \mu\text{m}$  erreicht werden, bei einem Aspektverhältnis von  $1,8 \pm 0,72$ . Referenzwerte ohne Ultraschallunterstützung wurden nicht angegeben. Es ist jedoch erkennbar, dass das epitaktische Kornwachstum durchbrochen sowie eine Kornfeinung in der obersten Lage erreicht wurde [57, S. 4–5].

Die im vorangegangenen Absatz besprochenen Arbeiten machen deutlich, dass die Unterstützung von additiven Fertigungsverfahren mit Ultraschall geeignet ist, um das

resultierende Gefüge in Richtung feinerer Körner und Gleichachsigkeit zu beeinflussen. Das Prinzip lässt sich auf unterschiedliche Werkstoffe wie Aluminium [53], Stahl [52, 56], Inconel [50] und Titan [54, 55, 57] anwenden. Die Adaption für unterschiedliche Verfahren ist ebenfalls möglich, wie Versuche mit LPA [50, 52–56], SLM [51] und LDA [57] gezeigt haben. Unabhängig von Verfahren und Werkstoff konnte jeweils eine nachweisbare Kornfeinung realisiert werden sowie, falls dies untersucht wurde, eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften [52–55]. Bisher konzentrieren sich Untersuchungen auf Einzel-lagen [51, 52] oder simple mehrlagige Geometrien [50, 53–57]. Die Einleitung des Ultraschalls erfolgt in der Regel über die Beschallung des gesamten Substrates. Eine Ausnahme stellt die Arbeit von Yuan, Shao et al. dar [57]. Die gewählte Ultraschallfrequenz lag bei den meisten Versuchen im Bereich von 20 kHz [52, 54–57]. Gorunov arbeitete mit Frequenzen zwischen 22 kHz und 100 kHz [54, S. 2]. Tilita, Chen et al. wählten eine Frequenz von 50 kHz [51, S. 3]. Eine Angabe zur korrespondierenden Amplitude ist in den meisten Fällen nicht möglich ohne Kenntnis des eingesetzten Schwingsystems. Xu, Zhou et al. geben die Amplitude mit 25  $\mu\text{m}$  an [52, S. 3], Todaro, Easton et al. mit  $< 30 \mu\text{m}$  [55, S. 3].

Herausforderungen bei der Weiterentwicklung der Technologie sind die Anwendung bei komplexen Geometrien sowie die Gewährleistung einer effizienten und stabilen Ultraschalleinleitung. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Adaption für alle mittels LPA oder LDA verarbeitbaren Werkstoffe theoretisch möglich ist. Für das LDA ist das Einbringen weiterer Einflussgrößen in die bereits komplexe Interaktion der Parameter (vgl. Abbildung 4) eine besondere Herausforderung.

### 2.2.3.2 Patente

Unter Verwendung der Patentdatenbank-Software PatBase wurde nach Patenten gesucht, die die in situ Mikrostrukturbeeinflussung in der additiven Fertigung betreffen. Zunächst wurde mit der Kombination von Schlüsselworten wie „ultrasound“, „refinement“ und „additive manufacturing“ ein relevantes Patent gefunden. Anhand der „International Patent Classifications (IPC)“ dieses Patents wurde die Suche weitergeführt. Die Ergebnisse der Suche mittels IPC wurden mit Schlüsselworten zu Ultraschall und mechanischer Vibration kombiniert. Die verbleibenden Ergebnisse wurden nach ihrer Relevanz bewertet und ausgewählt. Der Patbase-Suchverlauf findet sich in Anhang 1.

Am 11.09.2014 wurde durch die „Rolls Royce Corp“ eine additive Fertigungsmethode publiziert. Der Patenttitel lautet „sonic grain refinement of laser deposits“. Die Methode beinhaltet eine Schall- oder Ultraschallsonde, die während der Erstarrung auf ein Schmelzbad ausgerichtet ist, welches auf einem Substrat erzeugt wurde. Das Patent umfasst außerdem Laserschweißen, Plasmaschweißen, Wolfram-Inertgas-Schweißen und Metall-

Inertgas-Schweißen. Die Einbringung des Ultraschalls wird über eine lokale kontaktlose Sonotrode realisiert. Die dem Patent beiliegende Bild-Datei zeigt, dass Energiezufuhr, z. B. in Form eines Laserstrahls, und Beschallung des Schmelzbades nicht zeitgleich erfolgen.

Durch „Siemens Energy Inc“ wurde am 11.08.2016 ein Materialreparaturprozess publiziert. Dieser umfasst das Erzeugen eines Schmelzbades durch einen Energiestrahle und das Einbringen mechanischer Vibration in den Prozess. Der Patenttitel lautet „material repair process using laser and ultrasound“. Die vorgesehene Methode zur Einbringung des Ultraschalls ist nicht klar erkenntlich. Aus der beiliegenden Bild-Datei lässt ableiten, dass es sich entweder um eine lokale Sonotrode oder um eine Anregung des gesamten Bauteils handelt. Das Patent bezieht sich nicht direkt auf die additive Fertigung, in einem Patentanspruch wird jedoch die Verwendung von füllendem Zusatzmaterial in Pulverform erwähnt.

Am 08.12.2016 wurde von Gale und Achuthan an der „Clarkson University“ eine Methode für die Beeinflussung mechanischer Eigenschaften von metallischen, additiv gefertigten Bauteilen publiziert. Der Patenttitel lautet „methods for modifying and enhancing material properties of additive manufactured parts“. Das Patent beschreibt eine Vorrichtung bestehend aus zwei Sonden: die erste so konfiguriert, dass sie ein Objekt aufbaut; die zweite so konfiguriert, dass sie Ultraschallwellen emittiert, um die Mikrostruktur des generierten Objektes zu beeinflussen. Aus den Patentansprüchen und der beiliegenden Bilddatei geht hervor, dass es sich nicht um eine Beeinflussung des durch die erste Sonde erzeugten Schmelzbades handelt. Die Mikrostrukturbeeinflussung erfolgt an bereits erstarrten Bereichen des generierten Objekts.

Ein Patent mit dem Titel „additive manufacturing method and additive manufacturing machine“ wurde am 27.09.2017 von der „Chung-Hsing-Nationaluniversität“ publiziert. Es beschreibt eine mechanisch vibrierende Plattform, auf die mittels LPA ein mehrlagiges Objekt aufgetragen wird. Die Frequenz der Vibration soll dabei kleiner als 90 Hz bleiben.

Von der „Boing Company“ wurden am 30.05.2019 Methoden zur Mikrostrukturbeeinflussung durch Schmelzbadrühren in der additiven Fertigung publiziert. Der Patenttitel lautet „microstructure refinement methods by melt pool stirring for additive manufactured parts“. Der erste Patentanspruch beschreibt das Induzieren von Nukleationskeimen durch elektromagnetisches Rühren. Folgende Patentansprüche beinhalten das Zerstören von wachsenden Dendriten im abkühlenden Schmelzbad durch Vibration. Die Bruchstücke dienen als neue Nukleationskeime. Die Methode der Einbringung der Vibration wird nicht erläutert. Ein Patentanspruch bezieht sich auf die Anwendung der Methode auf „wire feed additive manufacturing“.

Am 15.12.2020 wurde durch die „Dong-A University Research Foundation for Industry-Academy Cooperation“ ein Gerät für das ultraschallunterstützte Laserschweißen publiziert. Der Patenttitel lautet „laser welding apparatus and method for welding using the same“. Das Patent beschreibt ein Gerät zur coaxialen Einbringung von Laser- und Ultraschallenergie. Dabei sollen Poren aus dem induzierten Schmelzbad entfernt werden. Da nur das Abstract in englischer Sprache vorliegt, ist der Umfang des Patentes unklar. Eine Verwendung des beschriebenen Gerätes in der additiven Fertigung und zur Beeinflussung der Mikrostruktur kann nicht ausgeschlossen werden. Ein gemeinsames Patent der „Harbin Engineering University“ und „Hangzhou Success Ultrasonic Equipment Co., Ltd“ beschreibt ein ähnliches Gerät, welches auf Ultraschallschlagbehandlung beruht.

Ein am 13.07.2021 publiziertes Patent der „Chonqing University“, mit dem Titel „ultrasonic-assisted electric arc additive manufacturing method“, beschreibt das Eintauchen einer im Ultraschallbereich vibrierenden Nadel in das beim Lichtbogenschweißen erzeugte Schmelzbad. Die Bewegung der Nadel erfolgt synchron zum Schmelzbad. Dabei sollen die Erstarrungsstruktur und die mechanischen Eigenschaften positiv beeinflusst werden.

Am 13.01.2022 publizierte Han an der „Purdue University“ eine Methode für das ultraschallunterstützte 3D-Drucken und Schweißen. Der Patenttitel lautet „methods of ultrasound assisted 3D printing and welding“. Die Methode beschreibt eine auf das bereits erstarrte Material am Rand des Schmelzbades gepresste Sonotrode, die mit dem Schmelzbad mitgeführt wird. Die Übertragung von Ultraschallvibrationen soll das Auftreten von Heißrissen und Poren reduzieren.

Ein durch die „Wenzhou University“ publiziertes Patent vom 25.02.2022 trägt den Titel „multi-heat-source ingredient-adjustable additive manufacturing device“. Das Patent beschreibt ein Gerät, das eine Lichtbogenschweißpistole mit einer Laseroptik kombiniert. Dabei sollen Zusatzwerkstoffe in Draht oder Pulverform verarbeitbar sein. Die Lichtbogenschweißpistole umfasst ein im Ultraschallbereich vibrierendes Gehäuse sowie einen Spiralrührer. Da nur das Abstract in englischer Sprache vorliegt, können keine weiteren Aussagen über die Methode der Einbringung des Ultraschalls getroffen werden. Das Ziel der Mikrostrukturbeeinflussung mittels Ultraschall wird im Abstract nicht erwähnt.

Am 07.07.2022 wurde durch Liu, Wang und Pfeifer über die „Ohio State Innovation Foundation“ ein Patent mit dem Titel „ultrasonically assisted wire additive manufacturing process and apparatus“ publiziert. Das Patent beschreibt eine Ultraschallsonde, die mit einem gewissen Abstand der Energiequelle folgt. Dabei sollen durch den Ultraschall akustische Kavitation und Strömungseffekte im Schmelzbad induziert werden. Die beschriebene Methode bezieht sich auf das LDA unter Verwendung einer lokalen Sonotrode.

Die Anwendung von Ultraschall für die in situ Beeinflussung des Schweißergebnisses und der Mikrostruktur ist bereits seit mindestens 2014 Gegenstand von Patentansprüchen. Seit circa 2019 kann ein Anstieg in der Anzahl der eingereichten Anträge beobachtet werden. Die Patente umfassen eine große Auswahl an unterschiedlichen Verfahren und Energiequellen. Die in situ Behandlung bezieht sich nicht immer auf die Ultraschallinteraktion mit dem Schmelzbad, sondern kann auch die Ultraschallbehandlung des frisch erstarrten Gefüges bedeuten. Die häufigste Methode der Ultraschalleinbringung erfolgt über eine lokale, mit dem Schmelzbad mitgeführte Sonotrode. Diese kann entweder in direktem Kontakt mit dem Schmelzbad stehen oder in unmittelbarer Nähe parallel geführt werden.

Das LDA wird von zwei Patenten direkt erwähnt. Einmal durch das Patent US2019160540 AA der „Boing Company“. Dabei werden die beschriebenen Vibrationen jedoch nicht in Frequenz, Amplitude oder Leistung charakterisiert. Die Methode zur Übertragung dieser Vibrationen in den Prozess wird ebenfalls nicht konkretisiert. Die zweite direkte Erwähnung erfolgt durch das Patent WO2214715 A1 der „Ohio State Innovation Foundation“. Die Patentansprüche umfassen eine lokale mitgeführte Sonotrode aus Wolfram oder einer Wolframlegierung, die zwischen 20 kHz und 40 kHz schwingt.

## 3 SYSTEMTECHNIK UND WERKSTOFFE

### 3.1 SYSTEMTECHNIK

#### 3.1.1 Fertigungsanlage

Als Fertigungsanlage steht eine umgerüstete fünfachsigige NC-Anlage vom Typ 19389 MTH der Firma Arnold Ravensburg zur Verfügung. Zusätzlich zum Verfahren des Prozesskopfes in X-, Y- und Z- Richtung ist ein dreh- und kippbarer Maschinentisch integriert, der die A- und C-Achse realisiert. Die Steuerung der Anlage erfolgt über die Siemens Sinumerik 840D Maschinensteuersoftware. Abbildung 13 zeigt den Bauraum mit eingebautem Prozesskopf und Prozessüberwachung sowie das Steuerpult.

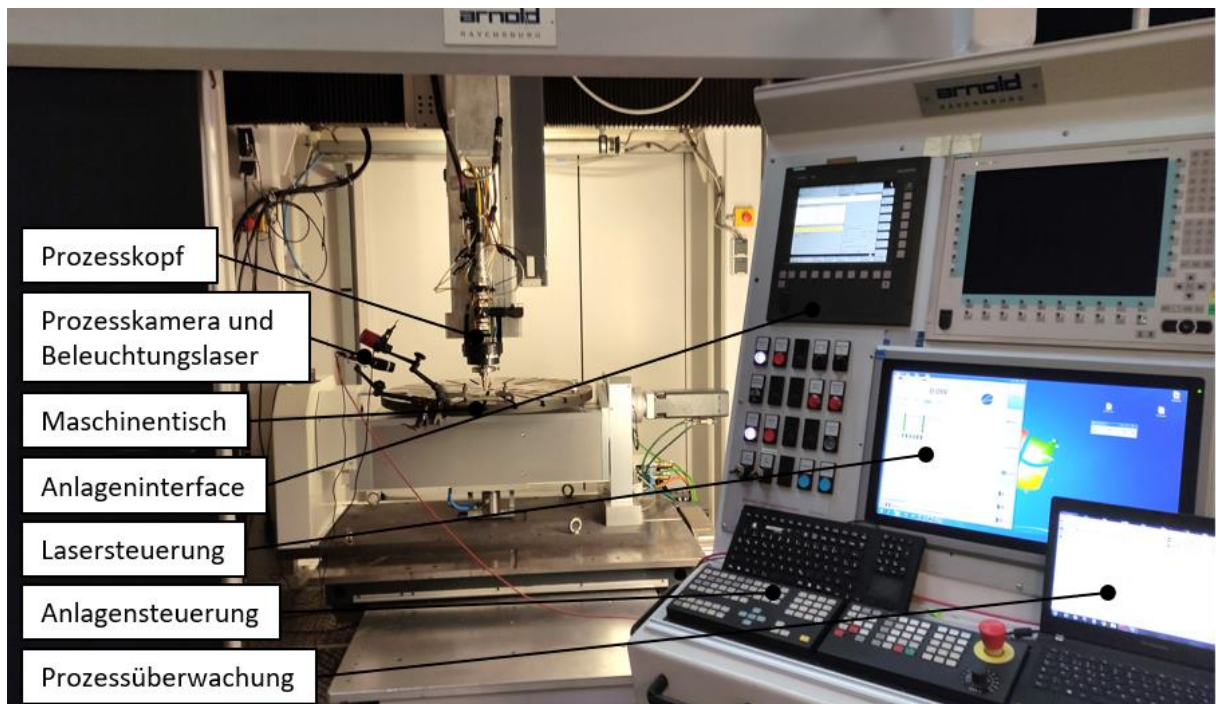


Abbildung 13: Fünfachsigige NC-Anlage 19389 MTH

### **3.1.2 Prozessüberwachung**

#### **3.1.2.1 Prozesskamera**

Als Prozesskamera wird je nach Verfügbarkeit eine Manta G-419B NIR oder eine Manta G-235C IRC verwendet. Beide Modelle werden von ALLIED Vision Technologies GmbH hergestellt. Die Manta G-419B NIR liefert Bilder in Graustufen mit einer Auflösung von 2048 x 2048 Pixel bei maximal 28 Bildern pro Sekunde. Die Manta G-235C IRC liefert Farbbilder mit einer Auflösung von 1936 x 1216 Pixel bei maximal 50 Bildern pro Sekunde. Zum Schutz der Sensoren kamen Bandpassfilter zum Einsatz.

#### **3.1.2.2 Infrarot(IR)-kamera**

Für einige Schweißprozesse erfolgt eine zusätzliche Prozessüberwachung mit einer ImageIR® 8300 hs der Firma InfraTec. Diese verfügt über eine Auflösung von 640 x 512 Pixel und eine Bildfrequenz von 1004 Hz. Jedem Pixel wird in jedem Einzelbild eine Temperatur zugeordnet.

### **3.1.3 Optik und Prozesskopf**

Als Prozesskopf und Laseroptik kommt die am Fraunhofer IWS entwickelte, koaxiale Laser-Draht-Bearbeitungsoptik COAXwire zum Einsatz. Die koaxiale Drahtzuführung ermöglicht das weitgehend richtungsunabhängige Auftragschweißen mit Metalldrähten. Der kollimierte Laserstrahl wird symmetrisch in drei Teilstrahlen gespalten und auf der Substratoberfläche wieder zu einem Brennfleck fokussiert. Der Draht sticht bei korrekter Justierung in das Zentrum des laserinduzierten Schmelzbades ein. Die maximale Laserleistung beträgt 4 kW. Abbildung 14 zeigt den Prozesskopf mit den wichtigsten Komponenten.

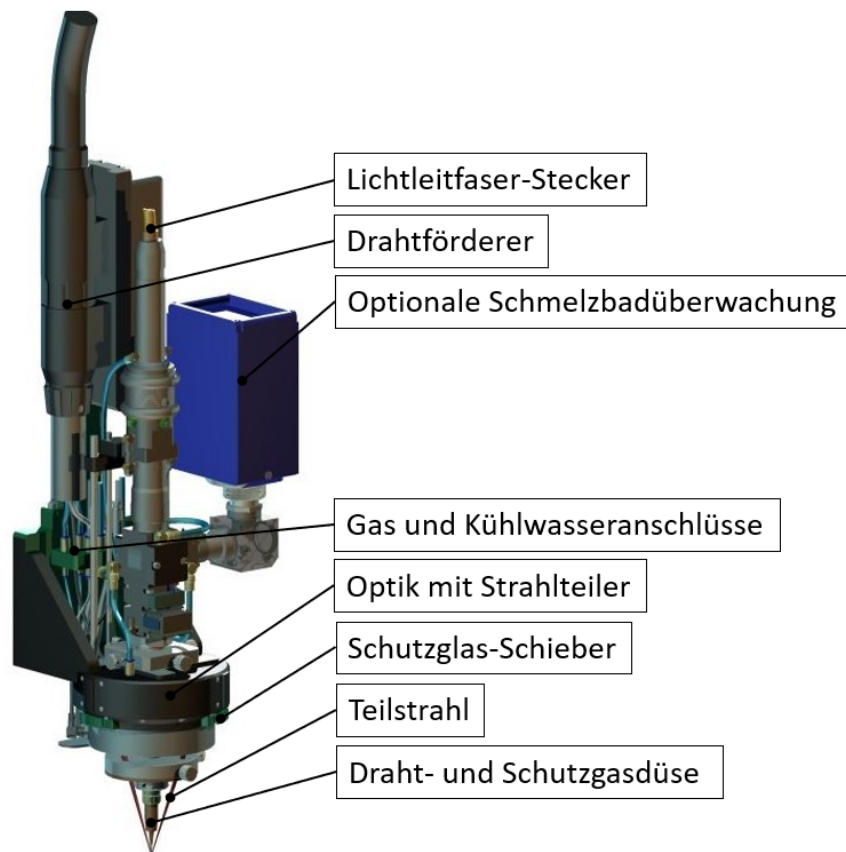


Abbildung 14: Darstellung des Prozesskopfes COAXwire mit relevanten Komponenten [13, S. 39]

### 3.1.4 Strahlenquelle

Als Strahlenquelle dient ein LDF 4000 – 30 der Firma Laserline GmbH. Es handelt sich um einen Diodenlaser im Infrarotbereich. Die technischen Daten sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Eigenschaften der Strahlenquelle [58]

|                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| Maximalleistung  | 4240 W                  |
| Leistungsbereich | 10–100 %                |
| Wellenlänge      | 940–2060 nm $\pm$ 10 nm |
| Baujahr          | 2015                    |
| Lichtleitkabel   | 100 $\mu$ m             |
| Strahlqualität   | 4 mm.mrad               |

### 3.1.5 Drahtfördereinheit

Zur Förderung des Drahtes in die Prozesszone kommt ein Drahtfördersystem der DINSE G.m.b.H. zum Einsatz. Die Steuereinheit ist ein Modell des Typs DIX FDE\_PB 100L.

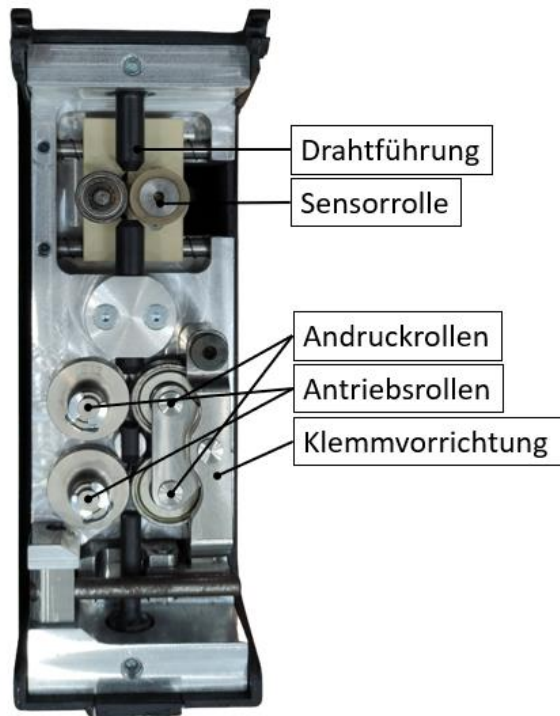


Abbildung 15: Darstellung des Drahtförderers mit relevanten Komponenten

Der Draht wird von der Spule, auf die er für Transport und Lagerung gewickelt ist, abgespult und über eine Drahtseele zum Drahtförderer transportiert.

Zunächst passiert der Draht eine Sensorrolle, welche die Erfassung der tatsächlichen Förderrate ermöglicht.

Die Antriebsrollen drehen mit dem Moment, das der geforderten Fördergeschwindigkeit entspricht, die gegenüberliegenden Andruckrollen realisieren die manuell eingestellte Klemmkraft.

### 3.1.6 Ultraschallprozessor

#### 3.1.6.1 Ultraschallgenerator

Der eingesetzte Ultraschallgenerator ist ein GM 4400 der Firma BANDELIN electronic GmbH & Co. KG. Das Gerät wandelt die anliegende Netzspannung mit  $230 \pm 23$  V und 50 Hz in die vom Ultraschallwandler benötigte Spannung und Frequenz um. Gleichzeitig lassen sich über ein Interface Prozessparameter einstellen und Abläufe anzeigen. Die Amplitude kann von 10 bis 80 % gewählt werden, was 3–24  $\mu\text{m}$  entspricht. Die maximale Leistung entspricht 400 W bzw. 320 W für das vorliegende Schallsystem. Die Frequenz kann

nicht eingestellt werden, sondern hängt von der Resonanzfrequenz des Systems ab. Diese kann mittels eines automatisierten Suchlaufs im Bereich zwischen 19 und 21 kHz lokalisiert werden. Nach einer Anpassung durch den Hersteller wurde dieser Bereich auf 18 bis 21 kHz erweitert. Weitere Einstellungsmöglichkeiten, wie die nicht kontinuierliche Beschallung, waren für diese Arbeit nicht relevant.

### 3.1.6.2 Ultraschallwandler

Der dazugehörige Ultraschallwandler ist ein UW 400, ebenfalls hergestellt von BANDELIN electronic GmbH & Co. KG. Die Aufgabe des Ultraschallwandlers ist es, die vom Generator bereitgestellte elektrische Energie in mechanische Schwingungen mit der gewünschten Frequenz und Amplitude umzuwandeln. Es handelt sich um einen piezoelektrischen Schallwandler mit einer maximalen Leistungsaufnahme von 400 W [59].

### 3.1.6.3 Spezialboosterhorn

Das Spezialboosterhorn überträgt die vom Wandler generierte Schwingung auf die Sonotrode. Abhängig von seiner Bauweise modelliert es die an der Sonotrode resultierende Amplitude. Das eingesetzte Spezialboosterhorn SH 400 G-S wurde eigens für die geplante Anwendung ausgelegt. Zum Anschluss an das Substrat, welches gleichzeitig als Sonotrode funktioniert, ist ein M 14x1,5 Zapfen vorgesehen.

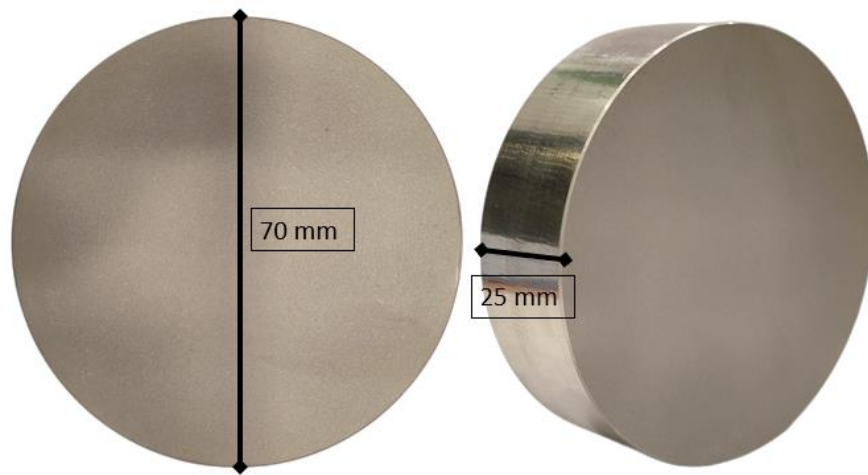


Abbildung 16: Spezialboosterhorn SH 400 G-S

Spezialboosterhorn und Ultraschallwandler sind über eine Schraubverbindung fest verbunden, die mittels Hakenschlüsseln befestigt oder gelöst werden kann.

### 3.1.6.4 Substrat und Sonotrode

Ein zylindrisches Substrat mit Radius 35 mm und Dicke 25 mm erfüllt gleichzeitig die Rolle der Sonotrode. Der Anschluss an das Spezialboosterhorn erfolgt über ein M14x1,5 Innengewinde, um eine kraftschlüssige Verbindung zu gewährleisten. Die Oberfläche wird zur Verbesserung der Lasereinkopplung und für eine erhöhte Reproduzierbarkeit sandgestrahlt.



**Abbildung 17: zylindrisches Rundsubstrat und Sonotrode**

Das beschriebene Substrat ist mehrfach vorhanden und beliebig austauschbar, um die Durchführung von Versuchsreihen zu ermöglichen.

## 3.2 WERKSTOFFE

### 3.2.1 Substrat

Das Substrat besteht aus dem nichtrostenden austenitischen Stahl 1.4404, der besser unter dem Handelsnamen 316L bekannt ist. Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 4 aufgeführt.

**Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung von 1.4404 nach DIN EN 10088-3 [60]**

|            | C    | Mn  | Si  | P     | S    | Cr   | Ni   | Mo  | N   |
|------------|------|-----|-----|-------|------|------|------|-----|-----|
| <b>Min</b> | –    | –   | –   | –     | –    | 16,5 | 10,0 | 2,0 | –   |
| <b>Max</b> | 0,03 | 2,0 | 1,0 | 0,045 | 0,03 | 18,5 | 13,0 | 2,5 | 0,1 |

### 3.2.2 Zusatzwerkstoff

Als Zusatzwerkstoff kommt 1.4430 zum Einsatz. Unter dem Handelsnamen 316LSi bekannt, handelt es sich um einen austenitischen, rostfreien Stahl mit erhöhtem Siliciumgehalt für bessere Schweißbarkeit. Der Drahtdurchmesser beträgt 1 mm, der Durchmesser der Dornspule 200 mm. Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 4 Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung von 1.4430 nach DIN EN 10088-3 [60]

|     | C    | Mn  | Si  | P     | S     | Cr   | Ni   | Mo  | N |
|-----|------|-----|-----|-------|-------|------|------|-----|---|
| Min | –    | –   | –   | –     | –     | 17,2 | 10,7 | 2,0 | – |
| Max | 0,02 | 1,9 | 1,4 | 0,025 | 0,015 | 19,8 | 13,3 | 2,5 | 0 |

## 4 SYSTEMINTEGRATION UND VORBETRACHTUNG

### 4.1 WAHL DER ULTRASCHALLEINKOPPLUNG

Wie bereits in Abschnitt 2.2.3 angesprochen ist die Übertragung des Ultraschalls in das Schmelzbad während des Prozesses eine zentrale Herausforderung. Der im Schmelzbad induzierte Schalldruck muss möglichst konstant sein, um ein über das Bauteil homogenes Gefüge zu erreichen. Gleichzeitig muss die Lösung mit der vorhandenen Systemtechnik kompatibel und einfach zu integrieren sein. Weitere zu berücksichtigende Punkte sind Kosten, Effizienz, Reproduzierbarkeit und bereits vorhandene Kompetenzen. Nachfolgend werden verschiedene Möglichkeiten besprochen werden, das Einleiten von Ultraschall zu realisieren.

#### 4.1.1 Anregung des gesamten Substrates

Die denkbar einfachste Lösung stellt die Anregung des gesamten Substrates dar. Dafür wird dieses kraftschlüssig mit einer Sonotrode verbunden oder funktioniert selbst als solche. Einen Aufbau dieser Art realisierten z. B. Ning, Hu et al. wie in Abbildung 18 dargestellt.

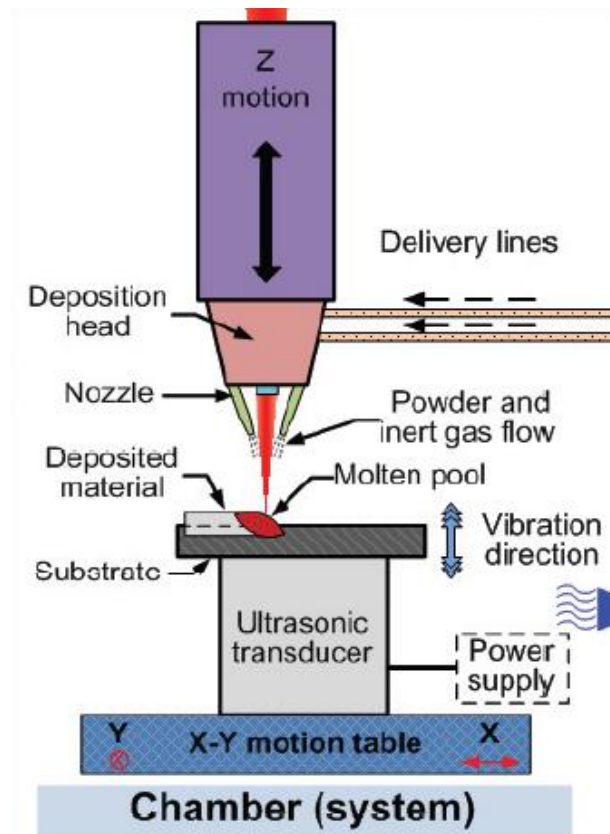
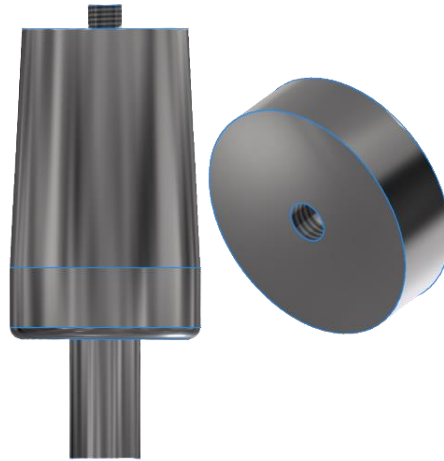


Abbildung 18: Anregung des kompletten Substrates nach Ning, Hu et al. [50, S. 4]

Die Vorteile liegen vor allem in der vergleichsweise unkomplizierten Umsetzung. Das gesamte Substrat wird angeregt und überträgt die Ultraschallwellen auf das laserinduzierte Schmelzbad. Der in der Schmelze vorliegende Schalldruck ist damit abhängig vom Abstand der aktuellen Schweißlage zur Substratoberfläche, könnte aber durch Anpassung der Amplitude entsprechend geregelt werden. Nachteilig ist die hohe Leistung, die benötigt wird, um die Masse des gesamten Substrates in Schwingung zu versetzen. Die Effizienz ist demzufolge gering. Ebenfalls bedacht werden müssen die aus dem Schweißprozess resultierende Wärmeentwicklung und ihre Wirkung auf das Ultraschallsystem. Das zentrale Problem ist die Realisierung eines austauschbaren Substrates, was für die Durchführung von mehreren Versuchen notwendig ist. Das Substrat muss somit sowohl kraftschlüssig mit dem Schallwandler verbunden als auch austausch- und ersetzbar sein. Abbildung 19 zeigt das Konzept für eine mögliche Umsetzung einer Anregung des gesamten Substrates.

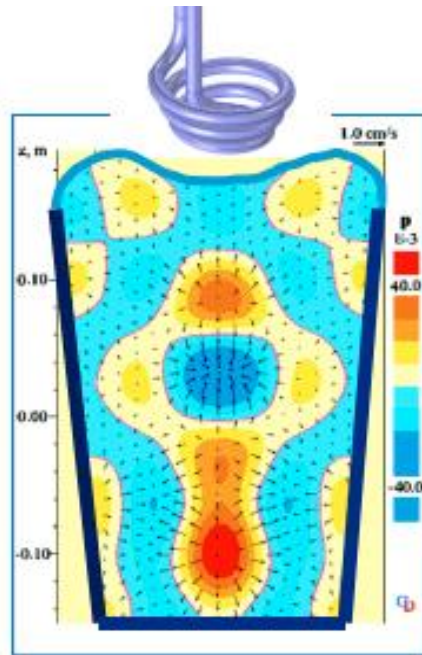


**Abbildung 19: Konzept einer Sonotrode mit austauschbarem Substrat**

Die kraftschlüssige Übertragung soll hier durch eine Schraubverbindung realisiert werden, stellt jedoch hohe Anforderungen an die Maßgenauigkeit der Komponenten. Eine Sonotrode mit großem Volumen relativ zum Substrat soll als Wärmesenke wirken und gleichzeitig verhindern, dass die Masseänderung des Schwingensystems durch aufgebaute Strukturen die Funktion des Ultraschallwandlers beeinträchtigt.

#### **4.1.2 Elektromagnetisch induzierte Kavitation**

Die Möglichkeit, durch elektromagnetische Induktion Ultraschallwellen in einer Metallschmelze zu erzeugen, ist bereits seit geraumer Zeit bekannt. So untersuchte 1998 Vivès die Kornfeinung mittels elektromagnetischer Vibration für Aluminiumlegierungen [61]. Aktuelle Untersuchungen erfolgten 2019 durch Pericleous, Bojarevics et al. Abbildung 20 zeigt schematisch die Versuchsanordnung mit Simulation des generierten Schallfeldes [62].



**Abbildung 20: Simulation eines durch elektromagnetische Induktion generierten Schallfelds [62, S. 2]**

Die magnetische Induktion erfolgt mittels einer wassergekühlten Spule, durch die ca. 1700 kA mit 9,5 kHz fließen. Um den nötigen Schwellwert für Kavitation in der Schmelze zu erreichen, war es notwendig, die Frequenz in der Spule auf die Resonanzfrequenz des Tiegels abzustimmen. Einflussgrößen sind die Tiegelgeometrie, die Form der Schmelzoberfläche, die Temperatur und akustische Eigenschaften der Komponenten [62].

Die in der additiven Fertigung erzeugten Schmelzvolumina sind um Größenordnungen kleiner als die durch Pericleous, Bojarevics et al. untersuchten Aluminiumschmelzen. Entsprechend wären geringere Stromstärken notwendig, um den Schwellwert für Kavitation zu erreichen. Der Aufwand, die Versuchsanordnung für den LDA-Prozess zu adaptieren, wäre jedoch immens. Die verwendete Spule müsste in den Prozesskopf integriert und unerwünschte Interaktion des Magnetfeldes mit der Systemtechnik ausgeschlossen werden. Die Frequenz der Spule müsste konstant angepasst werden, um das aufgetragene Volumen zu berücksichtigen. Das notwendige mathematische Modell wäre komplex, wie die Berechnungen von Pericleous, Bojarevics et al. für ein System mit konstanten Parametern zeigen [62].

Aufgrund der technischen Herausforderungen und Unsicherheiten wurde dieser Ansatz für die vorliegende Arbeit verworfen. Die potenziellen Vorteile machen die Problematik jedoch für weitere die Betrachtung in einem zukünftigen Projekt attraktiv.

### 4.1.3 Lokale Sonotrode

Die Verwendung einer in die Schmelze eingetauchten Sonotrode ist die am besten untersuchte und erprobte Form der ultraschallunterstützten Kornfeinung [46, S 3–8]. Die Ultraschallwellen werden direkt von der Sonotrode auf das Schmelzbad übertragen. Die Effizienz ist somit vergleichsweise hoch und die konstante Übertragung ist gewährleistet, solange die Sonotrode ausreichend in die Schmelze eingetaucht ist. Ferguson, Schultz et al. untersuchten 2014 mit der in Abbildung 21 dargestellten Versuchsanordnung den Einfluss von Ultraschallbehandlung der Schmelze auf die Korngröße von Gussmetall.

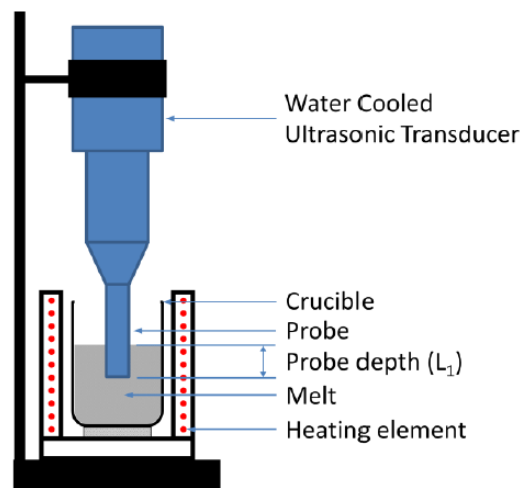


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für Ultraschallanregung einer Metallschmelze [63, S. 2]

Für die Behandlung von Schmelzvolumina in einem Tiegel ist die Versuchsanordnung, wie Abbildung 21 zeigt, simpel. Mehrere Faktoren machen die Adaption für den LDA-Prozess jedoch deutlich schwieriger. Das durch die vorhandene Systemtechnik erzeugte Schmelzbad hat einen Durchmesser von ca. 2 mm (abhängig von der Defokussierung) und muss bereits den Draht mit einem Durchmesser von 1 mm aufnehmen. Der vorhandene Platz, um eine Sonotrode in das Schmelzbad einzuführen, ist begrenzt. Weiterhin müsste die Sonotrode mit dem Prozesskopf mitgeführt werden, also in den Prozesskopf integriert oder über eine weitere Achse gesteuert werden. Aus dieser Herausforderung ergibt sich eine weitere Komplikation. Der Prozesskopf COAXwire, dargestellt in Abbildung 14, ist speziell konstruiert, um weitgehend richtungsunabhängiges LDA zu ermöglichen. Eine mögliche Sonotrode müsste zwangsweise in einem Winkel angebracht werden, da der Draht bereits coaxial geführt wird. Das Ergebnis wäre eine von der Sonotrode induzierte Richtungsabhängigkeit, die den Prozess maßgeblich beeinflusst. Ein weiteres Problem, das für den gewählten Werkstoff besteht, ist die Schmelztemperatur von 1398 °C. Bei dieser Temperatur ist kein möglicher Sonotrodenwerkstoff langfristig stabil. Hinzukommt die zumindest partielle Absorption von Laserleistung durch die Sonotrode.

#### 4.1.4 Einleitung über den Draht

Die Übertragung von Ultraschall durch Draht ist bereits seit längerer Zeit Forschungsgegenstand in der Medizin. 1999 untersuchten Atar, Luo et al. die Behandlung von verstopften Arterien mittels über Draht übertragenem Ultraschall [64]. Abbildung 22 zeigt ein solches Ultraschallsystem.

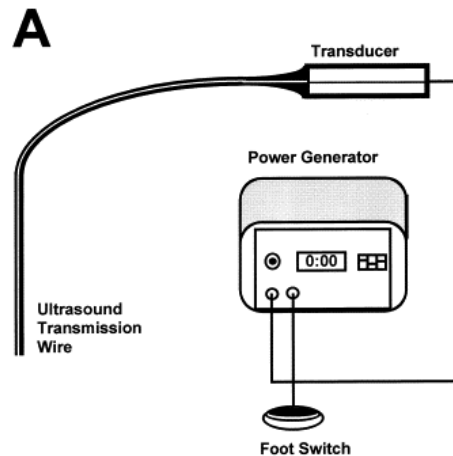
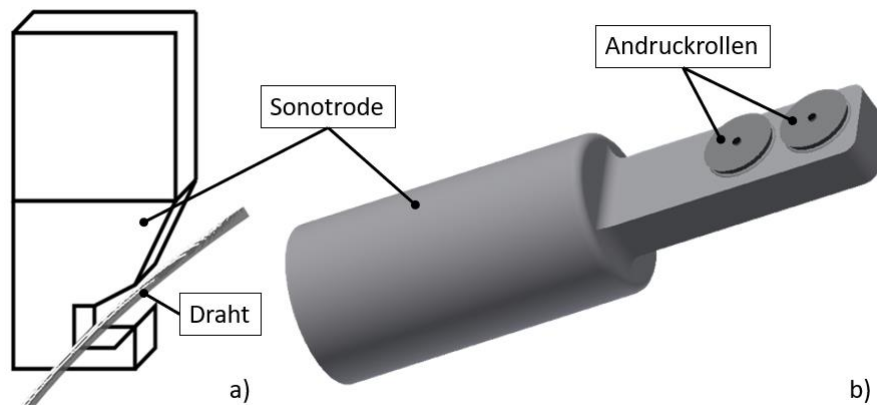


Abbildung 22: Schematische Darstellung eines Draht-Ultraschallsystems für Thrombolyse [64, S. 2]

Die Verwendung des Drahts als Sonotrode für das LDA ist ein Ansatz, der die Vorteile einer lokalen Sonotrode ohne die einhergehenden Nachteile bieten könnte. Da das Schmelzbad direkt angeregt wird, ist die notwendige Leistung des Ultraschallsystems geringer als z. B. für eine Beschallung des gesamten Substrates. Die relativ konstante Schmelzbadgeometrie bestimmt die Ultraschallparameter. Diese wären somit weitgehend unabhängig von der Geometrie der aufgetragenen Struktur. Da keine zusätzliche Sonotrode in die Prozesszone geführt werden muss, entfallen das Problem der Richtungsabhängigkeit sowie die notwendige Temperaturbeständigkeit des Sonotrodenmaterials.

Die Herausforderung besteht in der Übertragung der Ultraschallwellen auf den Draht, während dieser in die Prozesszone gefördert wird. Abbildung 23 zeigt Konzepte für die Ultraschalleinkopplung in den Draht.



**Abbildung 23:** Konzepte für die Ultraschalleinkopplung in den Draht: a) Führung durch eine Sonotrode mit Haken, b) Führung durch eine Sonotrode mit Andruckrollen.

Nach Rücksprache mit einem Hersteller von Ultraschall-Systemen (BANDELIN electronic GmbH & Co. KG. ) konnte kein zielführendes Konzept entwickelt werden. Für die kontinuierliche und effiziente Übertragung von Ultraschallwellen ist eine kraftschlüssige Verbindung erforderlich, die sich mit den vorhandenen Mitteln und im Zeitrahmen dieser Arbeit nicht für einen beweglichen Draht realisieren lässt. Der Ansatz ist jedoch durch die möglichen Vorteile von großem Interesse für weitere Untersuchungen.

Für den Rahmen dieser Arbeit wurde der Ansatz der Anregung des kompletten Substrates als zielführend ausgewählt. Sowohl die elektromagnetisch induzierte Kavitation als auch die Einleitung über den Draht sind potenziell umsetzbar, erfordern jedoch deutlich gesteigerten Aufwand mit Blick auf Bearbeitungszeit, Kosten und Kooperation mit anderen Institutionen. Die Anregung des gesamten Substrates ist vergleichsweise einfach umsetzbar und sollte eine den Anforderungen entsprechende Beeinflussung des Erstarrungsprozesses ermöglichen.

## 4.2 AUSLEGUNG, BESCHAFFUNG UND INTEGRATION

Nach der Entscheidung für den Ansatz der Beschallung des gesamten Substrates erfolgte die Beschaffung eines geeigneten Ultraschallsystems und die Integration in die vorhandene fünfschichtige NC-Anlage 19389 MTH. Das austauschbare Substrat soll direkt mit einem Spezialboosterhorn zur Modulation der Amplitude verbunden werden. Diese Verbindung soll über einen M14-Gewindestift am Spezialboosterhorn und ein entsprechendes Gewinde im Substrat erfolgen.

Die in Abschnitt 2.2.3 vorgestellten Arbeiten zu Ultraschall in der additiven Fertigung liefern vorläufige Kennwerte, die ein geeignetes Ultraschallsystem erfüllen sollte. Von

besonderem Interesse ist die Arbeit von Todaro, Easton et al. aufgrund der ähnlichen Versuchsanordnung. Für ihre Versuchsanordnung wählten sie eine Frequenz von 20 kHz und eine maximal erreichbare Amplitude von 30 µm [55, S. 3–7]. Beide Werte stimmen mit denen in anderen Arbeiten gewählten überein. Gleichung (8) mit der Dichte der Flüssigkeit  $\rho$ , der Schallgeschwindigkeit im Medium  $c$ , der Schallfrequenz  $f$  und der Schallamplitude  $A$  liefert die Ultraschallintensität [46, S. 24].

$$I = \frac{1}{2} \rho * c (2\pi f A)^2 \quad (8)$$

Für Temperaturen in der Nähe des Schmelzpunktes liegt die Dichte von flüssigem Stahl bei ca. 7050 kg/m³ [65, S. 3]. Die Schallgeschwindigkeit in flüssigem 1.4430 erfordert eine Näherung unter Verwendung von Gleichung (9) [66, S. 2]. Mit der molaren Gaskonstante  $R$  8,314 J/mol\*K, dem Schmelzpunkt  $T_m$  1671,15 K und der molaren Masse  $M$  0.00561 kg/mol.

$$c = 7.5642 \left( \frac{RT_m}{M} \right)^{0,5} \quad (9)$$

Für  $c$  ergibt sich 3764,8 m/s. Dieser Wert stimmt annähernd mit dem experimentell ermittelten Wert von  $3820 \pm 3$  m/s [67, S. 1] für flüssiges Eisen am Schmelzpunkt überein. Für eine Frequenz von 20 kHz und eine Amplitude von 30 µm ergibt Gleichung (8) eine Ultraschallintensität von 18861 W/cm² an der Substratoberfläche. Eskin gibt [46, S. 89] den Schwellwert für die Kavitation in flüssigen Leichtmetallen mit ca. 100 W/cm² an. Obwohl kein Wert für flüssigen Edelstahl vorliegt, kann davon ausgegangen werden, dass eine um zwei Größenordnungen höhere Schallintensität zur Anregung von Kavitation ausreichend ist.

Mit den aus Literaturquellen entnommen und errechneten Kennwerten wurde ein unverbindliches Angebot von Hielscher Ultrasonics GmbH angefordert. Da das angebotene Ultraschallsystem den Betrag von 10.000 € überstieg, wurde eine Ausschreibung mit den in Tabelle 6 aufgeführten neutralen Leistungskriterien bei der Beschaffungsstelle beantragt.

**Tabelle 6: Neutrale Leistungskriterien für die Ausschreibung**

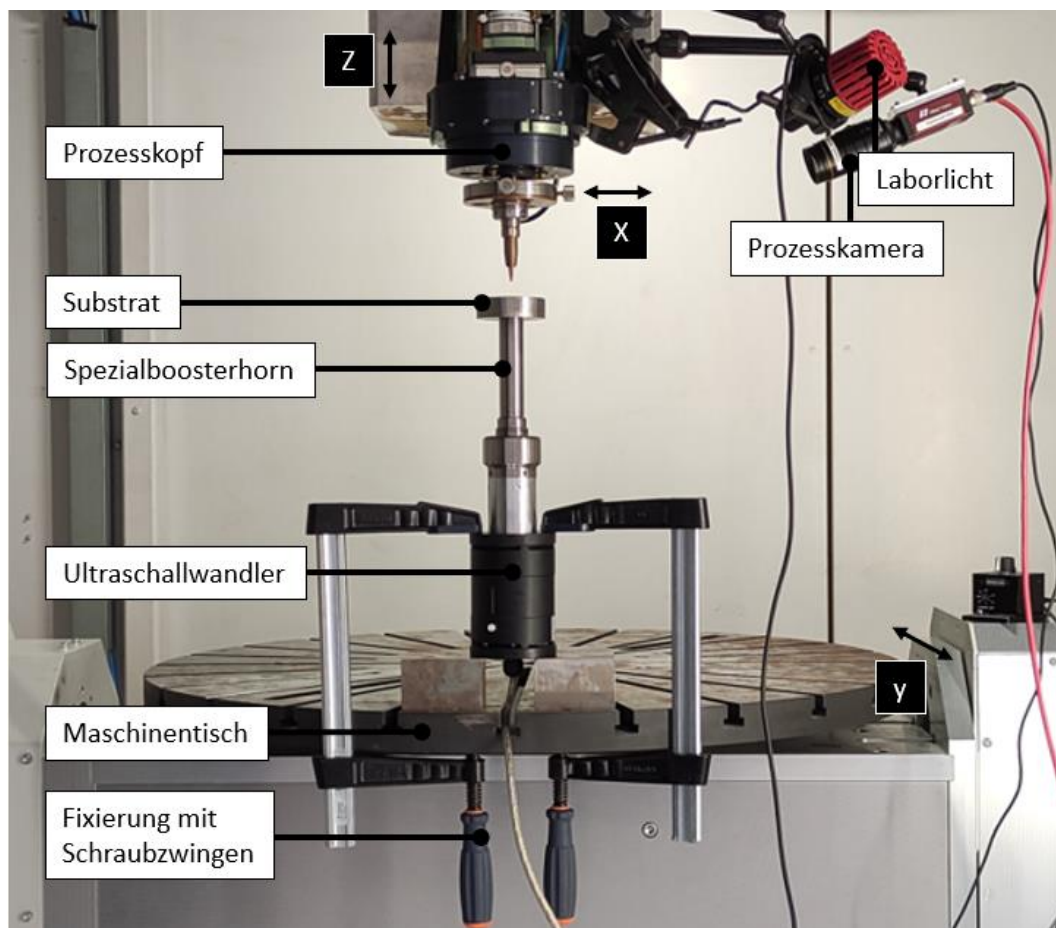
|   |                                                                                                               |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Amplitude Ultraschall-Booster zwischen 25 und 35 µm                                                           |
| 2 | Frequenz Ultraschall $\geq 20$ kHz                                                                            |
| 3 | Laufstabilität bei in situ veränderlicher Masse/Geometrie des zu beschallenden Volumens bis mindestens +150 g |
| 4 | Booster mit Substrataufnahme – M14 Gewindestift                                                               |

Kontaktiert wurden folgende Firmen: SONOTRONIC Nagel GmbH, Hielscher Ultrasonics GmbH sowie BANDELIN electronic GmbH & Co. KG. Das einzige Angebot erfolgte durch BANDELIN electronic GmbH & Co. KG. Da es keine Alternativen gab, wurde das Angebot in folgendem Umfang akzeptiert: GM 4400 Ultraschallgenerator, UW 400 Ultraschallwandler, NL 5 Netzkabel sowie eine Sonderanfertigung des SH 400 G-S Spezialboosterhorns zur Aufnahme des Substrates. Die technischen Daten der im Angebot beinhalteten Geräte sind in Abschnitt 3.1.6 aufgeführt. Die Fertigung der Substrate erfolgte in der IWS eigenen Werkstatt aus 1.4404 Rundhalbzeug mit einem Durchmesser von 70 mm. Auf Anschlussflächen am Substrat wurde verzichtet, um einen Versatz zwischen diesen und dem Gewinde vorzubeugen und eine bessere Reproduzierbarkeit zu erreichen. Die Abmaße und Werkstoffdaten sind in Abschnitt 3.1.6.4 bzw. 3.2.1 aufgelistet. Ein fertiges Substrat wurde zur Modellierung des Spezialboosterhorns und zur Kalibrierung des Ultraschallprozessors an BANDELIN electronic GmbH & Co. KG versendet. Das fertige und ausgelieferte Ultraschallsystem ist in Abbildung 24 dargestellt.



Abbildung 24: Ultraschallsystem bestehend aus GM 4400, UW 400, SH 400 G-S, Substrat sowie Netz- und Verbindungskabel.

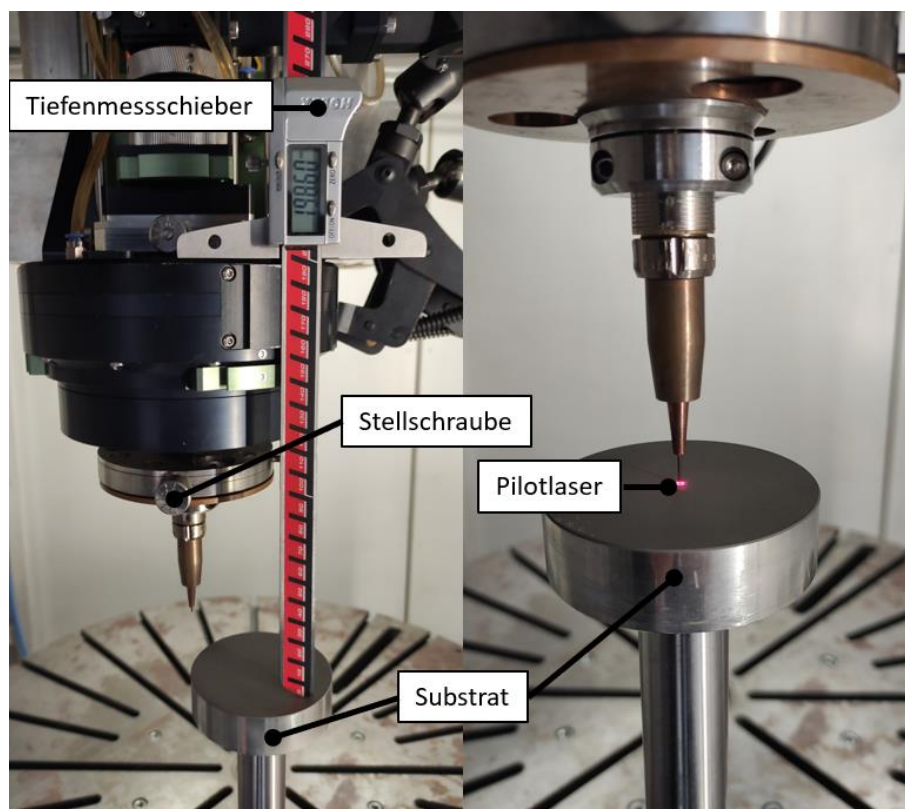
Die Verbindung zwischen Ultraschallwandler und Spezialboosterhorn wird mittels mitgelieferten Hakenschlüsseln hergestellt. Da das Substrat nicht mit Anschlussflächen versehen werden konnte, erfolgt die Herstellung der Verbindung mit dem Spezialboosterhorn mittels einer Wasserpumpenzange. Der Ultraschallgenerator wird außerhalb der Fertigungsanlage positioniert, um die Steuerung des Ultraschallsystems im laufenden Prozess zu ermöglichen. Der Ultraschallwandler mit fixiertem Spezialboosterhorn und Substrat wird über das Kunststoffgehäuse mittels Schraubzwingen am Maschinentisch befestigt. Kippung oder Rotation des Maschinentischs sind für die Durchführung der Versuche nicht notwendig. Das in die Anlage integrierte Ultraschallsystem ist in Abbildung 25 dargestellt. Zur Prozessüberwachung steht neben dem Anlagenfenster eine Prozesskamera zur Verfügung, unterstützt durch ein Laborlicht. Sowohl Prozesskamera als auch Laborlicht werden mit dem Prozesskopf mitgeführt und sind somit nach einmaliger Justierung immer auf die Prozesszone ausgerichtet.



**Abbildung 25:** In die Fertigungsanlage integrierte Ultraschall-Systemtechnik und Prozessüberwachung mit Kennzeichnung der relevanten Achsen.

Die Einstellung des Arbeitsabstandes und somit der Defokussierung erfolgt mittels eines Tiefenmessschiebers. Bei einer gewünschten Defokussierung von 2 mm beträgt der Abstand von der Prozesskopfoberseite zur Substratoberfläche 198,6 mm. Da der Einbau des

Ultraschallsystems nicht deckungsgleich reproduzierbar ist, muss der Nullpunkt des Koordinatensystems im Substratzentrum nach jedem Einbau neu ermittelt und eingestellt werden. Dies erfolgt unter Verwendung des Pilotlasers mit Hilfe eines Programms, da die zur Verfügung stehende Anlage nicht mit einem Messtaster ausgestattet ist. Der Nullpunkt wird zunächst mit korrektem Arbeitsabstand auf den Rand des Substrates gesetzt. Anschließend fährt der Prozesskopf einen Kreis mit einem Radius von 35 mm. Durch Beobachten des Pilotlasers während der Kreisbahn lässt sich die Lage des Nullpunktes nachfolgend anpassen, bis Substratrand und Kreisbahn übereinstimmen. Eine Verschiebung des so ermittelten Nullpunktes um 35 mm in die entsprechende Richtung ergibt den Substratmittelpunkt. Dieses Vorgehen zur Ermittlung des Nullpunktes stellt einen Kompromiss aus Genauigkeit und Arbeitszeit dar, der für die geplanten Versuche ausreichend genau ist. Die Ausrichtung des Drahtes relativ zum Laserfokus erfolgt ebenfalls mit Hilfe des Pilotlasers über am Prozesskopf vorhandene Stellschrauben. Abbildung 26 zeigt das Vermessen des Arbeitsabstandes sowie den ermittelten Nullpunkt mit zentriertem Draht.



**Abbildung 26: Einrichten der Fokusebene und der Drahtzentrierung**

Das Wechseln des Substrates erfordert das Lösen der Schraubzwingen sowie die Entnahme des Ultraschallwandlers mit Spezialboosterhorn und Substrat aus der Anlage. Nach Lösen des verwendeten Substrates kann ein ungenutztes Substrat befestigt und das Ultraschallsystem erneut am Maschinentisch fixiert werden. Anschließend erfolgt erneut die Einrichtung des Prozesskopfes wie vorangegangen beschrieben.

## 4.3 VERSUCHSPLANUNG

### 4.3.1 Probengeometrie

Die Untersuchung des Ultraschalleinflusses auf die Mikrostruktur und den Prozess erfordert die Wahl von geeigneten Probengeometrien. Mit dem Durchmesser des Substrates von 70 mm sind bereits die maximalen Maße einer möglichen Geometrie vorgegeben. Weiter eingeschränkt werden die möglichen Geometrien durch die vom LDA vorgegebenen Anforderungen an Auftragsbeginn und Auftragsstopp. Es ist zum Beispiel nicht möglich, Kreise mit beliebig kleinem Radius aufzutragen. Eine zylindrische Form muss durch eine Kontur, die mäandernd gefüllt wird, realisiert werden.

Das Ultraschallsystem limitiert in unbekanntem Maß das maximal auftragbare Volumen. Wird die Resonanzfrequenz des Schwingensystems durch aufgetragenes Material zu stark verändert, wird die Beschallung durch den Ultraschallprozessor gestoppt. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss von aufgetragenem Material abhängig von Volumen, Position und Geometrie ist. Der Ultraschall selbst stellt eine weitgehend unbekannte Einflussgröße auf den aktiven LDA-Prozess dar. Aufgrund des Vorhandenseins mehrerer unbekannter Einflussgrößen sowie des primären Ziels eines Machbarkeitsnachweises werden Geometrien gewählt, bei denen die Prozessführung bekannt ist und für die sich die Prozessparameter leicht anpassen lassen.

Nachfolgend wird sich auf das Koordinatensystem der in 3.1.1 beschriebenen Fertigungsanlage bezogen. Zwei der verfügbaren Achsen, die A- und die C-Achse, werden nicht verwendet. Die X-Achse ist über eine seitliche Bewegung des Prozesskopfes relativ zum Maschinentisch realisiert, die Z-Achse über das Absenken oder Anheben des Prozesskopfes. Eine Bewegung auf der Y-Achse geschieht durch ein Verfahren des Maschinentisches orthogonal zur X-Achse. Die Achsen sind in Abbildung 25 gekennzeichnet.

Die einfachste mögliche Geometrie ist eine Einzelspur entlang der X- bzw. Y-Achse. Mittig im Substrat positioniert, um einen möglichst hohen Grad an Symmetrie zu erhalten, wird die Veränderung der Resonanzfrequenz durch den Auftrag minimiert. Da nicht beliebig viele Substrate zur Verfügung stehen, ist es jedoch notwendig, mehrere Einzelspuren auf ein Substrat aufzutragen. Für die Untersuchung des Einflusses von Ultraschall auf die Mikrostruktur ist eine Einzelspur nur von begrenzter Aussagekraft. Der direkte Kontakt des Schmelzbades mit den Körnern des Substrates, die als Nukleationskeim wirken, führt zu ausgeprägtem epitaktischen Wachstum bei der Erstarrung. Ebenfalls fehlt bei einer Einzelspur das Umschmelzen durch eine darüber aufgetragene Lage. Weiterhin ist die Schallintensität an der Substratoberfläche am größten und nimmt mit steigender Höhe ab. Die Mikrostruktur ist somit nicht repräsentativ für den Großteil des Volumens eines

möglichen Bauteils. Einzelspuren sind jedoch geeignet, den Einfluss von Ultraschall auf Nahtkenngrößen zu untersuchen.

Mehrere durch Verschiebung entlang der Z-Achse übereinander gelegte Einzelspuren werden nachfolgend als Wände bezeichnet. In einer Wand sollten bei einer ausreichenden Anzahl von Lagen Gefügebereiche vorhanden sein, in denen die Mikrostruktur weitgehend unbeeinflusst von der Substratoberfläche ist. Dabei ist die aufgetragene Masse deutlich kleiner als für Geometrien, bei denen jede Lage aus sich überlappenden Einzelspuren aufgebaut ist. Das macht Wände kompatibler mit den Limitierungen des Ultraschallsystems, ist jedoch weiter entfernt von einem repräsentativen Bauteil. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Resonanzfrequenz eines Substrates beim Auftragen von Wänden schneller die zulässigen Grenzwerte überschreitet als beim Auftragen von Einzelspuren. Ein limitierender Faktor für das Generieren dieser Art Geometrie ist die Dynamik der Achsen der zur Verfügung stehenden Fertigungsanlage, kombiniert mit den Anforderungen des LDA-Prozess.

Eine möglichst simple Geometrie aus überlappenden Einzelspuren und mehreren Lagen ist ein Quader. Bei ausreichend großen Kantenlängen können aus einem generierten Quader Zugproben entnommen werden. Einzelspuren werden sowohl durch darüber folgende Lagen umgeschmolzen als auch durch benachbarte überlappende Spuren derselben Lage. Von den bisher angeführten simplen Geometrien ist das Gefüge eines Quaders am ehesten mit dem eines realen Bauteils vergleichbar. Das deutlich höhere Auftragsvolumen wird jedoch deutlich schneller zu Resonanzfrequenzen außerhalb des Arbeitsbereichs führen.

#### **4.3.2 Prozessparameter und Verfahrensstrategie**

Die wichtigsten Prozessparameter für das LDA und ihr Einfluss auf den Prozess sowie resultierende Kenngrößen sind in 2.1.2.2 aufgeführt. Aus Erfahrungswerten und Vorversuchen ohne integriertem Ultraschallsystem wurde der folgende, in Tabelle 7 aufgeführte, initiale Parametersatz entwickelt.

Tabelle 7: Initialer Parametersatz für das LDA mit Ultraschall

|                              |             |                     |          |
|------------------------------|-------------|---------------------|----------|
| Laserleistung                | 600 W       | Lasereinlaufstrecke | 0,2 mm   |
| Vorschubgeschwindigkeit      | 450 mm/min  | Laserauslaufstrecke | 1 mm     |
| Drahtvorschubgeschwindigkeit | 580 mm/min  | Schutzgasstrom      | 25 l/min |
| Streckenmasse                | 0,0094 g/mm | Defokussierung      | 2 mm     |
| Streckenenergie              | 1,5 J/mm    | Lagenhöhe           | 0,55 mm  |
| Drahteinlaufstrecke          | 0,35 mm     | Spurbreite          | 2,5 mm   |
| Drahtauslaufstrecke          | 1,5 mm      |                     |          |

Der Start des Auftrags erfolgt fliegend und weggesteuert wie in 2.1.2.1 beschrieben. Zusätzlich wird, um eine möglichst einheitliche Höhe der Spur zu erreichen, ein Bereich definiert, in dem  $v_L$  um einen Prozentsatz reduziert wird. Dieser Bereich wird nachfolgend als Korrekturfeld bezeichnet, die Abmaße dieses Feldes beziehen sich auf seine Ausdehnung in positiver und negativer Auftragsrichtung vom Mittelpunkt der aufgetragenen Geometrie. In Abbildung 27 ist ein solches Korrekturfeld als Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Weges für eine Einzelspur dargestellt.

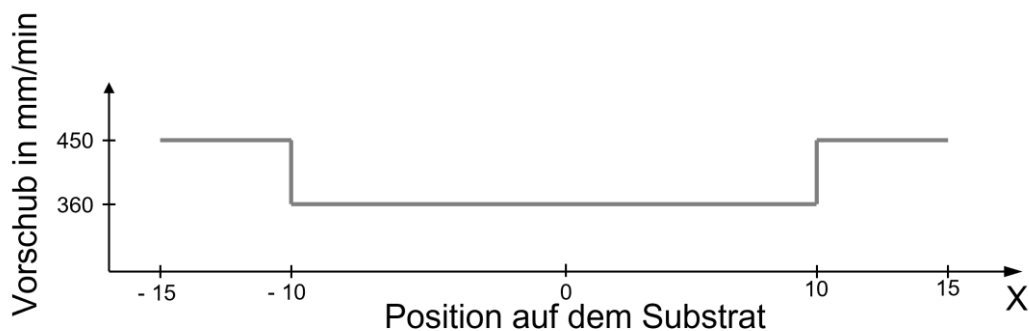
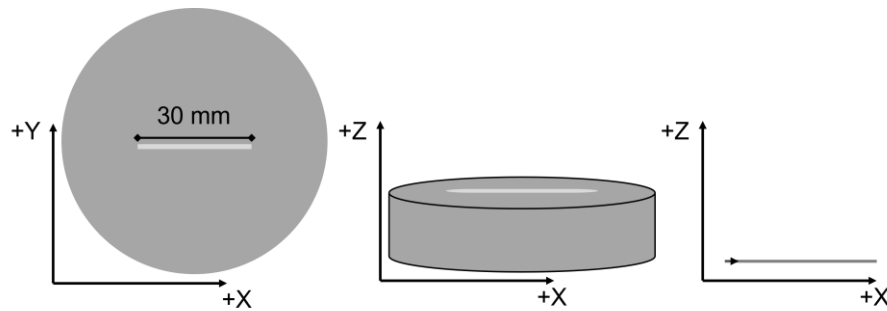


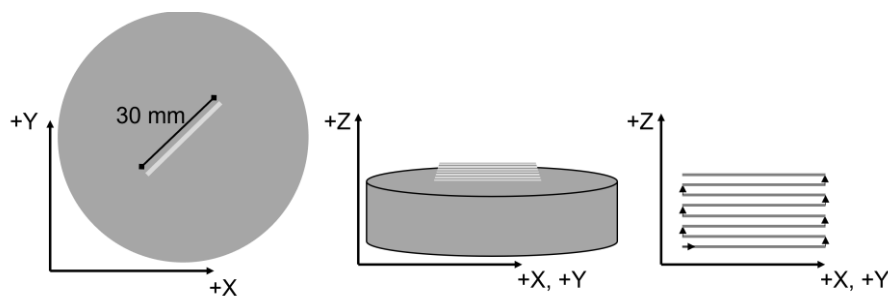
Abbildung 27: Korrekturfeld für eine Einzelspur bei Vernachlässigung der Achsendynamik

Zunächst wird ein Korrekturfeld mit Ausdehnung  $A_{KF} \pm 10$  mm und einer Verlangsamungsrate  $V_{KF}$  von 20 % angewandt. Abbildung 28 zeigt schematisch die Verfahrensstrategie für eine Einzelspur und die Position auf dem Substrat. Die Spurlänge beträgt 30 mm.



**Abbildung 28: Schematische Darstellung der Verfahrenstrategie für eine Einzelspur**

Weitere Einzelspuren können auf demselben Substrat durch Verschieben des Nullpunktes entlang der Y-Achse aufgetragen werden. Für das Auftragen von Wänden werden weitere Anpassungen vorgenommen. Das Auftragen erfolgt im  $45^\circ$ -Winkel zur X- bzw. Y-Achse, um den Einfluss der richtungsabhängigen Achsenbeschleunigung zu reduzieren. Entsprechend muss das Korrekturfeld angepasst werden. Um zu verhindern, dass der Drahteinstich zu früh erfolgt und so der geförderte Draht an der darunterliegenden Spur hängen bleibt, wird jede aufeinanderfolgende gegenüber der vorangegangenen Lage um 0,2 mm verkürzt. Die resultierende Geometrie ist trapezförmig. Abbildung 29 zeigt schematisch die Verfahrenstrategie für eine Wand und die Position auf dem Substrat. Die Spurlänge der untersten Einzelspur beträgt 30 mm. Der Auftragsbeginn aufeinanderfolgender Lagen startet jeweils auf der gegenüberliegenden Seite.



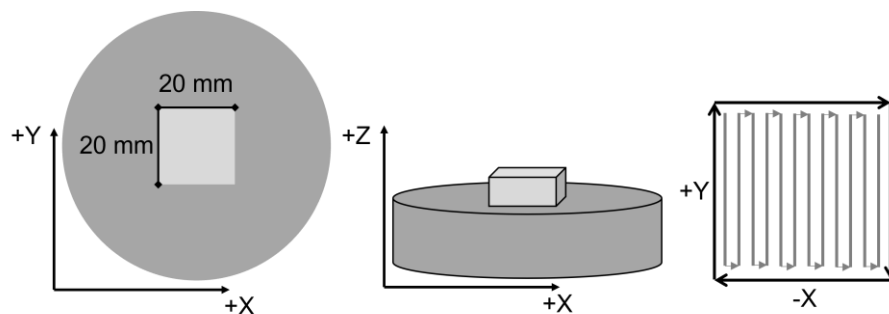
**Abbildung 29: Schematische Darstellung der Verfahrenstrategie für Wände**

Weitere Wände können auf demselben Substrat durch betragsgleiches Verschieben des Nullpunktes in negativer X-Richtung und positiver Y-Richtung, bzw. in positiver X-Richtung und negativer Y-Richtung aufgetragen werden.

Ab der zweiten Lage erfolgt die Wärmeableitung in das Substrat über die darunterliegenden Lagen. Die dafür zur Verfügung stehende Querschnittsfläche ist deutlich kleiner als beim Auftrag direkt auf dem Substrat. Mit jeder weiteren Lage muss die Wärme über eine größere Strecke durch den kleineren Querschnitt transportiert werden. Zusätzlich zur im aufgetragenen Volumen befindlichen Restwärme steigt die Temperatur des gesamten

Substrates, was die Wärmeleitung aus der Prozesszone weiter einschränkt. Um diesen Effekt zu kompensieren, wird die Laserleistung in Abhängigkeit der Lagenhöhe reduziert werden. Ab der zweiten Lage wird  $P_L$  um 50 W auf 550 W reduziert, ab der fünften Lage um weitere 50 W auf 500 W.

Das Auftragen von Quadern erfordert weitere Anpassungen. Diese werden mit aus Wand- und Einzelspurversuchen gewonnen Erkenntnissen vorgenommen. Die geplante Geometrie ist ein Quader mit einer quadratischen Grundfläche von 20 x 20 mm. Das Auftragen einer Lage erfolgt durch mäanderndes Verfahren ohne Absetzen, gefolgt vom Abfahren der Kontur. Abbildung 30 zeigt schematisch die Verfahrensstrategie für einen Quader sowie die Position auf dem Substrat. Das Korrekturfeld muss angepasst werden, um zwei Achsen zu berücksichtigen.



**Abbildung 30: Schematische Darstellung der Verfahrensstrategie für Quader**

Durch die relativ zu Einzelspuren und Wänden große Masseänderung des Schwingssystems durch das Auftragen von Quadern wird davon ausgegangen, dass nur ein Quader pro Substrat generiert werden kann.

Zunächst wird ein „Amplitudenspektrum“ in Form von Einzelspuren erstellt werden, bei dem alle Parameter außer der vorgegebenen Ultraschallamplitude konstant bleiben. Daraus werden Informationen über den Einfluss der Amplitude und Spurposition im Schallfeld auf die Spurgeometrie gewonnen. Zusätzlich wird der Einfluss von Materialauftrag auf die Resonanzfrequenz quantifiziert werden.

Nachfolgend wird der Ultraschalleinfluss auf die Prozessstabilität anhand von Wänden untersucht und minimiert werden. Der Ultraschalleinfluss auf die Mikrostruktur wird an unterschiedlichen Positionen innerhalb der Wände analysiert werden und die mindestens notwendige Amplitude für eine nachweisbare Kornfeinung gefunden werden. Bei einem stabilen Prozess mit aktivem Ultraschall und der korrekten Amplitude können Quader für weitere Untersuchungen generiert werden.

## 5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Prozessparameter, Verfahrenstrategien und Abmaße sind nur vorläufig und werden im Lauf der Versuche nach Bedarf und mit Hinblick auf gewonnene Erkenntnisse angepasst. Eine Änderung der Hauptprozessparameter ist der bevorzugte Ansatz, da sich diese schnell im Programm anpassen lassen. Die Änderung der Verfahrenstrategie ist mit vergleichsweise größerem Programmieraufwand verbunden.

### 5.1 AMPLITUDENSPEKTRUM ANHAND VON EINZELSPUREN

Das Generieren des Amplitudenspektrum für Einzelspuren erfolgte mit der in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Verfahrenstrategie und den in Tabelle 7 gelisteten und für Einzelspuren relevanten Parametern. Vor dem Auftragen der ersten Einzelspur wurde die Resonanzfrequenz des Schwingensystems mit dem Suchlauf des Ultraschallgenerators ermittelt. Dieser Vorgang wurde jeweils nach dem Auftragen einer Einzelspur wiederholt. Die aktive Beschallung wurde jeweils nur kurz vor Beginn des Auftrags eingeschaltet und nach dem Generieren der Einzelspur abgeschaltet.

#### 5.1.1 Durchführung und makroskopische Auswertung

Abbildung 32 zeigt die generierten Einzelspuren mit der dazugehörigen Ultraschallamplitude sowie die Reihenfolge, in der die Einzelspuren generiert wurden. Da für eine Amplitude von 3  $\mu\text{m}$  zunächst keine Resonanz hergestellt werden konnte, wurde nach der Referenzspur mit einer 6  $\mu\text{m}$  Amplitude begonnen. Nach dem Auftragen der Einzelspur mit 24  $\mu\text{m}$ -Amplitude war das Betreiben des Ultraschallsystems mit einer 3  $\mu\text{m}$ -Amplitude durch die Änderung in der Resonanzfrequenz des Schwingensystems möglich und die entsprechende Einzelspur wurde generiert. Abbildung 31 erklärt an einem Beispiel die Bezeichnung der generierten Einzelspuren.

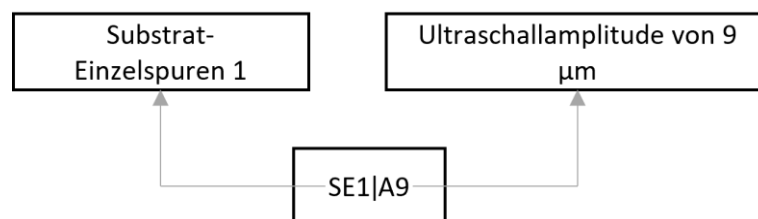
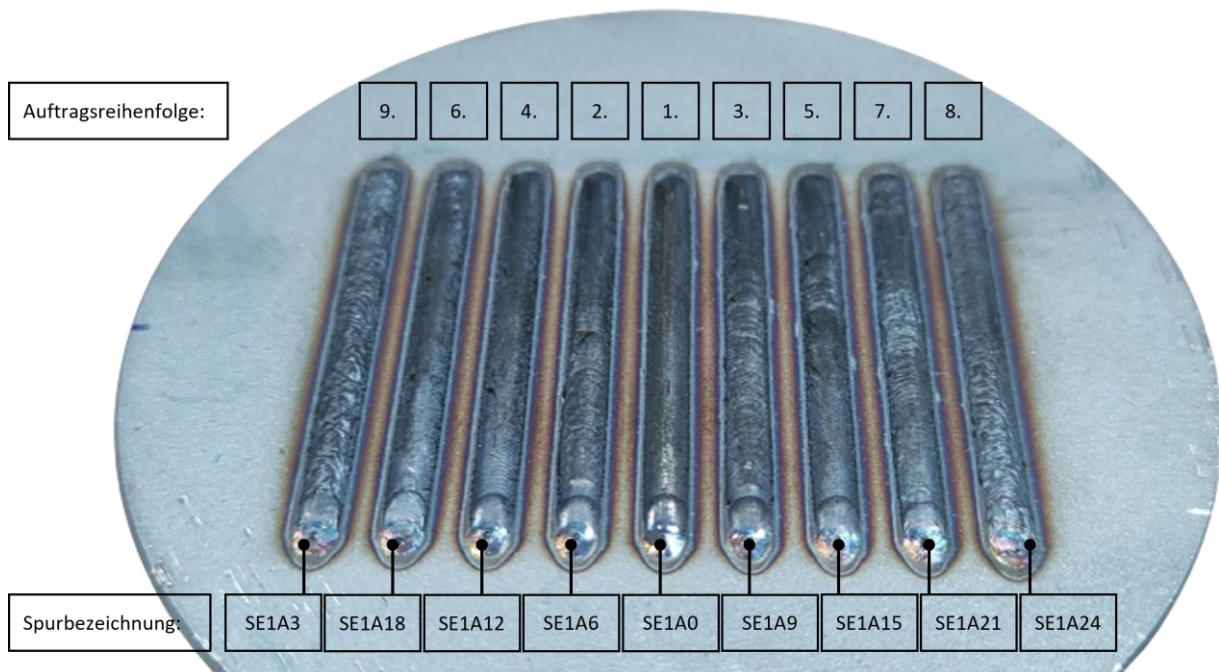
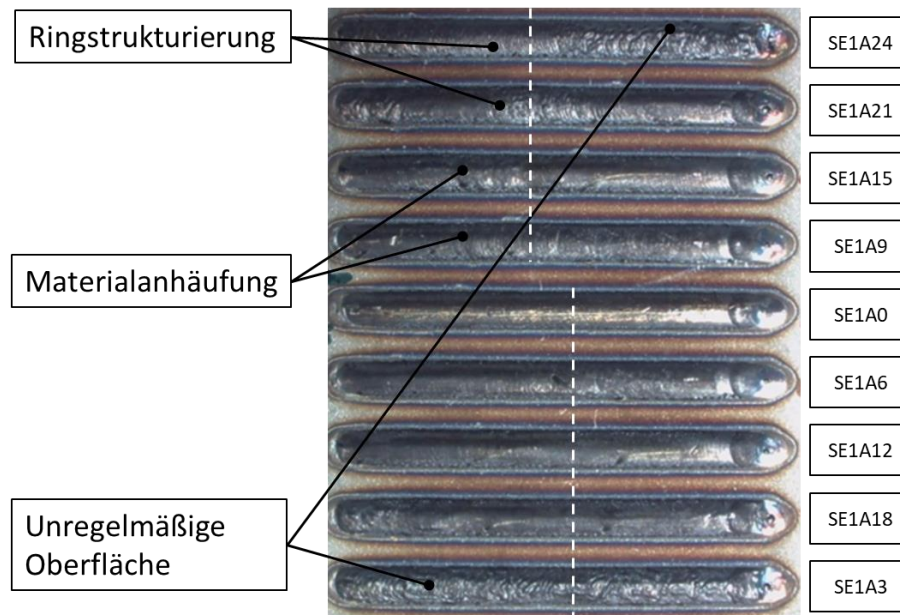


Abbildung 31: Bezeichnung generierter Strukturen am Beispiel SE1A9



**Abbildung 32: Übersichtsdarstellung des Amplitudenspektrums aus Einzelspuren von 0 bis 24 µm mit Reihenfolge des Auftrags auf Substrat E1**

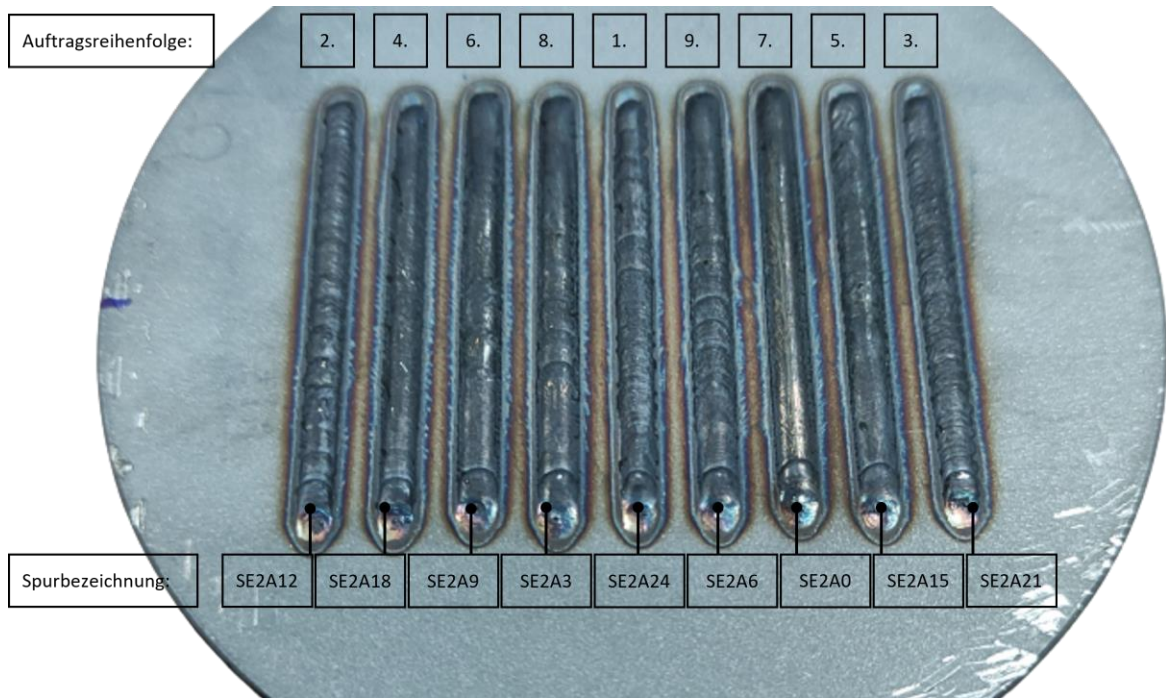
Ein Einfluss der Beschallung auf die Einzelspurgeometrie ist in Abbildung 32 mit bloßem Auge gut zu erkennen. Die als erste und ohne Ultraschall aufgetragene Spur SE1A0 in der Substratmitte dient als Referenz. Sie weist keine Auffälligkeiten in Form oder Oberflächenbeschaffenheit auf, mit Ausnahme der prozessbedingten Materialanhäufung am Spurende. Alle Spuren mit aktivem Ultraschall zeigen dagegen unterschiedlich stark ausgeprägte Unregelmäßigkeiten sowie eine deutlich erkennbare ringförmige Oberflächenstrukturierung. Diese wird teilweise von Bereichen mit stärker beeinflusster Oberfläche unterbrochen. Abbildung 33 zeigt eine Draufsicht von Substrat E1, in der beispielhaft einige Merkmale der von Ultraschall beeinflussten Einzelspuren gekennzeichnet sind.



**Abbildung 33:** Draufsicht auf Substrat E1 mit Kennzeichnung auffälliger Merkmale. Die weiße, gestrichelte Linie zeigt den Schnitt für die nachfolgende metallografische Untersuchung.

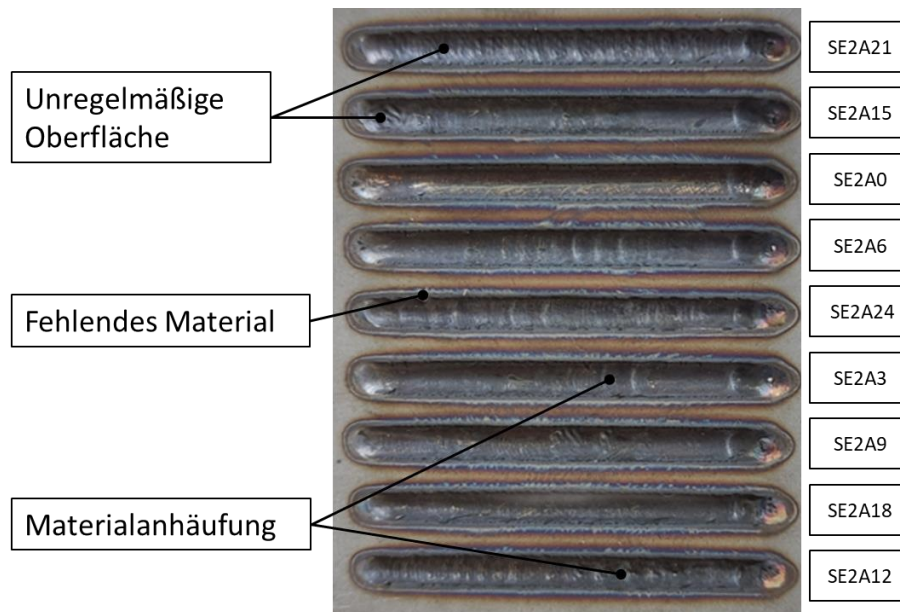
Die Einzelspuren SE1A6, SE1A9, SE1A12, SE1A15 und SE1A18 zeigen mit steigender Ultraschallamplitude eine Tendenz zu stärker ausgeprägter Ringstrukturierung und größerer Häufigkeit von Bereichen mit unregelmäßiger Materialverteilung. SE1A21 weist deutlich mehr dieser Unregelmäßigkeiten auf, als der bisherige Trend erwarten lassen würde. SE1A24 lässt sich in zwei Bereiche einteilen. Der Auftragsstartbereich wird von einer ausgeprägten, aber weitgehend regelmäßigen Ringstrukturierung geprägt. Der zweite Teil der Spur zeigt eine stark unregelmäßige Oberfläche ohne deutliches Muster. Diese Beeinflussung der Oberfläche ist für die gesamte Spur SE1A3 deutlich erkennbar. Diese Beobachtung steht im Widerspruch, zu dem für die kleinste Amplitude erwarteten Ergebnis. Es muss also zusätzlich zur Amplitude weitere Faktoren geben, die den Ultraschalleinfluss auf den Prozess bestimmen. Die wahrscheinlichste Ursache ist die Position der Spur im Schallfeld. Ebenfalls ist ein Einfluss der Resonanzfrequenz oder Einschränkungen der Funktionalität des Ultraschallsystems bei minimaler Amplitude möglich.

Um den Einfluss der Position im Schallfeld besser zu verstehen und die bisher beobachteten Tendenzen zu bestätigen oder zu widerlegen, wurde ein zweites Amplitudenspektrum aus Einzelspuren auf einem neuen Substrat erstellt. Abbildung 34 zeigt die angepasste Reihenfolge, in der die Spuren aufgetragen wurden, und die zur jeweiligen Position gehörende Amplitude.



**Abbildung 34:** Übersichtsdarstellung des Amplitudenspektrums aus Einzelspuren von 0 bis 24 µm mit Reihenfolge des Auftrags auf Substrat E2

Die Spur SE2A24, auf diesem Substrat in der Mitte und als erstes aufgetragen, zeigt eine unregelmäßige Materialverteilung. SE2A12 weist trotz der 50 % kleineren Amplitude einen ähnlichen Grad an Unregelmäßigkeit auf. Vergleicht man SE1A12, ist ein deutlicher Unterschied in der Spurqualität erkennbar, besonders in Form von Materialanhäufungen. SE2A21 zeigt die am stärksten ausgeprägte Beeinflussung der Oberfläche und Spurgeometrie. SE2A3 ist deutlich regelmäßiger als SE1A3, weist aber teilweise Materialanhäufungen auf. Abbildung 35 zeigt eine Draufsicht von Substrat E2 sowie vorangegangene beschriebene Merkmale an ausgewählten Beispielen. Auffällig ist die weitgehende Abwesenheit der auf Substrat E1 so deutlich sichtbaren Ringstrukturierung.



**Abbildung 35: Draufsicht auf Substrat E2 mit Kennzeichnung auffälliger Merkmale**

Aus dem Vergleich der Ergebnisse von Substrat E1 und Substrat E2 geht hervor, dass die Position im Schallfeld sich deutlich auf das Schweißergebnis auswirkt. Der Effekt verstärkt sich mit dem Abstand von der Substratmitte. Die äußersten Spuren werden stärker durch ihre Position als von der anliegenden Amplitude beeinflusst. Dieser Effekt ist besonders deutlich für SE1A3 und SE2A3 zu erkennen. Amplituden über 18  $\mu\text{m}$  wirken sich, unabhängig von der Position, negativ auf die Spurqualität aus. Die makroskopisch besten Ergebnisse werden mit Amplituden zwischen 6  $\mu\text{m}$  und 18  $\mu\text{m}$  erzielt. Ein Kreis mit einem Radius von ca. 15 mm um die Substratmitte stellt das bevorzugte Auftragsgebiet dar.

### 5.1.2 Resonanzfrequenzverlauf

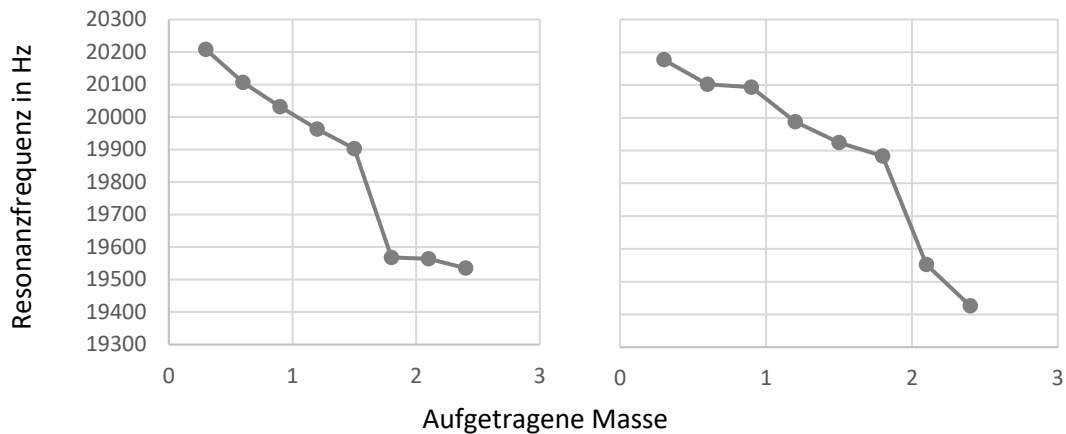
Die Entwicklung der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Anzahl der Einzelspuren und somit der aufgetragenen Masse ist in Tabelle 8 für Substrat E1 und für Substrat E2 in Tabelle 9 aufgeführt. In Abbildung 36 ist die Entwicklung der Resonanzfrequenz grafisch dargestellt.

Tabelle 8: Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der aufgetragenen Einzelspuren für Substrat E1

| Anzahl der Einzelspu-<br>ren | Aufgetragene<br>Masse | Resonanzfrequenz<br>$f_R$ | Resonanzdifferenz<br>$\Delta f_R$ |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 0                            | 0,3 g                 | 20208 Hz                  | –                                 |
| 1                            | 0,6 g                 | 20106 Hz                  | 102 Hz                            |
| 2                            | 0,9 g                 | 20032 Hz                  | 74 Hz                             |
| 3                            | 1,2 g                 | 19963 Hz                  | 69 Hz                             |
| 4                            | 1,5 g                 | 19903 Hz                  | 60 Hz                             |
| 5                            | 1,8 g                 | 19568 Hz                  | 335 Hz                            |
| 6                            | 2,1 g                 | 19564 Hz                  | 4 Hz                              |
| 7                            | 2,4 g                 | 19535 Hz                  | 29 Hz                             |

Tabelle 9: Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der aufgetragenen Einzelspuren für Substrat E2

| Anzahl der Einzelspu-<br>ren | Aufgetragene<br>Masse | Resonanzfrequenz<br>$f_R$ | Resonanzdifferenz<br>$\Delta f_R$ |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 0                            | 0,3 g                 | 20177 Hz                  | –                                 |
| 1                            | 0,6 g                 | 20102 Hz                  | 75 Hz                             |
| 2                            | 0,9 g                 | 20093 Hz                  | 9 Hz                              |
| 3                            | 1,2 g                 | 19988 Hz                  | 105 Hz                            |
| 4                            | 1,5 g                 | 19924 Hz                  | 64 Hz                             |
| 5                            | 1,8 g                 | 19883 Hz                  | 41 Hz                             |
| 6                            | 2,1 g                 | 19552 Hz                  | 331 Hz                            |
| 7                            | 2,4 g                 | 19426 Hz                  | 126 Hz                            |



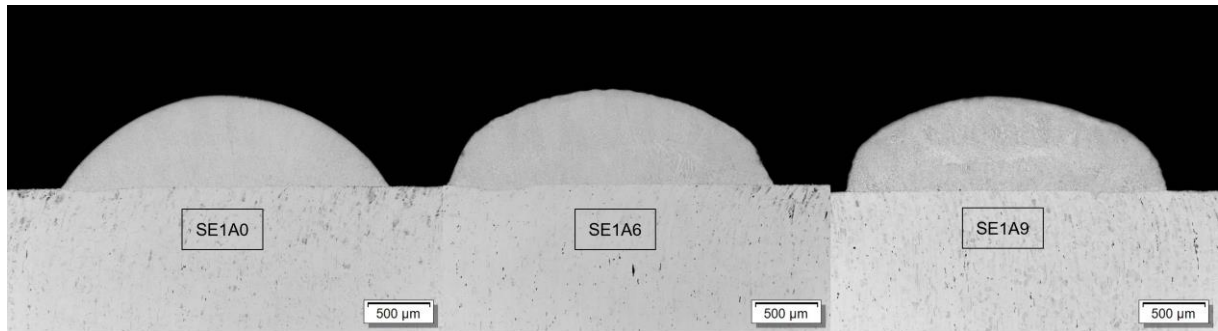
**Abbildung 36: Resonanzfrequenz über aufgetragene Masse für Substrat E1 (links) und Substrat E2 (rechts)**

Es muss angemerkt werden, dass der Resonanzsuchlauf des Ultraschallgenerators keine reproduzierbaren Ergebnisse liefert. Die wiederholte Resonanzsuche für ein identisches und unverändertes Substrat liefert abweichende Werte für die ermittelte Resonanzfrequenz. Trotz dieses Vorbehaltes zeigen beide Substrate zunächst einen in grober Näherung linearen Abfall der Resonanzfrequenz, wie in Abbildung 36 zu sehen ist. In diesem Bereich sinkt die Resonanzfrequenz um ca. 222 Hz/g. Auf diesen linearen Abschnitt folgt ein spontanes Absinken der Resonanzfrequenz um 335 bzw. 331 W. Für Substrat E1 findet diese Änderung nach 5 aufgetragenen Spuren und für Substrat E2 nach 6 aufgetragenen Spuren statt. Die spontane Änderung der Resonanzfrequenz findet somit zwischen 1,5 und 2,1 g aufgetragener Masse statt. Eine mögliche Erklärung für den Unterschied zwischen Substrat E1 und E2 ist die Reihenfolge des Auftrags. Für die Änderung der Resonanzfrequenz ist nicht nur die aufgetragene Masse entscheidend, sondern auch die Verteilung dieser Masse. Für den Bereich nach dem spontanen Absinken existieren nicht genügend Datenpunkte, um eine Aussage über das Verhalten treffen zu können.

Bei der Betrachtung mit bloßem Auge lässt sich kein Einfluss der Resonanzfrequenz auf das Schweißergebnis erkennen. Die Ursache des spontanen Absinkens der Resonanzfrequenz lässt sich ohne Wissen über die genaue Funktionsweise des Resonanzsuchlaufs nicht identifizieren. Das Auftragen von 2,4 g Material in Form von Einzelspuren senkt die Resonanzfrequenz des Schwingensystems um 673 bzw. 751 Hz. Da der Frequenzbereich des Ultraschallprozessors nur von 19 kHz bis 21 kHz ausgelegt ist, lässt sich die maximal auftragbare Masse unter optimalen Startbedingungen von 21 kHz Resonanzfrequenz auf ca. 9 g bestimmen.

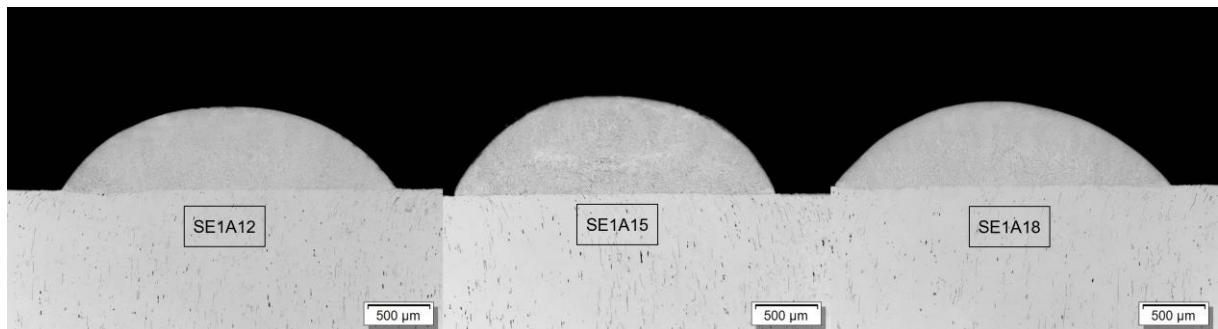
### 5.1.3 Mikroskopische Auswertung

Die in Abbildung 37, Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellten Aufnahmen wurden durch die Gruppe Werkstoffcharakterisierung und -prüfung an einem OLYMPUS GX51 metallurgischen Mikroskop aufgenommen. Die Höhe und Breite der Einzelspuren wurde mit der Bildverarbeitungssoftware Software ImageJ vermessen und der Nahtformkoeffizient berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 zusammengefasst.



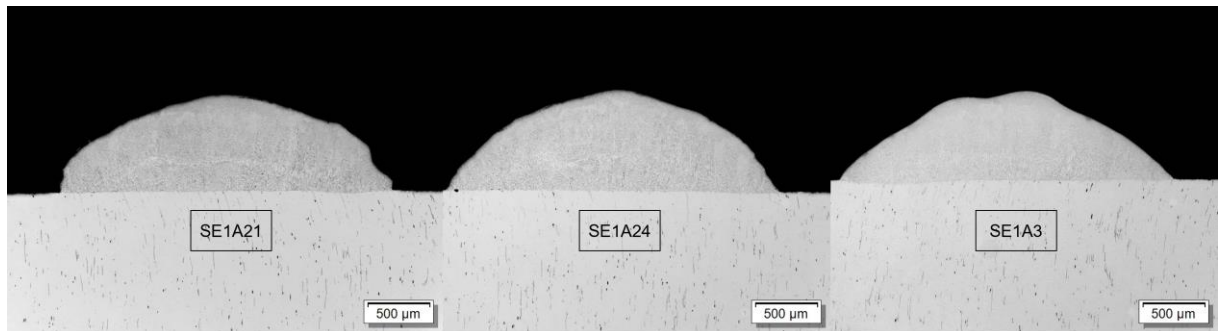
**Abbildung 37: Mikroskopisches Schliffbild von SE1A0, SE1A6 und SE1A9**

Die Spur SE1A0 zeigt eine reguläre Spurgeometrie, der Nahtformkoeffizient beträgt 3,61. Für SE1A6 und SE1A9 sind steilere Nahtflanken erkennbar, bevor diese in eine reguläre, gerundete Form im oberen Bereich der Naht übergehen. Die Nahtformkoeffizienten sind mit 3,46 bzw. 3,44 etwas niedriger. An der rechten Flanke von SE1A9 ist eine Materialanhäufung zu erkennen. Vergleicht man Abbildung 33 unter Berücksichtigung der Schnittlage, ist diese Materialanhäufung auch mit bloßem Auge erkennbar.



**Abbildung 38: Mikroskopisches Schliffbild von SE1A12, SE1A15 und SE1A18**

Mit 4,19 zeigt SE1A12 den höchsten gemessenen Nahtformkoeffizienten. Die Spur ist ca. 70 µm breiter und ca. 80 µm flacher als die Referenzspur SE1A0. Der Nahtformkoeffizient von SE1A15 ist mit 3,35 deutlich kleiner, bei einer Höhendifferenz von ca. 130 µm zu SE1A12. Die Spur SE1A18 ähnelt in ihrem Erscheinungsbild der SE1A12, der Nahtformkoeffizient ist mit 4,04 ebenfalls ähnlich groß.



**Abbildung 39: Mikroskopisches Schliffbild von SE1A21, SE1A24 und SE1A3**

An der rechten Flanke von SE1A21 ist eine Materialanhäufung zu erkennen; mit einem Bereich, in dem Material fehlt, direkt darunter. Die linke Flanke fällt im unteren Teil der Spur steil ab. Vergleicht man dies z. B. mit SE1A12, wird deutlich, dass die Oberfläche von SE1A21 unregelmäßig ist und eine höhere Rauigkeit aufweist. Das Gleiche ist für SE1A24 erkennbar, auch wenn an der Schnittposition keine ausgeprägten Materialanhäufungen zu sehen sind. Allerdings liegt die Schnittposition in dem durch Ringstrukturierung dominierten Bereich der Spur, wie in Abbildung 33 zu sehen ist. SE1A3 erscheint im Schliffbild zwar mit einer glatten Oberfläche, die Querschnittsform der Spur weicht jedoch deutlich von der Referenzspur SW1A0 ab.

Da SW1A18 bei einer deutlich höheren Amplitude keine steilen Flanken aufweist, können diese bei der SW1A6 und SW1A9 nicht mit der anliegenden Ultraschallamplitude erklärt werden. Beide Spuren teilen sich jedoch den betragsmäßig gleichen Abstand zur Substratmitte und ihre Position relativ zur Referenzspur. Die Ursache für die Veränderung in der Spurgeometrie liegt somit wahrscheinlich in der Position im Schallfeld. Die starke Abweichung von SW1A15, verglichen mit SW1A12  $\mu\text{m}$  oder SW1A18, kann mit der Anwesenheit einer Materialanhäufung nahe der Schnittposition erklärt werden, wie in Abbildung 33 gekennzeichnet. Geht man von einem homogenen Schallfeld aus, muss das Erscheinungsbild von SW1A21 auf die Ultraschallamplitude zurückzuführen sein. SW1A18 an der gleichen relativen Substratposition ist deutlich regelmäßiger und zeigt keine vergleichbaren Materialanhäufungen. Für die Spur SW1A24 ist durch die Kombination aus hoher Amplitude und der äußeren Position auf dem Substrat eine unregelmäßige Oberfläche zu erwarten. Die Unterteilung der Spur in zwei Bereiche ist schwer zu erklären. Es muss davon ausgegangen werden, dass mit zunehmender Auftragsmasse die Homogenität des Schallfeldes nicht mehr gegeben ist und diese Schallfeldinhomogenität sich maßgeblich auf die Prozessstabilität auswirkt. Bestärkt wird diese These durch das Erscheinungsbild von SW1A3. SW1A12 auf Substrat E2 nimmt die gleiche relative Position auf dem Substrat ein, ist jedoch zumindest makroskopisch deutlich weniger unregelmäßig. Neben der Amplitude unterscheiden sich die Spuren nur im Substratzustand während des Auftrags.

Tabelle 10: Spurhöhe, Spurbreite und Nahtformkoeffizient in Abhängigkeit der Amplitude auf Substrat E1

| Amplitude        | Spurhöhe          | Spurbreite         | Nahtformkoeffizient |
|------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| 0 $\mu\text{m}$  | 728 $\mu\text{m}$ | 2630 $\mu\text{m}$ | 3,61                |
| 6 $\mu\text{m}$  | 763 $\mu\text{m}$ | 2638 $\mu\text{m}$ | 3,46                |
| 9 $\mu\text{m}$  | 748 $\mu\text{m}$ | 2575 $\mu\text{m}$ | 3,44                |
| 12 $\mu\text{m}$ | 645 $\mu\text{m}$ | 2703 $\mu\text{m}$ | 4,19                |
| 15 $\mu\text{m}$ | 775 $\mu\text{m}$ | 2593 $\mu\text{m}$ | 3,35                |
| 18 $\mu\text{m}$ | 670 $\mu\text{m}$ | 2708 $\mu\text{m}$ | 4,04                |
| 21 $\mu\text{m}$ | 768 $\mu\text{m}$ | 2668 $\mu\text{m}$ | 3,47                |
| 24 $\mu\text{m}$ | 813 $\mu\text{m}$ | 2663 $\mu\text{m}$ | 3,28                |
| 3 $\mu\text{m}$  | 713 $\mu\text{m}$ | 2680 $\mu\text{m}$ | 3,76                |

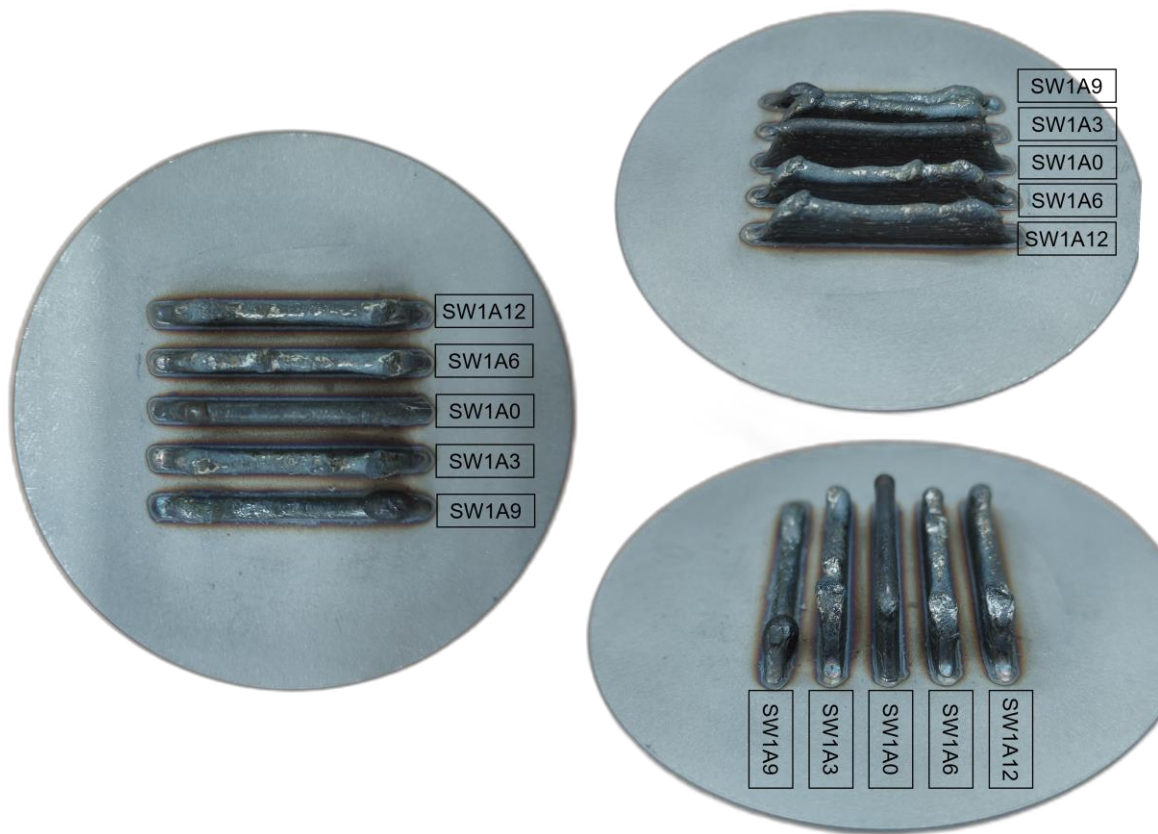
Die generierten Amplitudenspektren anhand von Einzelspuren zeigen, dass das Auftragen mit einer Ultraschallamplitude eine makroskopisch sichtbare Beeinflussung des Schweißergebnisses zur Folge hat. Dieser Einfluss wird tendenziell mit zunehmender Amplitude größer. Gleichzeitig hat die Position einer aufgetragenen Struktur im Schallfeld einen maßgeblichen Einfluss auf das Schweißergebnis und die Prozessstabilität. Mit zunehmender aufgetragener Masse sinkt die Resonanzfrequenz des Schwingensystems deutlich. Die Änderung der Masse und der Geometrie des Schwingensystems resultieren in einer Inhomogenität des Schallfeldes, die sich negativ auf die Prozessstabilität auswirken kann.

## 5.2 AMPLITUDENSPEKTRUM ANHAND VON WÄNDEN

Die Wände für das Amplitudenspektrum wurden mit den in Tabelle 7 aufgeführten Parametern und mit der in Abbildung 29 gezeigten Verfahrenstrategie generiert. Neben der Ultraschallamplitude wurde teilweise das Korrekturfeld mit der Zielstellung, die Prozessstabilität zu verbessern, angepasst.

### 5.2.1 Durchführung und makroskopische Auswertung

Abbildung 40 zeigt das Substrat W1 aus unterschiedlichen Ansichten. Die Bezeichnung der Wände erfolgt nach dem in Abbildung 31 dargestellten System.

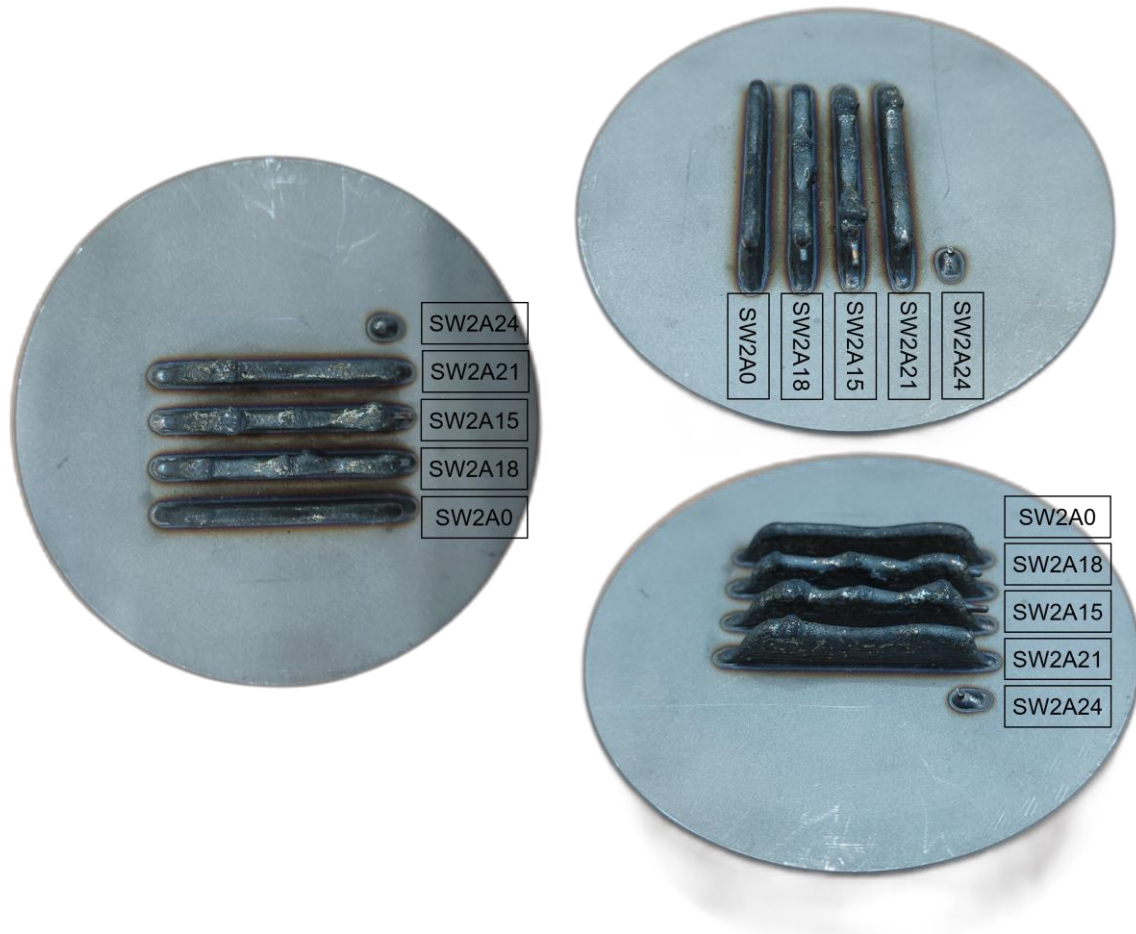


**Abbildung 40: Substrat W1 mit Amplituden von 3 µm bis 12 µm und Referenzwand aus verschiedenen Ansichten**

Für die Referenzwand wurden 13 Lagen aufgetragen, bevor der Prozess manuell unterbrochen wurde. Für die nachfolgenden Wände wurde das Auftragen von zehn Lagen angestrebt. SW1A0 konnte bis zur Zielhöhe generiert werden. In der achten Lage erfolgte ein Resonanzverlust des Schwingensystems und die Beschallung konnte erst nach erneuter Resonanzsuche in Lage neun weitergeführt werden. SW1A6 konnte ebenfalls bis Lage zehn aufgebaut werden – mit erneutem Resonanzverlust in der achten Lage. Für Wand SW1A9 wurde  $V_{KF}$  des Korrekturfeldes auf 22 % erhöht. In der vierten Lage trat Balling auf und der Prozess musste unterbrochen werden. Die resultierende Oberfläche war zu unregelmäßig, um den Auftrag fortzusetzen.  $V_{KF}$  des Korrekturfeldes wurde für SW1A12 weiter erhöht auf 25 %, die Zielhöhe von 10 Lagen wurde erreicht. Wie in Abbildung 40 zu erkennen ist, sind für alle mit Ultraschallamplitude generierten Wände starke Abweichungen im Vergleich zur Referenzwand vorhanden. Der Auftrag erfolgt unregelmäßig, was zu Schwankungen in der Höhe der generierten Wand über die Auftragslänge führt. Die mit aktiver Beschallung generierten Wände neigen zu Materialanhäufungen am Start und Endpunkt der Einzellagen. Entsprechend fehlt Material im mittleren Abschnitt der Wand. Die Anpassung des Korrekturfeldes konnte das Auftreten dieses Schweißfehlers nicht

unterbinden. Während des Prozesses trat immer wieder kurzzeitiges Balling auf, bevor sich der Prozess stabilisierte. Diese Balling-Ereignisse ohne Prozessabbruch führen zu einer lokalen, inhomogenen Materialverteilung, die den restlichen Prozessverlauf beeinflusst und als Auslöser für weitere Balling-Ereignisse wirken kann.

Substrat W2, auf dem die restlichen Wände für das Amplitudenspektrum generiert wurden, ist in Abbildung 41 abgebildet.



**Abbildung 41: Substrat W2 mit Amplituden von 15 µm bis 24 µm und Referenzwand aus verschiedenen Ansichten**

Für die Wand SW2A15 wurde  $V_{KF}$  des Korrekturfeldes auf 28 % erhöht, die Zielhöhe von 10 Lagen wurde erreicht. Die Anpassung des Korrekturfeldes resultierte in einer zusätzlichen Materialanhäufung in der Mitte der Wand. Folglich wurde SW2A18 mit  $A_{KF} \pm 12$  mm generiert. Die Zielhöhe wurde erreicht, die Anpassung des Korrekturfeldes konnte die unregelmäßige Materialverteilung nicht korrigieren. Das Generieren von Wand SW2A21 erfolgte ohne weitere Anpassung des Korrekturfeldes. Trotzdem ist die bisher charakteristische inhomogene Materialverteilung weniger ausgeprägt. Die einseitige Materialanhäufung entstand durch Balling in Lage 10 kurz vor Prozessende. SW2A24 konnte aufgrund

von Resonanzverlust nicht aufgetragen werden. Ein erneuter Resonanzsuchlauf konnte keine Resonanzfrequenz im Arbeitsbereich des Ultraschallprozessors finden.

Die auf Substrat W2 aufgetragenen Wände zeigen ebenfalls die bereits beobachtete Tendenz zu unregelmäßigem Auftrag und inhomogener Materialverteilung. Es kann jedoch keine prinzipielle Tendenz zu größerer Prozessinstabilität bei höherer Ultraschallamplitude festgestellt werden, wie das Amplitudenspektrum anhand von Einzelspuren vermuten lassen würde. Wie bereits auf Substrat W1 beobachtet gibt es eine Tendenz zu Materialanhäufung an den Start und Endpunkten sowie bei entsprechendem Korrekturfeld eine zusätzliche Materialanhäufung in der Wandmitte. Das Auftreten von Balling-Ereignissen ohne Prozessabbruch folgt keinen erkennbaren Regeln und kann an jedem Punkt im Prozess auftreten. Eine aus einem solchen Ereignis resultierende Materialinhomogenität setzt sich in den darauffolgenden Lagen fort. Die geringste Inhomogenität zeigen SW1A12 und die SW2A21. Ob sich die für diese Wände anliegenden Frequenzen tatsächlich positiv auf die Prozessstabilität auswirken, kann anhand der vorhandenen Daten nicht beurteilt werden.

### 5.2.2 Resonanzfrequenzverlauf

Analog zum Amplitudenspektrum anhand von Einzelspuren wird die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der aufgetragenen Masse betrachtet. Die Daten werden in Tabelle 11 für Substrat W1 und in Tabelle 12 für Substrat W2 aufgeführt. Abbildung 42 stellt den Verlauf der Resonanzfrequenz grafisch dar.

**Tabelle 11: Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der aufgetragenen Masse für Substrat W1**

| Aufgetragene Masse | Resonanzfrequenz<br>$f_R$ | Resonanzdifferenz<br>$\Delta f_R$ |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 0                  | 19692                     | –                                 |
| 3,9                | 19503                     | 189                               |
| 6,9                | 19418                     | 85                                |
| 9,9                | 19292                     | 126                               |
| 10,95              | 19021                     | 271                               |

Tabelle 12: Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der aufgetragenen Masse für Substrat W2

| Aufgetragene Masse | Resonanzfrequenz<br>$f_R$ | Resonanzdifferenz<br>$\Delta f_R$ |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 0                  | 9518                      | –                                 |
| 3                  | 19395                     | 123                               |
| 6                  | 19299                     | 96                                |
| 9                  | 19212                     | 87                                |

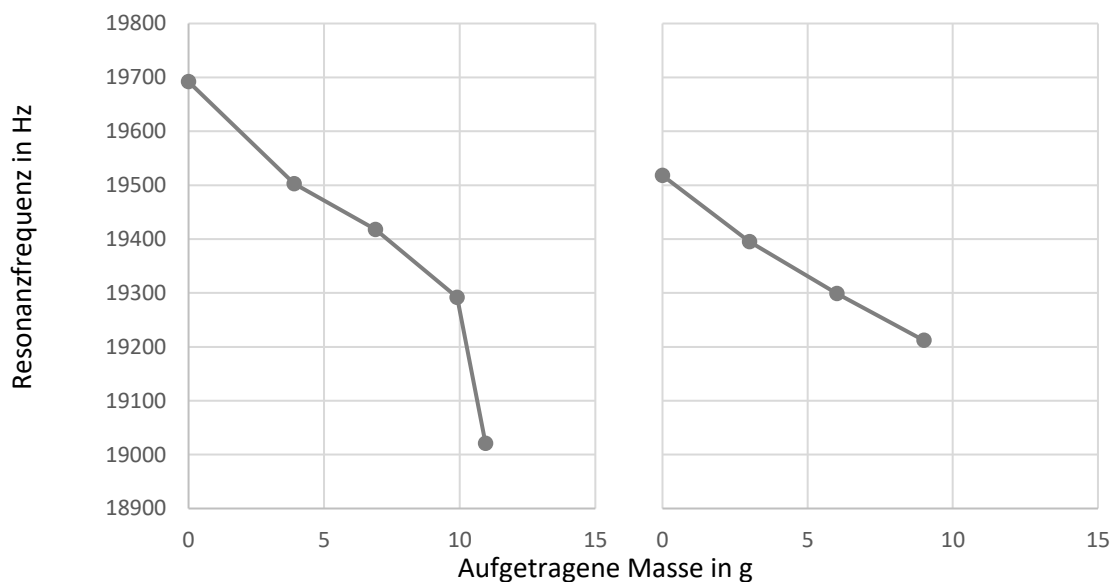


Abbildung 42: Resonanzfrequenz über aufgetragene Masse für Substrat W1 (links) und Substrat W2 (rechts)

Wie auch beim Amplitudenspektrum anhand von Einzelspuren sinkt die Resonanzfrequenz zunächst in grober Näherung linear, gefolgt von einem spontanen Absinken nach dem Auftrag einer bestimmten Masse. Die Absinkrate ist jedoch deutlich langsamer mit ca. 32 Hz/g. Das spontane Absinken tritt ebenso nach einer deutlich höheren Masseänderung auf. Diese Diskrepanz deutet darauf hin, dass die Position der aufgetragenen Masse im Schallfeld einen bestimmenden Einfluss auf die Entwicklung der Resonanzfrequenz hat. Das Auftreten des spontanen Absinkens zwischen 10 und 11 g aufgetragener Masse bei Substrat W1 und der vollständige Resonanzverlust nach 9 g aufgetragener Masse bei Substrat W2 zeigen jedoch erneut, dass die maximal verlässlich auftragbare Masse bei ca. 9 g liegt.

Eine Bauteilgeometrie wie in Abbildung 43 dargestellt, die das Heraustrennen einer Miniaturzugprobe ermöglicht, muss mindestens Kantenlängen von 60 mm x 12 mm aufweisen, um ein sauberes Trennen zu ermöglichen und das epitaktische Gefüge in der Nähe der Substratoberfläche zu vermeiden. Die Strukturdicke ist durch die Spurbreite von ca. 2,5 mm vorgegeben. Abbildung 44 zeigt die Masse einer solchen Struktur verglichen mit der ermittelten maximal auftragbaren Masse.

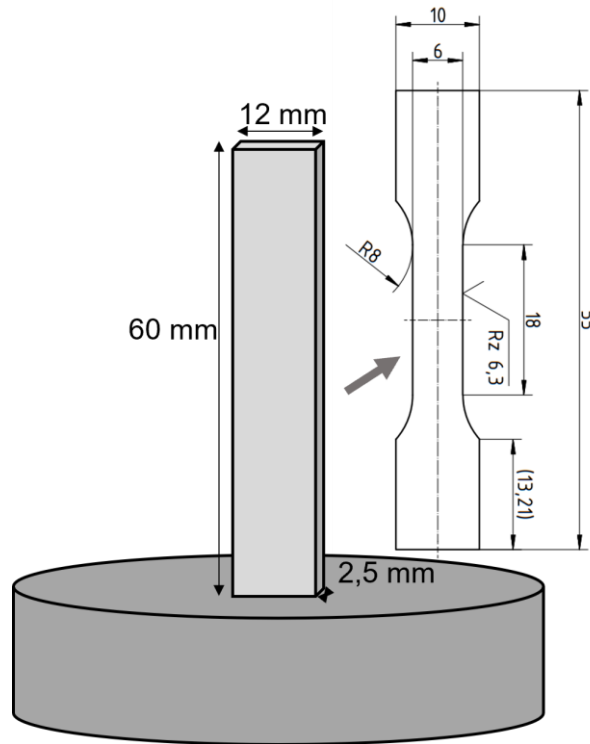


Abbildung 43: Minimale Bauteilgeometrie für das Heraustrennen einer Miniaturzugprobe

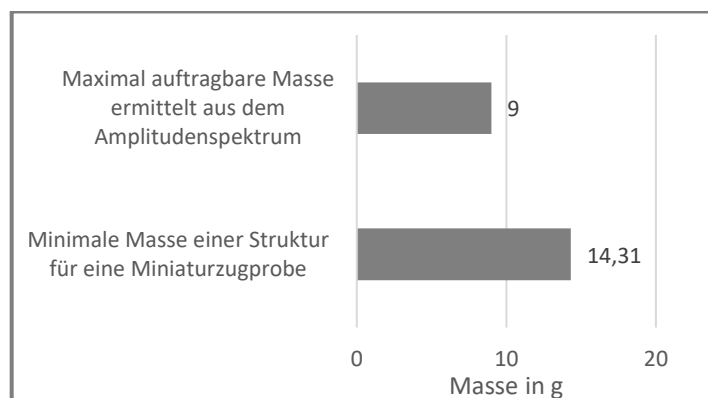


Abbildung 44: Maximal auftragbare Masse verglichen mit minimal notwendiger Masse für eine Miniaturzugprobe

### 5.2.3 Mikroskopische Auswertung

Die Aufnahmen in Abbildung 45, Abbildung 49 und Abbildung 52 wurden von der Gruppe Werkstoffcharakterisierung und -prüfung erstellt. Die Übersichtsaufnahmen wurden mit einem OLYMPUS GX51 metallurgischen Lichtmikroskop aufgenommen, die Detailaufnahmen mit einem JEOL JSM-7800F Raster-Elektronenmikroskop (REM). Das Erstellen von Detailaufnahmen erfolgte für Wände SW1A0, SW1A12 und SW2A21. Dabei wurden für jede Wand mehrere interessante Gefügebereiche untersucht. Der erste Bereich (GB0) ist das Interface zwischen Substrat und aufgetragenem Material. Der zweite (GB3) und der dritte Bereich (GB5) sind Gebiete 3 mm bzw. 5 mm oberhalb der Substratoberfläche in der Mitte der generierten Struktur. Alle an den Aufnahmen durchgeführten Messungen wurden mit der Bildverarbeitungssoftware ImageJ durchgeführt. Übersichtsaufnahmen von Wänden, die in diesem Abschnitt nicht ausgewertet werden, finden sich in Anhang 2 und Anhang 3.

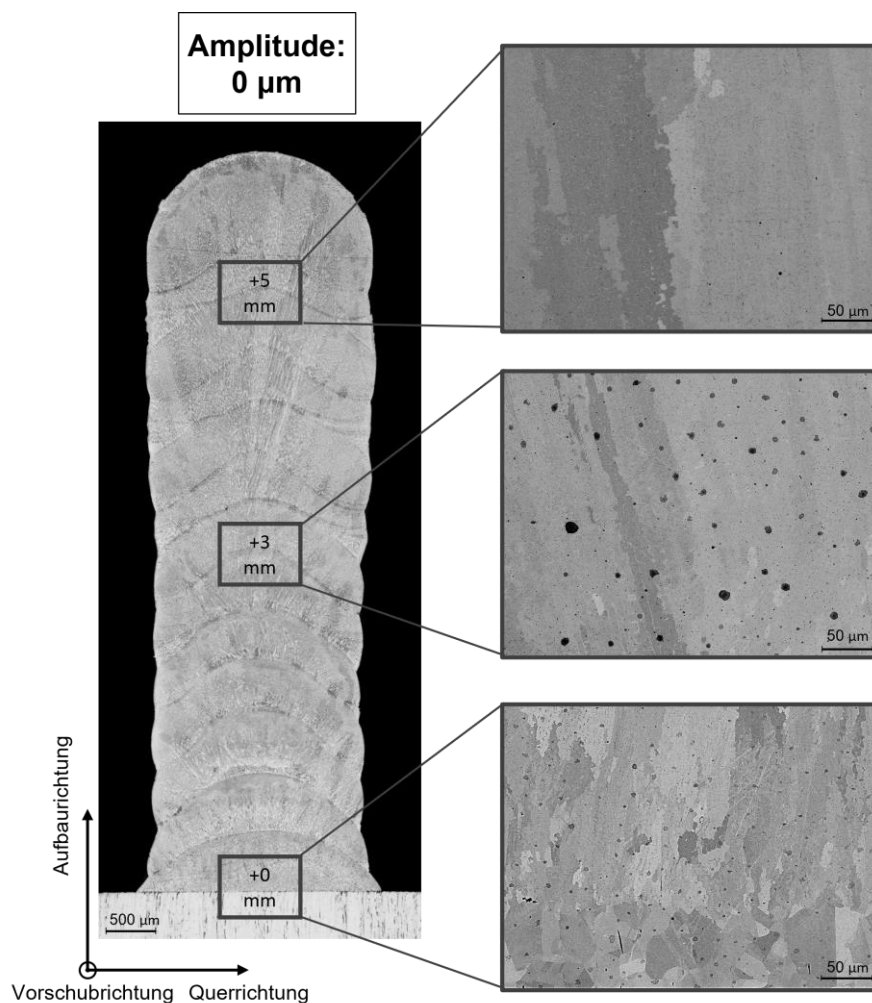


Abbildung 45: Lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme (links) der ohne Amplitude generierten Wand SW1A0 und Detailaufnahmen (rechts) interessanter Bereiche mit REM

Da es sich bei SW1A0 um die Referenzwand ohne aktive Beschallung handelt, wird keine starke Abweichung der Wandgeometrie erwartet. Die Mikrostruktur sollte wie in 2.1.2.4 beschrieben ausgeprägt sein.

Zunächst wird die Übersichtsaufnahme betrachtet. Wie erwartet entspricht die Geometrie der Wand der Zielgeometrie mit kleineren prozessbedingten Unregelmäßigkeiten. Die Einzellagen sind gut erkenn- und unterscheidbar. Die Materialverteilung erscheint leicht inhomogen mit einer Materialanhäufung auf der in Abbildung 45 rechten Wandseite. Teilt man den Querschnitt der Wand in zwei Hälften ausgehend von der Mitte der ersten Lage, ist die Fläche auf der linken Seite mit  $8,514 \text{ mm}^2$  kleiner als die auf der rechten Seite mit  $8,551 \text{ mm}^2$ . Dieser Unterschied ist wahrscheinlich auf die Drahtkrümmung zurückzuführen, die aus der Lagerung auf einer Spule resultiert. In Tabelle 13 sind die Abmaße und Nahtformkoeffizienten für ausgewählte Einzellagen aufgeführt. Die Einzelspurbreite und Einzelspurbhöhe schwanken mit steigender Lage, der Nahtformkoeffizient steigt nach Lage zwei kontinuierlich an.

In der oberen Hälfte lassen sich zwei Körner auf der Übersichtsaufnahme, mit einer Länge in Aufbaurichtung im Millimeterbereich und einer Ausdehnung über mehrere Lagen hinweg erkennen.

**Tabelle 13: Abmaße und Nahtformkoeffizient für ausgewählte Einzellagen von SW1A0**

| Lage | Einzelspurbreite in $\mu\text{m}$ | Einzelspurbhöhe in $\mu\text{m}$ | Nahtformkoeffizient |
|------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 1.   | 2562                              | 634                              | 4,04                |
| 2.   | 2312                              | 592                              | 3,91                |
| 5.   | 2132                              | 507                              | 4,21                |
| 10.  | 2331                              | 534                              | 4,37                |

Der erste Gefügebereich GB0 zeigt das gleichachsige und feine Gefüge des Substratwerkstoffes mit einem Großteil der Körner kleiner  $50 \mu\text{m}$ . Mit diesen Körnern als Keim sind epitaktisch die Körner des Zusatzwerkstoffes gewachsen. Das Ergebnis sind Körner mit einer Ausdehnung in Querrichtung kleiner  $100 \mu\text{m}$  und einer Ausdehnung in Aufbaurichtung größer  $200 \mu\text{m}$ . Bei den auf der gesamten Aufnahme sichtbaren, annähernd sphärischen Artefakten handelt sich wahrscheinlich um Präparationsfehler, da diese sowohl im Bereich des Substratwerkstoffes als auch im Bereich des Zusatzwerkstoffes auftreten.

In GB3 sind weiterhin große langgestreckte Körner in Aufbaurichtung zu sehen. Das in der linken Bildhälfte gut erkennbare Korn erstreckt sich über den Aufnahmebereich hinaus. Das Vermessen des im Aufnahmebereich befindlichen Teils des Korns ergibt ein Aspektverhältnis von 15,5. Bei den sichtbaren Artefakten größer 10  $\mu\text{m}$  handelt es sich wahrscheinlich wie in GB0 um Präparationsfehler. GB5 zeigt ebenfalls grobe kolumnare Körner mit einer Ausdehnung in Querrichtung größer 100  $\mu\text{m}$ . Die Ausdehnung in Aufbaurichtung kann nicht vermessen werden, da sich die Körner über die Aufnahme hinaus erstrecken. GB5 zeigt keine Präparationsfehler über die gesamte Aufnahme. Bei sichtbaren Artefakten handelt es sich wahrscheinlich um Poren oder Oxide kleiner 5  $\mu\text{m}$ .

Sowohl die Geometrie der Wand als auch die Mikrostruktur entsprechen dem erwarteten Ergebnis. An der Verbindung zwischen Substrat- und Zusatzwerkstoff dominiert epitaktisches Kornwachstum, welches in kolumnaren Körnern in Aufbaurichtung resultiert. Diese langgesteckten Körner setzen sich auch mit zunehmendem Abstand von der Substratoberfläche fort. Das Gefüge ist grob und das Aspektverhältnis der Körner groß.

Abbildung 47 zeigt ein EBSD-Bild von SW1A0 4 mm von der Substratoberfläche in der Mitte des Volumens. Es stellt die Kristallorientierung der einzelnen Körner dar. Den Farbschlüssel für alle folgenden EBSD-Aufnahmen zeigt Abbildung 46. Die resultierende Textur wird durch die Polfiguren in Abbildung 48 dargestellt.

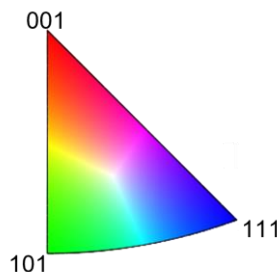


Abbildung 46: Farbschlüssel für EBSD-Aufnahmen

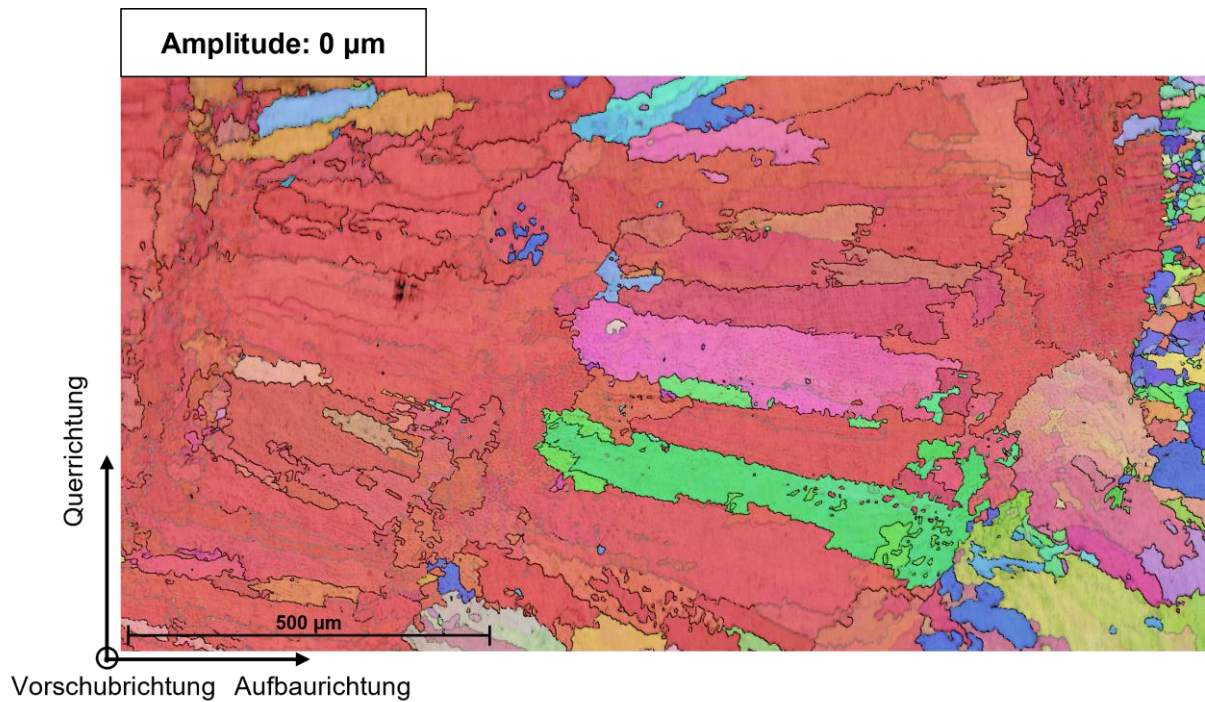


Abbildung 47: EBSD-Aufnahme der Wand SW1A0 ohne Amplitude 4 mm von der Substratoberfläche

Das EBSD-Bild von SW1A0 zeigt größtenteils grobe, kolumnare Körner. Am rechten Bildrand ist ein Bereich mit feineren, gleichachsigen Körnern zu erkennen. Dieser Bereich entspricht nicht der erwarteten und in Abbildung 45 beobachteten Mikrostruktur. Als Ursache dieses Gefügebereichs ist der Übergang von einer Lage zur nächsten wahrscheinlich. Der Bildbereich ist groß genug, dass mindestens ein solcher Übergang abgebildet sein muss. Auf der Oberfläche einer Einzellage treten höhere Abkühlgeschwindigkeiten auf, die in einem feinkörnigeren Gefüge resultieren können. Für die quantitative Gefügeanalyse wird dieser Bereich ignoriert. Der Farbschlüssel zeigt eine starke Bevorzugung der  $\{001\}$ -Orientierung und geringe Unterschiede in der Orientierung benachbarter Körner, besonders im linken Drittel der Aufnahme.

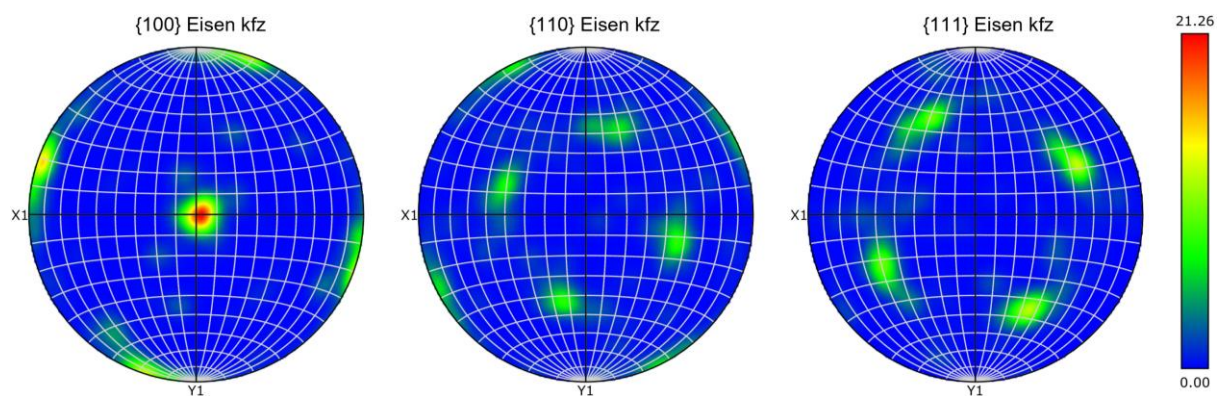


Abbildung 48: Polfiguren der Wand SW1A0 4 mm von der Substratoberfläche

Die Polfiguren unterstützen die Annahme einer stark bevorzugten Kristallorientierung. Sie zeigen eine stark ausgeprägte {100}-Textur des austenitischen Gefüges. Die Farbskala rechts in Abbildung 48 zeigt das „Multiple of Uniform Density“ (MUD). Ein MUD von 1 bedeutet zufällig orientierte Körner. MUD deutlich größer 1 weist auf das Vorhandensein einer Textur hin.

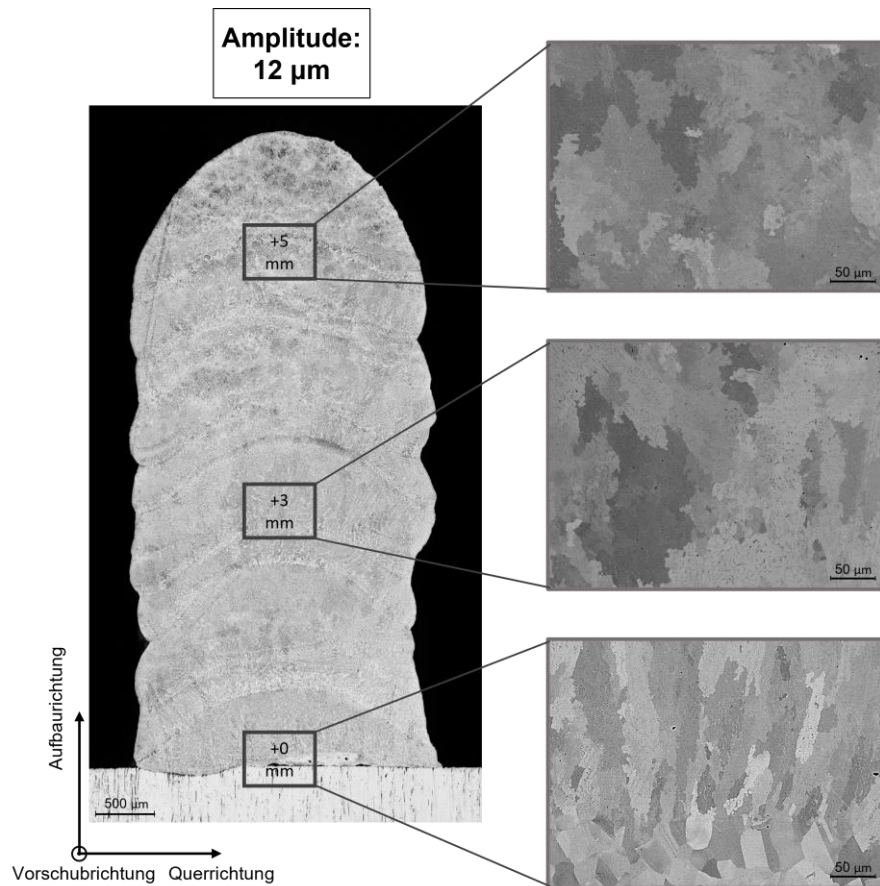
An Abbildung 47 wurde das Linienschnittverfahren nach DIN EN ISO 643 [68] durchgeführt. Dabei wurden jeweils 5 Linien in Aufbaurichtung und 5 Linien in Querrichtung ausgezählt.

Gleichung (10) beschreibt die mittlere Kornlänge in einer Richtung  $l_i$  als Summe der Länge aller Linien in dieser Richtung  $L_i$  geteilt durch die Summe der je Linie geschnittener Körner  $Z_i$ .

$$l_i = \frac{\sum L_i}{\sum z_i} \quad (10)$$

Die  $z_i$  für die jeweiligen Linien können Anhang 4 und Anhang 5 entnommen werden. Die Länge einer Linie in Aufbaurichtung beträgt 1121  $\mu\text{m}$ , die Linienlänge in Querrichtung 622  $\mu\text{m}$ . Für die mittlere Kornlänge in Aufbaurichtung  $l_A$  ergibt sich  $114 \pm 21 \mu\text{m}$ . Die mittlere Kornlänge in Querrichtung  $l_Q$  wurde mit  $59 \pm 5 \mu\text{m}$  berechnet. Die mittlere Korngröße beträgt somit  $86,5 \pm 33 \mu\text{m}$  bei einem durchschnittlichen Aspektverhältnis von  $1,93 + 0,57 - 0,48$ .

Die mittels Linienschnittverfahren für diese Aufnahme ermittelten Werte unterliegen zwei Vorbehalten. Zum einen ist der zur Verfügung stehende Bildausschnitt relativ zur Korngröße klein. Somit ist die Gesamtzahl der gezählten Körner klein, was die Genauigkeit senkt, und es ist schwierig, die Doppeltzählung besonders großer Körner zu vermeiden. Zum anderen wird die Unterscheidung einzelner Körner durch die geringen Unterschiede in der Kornorientierung erschwert, besonders in der linken Bildhälfte. Der Unterschied in der Orientierung ist teilweise so klein, dass die Unterscheidung in zwei Körner in Frage gestellt werden kann. Die tatsächliche mittlere Korngröße und das tatsächliche durchschnittliche Aspektverhältnis können somit deutlich größer sein.



**Abbildung 49:** Lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme (links) der mit 12 µm Amplitude generierten Wand SW1A12 und Detailaufnahmen (rechts) interessanter Bereiche mit REM

Für SW1A12 wird eine Abweichung von der annähernd symmetrischen und regelmäßigen Wandgeometrie der SW1A0 Wand erwartet. Die Mikrostruktur sollte in Richtung Gleichachsigkeit und feinerer Körnung beeinflusst sein.

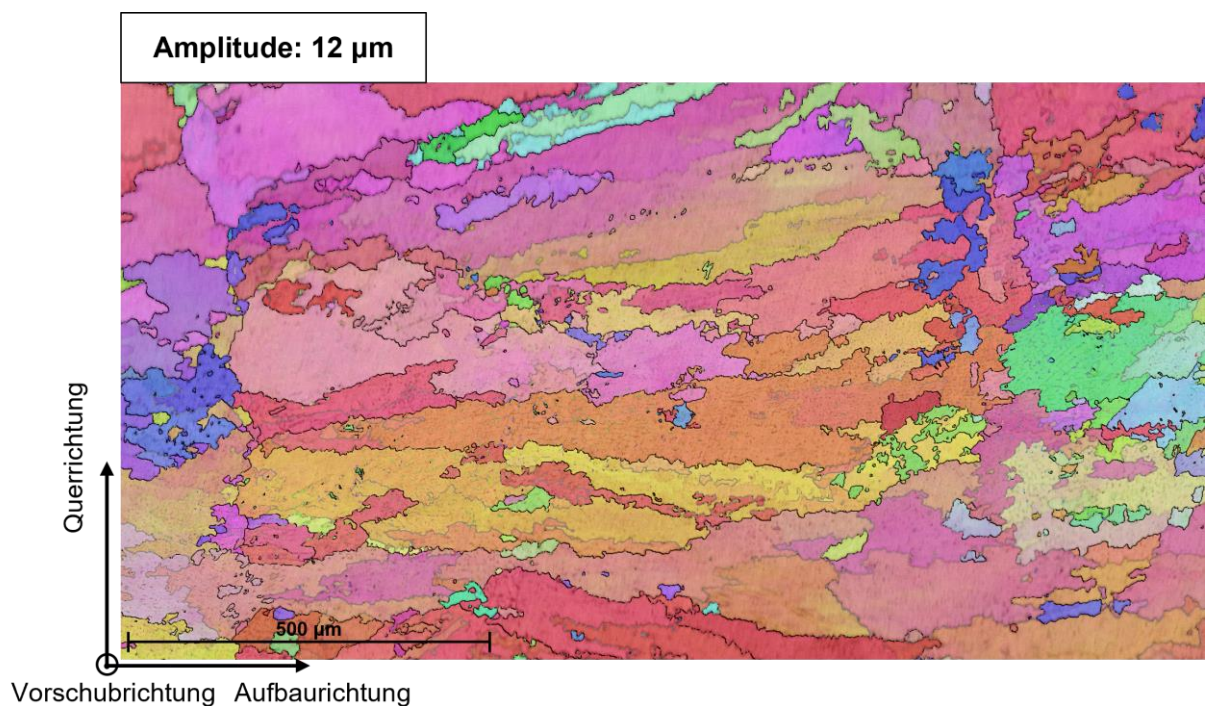
Die Übersichtsaufnahme zeigt wie erwartet eine inhomogene Materialverteilung über den Querschnitt. Teilt man den Querschnitt der Wand in zwei Hälften ausgehend von der Mitte der ersten Lage, ist die Fläche auf der linken Seite mit 7,36 mm<sup>2</sup> größer als die auf der rechten Seite mit 6,26 mm<sup>2</sup>, was den Eindruck einer inhomogenen Materialverteilung quantitativ bestätigt. Da die Einzellagen schwieriger zu erkennen und zu differenzieren sind als für SW1A0, wird auf das Vermessen der Einzelspurbreiten und Einzellagenhöhen verzichtet. Auf der in Abbildung 49 linken Wandseite ist für die unterste Einzelspur eine erhöhte Einbrandtiefe erkennbar. In der Mitte dieser Spur beginnend und nach rechts fortgesetzt ist Delamination erkennbar. Diese ist wahrscheinlich auf eine unzureichende Streckenenergie beim Auftragen der untersten Lage zurückzuführen.

GB0 zeigt wie für SW1A0 eine durch epitaktisches Kornwachstum dominierte Mikrostruktur. Die Körner lassen sich besser voneinander unterscheiden und es sind mehr

individuelle Körner kleiner  $200\ \mu\text{m}$  in Auftragsrichtung erkennbar. Es kann jedoch nicht von einer relevanten Gefügebeeinflussung durch den Ultraschall gesprochen werden, da epitaktische, langgestreckte Körner in Aufbaurichtung weiterhin bevorzugt auftreten. Im aufgetragenen Gefüge sind zwei Poren oder Oxide kleiner  $10\ \mu\text{m}$  erkennbar.

GB3 unterscheidet sich deutlich von dem entsprechenden Gefügegebiet in SW1A0. Qualitativ ist eine höhere Gleichachsigkeit der Körner erkennbar. Ein bevorzugtes Kornwachstum in Auftragsrichtung ist weiterhin erkennbar, aber weniger ausgeprägt. GB5 zeigt ebenfalls deutlich gesteigerte Gleichachsigkeit, reduzierte Korngröße und eine geringe Kornausdehnung in Aufbaurichtung. Vereinzelt sind Poren oder Oxide zu erkennen im Größenbereich von ca.  $1\ \mu\text{m}$ .

Abbildung 50 zeigt ein EBSD-Bild, 4 mm von der Substratoberfläche in der Mitte des Volumens, von SW1A12. Die dazugehörigen Polfiguren sind in Abbildung 51 dargestellt.



**Abbildung 50: EBSD-Aufnahme der Wand SW1A12 mit  $12\ \mu\text{m}$  Amplitude 4 mm von der Substratoberfläche**

SW1A12 zeigt auf dem EBSD-Bild großteilig grobe kolumnare Körner. Es treten jedoch im gesamten Bildbereich kleinere, unregelmäßig geformte Körner auf. Die Bevorzugung des Wachstums in Aufbaurichtung ist deutlich erkennbar. Der Farbschlüssel zeigt größere Unterschiede in der Orientierung benachbarter Körner, als für SW1A0 der Fall ist. Ein vermehrtes Auftreten der  $\{001\}$ -Orientierung ist nach wie vor erkennbar.

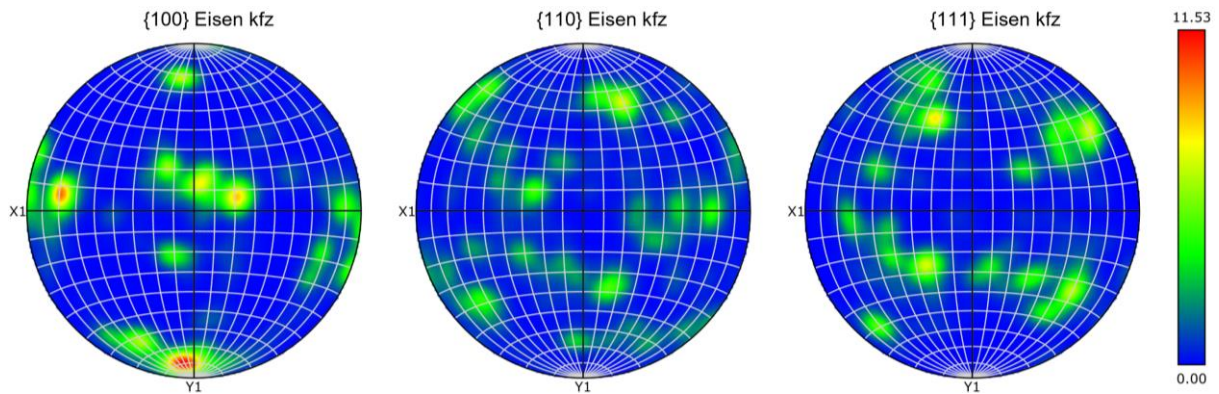


Abbildung 51: Polfiguren der Wand SW1A12 4 mm von der Substratoberfläche

Die Polfiguren bestätigen eine weniger starke Ausprägung der {100}-Textur. Das maximale MUD wird von 21,26 auf 11,53 reduziert. Ein MUD von 11,53 zeigt jedoch immer noch eine deutliche Texturierung.

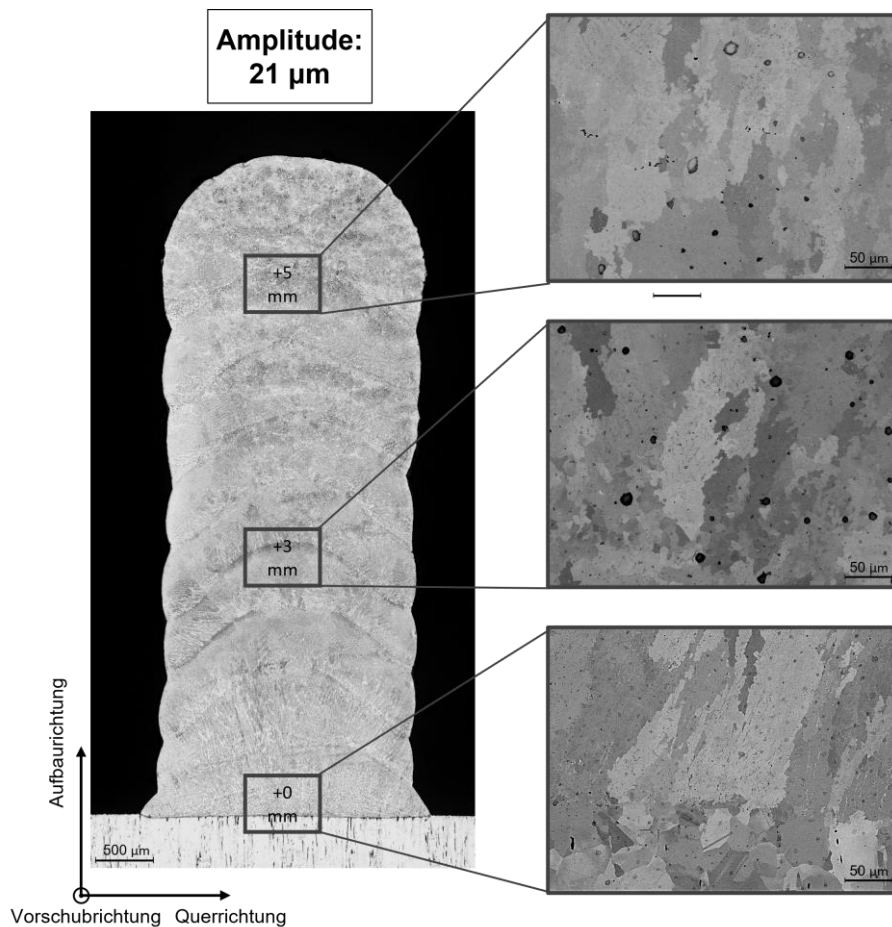
Analog zu SW1A0 wurde an Abbildung 50 das Linienschnittverfahren durchgeführt. Anhand von Gleichung (10) wurde  $l_A$  mit  $122 \pm 36 \mu\text{m}$  und  $l_Q$  mit  $40 \pm 11 \mu\text{m}$  berechnet. Die mittlere Korngröße beträgt  $81 \pm 52 \mu\text{m}$ , das mittlere Aspektverhältnis  $3,05 +2,4 -1,25$ . Die spezifischen  $z_i$  für die einzelnen Linien finden sich in

Anhang 6 und Anhang 7. SW1A12 zeigt eine hohe Standardabweichung bei der mittleren Korngröße und dem Aspektverhältnis.

Obwohl die mittlere Korngröße gegenüber SW1A0 leicht sinkt, ist das Aspektverhältnis deutlich größer. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu der nach Abbildung 49 und Abbildung 51 erwarteten Reduktion der bevorzugten Wachstumsrichtung in Aufbaurichtung. Für das Linienschnittverfahren an SW1A12 gelten ähnliche Vorbehalte wie für SW1A0. Die Unterscheidung individueller Körner ist einfacher, aber das Vermeiden von Mehrfachzählungen schwierig. Für eine statistisch gesicherte, quantitative Bewertung wäre die Auswertung weitere Gefügebereiche der gleichen Probe notwendig. Für diese liegen keine EBSD-Bilder vor.

Die aktive Beschallung während des Aufbaus mit einer Amplitude von  $12 \mu\text{m}$ , einer Frequenz von 19021 Hz und somit einer theoretischen Schallintensität von  $2770 \text{ W/cm}^2$  reduziert die {100}-Textur der Mikrostruktur bei ausreichendem Abstand von der Substratoberfläche. Am Übergang von Substrat zum Zusatzwerkstoff wird das epitaktische Wachstum nicht relevant beeinflusst.

An REM-Aufnahmen konnte eine Kornfeinung und eine Reduktion des Aspektverhältnisses beobachtet werden. Quantitativ mittels Linienschnittverfahren an einem EBSD-Bild konnte diese Beobachtung nicht bestätigt werden.



**Abbildung 52:** Lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme (links) der mit 21 µm Amplitude generierten Wand SW2A21 und Detailaufnahmen (rechts) interessanter Bereiche mit REM

Für SW2A21 sollte aufgrund der stärkeren Ultraschallamplitude sowohl die Wandgeometrie als auch die Mikrostruktur stärker beeinflusst worden sein als für SW1A12.

Die Übersichtsaufnahme zeigt, dass diese Erwartung für die Wandgeometrie nicht erfüllt wird. Die Materialverteilung ist annähernd homogen. Teilt man den Querschnitt der Wand in zwei Hälften ausgehend von der Mitte der ersten Lage, ist die Fläche auf der linken Seite mit  $6,36 \text{ mm}^2$  kleiner als die auf der rechten Seite mit  $6,53 \text{ mm}^2$ . Der Unterschied in der Querschnittsfläche ist größer als bei SW1A0, aber kleiner als bei SW1A12. Die Einzellagen sind gut differenzierbar, mit Ausnahme der Übergänge von Lage eins zu Lage zwei und von Lage neun zu Lage zehn. Tabelle 14 führt die Abmaße und Nahtformkoeffizienten für ausgewählte Einzellagen von SW2A21 auf.

Tabelle 14: Abmaße und Nahtformkoeffizient für aus gewählte Einzellagen von SW2A21

| Lage | Einzelspurbreite in $\mu\text{m}$ | Einzelspurhöhe in $\mu\text{m}$ | Nahtformkoeffizient |
|------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| 1.   | 2565                              | 741                             | 3,46                |
| 2.   | 2261                              | 573                             | 3,95                |
| 5.   | 2204                              | 542                             | 4,07                |
| 8.   | 2237                              | 640                             | 3,50                |

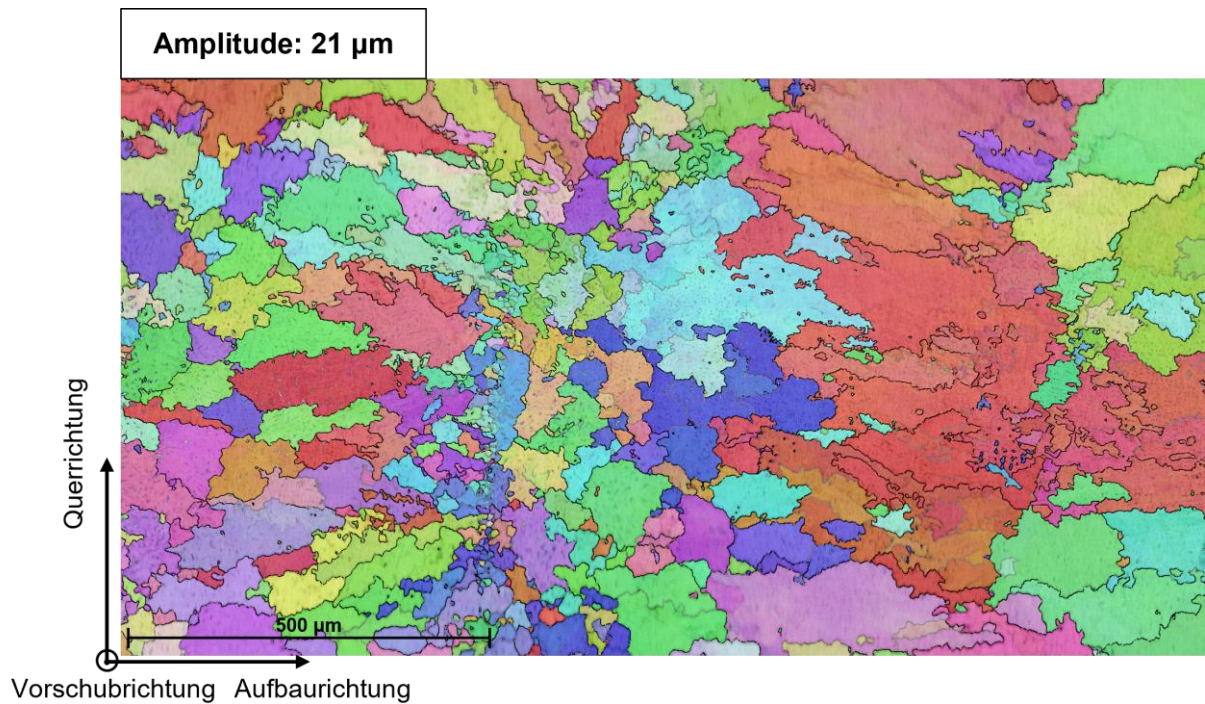
Die Einzelspurbreite sinkt von Lage eins zu Lage zwei um 300  $\mu\text{m}$  und bleibt anschließend annähernd konstant. Die Lagenhöhe nimmt zunächst ab, bevor sie in der oberen Hälfte der Wand wieder ansteigt. Der Nahtformkoeffizient verhält sich umgekehrt und steigt zunächst an, bevor er in Lage acht wieder annähernd gleich dem in Lage eins ist.

Die unterste Einzellage zeigt über den gesamten Querschnitt eine erhöhte Einbrandtiefe gegenüber SW1A0. Die für SW1A12 beobachteten Anbindungsfehler sind nicht erkennbar.

Die Detailaufnahme des Übergangs GB0 zeigt wie bei SW1A0 und SW1A12 epitaktisches Kornwachstum mit langgestreckten Körnern. Die bevorzugte Wachstumsrichtung der Körner ist jedoch um durchschnittlich  $24^\circ$  gegenüber der Aufbaurichtung gekippt. Bei den sichtbaren Artefakten handelt es sich wahrscheinlich größtenteils um Präparationsfehler. Im Substratwerkstoff sind einige Risse bzw. Poren erkennbar. GB3 zeigt ein erkennbar feineres und gleichachsigeres Gefüge als für SW1A0. Die bevorzugte Wachstumsrichtung erscheint erneut gegenüber der Aufbaurichtung gekippt zu sein. Die Anzahl von Körnern mit deutlicher Vorzugsrichtung ist jedoch zu klein, um eine quantitative Aussage treffen zu können. Bei den deutlich sichtbaren Artefakten kann es sich teilweise um Poren oder Oxide handeln. Das Vorhandensein von Präparationsfehlern in GB0 lässt darauf schließen, dass zumindest einige der Artefakte in GB3 ebenfalls Präparationsfehler sind. GB5 unterstützt die Beobachtung eines gleichachsigeren Gefüges und einer kleineren mittleren Korngröße gegenüber SW1A0. Anders als in GB0 und GB3 scheint die bevorzugte Wachstumsrichtung annähernd der Aufbaurichtung zu entsprechen.

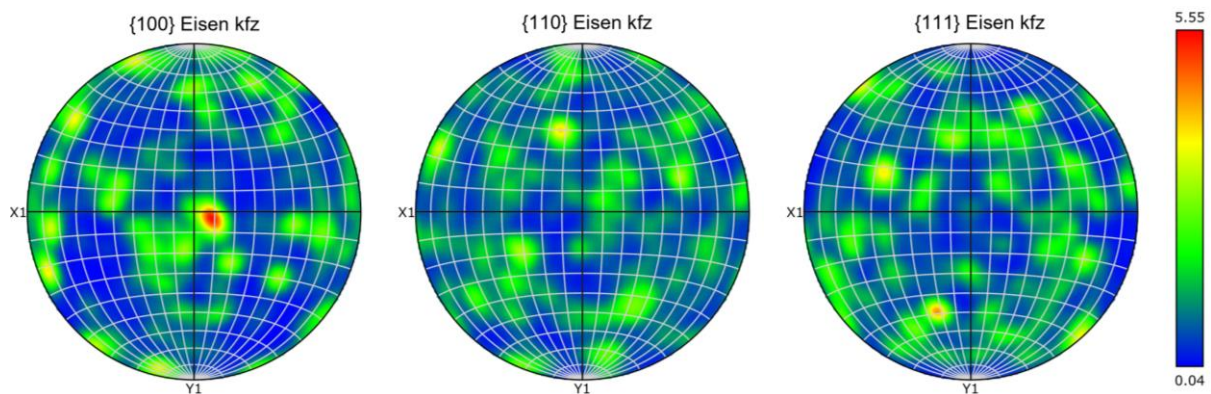
Bei Artefakten mit einer Ausdehnung kleiner 10  $\mu\text{m}$  handelt es sich wahrscheinlich um Poren oder Oxide, bei größeren Artefakten um Präparationsfehler.

Abbildung 53 zeigt ein EBSD-Bild, 4 mm von der Substratoberfläche in der Mitte des Volumens, von SW1A12. Die dazugehörigen Polfiguren sind in Abbildung 54 dargestellt.



**Abbildung 53: EBSD-Aufnahme der Wand mit 21 µm Amplitude 4 mm von der Substratoberfläche**

Das EBSD-Bild von SW2A21 zeigt ein deutlich gleichachsigeres und feineres Gefüge als SW1A0 und SW1A21. Die Orientierung benachbarter Körner unterscheidet sich größtenteils deutlich. Bereiche mit einer bevorzugten Orientierung sind vorhanden, aber lokalisiert.



**Abbildung 54: Polfiguren der Wand SW2A21 4 mm von der Substratoberfläche**

Die Polfiguren bestätigen eine deutliche reduzierte Texturierung des Gefüges. Das maximale MUD ist gegenüber SW1A0 von 21,26 auf 5,55 reduziert. Eine leichte {100}-Textur ist weiterhin erkennbar, aber deutlich weniger ausgeprägt.

Die Durchführung des Linienschnittverfahrens für Abbildung 53 unter Verwendung von Gleichung (10) ergibt eine mittlere Kornlänge in Aufbaurichtung von  $68 \pm 16 \mu\text{m}$  und eine mittlere Kornlänge in Querrichtung von  $40 \pm 11 \mu\text{m}$ . Die mittlere Korngröße beträgt  $54 \pm 18$

$\mu\text{m}$ , das mittlere Aspektverhältnis  $1,7 +1,2 -0,68$ . Die spezifischen  $z_i$  für die einzelnen Linien finden sich in Anhang 8 und Anhang 9.

Die mittlere Korngröße ist mit  $54 \mu\text{m}$  deutlich kleiner als bei SW1A0 und SW1A12. Das Aspektverhältnis ist mit  $1,7$  kleiner als bei SW1A0 und deutlich kleiner als bei SW1A12. Die Genauigkeit des Linienschnittverfahrens ist für SW2A21 am höchsten. Mehrfachzählungen lassen sich leicht vermeiden und die Differenzierung benachbarter Körner ist einfach.

Die aktive Beschallung während des Aufbaus mit einer Amplitude von  $21 \mu\text{m}$ , einer Frequenz von  $19212 \text{ Hz}$  und somit einer theoretischen Schallintensität von  $8653 \text{ W/cm}^2$  reduziert die  $\{100\}$ -Textur der Mikrostruktur deutlich. Am Übergang Substrat zu Zusatzwerkstoff wird das epitaktische Wachstum nicht relevant beeinflusst, aber die bevorzugte Wachstumsrichtung ist gegenüber der Aufbaurichtung gekippt.

An REM-Aufnahmen konnte eine Kornfeinung und eine Reduktion des Aspektverhältnisses beobachtet werden. Quantitativ mittels Linienschnittverfahren an einem EBSD-Bild konnte diese Beobachtung bestätigt werden. Die mittlere Korngröße konnte gegenüber einer ohne Ultraschall generierten Referenz von  $86,5 \pm 33 \mu\text{m}$  auf  $54 \pm 16 \mu\text{m}$  reduziert werden. Das Aspektverhältnis wurde von  $1,93 +0,57 -0,48$  auf  $1,7 +1,2 -0,68$  gesenkt.

Die Auswertung der lichtmikroskopischen Aufnahmen, REM-Aufnahmen, EBSD-Bildern und Polfiguren hat gezeigt, dass eine Kornformbeeinflussung beim LDA mittels Ultraschall möglich ist. Der Grad dieser Beeinflussung steigt mit zunehmender Größe der Ultraschallamplitude deutlich an. Gleichzeitig werden durch den Ultraschall die Prozessstabilität und somit auch das makroskopische Schweißergebnis negativ beeinflusst. Die Größe der anliegenden Ultraschallamplitude scheint in keinem direkten Zusammenhang mit dieser Beeinflussung der Prozessstabilität zu stehen. Mit steigender Entfernung von der Substratoberfläche und somit mit steigender Anzahl von Lagen verschlechtert sich die Prozessstabilität.

Für den Vergleich der Ergebnisse aus der quantitativen Gefügeanalyse mit Ergebnissen aus anderen Forschungsarbeiten bieten sich, aufgrund des ähnlichen Versuchsaufbaus zur Ultraschalleinbringung, Todaro, Easton et al. [55] an sowie Yuan, Shao et al. [57], die mit dem gleichen Verfahren gearbeitet haben. Todaro, Easton et al. erreichen eine stärkere Kornfeinung von  $500 \pm 354 \mu\text{m}$  auf  $117 \pm 61 \mu\text{m}$  und eine stärkere Senkung des Aspektverhältnisses von  $4,0 \pm 2,2$  auf  $2,1 \pm 0,9$ . Dabei arbeiteten Todaro, Easton et al. mit einer höheren Ultraschallintensität von ca.  $13000 \text{ W/cm}^2$ . Die quantitative Korngrößenbestimmung in dieser Arbeit für die Referenzprobe SW1A0 ist durch den relativ zur Korngröße kleinen vermessenen Gefügebereich fehlerbehaftet. Die berechnete Korngröße für SW1A0 ist deutlich geringer. Es ist wahrscheinlich, dass der Effekt der Kornfeinung stärker

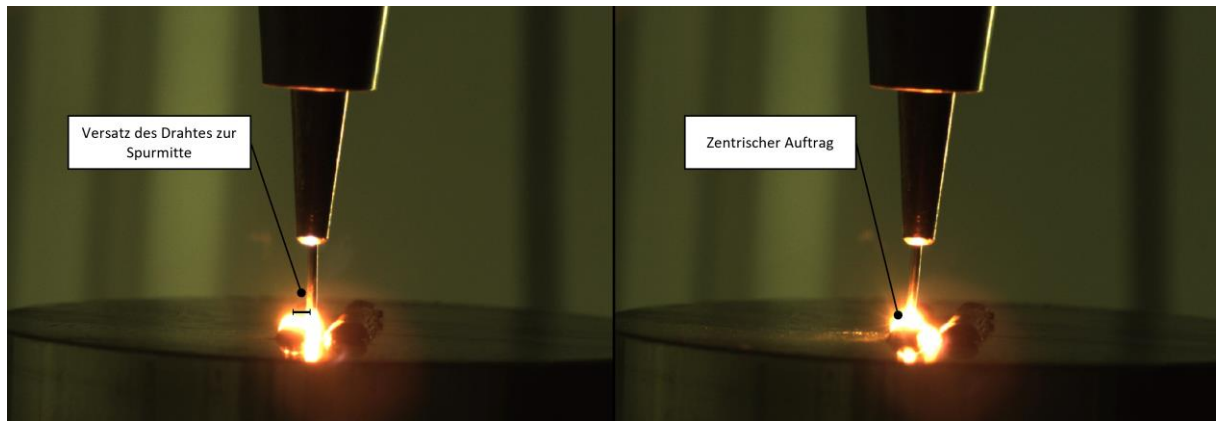
wirkt, wenn die mittlere Korngröße im Referenzgefüge groß ist. Yuan, Shao et al. erreichten im mit Ultraschallbehandlung erstarrten Gefügebereich eine mittlere Korngröße von  $152 \pm 93 \mu\text{m}$  und ein Aspektverhältnis von  $1,8 \pm 0,72$ . Da keine Werte für eine Referenzprobe angegeben wurden, können nur die Werte für die durch Ultraschall beeinflusste Mikrostruktur verglichen werden. Die erreichte mittlere Korngröße ist deutlich gröber, die Werte für das Aspektverhältnis stimmen gut überein. Ein Vergleich der Ultraschallintensität ist durch die unterschiedliche Methode der Ultraschalleinbringung schwierig. Wäre die Sonotrode direkt ins Schmelzbad eingetaucht, ergäbe sich eine Schallintensität von  $2108 \text{ W/cm}^2$ . Bei Mitführung der Sonotrode im entsprechenden Abstand berechnen Yuan, Shao et al. die Amplitude im Schmelzbad mit ca.  $350 \text{ W/cm}^2$  [57, S. 5]. Für diese Arbeit ist die im Schmelzbad vorliegende Ultraschallintensität nicht bekannt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Unterschied in der erreichten mittleren Korngröße seine Ursache in einer höheren Schallintensität im Schmelzbad hat.

### 5.3 ANSÄTZE ZUR PROZESSSTABILISIERUNG

Das Generieren des Amplitudenspektrums hat gezeigt, dass die aktive Beschallung die Prozessstabilität maßgeblich negativ beeinflusst. Wände über eine Höhe von zehn Einzellagen hinaus, lassen sich mit dem verwendeten Parameterset nicht reproduzierbar aufbauen. In jeder Einzellage kann es spontan und ohne erkennbares Muster zu einem vollständigen oder partiellen Prozessabbruch durch Balling kommen. Auch ein partieller Prozessabbruch führt zu Schweißfehlern, die sich negativ auf den weiteren Prozess und das resultierende Ergebnis auswirken.

Eine mögliche Ursache für die Prozessinstabilität liegt in der zusätzlichen Energie, die der Schmelze durch die Ultraschallanregung zugeführt wird. Todaro, Easton et al. reduzieren zum Ausgleich die Laserleistung von  $250 \text{ W}$  auf  $150 \text{ W}$  [55, S. 7]. Dieser Ansatz ist für das LDA nicht direkt übertragbar. Auf die Ursache wird in 5.3.5 näher eingegangen. Die Prozessinstabilität tritt auch bei kleinen Amplituden auf. Bei  $20 \text{ kHz}$  resultiert nach Gleichung (8) eine Amplitude von  $6 \mu\text{m}$  in einer theoretischen Schallintensität von  $754 \text{ W/cm}^2$  und eine Amplitude von  $21 \mu\text{m}$  in einer theoretischen Schallintensität von  $9242 \text{ W/cm}^2$ . Der Energieeintrag unterscheidet sich um eine Größenordnung. Die zusätzliche der Schmelze zugeführte Energie kann somit nicht allein die beobachtete Prozessinstabilität erklären.

Eine weitere mögliche Ursache ist die Interaktion des Drahtes mit dem schwingenden Substrat. Durch Positionierung der Prozesskamera annähernd parallel zur Auftragsrichtung wurde das in Abbildung 55 gezeigte Verhalten des Drahtes beobachtet.



**Abbildung 55: Drahtverhalten während des Auftrags bei aktiver Beschallung mit 12 µm-Amplitude in Lage drei einer Wand**

Das linke Bild in Abbildung 55 zeigt deutlich einen Versatz des Drahtes zur Mitte der Spur, obwohl vor Prozessbeginn die Drahtzentrierung geprüft wurde. Das rechte Bild zeigt das Auftragen der gleichen Einzellage wenige Sekunden später, nun mit zentrischer Drahtzufuhr. Die Position relativ zur Spurmitte, in der der Draht mit dem Substrat in Kontakt kommt, ändert sich rapide und ohne erkennbares Muster. Bei nicht zentrischem Auftrag kommt es zu inhomogener Materialverteilung. In der Mitte der Spur fehlt Material und diese Materiallücke wird in nachfolgenden Lagen zu einem Auslöser für Balling-Ereignisse. Bei Auftrag ohne Ultraschall wird dieses Verhalten nicht oder nur in deutlich schwächerer Ausprägung beobachtet. Bereits eine Amplitude von 6 µm führt zu sichtbarer, spontaner Dezentrierung des Drahtes. Das Auftreten dieses Drahtverhaltens bei allen Ultraschallamplituden und ohne erkennbares Muster macht es als Ursache für die Prozessinstabilität wahrscheinlich.

Nachfolgend werden verschiedene Ansätze zur Verbesserung der Prozessstabilität und die entsprechenden Resultate beschrieben. Die unterschiedlichen Ansätze lassen sich einteilen in Anpassung der Hauptprozessparameter und Anpassung der Verfahrenstrategie.

### 5.3.1 Stärkere Defokussierung

Die bereits beschriebene Dezentrierung des Drahtes ist die wahrscheinlichste Ursache für die beobachtete Prozessinstabilität. Die stärkere Defokussierung hat zum Ziel, die Einzelspurbreite durch ein größeres  $Q_{BD}$  zu erhöhen und somit die Auswirkung der Dezentrierung zu reduzieren. Abbildung 56 zeigt die Position des Drahtes auf der Spur bei gleicher Dezentrierung des Drahtes relativ zur Spurmitte für unterschiedliche Spurbreiten. Für eine schmalere Spur würde in diesem Fall kein Auftrag erfolgen, für eine breitere Spur wäre der Materialauftrag inhomogen, aber kontinuierlich.

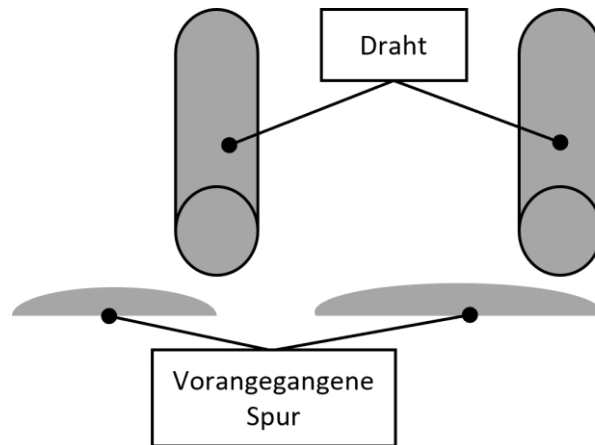


Abbildung 56: Schematische Darstellung unterschiedlicher Spurbreiten bei gleicher Dezentrierung des Drahtes

Das Verwenden einer Mehrstrahlenoptik ermöglicht die Einstellung des Laserspotdurchmessers und dementsprechend die Einstellung der Schmelzbadgröße. Wie in 2.1.2.2 beschrieben führt eine stärkere Defokussierung, wie sie in Abbildung 57 dargestellt ist, zu einem flacheren, breiteren Schmelzbad, welches wiederum in einer breiteren Spur mit geringerer Aufmischung resultiert.

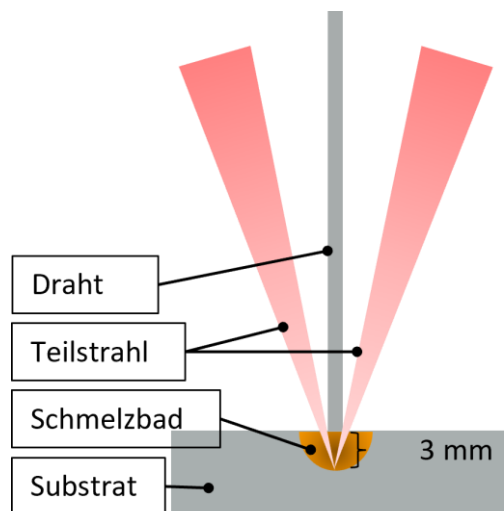


Abbildung 57: Schematische Darstellung der Defokussierung und resultierendes Schmelzbad

Tabelle 15 führt die Prozessparameter auf, die für das Generieren von Wänden mit stärkerer Defokussierung verwendet wurden.

Tabelle 15: Prozessparameter für die stärkere Defokussierung

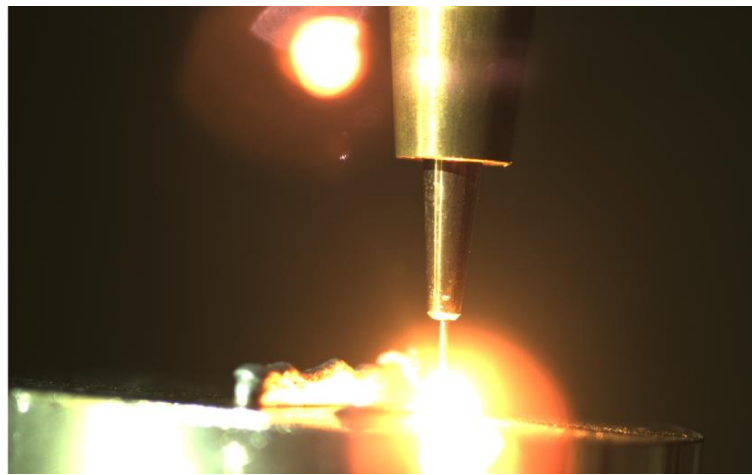
|                              |             |                                       |          |
|------------------------------|-------------|---------------------------------------|----------|
| Laserleistung                | 800 W       | Lasereinlaufstrecke                   | 0,2 mm   |
| Vorschubgeschwindigkeit      | 450 mm/min  | Laserauslaufstrecke                   | 1 mm     |
| Drahtvorschubgeschwindigkeit | 550 mm/min  | Schutzgasstrom                        | 25 l/min |
| Streckenmasse                | 0,0086 g/mm | Defokussierung                        | 3 mm     |
| Streckenenergie              | 2 J/mm      | Lagenhöhe                             | 0,42 mm  |
| Drahteinlaufstrecke          | 0,35 mm     | Korrekturfeld                         | ±10 mm   |
| Drahtauslaufstrecke          | 1,5 mm      | Verlangsamungsrate des Korrekturfelds | 22 %     |

Mit der stärkeren Defokussierung von 3 mm steigt das Volumen des erzeugten Schmelzbades. Es ist daher notwendig, die Laserleistung dem gesteigerten Energiebedarf anzupassen. Die Reduzierung der Laserleistung in der zweiten und in der fünften Lage um je 50 W wurde beibehalten. Die Drahtvorschubgeschwindigkeit wurde trotz des größeren Schmelzbades leicht reduziert, da eine hohe Streckenmasse das Problem der Drahtdezentrierung verstärkt. Mit der in 4.3.2 beschriebenen Verfahrenstrategie und den vorangegangenen erläuterten Anpassungen wurde die in Abbildung 58 gezeigte Wand generiert.

Abbildung 58: Mit 3 mm Defokussierung und 12  $\mu$ m Amplitude generierte Wand SD1A12

Das Ergebnis war ein deutlich stabilerer Prozess ohne Balling-Ereignisse und ohne sichtbare Drahtdezentrierung. Das Schweißergebnis zeigt eine leicht inhomogene Materialverteilung über die Auftragstrecke, aber keine prozessgefährdenden Materialanhäufungen

oder -lücken. Der Prozess wurde aufgrund von Resonanzverlust manuell unterbrochen. Ein erneuter Resonanzsuchlauf konnte keine Resonanzfrequenz im Arbeitsbereich des Ultraschallprozessor finden. Da dieses Problem auch für ein Substrat ohne aufgetragenes Material auftrat, wurde das gesamte Ultraschallsystem zur Überprüfung an den Hersteller versendet. Nach Reparatur und Nachkalibrierung des Ultraschallwandlers sowie der Erweiterung des Arbeitsbereiches des Ultraschallgenerators auf 18 kHz bis 21 kHz durch den Hersteller wurde das Generieren der Wand aus Abbildung 58 mit identischen Parametern und identischer Strategie wiederholt. Abbildung 59 zeigt den laufenden Prozess für das Generieren dieser Wand.



**Abbildung 59: Laufender Prozess einer mit 3 mm Defokussierung und 12 µm Amplitude generierten Wand SD2A12 nach Reparatur des Ultraschallsystems**

Wie in Abbildung 59 erkennbar ist, traten Materialanhäufungen und Materiallücken auf, die kurze Zeit später zu einem Balling-Ereignis und zum Prozessabbruch führten. Die Ursache des inhomogenen Materialauftrags ist trotz der größeren Spurbreite spontane Drahtdezentrierung. Die Erklärung für die bei SD1A12 beobachtete verbesserte Prozessstabilität liegt wahrscheinlich im Zustand des Ultraschallwandlers während des Auftrags. Es kann davon ausgegangen werden, dass zu diesem Zeitpunkt die Funktionalität des Systems bereits so weit eingeschränkt war, dass die resultierende Schallintensität deutlich unter dem für Kornfeinung und Kornformbeeinflussung notwendigen Schwellwert lag. Bei voller Funktionalität des Ultraschallwandlers konnte der positive Einfluss der stärkeren Defokussierung nicht bestätigt werden.

### 5.3.2 Dreispurige Wände

Das Generieren von Wänden mit drei Einzelspuren je Lage verfolgt ebenso wie die Defokussierung das Ziel, die Drahtdezentrierung durch eine größere für den Auftrag zur Verfügung stehende Fläche zu kompensieren. Die angepasste Verfahrensstrategie ist in

Abbildung 60 dargestellt. Zunächst werden die zwei äußeren Einzelspuren mit gleicher Auftragsrichtung generiert, es folgt die mittlere Einzelspur um 180° gedreht. Anschließend erfolgt die Zustellung in Z-Richtung und das Generieren der nächsten Lage mit allen Einzelspuren um 180° gedreht gegenüber der vorangegangenen Lage.

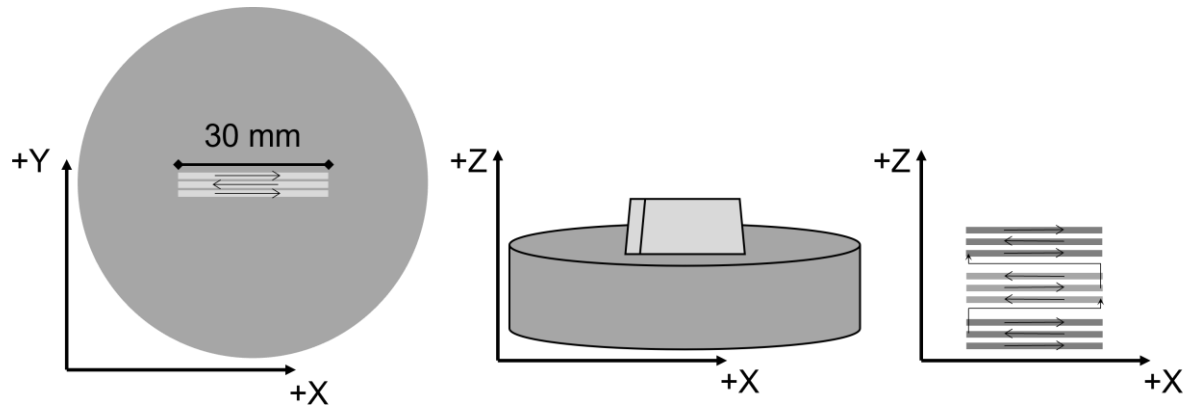


Abbildung 60: Schematische Darstellung der Verfahrenstrategie für eine Wand aus drei Einzelspuren je Lage

Die, für das Generieren von Wänden aus drei Einzelspuren je Lage, verwendeten Prozessparameter sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Prozessparameter für Wände mit drei Einzelspuren je Lage

|                              |             |                                       |          |
|------------------------------|-------------|---------------------------------------|----------|
| Laserleistung                | 600 W       | Laserauslaufstrecke                   | 1 mm     |
| Vorschubgeschwindigkeit      | 450 mm/min  | Schutzgasstrom                        | 25 l/min |
| Drahtvorschubgeschwindigkeit | 580 mm/min  | Defokussierung                        | 2 mm     |
| Streckenmasse                | 0,0091 g/mm | Einzelspurbreite                      | 2,5 mm   |
| Streckenenergie              | 1,5 J/mm    | Überlappung der Einzelspuren          | 50 %     |
| Drahteinlaufstrecke          | 0,35 mm     | Lagenhöhe                             | 0,85 mm  |
| Drahtauslaufstrecke          | 1,5 mm      | Korrekturfeld                         | ±12 mm   |
| Lasereinlaufstrecke          | 0,2 mm      | Verlangsamungsrate des Korrekturfelds | 28%      |

Die Parameter wurden vom Generieren von Wänden mit einer Einzelspur je Lage übernommen. Die Lagenhöhe bzw. Z-Zustellung wurde angepasst, um die Überlappung zu berücksichtigen. Da es beim Testen des NC-Programmes ohne Ultraschall wiederholt zu Balling-Ereignissen kam, wurde die Drahtvorschubgeschwindigkeit lagenabhängig angepasst. Mit der zweiten Lage wurde sie auf 600 mm/min und mit der fünften Lage auf

620mm/min erhöht. Das Korrekturfeld wurde wie für SW2A21 auf  $\pm 12$  mm gesetzt, die Verlangsamungsrate wurde auf 28 % erhöht.

Abbildung 61 zeigt die mit der beschriebenen Verfahrenstrategie und den in Tabelle 16 aufgeführten Parametern generierten Wände.



**Abbildung 61: Wänden mit drei Einzelspuren je Lage. Referenzwand (links) und Wände mit 12  $\mu$ m-Amplitude (mittig und rechts)**

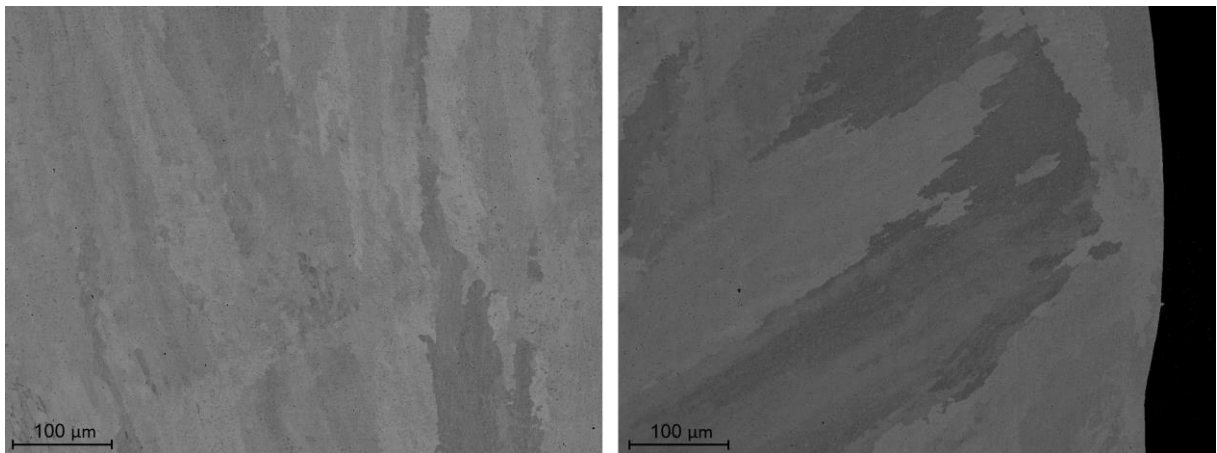
SdW1A0 ist die Referenzwand ohne Ultraschall. Es sind Schweißfehler wie z. B. unvollständig aufgeschmolzener Draht im Auftragsstart bzw. Endbereich erkennbar. Diese sind auf nicht optimierte Verfahrenstrategie und Prozessparameter zurückzuführen. Die Wand konnte bis zu einer Höhe von 20 mm aufgebaut werden, bevor der Prozess manuell unterbrochen wurde. SdW1A12\_1 und SdW1A12\_2 sind mit identischen Parametern und einer Ultraschallamplitude von 12  $\mu$ m generiert worden. Die in Abbildung 61 erkennbare, deutlich niedrigere Aufbauhöhe als für SdW1A0 resultierte aus Balling-Ereignissen, die zum Prozessabbruch führten.

Die Prozessstabilität wurde nicht erkennbar positiv beeinflusst und die erreichte Aufbauhöhe war geringer als für Wände, die aus einer Einzelspur je Lage bestehen. Die Dezentrierung des Drahtes trat weiterhin auf, allerdings nahezu ausschließlich für die äußeren beiden Einzelspuren. Aus dieser Beobachtung wurde der Ansatz abgeleitet, eine Wand aus drei Einzelspuren je Lage zu generieren, bei der nur die mittlere Einzelspur mit einer aktiven Ultraschallamplitude aufgetragen wird. Die äußeren Einzelspuren sollen dabei die Rolle einer Führungsschiene einnehmen, welche die Drahtdezentrierung verhindert. Abbildung 62 zeigt eine auf diese Weise generierte Wand. Die Verfahrenstrategie und Prozessparameter entsprechen denen von SdW1A0.



**Abbildung 62: Unterschiedliche Ansichten einer Wand aus drei Einzelspuren je Lage mit Beschallung der mittleren Einzelspur mit 12 µm Amplitude**

Vergleicht man SdW2A12\_T mit SdW1A12\_1 und SdW1A12\_2, ist erkennbar, dass eine höhere Aufbauhöhe erreicht werden konnte. Der Prozess wurde manuell abgebrochen. Balling-Ereignisse traten während des Auftrags nicht auf. Die Materialverteilung über die Auftragstrecke ist leicht inhomogen mit Materialanhäufungen an den Start- und Endpunkten. Die Prozessstabilität war gegenüber SdW1A12\_1 und SdW1A12\_2 deutlich erhöht. Die Wirkung der äußeren Spuren als Führungsschiene wurde nicht beobachtet. Die verbesserte Prozessstabilität folgt aus dem Umschmelzen der unregelmäßigen Mittelspur durch die äußeren Spuren der nachfolgenden Lage. Abbildung 63 zeigt von der Gruppe Werkstoffcharakterisierung und -prüfung an einem JEOL JSM-7800F erstellte REM-Aufnahmen von SdW2A12\_T 5 mm oberhalb der Substratoberfläche.



**Abbildung 63: REM-Aufnahmen von Wand SdW2A12\_T 5 mm von der Substratoberfläche: Mitte (links) und Rand (rechts)**

Für die mittlere Spur, die mit einer Ultraschallamplitude von 12 µm aufgetragen wurde, wird eine Gefügeveränderung zu feineren, gleichachsigeren Körnern erwartet. Das REM-Bild des entsprechenden Bereichs in Abbildung 63 bestätigt diese Erwartung nicht. Vergleicht man den Gefügebereich 5 mm oberhalb der Oberfläche von SW1A12 in Abbildung 49, ist erkennbar, dass SdW2A12\_T keine maßgebliche Gefügeveränderung aufweist. Das Gefüge im Randbereich von SdW2A12\_T unterscheidet sich in Korngröße und

Aspektverhältnis kaum. Der Unterschied in der bevorzugten Wachstumsrichtung resultiert aus der Wandgeometrie.

Es ist wahrscheinlich, dass das Umschmelzen der mittleren Spur, das für die erhöhte Prozessstabilität verantwortlich ist, gleichzeitig die ultraschallbeeinflusste Mikrostruktur verändert. Eine Verbesserung der Prozessstabilität ohne erkennliche Beeinflussung der Mikrostruktur in Richtung feinerer gleichachsiger Körnern ist nicht zielführend. Entsprechend wurde der Ansatz nicht weiterverfolgt.

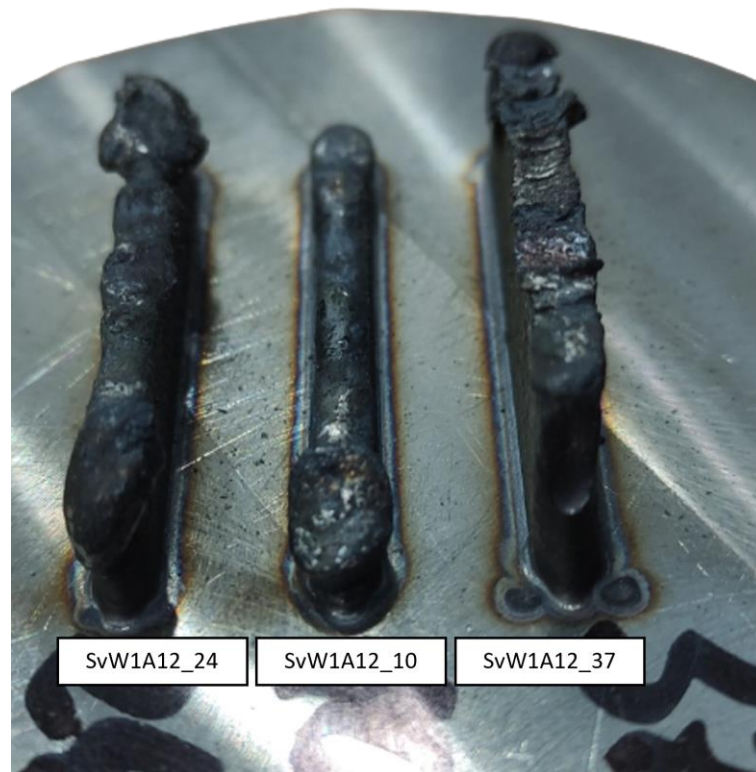
### 5.3.3 Wände mit verzögertem Einschalten des Ultraschalls

Die häufigste Ursache für den unerwünschten Prozessabbruch beim Auftragen mit aktivem Ultraschall sind Balling-Ereignisse. Diese treten häufig an Stellen auf, an denen es in vorangegangenen Lagen zu Drahtdezentrierung und somit inhomogenem Materialauftrag kam. Aus dieser Beobachtung wurde der Ansatz abgeleitet, Wände aus einer Einzelspur je Lage zunächst ohne aktive Beschallung zu generieren. Nach dem Erreichen unterschiedlicher Auftragshöhen wird der Ultraschall beim Auftragen der nächsten Einzellage eingeschaltet. Die für diese Wände verwendeten Prozessparameter sind in Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 17: Prozessparameter für Wände mit verzögertem Einschalten des Ultraschalls

|                              |             |                                       |          |
|------------------------------|-------------|---------------------------------------|----------|
| Laserleistung                | 1000 W      | Lasereinlaufstrecke                   | 0,45 mm  |
| Vorschubgeschwindigkeit      | 450 mm/min  | Laserauslaufstrecke                   | 1,5 mm   |
| Drahtvorschubgeschwindigkeit | 440 mm/min  | Schutzgasstrom                        | 25 l/min |
| Streckenmasse                | 0,0069 g/mm | Defokussierung                        | 2 mm     |
| Streckenenergie              | 1,5 J/mm    | Lagenhöhe                             | 0,417 mm |
| Drahteinlaufstrecke          | 0,5 mm      | Korrekturfeld                         | ±12 mm   |
| Drahtauslaufstrecke          | 0,2 mm      | Verlangsamungsrate des Korrekturfelds | 14 %     |

Anhand von Versuchen ohne Ultraschall wurde eine neue Kombination aus Auftragsstart- und Auftragsendparametern entwickelt, die den Auftrag ohne Reduzierung der Spurlänge für jede folgende Lage ermöglicht. Laserleistung und Drahtvorschubgeschwindigkeit wurden ebenfalls durch Versuche ohne Ultraschall angepasst und optimiert.

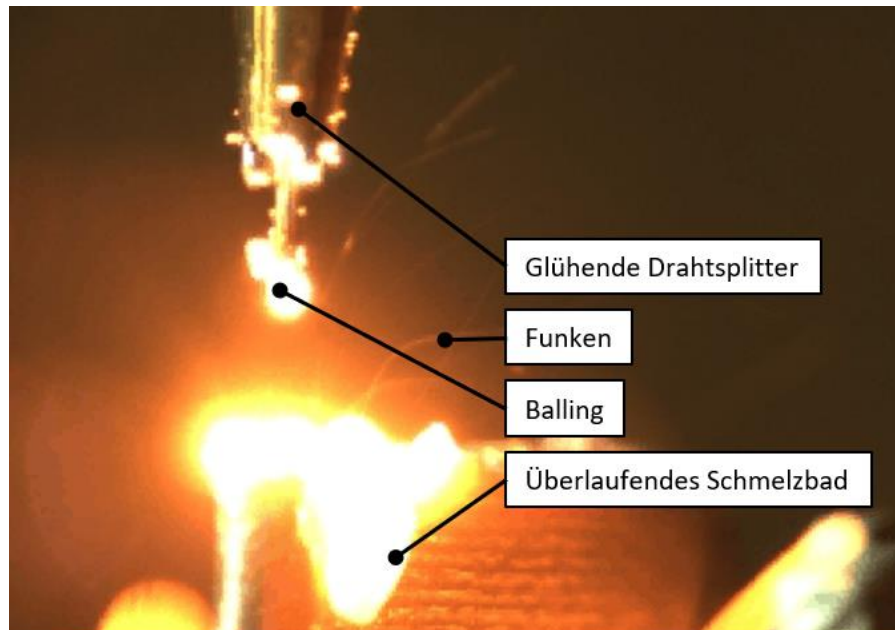


**Abbildung 64:** Mit verzögertem Einschalten des Ultraschalls und 12  $\mu\text{m}$  Amplitude generierte Wände. Einschalten nach 10 Einzellagen (mittig), nach 24 Einzellagen (rechts), nach 37 Einzellagen (links)

Für SvW1A12\_10 wurden zehn Lagen ohne Ultraschall generiert. Für Lage elf und folgende Lagen wurde der Ultraschall mit einer Amplitude von 12  $\mu\text{m}$  eingeschaltet. Beim Auftrag von Lage elf wurden Drahtdezentrierung und daraus resultierend inhomogene Materialverteilung beobachtet. Das Auftragen von Lage zwölf wurde durch die Materialanhäufungen und Materiallücken in Lage elf deutlich negativ beeinflusst. Beim Auftragen von Lage 13 kam es zu einem Balling-Ereignis, das in einem Prozessabbruch resultierte.

Bei SvW1A12\_24 erfolgte das Einschalten des Ultraschalls in Lage 25. Analog zu Lage elf in SvW1A12\_10 erfolgte der Auftrag stark unregelmäßig und resultierte in einer inhomogenen Materialverteilung über die Auftragstrecke. In Folge kam es in Lage 26 zu einem Balling-Ereignis ohne Prozessabbruch. Gefolgt von einem Balling-Ereignis in Lage 27 mit vollständigem Prozessabbruch.

Für SvW1A12\_37 wurde der Ultraschall in Lage 38 eingeschaltet. Für diese Lage wurden sprühende Funken und nahezu kein Auftrag beobachtet. Abbildung 65 zeigt das Auftragen von Lage 39.



**Abbildung 65: Auftrag von Lage 39 von SvW1A12\_37 mit Kennzeichnung von erkennbaren Prozessfehlern**

Bei Kontakt mit dem Substrat sind Teile des Drahtes zersplittert. In Abbildung 65 sind die noch glühenden Bruchstücke erkennbar. Da deutlich weniger Energie für das Aufschmelzen des Drahtes verbraucht wurde, kam es zur Ausbildung eines deutlich vergrößerten Schmelzbades, das teilweise an den Flanken der vorher generierten Wandstruktur herunterlief. Der Prozess wurde in Folge zum Schutz der Systemtechnik manuell abgebrochen. Die Ursache für das Auftreten dieser Prozessfehler liegt wahrscheinlich in der Veränderung der Frequenz und Amplitude, die in dieser Aufbauhöhe aus der Schallausbreitung resultierten.

Die mit diesem Ansatz aufgetragenen Wände haben gezeigt, dass eine Schallintensität von höchstens  $3018 \text{ W/cm}^2$  die für einen stabilen Prozess notwendigen Prozessparameter sofort und deutlich verändert. Die beim Auftragen von SvW1A12\_37 beobachteten Prozessfehler zeigen, dass für Wände mit einer Einzelspur je Lage eine maximale Aufbauhöhe existiert, für die wahrscheinlich kein Parametersatz existiert, mit dem bei aktiver Beschallung stabiler Auftrag möglich ist. Diese maximale Aufbauhöhe liegt deutlich unter der für das Generieren einer Struktur für die Entnahme von Miniaturzugproben notwendigen minimalen Aufbauhöhe.

### 5.3.4 Quader

Das Generieren von Quadern wurde bereits in der Versuchsplanungsphase angestrebt. Aufgrund des in 5.1.2 und 5.2.2 beobachteten schnellen Absinkens der Resonanzfrequenz mit zunehmender aufgetragener Masse, wurden jedoch zunächst keine Quader generiert. Mit Hinblick auf die Prozessstabilität bieten Quader den Vorteil, dass eine deutlich größere Fläche für den Auftrag der Einzelspuren zur Verfügung steht. Im Vergleich zu einer Wand aus drei Einzelspuren je Lage nimmt ein deutlich kleinerer Anteil der Einzelspuren eine Position direkt am Rand der Struktur ein.

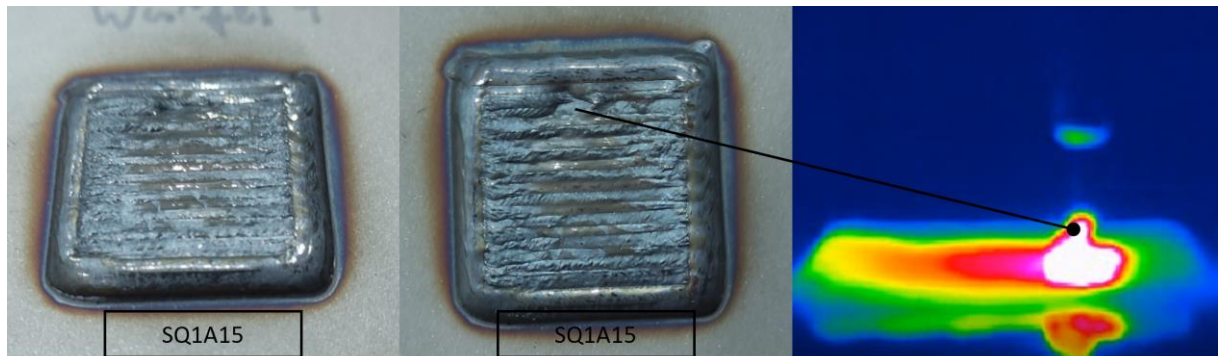
Tabelle 18 führt die an das Generieren eines Quaders angepassten Prozessparameter auf.

**Tabelle 18: Prozessparameter für das Generieren eines Quaders**

|                                     |             |                            |          |
|-------------------------------------|-------------|----------------------------|----------|
| <b>Laserleistung</b>                | 700 W       | <b>Lasereinlaufstrecke</b> | 0,45 mm  |
| <b>Vorschubgeschwindigkeit</b>      | 450 mm/min  | <b>Laserauslaufstrecke</b> | 1,5 mm   |
| <b>Drahtvorschubgeschwindigkeit</b> | 650 mm/min  | <b>Schutzgasstrom</b>      | 25 l/min |
| <b>Streckenmasse</b>                | 0,0102 g/mm | <b>Defokussierung</b>      | 2 mm     |
| <b>Streckenenergie</b>              | 1,75 J/mm   | <b>Lagenhöhe</b>           | 0,92 mm  |
| <b>Drahteinlaufstrecke</b>          | 0,5 mm      | <b>Einzelspurbreite</b>    | 2,5 mm   |
| <b>Drahtauslaufstrecke</b>          | 0,2 mm      | <b>Überlappung</b>         | 50 %     |

Die Verfahrenstrategie für das Generieren eines Quaders wurde in 4.3.2 beschrieben. Die gegenüber den Prozessparametern für Wände mit verzögertem Einschalten des Ultraschalls reduzierte Laserleistung und der erhöhte Drahtvorschub sind notwendig, um Balling-Ereignisse in Lagen nach der ersten zu vermeiden. Ab der zweiten Lage wird die Laserleistung um 100 W reduziert. Das Auftragen der ersten Lage erfolgt ohne Ultraschall. Zusätzlich zur Prozesskamera wurde eine Infrarot(IR)-Kamera zur besseren Prozessüberwachung und -bewertung integriert.

Abbildung 66 zeigt einen mit den in Tabelle 18 aufgeführten Parametern generierten Quader sowie eine IR-Aufnahme des Auftrags in Lage zwei.



**Abbildung 66:** Zweilagiger Quader SQ1A15, erste Lage ohne Ultraschall, zweite Lage mit einer Ultraschallamplitude von  $4,5\ \mu\text{m}$  (links). IR-Aufnahmen des Auftrags in Lage zwei mit Balling-Ereignis (rechts)

Die zweite Lage wurde vollständig mit einer Amplitude von  $4,5\ \mu\text{m}$  aufgetragen. Die Rauigkeit der Oberfläche ist sichtbar erhöht gegenüber einem Referenzquader ohne Ultraschall. Die Ursache der erkennbaren Materialücke ist ein Balling-Ereignis ohne Prozessabbruch. Dieses ist in Abbildung 66 auf der rechten Seite in der IR-Aufnahme zu erkennen. Im Verlauf des Auftrags von Lage zwei sank die Resonanzfrequenz von  $19800\ \text{Hz}$  auf  $19100\ \text{Hz}$ , gefolgt von einem Resonanzverlust mit Abschluss der Lage. Ein erneuter Resonanzsuchlauf konnte keine Resonanzfrequenz im Arbeitsbereich des Generators finden. Die Kontur wurde entsprechend ohne Ultraschall generiert.

Auf eine metallografische Auswertung wurde verzichtet. Der geringe Abstand von der Substratoberfläche und die geringe Ultraschallamplitude lassen eine wenig beeinflusste Mikrostruktur erwarten.

Das Generieren einer Einzellage eines Quaders senkt die Resonanzfrequenz des Schwingensystems deutlich. Es ist unwahrscheinlich, dass bei den gewählten Abmaßen das Generieren von mehr als drei Lagen möglich ist. Die resultierende geringe Aufbauhöhe macht Quader als prozessstabilisierende Geometrie ungeeignet. Das Verwenden einer IR-Kamera als zusätzliche Prozessüberwachung liefert wertvolle Informationen über die Schmelzbadgröße und die Entstehung von Balling-Ereignissen.

### 5.3.5 Parameteroptimierung anhand von Wänden mit Infrarotkamera

Mit Verwendung einer IR-Kamera lässt sich der Prozess besser beobachten und hinsichtlich Prozessstabilität bewerten. Aufgrund dieser am Auftrag von Quadern gemachten Beobachtung wurde eine Parameteroptimierung anhand von Wänden aus einer Einzelspur je Lage mit IR-Prozessüberwachung durchgeführt. Tabelle 19 führt die Startparameter für diese Parameteroptimierung auf.

Tabelle 19: Start-Prozessparameter für Parameteroptimierung anhand von Wänden mit IR-Kamera

|                              |             |                                       |          |
|------------------------------|-------------|---------------------------------------|----------|
| Laserleistung                | 700 W       | Lasereinlaufstrecke                   | 0,45 mm  |
| Vorschubgeschwindigkeit      | 450 mm/min  | Laserauslaufstrecke                   | 1,5 mm   |
| Drahtvorschubgeschwindigkeit | 600 mm/min  | Schutzgasstrom                        | 25 l/min |
| Streckenmasse                | 0,0094 g/mm | Defokussierung                        | 2 mm     |
| Streckenenergie              | 1,75 J/mm   | Lagenhöhe                             | 0,43 mm  |
| Drahteinlaufstrecke          | 0,5 mm      | Korrekturfeld                         | ±12 mm   |
| Drahtauslaufstrecke          | 0,2 mm      | Verlangsamungsrate des Korrekturfelds | 14 %     |

Der Prozess der Parameteroptimierung wird am Beispiel von zwei Wänden dargestellt. Abbildung 67 zeigt IR-Prozessaufnahmen dieser mit unterschiedlichen Parametern generierten Wänden im Verlauf des Aufbaus. Die ersten zwei Lagen wurden jeweils ohne Ultraschall generiert. Die Ultraschallamplitude ab der dritten Lage betrug 12 µm.

SIR1A12 wurde mit den in Tabelle 19 aufgeführten Parametern generiert. Die Lasterleistung wurde ab der zweiten Lage um 100 W und ab der dritten Lage um weitere 100 W reduziert.

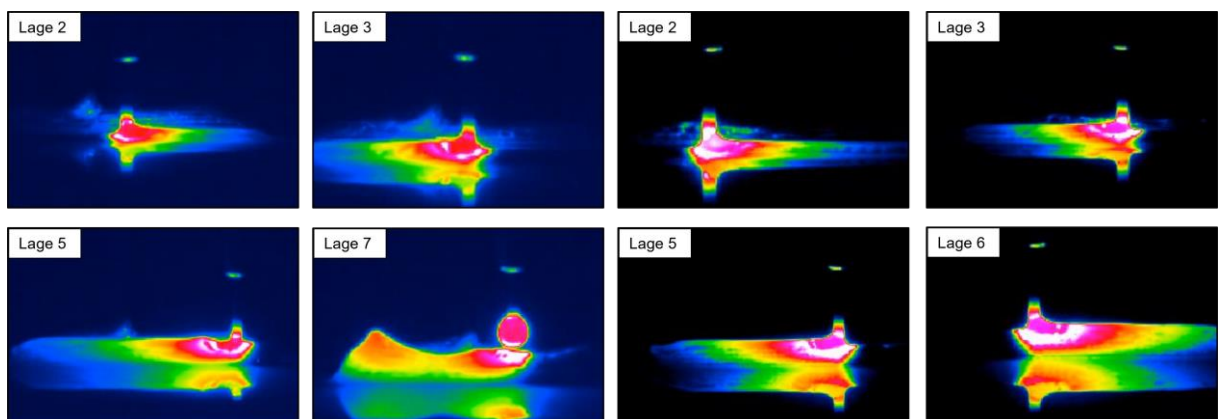


Abbildung 67: IR-Prozessaufnahmen von zwei Wänden mit unterschiedlichen Parametern in verschiedenen Lagen. SIR1A12 (links) und SIR2A12 (rechts)

Der Prozess in Lage zwei von SIR1A4,5 ohne Ultraschall zeigt ein normal großes Schmelzbad und einen homogenen Auftrag. In Lage drei ist bei eingeschaltetem Ultraschall bereits ein vergrößertes Schmelzbad erkennbar. Das Schmelzbad in Lage fünf ist größer als in Lage drei und zeigt zusätzlich eine unregelmäßige Geometrie. Die aufgetragene Struktur

zeigt kleine Unterschiede in der Auftragshöhe. In Lage sieben ist der Prozessabbruch durch ein Balling-Ereignis zu sehen. Im Auftragsstart- bzw. Auftragsendbereich ist eine Materialanhäufung erkennbar. Im Bereich zwischen dieser Materialanhäufung und der Strukturmitte fehlt entsprechend Material. Die inhomogene Materialverteilung macht ein Fortsetzen des Auftrags unmöglich.

Als Hauptursache für die Prozessinstabilität wurde eine zu große Streckenenergie kombiniert mit einer zu hohen Streckenmasse identifiziert. Eine weitere Ursache ist die negative Beeinflussung der Auftragsstart- und Auftragsendroutine durch den Ultraschall. Dieser Teil des Prozesses ist besonders anfällig für Veränderungen in den Prozessbedingungen. Anhand dieser Beobachtungen wurde für SIR2A12 die Laserleistung ab der dritten Lage um zusätzlich 100 W auf 400 W reduziert. Der Drahtvorschub wurde auf 500 mm/min angepasst. Die Einzelspurlänge wurde von 30 mm auf 40 mm erhöht, um den Auftragsbeginn und das Auftragsende ohne Ultraschall, bei annähernd gleicher mit Ultraschall aufgetragener Strecke, erfolgen zu lassen. In Lage zwei von SIR2A12 unterscheidet sich der Prozess nicht bedeutend von dem in SIR1A12. In Lage drei ist das Schmelzbad gegenüber Lage zwei nicht erkennbar gewachsen. Das Schmelzbad in Lage fünf ist deutlich größer, aber weiterhin regulär geformt. Diese Beobachtung setzt sich in Lage sechs fort, die generierte Struktur zeigt leichte Unterschiede in der Aufbauhöhe.

Verglichen mit SIR1A12 ist eine deutlich höhere Prozessstabilität erkennbar. Das Schmelzbad wächst jedoch weiterhin mit zunehmender Aufbauhöhe und würde nach wenigen weiteren Lagen erneut zu Prozessinstabilität und inhomogenem Auftrag führen. Der Korrekturansatz wäre eine weitere Reduzierung der Laserleistung für mit Ultraschall generierte Lagen. Da jedoch Prozessstart und -ende ohne Ultraschall erfolgen werden, fehlt die zusätzliche ins Schmelzbad übertragene Energie. Dies resultiert in Problemen, besonders beim Auftragsstart. Eine mögliche Lösung wäre eine weggesteuerte Anpassung der Laserleistung. Dieser Ansatz konnte aufgrund eines erneuten Defektes des Ultraschallsystems nicht im Rahmen der Bearbeitungszeit weiterverfolgt werden.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG, AUSBLICK UND ABGELEITETE HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

In dieser Arbeit wurde nach Literaturrecherche der Ansatz gewählt, Ultraschall durch die Anregung des gesamten Substrates auf das Schmelzbad zu übertragen. Ein entsprechendes Ultraschallsystem mit austauschbarem Substrat wurde konzipiert und der Beschaffungsauftrag mit passenden Leistungskriterien an die Beschaffungsstelle übergeben. Es folgte die Integration des gelieferten Ultraschallsystems in die zur Verfügung stehende Fertigungsanlage.

Als Probengeometrie für die in situ Ultraschallbeeinflussung wurden zunächst Einzelspuren und dünne Wände aus einer Einzelspur je Lage gewählt. Nach dem Etablieren eines initialen Parametersatzes, erfolgte anhand von Einzelspuren die Untersuchung des Ultraschalleinflusses in Abhängigkeit der Amplitude. Dabei konnte gezeigt werden, dass unabhängig von der Höhe der Ultraschallamplitude eine makroskopisch sichtbare Beeinflussung des Schweißergebnisses erfolgt. Dies wurde durch die mikroskopische Auswertung der Querschnittsgeometrie bestätigt. Weiterhin konnte beobachtet werden, dass das Schweißergebnis und die Prozessstabilität deutlich durch die Position der aufzutragenden Struktur im Schallfeld beeinflusst werden. Veränderungen in der Masse und Geometrie des Schwingensystems senkten die Resonanzfrequenz deutlich stärker als in den Leistungskriterien gefordert.

Die Untersuchung des Ultraschalleinflusses in Abhängigkeit der Amplitude wurde für dünne Wände wiederholt. Die generierten Proben wurden zunächst makroskopisch bewertet. Anschließend wurden durch die Gruppe Werkstoffcharakterisierung und -prüfung lichtmikroskopische Übersichtsaufnahmen, Detailaufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop und Elektronenrückstreuungsbilder von unterschiedlichen Gefügebereichen erstellt. Diese wurden für eine Referenzprobe ohne Ultraschall sowie für zwei Proben mit 12  $\mu\text{m}$  und 21  $\mu\text{m}$  Ultraschallamplitude qualitativ und quantitativ ausgewertet. Dabei wurde gezeigt, dass eine Anregung des gesamten Substrates, die in einer Schallintensität kleiner  $2770 \text{ W/cm}^2$  resultiert, bereits in der Lage ist, die Korngröße und Orientierung beim LDA zu beeinflussen. Bei einer Schallintensität kleiner  $8653 \text{ W/cm}^2$  entstehen feinere Körner mit einem kleineren Aspektverhältnis und einer deutlich reduzierten Textur gegenüber einer Probe ohne Ultraschall. Die mittlere Korngröße wurde von  $86,5 \pm 33 \mu\text{m}$  auf  $54 \pm 16 \mu\text{m}$  reduziert und das Aspektverhältnis von  $1,93 +0,57 -0,48$  auf  $1,7 +1,2 -0,68$  gesenkt. Die Beeinflussung der Korngröße, Kornform und Textur erfolgt mit

steigender Schallintensität in Richtung eines feinen, gleichachsigen Gefüges ohne ausgeprägte Textur.

Beim Generieren der Proben wurde ein deutlicher negativer Einfluss des Ultraschalls auf die Prozessstabilität beobachtet. Um diesen Einfluss zu kompensieren oder zumindest zu reduzieren, wurden verschiedene Ansätze zur Prozessstabilisierung verfolgt, u. a. eine stärkere Defokussierung zum Auftragen breiterer Spuren und das Generieren dickerer Wände aus drei Einzelspuren je Lage. Anhand von dünnen Wänden, für die der Ultraschall erst nach Erreichen einer bestimmten Auftragshöhe in den Prozess eingebracht wird, wurde gezeigt, dass mit dem vorhandenen Ultraschallsystem der Auftrag von dünnen Wänden nur bis zu einer Auftragshöhe kleiner 15 mm möglich ist. Mit Verwendung einer IR-Kamera als zusätzliche Prozessüberwachung konnte durch Anpassung der Hauptprozessparameter und der Durchführung des Auftragsstarts und -endes ohne Ultraschall eine Verbesserung der Prozessstabilität erreicht werden. Dieser Ansatz konnte aufgrund eines Defektes des Ultraschallsystems im Rahmen der Bearbeitungszeit nicht weiterverfolgt werden. Das Beobachten der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der aufgetragenen Masse hat gezeigt, dass nur ca. 9 g Material verlässlich aufgetragen werden können, bevor die Resonanzfrequenz des Schwingensystems außerhalb des Arbeitsbereichs des Ultraschallgenerators liegt. Damit wird die durch die Leistungskriterien geforderte Laufstabilität bei Veränderung der Masse um bis zu 150 g nicht erbracht.

Es wurde gezeigt, dass eine in situ Mikrostrukturbeeinflussung mittels Ultraschall für das LDA mit dem vorhandenen Ultraschallsystem möglich ist. Aus den Beobachtungen bezüglich der Prozessstabilität und dem Verhalten der Resonanzfrequenz ergibt sich, dass das vorhandene System für das Generieren von größeren Realbauteilen ungeeignet ist. Die Verbesserung der Prozessstabilität erfordert weitere umfangreiche Versuche mit intensiver Schmelzbadüberwachung, z. B. durch eine Infrarotkamera. Das Durchführen der Auftragsstart- und Auftragsendroutine ohne Ultraschall erfordert eine Anpassung der Streckenenergie innerhalb einer Einzellage. Diese könnte durch die Einbindung eines E-MAqS-Temperaturerfassungssystems realisiert werden.

Das Generieren von Strukturen größer 9 g erfordert die Anpassung des bestehenden Systems oder das Konzipieren eines neuen Ansatzes zur Ultraschalleinbringung in das Schmelzbad. Soll der Ansatz einer Anregung des gesamten Substrates weiterverfolgt werden, ist für das Generieren größerer Bauteile eine Skalierung des Ultraschallsystems erforderlich. Dieses könnte z. B. als schwingfähiger Maschinentisch mit hoher Toleranz gegenüber Masse- und Geometrieänderungen konzipiert werden. Aufgrund bestehender Patente ist der Ansatz einer lokalen Sonde mit oder ohne Schmelzbadkontakt nicht empfehlenswert. Eine Ultraschalleinbringung über den Draht ist bisher wenig untersucht und

hat das Potential, eine Reihe von Vorteilen gegenüber der Anregung des gesamten Substrates zu bieten, wie z. B. Unabhängigkeit von der aufgetragenen Masse und einen geringeren Energiebedarf. Ein solches System erfordert jedoch intensive Zusammenarbeit mit Experten für Ultraschallsysteme, um eine den Anforderungen entsprechende Funktionalität sicherzustellen.

Die vorgeschlagenen Handlungsstrategien lassen sich in die folgenden drei Ansätze aufteilen:

1. Anpassung und Optimierung des bestehenden Systems:
  - umfassende Parameterstudie zur Prozessstabilisierung
  - Charakterisierung des Schallfeldes in Abhängigkeit der Aufbauhöhe, z. B. mittels Laser-Akustik
  - Einbindung zusätzlicher Prozessregelung, z. B. E-MAqS, und Prozessüberwachung, z. B. Infrarotkamera
  - Einbindung des Ultraschallgenerators in die Maschinensteuerung (Steuern des Ultraschalls über NC-Programm)
  - konstantes Erfassen von Resonanzfrequenz und theoretischer Schallintensität für Reproduzierbarkeit
  - Anpassung des Systems durch den Hersteller (Erfüllen der Leistungskriterien)
  
2. Weiterverfolgen der Anregung des gesamten Substrates:
  - Konzipierung und Entwicklung eines schwingfähigen Maschinentischs mit hoher Toleranz gegenüber Masse- und Geometrieänderung
  - Charakterisierung des Schallfeldes in Abhängigkeit der Aufbauhöhe, z. B. mittels Laser-Akustik
  - Einbindung zusätzlicher Prozessregelung, z. B. E-MAqS, und Prozessüberwachung, z. B. Infrarotkamera
  - Einbindung des schwingfähigen Maschinentischs in die Maschinensteuerung

3. Ultraschalleinleitung über den Draht:

- Konzipierung und Entwicklung eines Prozesskopfes mit Übertragen von Ultraschall über den Draht ins Schmelzbad. Schutz der Laseroptik vor Schwingungen
- Entwicklung eines Parametersatzes für diese Methode der Ultraschalleinbringung
- Bestätigung der Kornformbeeinflussung durch geeignete Versuche
- ggf. Einbindung zusätzlicher Prozessregelung, z. B. E-MAqS, und Prozessüberwachung, z .B. IR-Kamera
- ggf. Einbindung der Ultraschallregelung in die Maschinensteuerung

# LITERATURVERZEICHNIS

1. Gebhardt A, Hötter J-S, Fateri M. Generative Fertigungsverfahren: Additive manufacturing und 3D Drucken für Prototyping-Tooling-Produktion. 4., Neubearb. und erw. Aufl. München: Hanser; 2013. (*Hanser eLibrary*). Verfügbar unter: <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446436527>.
2. Kumbhar NN, Mulay AV. Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review. *J. Inst. Eng. India Ser. C* 2018; 99(4):481–7. doi: 10.1007/s40032-016-0340-z.
3. Zeyn H, Hrsg. Industrialisierung der Additiven Fertigung: Digitalisierte Prozesskette - von der Entwicklung bis zum einsetzbaren Artikel. 1. Auflage. Berlin, Wien, Zürich, Offenbach: Beuth Verlag GmbH; VDE Verlag GmbH; 2017.
4. AMPOWER. Technology overview metal Additive Manufacturing: Metal Additive Manufacturing Landscape [Stand: 30.08.2022]. Verfügbar unter: <https://am-power.de/tools/metal-additive-manufacturing/>.
5. Sculpteo. The State of 3D Printing: 2021 Edition; 2021 [Stand: 12.09.2022]. Verfügbar unter: <https://www.sculpteo.com/de/ebooks/state-of-3d-printing-report-2021/>.
6. DebRoy T, Wei HL, Zuback JS, Mukherjee T, Elmer JW, Milewski JO et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science* 2018; 92:112–224. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
7. Raji SA, Popoola API, Pityana SL, Tlotleng M. Microstructure and Mechanical Properties of Heat-Treated Ti-Al-Si Alloy Produced via Laser In Situ Alloying. *J. of Materi Eng and Perform* 2021; 30(5):3321–32. doi: 10.1007/s11665-021-05681-9.
8. Zhang Q, Wang G, Ding X, Du F, Fan S, Duan X. Advanced metal-wire laser additive manufacturing in-space. In: 9th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Subdiffraction-limited Plasmonic Lithography and Innovative Manufacturing Technology: SPIE; 2018 - 2018. S. 24 Verfügbar unter: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10842/2507758/Advanced-metal-wire-laser-additive-manufacturing-in-space/10.1117/12.2507758.full>.
9. Shaikh MO, Chen C-C, Chiang H-C, Chen J-R, Chou Y-C, Kuo T-Y et al. Additive manufacturing using fine wire-based laser metal deposition. *RPJ* 2019; 26(3):473–83. doi: 10.1108/RPJ-04-2019-0110.

10. Lunetto V, Catalano AR, Priarone PC, Settineri L. Comments About the Human Health Risks Related to Additive Manufacturing. In: Dao D, Howlett RJ, Setchi R, Vlacic L, Hrsg. Sustainable Design and Manufacturing 2018. Cham: Springer International Publishing; 2019. S. 95–104 (Smart Innovation, Systems and Technologies).
11. Airbus G. Qualification Route of SLM Additive Manufacturing for Aerospace Applications. In: 3. Internationales Symposium »Additive Manufacturing« (ISAM 2019).
12. Kennedy SK, Dalley AM, Kotyk GJ. Additive Manufacturing: Assessing Metal Powder Quality Through Characterizing Feedstock and Contaminants. *J. of Materi Eng and Perform* 2019; 28(2):728–40. doi: 10.1007/s11665-018-3841-5.
13. Sureck L. Beitrag zur Reduzierung der Vorlaufzeiten für generativ gefertigte Bauteile beim Laser-Draht-Auftragschweißen [Diplomarbeit]. Dresden: Technische Universität Dresden; 2018.
14. Shakhverdova I, Nowotny S, Thieme S, Kubisch F, Beyer E, Leyens C. Coaxial Laser Wire Deposition. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018; 1109:12026. doi: 10.1088/1742-6596/1109/1/012026.
15. Huang W, Chen S, Xiao J, Jiang X, Jia Y. Laser wire-feed metal additive manufacturing of the Al alloy. *Optics & Laser Technology* 2021; 134:106627. doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106627.
16. Zhang Y, Wei Z, Shi L, Xi M. Characterization of laser powder deposited Ti–TiC composites and functional gradient materials. *Journal of Materials Processing Technology* 2008; 206(1-3):438–44. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.055.
17. Cavaliere P. Laser Cladding of Metals. 1st ed. 2021. Cham: Springer International Publishing; Imprint: Springer; 2021.
18. Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. Second Edition. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer; 2015. Verfügbar unter: <https://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1617/2014953293-b.html>.
19. Amine T, Newkirk JW, Liou F. An investigation of the effect of direct metal deposition parameters on the characteristics of the deposited layers. *Case Studies in Thermal Engineering* 2014; 3:21–34. doi: 10.1016/j.csite.2014.02.002.
20. Adam F. Laser-Präzisionsauftragschweißen mit zentrischer Drahtzufuhr: BMBF-Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ ; Ergebnisbericht zum Verbundvorhaben „Flexible 3D-Bearbeitung durch laserbasierte Fügeverfahren mit integrierter Werkstoffzufuhr“ ; FLEXILAS ; Laser-Präzisionsauftragschweißen mit

- zentrischer Werkstoffzufuhr. Dresden; 2009. Verfügbar unter: <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-139746.html>.
21. Bliedtner J, Müller H, Barz A. Lasermaterialbearbeitung: Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele ; mit 110 Tabellen. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl.; 2013.
  22. Nurminen J, Riihimäki J, Näkki J, Vuoristo P. Hot-wire cladding process studies. In: International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics: Laser Institute of America; 2007. S. 1702.
  23. Nie Z, Wang G, McGuffin-Cawley JD, Narayanan B, Zhang S, Schwam D et al. Experimental study and modeling of H13 steel deposition using laser hot-wire additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* 2016; 235:171–86. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.04.006.
  24. Marquardt F. Untersuchung zur generativen Herstellung von Mikrostrukturen durch Laser-Feindrahtauftragschweißen [Diplomarbeit]. Dresden: HTW Dresden; 2015.
  25. Deutsches Institut für Normung. Schweißen und verwandte Prozesse\_ - Begriffe\_ - Teil\_100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN\_EN\_14610:2005. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2008 02/2008.
  26. Mahamood RM. Laser metal deposition process of metals, alloys, and composite materials. Cham: Springer International Publishing; 2018. (*Engineering Materials and Processes*). Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5024553>.
  27. Stepien L, Gruber S, Greifzu M, Riede M, Roch A. Pure Copper: Advanced Additive Manufacturing. In: V. Shishkovsky I, Hrsg. Advanced Additive Manufacturing: In-techOpen; 2022.
  28. Kern M. Gas- und Magnetofluidynamische Maßnahmen Zur Beeinflussung der Nahtqualität Beim Laserstrahlschweißen. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; 1999. (*Laser in der Materialbearbeitung Ser*). Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6586870>.
  29. Lochmann K. Formelsammlung Fertigungstechnik: Formeln - Richtwerte - Diagramme ; mit zahlreichen Tabellen. 3., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl.; 2012.
  30. Wahl R. Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung [Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss]. Stuttgart: Teubner; 1994. (*Laser in der Materialbearbeitung*).

31. Diltthey U. Schweißtechnische Fertigungsverfahren: Schweiß- und Schneidtechnologien. Zweite Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg; 1994. (*Springer eBook Collection Computer Science and Engineering*).
32. Zhang D, Sun S, Qiu D, Gibson MA, Dargusch MS, Brandt M et al. Metal Alloys for Fusion-Based Additive Manufacturing. *Adv. Eng. Mater.* 2018; 20(5):1700952. doi: 10.1002/adem.201700952.
33. Gorsse S, Hutchinson C, Gouné M, Banerjee R. Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. *Sci Technol Adv Mater* 2017; 18(1):584–610. doi: 10.1080/14686996.2017.1361305.
34. Åkerfeldt P, Antti M-L, Pederson R. Influence of microstructure on mechanical properties of laser metal wire-deposited Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A* 2016; 674:428–37. doi: 10.1016/j.msea.2016.07.038.
35. Xu X, Mi G, Luo Y, Jiang P, Shao X, Wang C. Morphologies, microstructures, and mechanical properties of samples produced using laser metal deposition with 316 L stainless steel wire. *Optics and Lasers in Engineering* 2017; 94:1–11. doi: 10.1016/j.optlaseng.2017.02.008.
36. Belsvik MA, Tucho WM, Hansen V. Microstructural studies of direct-laser-deposited stainless steel 316L-Si on 316L base material. *SN Appl. Sci.* 2020; 2(12). doi: 10.1007/s42452-020-03530-3.
37. Bohnet M, Ullmann F, Hrsg. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. 6., compl. rev. ed. Weinheim: Wiley-VCH; 2003.
38. Kuttruff H. Ultraschall. In: Müller G, Möser M, Hrsg. Taschenbuch der Technischen Akustik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2004. S. 751–65.
39. Franc J-P, Michel J-M. Fundamentals of Cavitation. Dordrecht: Springer Science + Business Media Inc; 2005. (*Fluid Mechanics and Its Applications; Bd. 76*). Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-2233-6>.
40. ULTRAWAVES. Ultraschall: Umweltfreundliche Technologie steigert die Effizienz und senkt Kosten [Stand: 16.09.2022]. Verfügbar unter: <https://ultrawaves.de/de/ultraschall/>.
41. SlurryFlo Control Valves. WHAT IS VALVE CAVITATION? [Stand: 15.09.2022]. Verfügbar unter: <https://www.slurryflo.com/cavitation>.
42. Suslick KS, Hammerton DA, Cline RE. Sonochemical hot spot. *J. Am. Chem. Soc.* 1986; 108(18):5641–2. doi: 10.1021/ja00278a055.

43. Kenneth S. Suslick. The Chemical Effects of Ultrasound: Intense ultrasonic waves traveling through liquids generate small cavities that enlarge and implode, creating tremendous heat. These extreme conditions provide an unusual chemical environment. *Scientific American* 1989; (Februar 1989):62–8.
44. Freudig B, Tesch S, Schubert H. Herstellen von Emulsionen in Hochdruckhomogenisatoren – Teil 2: Bedeutung der Kavitation für die Tropfenzerkleinerung. *Chemie Ingenieur Technik* 2002; 74(6):880–4. doi: 10.1002/1522-2640(200206)74:6<880::AID-CITE880>3.0.CO;2-O.
45. Hielscher T. Ultrasonic Production of Nano-Size Dispersions and Emulsions. *Dans European Nano Systems Workshop - ENS 2005* 2005. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/0708.1831v1>.
46. Eskin GI, Eskin DG. Ultrasonic treatment of light alloy melts. 2. ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press; 2015. (*Advances in metallic alloys*). Verfügbar unter: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1605168>.
47. Barbosa J, Puga H. Ultrasonic Melt Treatment of Light Alloys. *Inter Metalcast* 2019; 13(1):180–9. doi: 10.1007/s40962-018-0248-x.
48. Eskin DG. Overview of Ultrasonic Degassing Development. In: Ratvik AP, Hrsg. Light Metals 2017. Cham: Springer International Publishing; 2017. S. 1437–43 (The Minerals, Metals & Materials Series).
49. Fundació Privada Ascamm, Hrsg. ULTRAGASSING: “Development of a degassing system for aluminium casting processing based on ultrasound”; 12.11.2013 [Stand: 16.08.2022]. Verfügbar unter: <https://cordis.europa.eu/project/id/286344/de>.
50. Ning F, Hu Y, Liu Z, Cong W, Li Y, Wang X. Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Engineered Net Shaping of Inconel 718 Parts: A Feasibility Study. *Procedia Manufacturing* 2017; 10:771–8. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.074.
51. Tilita GA, Chen W, Kwan C, Yuen M. The effect of ultrasonic excitation on the microstructure of selective laser melted 304 L stainless steel. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 2017; 48(5):342–8. doi: 10.1002/mawe.201600763.
52. Xu J, Zhou J, Tan W, Huang S, Wang S, He W. Ultrasonic vibration on wear property of laser cladding Fe-based coating. *Surface Engineering* 2020; 36(12):1261–9. doi: 10.1080/02670844.2018.1475102.
53. Zhang, Guo, Chen, Kang, Cao, Qi et al. Ultrasonic-Assisted Laser Metal Deposition of the Al 4047Alloy. *Metals* 2019; 9(10):1111. doi: 10.3390/met9101111.

54. Gorunov AI. Additive manufacturing of Ti6Al4V parts using ultrasonic assisted direct energy deposition. *Journal of Manufacturing Processes* 2020; 59:545–56. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.10.024.
55. Todaro CJ, Easton MA, Qiu D, Zhang D, Bermingham MJ, Lui EW et al. Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound. *Nat Commun* 2020; 11(1):142. doi: 10.1038/s41467-019-13874-z.
56. Yao Z, Wang Z, Chen J, Sui Y, Yao J. Equiaxed microstructure formation by ultrasonic assisted laser metal deposition. *Manufacturing Letters* 2022; 31:56–9. doi: 10.1016/j.mfglet.2021.07.002.
57. Yuan D, Shao S, Guo C, Jiang F, Wang J. Grain refining of Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser and wire additive manufacturing assisted with ultrasonic vibration. *Ultrason Sonochem* 2021; 73:105472. doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105472.
58. Laserline GmbH. LDF Diodenlaser mit Strahlkonverter: Laserline GmbH [Stand: 18.05.2021]. Verfügbar unter: <https://www.laserline.com/de-int/ldf-serie-mit-strahlkonverter/>.
59. BANDELIN electronic GmbH & Co. KG. Hochleistungs-Ultraschall für Labor und Verfahrenstechnik; 02/2022 [Stand: 10.05.2022]. Verfügbar unter: [https://bandelin.com/prospekte/Labor-Prospekt\\_DE\\_BANDELIN.pdf](https://bandelin.com/prospekte/Labor-Prospekt_DE_BANDELIN.pdf).
60. Deutsches Institut für Normung. Nichtrostende Stähle\_ Teil\_3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung; Deutsche Fassung EN\_10088-3:2014. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2014. (77.140.20, 77.140.50, 77.140.65) 12/2014.
61. Charles Vivès. Grain Refinement in Aluminum Alloys by Means of Electromagnetic Vibrations Including Cavitation Phenomena. *The Member Journal of The Minerals, Metals & Materials Society* 1998; Februar 1998(vol. 50 no. 2) [Stand: 01.09.2022]. Verfügbar unter: <https://www.tms.org/pubs/journals/jom/9802/vives/vives-9802.html>.
62. Pericleous K, Bojarevics V, Djambazov G, Dybalska A, Griffiths WD, Tonry C. Contactless Ultrasonic Cavitation in Alloy Melts. *Materials (Basel)* 2019; 12(21). doi: 10.3390/ma12213610.
63. Ferguson J, Schultz B, Cho K, Rohatgi P. Correlation vs. Causation: The Effects of Ultrasonic Melt Treatment on Cast Metal Grain Size. *Metals* 2014; 4(4):477–89. doi: 10.3390/met4040477.

64. Atar S, Luo H, Nagai T, Siegel RJ. Ultrasonic thrombolysis: catheter-delivered and transcutaneous applications. *European Journal of Ultrasound* 1999; 9(1):39–54. doi: 10.1016/S0929-8266(99)00007-5.
65. Rywotycki M, Malinowski Z, Giełżecki J, Gołdasz A. Modelling Liquid Steel Motion Caused by Electromagnetic Stirring in Continuous Casting Steel Process. *Archives of Metallurgy and Materials* 2014; 59(2):487–92. doi: 10.2478/amm-2014-0080.
66. Blairs S. Sound velocity of liquid metals and metalloids at the melting temperature. *Physics and Chemistry of Liquids* 2007; 45(4):399–407. doi: 10.1080/00319100701272084.
67. Nasch PM, Manghnani MH, Secco RA. Sound velocity measurements in liquid iron by ultrasonic interferometry. *J. Geophys. Res.* 1994; 99(B3):4285–91. doi: 10.1029/93JB03111.
68. DIN EN ISO 643:2020-06, Stahl\_ - Mikrophotographische Bestimmung der erkennbaren Korngröße (ISO\_643:2019, korrigierte Fassung 2020-03); Deutsche Fassung ISO\_643:2020. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

# TABELLENVERZEICHNIS

|             |                                                                                                                                                 |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1:  | Gegenüberstellung ausgewählter üblicher Parameter für pulverbettbasierte Verfahren und Verfahren des direkten Energieeintrages [5, S. 119]..... | 4  |
| Tabelle 2:  | Häufige Bauteildefekte beim LDA [20, S. 4] .....                                                                                                | 16 |
| Tabelle 3:  | Eigenschaften der Strahlenquelle [44] .....                                                                                                     | 34 |
| Tabelle 4:  | Chemische Zusammensetzung von 1.4404 nach DIN EN 10088-3 [46] .....                                                                             | 37 |
| Tabelle 5:  | Chemische Zusammensetzung von 1.4430 nach DIN EN 10088-3 [46] .....                                                                             | 38 |
| Tabelle 6:  | Neutrale Leistungskriterien für die Ausschreibung .....                                                                                         | 45 |
| Tabelle 7:  | Initialer Parametersatz für das LDA mit Ultraschall.....                                                                                        | 51 |
| Tabelle 8:  | Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der aufgetragenen Einzelspuren für Substrat E1 .....                                                           | 59 |
| Tabelle 9:  | Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der aufgetragenen Einzelspuren für Substrat E2 .....                                                           | 59 |
| Tabelle 10: | Spurhöhe, Spurbreite und Nahtformkoeffizient in Abhängigkeit der Amplitude auf Substrat E1 .....                                                | 63 |
| Tabelle 11: | Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der aufgetragenen Masse für Substrat W1 .....                                                                  | 66 |
| Tabelle 12: | Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der aufgetragenen Masse für Substrat W2 .....                                                                  | 67 |
| Tabelle 13: | Abmaße und Nahtformkoeffizient für ausgewählte Einzellagen von SW1A0.....                                                                       | 70 |
| Tabelle 14: | Abmaße und Nahtformkoeffizient für aus gewählte Einzellagen von SW2A21 .....                                                                    | 78 |
| Tabelle 15: | Prozessparameter für die stärkere Defokussierung .....                                                                                          | 84 |
| Tabelle 16: | Prozessparameter für Wände mit drei Einzelspuren je Lage .....                                                                                  | 86 |
| Tabelle 17: | Prozessparameter für Wände mit verzögertem Einschalten des Ultraschalls .....                                                                   | 89 |
| Tabelle 18: | Prozessparameter für das Generieren eines Quaders.....                                                                                          | 92 |
| Tabelle 19: | Start-Prozessparameter für Parameteroptimierung anhand von Wänden mit IR-Kamera .....                                                           | 94 |

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

|               |                                                                                                                                                          |    |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1:  | Allgemeines Prinzip der additiven Fertigung.....                                                                                                         | 2  |
| Abbildung 2:  | Verfahrensübersicht additive Fertigung [4].....                                                                                                          | 3  |
| Abbildung 3:  | Verfahrensprinzip des LDA mit koaxialer Drahtzufuhr [13, S. 9].....                                                                                      | 6  |
| Abbildung 4:  | Ishikawa-Diagramm der Einflussfaktoren beim LDA [24] .....                                                                                               | 9  |
| Abbildung 5:  | Schmelzbadgeometrie mit fokussiertem (links) und defokussiertem (rechts) Laserstrahl. ....                                                               | 13 |
| Abbildung 6:  | Resultierende Spurgeometrie für kleine $Q_{BD}$ (links) und große $Q_{BD}$ (rechts) .....                                                                | 14 |
| Abbildung 7:  | EBSD-Bilder der Fügezone einer mittels LPA generierten 316L Probe ((a) inverse Pole figure, (b) image quality mapping) [36].....                         | 18 |
| Abbildung 8:  | EBSD-Bilder oberhalb der Fügezone einer mittels LPA generierten 316L Probe ((a) inverse Pole figure, (b) image quality mapping) [36].....                | 19 |
| Abbildung 9:  | Ausbreitung einer ungedämpften Schallwelle als Funktion der Zeit .....                                                                                   | 20 |
| Abbildung 10: | Schematische Darstellung von diagnostischem Ultraschall (links) und Leistungultraschall (rechts).....                                                    | 21 |
| Abbildung 11: | Prinzip der durch Ultraschall induzierten Kavitation [40] .....                                                                                          | 22 |
| Abbildung 12: | Schematische Darstellung des nicht sphärischer Kollaps einer Kavität in der Nähe eines Partikels größer 100 $\mu\text{m}$ [41].....                      | 23 |
| Abbildung 13: | Fünfsichtige NC-Anlage 19389 MTH .....                                                                                                                   | 32 |
| Abbildung 14: | Darstellung des Prozesskopfes COAXwire mit relevanten Komponenten [13, S. 39].....                                                                       | 34 |
| Abbildung 15: | Darstellung des Drahtförderers mit relevanten Komponenten .....                                                                                          | 35 |
| Abbildung 16: | Spezialboosterhorn SH 400 G-S.....                                                                                                                       | 36 |
| Abbildung 17: | zylindrisches Rundsubstrat und Sonotrode .....                                                                                                           | 37 |
| Abbildung 18: | Anregung des kompletten Substrates nach Ning, Hu et al. [50, S. 4].....                                                                                  | 39 |
| Abbildung 19: | Konzept einer Sonotrode mit austauschbarem Substrat.....                                                                                                 | 40 |
| Abbildung 20: | Simulation eines durch elektromagnetische Induktion generierten Schallfelds [62, S. 2] .....                                                             | 41 |
| Abbildung 21: | Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für Ultraschallanregung einer Metallschmelze [63, S. 2].....                                              | 42 |
| Abbildung 22: | Schematische Darstellung eines Draht-Ultraschallsystems für Thrombolyse [64, S. 2] .....                                                                 | 43 |
| Abbildung 23: | Konzepte für die Ultraschalleinkopplung in den Draht: a) Führung durch eine Sonotrode mit Haken, b) Führung durch eine Sonotrode mit Andruckrollen. .... | 44 |

|               |                                                                                                                                                                             |    |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 24: | Ultraschallsystem bestehend aus GM 4400, UW 400, SH 400 G-S, Substrat sowie Netz- und Verbindungskabel. ....                                                                | 46 |
| Abbildung 25: | In die Fertigungsanlage integrierte Ultraschall-Systemtechnik und Prozessüberwachung mit Kennzeichnung der relevanten Achsen. ....                                          | 47 |
| Abbildung 26: | Einrichten der Fokusebene und der Drahtzentrierung .....                                                                                                                    | 48 |
| Abbildung 27: | Korrekturfeld für eine Einzelspur bei Vernachlässigung der Achsendynamik.....                                                                                               | 51 |
| Abbildung 28: | Schematische Darstellung der Verfahrrategie für eine Einzelspur .....                                                                                                       | 52 |
| Abbildung 29: | Schematische Darstellung der Verfahrrategie für Wände .....                                                                                                                 | 52 |
| Abbildung 30: | Schematische Darstellung der Verfahrrategie für Quader .....                                                                                                                | 53 |
| Abbildung 31: | Bezeichnung generierter Strukturen am Beispiel SE1A9 .....                                                                                                                  | 54 |
| Abbildung 32: | Übersichtsdarstellung des Amplitudenspektrums aus Einzelspuren von 0 bis 24 $\mu\text{m}$ mit Reihenfolge des Auftrags auf Substrat E1 .....                                | 55 |
| Abbildung 33: | Draufsicht auf Substrat E1 mit Kennzeichnung auffälliger Merkmale. Die weiße, gestrichelte Linie zeigt den Schnitt für die nachfolgende metallografische Untersuchung. .... | 56 |
| Abbildung 34: | Übersichtsdarstellung des Amplitudenspektrum aus Einzelspuren von 0 bis 24 $\mu\text{m}$ mit Reihenfolge des Auftrags auf Substrat E2.....                                  | 57 |
| Abbildung 35: | Draufsicht auf Substrat E2 mit Kennzeichnung auffälliger Merkmale ...                                                                                                       | 58 |
| Abbildung 36: | Resonanzfrequenz über aufgetragene Masse für Substrat E1 (links) und Substrat E2 (rechts).....                                                                              | 60 |
| Abbildung 37: | Mikroskopisches Schliffbild von SE1A0, SE1A6 und SE1A9 .....                                                                                                                | 61 |
| Abbildung 38: | Mikroskopisches Schliffbild von SE1A12, SE1A15 und SE1A18 .....                                                                                                             | 61 |
| Abbildung 39: | Mikroskopisches Schliffbild von SE1A21, SE1A24 und SE1A3 .....                                                                                                              | 62 |
| Abbildung 40: | Substrat W1 mit Amplituden von 3 $\mu\text{m}$ bis 12 $\mu\text{m}$ und Referenzwand aus verschiedenen Ansichten.....                                                       | 64 |
| Abbildung 41: | Substrat W2 mit Amplituden von 15 $\mu\text{m}$ bis 24 $\mu\text{m}$ und Referenzwand aus verschiedenen Ansichten.....                                                      | 65 |
| Abbildung 42: | Resonanzfrequenz über aufgetragene Masse für Substrat W1 (links) und Substrat W2 (rechts).....                                                                              | 67 |
| Abbildung 43: | Minimale Bauteilgeometrie für das Heraustrennen einer Miniaturzugprobe .....                                                                                                | 68 |
| Abbildung 44: | Maximal auftragbare Masse verglichen mit minimal notwendiger Masse für eine Miniaturzugprobe .....                                                                          | 68 |
| Abbildung 45: | Lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme (links) der ohne Amplitude generierten Wand SW1A0 und Detailaufnahmen (rechts) interessanter Bereiche mit REM .....                  | 69 |

|               |                                                                                                                                                                                                  |    |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 46: | Farbschlüssel für EBSD-Aufnahmen .....                                                                                                                                                           | 71 |
| Abbildung 47: | EBSD-Aufnahme der Wand SW1A0 ohne Amplitude 4 mm von der Substratoberfläche .....                                                                                                                | 72 |
| Abbildung 48: | Polfiguren der Wand SW1A0 4 mm von der Substratoberfläche .....                                                                                                                                  | 72 |
| Abbildung 49: | Lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme (links) der mit 12 $\mu$ m Amplitude generierten Wand SW1A12 und Detailaufnahmen (rechts) interessanter Bereiche mit REM .....                            | 74 |
| Abbildung 50: | EBSD-Aufnahme der Wand SW1A12 mit 12 $\mu$ m Amplitude 4 mm von der Substratoberfläche .....                                                                                                     | 75 |
| Abbildung 51: | Polfiguren der Wand SW1A12 4 mm von der Substratoberfläche .....                                                                                                                                 | 76 |
| Abbildung 52: | Lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme (links) der mit 21 $\mu$ m Amplitude generierten Wand SW2A21 und Detailaufnahmen (rechts) interessanter Bereiche mit REM .....                            | 77 |
| Abbildung 53: | EBSD-Aufnahme der Wand mit 21 $\mu$ m Amplitude 4 mm von der Substratoberfläche .....                                                                                                            | 79 |
| Abbildung 54: | Polfiguren der Wand SW2A21 4 mm von der Substratoberfläche .....                                                                                                                                 | 79 |
| Abbildung 55: | Drahtverhalten während des Auftrags bei aktiver Beschallung mit 12 $\mu$ m- Amplitude in Lage drei einer Wand.....                                                                               | 82 |
| Abbildung 56: | Schematische Darstellung unterschiedlicher Spurbreiten bei gleicher Dezentrierung des Drahtes .....                                                                                              | 83 |
| Abbildung 57: | Schematische Darstellung der Defokussierung und resultierendes Schmelzbad .....                                                                                                                  | 83 |
| Abbildung 58: | Mit 3 mm Defokussierung und 12 $\mu$ m Amplitude generierte Wand SD1A12.....                                                                                                                     | 84 |
| Abbildung 59: | Laufender Prozess einer mit 3 mm Defokussierung und 12 $\mu$ m Amplitude generierten Wand SD2A12 nach Reparatur des Ultraschallsystems.....                                                      | 85 |
| Abbildung 60: | Schematische Darstellung der Verfahrrategie für eine Wand aus drei Einzelspuren je Lage .....                                                                                                    | 86 |
| Abbildung 61: | Wänden mit drei Einzelspuren je Lage. Referenzwand (links) und Wände mit 12 $\mu$ m-Amplitude (mittig und rechts) .....                                                                          | 87 |
| Abbildung 62: | Unterschiedliche Ansichten einer Wand aus drei Einzelspuren je Lage mit Beschallung der mittleren Einzelspur mit 12 $\mu$ m Amplitude...                                                         | 88 |
| Abbildung 63: | REM-Aufnahmen von Wand SdW2A12_T 5 mm von der Substratoberfläche: Mitte (links) und Rand (rechts) .....                                                                                          | 88 |
| Abbildung 64: | Mit verzögertem Einschalten des Ultraschalls und 12 $\mu$ m Amplitude generierte Wände. Einschalten nach 10 Einzellagen (mittig), nach 24 Einzellagen (rechts), nach 37 Einzellagen (links)..... | 90 |

|               |                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 65: | Auftrag von Lage 39 von SvW1A12_37 mit Kennzeichnung von erkennbaren Prozessfehlern .....                                                                                                         | 91 |
| Abbildung 66: | Zweilagiger Quader SQ1A15, erste Lage ohne Ultraschall, zweite Lage mit einer Ultraschallamplitude von 4,5 µm (links). IR-Aufnahmen des Auftrags in Lage zwei mit Balling-Ereignis (rechts) ..... | 93 |
| Abbildung 67: | IR-Prozessaufnahmen von zwei Wänden mit unterschiedlichen Parametern in verschiedenen Lagen. SIR1A12 (links) und SIR2A12 (rechts) .....                                                           | 94 |

## ANHÄNGE

### Anhang 1: PatBase-Suchverlauf

| # | Suchanfrage                                                                                                                                                                                        | Ergebnisse |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7 | (TAC=(ultrasound) OR TAC=(ultrasonic) OR TAC=(ultra sonic) OR TAC=(Ultraschall) OR TAC=(Hyperschall) OR TAC=(Schallwellen) OR TAC=(Vibration)) AND 6                                               | 106        |
| 6 | (IC=(C21D10/00) OR IC=(B22F7/00) OR IC=(B23K20/10)) AND 5                                                                                                                                          | 426        |
| 5 | IC=(B22F10/28) OR IC=(B33Y10/00) OR IC=(B33Y80/00) OR IC=(B22F10/20) OR IC=(B22F12/00) OR IC=(B22F12/82) OR IC=(B22F12/50) OR IC=(B23K26/21) OR IC=(B23K26/34) OR IC=(B23K26/342)                  | 54.520     |
| 4 | (TAC=(Additive Manufacturing) OR TAC=(printing) OR TAC=(welding) OR TAC=(deposition) OR TAC=(Additive Fertigung) OR TAC=(Schweißen) OR TAC=(Drucken) OR TAC=(Auftragen) OR TAC=(Generieren)) AND 3 | 60         |
| 3 | (TAC=(refinement) OR TAC=(Feinung) OR TAC=(modulation) OR TAC=(Beeinflussung) OR TAC=(influence) OR TAC=(manipulation)) AND 2                                                                      | 268        |
| 2 | (TAC=(grain size) OR TAC=(Korngröße) OR TAC=(grain) OR TAC=(Korn)) AND 1                                                                                                                           | 3.988      |
| 1 | TAC=(ultrasound) OR TAC=(ultrasonic) OR TAC=(Ultraschall)                                                                                                                                          | 492.867    |

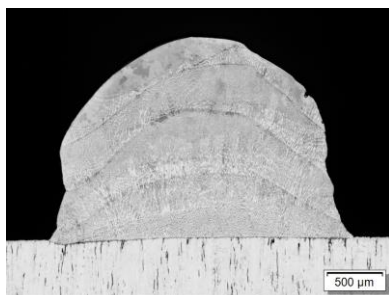
Anhang 2: Lichtmikroskopische Übersichtsaufnahmen von SW1A3, SW1A6, SW1A9 und SW1A12



SW1A3



SW1A6

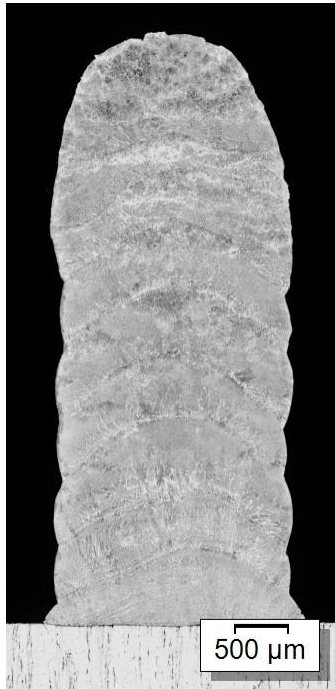


SW1A9



SW1A12

Anhang 3: Lichtmikroskopische Übersichtsaufnahmen von SW2A15, SW2A18, SW2A21 und SW2A0



SW2A15



SW2A18



SW2A21



SW2A0

**Anhang 4: durch Linien in Querrichtung vollständig geschnittene Körner für SW1A0**

| Linie in Querrichtung | Vollständig geschnittene Körner |
|-----------------------|---------------------------------|
| Linie 1               | 12                              |
| Linie 2               | 10                              |
| Linie 3               | 10                              |
| Linie 4               | 11                              |
| Linie 5               | 10                              |
| Summe                 | 53                              |

**Anhang 5: durch Linien in Aufbaurichtung vollständig geschnittene Körner für SW1A0**

| Linie in Aufbaurichtung | Vollständig geschnittene Körner |
|-------------------------|---------------------------------|
| Linie 1                 | 9                               |
| Linie 2                 | 11                              |
| Linie 3                 | 8                               |
| Linie 4                 | 9                               |
| Linie 5                 | 13                              |
| Summe                   | 50                              |

**Anhang 6: durch Linien in Querrichtung vollständig geschnittene Körner für SW1A12**

| Linie in Querrichtung | Vollständig geschnittene Körner |
|-----------------------|---------------------------------|
| Linie 1               | 13                              |
| Linie 2               | 18                              |
| Linie 3               | 11                              |
| Linie 4               | 14                              |
| Linie 5               | 22                              |
| Summe                 | 78                              |

**Anhang 7: durch Linien in Aufbaurichtung vollständig geschnittene Körner für SW1A12**

| Linie in Aufbaurichtung | Vollständig geschnittene Körner |
|-------------------------|---------------------------------|
| Linie 1                 | 10                              |
| Linie 2                 | 10                              |
| Linie 3                 | 12                              |
| Linie 4                 | 8                               |
| Linie 5                 | 6                               |
| Summe                   | 46                              |

**Anhang 8: durch Linien in Querrichtung vollständig geschnittene Körner für SW2A21**

| Linie in Querrichtung | Vollständig geschnittene Körner |
|-----------------------|---------------------------------|
| Linie 1               | 13                              |
| Linie 2               | 18                              |
| Linie 3               | 11                              |
| Linie 4               | 14                              |
| Linie 5               | 22                              |
| Summe                 | 78                              |

**Anhang 9: durch Linien in Aufbaurichtung vollständig geschnittene Körner für SW2A21**

| Linie in Aufbaurichtung | Vollständig geschnittene Körner |
|-------------------------|---------------------------------|
| Linie 1                 | 26                              |
| Linie 2                 | 13                              |
| Linie 3                 | 17                              |
| Linie 4                 | 16                              |
| Linie 5                 | 18                              |
| Summe                   | 90                              |