

## **Bachelorarbeit**

Anja-Maria Mertens

**Wissenschaftliche Untersuchung und Bewertung  
des Verhaltens von unterschiedlichen Auftragsma-  
terialien beim Laser-Pulver-Auftragschweißen zur  
Rekonditionierung von Schiffsdieselbauteilen aus  
Grauguss**

# **Anja-Maria Mertens**

## **Wissenschaftliche Untersuchung und Bewertung des Verhaltens von unterschiedlichen Auftragsmaterialien beim Laser-Pulver-Auftragschweißen zur Rekonditionierung von Schiffsdieselbauteile aus Grauguss mit Lamellengraphit**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Produktionstechnik  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

LZN Laser Zentrum Nord GmbH  
Am Schleusengraben 14  
21029 Hamburg

Erstprüfer/in: Dr. Dipl. Ing. Lutz Müller

Zweitprüfer/in : Dipl.-Ing. Dirk Herzog

Abgabedatum: 20. Januar 2016

# **Zusammenfassung**

**Anja-Maria Mertens**

## **Thema der Bachelorthesis**

Wissenschaftliche Untersuchung und Bewertung des Verhaltens von unterschiedlichen Auftragsmaterialien beim Laser-Pulver-Auftragsschweißen zur Rekonditionierung von Schiffsdieselbauteile aus Grauguss

## **Stichworte**

Laser-Pulver-Auftragschweißen, Rekonditionierung, Grauguss mit Lamellengraphit

## **Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit umfasst eine wissenschaftliche Untersuchung zu einem Laser-Pulver-Auftragschweiß-Prozess. Der Grundwerkstoff ist ein Grauguss mit Lamellengraphit, auf den drei unterschiedliche Pulverauftragswerkstoffe aufgeschweißt werden. Dafür werden Anforderungen und Qualitätsziele formuliert, die eingehalten werden müssen.

**Anja-Maria Mertens**

## **Title of the paper**

Scientific assessment and evaluation of the behavior of different materials in order laser powder cladding reconditioning of marine diesel components made of cast iron with lamellar graphite

## **Keywords**

Laser powder cladding, reconditioning, grey cast iron with lamellar graphite

## **Abstract**

This work includes a scientific investigation to a laser powder build-up welding process. The base material is a cast iron with lamellar graphite, are welded onto the three different powder application materials. For requirements and quality objectives are formulated which must be respected.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	vi
Nomenklatur	vii
Abkürzungsverzeichnis	viii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Struktur der Vorgehensweise	2
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>4</b>
2.1 Laser-Pulver-Auftragschweißen (LPA)	4
2.1.1 Verfahrensmerkmale des LPA-Verfahren	4
2.1.2 Verfahrensprinzip	7
2.1.3 Technische Komponenten	9
2.1.4 Laserquellen	10
2.1.5 Arbeitsgase	11
2.2 Grauguss mit Lamellengraphit	12
2.2.1 Eigenschaften von Grauguss mit Lamellengraphit	12
2.2.2 Schweißen von Grauguss mit Lamellengraphit	15
2.3 Vorversuche am Laser Zentrum Nord	17
2.3.1 Vorversuch 1	17
2.3.2 Vorversuch 2	18
<b>3 Schadensanalyse</b>	<b>19</b>
3.1 Unterschiedlichen Schadensfälle an einem Schiffsdieselmotor	19
3.1.1 Schadensfälle aus thermischer Belastung	19
3.1.2 Schadensfälle aus mechanischer Belastung	20
<b>4 Erstellung eines Anforderungskataloges</b>	<b>22</b>
4.1 Fertigungstechnische Zielparameter der Auftragsnaht	22
4.2 Qualitätsziele der Auftragsnaht	24
4.2.1 Bewertungskatalog für Unregelmäßigkeiten	27
<b>5 Auswahl der Pulverwerkstoffe</b>	<b>29</b>
5.1 Eigenschaften der Pulverwerkstoffe	29
5.2 Punktbewertung für die Auswahl der Pulverwerkstoffe	32
5.2.1 Gewählte Pulver	43
5.2.2 Partikelgrößenbestimmung der Pulver	46

<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchung.....</b>	<b>47</b>
6.1	Anlagen und Systemtechnik .....	47
6.1.1	Laserstrahlquelle.....	47
6.1.2	Pulverförderung .....	48
6.1.3	Bearbeitungskopf .....	49
6.2	Auswertung und Versuchsplanung.....	50
6.2.1	Prüfmethoden für die Beurteilung der Auftragsnaht .....	50
6.2.2	Einflussfaktoren .....	53
6.2.3	Aufstellung des theoretischen Versuchsplanes .....	55
6.2.4	Nomenklatur .....	58
6.3	Vorversuch.....	58
6.3.1	Einfluss der Laserleistung.....	60
6.3.2	Einfluss der Geschwindigkeit .....	61
6.3.3	Einfluss des Fokusabstandes .....	62
6.3.4	Fazit der Vorversuche .....	62
<b>7</b>	<b>Auswertung .....</b>	<b>63</b>
7.1	Versuch 1 Auftragswerkstoff <i>Stellite 21</i> <sup>®</sup> .....	63
7.1.1	Legierungselemente und Einstellparameter.....	63
7.1.2	Ergebnisse der Auswertung .....	63
7.1.3	Adaption der Einzelnaht auf die Flächennaht.....	67
7.2	Versuch 2 Auftragswerkstoff Edelstahl .....	70
7.2.1	Legierungselemente und Einstellparameter.....	70
7.2.2	Ergebnisse der Auswertung der Einzelnaht .....	70
7.2.3	Adaption der Einzelnaht auf die Flächennaht.....	75
7.3	Versuch 3 Auftragspulver Eisen-Nickel-Legierung ( <i>INVAR</i> <sup>®</sup> ) .....	77
7.3.1	Legierungselemente und Einstellparameter.....	77
7.3.2	Ergebnisse der Auswertung der Einzelnaht .....	77
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>81</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>83</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
<b>11</b>	<b>Datenblätter der Auftragswerkstoffe .....</b>	<b>87</b>

## Abbildungsverzeichnis

---

<b>Abbildung 1</b> Laser-Pulver-Auftragschweißen [Firma <i>Trumpf</i> ] .....	4
<b>Abbildung 2</b> Prinzipdarstellung des Laserstrahl-Auftragschweißens mit Pulver [Firma <i>Trumpf</i> ].....	7
<b>Abbildung 3</b> Form der Auftragsspur .....	7
<b>Abbildung 4</b> Wechselwirkung von Laserstrahl/Materie [SLV GSI] .....	9
<b>Abbildung 5</b> Prinzipieller Aufbau des Lasers [LZH Hannover].....	11
<b>Abbildung 6</b> Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, Bereich des Graugusses [Europa Verlag, Metallkunde]	12
<b>Abbildung 7</b> Lamellares Gusseisen [5] .....	13
<b>Abbildung 8</b> Zeit-Temperatur-Kristallisationsschaubild [GSI SLV] .....	16
<b>Abbildung 9</b> Rissdetektierung nach Farbeindringverfahren [LZN Hamburg].....	17
<b>Abbildung 10</b> Schiffsdieselmotor [LZN Hamburg] .....	19
<b>Abbildung 11</b> Thermische Ausdehnung des Kolbens [11] .....	19
<b>Abbildung 12</b> Kräfte am Kolben .....	20
<b>Abbildung 13</b> Grenzschmierspalt zwischen Kolben und Zylinder .....	20
<b>Abbildung 14</b> Rauigkeit einer Oberfläche .....	22
<b>Abbildung 15</b> Vorgänge in der WEZ schmelzgeschweißter Graugusswerkstoffe [29].....	25
<b>Abbildung 16</b> Schematische Darstellung einer Pore.....	26
<b>Abbildung 17</b> Grafische Darstellung der Längenänderung [Europa Verlag] .....	30
<b>Abbildung 18</b> Globulare Pulverpartikel.....	30
<b>Abbildung 19</b> Eisen-Graphit-Legierung .....	43
<b>Abbildung 20</b> Zusammensetzung des Pulvers .....	44

<b>Abbildung 21</b> Lichtmikroskopische Aufnahmen von Stellite 21 .....	44
<b>Abbildung 22</b> Wärmeausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit vom Nickelgehalt.....	45
<b>Abbildung 23</b> Korngrößenverteilung eines Pulvers .....	46
<b>Abbildung 24</b> Versuchsaufbau für den LPA-Prozess .....	47
<b>Abbildung 25</b> Schematische Darstellung des Pulverförderers.....	48
<b>Abbildung 26</b> Flexibilität des Bearbeitungskopfes.....	49
<b>Abbildung 27</b> Abstand zum Bearbeitungskopf .....	49
<b>Abbildung 28</b> Geometrie der Härteprüfung .....	50
<b>Abbildung 29</b> Unterschiedliche Bereiche der Härtemessung.....	51
<b>Abbildung 30</b> Probe einer Auftragsnaht .....	52
<b>Abbildung 31</b> Teilbereiche der Auftragsnaht.....	52
<b>Abbildung 32</b> Welligkeit einer Schweißnaht.....	53
<b>Abbildung 33</b> Schematische Abbildung der Strahlakustik [4] .....	54
<b>Abbildung 34</b> Förderrate bei einem bei einem unterschiedlichen Gasdurchfluss .....	55
<b>Abbildung 35</b> Laserleistung 3000 W .....	60
<b>Abbildung 36</b> Laserleistung 2.300 W .....	60
<b>Abbildung 37</b> Geschwindigkeit: 1,3 m/min.....	61
<b>Abbildung 38</b> Geschwindigkeit: 1,0 m/min.....	61
<b>Abbildung 39</b> Diagramm: Einfluss der Geschwindigkeit .....	61
<b>Abbildung 40</b> Fokusabstand: 33 mm .....	62
<b>Abbildung 41</b> Fokusabstand: 27 mm .....	62
<b>Abbildung 42</b> Vermessung der Auftragsnaht.....	64

<b>Abbildung 43</b> Nummerierung der Härtewerte .....	65
<b>Abbildung 44</b> Aufnahme der Naht bei einer 1,25fachen Vergrößerung .....	66
<b>Abbildung 45</b> Spurgeometrie des Auftrags.....	67
<b>Abbildung 46</b> Aspektenverhältnis der Auftragsnaht/Höhenangabe .....	67
<b>Abbildung 47</b> Aufmischungsgrad des Flächenauftrages .....	68
<b>Abbildung 48</b> Härteverlauf der Flächennaht .....	68
<b>Abbildung 49</b> Fehlende Anbindung an den Rändern.....	69
<b>Abbildung 50</b> Auftragsnaht mit den Parametern aus dem 1. Versuch.....	71
<b>Abbildung 51</b> Aspektenverhältnis der Auftragsnaht .....	71
<b>Abbildung 52</b> Aufmischungsbereiche der Auftragsnaht.....	72
<b>Abbildung 53</b> Härteverlauf der Einzelspur mit Edelstahlpulver.....	73
<b>Abbildung 54</b> Riss in der Randschicht .....	73
<b>Abbildung 55</b> Porenvermessung in der Auftragsnaht.....	74
<b>Abbildung 56</b> Risserscheinung in der Flächennaht.....	75
<b>Abbildung 57</b> Übersicht der Flächennaht .....	75
<b>Abbildung 58</b> Geänderte Spurgeometrie.....	76
<b>Abbildung 59</b> Auftragsnähte mit dem Pulverwerkstoff <i>INVAR</i> <sup>®</sup> .....	77
<b>Abbildung 60</b> Vergleich der unterschiedlichen Laserleistung.....	78
<b>Abbildung 61</b> Reinnickelpulver auf Gusseisen .....	79
<b>Abbildung 62</b> Reineisen Pulver auf Grauguss .....	79
<b>Abbildung 63</b> Auftragsnaht mit Eisenpulver .....	80



## Tabellenverzeichnis

---

<b>Tabelle 1</b> Diagramm zur Struktur der Vorgehensweise .....	3
<b>Tabelle 2</b> Eigenschaften des Laser-Pulver-Auftragschweißens [2] .....	6
<b>Tabelle 3</b> Zusammenhang der verschiedenen Einflussgrößen .....	8
<b>Tabelle 4</b> Übersicht der Eigenschaften bei Grauguss mit Lamellengraphit [6].....	14
<b>Tabelle 5</b> Übersicht der unterschiedlichen Schweißverfahren bei Gusseisen .....	15
<b>Tabelle 6</b> Kennwerte der Zielparameter .....	23
<b>Tabelle 7</b> Bewertungskatalog für Unregelmäßigkeiten .....	27
<b>Tabelle 8</b> Auswahl des Pulverwerkstoffes unter Berücksichtigung der Ziele .....	29
<b>Tabelle 9</b> Übersicht der Faktorenstufenkombination.....	56
<b>Tabelle 10</b> Entstandene Faktorenstufenkombinationen .....	57
<b>Tabelle 11</b> Ausgewählte Parameter .....	58
<b>Tabelle 12</b> Einstellparameter für den Vorversuch .....	60
<b>Tabelle 13</b> Härteverlauf der Auftragsspur .....	65

## Nomenklatur

---

Symbol	Einheit	Beschreibung
d	mm	Durchmesser
W	$\frac{\text{kg}\cdot\text{m}^2}{\text{s}^3}$	Watt
$h_c$	mm	Höhe der Auftragsnaht
$d_c$	mm	Höhe der Aufmischungszone
$t_c$	mm	Gesamte Höhe der Auftragsnaht
$w_c$	mm	Breite der Auftragsnaht
$\mu\text{m}$	$\text{mm}^{-4}$	Mikrometer
$A_G$		Absorptionsgrad
R		Reflexionsgrad
$\Lambda$	$\mu\text{m}$	Wellenlänge
$R_m$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Zugfestigkeit
$R_{p0,1}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Streckgrenze
A	%	Bruchdehnung
HB		Härte von Brinell
HV		Härte von Vickers
$R_a$	mm	Arithmetischer Mittenrauwert
$v_L$	m/min	Vorschubgeschwindigkeit des Bearbeitungskopfes
$P_L$	$\text{W}/\text{mm}^2$	Strahlenleistung des Lasers
H	J/m	Streckenenergie
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
$\Delta T$	$^{\circ}\text{C}$	Temperaturdifferenz
$\rho$	$\text{g}/\text{cm}^3$	Dichte
$\alpha$	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizient

## Abkürzungsverzeichnis

---

LZN	Laserzentrum Nord
LPA	Laser-Pulver-Auftragschweißen
WWZ	Wärmewechselzone
Nd:YAG	Neodym: Yttrium-Aluminium-Granat (Laser)
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm
HV	Härte nach Vickers
HB	Härte nach Brinell
DIN	Deutsches Institut für Normung
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Eine leistungsstarke und international wettbewerbsfähige maritime Wirtschaft ist für ein außenhandelsorientiertes Land von hoher gesamtwirtschaftlicher Bedeutung und sichert das Wirtschaftswachstum und die Beschäftigung. Ziel der Zulieferindustrie des Schiffbaus ist es, den technologischen Vorsprung durch Forschung, Entwicklung und Innovation weiter zu stabilisieren. Marktpotentiale werden hier in umweltfreundlichen Produkten und Technologien gesehen. Diese sollen auf lange Sicht auch dazu beitragen, Kosten zu senken und ein effizienteres Arbeiten zu ermöglichen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass ein strategisches, ressourcenschonendes Nachhaltigkeitskonzept für den Industriestandort Deutschland ein wichtiger Bestandteil in der Entwicklung von neuen Verfahren sein sollte.



Das Verfahren des Laser-Pulver-Auftragschweißen (LPA) leistet hier einen entscheidenden Beitrag, da mit diesem Verfahren das Bauteil nicht mit hoher Material- und Energieaufwendung neu produziert werden muss, sondern durch einen Prozess repariert wird und so wieder im vollen Umfang einsatzbereit ist. Eine weitere Absicht ist es, durch den Auftrag eine verschleißfestere Oberfläche, im Gegensatz zum Grundwerkstoff zu erreichen. Für diesen Prozess wird auf den Grundwerkstoff, ein Grauguss mit Lamellengraphit, ein Pulverwerkstoff in kleinsten Partikeln aufgebracht und im gleichen Verlauf durch einen Laserstrahl lokal aufgeschmolzen, so dass nach Beenden eine neue, verschleißfestere Auftragsschicht entstanden ist. Es kann also eine gezielte und präzise Zufuhr eines Auftragswerkstoffes mit metallurgischer Anbindung erfolgen.

Das Potential hat seinen Ursprung im Grundwerkstoff. Da sich mit Grauguss komplexe Geometrien in großen Stückzahlen herstellen lassen, wird dieser Werkstoff weit verbreitet eingesetzt und ist in vielen Motoren und Schiffsdieselantrieben zu finden. Somit besteht ein großes wirtschaftliches Interesse darin, diesen Prozess zu qualifizieren. Gerade auch weil die stetig steigenden Rohstoffpreise die Unternehmen zum Umdenken zwingen und dies ein Schritt sein könnte die Kostenreduzierung in Unternehmen zu ermöglichen.

Der hauptsächliche Forschungsbedarf auf diesem Gebiet besteht darin, einen stabilen Prozess für die Auftragschweißung auf dem Grundwerkstoff Gusseisen zu realisieren. Gusseisen gilt nur als bedingt schweißgeeignet, da es ein sehr schlechtes Verformungsvermögen aufweist, das dazu führt, dass bei einer Wärmeeinbringung vermehrt Risse in der Bearbeitungszone entstehen. In der Praxis wird ein Schweißvorgang deshalb mit einer Vorwärmung des Grundwerkstoffes durchgeführt. Die Rissanfälligkeit wird so gemindert und das Ergebnis entspricht den Anforderungen an eine Schweißnaht. Eine Vorwärmung wird aber im Rahmen der Wirtschaftlichkeit, als nicht sinnvoll angesehen. Daraus folgt, dass die interdisziplinäre Herausforderung darin besteht, sowohl diesen Prozessschritt zu übergehen und dennoch einen Auftrag herzustellen, der den geforderten Bewertungskriterien entspricht.

## **1.2 Ziel der Arbeit**

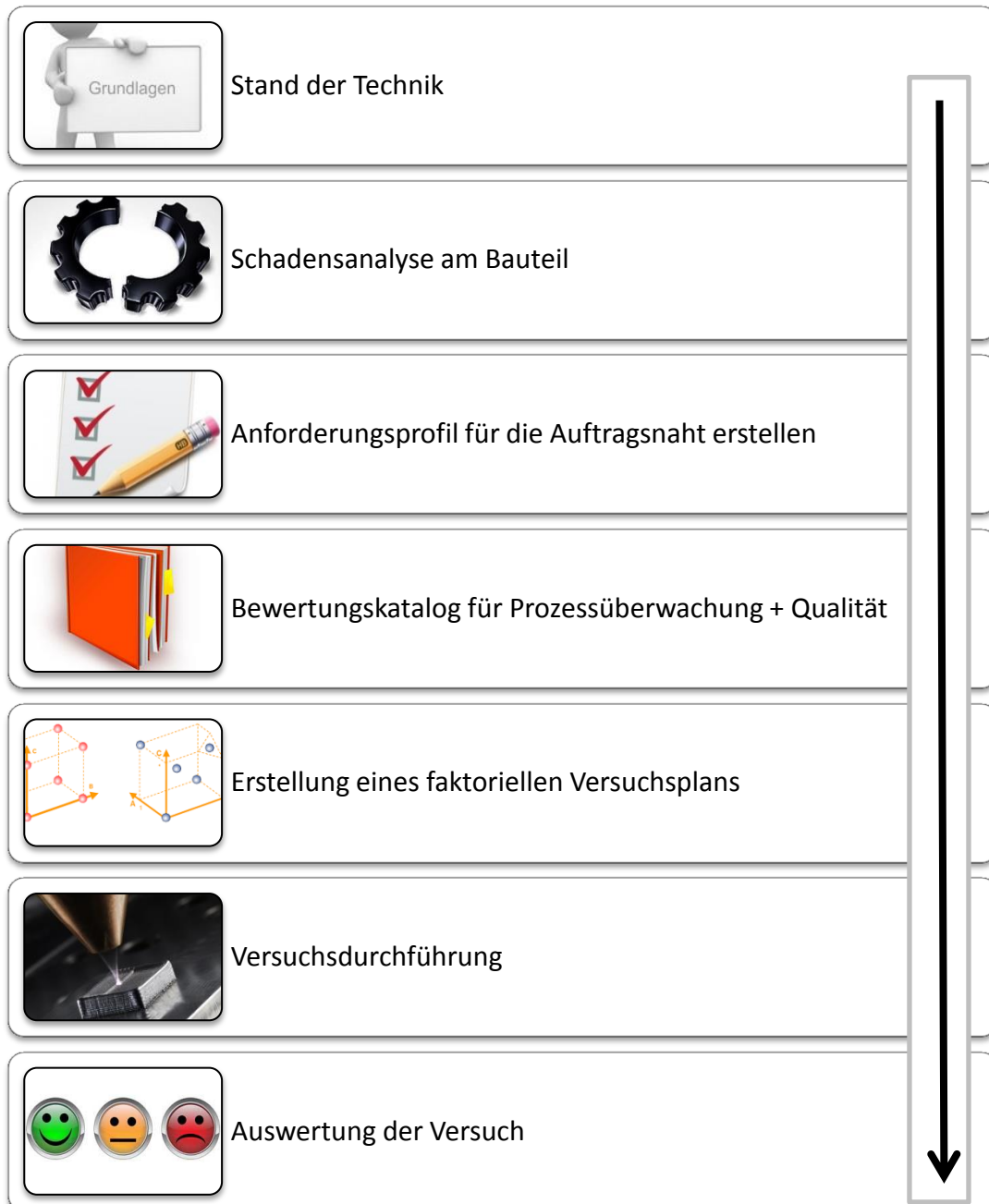
Ziel ist die Ermittlung eines Auftragspulvers, das die gestellten Anforderungen und Qualitätsziele erfüllt. Anforderungen sind in erster Linie ein stabiler und reproduzierbarer Prozess. Um dies zu bewerten, wird ein Anforderungskatalog aufgestellt und die Auftragsnaht nach erfolgtem Auftragsverfahren untersucht und bewertet. Die Methodik zur Aufstellung von Qualitätszielen wird mithilfe von DIN Normen und Erfahrungswerten erstellt und sollen als Grundlage dienen, das gestellte Qualitätsziel zu erreichen und zu überprüfen, ob die Auftragsnaht nach dem Prozess eine höhere Qualität im Gegensatz zum Grundwerkstoff aufweist. Auch erfolgen eine Reihe von Bewertungen und Untersuchungen.

## **1.3 Struktur der Vorgehensweise**

Zur Grundlage dieser Ausarbeitung dient der aktuelle Stand der Technik. Zu allen relevanten Themen entsteht eine Ausarbeitung aus der Fachliteratur und aktuellen Forschungsberichten. Um ein Anforderungsprofil für die Auftragsnaht und die zu wählenden Pulver ermittelt zu können, wird im nächsten Schritt eine Schadensanalyse am Bauteil vorgenommen und die unterschiedlichen Schadensfälle aufgezeigt. Aus diesen Ermittlungen werden nun ein Anforderungsprofil und ein Bewertungskatalog auf Grundlage von Normen und Erfahrungswerten erstellt. Der Bewertungskatalog erhält zudem eine Toleranzangabe und welche Möglichkeiten zur Überprüfung der Eigenschaften zur Verfügung stehen. Diese Instrumente sollen eine Prozessüberwachung und Qualitätssicherung sicherstellen. Im Kapitel 5 werden Pulverwerkstoffe ausgewählt die aufgrund von Forschungsberichten und/oder der Eigenschaften ihrer Legierungselemente in Frage kommen und theoretisch die Anforderungen an die Auftragsnaht erfüllen sollten. Die Auswahl erfolgt im Rahmen einer Punktbewertung auf die später noch genauer eingegangen wird. Im weiteren Verlauf werden die theoretischen Ergebnisse in die Praxis

überführt. Anhand von unterschiedlichen Versuchsreihen, werden die unterschiedlichen Pulver auf Probestücke des Bauteiles aufgetragen. Im Anschluss erfolgt die zerstörungsfreie und zerstörende Werkstoffprüfung der einzelnen Versuchsreihen im Labor. Mit diesen Ergebnissen kann anschließend eine Aussage darüber gemacht werden, ob die geforderten Ziele erreicht worden sind.

**Diagramm zur Struktur der Vorgehensweise**



**Tabelle 1** Diagramm zur Struktur der Vorgehensweise

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Laser-Pulver-Auftragschweißen (LPA)

Die Untersuchungen für diese Arbeit basieren auf dem Prozess des Laser-Pulver-Auftragschweißens (LPA), wie in **Abbildung 1** bildlich dargestellt. Dieser ordnet sich technologisch neben dem Plasma-Pulver- und dem WIG-Auftragschweißen ein [8]. Er gehört zu den generierenden Verfahren und findet meist Anwendung in der Reparatur, der Modifikation bestehender Bauteile oder zur Veredelung von Oberflächen [9]



**Abbildung 1** Laser-Pulver-Auftragschweißen [Firma Trumpf]

#### 2.1.1 Verfahrensmerkmale des LPA-Verfahren

Im Unterschied zu anderen Lichtquellen hat der Laser die Eigenschaft, einen stark gebündelten, kohärenten Lichtstrahl mit einer hohen Energiedichte auszusenden. Auf der Oberfläche wird dieser, gerade bei metallischen Werkstoffen, in einer dünnen Schicht absorbiert und dringt dabei nicht sehr tief in das Material ein. Es lassen sich innerhalb eines kurzen Zeitfensters, lokale Stellen aufheizen und dann definierte Stellen bearbeiten. Das ist der Grund, warum man ihn als thermisches Werkzeug in der Oberflächenbehandlung einsetzt [2]. Der Unterschied zum thermischen Spritzen besteht darin, dass der Zusatzwerkstoff erst in der Wechselwirkungszone des Laserstrahles auf der Bauteiloberfläche aufgeschmolzen wird und der Grundwerkstoff nur geringfügig mit dem Auftragswerkstoff in

Kontakt tritt. Dies garantiert eine metallurgische Anbindung, führt aber nicht dazu, dass eine große Aufmischungszone entsteht.

Das Hauptanwendungsgebiet liegt bei diesem Verfahren in der Reparatur von komplexen Bauteilen die durch hohe Beanspruchung ihre technisch erforderlichen Eigenschaften verloren haben. Anhand des Pulverauftrages werden die Funktionsflächen wieder hergestellt. Auch eine Reihe von Beschichtungsaufgaben, von höherwertigen auf minderwertige Werkstoffe können mit diesem Verfahren realisiert werden. Gerade hinsichtlich darauf, dass nur ein geringer Teil des Grundwerkstoffes aufgeschmolzen wird und damit auch eine bessere Wirtschaftlichkeit erzielt werden kann. Eine Endbearbeitung ist nach der Auftragschweißung immer erforderlich. Alle Werkstoffkombinationen sind möglich, wenn der Schmelzpunkt des zu beschichtenden Werkstoffes nicht viel höher ist, als der des Substrates (Grundwerkstoff). Allerdings muss man bei der schnellen und präzisen Aufheizung und Abkühlung des Werkstoffes, die Einschränkung durch die Rissproblematik, hervorgerufen durch Eigenspannung und die chemische Verträglichkeit, mit berücksichtigen. Weitere Vorteile des LPA-Verfahrens sind:

- Hochpräzises Auftragen
- Auftragschweißen ohne Einbrandkerben und mit geringster Wärmeeinbringung
- Artgleiches oder Artähnliches Auftragschweißen
- Hohe Flexibilität bezüglich der Zusatzwerkstoffe und damit die Herstellung von Verbund- und Gradientenschichten
- Hoher Automatisierungsgrad
- Reparatur von polierten Oberflächen und Realisierung von großen Schichthärten [1]

In **Tabelle 2** sind die Eigenschaften des Prozesses in tabellarischer Form dargestellt, damit man einen detaillierten Überblick für die unterschiedlichen Merkmale bekommt. Des Weiteren dient sie dazu, aufzuzeigen, welche Möglichkeiten solch ein Verfahren zur Verfügung stellt und welchen positiven Aspekt es für den Anwender mit sich bringt.

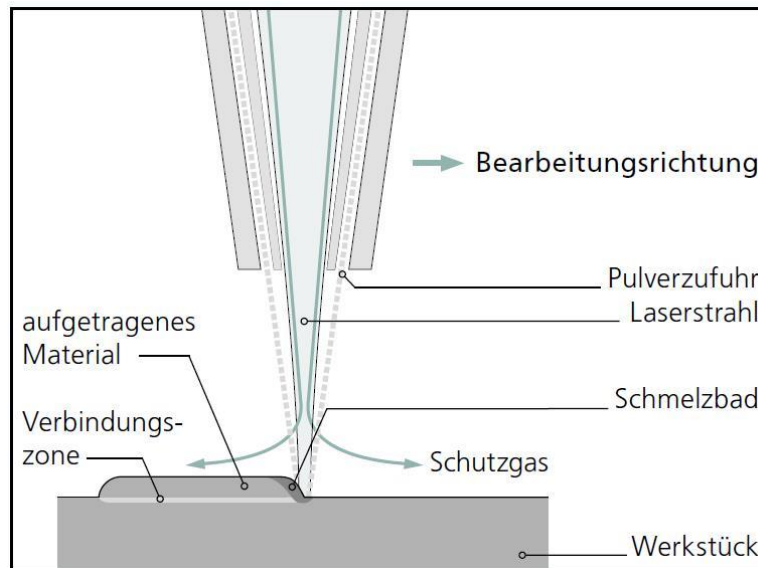


**Tabelle 2** Eigenschaften des Laser-Pulver-Auftragschweißens [2]

<b>Merkmal</b>	<b>Grenzen/Bewertung</b>	<b>Bemerkungen</b>
Lasertypen	<i>CO<sub>2</sub>, Nd:YAG, Faser, Scheibe, Diode</i>	i. d. R. mindestens 1000 W (cw)
Leistungsdichte	<i>5.000 – 1.000.000 W/cm<sup>2</sup></i>	CO <sub>2</sub> -Laser wegen geringer Absorption mit Leistungsdichten im Bereich von 1.000.000 W/cm <sup>2</sup>
Einwirkzeit	<i>0,001 bis 2 Sekunden</i>	Einzelraupe
Spurgeometrie - Spurbreite - Einzelraupenhöhe - typische Schichtdicke	<i>0,2 bis 10 mm 0,1 bis 2 mm 0,3 bis 3 mm</i>	Größere Schichtdicken durch Mehrlagentechnik, 3D-Konturbeschichtung möglich
Lokalisierbarkeit	<i>Sehr gut</i>	
Endkonturnähe	<i>Mittel bis hoch</i>	Endbearbeitung meistens erforderlich
Flächenleistung/Auftragsrate	<i>100 bis 1.200 mm<sup>2</sup>/min</i>	Abhängig von der Laserleistung, Werkstoff und Bauteilgeometrie
Wärmeeintrag in das Bauteil	<i>Gering bis mittel</i>	
Verzug, Formabweichung	<i>Gering bis mittel</i>	
Schichtgefüge	<i>Dicht, homogen</i>	
Haftfestigkeit	<i>Schmelzmetallurgische Anbindung</i>	Haftfestigkeit in der Größenordnung der Schichtfestigkeit
Aufmischung der Schicht mit dem Grundwerkstoff	<i>2 bis 30 %</i>	
Umgebungsbedingungen	<i>Meist unter normalen Atmosphärenbedingungen</i>	Zusätzliche Schutzgasabschirmung möglich, typischerweise N <sub>2</sub> , Ar oder He
Bauteilgröße	<i>Unbegrenzt</i>	Abhängig von der verfügbaren Laseranlage
Oberflächengeometrie	<i>Kleinere und/oder komplexe Funktionsflächen</i>	Großflächige Beschichtungen vor allem aus wirtschaftlicher Sicht ungünstig

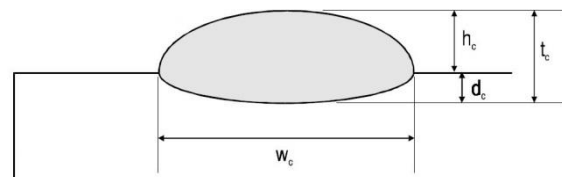
## 2.1.2 Verfahrensprinzip

Grundprinzip des Verfahrens ist das Aufschmelzen eines Pulvers durch den Laserstrahl, das auf einem eng lokalisierten Bereich eines Werkstückes stattfindet. Gelangt das zugeführte Pulver durch den Laserstrahl, wird es erwärmt und im Schmelzbad aufgeschmolzen. **Abbildung 2** zeigt eine schematische Darstellung des Verfahrens. Das Anschmelzen des Grundwerkstoffes erfolgt im Wesentlichen

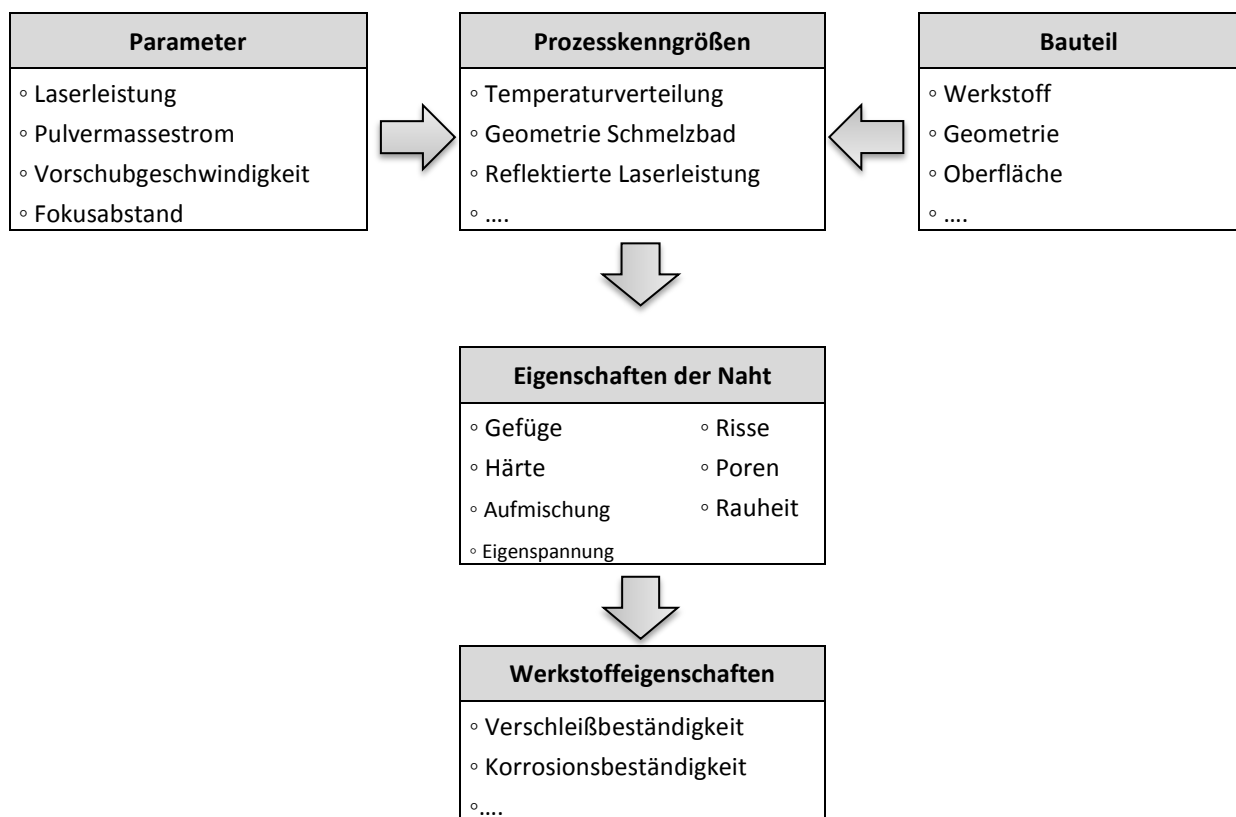


**Abbildung 2** Prinzipdarstellung des Laserstrahl-Auftragschweißens mit Pulver [Firma Trumpf]

über die Wärmeleitung und ist nur wenige Zehntelmillimeter dick. Die Wärmeableitung in das kalte Substrat garantiert das schnelle Erstarren des schmelzflüssigen Zusatzwerkstoffes und die Entstehung von raupenförmigen Auftragsspuren (**Abbildung 3** Form der Auftragsspur). Ausschlaggebend für das metallographische und geometrische Erscheinungsbild sind die komplexen Modifikationen zwischen Werkstück-, Stoff-, und Laserstrahleigenschaften, die Auslegung des Pulverstromes und die Laserstrahlabmessung. Hinzu kommen die unterschiedlichen Prozessparameter wie Pulvermassenstrom, Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit und die Wahl des Schutzgases [4]. Ein optimales Prozessergebnis ist dadurch von vielen Parametern abhängig, die es in geeigneter Weise einzustellen gilt. Der Zusammenhang der unterschiedlichen Einflussgrößen ist in der nachfolgenden **Tabelle 3** Zusammenhang der verschiedenen Einflussgrößen und stellt den Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Einstellgrößen und den einwirkenden Einflussfaktoren auf den Prozess bildlich dar.



**Abbildung 3** Form der Auftragsspur

**Tabelle 3** Zusammenhang der verschiedenen Einflussgrößen

Bei dem Verfahren hat die Zuführung des Pulvers die größte Flexibilität in der Reparatur von Schadstellen, da neben der dargestellten Variante (**Abbildung 2**) der koaxiale Zuführung, auch seitliche oder quasikoaxial angeordnete Pulverströme realisiert werden können.

Meist wird dieses Verfahren ohne Vorwärmen ausgeführt, für bestimmte Kombinationen ist aber eine Vorwärmung oder Pufferschicht sinnvoll, da sie Risse vorbeugen kann. Außerdem sollte man vermeiden das Grund- und Zusatzwerkstoff sehr unterschiedliche Schmelzpunkte und Ausdehnungskoeffizienten haben, sowie eine Neigung zur Bildung spröder Phasen im Aufmischungsbereich.

Der Werkstoff kann auf unterschiedlichen Wegen in die Wechselwirkungszone eingebracht werden. Realisiert man den Auftrag des Pulvers in zwei separaten Schritten, d. h. man vordeponiert das Pulver vor der Einwirkung des Laserstrahles, spricht man von einem zweistufigen Verfahren. Wird das Pulver aber simultan mit dem Laserstrahl in die Wechselwirkungszone eingebracht, handelt es sich um ein einstufiges Verfahren [3]

Die Schichtdicke ist wesentlich geringer als bei dem einstufigen Verfahren, da der Energietransport zum Grundwerkstoff überwiegend auf der Wärmeleitung basiert. Das Resultat daraus ist eine höhere Empfindlichkeit gegen Überhitzung, deswegen sind die erreichbaren Schichtdicken geringer [4]. Für

die vorliegende Arbeit wird ein einstufiges Verfahren angestrebt, da auch die Maschine für diesen Prozess ausgelegt ist.

Es entsteht ein sehr geringer Wärmeeintrag in das Bauteil, einhergehend ist also nur eine geringer Verzug zu erwarten und eine kleine Wärmeeinflusszone. Daher ist keine aufwendige Nachbearbeitung des Bauteiles, in Form von Wärmebehandlung, notwendig. Man kann eine sehr gute Schichthaftung aufgrund der schmelzmetallurgischen Bindung erreichen, d. h. es ist ein gezieltes Aufschmelzen der Substratoberfläche, aufgrund des präzise steuerbaren Prozesses möglich. Ddauurch ist auch eine hohe Konturentreue bei komplizierten Werkstückformen möglich. Abschließend kann man noch erwähnen, das bei exakt eingestellten Prozessparametern ein Pulverwirkungsgrad von 80 – 95 % zu erreichen ist und somit eine umweltschonende und ökonomische Technologie vorliegt [2]

### 2.1.3 Technische Komponenten

Die technischen Komponenten für das Verfahren sind der Laser, Strahlführung-und Strahlformung, Werkstückhandhabung und Steuerung und Überwachung. Wichtig ist, dass der Laser für jede Bearbeitungsaufgabe angepasst werden muss. Durch den Einsatz von Roboterführungen ist es auch möglich, das Werkstück zu bearbeiten ohne das eine Bewegung von diesem ausgeht. Notwendig sind aber in jedem Fall für das Auftragschweißen spezielle Optiken zur Strahlformung.

#### 2.1.3.1 Lasertechnik

Der Laser hat sich zu einem interdisziplinären Prozess entwickelt der erstmalig in den 70er Jahren zum Einsatz kam. Der Begriff Laser beinhaltet den Effekt der Verstärkung des Lichtes durch erzwungene Aussendung (Emission) von Strahlung.

Die Emission basiert auf einer Wechselwirkung zwischen Licht und Materie, wobei die erzwungene Strahlung durch die Materie emittiert wird. Der Einsatz von Laser in der Fügetechnik ist darauf zu-

rückzuführen, dass sich das Laserlicht auf einen Punkt fokussieren lässt und dadurch eine außerordentlich hohe Energiedichte erzeugt werden kann. Die Wirkung des Laserstrahles entsteht, wenn der Strahl auf die Oberfläche des

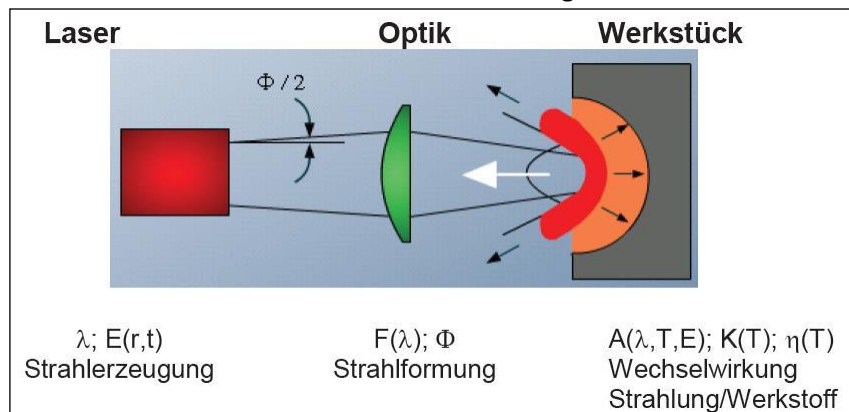


Abbildung 4 Wechselwirkung von Laserstrahl/Materie [SLV GSI]

Werkstoffes auftrifft, entsprechend des Reflexionsgrades wird ein Teil der Lichtenergie reflektiert und der verbleibende Teil dringt in den Werkstoff ein und wird dort gestreut oder absorbiert (**Abbildung 4**). Dieser Anteil wandelt sich dabei in andere Energieformen, vorwiegend in Wärme um und führt zu dem Aufschmelzen des Werkstoffes. Der Absorptionsgrad ist eine materialspezifische Größe und hängt von der Temperatur, von der Wellenlänge und Intensität des Laserstrahles ab.

### 2.1.3.2 Laser und Strahlformung

Zum Einsatz kommen bei diesem Prozess CO<sub>2</sub>-, Nd:YAG-, Faser-, Scheiben- und Dioden-Dauerstrichlaser, deren Strahlleistung zwischen im Bereich zwischen 1000 – 6000 W liegen. Alle Laser können auch zum Auftragen mit niedrigen Leistungsdichten eingesetzt werden, da sie aufgrund der kürzeren Wellenlänge eine deutlich bessere Absorption generieren, mit Ausnahme des CO<sub>2</sub>-Lasers. Der Absorptionsgrad gibt an, welche Anteile der auftreffenden Welle von dem Material aufgenommen (absorbiert) wird. Meist beträgt die Eindringtiefe weniger als 0,1 µm. Der Absorptionsgrad **A** ist somit der auf die einfallende Leistung bezogene prozentuale Anteil der Gesamtleistung, welcher in das Medium eindringt. Unter dem Reflexionsgrad **R** versteht man den prozentualen Anteil der reflektierenden zur auftreffenden Strahlleistung.

Somit gilt:  $R + A = 1$  (1. 1)

Nd:YAG-Laser: **A = 30 %**

Die Rauigkeit hat einen großen Einfluss auf den Absorptionsgrad. [3]

### 2.1.4 Laserquellen

Für die vorliegende Arbeit kommt ein Nd:YAG-Festkörperlaser zum Einsatz. Bei diesem Laser besteht das aktive Medium aus einem Festkörper. Das sind in den meisten Fällen gezüchtete Einkristalle, das sogenannte YAG-Kristall (Yttrium-Aluminium-Granat) mit dotierten, laseraktiven Nd<sup>3+</sup>-Ionen. Dieser Kristall wird im Resonatorraum durch eine mit Pumplicht umgebender Bogenlampe angeregt. Das hat zur Folge, dass Licht mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$  beim Übergang vom oberen in das untere Laserenergieniveau ausgesendet wird. Zwischen den Resonatorspiegeln bildet sich durch „stimulierte Emission“ eine stehende Welle, die durch Wechselwirkung der Ionen immer mehr angeregte Ionen erzeugt und sich dadurch selbst verstärkt. Das Auskoppeln des kohärenten Lichtes, bei Erreichen des Schwellenwertes, wird durch die Teildurchlässigkeit eines der Resonatorspiegel realisiert. Ein schematischer Aufbau ist in **Abbildung 5** zu sehen [2]. Der Vorteil gegenüber einem CO<sub>2</sub>-Laser ist, dass der

Nd:YAG-Laser kleinere Wellenlängen besitzt, damit über ein größeres Prozessfenster verfügt und dadurch weniger Leistung absorbiert wird.

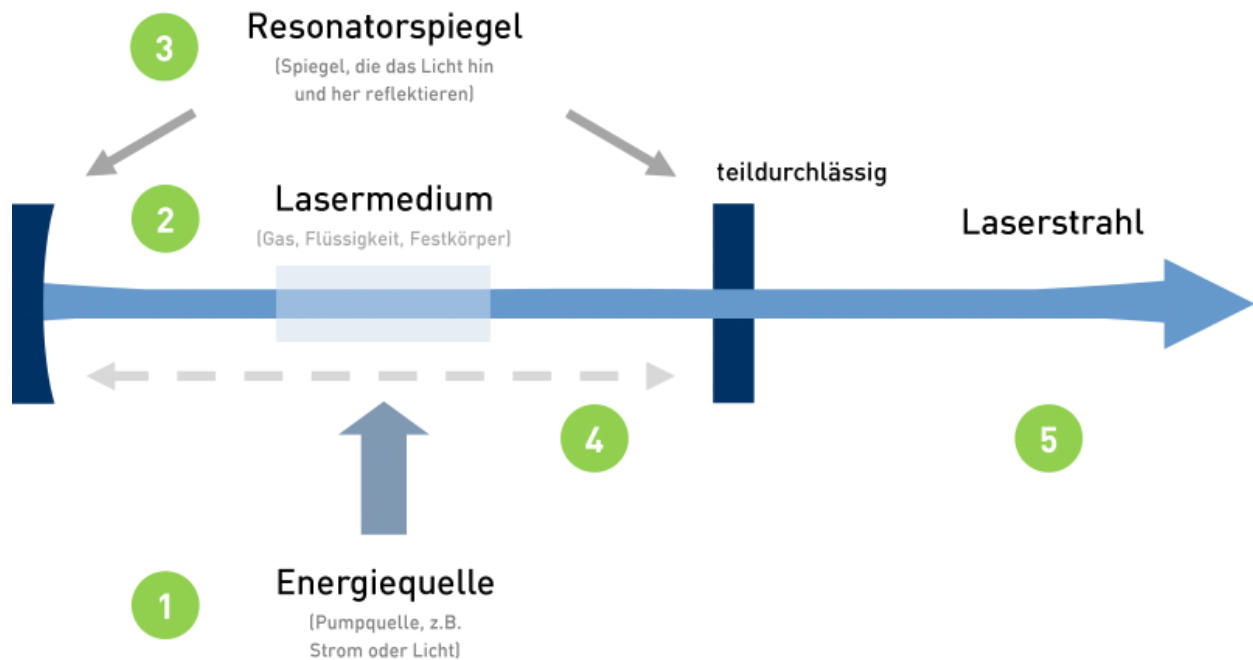


Abbildung 5 Prinzipieller Aufbau des Lasers [LZH Hannover]

### 2.1.5 Arbeitsgase

Es kommen für den LPA-Prozess unterschiedliche Schutzgase zum Einsatz. Zum einen wird ein Schutzgas als Trägergas eingesetzt, um das Auftragspulver von dem Fördertopf an den Bearbeitungskopf zu transportieren. Die Hauptaufgabe dieses Gases besteht darin einen gleichmäßigen Partikeltransport zu gewährleisten und die Partikelflugbahn nicht zu beeinflussen. Für diesen Zweck wird Helium gewählt. Zum anderen wird ein Schutzgas für den Schweißprozess eingesetzt, dieses dient dazu das Verfahren vor einer Oxidation zu schützen, gleichzeitig bietet es auch als Schutz für die Bearbeitungsoptik vor Metaldampf und Spritzern dienen [4]. Um die Kosten dafür gering zu halten, sollen diese Aufgaben bei einem geringen Gasdurchfluss realisiert werden. An dieser Stelle kommt Argon zum Einsatz.

Es wird deutlich, dass das LPA-Verfahren, durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst wird und dass der Prozess mit einer Vielzahl von technischen Komponenten ausgestattet ist, die alle im Einklang mit einander agieren müssen, um ein bestmögliches Ergebnis zu erreichen.

## 2.2 Grauguss mit Lamellengraphit

### 2.2.1 Eigenschaften von Grauguss mit Lamellengraphit

Beim dem Grundwerkstoff der in unserem Verfahren zum Einsatz kommt, handelt es sich um Grauguss mit Lamellengraphit, der nach DIN EN 1561: 2012-01 genormt ist und die Bezeichnung GJL trägt. Eisen kann nur maximal 2,06 % Kohlenstoff in sein Kristallgitter aufnehmen. Ist in einer Legierung mehr Kohlenstoff enthalten, lagert sich dieser in unterschiedlichen Formen in der Legierung ab, in diesem Fall spricht man von Gusseisen. Der Kohlenstoffgehalt beträgt also zwischen 2,06 bis 6,67 % (in technischen Anwendungen wird das Gebiet auf 2,5 bis 5 % eingeschränkt) [15], der in dem vorliegenden Grundwerkstoff als eingelagerte Graphitlamellen vorkommt.

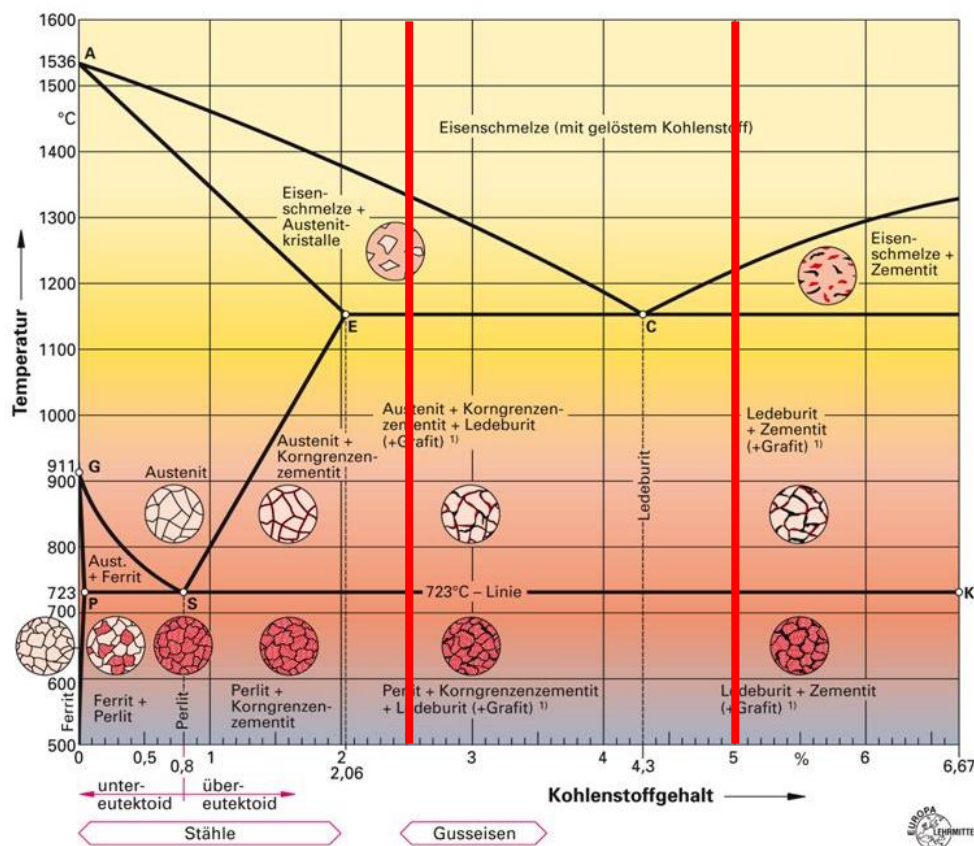
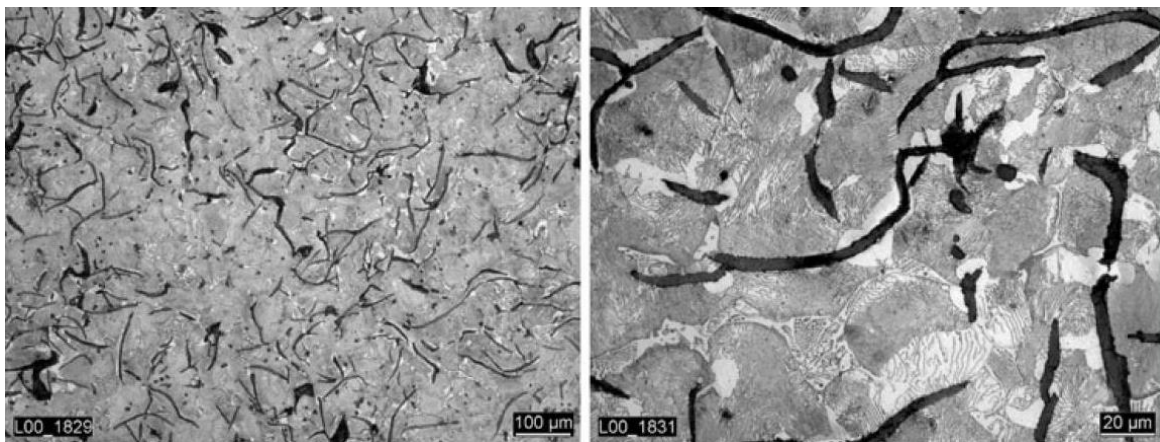


Abbildung 6 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, Bereich des Graugusses [Europa Verlag, Metallkunde]

Der Name Grauguss liegt eigentlich in dem Fertigungsverfahren begründet, da die Werkstücke ihre Form durch vergießen des flüssigen Werkstoffes erhalten [10]. Sehr komplizierte und komplexe Formen können so kostengünstig hergestellt werden. Grauguss mit Lamellengraphit besitzt entweder ein perlitisches oder ferritisch-perlitisches Gefüge. Weitere Legierungsbestandteile sind Silizium, welches mit einem Anteil von 0,8 – 3 % vorliegt und die Ausscheidung des Lamellengraphites fördert.

Mangan trägt dazu bei, dass die Festigkeit gesteigert wird. Einen weiteren Einfluss hat auch die geringe Menge an Phosphor, sie generiert eine dünnflüssigere Schmelze, fördert aber gleichzeitig die Sprödigkeit des Werkstoffes. Gerade Grauguss mit Lamellengraphit zeichnet sich dadurch aus, dass er ein hohes Dämpfungspotential besitzt und aus diesem Grund gerade da eingesetzt wird, wo eine Geräuschentwicklung minimiert werden soll. Einsatzbereiche sind so Maschinenbetten, Zylinderblöcke, Getriebegehäuse und in dem betrachteten Fall Zylinderkomponenten. Auch wenn, aufgrund der Gewichtsreduzierung, meist nur noch Aluminiumguss zum Einsatz kommt, kann sich Grauguss in hoch beanspruchten Dieselmotoren, aufgrund seiner hohen Festigkeit, des großen Dämpfungsvermögens und seiner höheren Steifigkeit jedoch behaupten [8] [9].



**Abbildung 7** Lamellares Gusseisen [6]

Gusseisen kann je nach seiner Erstarrungsform nach schwarz oder weiß unterschieden werden. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind in diesem Fall die chemische Zusammensetzung und die Abkühlgeschwindigkeit. Ein metastabiles System entsteht bei einer beschleunigten Abkühlung der Schmelze, d. h. Kohlenstoff ist im Zementit gebunden. Man spricht in diesem Fall von weißem Gusseisen. Dieser Werkstoff ist hart, spröde und für eine spanende Bearbeitung nicht zu empfehlen. Im Gegensatz dazu, kommt es bei einer langsamen Abkühlung zu einer Ausscheidung des Kohlenstoffes in elementarer Form und zu einem stabilen System. Die Bruchfläche erscheint dunkel durch die in der Eisenmatrix eingelagerten Graphitbereiche. Dieser Werkstoff wird deshalb graues Gusseisen oder Grauguss genannt. Die eingelagerten Graphitlamellen stellen in diesem Fall innere Kerben dar [3], aus diesem Grund kann der Werkstoff nur begrenzt Zugspannungen aufnehmen und besitzt nur eine geringe Verformungsfähigkeit. Im Gegenzug besitzt dieser aber sehr gute Dämpfungs- und Gleiteigenschaften. Eine weitere Einteilung erfolgt nach der Form der Graphitbereiche im Gefüge. Gusseisen mit lamellenförmig ausgebildetem Graphit wird Lamellengraphit genannt, des Weiteren kommt er noch in Form von Kugelgraphit oder Vermiculargraphit vor. Der Werkstoff der für die Versuche der vorliegenden Arbeit vorkommt, ist ausschließlich Grauguss mit Lamellengraphit, der weitere, hier in der **Tabelle 4** aufgeführte werkstoffliche Eigenschaften aufweist:



**Tabelle 4** Übersicht der Eigenschaften bei Grauguss mit Lamellengraphit [10]

Werkstoff-Kurzzeichen	EN-GJL-150	EN-GJL-200	EN-GJL-250	EN-GJL-300
Grundgefüge	ferritisch-perlitisch	perlitisch	perlitisch	perlitisch
Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	150 bis 250	200 bis 300	250 bis 350	300 bis 400
0.1%-Streckgrenze $R_{p0.1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	98 bis 165	130 bis 195	165 bis 228	195 bis 260
Bruchdehnung A [%]	0,3 bis 0,8	0,3 bis 0,8	0,3 bis 0,8	0,3 bis 0,8
Brinellhärte HB 30	125 bis 205	150 bis 230	180 bis 250	200 bis 275
Elastizitätsmodul [kN/mm <sup>2</sup> ]	78 bis 103	88 bis 113	103 bis 118	108 bis 137
Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	600	720	840	960
Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	250	290	340	390
Bruchzähigkeit [N/mm <sup>3/2</sup> ]	320	400	480	560
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	7,1	7,15	7,2	7,25
elektr. Widerstand [Ohm*mm <sup>2</sup> /m]	0,80	0,77	0,73	0,70

Da, wie oben bereits schon angesprochen, die Gefügeausbildung in unmittelbarem Zusammenhang mit den Abkühlgeschwindigkeiten steht, besteht eine Anhängigkeit der Wanddicke mit der Zugfestigkeit bzw. Härte. Die DIN EN 1691 gibt vor, dass die Härte und die Zugfestigkeit bestimmter Sorten von Gusseisen mit Lamellengraphit in einen empirischen Zusammenhang gebracht werden können:

$$HB = RH \cdot (100 + 0,44 \cdot R_m) \quad [7] \quad (1.2)$$

Hier stellt RH die relative Härte da, dabei ist aber zu beachten das es Schwankungsbreiten von 0,8 bis 1,2 gibt, die durch die schmelzmetallurgischen Bedingungen bei der Fertigung bestimmt werden und über entsprechende Streuungsanalysen und Regressionen eingegrenzt werden müssen. [8][6]

## 2.2.2 Schweißen von Grauguss mit Lamellengraphit

Gusseisen mit Lamellengraphit gilt als bedingt schweißgeeignet und lässt sich mit den richtig gewählten Einflussparametern gut beherrschen. Zu den Einflussparametern gehören:

- Der C-Gehalt in Form von Graphit und  $\text{Fe}_3\text{C}$
- die Sprödigkeit und geringe Bruchdehnung
- die Gefahr von Rissbildung durch Eigenspannung
- die niedrige Schmelztemperatur
- die dünnflüssige Schmelze
- die hohen Gehalte an Phosphor und Schwefel

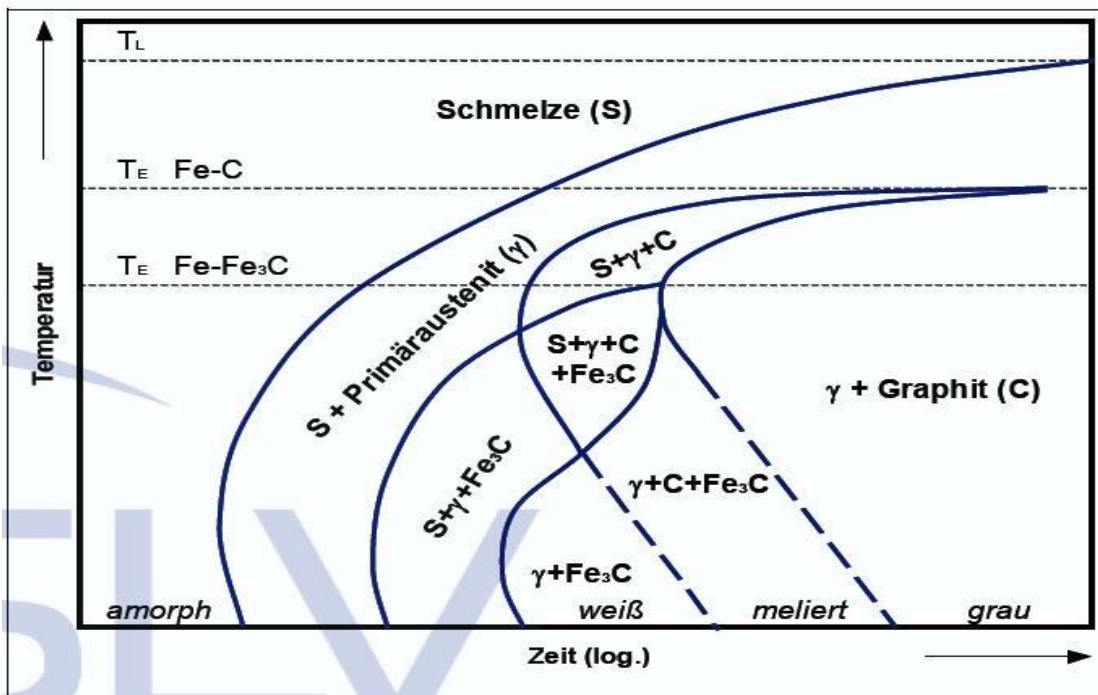
Gusseisen besitzt in der Regel ein überwiegend perlitisches Grundgefüge, welches sich bei einer Temperatur oberhalb von  $400\text{ }^\circ\text{C}$  in Ferrit umwandelt.

Gusseisen mit Kugelgraphit ist in der Regel leichter zu verarbeiten, da er im Gegensatz zu Lamellengraphit eine größere Zähigkeit besitzt. Generell haben aber die Art und Größe der Graphitlamellen einen Einfluss, aber vor allem das Matrixgefüge. Ferritischer Guss lässt sich leichter beherrschen als ein perlitischer oder vergüteter Gusswerkstoff, weil er eine höhere Dehnungsgrenze aufweisen kann und die Eigenspannungen dadurch besser abgebaut werden können. Bei der Schweißung mit artgleichen Zusätzen ist nur eine Schweißung in der PA-Position möglich da eine dünnflüssige Schmelze entsteht. Bei artfremden Zusätzen wie Nickel oder Eisenlegierungen kann eine spröde Ledeburitschicht entstehen, die dann im Übergang zu einer verstärkten Rissbildung führen kann. Zudem können die vergleichsweise hohen Gehalte an Schwefel und Phosphor die Ausbildung von Heiß- und Kaltrissen negativ beeinflussen. Das Reparaturschweißen von Gusseisen kann dann zu Problemen führen, wenn die Zusammensetzung von älteren Teilen nicht bekannt ist oder die Bauteile auch unter der Oberfläche mit Schmierstoffen vollgesogen sind oder es zu einer inneren Oxidation kommt. [7]Das hier angewendete Produktionsverfahren kommt einer Reparaturschweißung gleich und kann nach den verschiedenen Schweißzusätzen unterschieden werden.

Artgleiches Schweißen	Artähnliches Schweißen	Artfremdes Schweißen
Schweißgut hat den gleichen Gefügetyp wie der Grundwerkstoff	Schweißgut verfügt über ein Stahlgefüge ohne Graphit	Schweißgut hat einen anderen Gefügetyp wie der Grundwerkstoff
Hohe Vorwärmung: $500 - 700\text{ }^\circ\text{C}$	Mittlere Vorwärmung $250 - 550\text{ }^\circ\text{C}$	Ohne oder nur geringe Vorwärmung ( $<300\text{ }^\circ\text{C}$ )

**Tabelle 5** Übersicht der unterschiedlichen Schweißverfahren bei Gusseisen

Der Umwandlungsverlauf des Gusseisens beim Erstarren, lässt sich grundlegend an den Systemen Fe-Fe<sub>3</sub>C oder Fe-C beschreiben. Ausschlaggebend ist hierfür der Zeit-Temperatur-Verlauf. Anhand der **Abbildung 8** wird deutlich, in welchen Bereichen es zu einer schwarzen und damit stabilen Erstarrung kommt. Dieses Diagramm kann dazu beitragen, eine Aussage über die Kristallisationsausbildung nach dem LPA-Verfahren machen. Da auch hier die Wärmeeinbringung und die Abkühlgeschwindigkeit einen Einfluss haben.



**Abbildung 8** Zeit-Temperatur-Kristallisationsschaubild [GSI SLV]

Es ist also davon auszugehen, dass sich Gusseisen in der WEZ beim dem LPA-Prozess genauso verhält wie bei einem Schweißvorgang. Auch hier wird eine Wärmeeinbringung generiert, die eine anschließende Abkühlung mit sich bringt.

Verbindet man zwei unterschiedliche Stoffe haben die im Schmelzbad auftretenden Phasen und deren Verhalten beim Abkühlen einen großen Einfluss auf das Ergebnis. Ein gutes Resultat wird meist nur erreicht, wenn die Legierungselemente vollständig ineinander löslich sind und damit eine Mischkristallbildung auftritt. Tritt allerdings zwischen den beiden Komponenten eine intermetallische/intermediäre Phase auf, kommt es an dieser Stelle zu Versprödung des Werkstoffes und das kann bei einer erhöhten Krafteinbringung auf die Oberfläche zum Abplatzen des Auftragswerkstoffes führen. Auch ein erhöhter Kohlenstoffgehalt kann durch bestimmte Legierungselemente zu einer Martensitbildung und damit zu einer Versprödung führen.

## 2.3 Vorversuche am Laser Zentrum Nord

### 2.3.1 Vorversuch 1

Es wurden bereits mehrere Versuche zu diesem Projekt im Laserzentrum durchgeführt. In dem ersten Projekt wurden Einzelspuren aus einer Chrom-Nickel-Legierung auf ein Grauguss mit dem Laser-Pulver-Auftragschweißen aufgebracht und für die Auswertung die Mikrostruktur und der Härteverlauf beurteilt. Es stellte sich heraus, dass die große Herausforderung darin besteht, die Auftragsnaht ohne Risse zu erzeugen. Bei der Erzeugung eines Mikroschliffes stellte sich heraus, dass die Risse sich bis in den Grundwerkstoff erstrecken. Da der Grundwerkstoff nur eine geringe Plastizität besitzt, kann er Spannungen, die während des Aufschmelzens der beiden Werkstoffe (Grundwerkstoff und Pulverwerkstoff) und das anschließend schnelle Abkühlen entstehen, nicht ausreichend abbauen. Es kommt in der Folge zu Rissen im Grund- und Pulverwerkstoff, wie in **Abbildung 9** zu sehen. Das Werkstück wurde im darauffolgenden Schritt einer Vorwärmung mit 200 ° C unterzogen, um die Plastizität des Grundwerkstoffes zu erhöhen und einen besseren Abbau der Eigenspannungen zu gewährleisten. Bei der nachfolgenden Untersuchung stellte man fest, dass sich Risse reduzierten und an manchen Stellen vermeiden ließen. Doch gerade an den Übergangsstellen von Grund- zu Pulverwerkstoff waren diese noch vorhanden. Mit diesem Ergebnis lässt sich jedoch kein stabiler Prozess realisieren, besteht weiterhin der Forschungsbedarf zu diesem Thema.



**Abbildung 9** Rissdetektierung nach Farbeindringverfahren [LZN Hamburg]

### 2.3.2 Vorversuch 2

In diesem Versuch sollen die Einflussfaktoren für die Auswahl der geeigneten Zusatzwerkstoffe ermittelt werden. Der Fokus lag aber hier auf der Ermittlung der geeigneten Prozessparameter für dieses Verfahren. Zu diesem Zweck wurden zwei Pulverwerkstoffe auf den Grundwerkstoff Grauguss mit Lamellengraphit aufgebracht, nachdem man eine Aufstellung der globalen Einflussfaktoren aufgestellt hatte. In dem ersten Versuch mit dem Pulverwerkstoff *Inconel*<sup>®</sup>, wurde eine Einzelspur erzeugt, die aber den Anforderungen nicht entsprach. Auch hier wurde eine Vorwärmung von 300 ° C vorgenommen, bei der allerdings auch keine signifikante Steigerung des Ergebnisses erzielt werden konnte. Erst bei einer Vorwärmung von 700 ° C konnte eine rissfreie Auftragsnaht erzielt werden. Da aber, im Zuge dieser hohen Temperaturen der Grauguss eine Verschlechterung seiner Eigenschaften erfährt, ist dieser Ansatz auch nicht geeignet um ein stabiles Verfahren für die Reparatur von Graugusswerkstücken zu realisieren. Abschließend wurde hier noch ein anderer Auftragswerkstoff eingesetzt, der als Pufferlage für einen weiteren dienen soll. Hier handelt es sich um eine Nickellegierung, die aber aufgrund ihrer niedrigen Verschleißfestigkeit, nicht als Oberflächenauftrag in Frage kommt und so nur als Zwischenschicht dient. Bei der nachfolgenden Untersuchung hat man festgestellt, dass damit eine rissfreie Auftragsnaht zustande gekommen ist und an dieses Ergebnis weiter angeknüpft werden kann.

## 3 Schadensanalyse

### 3.1 Unterschiedlichen Schadensfälle an einem Schiffsdieselmotor

Die Definition für eine Zylinder lautet folgendermaßen: Die Zylinder dienen der Aufnahme der Kolbengruppe und erfüllen mit ihrer Oberfläche und dem eingesetzten Werkstoff im Zusammenwirken mit den Kolbenringen eine Gleit- und Dichtfunktion [17].

Im Zylinder läuft als Element der Kraftübertragung ein Kolben, der eine zugeführte Energie in sehr kurzer Zeit in Wärme und Druck umsetzt. Dabei steigen diese Werte in einem geringen Zeitraum stark an und der Zylinder weist nach einer bestimmten Einsatzzeit unterschiedliche Schadensfälle auf. Während die äußere Fläche die Kühlungsfunktion übernimmt und im Wasser läuft, entstehen Schäden durch Kavitation und Korrosion. Die innere Lauffläche ist durch den Kolbenbetrieb einer ständigen Reibung ausgesetzt und es kann zu Rissen in dem

Werkstoff kommen. Es wird zwischen einer thermischen und mechanischen Belastung unterschieden. Bei der vorliegenden Arbeit, sollen die Folgen des Verschleißes im Inneren des Zylinders Beachtung finden, so dass auf diese Schadensfälle im weiteren Verlauf näher eingegangen wird.



Abbildung 10 Schiffsdieselmotorzylinder [LZN Hamburg]

#### 3.1.1 Schadensfälle aus thermischer Belastung

Unter der thermischen Belastung versteht man, die unterschiedliche Ausbreitung des Werkstoffes bei der entstehenden Wärme durch den Betriebseinsatz. Die Baugruppe ist bei thermischen Einflüssen unterschiedlichen Wärmeausdehnungen ausgesetzt. Das führt zu geringen Verformungen des Bauteiles, das zum abrasiven Verschleiß der Oberflächen führt. Die **Abbildung 11** zeigt schematisch, wie sich der Kolben unter Einwirkung der inhomogenen Tem-

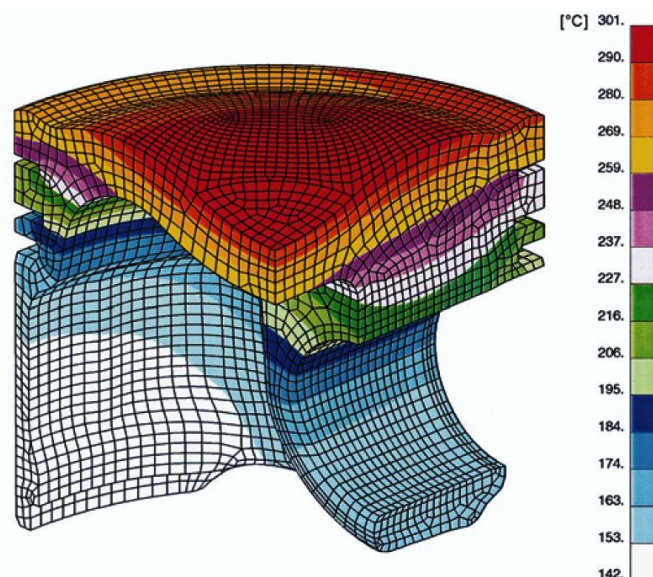
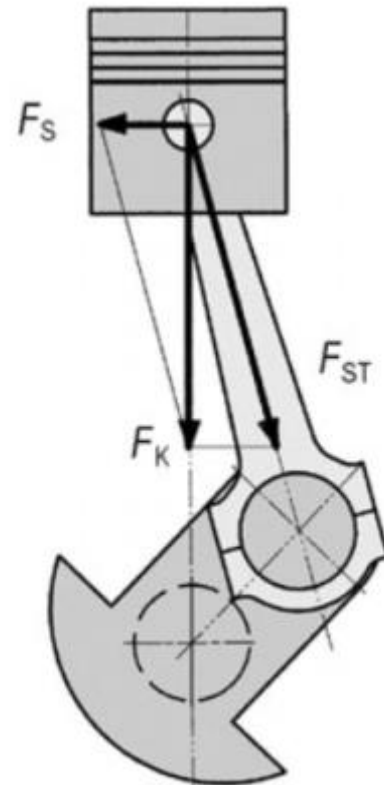


Abbildung 11 Thermische Ausdehnung des Kolbens [9]

peraturverteilung ausdehnt und deformiert. Dieser Effekt kann dazu beitragen, dass der Kolben sich über die Maße der Spielpassung ausdehnt und es zu einem abrasiven Verschleiß zwischen Kolben und Zylinder kommt.

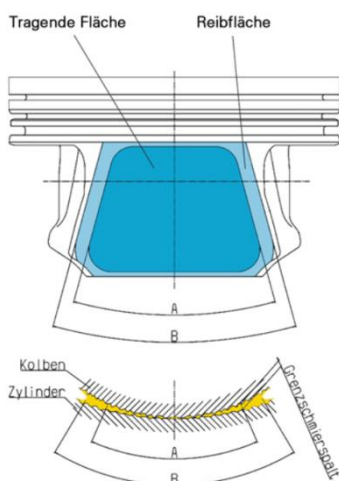
### 3.1.2 Schadensfälle aus mechanischer Belastung

Der Kolben ist während des Betriebes unterschiedlichen mechanischen Verformungen ausgesetzt, so dass es zu verschiedenartigen Verschleißstellen kommt. Auf den Kolbenboden wirkt die Kraft des Gasdruckes und das oszillierende Massenträgheitsmoment, die sogenannte Massenkraft. Der Kolben und die Pleuelstange ergeben zusammen die Kolbenkraft  $F_K$  (**Abbildung 12**) Durch die Umlenkung der Kolbenkraft in Richtung der Pleuelstange mit der Kraft  $F_{ST}$  tritt – entsprechend dem Kräfteparallelogramm- eine weitere Komponente in Form der Seitenkraft  $F_S$  (Normalkraft) auf. Aufgrund dessen wird der Kolbenschaft an die Zylinderlaufbahn gedrückt [11]. Im Laufe eines Arbeitsspieles ändert dann die Seitenkraft mehrmals ihre Richtung, wobei der Kolben wegen seines Kolbenspieles von der einen an die andere Seite der Zylinderlauffläche gedrückt wird und somit ein erhöhter Verschleiß an diesen Flächen entsteht. Eine weitere mechanische Belastung entsteht durch die Reibung. Aus diesem Grund, sind an



**Abbildung 12** Kräfte am Pleuellager

den Zylinderlaufflächen bestimmte Rauheitswerte einzuhalten. Das dient dazu den abrasiven Ver-



**Abbildung 13** Grenzschmierspalt zwischen Pleuellager und Pleuellagerbolzen

schleiß zu minimieren und damit sich ein hydrodynamischer Schmierfilm zwischen Pleuellager und Pleuellagerbolzen bilden kann. Zu einem Verschleiß kommt es, wenn das tribologische System zwischen den Flächen nicht ausreichend ist. Zudem wird am Umkehrpunkt des Pleuellagers (oberer und unterer Totpunkt), das hydrodynamische Schmierverhalten durch die Änderung der Bewegungsrichtung gestört, wie in **Abbildung 13** zu sehen. Bei diesem Bereich kann man von einem erhöhten abrasiven Verschleiß sprechen. Weiter Schadensfälle durch mechanische Belastung sind Risse. Diese können bei zyklischer aber auch bei ruhender Belastung eines Bauteiles auftreten und zum Versagen des gesamten Bauteiles führen.

---

Unter einem Riss wird allgemein nicht die gesamte Trennung des Querschnittes verstanden, sondern nur eine lokale Aufspaltung des Materials. Risse entstehen dann, wenn Spannungen durch die Elastizität oder Plastizität des Bauteils nicht mehr abgebaut werden können. Der Werkstoff reißt auf. An den Enden des Risses entstehen Spannungsspitzen, die bei Belastung des Bauteiles zu einem endgültigen Versagen führen. Wenn ein Riss im Bauteil festgestellt wird, muss dieser schnellstmöglich detektiert und repariert werden, damit es nicht zum Ausfall der Anlage führt. Für eine Reparatur eines Risses muss das Bauteil vorbereitet werden. Es muss eine Ausfräsung bis an das Rissende erfolgen, bevor man den schadhaften Bereich wieder durch das LPA-Verfahren auffüllen kann.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Schadensfälle alle mit einem Materialabtrag einhergehen, die an unterschiedlichen Stellen auftreten und auch von Bauteil zu Bauteil abweichen. Aus diesem Grund ist das LPA-Verfahren einer der Prozesse, die sich durch ihre Flexibilität und den Einsatz an unterschiedlichen Stellen, am besten eignen.



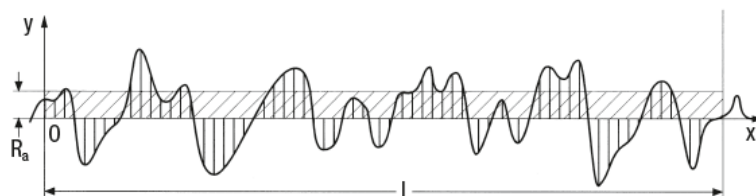
## 4 Erstellung eines Anforderungskataloges

### 4.1 Fertigungstechnische Zielparameter der Auftragsnaht

Ziel des gesamten Projektes ist, die Schadstellen an denen der Materialabtrag entstanden ist, durch die Anwendung des LPA-Verfahrens wieder aufzufüllen. Der Grundwerkstoff weist eine Reihe von Eigenschaften auf, die für den Einsatzbereich als Zylinderlauffläche erforderlich sind. Durch den Auftrag des Pulvers und die damit neu entstandene Oberfläche ist es unter diesen Umständen zwingend erforderlich, dass der Auftragswerkstoff die gleichen Eigenschaften aufweist wie der Grundwerkstoff. Ein positivere Effekt könnte auch erzielt werden, wenn der Pulverwerkstoff, die Anforderungen noch übertrifft und so ein Bauteil generiert wird, dessen Qualität noch höher bewertet werden kann. Eine der wichtigsten Kenngrößen, die erreicht werden muss, ist die Härte. Denn diese steht im Zusammenhang mit der Verschleißfestigkeit der Oberfläche. Hartstoffe in der Randschicht des Bauteiles verhindern, das angreifendes Abrasivgut nicht in die Oberfläche eindringt, der rasch fortschreitende Werkstoffabtrag soll so verhindert werden. Die Härte für den Grundwerkstoff EN-GJL-250 ist in der **Tabelle 4** [10] mit 180 – 250 HB angegeben, laut Tabelle im Anhang entspricht das der gleichen Härte nach Vickers (HV). Es muss deshalb gewährleistet sein, dass dieser Härtewert in jedem Fall erreicht wird und unter Umstände die Werte noch übersteigen, umso eine höherwertigere Oberfläche zu garantieren.

Eine weitere Eigenschaft ist die konturnahe Fertigung, darunter versteht man, dass der Auftrag ausschließlich dort erfolgen soll, an denen sich die Schadstellen befinden. Eine wichtige Rolle spielt auch hier das Verhältnis der Breite zu Höhe der Auftragsspur, das sogenannte Aspektenverhältnis. Um einen wirtschaftlichen Prozess zu garantieren, sollte eine Einzelspur eine Mindesthöhe von einem Millimeter erreichen, das ist notwendig um eine eventuelle Oberflächenbearbeitung (Schleifen, Honen) zu gewährleisten. Als Richtwert wird das Aspektenverhältnis 4:1 angegeben, das entspricht einer Breite von vier Millimeter bei einem Auftrag von einem Millimeter Höhe. Das Breitenverhältnis kann variieren, während eine Mindesthöhe erreicht werden muss.

Generiert man aus mehreren Einzelspuren einen Flächenauftrag, liegen diese raupenförmig nebeneinander. Die Oberfläche weist damit eine Welligkeit auf, wie in **Abbildung 14** sehen. Umso höher die Abwei-



$R_a$  = Arithmetischer Mittenrauwert  
 $x$  = Messachse

$l$  = Bezugsstrecke  
 $y$  = Gestaltabweichung

**Abbildung 14** Rauigkeit einer Oberfläche

chung des arithmetischen Mittenrauwertes  $R_a$  ist, umso aufwendiger ist die anschließende Nachbearbeitung der Oberfläche. Da hier noch keine Erfahrungswerte vorliegen, muss in der anschließenden Bewertung eine Aussage darüber gemacht werden. Dazu können die entstandenen Aufträge verglichen werden und eine Parametrisierung erfolgen. Bei Einzelnähten kann man nur eine Aussage über die Rauigkeit machen und keine Rückschlüsse für die Welligkeit einer Flächennaht ziehen. Nach einer mechanischen Bearbeitung sollte die Oberfläche eine Rauigkeit von  $2,5 - 5 \mu\text{m}$  aufweisen [11]. Die Auftragsnaht dient nach dem Prozess als Lauffläche für den Kolben, unter diesen Umständen muss sie eine bestimmte Temperaturbeständigkeit vorweisen, laut Aussage der Literatur, liegt diese zwischen  $600 - 850 \text{ }^\circ\text{C}$  [11] Auch die Wärmeausdehnung sollte berücksichtigt werden, da bei zu großer Differenz sich der Grund- und Auftragswerkstoff unterschiedlich ausdehnt und es zu Abplatzungen kommen kann.

Um eine Auswahl für die Pulverwerkstoffe zu treffen müssen diese fertigungstechnischen Eigenschaften berücksichtigt werden, in der nachfolgenden Tabelle werden diese noch einmal tabellarisch dargestellt:

**Tabelle 6** Kennwerte der Zielparameter

Zielparameter			
#	Benennung	Einheit	Ziel
1	Härte	HV	300
1	Aspektenverhältnis	Verhältnis	4
2	Höhe der Auftragsspur	[mm]	1
3	Welligkeit	mm	↓
4	Warmfestigkeit	$^\circ\text{C}$	850

## 4.2 Qualitätsziele der Auftragsnaht

Wie im ersten Teil schon ausgeführt, besitzt Grauguss mit Lamellengraphit sehr niedrige Zähigkeitswerte im Gegensatz zu anderen Gusseisensorten. D. h. die Spannungen die bei einem Schweißprozess entstehen, können aufgrund der niedrigen Plastizität des Grundwerkstoffes schlecht abgebaut werden. Es kommt im weiteren Verlauf deshalb oft zu Rissen in der Auftragsnaht und im Grundwerkstoff. Eine Vorwärmung des Grundwerkstoffes auf eine Temperatur von 700 ° C, ermöglicht, wie in Vorversuchen schon bestätigt, eine rissfreie Anbindung an den Grundwerkstoff. Doch im Zuge dieses Vorwärmprozesses wird die Warmfestigkeit von dem Grundwerkstoff überschritten und es bildet sich neben dem Verfall der Zementitphase eine Versprödung der Oberfläche und die Abnahme von mechanischen Eigenschaften, wie die Warmfestigkeit und die Zähigkeitswerte. Man hat also, die Qualität des Grundwerkstoffes herabgesetzt und somit, das Ziel verfehlt. Bei diesem Versuch, soll die Auftragsnaht ohne ein Vorwärmen des Grundwerkstoffes erfolgen. Es muss also ein Auftragspulver ermittelt werden, welches aufgrund seiner Eigenschaften eine Anbindung zu den geforderten Bedingungen erreicht. Der Grund warum die Vorwärmung entfallen soll, liegt vor allem in der Wirtschaftlichkeit. Die Kosten für die Zeit- und Energieaufwendung rechnen sich nicht für den Rekonditionierungsprozess, addiert man dann noch die Aufwendungen für Anlagen und Material dazu, würde eine Neuproduktion des Bauteiles eher in Betracht kommen. Beim Schweißen von Grauguss bewirkt der hohe Kohlenstoffgehalt, das sich in der WEZ Martensit bildet, welches zu Versprödung führen kann, die Schwierigkeit besteht darin in der Aufmischungszone ein Gefüge zu erzielen, das nicht zu spröde ist, denn dadurch kann mit der Auftragsschicht kein stabiler Halt realisiert werden, es kommt zu Bindefehlern innerhalb der Aufmischungszone. Auch die Verwendung von artgleichem Auftragswerkstoff kann zu Ledeburit führen, der in der Regel auch sehr spröde ist. Deswegen sollte für eine Kaltschweißung nur artfremde Werkstoffe verwendet werden [19]. Gusseisen mit Lamellengraphit besitzt kein Erstarrungsintervall, sondern geht bei ca. 1.200 ° C sofort in die flüssige Phase über. Die daraus entstehende geringe plastische Verformung erfordert, dass die Temperaturdifferenz beim Schweißen möglichst gering gehalten werden muss. Für das artgleiche Schweißen ist eine geringe Abkühlgeschwindigkeit erforderlich, aufgrund der Eigenspannungen und der Menge an rissanfälligem Gefüges aus Ledeburit und Martensit in der WEZ. Die nachfolgende **Abbildung 15** zeigt schematisch die Abläufe in der WEZ bei sehr langsamer Abkühlung und bei schnellerem Abkühlen einer schmelzgeschweißten Verbindung. Der Einsatz von artfremden Werkstoffen soll ein verformbareres Schweißgut ermöglichen und durch seine bessere Plastifizierbarkeit die Eigenspannungen besser abbauen.

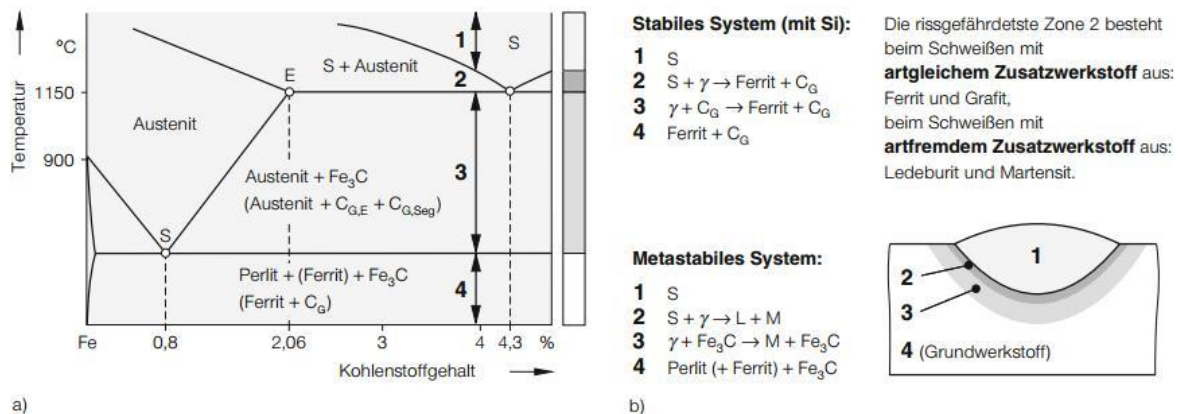


Abbildung 15 Vorgänge in der WEZ schmelzgeschweißter Graugusswerkstoffe [22]

Des Weiteren hat Nickel z. B. eine hohe Löslichkeit im Kohlenstoff und bildet keine Karbide, der Kohlenstoff wird in Form von Graphit ausgeschieden und vergrößert dadurch das Schweißvolumen, die Schrumpfspannung können so verringert werden. Artfremde Legierungen auf der Basis von austenitischem Cr-Ni-Stahl haben den Nachteil, das Chrom in der Schmelze Chromkarbide bilden, die zu einer intermetallischen Phase führen und somit eine hohe Sprödigkeit besitzen.

Mit diesen Eigenschaften des Grundwerkstoffes können die Qualitätsziele aufgestellt werden, diese sollen auch dazu dienen die Testreihen vergleichen zu können. Für das hier angestrebte Verfahren gibt es zurzeit noch keine bestehende Norm. Aus diesem Grund werden unterschiedliche DIN und DVS Normen zu Rate gezogen und auf deren Grundlage ein Bewertungskatalog der Unregelmäßigkeiten erstellt. Zum einen, sind das die Normen **DIN EN ISO 5817** (Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten), **DIN EN ISO 12932:2013-10** (Schweißen – Laserstrahl-Lichtbogen-Hybridschweißen von Stählen, Nickel und Nickellegierungen – Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten) und die **DVS 3210**, die man aus dem Qualitätsmanagement von normalen Schweißprozessen kennt. Auch bei einem normalen Laserschweißprozess kommt es zu einer Wärmebringung durch einen Laserstrahl in ein Bauteil und eine nachfolgende Abkühlung. Aus diesem Grund sind die werkstofflichen Eigenschaften gleich und können auch für diesen Prozess genutzt werden. Allerdings wurden nur die Werte adaptiert, die auch bei diesem Verfahren auftreten und so eine eigene Norm erstellt.

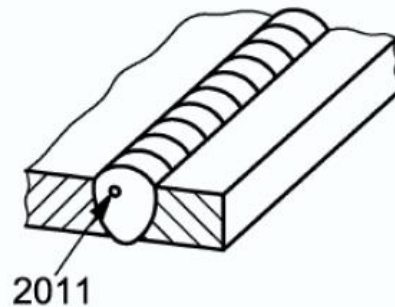
Gleichzeitig enthält der Bewertungskatalog (**Tabelle 7**) eine Übersicht über zerstörende- und zerstörungsfreie Prüfungen, die angewandt werden können um die Qualitätsziele zu überprüfen.

Die Tabelle ermöglicht eine Übersicht der Zielparameter, es erfolgt noch eine kurze Übersicht der gewählten Werte und ihre Eigenschaften.

Kommt es zu Rissen in der Auftragsnaht, sind diese generell nicht zulässig, da Risse die Einsatzfähigkeit des Bauteiles nicht gewährleisten können. Handelt es sich allerdings um Mikrorisse deren Rissfläche insgesamt kleiner als ein Quadratmillimeter ist, können diese akzeptiert werden. Risse die an der Randschicht des Auftragswerkstoffes entstanden sind, sind nicht zulässig, da man davon ausgeht, dass sie zur Ablösung des gesamten Auftrages führen.

Poren sind gasgefüllte Hohlräume (**Abbildung 16**) die im erstarrten Schweißgut zu finden sind, die sogenannten dreidimensionalen Gitterbaufehler. Diese entstehen, wenn eingebrachter Wasserstoff beim Erstarren der Schmelze nicht schnell genug an der Oberfläche entweichen kann und so im Schweißgut vorhanden ist. Da diese Unregelmäßigkeit die Qualität des Werkstoffes in einem gewissen Maß nicht beeinträchtigt, werden sie in dem vorgegebenen Rahmen toleriert.

Hat zwischen dem Substrat und dem Auftragspulver keine metallurgische Anbindung stattgefunden, es ein Bindefehler entstanden. Diese Unregelmäßigkeit ist nicht zulässig, da keine Aufmischungszone entstanden ist und die Werkstoffe keine Bindung zueinander haben. Folge daraus ist ein Abplatzen der Auftragsnaht. Die Aufmischungszone stellt auch eine



**Abbildung 16** Schematische Darstellung einer Pore

wesentliche Eigenschaft der Auftragsnaht da. Sie gibt Auskunft darüber mit welchem Prozentanteil sich der Auftragswerkstoff mit dem Grundwerkstoff verbunden hat. Dieser Wert sollte möglichst gering sein, da die Aufmischungszone eine andere Schichtzusammensetzung, im Gegensatz zu Grund- und Auftragswerkstoff besitzt und dadurch die Beständigkeit des Bauteiles negativ beeinflussen kann. Der Aufmischungsgrad ist in Prozent angegeben und wird mit folgender Formel berechnet:

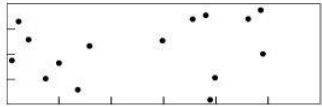
$$\text{Aufmischungsgrad [\%]} = \frac{\text{Fläche der Aufmischung} \cdot 100}{\text{Gesamte Auftragsfläche}} \quad (1.1)$$

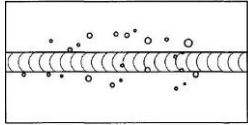
Es soll ein Aufmischungsgrad zwischen 5 – 10 % angestrebt werden, da er eine metallurgische Anbindung garantiert und gleichzeitig sicherstellt, dass die Fläche mit abweichender Schichtzusammensetzung nicht zu groß ist.

Die gesamte Bewertung der fertigungstechnischen Anforderungen, sowie die Qualitätsziele, sollen als Grundlage dienen, geeignete Pulverwerkstoffe zu finden, mit denen die Auftragsnaht realisiert werden kann. Um diese Ergebnisse belegen zu können, muss jeder gestellte Parameter nach den Versuchsreihen durch eine Prüfung belegt werden. Welche Möglichkeiten der Auswertung zur Verfügung stehen wird in Kapitel 6.2 beschrieben.

## 4.2.1 Bewertungskatalog für Unregelmäßigkeiten

Tabelle 7 Bewertungskatalog für Unregelmäßigkeiten

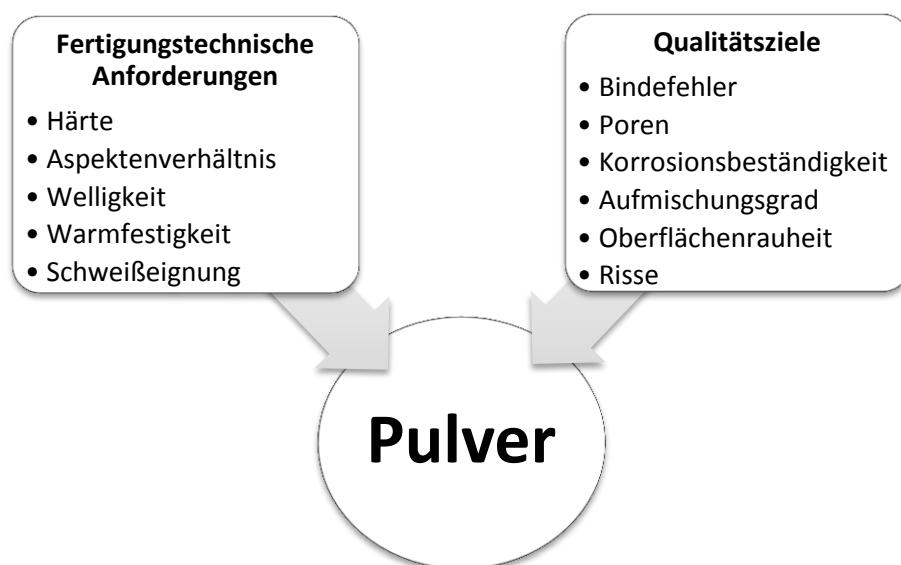
Nr.	Unregelmäßigkeit	Bemerkung	Bewertung	Prüfung	
				Zerstörungsfrei	Zerstörend
1	Riss	Alle Arten von Rissen mit Ausnahme von Mikrorissen (Rissfläche < 1mm <sup>2</sup> )	nicht zulässig	Farbeindringprüfung (PT, mit Kontraster)	Mikroschliff
2	Risse an der Randschicht der Auftragsnaht	Einzelspur	nicht zulässig	Farbeindringprüfung (PT, mit Kontraster)	Mikroschliff
3	Risse an der Randschicht der Auftragsnaht	Flächenspur	nicht zulässig		
4	Poren	<p>Die folgenden Bedingungen sind einzuhalten</p> <p>a) Höchstmaß l für die Einzelpore</p> <p>b) Höchstmaß der Summe der Projektionsfläche Unregelmäßigkeit.</p>  <p>Bild A.1 —Oberflächenanteil 1 %, 15 Poren, d = 1 mm</p>	<p>a) <math>l \leq 0,5 \cdot t</math> oder max. <math>l = 1\text{mm}</math></p> <p>b) 1 %</p>	Farbeindringprüfung (PT, mit Kontraster)	Mikroschliff
5	Bindefehler	Keine Aufmischung vorhanden	nicht zulässig		Mikroschliff

<b>6</b>	Schweißspritzer		zulässig	Sichtprüfung	
<b>7</b>	Korrosionsbeständigkeit		Muss gegeben sein		Mikroschliff
<b>8</b>	Erhöhter Härtewert im Aufmischungsbereich		Toleranzbereich: $\pm 50$ HV		Härteprüfung nach Vickers
<b>9</b>	Unzureichende Verschleißfestigkeit	Der Auftragswerkstoff muss verschleißfester als der Grundwerkstoff sein			
<b>10</b>	Aufmischungsgrad	Der Aufmischungsgrad muss 5 - 10 % betragen	Toleranzbereich : 5 - 10 %		Mikroschliff
<b>11</b>	Oberflächenrauigkeit	Möglichst gering			Mikroschliff

## 5 Auswahl der Pulverwerkstoffe

### 5.1 Eigenschaften der Pulverwerkstoffe

Für die Auswahl der Pulverwerkstoffe ergibt sich eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die die Anforderungen aus der fertigungstechnischen Sicht, wie auch die Qualitätsziele erfüllen müssen. Die nachfolgende Übersicht verdeutlicht die Zusammenhänge.



**Tabelle 8** Auswahl des Pulverwerkstoffes unter Berücksichtigung der Ziele

Bei dieser Betrachtung müssen auch die Attribute des Grundwerkstoffes mit einbezogen werden, denn beide Elemente bilden eine Einheit und können in vielen Fällen nicht einzeln betrachtet werden. Aufgrund der Vielzahl der Anforderungen kann allerdings nicht davon ausgegangen werden, dass ein Pulver gefunden werden kann, das alle Charakteristiken aufweist. Es wird demnach versucht, Pulverwerkstoffe zu detektieren, die theoretisch das bestmögliche Ergebnis liefern.

**Verschleißfestigkeit/Härte:** Die Verschleißfestigkeit beschreibt den Widerstand den ein Körper einem Verschleiß entgegensetzt, dieser ist sehr stark abhängig von dem tribologischen System der Verschleißkörper. Innerhalb einer Werkstoffgruppe gilt, dass mit steigender Härte der Werkstoffverschleiß sinkt, aber trotz gleicher Härte kann die Verschleißfestigkeit nicht auf andere Werkstoffe übertragen werden. Deswegen steht die Angabe der Härte immer im Zusammenhang mit den Werkstoffeigenschaften. Aus diesem Grund kann eine Aussage über die gleiche Härte kein Ergebnis aufzei-



gen [13]. Die Härtewerte zwischen Grundwerkstoff und Aufmischungszone sollte aber trotzdem nicht zu groß sein, damit die Auftragsschicht bei einer Belastung nicht abplatzt. Die Vickershärte von Gusseisen liegt bei 200 HV, normalerweise ist die Härte bei Gusseisen immer in Brinell angegeben, weil man aufgrund der Graphitinseln ein aussagekräftigeres Ergebnis bekommt, da aber nur eine Vickershärte-Prüfmaschine zur Verfügung steht, wird durch einen gemittelten Wert diese Härte angegeben. Der Auftragswerkstoff muss in jedem Fall die Härtewerte des Substrates übersteigen, weil der Auftrag in jedem Fall eine Verschleißfestigkeit sicherstellen soll.

**Zerspanbarkeit/Welligkeit:** Nach einem erfolgreichen Auftrag des Pulvers, kommt es immer zu einer Nacharbeit. Die Zylinderinnenflächen dienen als Lauffläche für den Kolben und müssen für den Einsatz gehont werden, damit eine Rauigkeit von  $R_a = 2,5 - 5 \mu\text{m}$  entsteht. Für dieses Verfahren muss sich der Auftragswerkstoff zerspanen lassen und darf keine oder nur eine geringe Sprödigkeit aufweisen.

**Wärmeausdehnungskoeffizient/Warmfestigkeit:** Die Wärmeausdehnung beschreibt die Veränderung der Geometrie eines Körpers bei Temperaturänderung. Der Koeffizient sollte bei dem Auftragspulver nicht zu stark von dem Grundwerkstoff abweichen, da es sonst bei dem Abkühlungsvorgang zu unterschiedlichen Wärmeschumpfungen und somit zu Rissen in und an der Auftragsnaht kommt.



Abbildung 17 Grafische Darstellung der Längenänderung [Europa Verlag]

**Schmelzpunkt/Aufmischungsgrad:** Der Schmelzpunkt des Auftragswerkstoffes sollte im Bereich des Grundwerkstoffes sein, der ca.  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$  beträgt. Die Aufmischung wird wesentlich davon beeinflusst. Daher muss auch beim Dispergieren der Schmelzpunkt des Auftragswerkstoffes grundsätzlich über dem des Grundwerkstoffes liegen, da der Aufmischungsgrad zwischen 5 – 10 % liegen soll.

**Korrosionsbeständigkeit:** Bleibt die Oberfläche von Gusseisen unbeschädigt, besitzt der Grundwerkstoff eine gute Korrosionsbeständigkeit. Diese wird auch beeinflusst von der Zulegierung mit Silizium, Chrom und Nickel. Der Auftragswerkstoff sollte aus diesem Grund in jedem Fall eine Korrosionsbeständigkeit besitzen.

**Partikel/Oberflächenrauheit:** Die verwendeten Zusatzwerkstoffe werden in der Regel durch Verdüsen hergestellt und besitzen charakterlich eine gaußförmige Verteilung der Pulverpartikeldurchmesser. Die Partikelform sollte in jedem Fall globular und pulverförmig sein, damit eine bessere Fließfähigkeit gewährleistet ist. Durch die Kugelform erhält man die größtmögliche

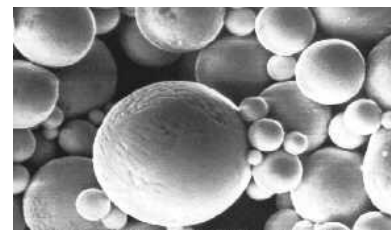


Abbildung 18 Globulare Pulverpartikel

Oberfläche, so dass eine Wärmeeinbringung besser möglich ist, im Gegensatz zu anderen Formen. Die Größe der Partikel sollte 45 – 90 µm betragen, da die Oberflächenrauigkeit mit der Partikelgröße zunimmt. Bei kleinen Korngrößen kann es, aufgrund des geringeren Gewichtes, zu Verwirbelungen durch das Prozessgas auf der Oberfläche kommen, was dazu führt, dass ein geringerer Pulveranteil aufgeschmolzen wird. Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit hat auch die Dichte der Werkstoffe, wird diese höher, verringert sich die Fließgeschwindigkeit aufgrund des steigenden Gewichtes. Auch die Fließfähigkeit der Partikel muss gegeben sein, diese kann beeinträchtigt werden, wenn die Partikel zu klein sind und durch eine statische Aufladung des Pulverförderers an dem Behälter kleben bleiben.

**Wirtschaftlichkeit:** Die Auswahl der Pulver sollte auch unter betriebswirtschaftlichen Aspekten erfolgen. Zum einen sollten die Kosten für das Auftragsmaterial gering sein, Titan kommt unter diesem Aspekt z. B. nicht in Frage. Das Werkstück soll aus diesen Gründen auch nicht vorgewärmt werden, weil der Zeitaufwand und die eingebrachte Energie sich nicht rechnen. Auch eine aufwendige Nachbearbeitung durch eine hohe Oberflächenrauigkeit, wirkt sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit aus. Auch geringe Korngrößen sind teurer, da deren Herstellung aufwendiger ist, im Gegensatz zu Größen um 150 µm.

**Gefüge:** Der Auftragswerkstoff sollte artfremd sein, damit eine Vorwärmung entfällt (siehe Kapitel 2.2.2). Die Entstehung einer intermetallischen Phase sollte unterbunden werden. Eine intermetallische Phase ist eine chemische Verbindung mit einem homogenen Gefüge. Ihre Gitterstruktur zeichnet sich dadurch aus, dass aus einer Mischverbindung aus einem metallischen Bindungsanteil und einer geringeren Atom. bzw. Ionenbindungsanteilen besteht, diese resultieren in Überstrukturen, d.h. die Struktur kann keinem der beteiligten Werkstoffe zugeteilt werden. Diese Verbindungen sind sehr hart und spröde, besitzen aber eine gute Korrosionsbeständigkeit. Für diesen Prozess sollen sie aber vermieden werden, da in der Aufmischungszone eine harte und spröde Phase zum Abplatzen des Auftragswerkstoffes führen kann. Unterscheiden sich Grund- und Auftragswerkstoff in ihrer chemischen Zusammensetzung, entsteht eine Elementenverteilung in der Aufmischungszone aus dem Auftrags- und dem Grundwerkstoff, der durch die Schmelzbaddynamik und den Diffusionsprozess in das Schichtvolumen gelangt.

**Temperaturbeständigkeit:** Die Zylinderlauffläche muss eine Temperaturbeständigkeit von 600 ° C erreichen, den diesen Wert erreicht die Einsatztemperatur. Kann der Auftragswerkstoff diese Beständigkeit nicht erreichen, kommt es zu Gefügeveränderungen die die mechanischen Eigenschaften des Auftragswerkstoffes weiter herabsetzen.

**Schweißbarkeit:** Der Werkstoff sollte bedingt schweißgeeignet sein, da er im Zuge eines Schweißvorganges auf den Grundwerkstoff aufgebracht wird.

Es gibt also eine Vielzahl von Eigenschaften, die bei der Pulverbewertung mit einfließen und die bei einer Auswahl berücksichtigt werden können. Einen Pulverwerkstoff zu finden, der alle Eigenschaften

positiv abdeckt wird unwahrscheinlich sein, weil viele der Eigenschaften sich gegenseitig ausschließen, z. B. lässt sich ein Werkstoff mit einer hohen Härte nicht leicht bearbeiten. Werkstoffe, wie z. B. Titan, die viele der Eigenschaften abdeckt, sind aus wirtschaftlicher Sicht gesehen, nicht realisierbar. Zur Auswahl wird deshalb das Instrument der Punktbewertung gewählt, worauf im nächsten Kapitel eingegangen wird.

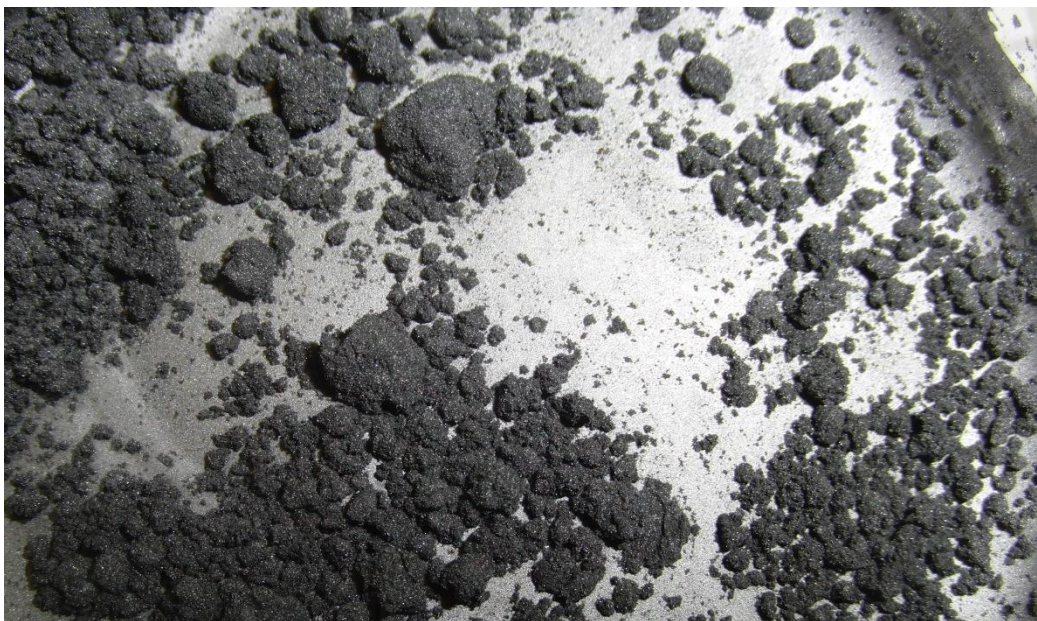
## 5.2 Punktbewertung für die Auswahl der Pulverwerkstoffe

Um eine Auswahl zu treffen wurde die Punktbewertung genutzt. Diese Bewertung stellt im Marketing eine Methode zur systematischen Alternativenauswahl dar. Die Gesamtbeurteilung der einzelnen Ideen wird aus der gewichteten Summe von Teilbeurteilungen zusammengesetzt. Die Beurteilung erfolgt anhand von verschiedenen Merkmalen, häufig qualitative Kriterien. Die Merkmale sollen im Gesamten betrachtet alle für den Erfolg des Objektes relevanten Einflussgrößen abdecken. Für die Bewertung werden die Zahlengrößen 1 (sehr schlecht) bis 10 (sehr gut) herangezogen. Die Bewertung soll eine Aussage darüber machen, welche Relevanz das Merkmal für den Erfolg des Produktes hat. Um diese Auswahl auf diesen Prozess zu übertragen, wurden die oben genannten Eigenschaften in eine Tabelle übertragen und die Punkte so vergeben, dass sie umso höher die Punktzahl ist, umso realistischer ist die Bewertung, das dieses Pulver die geforderten Angaben erfüllen kann. Die Gewichtung stellt dar, welche Relevanz die Eigenschaft hat, umso höher die Gewichtung, umso relevanter ist die Eigenschaft die erreicht werden soll. Die Gewichtung wird dann mit den Zahlengrößen der Bewertung multipliziert und ergibt im Gesamtkontext eine Summe. Die höchste Summe entscheidet dann auf die Werkstoffe die ausgewählt werden.

				Wert	1 Eisen-Graphit-Legierung		Wert	2 Stellite 21®		Wert	3 Eisen-Nickel-Legierung		Wert	4 Edelstahl (AS 4-P/LC)		Wert	5 Inconel 625		Wert	7 Bronze-Legierung CuZn38Mn1Al	
Beschreibung	Wert	Einheit	Gewicht (g)		n	n*g		n	n*g		n	n*g		n	n*g		n	n*g		n	n*g
Schmelzpunkt	1150	° C	20	1250 ° C	8	160	1295 - 1435 ° C	7	140	1450 ° C	7	140	1390 – 1440°C	6	120	1290-1350 ° C	7	140	850 ° C	1	20
Partikel	45 - 90	µm	5	30 - 45 µm	9	45	45 - 90 µm	7	35	45 - 75 µm	8	40	45 - 150 µm	5	25	35 - 125 µm	5	25	45 - 75 µm	5	25
Korrosionsbeständigkeit	ja		3	nein	1	3	ja	10	30	ja	10	30	ja	10	30	ja	9	27	ja	10	30
Verschleißbeständigkeit	200	HV	10	200 HV	7	70	230 - 403 HV	9	90	140 HV	6	60	160 - 190 HV	6	60	175 - 240 HV	8	80	100 - 120 HV	2	20
Härte	200	HV	15	200 HV	7	105	230 - 403 HV	9	135	140 HV	6	90	160 - 190 HV	6	90	175 - 240 HV	8	120	100 - 120 HV	2	30
Wärmeausdehnungskoeffizient	13,4	W/m°C	18	13 W/m°C	9	162	14.5 W/m°C	8	144	10,5 W/m-°C	7	126	14.6 W/m-°C	8	144	14.2 W/m-°C	7	126	18 W/m-°C	4	72
Zerspanbarkeit/Oberflächenrauigkeit	2,5 - 5	µm	3	45 - 75 µm	9	27	45 - 90 µm	7	21	45 - 75 µm	8	24	50 - 150 µm	5	15	35 - 125 µm	5	15	45 - 150 µm	5	15
Wirtschaftlichkeit	Kosten	€	18	1 kg = 7,00 €	10	180	1 kg = 49,20 €	6	108	1 kg = 19,00 €	9	162	1 kg = 18,00 €	9	162	1 Kg = 55,00 €	2	36	1 kg = 75,00 €	1	18
Temperaturbeständigkeit/Warmfestigkeit	600 ° C	° C	10	1250 ° C	10	100	800 ° C	9	90	1000 ° C	9	90	900 ° C	9	90	1000 ° C	9	90	400 ° C	2	20
Schweißbarkeit	bedingt	-	5	bedingt	6	30	gut	9	45	gut	9	45	gut	9	45	gut	9	45	bedingt	6	30
<b>Summe</b>						<b>882</b>			<b>838</b>			<b>807</b>			<b>781</b>			<b>704</b>			<b>280</b>

### 5.2.1 Gewählte Pulver

Es sollen drei unterschiedliche Pulverwerkstoffe untersucht werden. Aus der Punktbewertung ergibt sich demzufolge, ein standardisiertes Pulver, mit dem Namen *Stellite 21*<sup>®</sup>, das von einer Vielzahl von Unternehmen hergestellt und vertrieben wird, ein Edelpulver, das auch für andere Fertigungsverfahren zum Einsatz kommt und es wird eine Legierung hergestellt, die aus den Reinstoffen Eisen und Nickel besteht. Auf die definierten Eigenschaften wird in Folge genauer eingegangen. Aufgrund der Zahlenwerte, kommt auch der Pulverwerkstoff Eisen-Graphit in Frage, doch aufgrund der Beschaffenheit des Pulvers, lässt sich dieser nicht in dem Prozess einsetzen, da sich die beiden Reinstoffe nicht vermischen. **Abbildung 19** zeigt dies deutlich.



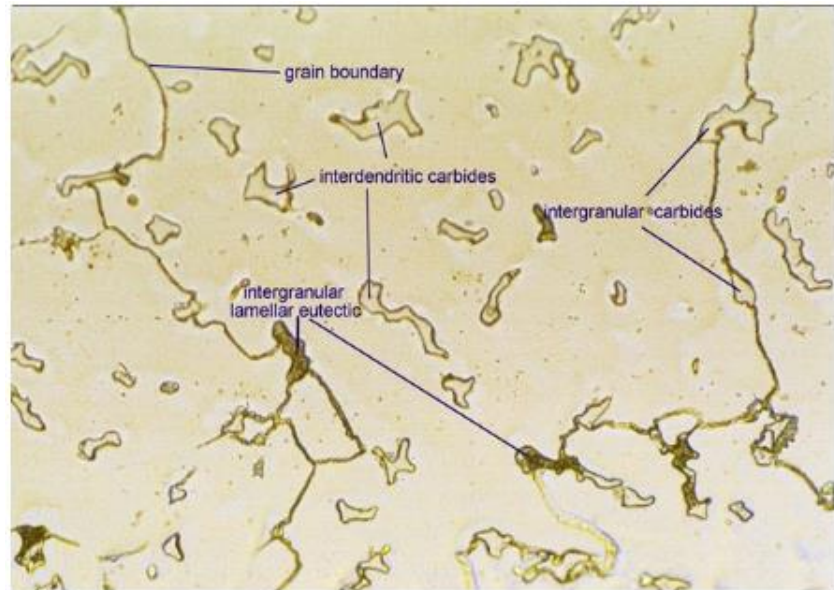
**Abbildung 19** Eisen-Graphit-Legierung

#### 1. Standardmodell der Hersteller von Pulverauftragswerkstoffen

Das ausgewählte Pulver ist hier ein *Stellite 21*<sup>®</sup>. Die Legierungsanteile setzen sich folgendermaßen zusammen:

Name	C	Cr	Fe	Si	Co	Mo	Ni
<b>Stellite 21</b>	0,25	27	3	1,5	Rest	5,5	2,5

*Stellite 21*<sup>®</sup> ist eine Legierung auf Kobaltbasis. Sie zeichnet sich durch eine hohe Verschleiß- und Temperaturbeständigkeit, bei gleichzeitiger sehr guter Korrosionsbeständigkeit aus. Der hohe Anteil an Chrom erhöht hier den Widerstand gegen Korrosion und Oxidation, parallel dazu bildet er die sogenannten Chromkarbide ( $M_7C_3$ ), diese sind zuständig für die Härte und Verschleißfestigkeit, in dem sie die Kobaltmatrix stärken. Aufgrund dessen, dass die Anteile von Wolfram und Molybdän



**Abbildung 20** Zusammensetzung des Pulvers

große Atome besitzen, geben sie der Matrix eine zusätzliche Festigkeit. Sie bilden aber harte und spröde Karbide. Der Zusatz an Nickel sorgt dafür, dass die Duktilität gesteigert wird. Die Härte wird mit 290 – 430 HV angegeben, er sollte in der Aufmischungszone den Wert von 350 HV allerdings nicht überschreiten. Die Dichte des Werkstoffes liegt bei 8,33 g/cm, dieser Wert ist relevant, weil er sich auf die Pulverförderung auswirkt. Der Schmelzpunkt wird mit 1295 – 1435 ° C angegeben und ist somit höher als der des Grundwerkstoffes, bei einer zu hohen Laserleistung könnte es zu einer zu großen Aufmischung kommen.

## 2. Edelstahl-Legierung

Die Zusammensetzung dieser Legierung setzt sich zusammen aus:

Name	C	Cr	Fe	Si	Co	Mo	Ni	Al	Mn	P	S
Edelstahl	0,021	17,15	Rest	0,87	–	2,09	12,7	0,004	0,62	0,015	0,006

Edelstahl eignet sich aufgrund seiner Legierungselemente sehr gut, er ist korrosionsbeständig da der Chromanteil über 12,5 % liegt und kann aufgrund seiner größeren Härte, durch den Anteil an Molybdän eine verschleißfestere Oberfläche ermöglichen. Edelstahl lässt sich gut bearbeiten und ist schweißgeeignet. Die Korngröße kann mit 50 – 150 µm zur Verfügung gestellt werden und eignet sich daher gut für den Prozess. Durch den geringen Preis von 18,00

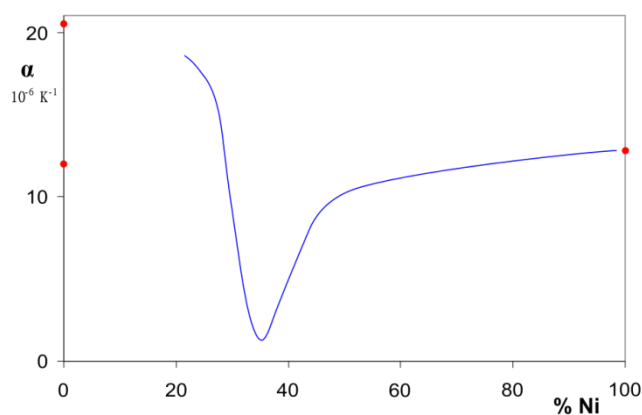
€/kg, lässt sich dieser Werkstoff kostengünstig einsetzen. Durch den geringen Härtewert könnte allerdings eine Auftragsschicht entstehen, die den Anforderungen nicht genügt.

### 3. Adaptiertes Modell aus der Werkstoffkunde

Die Wahl bei dem adaptierten Modell fällt auf eine Eisen-Nickel-Legierung mit der Markenbezeichnung *INVAR*<sup>®</sup>. Bestandteile dieser Legierung setzen sich wie folgt zusammen:

Name	Fe	Ni
<i>INVAR</i> <sup>®</sup>	64	36

Das zentrale Merkmal dieser Legierung ist der geringe Wärmeausdehnungskoeffizient, dieser liegt im Bereich von 20 – 90 ° C bei  $1,7 - 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , als Vergleich, bei einem normalen Stahl liegt dieser bei  $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Daher resultiert auch Name, den dieser Werkstoff besitzt eine **Invarianz** in der Dehnung bei einer Temperaturänderung. Dieser Effekt entsteht durch eine negative Volumenmagnetostriktion des Kristallgitters. Darunter versteht man, dass sich die Atomabstände vergrößern, wenn eine Abstoßung des magnetischen Momentes erfolgt. Die Abnahme dieses Effektes erfolgt bei steigender Temperatur und damit bei Abnahme des magnetischen Momentes. Das Kristallgitter schrumpft und die Abnahme der negativen Volumenmagnetostriktion bei steigender Temperatur verhält sich damit gegenläufig zur Wärmeausdehnung. Diese physikalischen Phänomene können sich in bestimmten Temperaturbereichen so kompensieren, dass sich die Atomabstände effektiv nicht ändern und der Festkörper dadurch keine Längenänderung (bzw. Volumenänderung) erfährt.



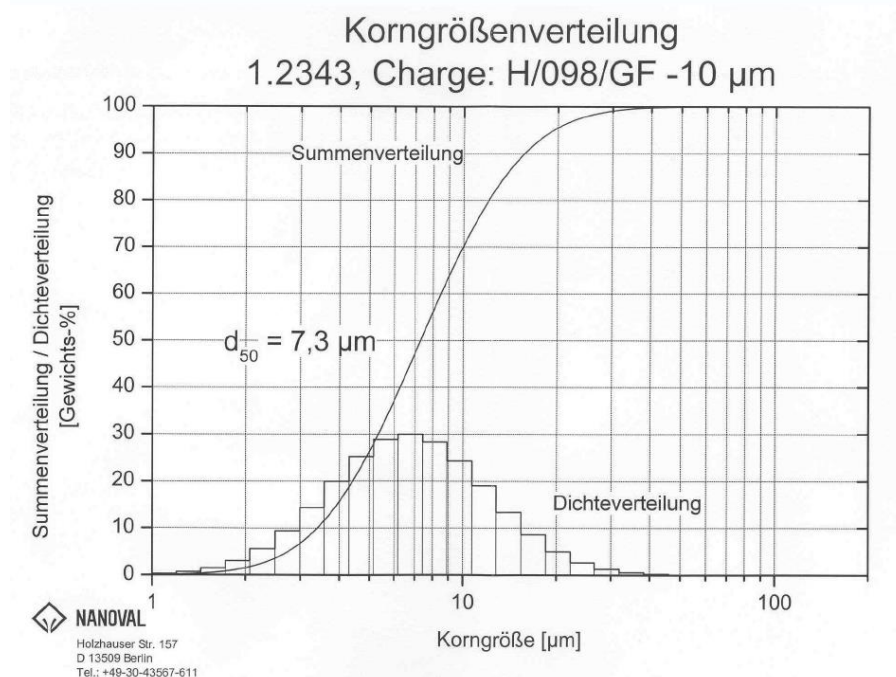
**Abbildung 22** Wärmeausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit vom Nickelgehalt

Ein weiterer Vorteil dieser Legierung bezieht sich auf die Eigenschaften beim Schweißen, die schon in Kapitel 2.2.2 angesprochen worden ist. Da wird beschrieben, dass eine artfremde Schweißung keine Vorwärmung nötig ist.

Dieser Werkstoff erfüllt auch eins der Hauptkriterien der Wirtschaftlichkeit, da Eisen ein sehr kostengünstiger Werkstoff ist. Zum anderen könnte die geringe Wärmeleitfähigkeit einen guten Beitrag leisten, da die Wärme während des Schweißprozesses besser in dem Pulver gehalten werden kann und die Spannungen im Grundwerkstoff geringer sind. Angesichts der schlechten Schweißigenschaften des Grauguss, sollte das Reparaturmaterial eine ausgezeichnete Benetzbarkeit aufweisen und die thermophysikalischen Parameter sollten gut aufeinander abgestimmt werden.

## 5.2.2 Partikelgrößenbestimmung der Pulver

Für jedes Pulver wird eine Partikelgrößenbestimmung durchgeführt, damit bei der Auswertung auch eine Aussage über deren Einfluss gemacht werden kann. Die Partikelgröße gibt die Breite, Höhe und Länge jedes einzelnen Partikels des Pulvers an. Die Partikelgrößenverteilung wird nach DIN ISO 13320 an dem Messgerät LS 13320 Laserbeugungsanalysator von Beckmann Coulter ermittelt. Dabei wird die Verteilungssumme  $Q_3(x)$  in der Mengengart Volumen ermittelt. Die Verteilungsdichte  $q_3(x)$  wird rechnerisch bestimmt. Bei jeder Messung wird eine Pulvermenge von ca. einem Gramm in die Einführöffnung des Messgerätes gegeben. Dabei dispergiert das Pulver im Wasser, welches sich in dem Messgerät befindet. Das Messprinzip beruht auf dem Laserbeugungsverfahren. An jeder Stichprobe werden insgesamt sechs Messungen durchgeführt. An der **Abbildung 23** wird beispielhaft gezeigt, dass die Korngrößen eine gaußförmige Verteilung besitzen.



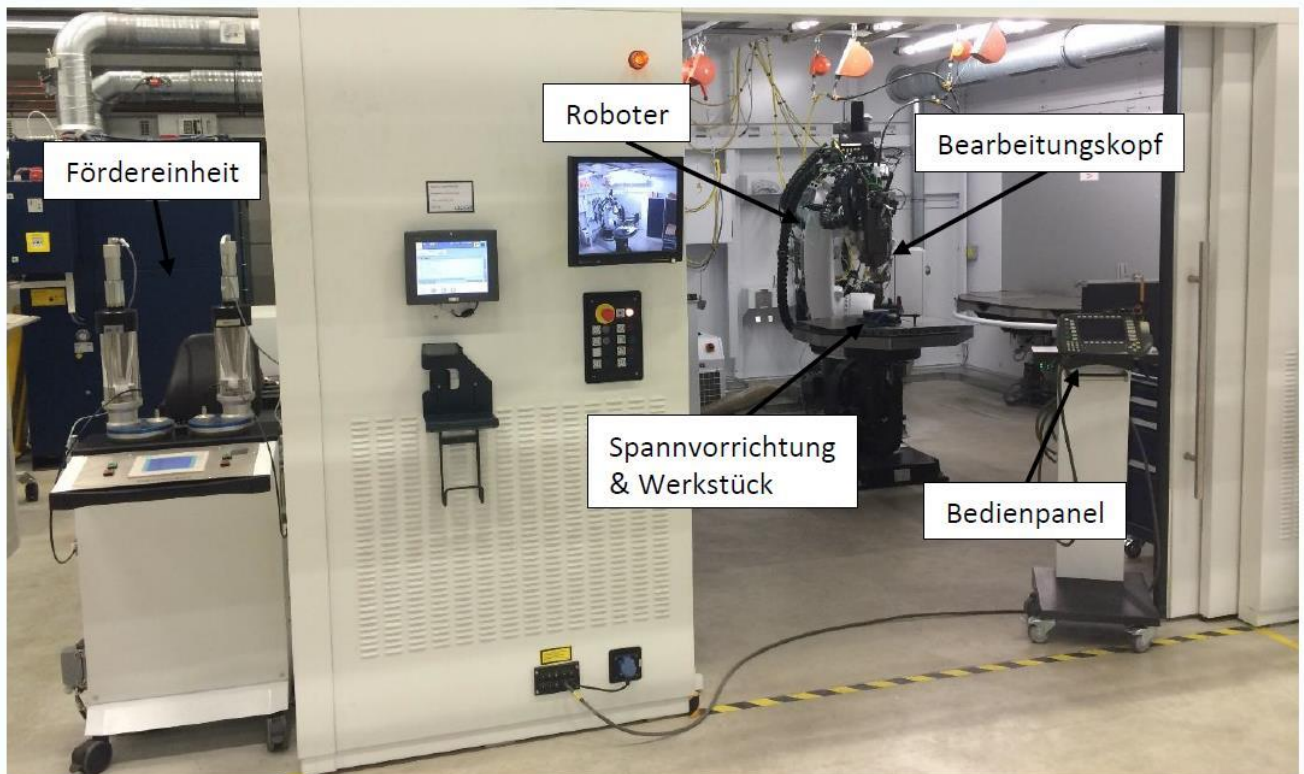
**Abbildung 23** Korngrößenverteilung eines Pulvers



## 6 Experimentelle Untersuchung

### 6.1 Anlagen und Systemtechnik

Bei der Anlage handelt es sich um eine geschlossene Roboterzelle wie in **Abbildung 24** dargestellt.



**Abbildung 24** Versuchsaufbau für den LPA-Prozess

Die Führung des Lasers übernimmt ein 6-Achs-Roboter der Firma *Kuka*, die Bedienung und Steuerung der Anlage übernimmt das Bedienpanel, das auch außerhalb der Roboterzelle zum Einsatz kommen kann. Da während des Prozesses die Tür aus sicherheitsrelevanten Gründen geschlossen sein muss und sich keine Personen innerhalb der Zellen aufhalten dürfen. Weitere Elemente sind die Laserstrahlquellen, der Bearbeitungskopf und der Pulverförderer, die in den nächsten Kapiteln noch näher erläutert werden.

#### 6.1.1 Laserstrahlquelle

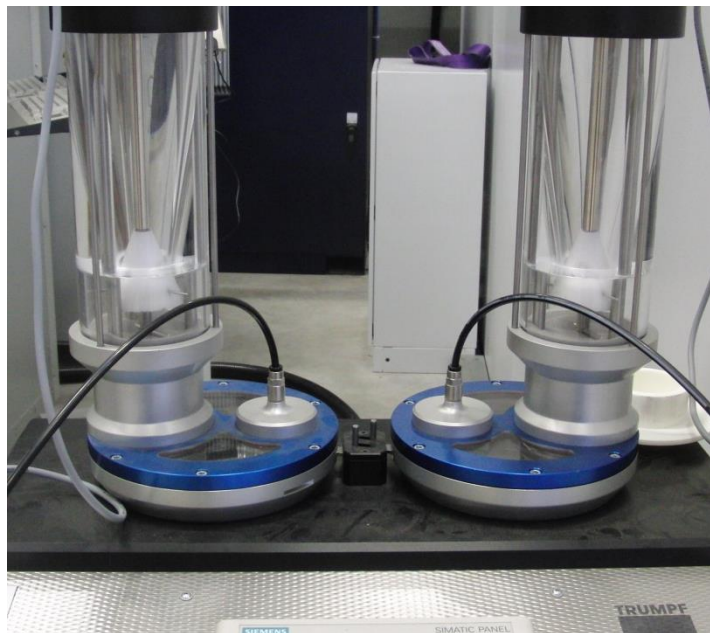
Die Laserstrahlquelle besteht aus einem Nd:YAG-Festkörperlaser der Firma *Trumpf* mit dem Markennamen *TruDisk6001*. Die maximale Leistung des Lasers liegt bei 6 kW und handelt sich hierbei um einen Scheibenlaser. Wie in den Grundlagen schon dargestellt, eignet sich dieser Laser aufgrund sei-

ner kleineren Wellenlänge sehr gut für diesen Prozess, weil er damit ein größeres Prozessfenster besitzt und weniger Leistung absorbiert wird. Auch lässt er sich, im Gegensatz zu einem CO<sub>2</sub>-Laser, durch ein Glasfaserkabel leiten, welches den Vorteil besitzt, dass er flexibler eingesetzt werden kann. Allerdings ist die Lebensdauer der Pumpdioden und des Kristalles sehr gering und dieser Laser im Gegensatz zu anderen Bauarten kostenintensiver in der Instandhaltung.

### 6.1.2 Pulverförderung

Die Fördereinheit mit dem Pulverförderer hat die Aufgabe einen konstanten Pulvermassenstrom zu erzeugen und diesen zum Bearbeitungskopf zu führen. Damit das Ergebnis zufriedenstellend ist, sollte der Prozess möglichst gleichmäßig ablaufen und eine geringe Pulsation aufweisen. Das Pulver befindet sich in dem zylinderförmigen Fördertopf, der in **Abbildung 25** zu sehen ist. Dieser Zylinder besitzt eine konische Form, dadurch gelangt das Pulver in die vorhandene Ringnut des Fördertellers. Ein nachgeschalteter Abstreifer definiert die Menge der Füllung. Die weitere Förderung des Pulvers erfolgt dann über einen konstanten Drehmoment des Tellers, die variiert werden kann. Im Förder-

topf und Bereich des Tellers besteht ein Überdruck, erreicht also das Pulver nach einer halben Umdrehung des Tellers, in Absaugvorrichtung wird es durch das Trägergas, in diesem Fall Argon, erfasst und gelangt über eine Leitung zu dem Bearbeitungskopf. Auch der Gasdruck und somit der Pulverdurchfluss kann variiert werden. Verschleißteile dieses Prozesses sind der Mitnehmer und der Abstreifer, da bei zu wenig Fördergas oder einer zu großen Tellergeschwindigkeit die Pulverpartikel an diesen Bauteilen schleifen und für abrasiven Verschleiß sorgen. [14]



**Abbildung 25** Schematische Darstellung des Pulverförderers

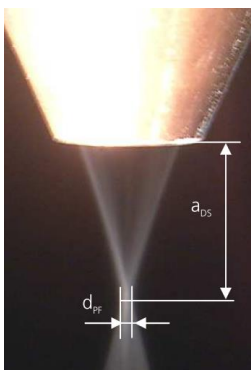
Der Pulverförderer der für diesen Versuch eingesetzt wird, kann laut Herstellerangaben einen Pulvermassenstrom von 5 – 30 g/min realisieren. Die Einstellung erfolgt über das Drehmoment des Pulvertellers, wobei das Fördergas entsprechend angepasst werden muss. Auch die Korngröße entscheidet über die Einstellungsparameter. In der Praxis heißt das, dass der Pulvermassenstrom für jeden Zusatzwerkstoff experimentell ermittelt werden muss. Die Erfahrungswerte aus Vorversuchen

besagen, dass das Fördergas bei den Messungen und Versuchen linear ansteigend zu dem Tellerdrehmoment eingestellt wird, so dass ein konstanter Pulvermassenstrom erreicht werden kann. Für die Ermittlung wird das zu untersuchende Pulver 30 Sekunden lang in einen Behälter gefördert und die Menge anschließend in einer Archimedes Waage gewogen. Für ein exaktes Ergebnis wird dieser Vorgang drei Mal wiederholt und aus den Ergebnissen ein Mittelwert gebildet.

### 6.1.3 Bearbeitungskopf

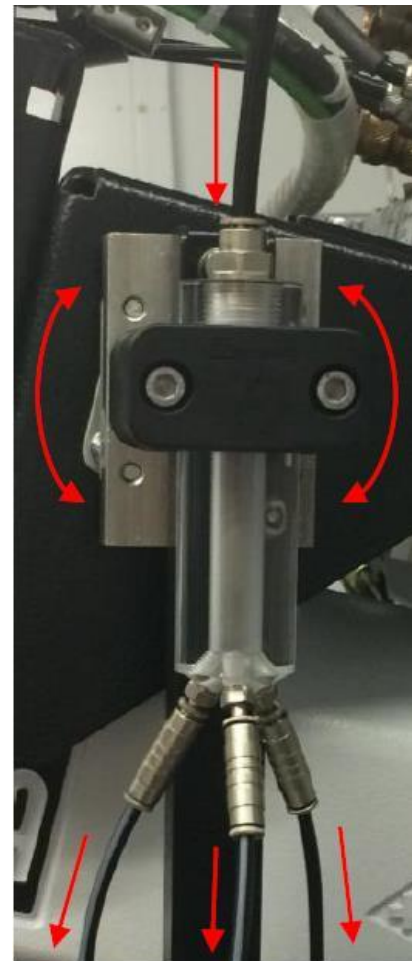
Der Bearbeitungskopf der hier zur Verwendung kommt, besteht aus einer Dreistrahdüse. Der Vorteil besteht bei dieser Düse darin, dass sich größere Auftragsraten auf der Werkstückoberfläche erzeugen lassen, aufgrund der drei Strahlengänge. Das Pulver wird zu diesem Zweck durch einen Schlauch zum Bearbeitungskopf geführt, wo es sich in drei Schläuche aufteilt, die jeweils zu den Düsen führen. Damit eine konstante Zuführung des Pulvers gewährleistet ist, ist die Zuführung drehbar gelagert. D. h. das der Pulverstrom, je nach Roboterbewegung immer senkrecht steht. Damit es auch infolge der Wärmeentwicklung bei dem Prozess, die Beibehaltung des konstanten Pulverstromes garantiert ist, sorgt eine separate Wasserkühlung die Temperatur der Kupferdüse auf  $\sim 15^\circ \text{C}$ . Weitere Eigenschaften des Bearbeitungskopfes sind in den folgenden Punkten aufgeführt:

- Brennweite von 150 mm
- Düsenabstand zur Oberfläche 16 mm
- Spotdurchmesser auf der Oberfläche 0,418 – 6,326 mm



**Abbildung 27** Abstand zum Bearbeitungskopf

Die Koaxialdüse des Bearbeitungskopfes besitzt 3 Düsen aus denen das Pulver gefördert wird. Es wurde ermittelt, dass bei einem Abstand von 16 mm, die Pulverstrahlen zusammen treffen, der Abstand wird, wie auf der **Abbildung 27** zu sehen mit,  $a_{DS}$  betitelt und bleibt über den gesamten Versuchszeitraum konstant. Der Abstand zur Oberfläche des Werkstückes muss immer 16 mm betragen. Denn an diesem Punkt treffen die 3 Pulverströme der Düsen zusammen und ergeben einen gemeinsamen Pulvermassenstrom.



**Abbildung 26** Flexibilität des Bearbeitungskopfes

## 6.2 Auswertung und Versuchsplanung

Es gibt unterschiedliche Instrumente die genutzt werden können, um die geforderten Kenngrößen zu bewerten. Welche der unterschiedlichen Werkstoffprüfungen angewendet werden, wird in diesem Kapitel beschrieben und soll den ersten Schritt der Versuchsplanung darstellen.

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und des Zeitmanagements versucht man die Anzahl an Versuchen möglichst gering zu halten. Aber auch so viele Versuche zu erzeugen, dass ein aussagekräftiges Ergebnis vorliegt. Aus diesem Grund wird eine Versuchsplanung erstellt, um den richtigen Versuchsumfang festzulegen. Der theoretische Versuchsplan soll eine Hilfestellung leisten, dass die Parameter-einstellungen der Maschine besser beherrschbar sind und man in kurzer Zeit feststellen kann wie das Verhalten der einzelnen Pulver ist und welchen Einfluss eine Änderung auf das Ergebnis hat.

### 6.2.1 Prüfmethoden für die Beurteilung der Auftragsnaht

#### 6.2.1.1 Härte [HV]

Die Härte des Auftragswerkstoffes soll die Härte des Grundwerkstoffes übersteigen, da die eine höhere Verschleißfestigkeit angestrebt werden soll. Die Härte in der Aufmischungszone, soll ähnlich der Härte des Grundwerkstoffes sein, damit kein Abplatzen der Auftragsschicht erfolgt.

**Auswertung:** Die Bestimmung der Härte erfolgt über eine statische Härteprüfung nach Vickers. Diese Prüfung wurde im Jahr 1925 von Smith und Sandland entwickelt und nach dem britischen Flugzeugbauunternehmen Vickers benannt [11]. Sie ist nach DIN EN ISO 6507-1:2005 bis -4:2005 genormt

und ist geeignet für homogene, dünnwandige und oberflächengehärtete Werkstoffe. Der Prüfkörper besteht aus einer gleichseitigen Diamantenpyramide mit einem Öffnungswinkel von  $136^\circ$  und wird unter festgelegter Prüfkraft in das Werkstück eingedrückt. Der Eindruck wird automatisch unter einem Mikroskop ausgemessen. Aus der festgestellten Länge der Diagonalen des Eindruckes wird die Eindruckoberfläche errechnet. Das Verhältnis von Prüfkraft in der Einheit Newton zur Eindruckoberfläche ( $d$  in Millimetern) ergibt mit dem Faktor 0,1891 multipliziert die Vickershärte (HV, engl. VHN = Vickers Hardness Number) [15].

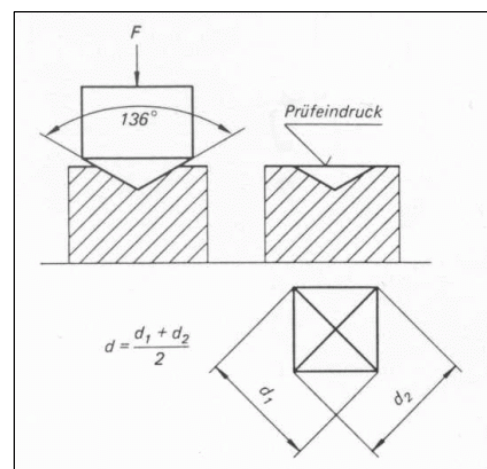
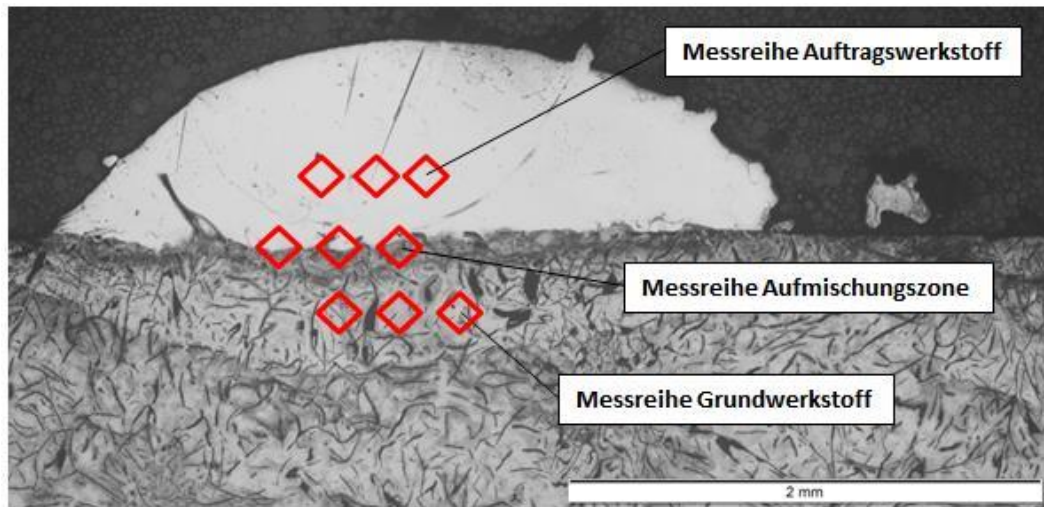


Abbildung 28 Geometrie der Härteprüfung

Die Messung soll in drei unterschiedlichen Bereichen vorgenommen werden, wie in der **Abbildung 29** gezeigt wird. Zum einen in der Auftragsnaht, der Aufmischungszone und des Grundwerkstoffes. Mit diesen Härtewerten kann dann eine Aussage über die Zielparmeter gemacht werden.



**Abbildung 29** Unterschiedliche Bereiche der Härtemessung

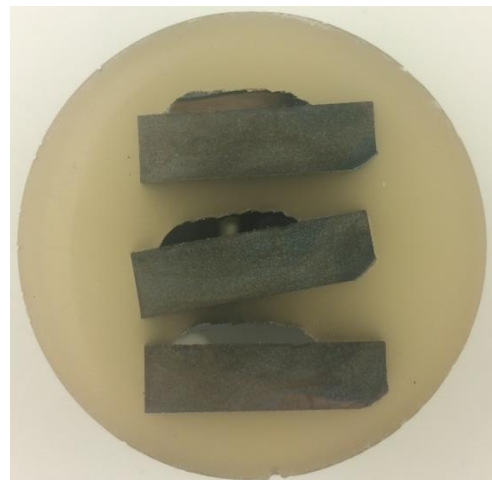
#### 6.2.1.2 Rissfreier Auftrags- und Grundwerkstoff, Poren und Bindefehler an der Oberfläche

Es soll eine nahezu porenfreie und dichte Auftragschicht entstehen, deren Anbindung an allen Stellen eine einheitliche Durchmischung aufzeigt. Eine rissfreie Anbindung, gerade an Grenzen der Auftragsnaht und der Oberfläche soll erreicht werden. Eine parametrisierte Anzahl an Mikrorissen kann toleriert werden.

**Auswertung:** Eine Überprüfung dieser Zielgröße kann über das Farbeindringverfahren erfolgen. Dieses Verfahren ist nach DIN EN 571 und DIN EN ISO 3452 genormt, es stellt eine kostengünstige Methode zum Nachweis von Unregelmäßigkeiten an der Oberfläche da. Zu diesem Zweck, muss die Oberfläche gereinigt werden, dann wird ein Eindringmittel auf die Oberfläche aufgebracht, das aufgrund von Kapillarwirkung auch feinste Risse und Bindefehler auffüllt. Nach einer kurzen Einwirkzeit wird es abgewaschen, aber ohne es aus ganz auszuwaschen. Mit dem nun aufgetragenen Entwickler, wird die Farbe aus den Unregelmäßigkeiten ausgesaugt und somit sichtbar gemacht. Für die inneren Unregelmäßigkeiten wird die Probe eingebettet und mikroskopiert, damit kann auch eine verlässliche Aussage über die Größe der Unregelmäßigkeiten gemacht werden

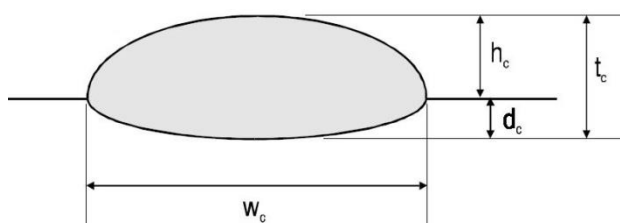
### 6.2.1.3 Mikroschliff der Auftragsnaht

Mit dem Lichtmikroskopischen Verfahren können eine Vielzahl von Beurteilungen der Auftragsnaht erfolgen. Diese Prüfmethode ermöglicht es, qualitative und quantitative Erkenntnisse über das Innere der Auftragsnaht zu machen. Die Probe mit der Auftragsnaht muss dafür aufgeschnitten und entgratet werden. Anschließend wird diese in eine Form eingelegt und dann mit einem Epoxidharz, der aus zwei Komponenten besteht, übergossen. Die Form härtet aus und wird nun mechanisch präpariert. Dieser Prozess ist in zwei Phasen aufgeteilt. Die erste Stufe besteht aus einem Schleifvorgang bei dem beschädigtes oder deformiertes Material abgetragen wird, dieser erfolgt zunächst mit einem Planschleifen und dann mit einem Feinschleifen. Der zweite Schritt besteht dann aus dem Polieren der Oberfläche, hier wird in der ersten Phase das Diamantpolieren angewendet und dann abschließend das Oxidpolieren, bei diesem Vorgang wird Siliziumoxid mit einer Korngröße von  $0,04 \mu\text{m}$  eingesetzt. Mit dieser Kombination aus chemischer Reaktion und mechanischer Politur kann eine kratzerfreie Oberfläche erzielt werden. Um anschließend das Gefüge und damit, unter anderem, die Wärmeeinflusszone sichtbar zu machen, muss die Probe geätzt werden. Aus diesem Grund wird die Probe mit Adlersäure geätzt und kann nun unter dem Lichtmikroskop ausgewertet werden. Es soll eine Probe entstehen, wie in **Abbildung 30** zu sehen. An diesem Probekörper können nun eine große Anzahl an Bewertungen durchgeführt werden. Auf die Bewertung der Härte wurde schon eingegangen, diese kann allerdings auch nur durch eine Einbettung erfolgen. Das Bild das unter dem Lichtmikroskop entsteht, ermöglicht eine genaue Vermessung der



**Abbildung 30** Probe einer Auftragsnaht

Auftragsnaht. Das Aspektenverhältnis, sowie die entstandene Auftragshöhe können so ermittelt werden. Die Auftragsnaht setzt sich aus unterschiedlichen Teilbereichen zusammen, wie die **Abbildung 31** zeigt



- $h_c$  = Höhe des Auftragswerkstoffes
- $d_c$  = Höhe der Aufmischungszone
- $t_c$  = Gesamte Höhe des Auftrages
- $w_c$  = Breite der Auftragsnaht

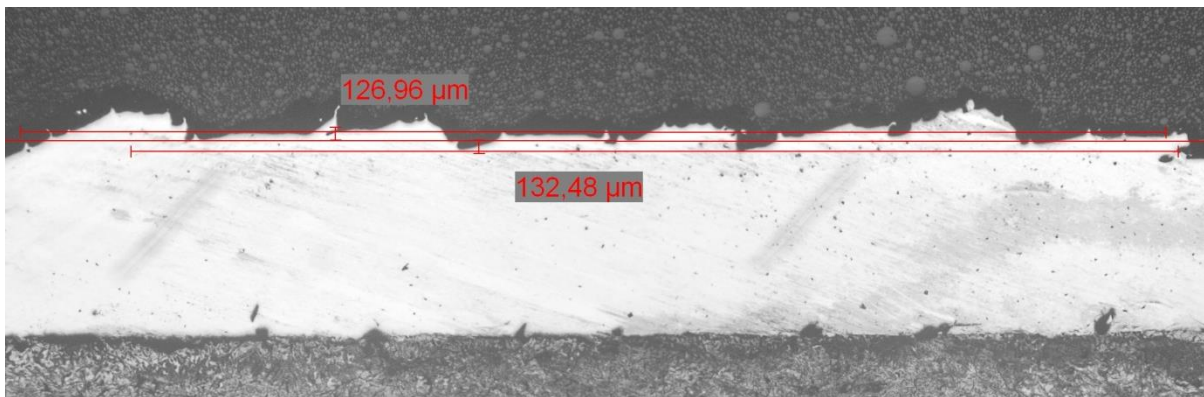
**Abbildung 31** Teilbereiche der Auftragsnaht

Das Aspektenverhältnis wird durch die folgende Formel berechnet: **Aspektenverhältnis** =  $\frac{w_c}{h_c}$  (1.2)

Durch die Ätzung wird die kristalline Struktur sichtbar, das ermöglicht dem Betrachter den Aufmischungsgrad des Auftragspulvers mit dem Grundwerkstoff zu bestimmen. Durch das Berechnungstool des Mikroskops, können die einzelnen Flächen wie Auftragsnaht, Grundwerkstoff und Aufmischungszone eingegrenzt werden und es wird die Fläche des jeweiligen Bereiches angegeben. Über die Verhältnisformel kann der prozentuale Anteil der Aufmischung angegeben werden.

$$\text{Aufmischungsgrad} = \frac{\text{Fläche der Aufmischung} \cdot 100}{\text{Gesamte Auftragsfläche}} [\%] \quad (1.3)$$

Im Rahmen der Welligkeitsbemaßung kann auch, anhand der Aufnahme eine Aussage gemacht werden, der Mittenrauwert wird durch einen Linie bestimmt und kann zum obere und untere Abmaß des Auftrages verschoben werden. Die Abweichung des Mittenrauwertes gibt die Höhe der Welligkeit an. Ein Beispiel für eine Vermessung der Welligkeit ist in **Abbildung 32** zu sehen.



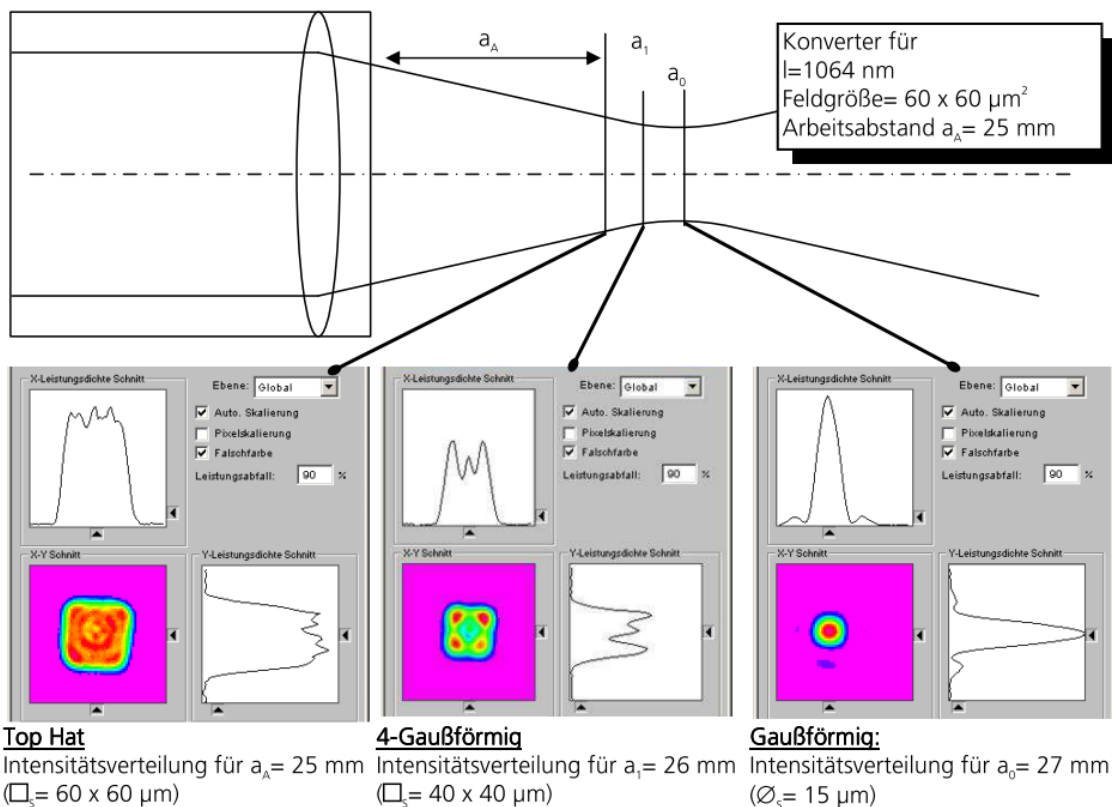
**Abbildung 32** Welligkeit einer Schweißnaht

## 6.2.2 Einflussfaktoren

Wichtiger Bestandteil einer Versuchsplanung sind zu dem die Einflussfaktoren, d. h. die Faktoren, die während des Prozesses auftreten und im Ablauf variiert werden können. Da bei diesem Prozesse viele Kombinationen der Faktoren auftreten, haben wir uns für die Erstellung eines Screening-Versuchsplanes entschieden. Bei diesem Plan wird versucht die Anzahl der Faktorstufenkombinationen zu reduzieren und somit mit wenigen Versuchen, eine Aussage über die Aus- und Wechselwirkungen der unterschiedlichen Einflussfaktoren zu treffen. Im Wesentlichen sind diese Pläne gut geeignet, wenn, wie in diesem Versuch sehr wenig über die Problemstellung bekannt ist. Bei dem vorliegenden Versuch treten die folgenden Einflussfaktoren auf

- Leistung des Laserstrahles  $P_L$  [kW]

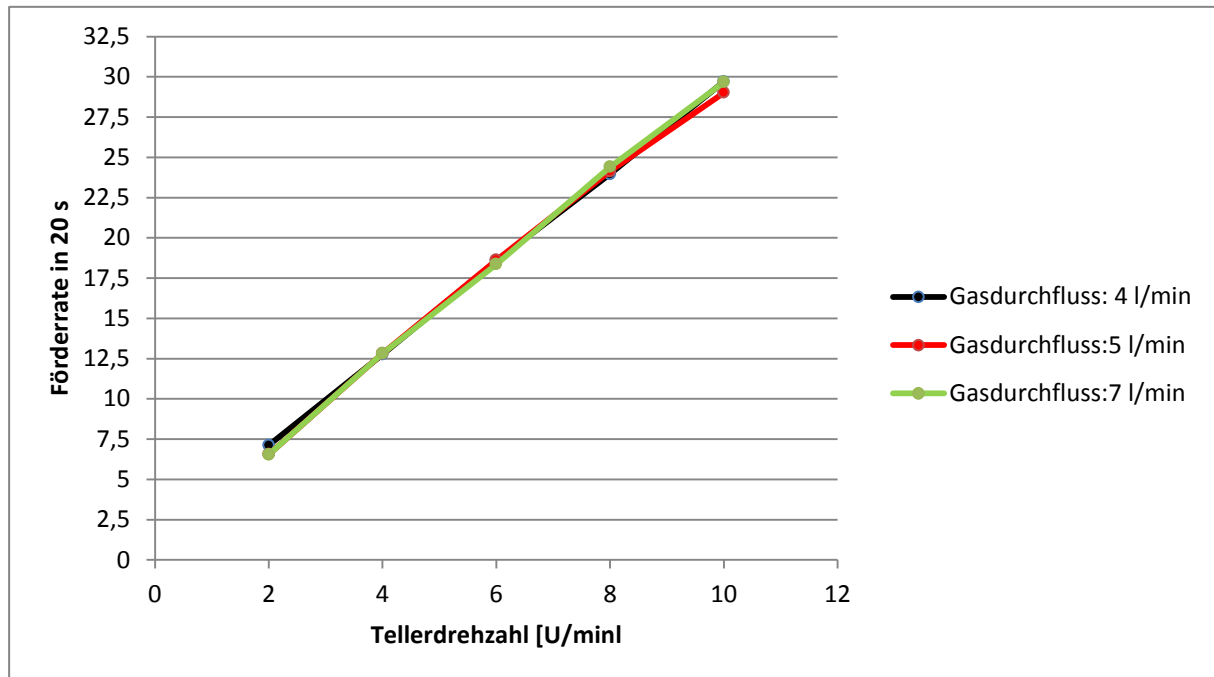
- Die Laserleistung muss im Verhältnis zu Pulvermassenstrom und der Vorschubgeschwindigkeit sein. Ist die Laserleistung zu gering, kann das Pulver nicht aufgeschmolzen werden und eine Ausnutzung des gesamten Massenstromes ist nicht gewährleistet. Ist die Laserleistung zu hoch gewählt, findet eine zu große Aufmischung des Grundwerkstoffes statt. Die Laserleistung kann in einem Bereich von 600 – 6000 W gewählt werden. D. h. 10 % der Leistung des Lasers muss eingestellt werden.
- Vorschubgeschwindigkeit  $v_L$  [m/min]
  - Die Vorschubgeschwindigkeit muss bei dem Roboter in mm/s angegeben werden und sollte immer das richtige Verhältnis zu dem aufgetragenen Pulver haben. Bei sehr geringen Vorschubgeschwindigkeiten ( $< 0,6$  m/min) können große Auftragsraten generiert werden. Dafür muss allerdings eine große Laserleistung zur Verfügung stehen, da sonst keine Anbindung an das Substrat erfolgen kann.
- Fokusabstand [mm]
  - Der Fokusabstand steht in Abhängigkeit zu dem Durchmesser des Laserstrahles, wie in **Abbildung 33** zu sehen und ist mit dem Buchstaben  $a$  gekennzeichnet. Für diesen Prozess gibt es aus vorangegangenen Versuchen den Erfahrungswert mit  $b = 27$  mm, da man bei diesem Abstand eine gaußförmige Verteilung des Laserstrahles erreicht. Über den Fokusabstand lässt sich die Fläche des Laserstrahles bestimmen.



**Abbildung 33** Schematische Abbildung der Strahlakustik [6]



- Pulverzufuhr [g/min]
  - Diese wird gesteuert über die Tellerdrehzahl [U/min] und die zugeführte Menge des Trägergases Argon. Die Pulverzufuhr nimmt maßgeblich mit der Tellerdrehzahl zu, da Versuche gezeigt haben, dass die Veränderung der Gaszufuhr nur einen geringen Einfluss auf den Pulvermassenstrom hat. Das zeigt die **Abbildung 34**, hier wurde eine Pulvermassenstrommessung durchgeführt und es ist ersichtlich, dass der geänderte Gasdurchfluss, die Fördermenge in sehr geringem Maße beeinflusst.



**Abbildung 34** Förderrate bei einem bei einem unterschiedlichen Gasdurchfluss

### 6.2.3 Aufstellung des theoretischen Versuchsplanes

Bei einem faktoriellen Versuch nimmt die Anzahl der Faktorenstufenkombination  $m$  mit der Anzahl der Faktoren  $k$  wie folgt zu:

$$m = 2^k$$

Daraus folgt, dass man für einen der vorliegenden Versuche  $2^3 = 8$  Kombinationen und damit auch eine weitere Anzahl von Wechselwirkungen der Einflussfaktoren erhält. Es gibt drei unterschiedliche Versuchsreihen, bei denen der Unterschied darin besteht, dass wir unterschiedliche Auftragswerkstoffe auftragen. Erstellt wird also für jedes Auftragspulver eine Tabelle, diese weist die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf. Hier können auch die unterschiedlichen Parameter, die aus dem Vorversuch generiert wurden, einfließen. Betrachten wir also zuerst die theoretische Aufstellung des Versuchsplanes [16].

Erstellt man für diesen Versuch einen faktoriellen Versuchsplan so ergeben sich  $2^3$  Faktorenstufenkombinationen. Um es anschaulich darzustellen, bezeichnen wir diese als A ( $P_L$ ), B ( $v_L$ ) und C (V). Daraus leiten sich dann die Effekte für AB, AC, BC und die Dreifachwechselwirkung ABC ab, die wir mit einem neuen Faktor D belegen. Es ergibt sich also eine neue Faktorstufenkombination  $2^4 = 16$ , da wir aber die Anzahl der Versuche halbieren wollen, ergibt sich  $\frac{1}{2} \cdot 2^4 = 2^{4-1}$ . Um die jeweiligen Zusammenhänge für die Versuche darzustellen, wurde eine Tabelle erstellt, aus denen man die Wechselwirkung für jeden Versuch ablesen kann. Für die Versuchsreihe kommen also nur die Versuchszeilen in Frage die 2, 4 Einflussfaktoren oder keinen positiv gekennzeichnet haben.

Versuch #	A $P_L$ [kW]	B $v_L$ [m/min]	C V [L/min]	D	$2^{4-1}$ -Plan
1	-	-	-	-	1
2	+	-	-	-	
3	-	+	-	-	
4	+	+	-	-	4
5	-	-	+	-	
6	+	-	+	-	6
7	-	+	+	-	7
8	+	+	+	-	
9	-	-	-	+	
10	+	-	-	+	2
11	-	+	-	+	3
12	+	+	-	+	
13	-	-	+	+	5
14	+	-	+	+	
15	-	+	+	+	
16	+	+	+	+	8

**Tabelle 9** Übersicht der Faktorenstufenkombination

Daraus generiert man eine neue Tabelle mit den Wechselwirkungen die sich im Laufe des Versuches ergeben.

#	A P <sub>L</sub> [kW]	B v <sub>L</sub> [m/min]	C V [L/min]	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
10	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
11	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

**Tabelle 10** Entstandene Faktorenstufenkombinationen

Die Vorzeichenspalten der Wechselwirkungen ergeben sich als Produkte der Vorzeichenspalten der beteiligten Faktoren. Folgende Spalten sind demnach gleich, die Effekte können allerdings nicht getrennt werden, sie sind miteinander vermengt.

1: A = BCD

2: B = ACD

3: C = ABD

4: D = ABC

5: AB = CD

6: AC = BD

7: AD = BC

(8: ABCD = Mittelwert)

Für die Versuche können nun Ablaufpläne erstellt werden, auf der Basis der Tabelle über die Einflussparameter. Für die Erstellung dieser Pläne, wird die Software *Minitap* benutzt. Im Laufe der Versuche kann dann eine Aussage über die Wechselwirkung und die Einflussparameter gemacht werden. Durch die Vorversuche ergeben sich schon einige Aussagen, die für diese Versuchsreihe wieder aufgegriffen werden können. Zum einen generiert eine hohe Intensität des Laserstrahles einen hohen Aufmischungsgrad. Aus diesem Grund wählen wir zwei unterschiedliche Intensitäten von 1800 und 2500 kW. Die Intensität hat den größten Einfluss auf das Ergebnis, der Pulvermassenstrom eher ein geringes, das aber im Zusammenhang mit dem Vorschub ansteigt, allerdings nicht mit einer hohen Relevanz, so dass es auch hier vernachlässigt werden kann. Es wurde daher ein Mittelwert von 26,19 g/min und 28,19 g/min als weiterer Parameter für das Auftragsvolumen gewählt.

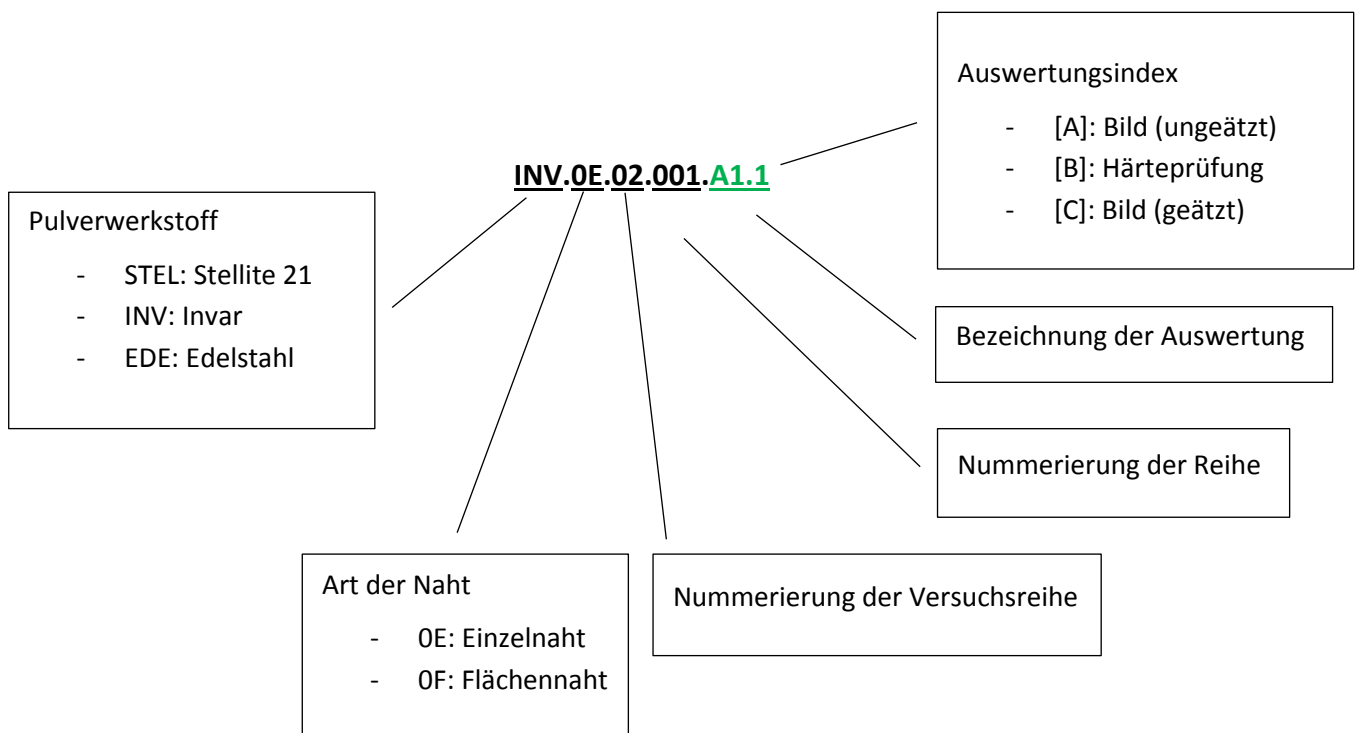
Es werden also für die Anfangsversuche die Einstellparameter aus dem Vorversuch gewählt, diese können dann, falls notwendig in darauffolgenden Versuchen weiter variiert werden und so ergeben sich folgende Einstellungen:

	#	A	B	C
+	①	1800	1,3	26,19
-	②	2500	1,5	28,19

**Tabelle 11** Ausgewählte Parameter

## 6.2.4 Nomenklatur

Für die einzelnen Versuchsreihen wird eine Nomenklatur festgelegt um bei der Auswertung einen besseren Überblick über die Proben zu bekommen. Wie diese sich zusammensetzt wird in der folgenden Grafik verdeutlicht.



## 6.3 Vorversuch

Der Vorversuch dient der Einordnung der Parametereinflüsse, aus diesem Grund erfolgen in diesem Abschnitt die Versuchsdurchführung und die Auswertung in einem Kapitel. Diese werden mit dem Auftragswerkstoff *Stellite 21*® durchgeführt. Es werden dafür unterschiedliche Werte der Parameter verglichen, um eine Aussage darüber zu erlangen, welche Einflüsse die einzelnen Einstellparameter

auf den Prozess haben. Folgende Aussage konnten getroffen werden, die Einstellparameter werden erst in Einzelspuren aufgetragen und mit denselben Parametern dann in einen Flächenauftrag überführt. Mit diesem Verfahren soll überprüft werden, ob eine Aussage über eine Einzelpur auch gleichzeitig für einen Flächenauftrag gilt. Die erste Versuchsreihe zeigt sich nach dem 2. Versuch schon, dass der gewählte Parameter mit einer Laserleistung von 1.800 kW nicht die gewünschte Leistung aufbringt um den Pulverwerkstoff genügend aufzuschmelzen und auf die Oberfläche aufzubringen. Der Versuchsplan wird daraufhin angepasst, da diese Leistung kein befriedigendes Ergebnis aufzeigt und es somit nicht sinnvoll wäre, damit weiter zu verfahren. Die Einstellungsparameter werden aus diesem Grund verändert und der Wert 3,0 kW gewählt um 1,8 kW zu ersetzen. Da der erste Versuch auch immer mehr einen Versuchscharakter besitzt, verändern wir die fortlaufenden Parameter auch nicht nach Versuchsplan, da versucht wird sich mehr nach den Zielgrößen zu orientieren. Somit wird zuerst versucht, das Aspektenverhältnis zu erreichen. Für diesen Schritt, soll die Höhe des Auftragsvolumens ein Millimeter erreichen, zu diesem Zweck wird der Vorschub immer weiter reduziert, das Auftragsvolumen durch die Erhöhung der Tellerdrehzahl erhöht und zum Ende die Leistung des Lasers um 500 W gesteigert. Um noch eine Aussage über den Fokusbereich machen zu können, wird ab der Hälfte der Versuche der Fokusbereich erhöht.

Folgende Parameter wurden für die Versuche eingestellt

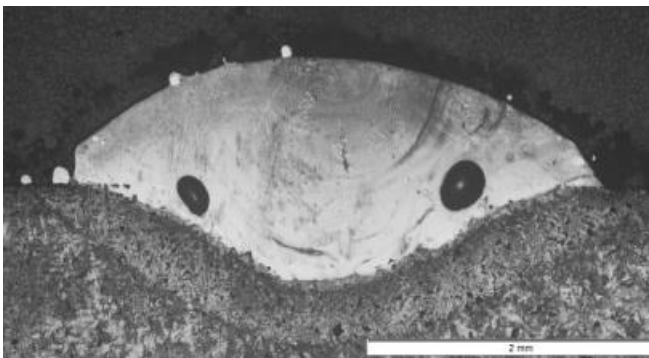
#	Laserleistung	Geschwindigkeit	Gasdurchfluss	Tellerdrehzahl	Fokusposition	Prozessgas
	$P_L$ [kW]	$v_L$ [m/min]	[l/min]	[U/min]	[mm]	[l/min]
1.1	2500	1,5	5	9	33	10
1.2	1800	1,5	5	9	33	10
1.3	2500	1,3	5	9	33	10
1.4	2500	1,3	5	10	33	10
1.5	2500	1,3	5	10	27	10
1.6	2500	1,0	5	10	27	10
1.7	3000	1,0	5	10	27	10
1.8	3000	1,0	5	10	27	15
2.1	2300	1,0	5	10	27	10
2.2	2100	1,0	5	10	27	10

2.3	2100	0,8	5	10	27	10
2.4	2100	0,7	5	10	27	10
5.1	2500	1,0	6	10	30	10
5.2	2500	0,8	6	10	30	10
5.3	2200	0,8	6	10	30	10
6.1	2200	0,5	6	10	30	10
6.2	2200	0,6	6	10	30	10
6.3	2400	0,6	6	10	30	10
10.1	2200	1	6	10	30	10
12.1	2200	1	6	10	28,5	10

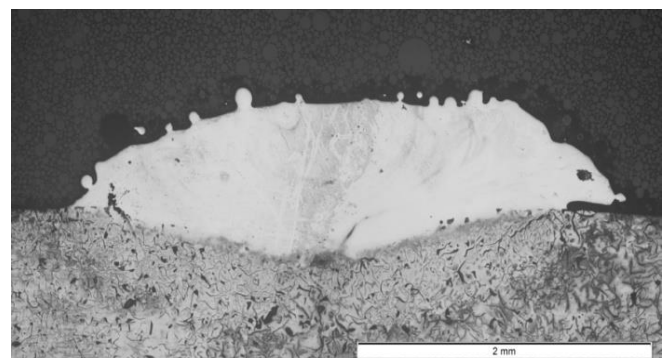
**Tabelle 12** Einstellparameter für den Vorversuch

Durch eine anschließende Auswertung konnte eine Aussage über die Einflüsse der unterschiedlichen Parameter gemacht werden. Die folgenden Abbildungen geben einen Einblick in das Verhalten der Pulver bei Auftragschweißung.

### 6.3.1 Einfluss der Laserleistung



**Abbildung 35** Laserleistung 3000 W



**Abbildung 36** Laserleistung 2.300 W

Erhöht man die Leistung des Lasers, ergibt sich eine Beeinflussung des Aspektenverhältnisses, das Verhältnis von Breite zu Höhe nimmt mit einer höheren Laserleistung zu. Auch die Einschmelztiefe in den Grundwerkstoff erhöht sich mit größerer Laserleistung. Bei einer Laserleistung ab 2500 W kommt es zu einer unzulässigen Porenbildung. Aus diesem Grund wird anhand der Versuche eine Laserleistung von 2200 W empfohlen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Laserleistung den

größten Einfluss auf die Menge des aufgeschmolzenen Pulvers hat und man diese beiden Werte miteinander verknüpfen muss. D. h. es muss immer genügend Pulver für die Laserleistung zur Verfügung stehen, auf der anderen Seite hat eine zu hohe Pulverzufuhr einen negativen Einfluss auf den Pulvernutzungsgrad, der sinkt, weil nicht die gesamte Menge mit der zur Verfügung stehenden Laserleistung aufgeschmolzen werden kann.

### 6.3.2 Einfluss der Geschwindigkeit

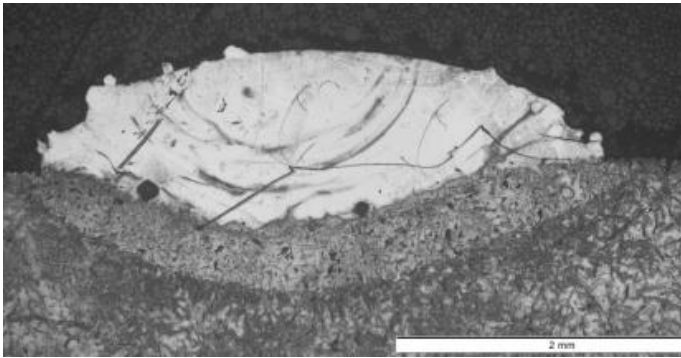


Abbildung 38 Geschwindigkeit: 1,0 m/min

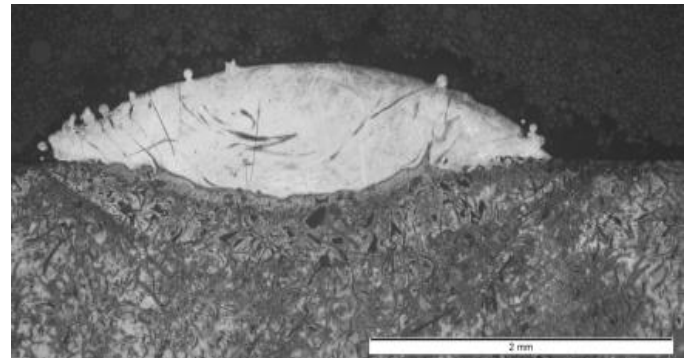


Abbildung 37 Geschwindigkeit: 1,3 m/min

Die  
Ge-

schwindigkeit hat den größten Einfluss auf die Auftragsmenge, d. h. umso geringer die Vorschubgeschwindigkeit eingestellt wird, umso größer ist die Auftragsmenge des Pulvers. Da an einer Stelle mehr Pulver aufgeschmolzen und auf die Oberfläche aufgebracht werden kann. Die Auftragsmenge ist allerdings begrenzt durch die Zuführung des Pulvers und der Laserleistung. Festzustellen ist allerdings auch, dass die Porenbildung mit steigender Vorschubgeschwindigkeit deutlich zunimmt. Die **Abbildung 38** und die **Abbildung 37** zeigen die Abnahme des Auftrages bei steigender Vorschubgeschwindigkeit. Der Zusammenhang ist in dem nachfolgenden Diagramm (**Abbildung 39**) dargestellt.

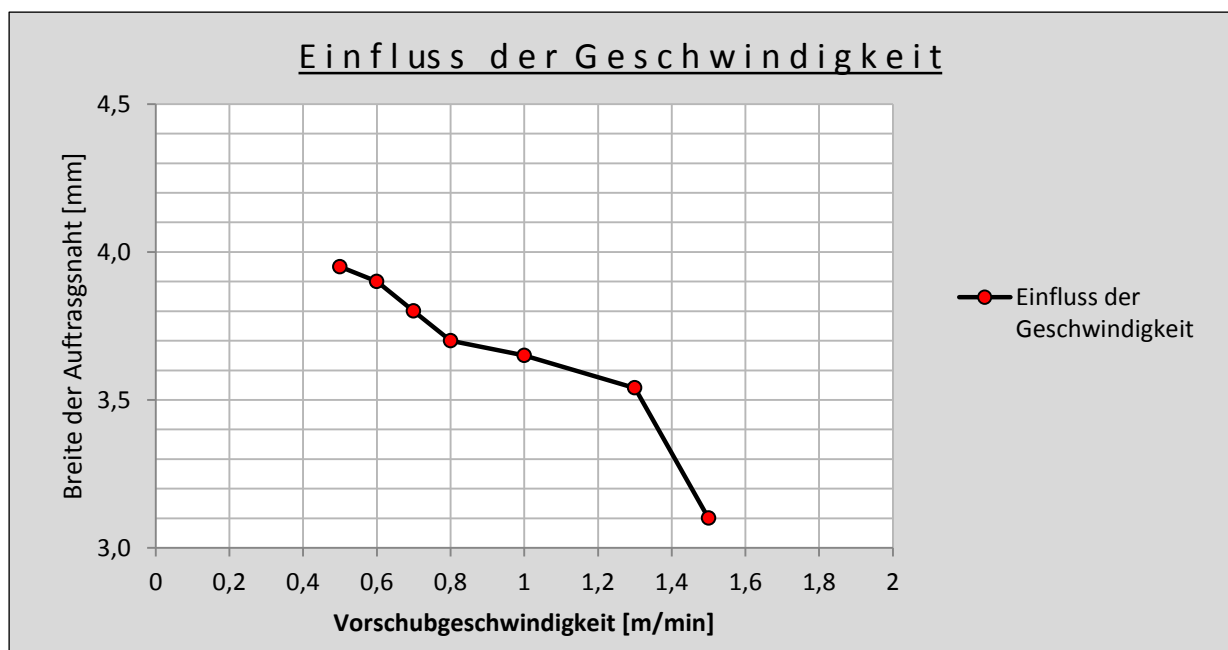
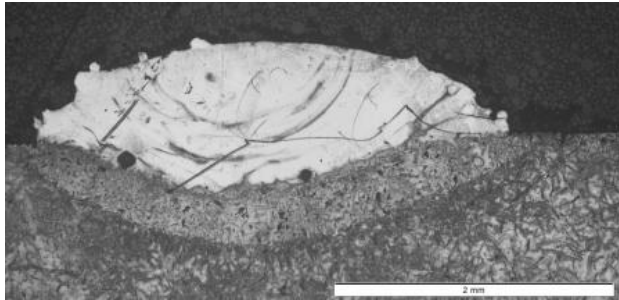
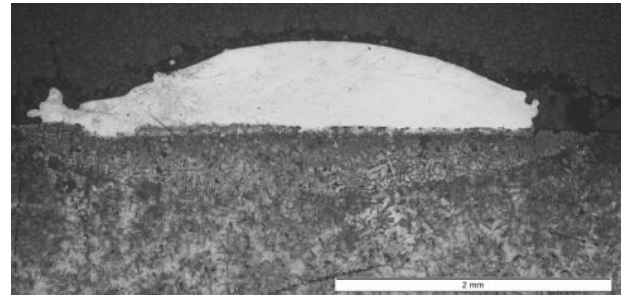


Abbildung 39 Diagramm: Einfluss der Geschwindigkeit

### 6.3.3 Einfluss des Fokusabstandes



**Abbildung 41** Fokusabstand: 27 mm



**Abbildung 40** Fokusabstand: 33 mm

Die beiden **Abbildung 40** **Abbildung 41** zeigen deutlich, dass die Änderung des Fokusbereichs einen großen Einfluss auf die Wärmeentwicklung im Bauteil und somit auch auf die Eindringtiefe des Werkstoffes hat. Einen positiven Einfluss auf den Aufmischungsgrad gibt es allerdings nicht, weil der Grundwerkstoff durch den Auftragswerkstoff nur verdrängt wird, aber sich nicht mit ihm mischt. Auch eine Porenbildung kann durch einen größeren Fokusabstand vermieden werden. Der ermittelte Fokusbereich beträgt 28,5 mm.

### 6.3.4 Fazit der Vorversuche

Die Vorversuche dienen dem Zweck, bei Änderung der Einflussfaktoren eine Aussage über deren Verhalten machen zu können und ein Parameterfeld zu erstellen, in dem die weiteren Versuchsreihen eingegrenzt werden können. Es wurde ermittelt, dass die Laserleistung den größten Einfluss auf die Auftragsnaht hat. Das erleichtert die weiteren Versuche, da man den Fokus auf diesen Parameter legen kann. Es ist allerdings nicht garantiert, dass bei der Änderung der Auftragspulver, diese Parameter noch eingehalten werden können, aber eine Eingrenzung hat in jedem Fall stattgefunden, da der Grundwerkstoff sich nicht ändert und auch die Korngröße der einzelnen Pulver relativ identisch sind.



## 7 Auswertung

### 7.1 Versuch 1 Auftragswerkstoff *Stellite 21*<sup>®</sup>

#### 7.1.1 Legierungselemente und Einstellparameter

Name	C	Cr	Fe	Si	Co	Mo	Ni
<i>Stellite 21</i>	0,25	27	3	1,5	Rest	5,5	2,5

	Laserleistung	Geschwindigkeit	Trägergas	Tellerdrehzahl	Fokusposition	Prozessgas
#	P <sub>L</sub> [kW]	v <sub>L</sub> [m/min]	[l/min]	[U/min]	[mm]	[l/min]
STE.0E.01.001	2.200	1,0	6	10	28	8

#### 7.1.2 Ergebnisse der Auswertung

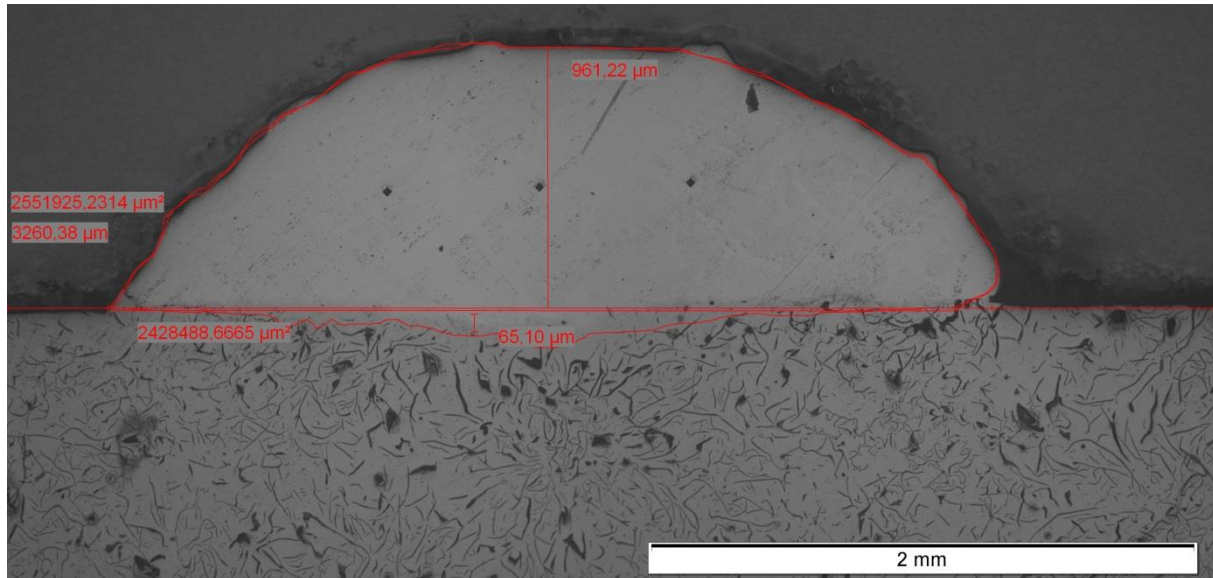
Eine Auswertung der Auftragsspuren ist sehr aufwendig. Aus diesem Grund wird durch eine Sichtprüfung eine Vorauswahl getroffen und die Spur ausgewählt, die auf den ersten Blick, die Anforderungen an die Parameter erfüllen könnte. Die Auswertung erfolgt wie in Kapitel 6.2 schon angesprochen, durch zwei Bewertungsgruppen, zum einem werden die fertigungstechnischen Anforderungen bewertet und zum anderen die Qualitätsziele der Auftragsnaht. Bei der Überprüfung des Aspektenverhältnisses kommt man zu dem Ergebnis, dass das Aspektenverhältnis mit dem Wert vier nicht erreicht worden ist. Die Höhe der Auftragsspur ist zu gering und besitzt nur einen Wert von 0,9612 mm (**Abbildung 42**). Vergleicht man den Wert mit Zielparameter hätte man mindestens 0,04 mm mehr Auftragshöhe erreichen müssen. Es wurde während des Prozesses zu wenig Pulver zur Verfügung gestellt, um das Ziel zu erreichen, der Pulvermassenstrom sollte in diesem Fall erhöht werden.

$$A = \frac{b_{AS}}{h_{AS}} \rightarrow A = \frac{3,26 \text{ mm}}{0,96 \text{ mm}} = 3,39$$

Dass eine metallurgische Anbindung stattgefunden hat, kann man über die Ermittlung des Aufmischungsgrades feststellen. Zu dieser Bewertung gelangt man nach einer graphischen Auswertung der unterschiedlichen Zonen über die Flächenbegrenzung, wie in **Abbildung 42** zu sehen ist. Die Formel

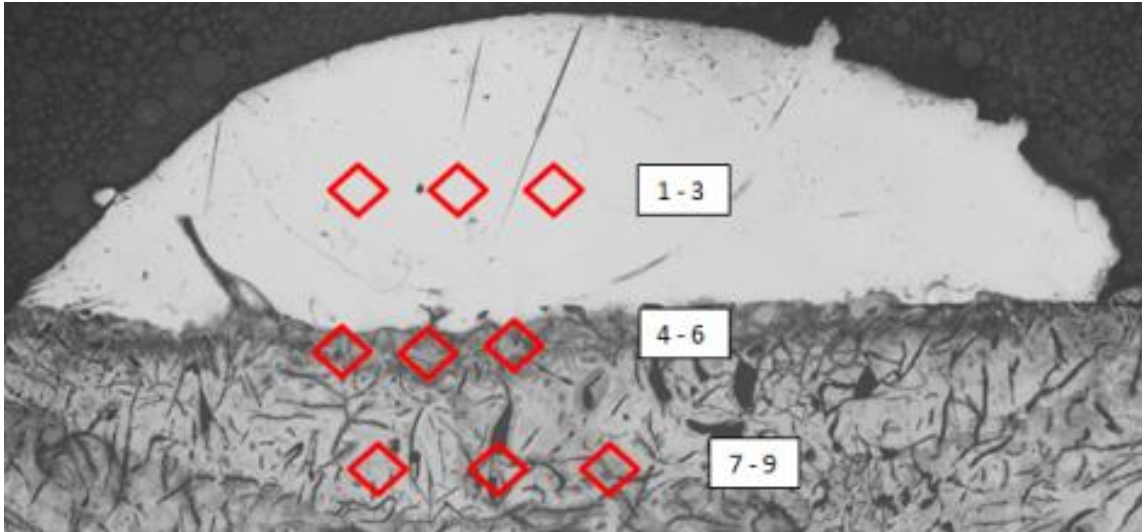
$$\text{Aufmischungsgrad [\%]} = \frac{\text{Fläche der Aufmischung} \cdot 100}{\text{Gesamte Auftragsfläche}} = \frac{0,2428488 \text{ mm}^2 \cdot 100 \%}{2,551925 \text{ mm}^2} = 4,83699 \%$$

ergibt ein zufriedenstellendes Ergebnis, da ein möglichst geringer Aufmischungsgrad erreicht werden soll und die Zielparmeter liegen bei 5 – 10 %, so ist dieses Ergebnis besser als gefordert.



**Abbildung 42** Vermessung der Auftragsnaht

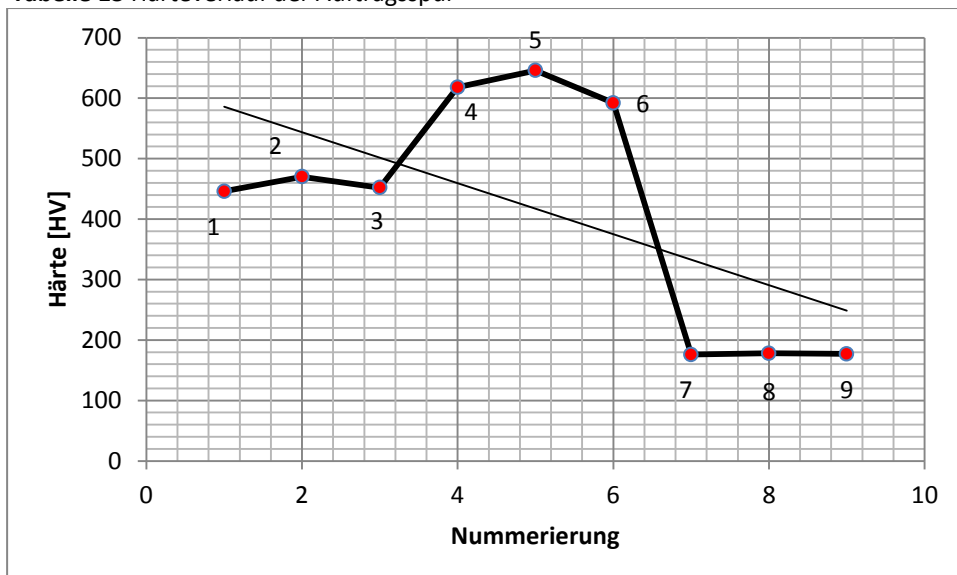
Die Bewertung der Härte erfolgt über die drei unterschiedlichen Zonen der Auftragsspur, wie in Kapitel 4.1 schon angesprochen. Die Überprüfung der Härte im Grundwerkstoff ist nur darauf beschränkt eine Aussage über die Wärmeinflusszone zu machen. Die Bewertung der Härte eines Graugusses mit Lamellengraphit sollte für einen Vergleichswert unter normalen Umständen nicht mit dem Vickers-Verfahren überprüft werden, da die lamellenartigen Kohlenstoffeinlagerungen das Ergebnis verfälschen. Diesen Wert überprüft man erfahrungsgemäß mit der Brinellhärte, da der Prüfkörper aus einer Kugel besteht, im Gegensatz zu dem pyramidenförmigen Prüfkörper von Vickers. Das Ergebnis wird so repräsentativ wird. Nach der Durchführung der Härtemessung über dem Querschnitt der Auftragsspur wurde festgestellt, dass unterschiedliche Härtewerte in der Aufmischungszone entstanden sind. In **Abbildung 43** wurden die unterschiedlichen Bereiche nummeriert und in dem nachfolgenden Diagramm dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass der Härtewert in der Aufmischungszone sehr ausgeprägt ist. Es ist davon auszugehen, dass in dieser Fläche durch die Verbindung der unterschiedlichen Werkstoffe eine Schicht entstanden ist, die eine wesentlich größere Härte, im Gegensatz zu den angrenzenden Werkstoffen besitzt. Es wird vermutet, dass der Legierungsanteil von Chrom dazu geführt hat, dass harte und spröde Chromkarbide entstanden sind, die den Anstieg der Härte zu verantworten haben.



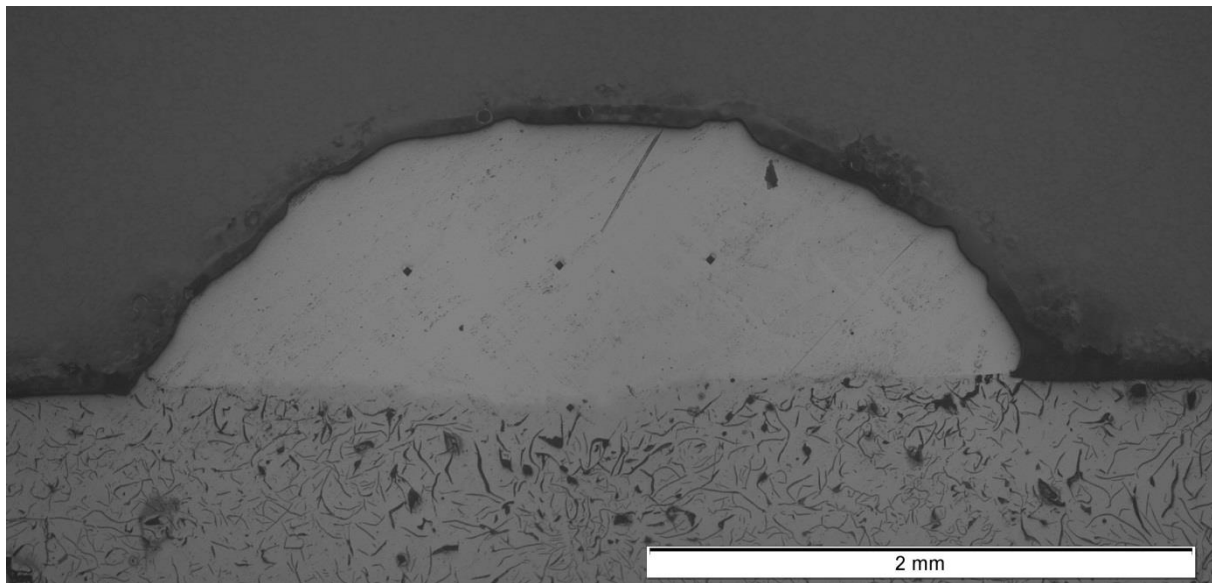
**Abbildung 43** Nummerierung der Härtewerte

Aufgrund der Ergebnisse aus der Härtemessung kann davon ausgegangen werden, dass die Verschleißfestigkeit in dem Rahmen gegeben ist, wie sie gefordert wurde, d. h. die Härte des Grundwerkstoffes wurde überschritten, wie in dem Härteverlauf der **Tabelle 13** erkennen ist, er liegt bei einem Wert von durchschnittlich 350 HV und ist somit um ca. 100 HV höher als der des Grundwerkstoffes.

**Tabelle 13** Härteverlauf der Auftragsspur



Durch das Farbeindringverfahren konnte sichergestellt werden, dass in der Auftragsnaht keine Risse entstanden sind. Anhand der lichtmikroskopischen Aufnahme können fast alle Qualitätsmerkmale bewertet werden. In **Abbildung 44** wird ersichtlich, dass eine rissfreie Anbindung im Inneren der Naht erreicht worden ist, auch an den Rändern ist eine gute Anbindung an den Grundwerkstoff erreicht worden, ohne erkennbare Risse. Die Aufnahme zeigt, dass im Grund- sowie im Auftragswerkstoff keine Poren entstanden sind. Dadurch dass man eine Aufmischung erzielt hat, kann man davon ausgehen, dass die Auftragsschicht sich metallurgisch mit dem Grundwerkstoff verbunden hat und somit keine Bindefehler in der Zwischenschicht entstanden sind.



**Abbildung 44** Aufnahme der Naht bei einer 1,25fachen Vergrößerung

**Fazit:** Mit den gewählten Parametern konnte eine Auftragsnaht erreicht werden, die fast alle Zielparameter erreicht. Die vorgegebene Auftragshöhe wurde allerdings nicht erreicht, was man aber durch eine Erhöhung des Massestromes beeinflussen kann oder sich bei dem Flächenauftrag durch die Überlappung der Nähte verändern wird. Die Erhöhung der Härte in der Zwischenschicht könnte bei schlagartiger Belastung dazu führen, dass die Naht abplatzt, da diese hart und spröde ist und schlagartige Belastung nicht abbauen kann. Tendenziell ist aber durch die größere Härte des Auftragswerkstoffes eine verschleißfestere Oberfläche entstanden.

### 7.1.3 Adaption der Einzelnaht auf die Flächennaht

Mit denselben Parametern wird im nächsten Schritt der Flächenauftrag generiert. Für diesen Vorgang muss die Breite der Einzelnaht genau ausgemessen werden, da der Flächenauftrag so generiert werden soll, dass sich die Nähte um 60 % überlappen. Der Bewegung des Lasers ist in der folgenden **Abbildung 45** schematisch dargestellt:

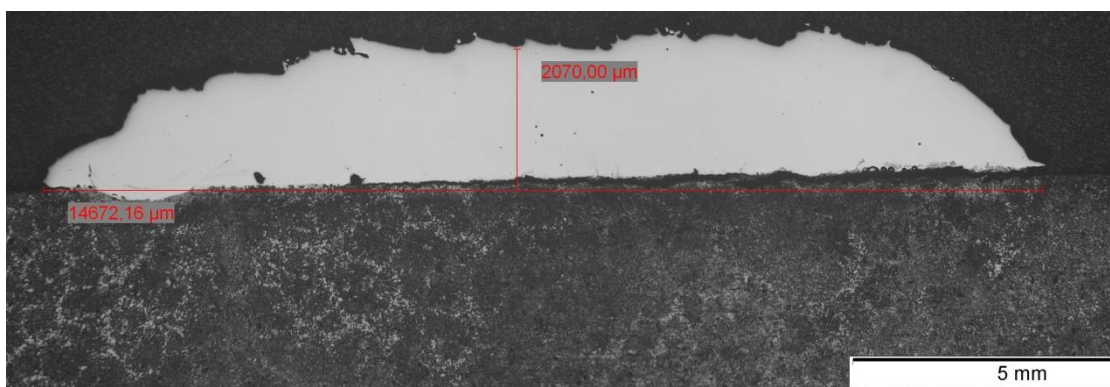


**Abbildung 45** Spurgeometrie des Auftrags

Es erfolgt immer eine lineare Bewegung in x-Richtung auf einer Länge von 60 mm, am Ende der Naht ergibt sich der Abstand der y-Richtung aus der Überlappung. Bei der vorliegenden Auftragsnaht mit einer Breite von 3,260 mm entsteht eine Y-Bewegung von 1,304 mm. Am Ende der linearen Bewegung findet ein Überschleifen statt. Beim Überschleifen werden einzelne Positionen, in diesem Fall von Ende der einen bis zum Anfang der nächsten Naht, nur näherungsweise angefahren, so dass der Roboter an dieser Stelle nicht abgebremst wird, sondern eine kontinuierliche Bahn fährt. Nach der Generierung des Auftrages wird wieder ein Mikroschliff der Auftragsnaht hergestellt.

#### 7.1.3.1 Bewertung der Auftragsnaht

Das Aspektenverhältnis kommt in einem Flächenauftrag nicht zum Tragen, da die Breite beliebig gewählt werden kann. Man kann deshalb nur eine Aussage über die Auftragshöhe machen und diese hat mit 2,07 mm das Mindestmaß der Anforderungen erreicht.



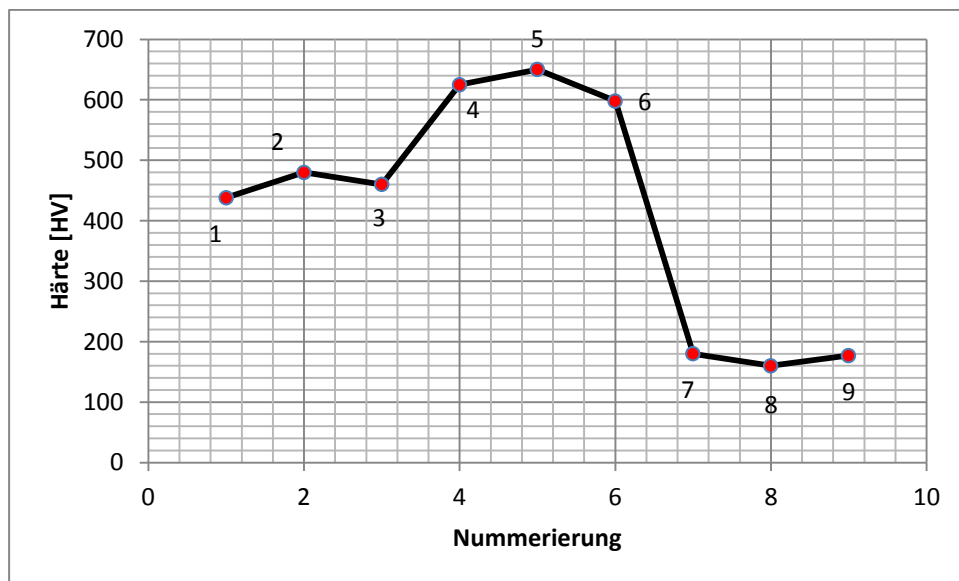
**Abbildung 46** Aspektenverhältnis der Auftragsnaht/Höhenangabe

Für die Bewertung des Aufmischungsgrades betrachten wir ein Teilstück der Auftragsnaht und kommen zu dem Ergebnis das die Aufmischung 4,61 % erreicht, welches auch mit den Forderungen übereinstimmt. Durch die **Abbildung 46** wird ersichtlich, dass der Auftragswerkstoff nicht über die gesamte Länge angebunden wird. Die Zielparame-ter, dass eine metallurgische Anbindung über die gesamte Länge erreicht werden soll, wurden nur für die ersten zwei Bahnen des Flächenauftrages erreicht. Der restliche Auftrag besitzt keine Verbindung zu dem Substrat.

Der Härteverlauf zeigt im Gegensatz zu dem Auftrag der Einzelnaht keine Abweichungen. Es ist wieder eine harte Schicht in der Aufmischungszone entstanden und die Verschleißfestigkeit durch eine höhere Härte des Auftragswerkstoffes lässt sich auch nachweisen. Der Härteverlauf ist in dem Diagramm (**Abbildung 48**) dargestellt und zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Einzelnaht.

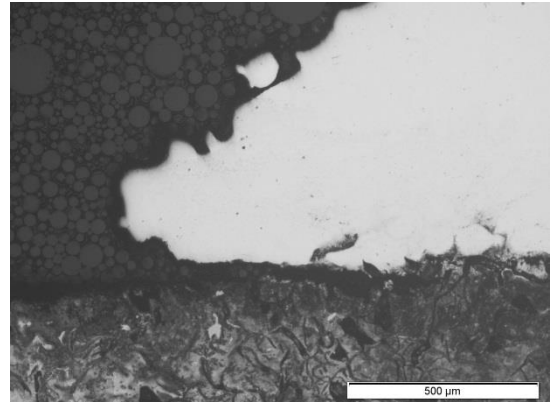


**Abbildung 47** Aufmischungsgrad des Flächenauftrages



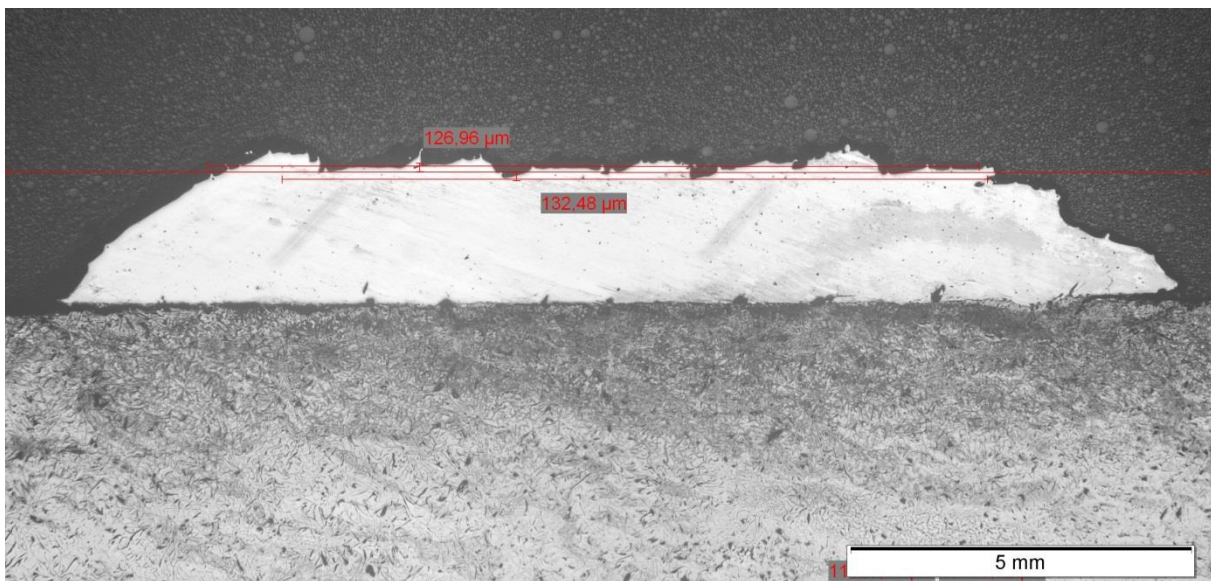
**Abbildung 48** Härteverlauf der Flächennaht

Die Oberfläche des Flächenauftrages ist rissfrei und auch im Inneren des Auftragswerkstoffes können keine Risse detektiert werden. Allerdings besteht, wie im vorangegangenen Kapitel schon angesprochen, ab einem Drittel des Auftrages keine Anbindung mehr an den Grundwerkstoff. Fehlerhafte Anbindung kann man zu dem an den Rändern der Auftragsnaht feststellen, wie in **Abbildung 49** sehr gut zu erkennen ist. Poren sind allerdings in sehr geringem Maße entstanden,



**Abbildung 49** Fehlende Anbindung an den Rändern

unter dem Mikroskop ist nur eine zu erkennen, die aber aufgrund ihrer geringen Größe noch tolerierbar ist. Auffallend ist für die Nachbearbeitung, da aufgrund der Überlappung eine sehr unregelmäßige Oberfläche entstanden ist, aufgrund der Einschätzung, eine sehr hohe Welligkeit besitzt. Die Abweichungen vom Mittenrauwert liegen bei 0,12696 und 0,12348 mm. Da dies die erste generierte Auftragsnaht ist, liegen noch keine vergleichbaren Ergebnisse vor.



**Fazit:** Die Anforderungen die von der Einzelnaht erfüllt werden, können nicht auf eine Flächennaht übertragen werden, da durch den erhöhten Wärmeeintrag die Anbindung an den Grundwerkstoff nicht über die gesamte Länge realisiert werden kann. Es kommt zu einem Ablösen der Auftragsnaht, wodurch das geforderte Qualitätsziel nicht erreicht werden kann. Der Härteverlauf ist kann zeigt keine Veränderung auf. Für eine Flächennaht muss demnach gewährleistet sein, dass der Prozess über einen gesteuerten Wärmeeintrag verfügt, so dass es zu einem konstanten Pulverauftrag und damit zu einer metallurgischen Anbindung über den gesamte Fläche.

## 7.2 Versuch 2 Auftragswerkstoff Edelstahl

### 7.2.1 Legierungselemente und Einstellparameter

Name	C	Cr	Fe	Si	Co	Mo	Ni	Al	Mn	P	S
Edelstahl	0,021	17,15	Rest	0,87	–	2,09	12,7	0,004	0,62	0,015	0,006

	Laserleistung	Geschwindigkeit	Trärgas	Tellerdrehzahl	Fokusposition	Prozessgas
#	$P_L$ [kW]	$v_L$ [m/min]	[l/min]	[U/min]	[mm]	[l/min]
EDE.0E.01.001	2.200	1,0	6	10	28	8

### 7.2.2 Ergebnisse der Auswertung der Einzelnah

#### 7.2.2.1 Bewertung der Auftragsnaht

Zu Beginn werden die Parameter wieder an einer Einzelspur getestet, allerdings stellt sich nach der ersten Untersuchung heraus, dass die ermittelten Parameter aus dem ersten Versuch, nicht beliebig auf andere Pulver übertragen werden können. Die gewählten Parameter aus den ersten Versuchen ergeben eine Auftragsnaht, die unter keinen Umständen den geforderten Zielparametern entspricht. Wie in **Abbildung 50** zu sehen, konnte keine stabile Anbindung an den Grundwerkstoff erreicht werden. An den Seitenrändern sind zu dem noch tiefe Risse entstanden, die zur Folge haben, dass an diesen Stellen gar keine Anbindung an den Grundwerkstoff stattgefunden hat, die Auftragsnaht hat zudem einen Riss, der durch den gesamten Querschnitt verläuft. Man muss unter diesen Umständen alle Parameter für jeden neuen Pulverwerkstoff anpassen und kann die Werte nicht übernehmen. Das liegt zum einem an der unterschiedlichen Zusammensetzung der Legierungen und der unterschiedlichen Korngröße jedes einzelnen Pulvers.



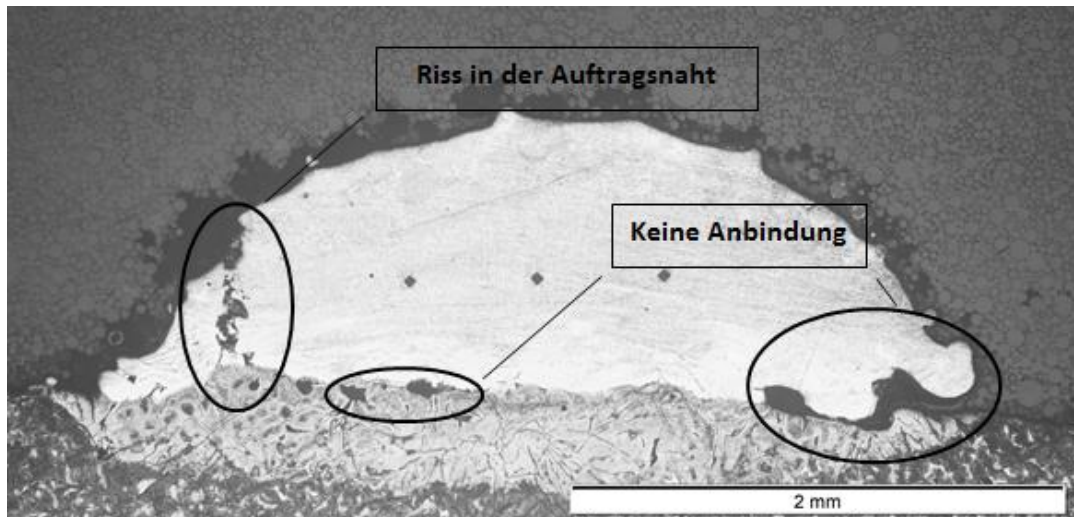


Abbildung 50 Auftragsnaht mit den Parametern aus dem 1. Versuch

### 7.2.2.2 Neue Einstellparameter

Mit einer Vielzahl von neuen Versuchen, werden neue Einstellparameter ermittelt mit denen dann eine weitere Bewertung des Auftrages stattfindet. Die Naht mit der folgenden Parametereinstellung wird in einem zweiten Versuch analysiert:

	Laserleistung	Geschwindigkeit	Trärgas	Tellerdrehzahl	Fokusposition	Prozessgas
#	$P_L$ [kW]	$v_L$ [m/min]	[l/min]	[U/min]	[mm]	[l/min]
EDE.OE.01.001	2.200	0,8	8	8	28	8

Der erste ermittelte Wert ist auch hier das Aspektverhältnis, anhand des Bildes **Abbildung 51** unter dem Mikroskop ergeben die Berechnungen:

$$\text{Aspektverhältnis} = \frac{b_{AS}}{h_{AS}} \quad \rightarrow \quad A = \frac{3,337118 \text{ mm}}{0,9537 \text{ mm}} = 3,49912$$

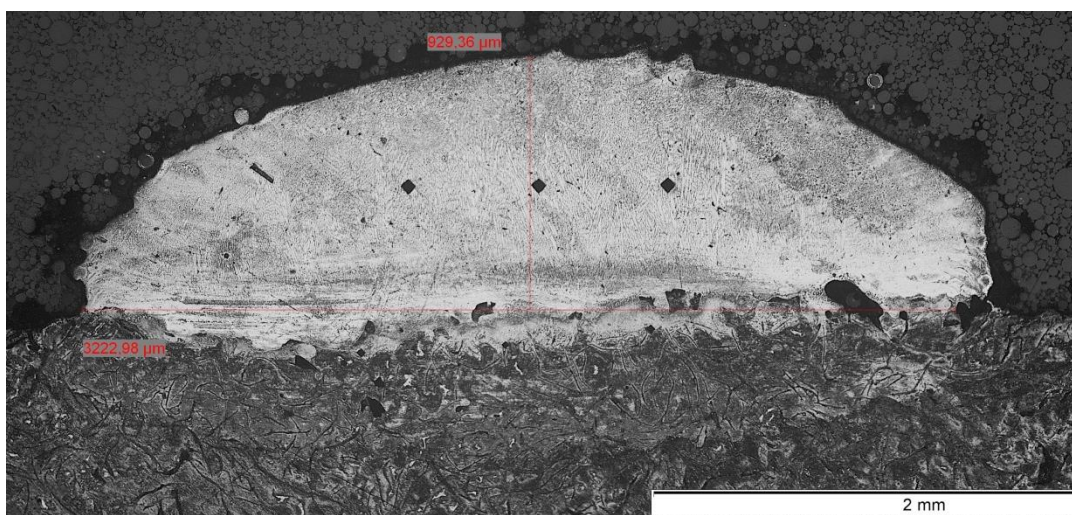
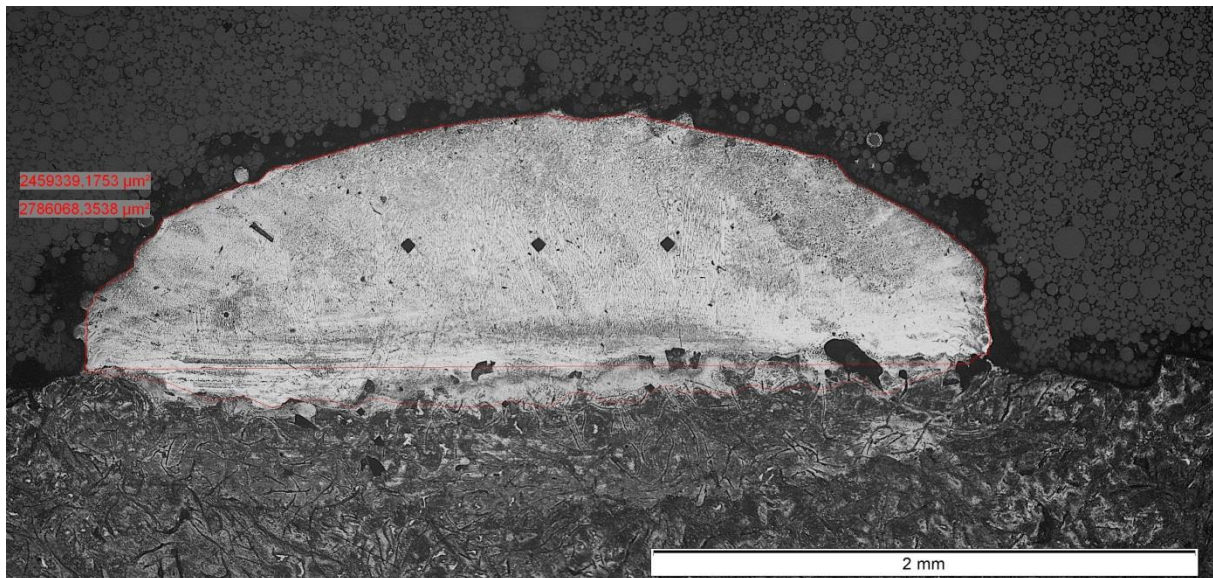


Abbildung 51 Aspektverhältnis der Auftragsnaht

Damit zeigt sich, dass auch hier die Anforderungen an einen Wert von 4 nicht erreicht werden konnte. Die optimale Höhe des Auftrages ist also nicht erreicht worden. Aber auch hier kann das Problem gelöst werden, in dem man einen Flächenauftrag generiert oder eine weitere Auftragsspur auf die bestehende aufbringt. Die mikroskopische Auswertung hat ergeben, dass eine Anbindung mit dem gewünschten Maß an den Grundwerkstoff erfolgt ist. Der Aufmischungsgrad beträgt 8,82 % und lässt sich auch anhand der Formeln berechnen:

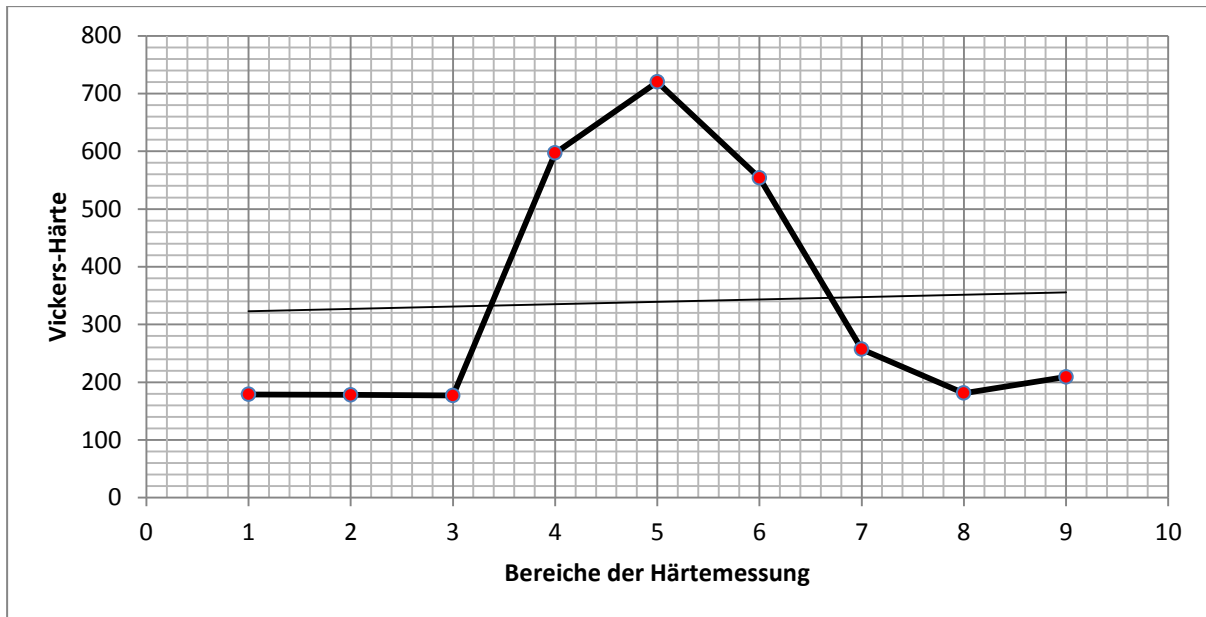
$$\text{Aufmischungsgrad [\%]} = \frac{\text{Fläche der Aufmischung} \cdot 100}{\text{Gesamte Auftragsfläche}} = \frac{0,245933 \text{ mm}^2 \cdot 100 \%}{2,78808 \text{ mm}^2} = 8,82087\%$$

Der angestrebte Prozentsatz von 5 – 10 % wurde mit diesen Parametern erreicht und es konnte eine Durchmischung des Grund- und Auftragswerkstoffes realisiert werden. Für die genaue Aussage der Zusammensetzung der Aufmischungszone, reicht allerdings eine mikroskopische Aufnahme nicht aus.



**Abbildung 52** Aufmischungsbereiche der Auftragsnaht

In diesem Fall müsste man eine EDX-Analyse durchführen. Bei diesem Verfahren werden die Atome in der Aufmischungszone durch einen Elektronenstrahl angeregt. Durch diese Energieeinbringung senden die jeweiligen Elemente spezifische Energien aus, diese weisen einen bestimmten Charakter aus und geben damit Aufschluss über die Zusammensetzung. Durch die Härteprüfung kann in diesem Fall allerdings auch eine Aussage über die Aufmischungszone gemacht werden. Nach einer Vickers-Härteprüfung zeigten sich folgende Ergebnisse:



**Abbildung 53** Härteverlauf der Einzelspur mit Edelstahlpulver

Man erkennt im Härteverlauf wieder deutlich, dass in der Aufmischungszone die Härte einen deutlich höheren Wert aufweist, im Gegensatz zu Grund- und Auftragswerkstoff. Es ist also davon auszugehen, dass der sehr hohe Chromanteil immer dazu führt, dass in dieser Zone Chromkarbide entstehen, die zu einem Anstieg des Wertes führen. Der Unterschied zwischen der Härte des Grund- und Auftragswerkstoffes ist in diesem Fall sehr gering. Es wird durch die Auftragsschicht in diesem Fall keine signifikante Steigerung der Verschleißfestigkeit erfolgen können, bzw. da die Werte unter dem des Grundwerkstoffes liegen wird eine Verbesserung durch den Auftrag in diesem Fall nicht erreicht, eine Qualitätssteigerung ist in diesem Fall nicht zu erwarten.

Nr.	Vickers-Härte
1	179
2	178
3	177
4	597
5	720
6	554
7	257
8	181
9	209

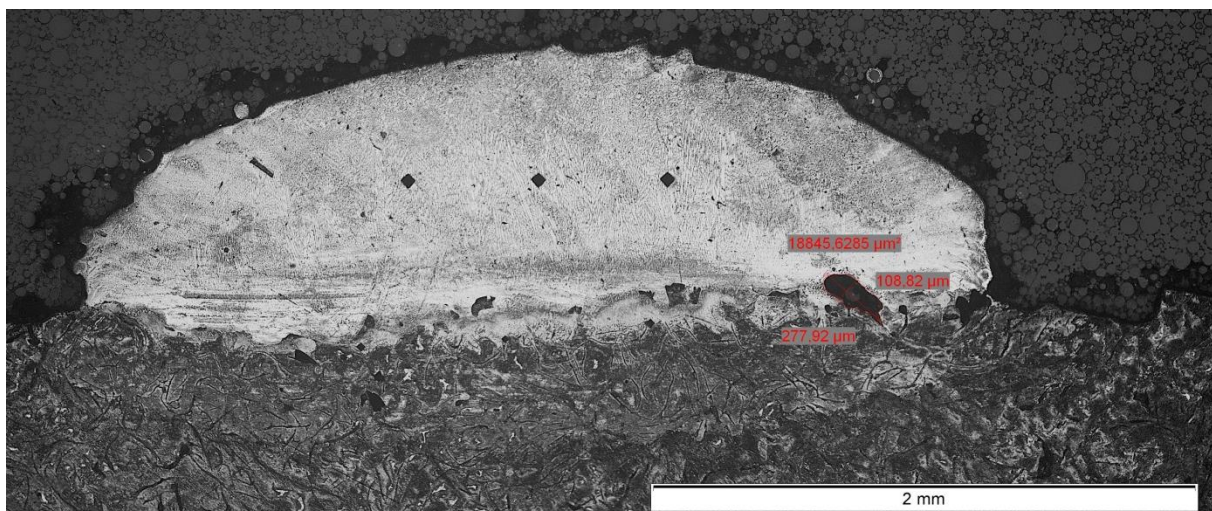
### 7.2.2.3 Bewertung der Qualität

Der Einzelauftrag auf den Grundwerkstoff enthält keine Risse in der Oberfläche der Auftragsschicht und kann demnach als rissfrei eingestuft werden. Allerdings wird in der Randschicht (**Abbildung 54**) ein metallurgischer Riss detektiert. Die Entstehung eines Risses kann unterschiedliche Gründe haben. Zum einen, kann es während der Abkühlung zu einer Kaltrissbildung kommen. Diese werden ausgelöst, wenn es im Zuge der Abkühlung Spannungen



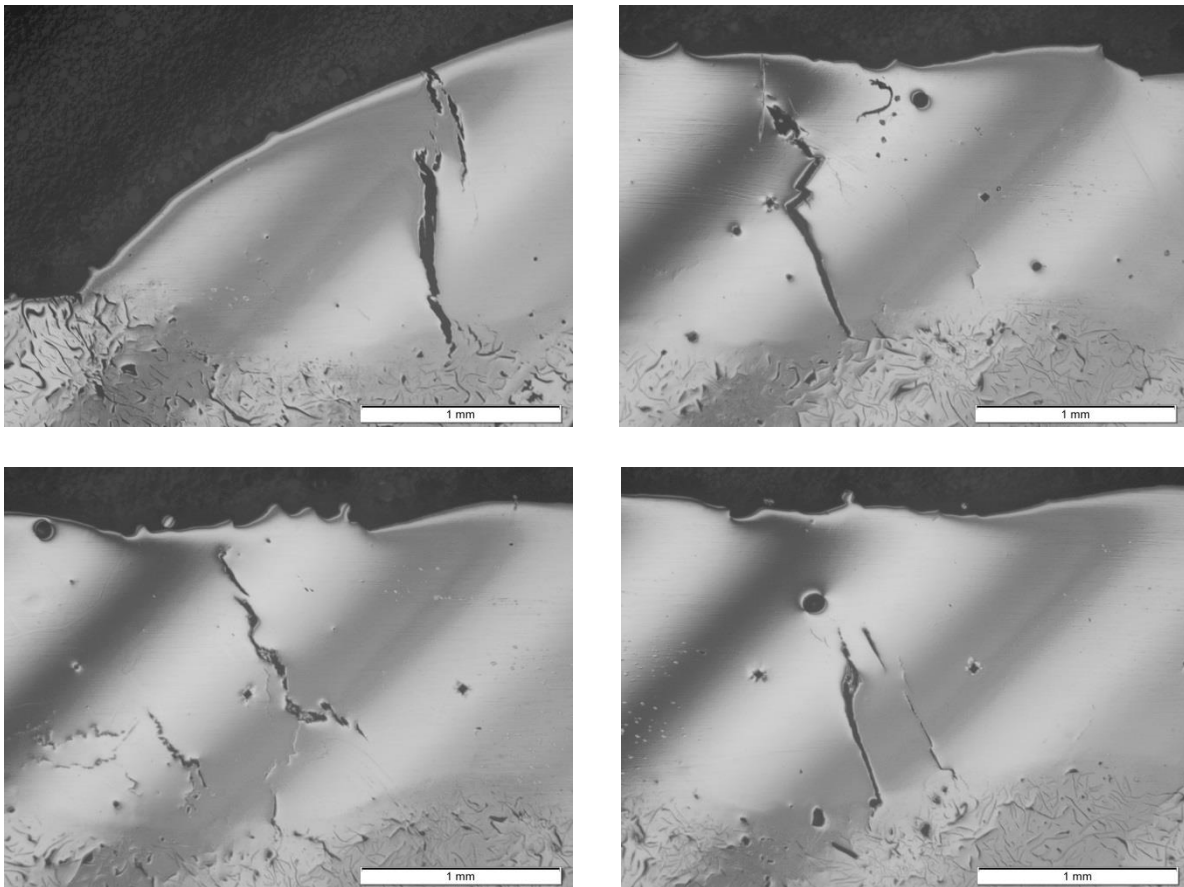
**Abbildung 54** Riss in der Randschicht

auftreten, die von dem Werkstoffe nicht mehr abgebaut werden können, in Folge davon reißt der Werkstoff auf. Ein weiterer Grund kann die fehlende Bereitstellung von genügend Pulverwerkstoff sein. Es kann im Laufe des Prozesses dazu kommen, dass eine der Düsen zu wenig Pulver in den Prozess fördert und somit an den Seitenrändern zu wenig Material eingebracht wird. Man kann in diesem Versuch davon ausgehen, dass dies der Fall gewesen ist, da die Anbindung nur an einer Seite fehlerhaft ist. Das weist darauf hin, dass die rechte Düse zu wenig Pulver gefördert hat. Aus diesem Grund ist es wichtig vor jedem Vorgang die Leistungsfähigkeit der einzelnen Düsen genau zu überprüfen und gegebenenfalls einzuschreiten und Maßnahmen einzuleiten die den Pulverstrom gewährleisten. In der Auftragsnaht kommt es zu einer Porenbildung. Anhand von der vergrößerten Aufnahme kann man über die Flächenbegrenzung die Größe der Pore ermitteln. Die Aufnahme (**Abbildung 55**) zeigt, dass eine Pore in der Auftragsnaht vorhanden ist. Vermisst man diese, wird ersichtlich, dass sie den Wert von  $d = 1\text{ mm}$  nicht übersteigt, die Porenbildung ist in dieser Naht nicht optimal, aber anhand der Bewertung nach den Unregelmäßigkeiten (**Tabelle 7**) zulässig.



**Abbildung 55** Porenvermessung in der Auftragsnaht

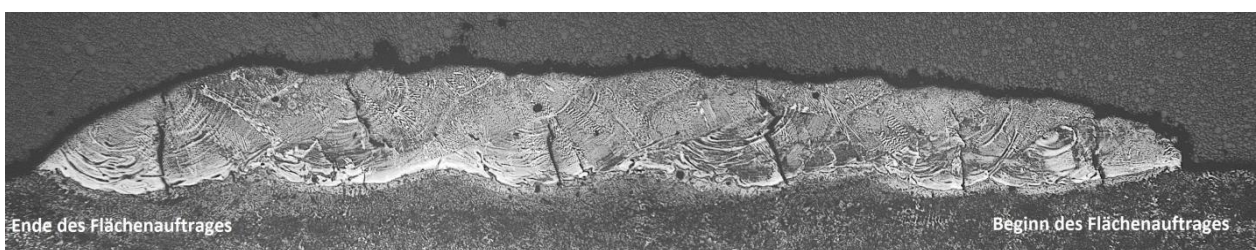
### 7.2.3 Adaption der Einzelnaht auf die Flächennaht



**Abbildung 56** Risserscheinung in der Flächennaht

Nach dem erfolgreichen Auftrag der Einzelnaht wurde danach mit denselben Parametern eine Flächennaht erzeugt. Nach der anschließenden Sichtprüfung wird aber schnell deutlich, dass sehr viele Risse auf der Oberfläche entstanden sind (**Abbildung 56**). Eine weitere Bewertung durch einen Mikroschliff wird aber trotzdem noch durchgeführt. Bei der genaueren Betrachtung wird erkennbar, dass die Risse im Bereich entstanden sind, in denen die Überlappung der Nähte erfolgt. Das kann in Zusammenhang mit der erhöhten Wärmeeinbringung gebracht werden, da in diesem Bereich der Werkstoff mit dem Pulver zweimal aufgeschmolzen wird. In der Auftragsnaht kommt es zu einem Spannungsaufbau durch die Temperatureinbringung und diese können im Laufe des Abkühlvorganges nicht mehr abgebaut werden, der Auftragswerkstoff bekommt Risse.

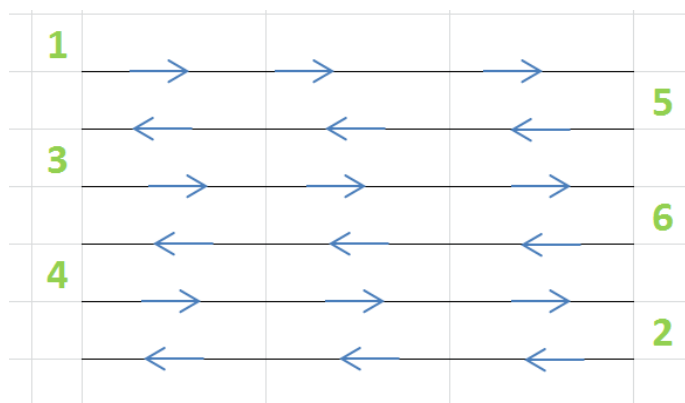
In **Abbildung 57** ist deutlich zu erkennen, dass die Flächennaht nur am Anfang eine gewünschte Anbindung an den Grundwerkstoff aufweisen kann. Ab einem Drittel des Nahtquerschnittes erfolgt dann ein wesentlich höherer Aufmischungsgrad und eine erweiterte Wärmeeinflusszone in den



**Abbildung 57** Übersicht der Flächennaht

Grundwerkstoff. Dieses Phänomen kann man auf die nicht gesteuerte Temperatureinbringung zurückführen. Da im Laufe des Prozesses die Temperatur stetig zunimmt, wird das Werkstück immer heißer und die Aufschmelzung des Grundwerkstoffes nimmt zu. Es entsteht ein immer größer werdender Wechselwirkungsbereich, der Massestrom nimmt zu und das Schmelzbad wandert immer weiter nach hinten.

**Fazit:** Es kann eine Einzelnaht mit dem Pulverwerkstoff aus Edelstahl generiert werden. Bei dem Versuch eine Flächennaht zu schweißen, kann man mit den eingestellten Parametern kein befriedigendes Ergebnis erzielen. Das liegt zum einem daran, dass man die Auftragsnaht an der Überlappung wieder aufschmelzt und sie dadurch ihre Eigenschaften ändern. Zum anderen liegt es an der nicht gesteuerten Temperatureinbringung, die Wärme nimmt im Verlaufe des Prozesses so stark zu, dass die eingestellten Parameter zu stark beeinflusst werden und die Eigenschaften wie Aufmischungsgrad und Auftragshöhe negativ beeinflusst werden. Eine mögliche Lösung wäre ein gesteuerter Temperaturverlauf, das ist zu realisieren in dem man eine abnehmende Laserleistung programmiert, so dass sie sich mit den zunehmenden Temperatur verringert und so im Verlauf weniger Wärme eingebracht wird. Auch kann man über eine andere Spurgeometrie nachdenken, so dass die Bahnen in einem anderen Verlauf angeordnet werden und so nicht direkt nach dem Auftrag wieder aufgeschmolzen werden. Die Programmierung einer anderen Spurgeometrie kann auch als weitere Lösungsmöglichkeit in Betracht gezogen werden. Der Auftrag sollte so angeordnet werden, dass die darauf folgende Spur nicht sofort die vorangegangene aufschmilzt, sondern eine längere Abkühlzeit vorhanden ist. Ein Beispiel ist in der **Abbildung 58** gegeben:



**Abbildung 58** Geänderte Spurgeometrie

## 7.3 Versuch 3 Auftragspulver Eisen-Nickel-Legierung (INVAR®)

### 7.3.1 Legierungselemente und Einstellparameter

Name	C	Cr	Fe	Si	Co	Mo	Ni	Al	Mn	P	S
INVAR	–	–	64	–	–	–	36	–	–	–	–

	Laserleistung	Geschwindigkeit	Trärgas	Tellerdrehzahl	Fokusposition	Prozessgas
#	$P_L$ [kW]	$v_L$ [m/min]	[l/min]	[U/min]	[mm]	[l/min]
INV.0E.01.016	2.400	0,5	5	8	28	10

### 7.3.2 Ergebnisse der Auswertung der Einzelnahrt

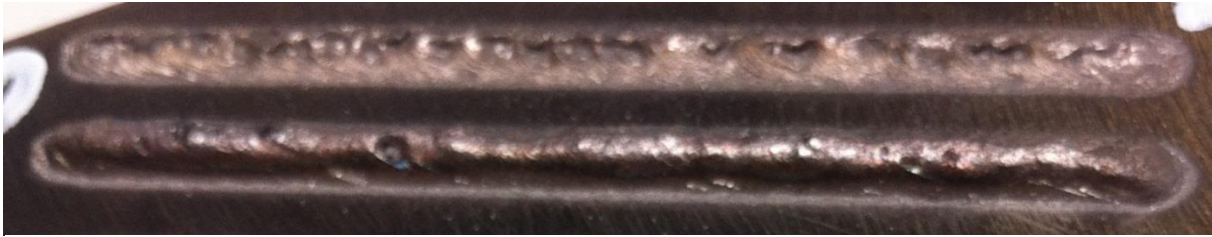
#### 7.3.2.1 Bewertung der Auftragsnaht

Es stellt sich schon nach der ersten Versuchsreihe heraus, dass eine stabile und zusammenhängende Auftragsnaht nicht generiert werden kann. Wie in **Abbildung 59** zu sehen, ist die Auftragsnaht durchzogen mit sehr großen Poren und Lunkern. Um aber eine Aussage über die Gründe machen zu können, wird auch hier eine Bewertung vorgenommen. Es muss also betrachtet werden, welche Parameter in Wechselwirkung zu einander stehen und das Gesamtergebnis beeinflussen. Augenscheinlich kann davon ausgegangen werden, dass bei dem Prozess nicht genügend Leistung zur Verfügung gestellt worden ist, um das Pulver aufzuschmelzen. Die maximale



**Abbildung 59** Auftragsnähte mit dem Pulverwerkstoff INVAR®

Pulverzufuhr wurde für diesen Versuch schon gewählt. Die Leistung wurde daraufhin um 200 W erhöht und die Vorschubgeschwindigkeit um 0,2 m/min verringert. Aber auch bei dieser Naht



**Abbildung 60** Vergleich der unterschiedlichen Laserleistung

(**Abbildung 60**) zeigt sich, dass kein homogener Auftrag entstanden ist und die Naht weiterhin Lunker und Poren aufweist. Allerdings wurde das Aspektenverhältnis erreicht. Bei der folgenden Parameter-einstellung wird das Trägergas reduziert, um zu überprüfen, ob ein geringerer Zustrom die Verwirbelung in der Naht verringert und der Auftrag dadurch homogener wird. Das Ergebnis bestätigt die Vermutung, die Auftragsnaht besitzt ein homogeneres Erscheinungsbild, es ist aber festzustellen, dass das Aspektenverhältnis nicht erreicht worden ist. Das wiederum veranlasst uns zu einer Reduzierung der Auftragsgeschwindigkeit, bei einer Verringerung kann mehr Pulver auf die Fläche aufgebracht werden und die Auftragshöhe somit erreicht werden. Dadurch, dass der Pulvernutzungsgrad noch nicht ausgeschöpft ist, sollte die Pulverzufuhr ausreichend für einen durchgehenden Auftrag sein. Nach Betrachtung stellt sich aber auch hier raus, dass wieder eine unregelmäßige und mit Poren und Lunkern versehene Oberfläche entstanden ist. Auch in weiteren Versuchen variieren die Werte immer wieder zwischen der unterschiedlichen Pulverzufuhr und der Vorschubgeschwindigkeit. Da weiterhin kein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wird, konzentriert man sich auf den Einfluss der Streckenenergie, diese setzt sich wie folgt zusammen:

$$\text{Streckenenergie} = \frac{P_L}{v_L} \quad [\text{Js/m}]$$

Der Quotient aus Laserstrahlleistung  $P_L$  und Vorschubgeschwindigkeit wird als Streckenenergie bezeichnet. Die Streckenenergie ist ein Maß für die entlang der Schweißnaht eingebrachte Energie bezogen auf eine Längeneinheit und schlägt sich direkt in dem aufgeschmolzenen Nahtvolumen nieder. Auch geometrische Nahtabmessung, wie z. B. Aufmischungsgrad wird häufig auf die Streckenenergie bezogen. Bei der Durchsicht der Parametereinstellung zeigt sich, dass bei den ersten Versuchen die Streckenenergie einen Wert von  $120.000 - 150.000 \text{ W/m}^{-5}$  erreicht. Durch die Erhöhung der Laserleistung wird auch gleichzeitig die Streckenenergie erhöht. Es zeigt sich bei dieser Reihe, dass eine Streckenenergie von  $280.000 \text{ W/m}^{-5}$  die gewünschte Homogenität der Auftragsnaht einstellt. Problematisch ist dann aber die Tatsache, dass sich sehr viele Risse auf der Oberfläche bilden und sehr starke Anlauffarben entstehen. Um eine Aussage über die Stabilität der Parameter treffen zu können, generieren wir diese Naht noch dreimal und stellen fest, dass das Ergebnis unterschiedlich ausfällt und in manchen Nähten auch wieder Lunker und größere Poren entstehen. Es ist zu vermuten, dass die Durchmischung des Pulvers und die Kombination aus den unterschiedlichen Werkstoffen dazu



führen, dass ein stabiles und aussagekräftiges Ergebnis nicht hergestellt werden kann. Im Zuge von diesem Versuch wird sehr schnell deutlich, dass eine theoretische Versuchsplanung wie in Kapitel 6.2.3 beschrieben, nicht angewendet werden kann, da die theoretischen Aussagen nicht mit den in der Praxis erreichten Ergebnissen übereinstimmen. Es wird deshalb versucht eine Aussage über die Eigenschaften der verschiedenen Pulver zu treffen, in dem sie in Reinstoff auf die Oberfläche aufgebracht wird.

### 7.3.2.2 Experimentelle Untersuchung mit dem Auftragswerkstoff Nickel

Bei der ersten Versuchsreihe wird das reine Nickelpulver auf die Oberfläche aufgetragen und das Verhalten überprüft. Die **Abbildung 61** zeigt, dass die die Legierungsanteile des Nickelpulvers die große Porosität in der Auftragsnaht auslösen. Verwenden wir Reineisen auf dem Grundwerkstoff, wird ersichtlich, dass damit ein homogener Auftrag generiert werden kann. Die Auftragsnaht ist in zu sehen, sie weist keinerlei Poren oder Lunker aus. Allerdings kann



**Abbildung 61** Reinnickelpulver auf Gusseisen

auch dieses Pulver nicht in seiner Reinform verwendet werden, da man bei einer mikroskopischen Bildaufnahme feststellen kann, dass keine Anbindung mit dem Grundwerkstoff stattgefunden hat.

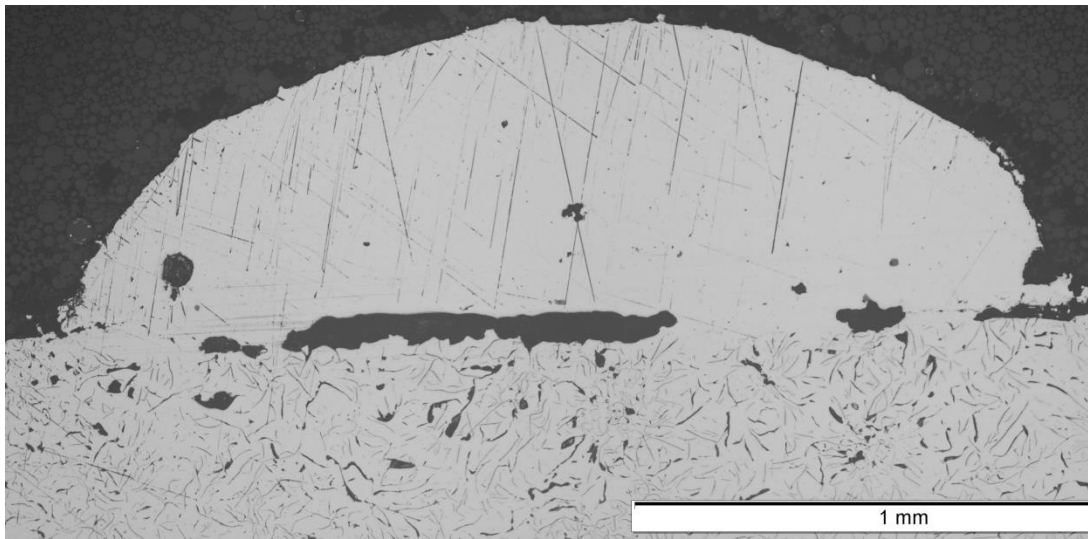
### 7.3.2.3 Experimentelle Untersuchung mit dem Auftragswerkstoff Eisen

Durch den Auftrag durch reines Eisenpulver konnte ein homogener, Poren- und Rissfreier Auftrag generiert werden, wie man der **Abbildung 62** entnehmen kann. Um eine Bewertung über die weiteren Anforderungsparameter



**Abbildung 62** Reineisen Pulver auf Grauguss

machen zu können, wird von der Probe ein Mikroschliff gefertigt. Nach der Erstellung des Schliffbildes wird im Zuge der Sichtprüfung deutlich, dass die Naht Bindefehler aufweist. An mehreren Stellen hat keine Anbindung mit dem Grundwerkstoff stattgefunden (**Abbildung 63**)



**Abbildung 63** Auftragsnaht mit Eisenpulver

**Fazit:** Der Auftragswerkstoff, der nach den theoretischen Gesichtspunkten eine geeignete Wahl dargestellt hat, kann im Praxisversuch keine geforderte Auftragsnaht realisieren. Bezogen auf die Parametereinstellungen die für diesen Versuch vorgenommen worden sind. Es hat sich im Laufe des Verfahrens herausgestellt, dass die Einstellparameter den größten Einfluss auf das Ergebnis haben. Der Schwerpunkt sollte bei weiteren Versuchen darauf gelegt werden.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Refurbish-Prozess zu der Rekonditionierung von Schiffsdieselsylindern setzt voraus, dass ein Pulverauftragswerkstoff gefunden wird, mit der eine Reparaturschweißung erfolgt, die den industriellen Anforderungen entspricht. Die vorliegende Arbeit hat für diesen Zweck unterschiedliche Pulver auf den Grundwerkstoff aufgetragen und deren Verhalten bewertet. Die unterschiedlichen Anforderungen wurden ermittelt, in dem man zuerst die Schadensfälle am Bauteil detektiert hat und anschließend eine Katalog erstellt hat, in dem die Zielvorgaben formuliert wurden. Die Pulverwerkstoffe wurden anhand dieses Leitfadens durch eine Punktbewertung ermittelt. In einer anschließenden Versuchsreihe, wurden drei unterschiedliche Auftragspulver anhand einer theoretischen Versuchsplanung aufgetragen. Dabei stellte sich heraus, dass nicht nur die Auswahl der Pulver eine Herausforderung darstellt, sondern insbesondere die Parametereinstellung, die der Prozess mit sich bringt. Die Einflussfaktoren des LPA-Prozesses müssen für jedes Pulver neu justiert werden und sind durch die hohe Anzahl sehr schlecht beherrschbar. Zu dem kommen die werkstofftechnischen Einflüsse, des Grund- sowie des Auftragswerkstoffes zusammen, die auch als Einflussfaktoren wahrgenommen werden müssen. Nach den ersten Versuchen wird ersichtlich, dass eine theoretische Versuchsplanung für diesen Prozess nur angewendet werden kann, wenn man die Bedeutung der unterschiedlichen Einflussparameter detektieren möchte. Um ein spezifisches Verhalten der unterschiedlichen Pulver auf dem Auftragswerkstoff zu treffen, muss eine zeitlich sehr aufwendige Untersuchung der Parametereinstellung erfolgen, bis man auf ein zufriedenstellendes Ergebnis trifft. Der zeitliche Aufwand, der dazu betrieben werden muss, eignet sich nicht im Rahmen dieser Arbeit. Es konnte so nicht zu allen Werkstoffen eine ausreichende Aussage gemacht werden.

Einzelnähte aus den Pulverwerkstoffen lassen sich als Einzelnaht unter den gewünschten Parametern aufbringen. Grundlegend kann aber festgestellt werden, dass eine Generierung der Einzelnaht sich nicht mit den gleichen Einstellungsparametern auf eine Flächennaht übertragen lässt. Denn bei dem Auftrag der Flächennaht, erweitert sich das Parameterfeld noch um viele der folgenden Eigenschaften wie, dem Wärmeverlauf, der Temperatureinbringung und damit das unterschiedliche Aufschmelzen des Grundwerkstoffes. Die Wärmeleitung des Werkstückes wird verändert und durch die Überlappung der Auftragsnähte findet ein mehrmaliges Aufschmelzen des Grundwerkstoffes statt. Aber auch hier gibt es eine Vielzahl von Maßnahmen und Lösungsmöglichkeiten, die ein Potential für weitere Untersuchungen haben. Zum einen kann man während des Prozesses Unterbrechungen einbauen, damit sich das Werkstück abkühlen kann. Aber auch eine geänderte Roboterbewe-

gung/Spurgeometrie wie in Kapitel 7.2.3 angesprochen kann eingesetzt werden. Eine Reduzierung der Laserleistung während des Prozesses könnte auch dazu beitragen, dass weniger Wärme im Verlauf des Prozesses entsteht. Eine Überwachung der Temperatureinbringung könnte Aufschluss darüber geben, an welchen Stellen Maßnahmen eingeleitet werden könnten, um den Prozess zu verbessern. Ein weiterer Punkt ist die Optimierung der Pulverwerkstoffe. Man kann davon ausgehen, dass die ungenügende Durchmischung von Eisen und Nickel dazu geführt hat, dass ein geforderter Auftrag nicht zu Stande gekommen ist. Hilfreich wäre es, weitere Untersuchungen durchzuführen in dem industriell hergestellte Pulver zu Einsatz kommen. Diese können eine konstante und stabile Durchmischung garantieren.

Das Ziel einen Pulverauftragswerkstoff zu ermitteln, der den geforderten Kriterien entspricht, wurde erreicht. Es kann also, mit gezielt eingesetzten Parametern ein stabiler Auftrag generiert werden. Dieser kann in Form einer Einzelspur auf den Grundwerkstoff aufgebracht werden und erreicht die geforderten Qualitätsziele. Eine Übertragung der Einzelnah in einen Flächenauftrag, stellt jetzt eine weitere Herausforderung dar. Es sollte versucht werden, mehr Erkenntnis über die Einflüsse der Flächennaht zu ermitteln und daraus Parameter abzuleiten, die einen stabilen Auftrag realisieren können.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] V. S. Hans J. Fahrenwaldt, Praxiswissen Schweißtechnik, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [2] D. Verlag, *Laserstrahl-Auftragschweißen*, Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2011.
- [3] T. G. Helmut Hügel, Laser in der Fertigung, Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009.
- [4] G. Bi, Identifizierung und Qualifizierung von prozessrelevanten Kenngrößen zur Überwachung und Regelung beim Laserauftragschweißen, Aachen: Shaker Verlag, 2004.
- [5] A. Karl, Laserauftragschweißen von hochlegierten Duplexstählen, Ilmenau: Universitätsverlag Ilmenau, 2014.
- [6] T. Jambor, Funktionalisierung von Bauteiloberflächen durch Mikro-Laserauftragschweißen, Aachen: Technische Hochschule Aachen, 2012.
- [7] G. F. Metting, „Schweißtechnische Verarbeitung der Gusseisenwerkstoffe,“ Duisburg , 2012.
- [8] W. T. Hans Berns, Eisenwerkstoffe, Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [9] MAHLE GmbH, Kolben und motorische Erprobung, Stuttgart: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [10] P. D.-I. h. K. M. Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Roos, Werkstoffkunde für Ingenieure, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2015.
- [11] R. F. B. Ilschner, Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik, Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [12] V. S. J. T. Hans J. Fahrenwaldt, Praxiswissen Schweißtechnik, Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [13] Unbekannt, „Die Härte allein macht es nicht,“ *Der Konstrukteur*, Nr. 10, pp. 64 - 66, 2007.
- [14] J. Shen, Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung bei gleichzeitiger Pulverzufuhr, Stuttgart: B. G. Teubner, 1994.

- 
- [15] H.-J. Bargel und G. (. Schulze, Werkstoffkunde, Berlin Heidelberg New York : Springer Verlag, 2012.
- [16] W. Kleppmann, Versuchsplanung, München Wien: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [17] H.-G. Rubahn, Laseranwendung in der Oberflächenphysik und Materialbearbeitung, Wiesbaden: Teubner, 1996.
- [18] K.-H. H. Horst Czichos, Tribologie-Handbuch, Wiesbaden: Springer, 2015.
- [19] R. H. J. S. Karl Sommer, Verschleiß metallischer Werkstoffe, Wiesbaden: Springer, 2014.
- [20] Trumpf, „Laserauftragschweißen mit Draht und Pulver,“ Trumpf GmbH, Ditzingen, 2015.
- [21] A. Karl, Laserauftragschweißen hochlegierter Duplexstähle, Ilmenau: Universitätsverlag Ilmenau, 2014.
- [22] G. Schulze, Metallurgie des Schweißens, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.

---

## Ablaufplan des Versuches an der robotergestützten Laseranlage

---

### 1. Einschalten der Maschine

- 1.1. Gashähne aufdrehen
  - 1.1.1. Argon (Gasdruck kontrollieren: **10 bar**)
  - 1.1.2. Helium (Gasdruck kontrollieren: **10 bar**)
  - 1.1.3. Druckluft
- 1.2. Abluft kontrollieren (Gashahnrichtung in Richtung des Rohres)
- 1.3. Pulverförderer einschalten
  - 1.3.1. Pulverstand überprüfen (bis zur 2. Röhreinrichtung)
- 1.4. Auf automatische Türschließung achten
- 1.5. Bremstest ausführen
  - 1.5.1. Service -> Safe Robot -> Programm abfahren

### 2. Einstellungen starten

- 2.1. Werkstück einspannen, ausrichten (Wasserwaage)
- 2.2. Programm anwählen und ändern
  - ① Fokusbereich einstellen
  - ② Pulvertopf auswählen (rechts **2**; links **1**)
  - ③ Tellerdrehzahl einstellen (**U/min**)
  - ④ Gasdurchfluss einstellen (**l/min**)
  - ⑤ Prozessgas einstellen (**l/min**)
  - ⑥ Geschwindigkeit einstellen (**m/min**), Umrechnung überprüfen, Nachkommastellen!
  - ⑦ Laserleistung einstellen (**W**), Wert muss an 2 Stellen geändert werden
  - ⑧ Überlappung auswählen bei einem Flächenauftrag
- 2.3. Werkstück positionieren
  - 2.3.1. Abstand des Lasers einstellen (**16 mm**, Probe nutzen)
  - 2.3.2. Programm überprüfen und abfahren
- 2.4. Pulverzufuhr überprüfen
  - 2.4.1. Setup -> Fernbedienung aus -> Prüfen -> 3 Werte eingeben -> grünen Startbutton drücken
  - 2.4.2. Pulverstrom mit einer Taschenlampe überprüfen
  - 2.4.3. Ggf. Pulverstand überprüfen
  - 2.4.4. Fernbedienung ein, Profibussteuerung muss angezeigt werden

### 3. Programm starten

- 3.1. Lüftung einschalten

3.2. Tür schließen

3.3. Laser an

3.4. Auf Prozentangabe achten

3.5. Programm auf Automatik stellen

3.6. Programm starten

**4. Nach dem Vorgang**

4.1. Manuellen Steuerung wählen, Laser aus, Tür auf



# DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE

Providing special steel solutions



Sonderwerkstoffe

Oberschlesienstr. 16  
47807 Krefeld - Germany  
Telefon: (siehe Sachbearbeiter)  
Telefax: (02151) 3633 3877  
email: sales@ferro-titanit.com

Seite/page 1 von/of 1

*Deutsche Edelstahlwerke GmbH - 47807 Krefeld - Germany*

LZN Laser Zentrum Nord GmbH  
Herr Möller  
Am Schleusengraben  
DE 21029 Hamburg

Zeugnis/Warenbegleitschein-Nr. - Inspection certificate/Delivery note no.		Datum - Date
45540/1		17.11.15
Abteilung	Sachbearbeiter - Telegraphno.	Konto-Nr. - Customer's index
VSO	Maria Rapp 02151/3633-2052	869158
Ihre Bestellung - Your order		Auftrags-Nr. - Order No.
D18/35283/2015/G-2/2015-11-03		4924729/1

## Werkzeugnis nach EN 10204-2.2

Test report EN 10204-2.2

Gegenstand Product	Prüfgegenstand/Test object Anforderungen/Requirements	Kennzeichnung/Verpackung Marking/package	Charge/Gewicht kg Heat no./weight kg
DEW AS4-P/LC 4799.05 50-150 µm Plastikflasche 5 kg	Metallpulver DEW Standardprodukt	DEW AS4-P/LC Körnung/grain size 50-150 µm	255652 20 kg

Chemische Analyse/Chemical analysis: (Masseprozent, percent by mass)

Charge Heat No.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	Al %	Fe %
255652	0,021	0,87	0,62	0,015	0,006	17,15	2,09	12,7	0,004	Balance

Siebanalyse/Sieve analysis:

Charge Heat No.	<45 µm %	45-53 µm %	53-63 µm %	63-80 µm %	80-100 µm %	100-125 µm %	125-150 µm %	150-180 µm %	>180 µm %
255652	0,0	1,6	9,6	25,9	25,2	25,4	12,2	0,1	0,0


Sonstige Eigenschaften/Other characteristics:

Charge Heat No.	Fließverhalten (s/50g) Flow rate (s/50g)	Schüttdichte (g/cm³) Apparent density (g/cm³)
255652	17,0	4,15

Dieses Zeugnis wurde maschinell erstellt und trägt daher keine Unterschrift.  
This document has been computer generated and need not be signed for validity.

Es wird bestätigt, dass die Lieferung geprüft wurde und den Vereinbarungen bei der Bestellannahme entspricht.  
We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order contract.

Ende des Dokuments / End of document

 <b>MG Metal Powders</b>	<b>Spezifikation</b>	Nummer: 1
		Datum: 30.10.2009
Art-No.: 111	Eisen-Pulver- CHEMICAL < 75	Revision: 2
		Seite: 1

CHEMICAL &lt; 75

Revision: 2.0

Bestandteile: &gt;98,0% % Eisen

	<u>min</u>	<u>max</u>	<u>Test method</u>
AD, g/cm <sup>3</sup>	2,70	3,40	ISO 3923/1
<b><u>Screen Analysis- %</u></b>			
+ 75 µm		Sp.	ISO 4497
+ 63 µm	2,0	20,0	ISO 4497
+ 45 µm	10,0	40,0	ISO 4497
- 45 µm	40,0	80,0	ISO 4497
<b><u>Chemical analysis wt-%</u></b>			
Carbon, %		0,50	Leco C/S
Oxygen (H <sub>2</sub> -loss), %		1,30	DIN ISO 4491-2

## Material Product Data Sheet

### 99% Nickel Powders for Thermal Spray

#### Thermal Spray Powder Products: Metco 56VC, Metco 56C-NS

#### 1 Introduction

Metco™ 56VC and Metco 56C-NS are pure nickel powders that can be thermal sprayed to salvage and build up surfaces of worn or mis-machined nickel and nickel alloy parts. The produced coatings are hard, dense and readily machinable.

These products can be used instead of Monel for applications which require corrosion-resistant coatings that are slightly harder than Monel coatings, but with good machinability. They can be applied using either atmospheric plasma spray or combustion powder Thermospray™.

Metco 56VC is a coarser grade material of higher purity that can be used for speciality applications where a coarser particle size distribution is desired.

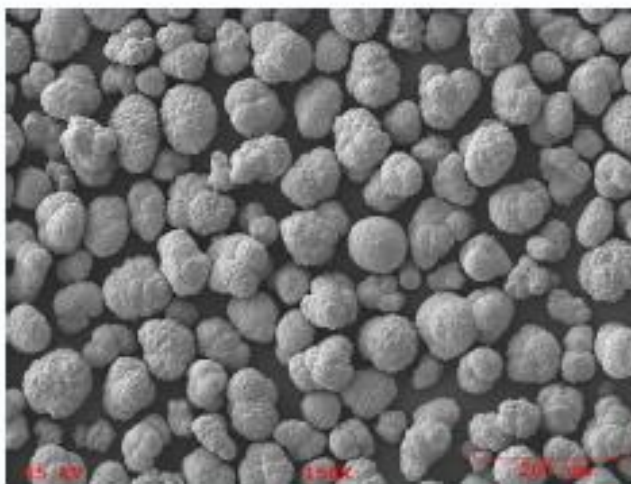
#### 1.1 Typical Uses and Applications:

Typically used for:

- Salvage and buildup of worn or mis-machined components made of nickel or nickel alloys

#### Quick Facts

Classification	Powder, pure nickel
Chemistry	99.3%+ Ni (typical)
Manufacture	Precipitated
Morphology	Globular
Apparent Density	approx. 3.4 g/cm <sup>3</sup>
Purpose	Salvage and restoration
Melting Point	1453 °C (2647 °F)
Process	Atmospheric Plasma Spray or Combustion Powder Thermospray™



SEM photomicrographs of Metco 56C-NS, showing morphology that is typical for these products.



# STELLITE® 21 ALLOY

## TECHNICAL DATA

TIG WELD DEPOSITION

MMA WELD DEPOSITION

MIG WELD DEPOSITION

PTA &amp; LASER WELD DEPOSITION

HVOF &amp; PLASMA SPRAY DEPOSITION

### Nominal Composition (mass %) and Physical Properties

Co	Cr	Mo	C	Ni	Others	Hardness**	Density	Melting Range
Base	26-29	4.5-6.0	0.20-0.35	2.0-3.0	Fe, Si, Mn	27-40 HRC** 290-430 HV**	8.33 g/cm <sup>3</sup> 0.301 lb/in <sup>3</sup>	2360-2615 °F 1295-1435 °C

\*\* Higher values indicate a typical work hardened surface. Stellite® 21 can work harden up to 550HV (48HRC).

**Stellite® 21** (previously known as **Stellite® 8**) was developed in the mid 1930s as a corrosion resistant CoCr alloy, and rapidly found application as a biocompatible hip implant and denture alloy. Many of the alloys currently used in medical applications are variants of the original **Stellite® 21** composition. It was also one of the first heat-resistant alloys trialled for use in jet engines.

**Stellite® 21** consists of a CoCrMo alloy matrix containing dispersed hard carbides which strengthen the alloy and increase its hardness, but also decrease the ductility. The type, shape, size, and distribution of the carbides is strongly influenced by the processing history of the alloy, and for this reason the mechanical properties of **Stellite® 21** are very dependent upon the manufacturing route and any subsequent heat treatments.

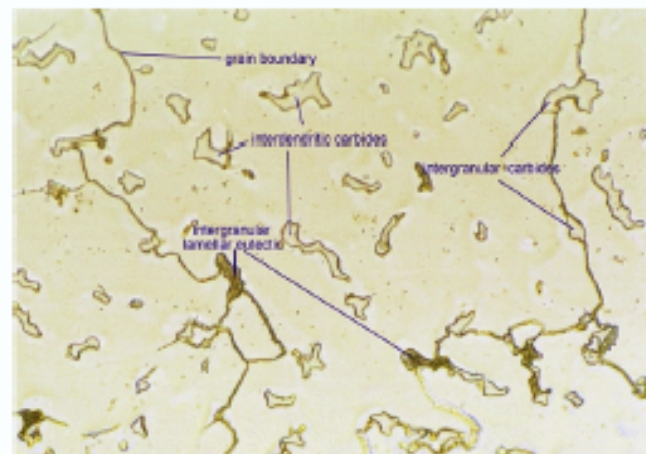
Due to the low volume fraction of carbides, the Co-based alloy matrix dominates the wear and corrosion properties. **Stellite® 21** has excellent cavitation, galling and metal-to-metal sliding wear resistance, but is not recommended for severe hard particle abrasion. The surface can work harden considerably during wear or even during machining, and the use of correct machining tools and techniques is important to achieve optimal results.

**Stellite® 21** has excellent resistance to thermal and mechanical shock. Optimum high temperature strength is obtained by solution heat treatments at 1200-1240°C (2190 - 2265°F) followed by quenching, and aging in the temperature range 700-1150°C (1290-2100°F).

**Stellite® 21** can be cast, powder metallurgically processed, or applied as a weld hardfacing. It is recommended for applications involving cavitation, erosion, corrosion and/or high temperatures, such as valve trim for petrochemical and power generation. Due to its good impact resistance, it has been widely used in the building up of forging or hot stamping dies. The oxyacetylene weld deposition method is not recommended for this alloy.

### Corrosion Resistance

**Stellite® 21** is resistant to oxidizing and reducing gaseous atmospheres up to 1150°C (2100°F). Because its ternary alloying element is Mo and not W, it has higher resistance to reducing or complex environments (e.g. sulphuric acid, hydrochloric acid, and sour gas) than CoCrW alloys such as **Stellite® 6**. The typical electrode potential in sea water at room temperature is approx. -0.3 V (SCE). Like stainless steels, **Stellite® 21** corrodes primarily by a pitting mechanism and not by general mass loss in seawater and chloride solutions. More information regarding corrosion resistance can be provided on request.



Optical Micrograph of a Stellite® 21 investment casting (as-cast, etched, 200X). The carbides in Stellite® 21 are usually of the type

**Vergleichstabelle der Vickers-Brinell-Rockwell-Härte und Zugfestigkeit <sup>1)</sup>**  
**Comparative table of Vickers, Brinell and Rockwell hardness and tensile strength <sup>1)</sup>**  
**Table de conversion des duretés <sup>1)</sup>**  
 ~ DIN 50150

Härte / Hardness / Dureté				Zugfestigkeit <sup>2)</sup> B Tensile strength <sup>2)</sup> B Resistance <sup>2)</sup> B N/mm <sup>2</sup>
Vickers HV 30	Brinell HB 30	Rockwell <sup>3)</sup>		
		HRB	HRC	
80	80	36,4	-	270
85	85	42,4	-	290
90	90	47,4	-	310
95	95	52,0	-	320
100	100	56,4	-	340
105	105	60,0	-	360
110	110	63,4	-	380
115	115	66,4	-	390
120	120	69,4	-	410
125	125	72,0	-	420
130	130	74,4	-	440
135	135	76,4	-	460
140	140	78,4	-	470
145	145	80,4	-	490
150	150	82,2	-	500
155	155	83,8	-	520
160	160	85,4	-	540
165	165	86,8	-	550
170	170	88,2	-	570
175	175	89,6	-	590
180	180	90,8	-	600
185	185	91,8	-	620
190	190	93,0	-	640
195	195	94,0	-	660
200	200	95,0	-	670
205	205	95,8	-	680
210	210	96,6	-	710
215	215	97,6	-	720
220	220	98,2	-	730
225	225	99,0	-	750
230	230	-	19,2	760
235	235	-	20,2	780
240	240	-	21,2	800
245	245	-	22,1	820
250	250	-	23,0	830
255	255	-	23,8	850
260	260	-	24,6	870
265	265	-	25,4	880
270	270	-	26,2	900
275	275	-	26,9	920
280	280	-	27,6	940
285	285	-	28,3	950
290	290	-	29,0	970
295	295	-	29,6	990
300	300	-	30,3	1010
310	310	-	31,5	1040
320	320	-	32,7	1080
330	330	-	33,8	1110
340	340	-	34,9	1140

<sup>1)</sup> Alle mittels verschiedener Härteprüfverfahren an verschiedenen Werkstoffen ermittelten Härtewerte sind nur annähernd vergleichbar.  
 All hardness values determined on different materials using various hardness testing methods are only approximately comparable.  
 Les indices de dureté déterminés par des essais différents sur des matériaux différents ne sont qu'approximativement comparables.

Härte / Hardness / Dureté				Zugfestigkeit <sup>2)</sup> B Tensile strength <sup>2)</sup> B Resistance <sup>2)</sup> B N/mm <sup>2</sup>
Vickers HV 30	Brinell HB 30	Rockwell <sup>3)</sup>		
		HRB	HRC	
350	350	-	36,0	1170
360	359	-	37,0	1200
370	368	-	38,0	1230
380	376	-	38,9	1260
390	385	-	39,8	1290
400	392	-	40,7	1320
410	400	-	41,5	1350
420	408	-	42,4	1380
430	415	-	43,2	1410
440	423	-	44,0	1430
450	430	-	44,8	1460
460	-	-	45,6	-
470	-	-	46,3	-
480	-	-	47,0	-
490	-	-	47,7	-
500	-	-	48,3	-
510	-	-	49,1	-
520	-	-	49,7	-
530	-	-	50,4	-
540	-	-	51,0	-
550	-	-	51,6	-
560	-	-	52,2	-
570	-	-	52,8	-
580	-	-	53,3	-
590	-	-	53,9	-
600	-	-	54,4	-
610	-	-	55,0	-
620	-	-	55,5	-
630	-	-	56,0	-
640	-	-	56,5	-
650	-	-	57,0	-
660	-	-	57,5	-
670	-	-	58,0	-
680	-	-	58,5	-
690	-	-	59,0	-
700	-	-	59,5	-
720	-	-	60,4	-
740	-	-	61,2	-
760	-	-	62,0	-
780	-	-	62,8	-
800	-	-	63,6	-
820	-	-	64,3	-
840	-	-	65,0	-
860	-	-	65,7	-
880	-	-	66,3	-
900	-	-	66,9	-
920	-	-	67,5	-
940	-	-	68,0	-

<sup>2)</sup> Die auf eine Dezimale angegebenen Rockwellwerte dienen nur der Interpolation und sind im Endergebnis auf ganze Zahlen zu runden.

The Rockwell values given to one decimal place serve only for interpolation and should be rounded to integers in the end result.  
 Les données Rockwell à une décimale ne servent qu'à l'interpolation, le résultat doit être arrondi au nombre entier.

