



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Isabel Becker

# **Vergleich der mechanischen Eigenschaften des Laser Engineering Net Shape-Verfahrens mit denen von gewalztem Stahl und unter Berücksichtigung des metallischen Laserstrahlschmelzens**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Isabel Becker**

**Vergleich der mechanischen  
Eigenschaften des Laser Engineering  
Net Shape-Verfahrens mit denen von  
gewalztem Stahl und unter  
Berücksichtigung des metallischen  
Laserstrahlschmelzens**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau und Produktion (dual) Entwicklung und Konstruktion  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
PWF – Doose GmbH  
Abteilung: Entwicklung und Konstruktion

■■■■■■■■■■  
■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■

Erstprüfer: Prof. Dr. Jens Telgkamp  
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Jannek Schütt

Abgabedatum: 01.08.2024

# **Zusammenfassung**

**Isabel Becker**

## **Thema der Bachelorthesis**

Vergleich der mechanischen Eigenschaften des Laser Engineering Net Shape-Verfahrens mit denen von gewalztem Stahl und unter Berücksichtigung des metallischen Laserstrahlschmelzens

## **Stichworte**

Additive Fertigung, Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (DED), pulverbettbasiertes Schmelzen (PBF), Laser Engineering Net Shape (LENS), Laserstrahlschmelzen (LBM), Selektives Laserschmelzen (SLM), DMG MORI, Zugversuch, Kerbschlagbiegeversuch, Druckversuch

## **Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit umfasst eine Versuchsplanung in Anlehnung an Taguchi. In dieser werden für das Laser Engineering Net Shape-Verfahren Parameter zusammengefasst, um Aussagen der mechanischen Eigenschaften und der Dichtigkeit im Vergleich zu handelsüblichem Stahl zu treffen. Für diesen Vergleich werden verschiedene Probenarten hergestellt. Im Folgenden werden gleiche Probenarten im Verfahren des metallischen Laserstrahlschmelzens hergestellt und die Ergebnisse zwischen denen von handelsüblichem Stahl und dem Laser Engineering Net Shape-Verfahren eingeordnet.

**Isabel Becker**

## **Title of the paper**

Comparison of the mechanical properties of the Laser Engineering Net Shape process with those of rolled steel and in consideration of metallic laser beam melting

## **Keywords**

Additive manufacturing, Direct Energy Deposition (DED), powder bed fusion (PBF), Laser Engineering Net Shape (LENS), Laser Beam Melting (LBM), Selektives Laserschmelzen (SLM), DMG MORI, tensile test, impact test, compression test

## **Abstract**

This work includes a test design based on Taguchi. It summarises parameters for the Laser Engineering Net Shape process in order to make statements about the mechanical properties and impermeability in comparison with standard steel. Different sample types are produced for this comparison. In the following, the same sample types are produced using the metallic laser beam melting process and the results are categorised between those of commercially available steel and the Laser Engineering Net Shape process.



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

*Hamburg University of Applied Sciences*

*Department Maschinenbau und Produktion*

## **Aufgabenstellung**

**für die Bachelorthesis**

von Frau **Isabel Becker**

Matrikel-Nummer: XXXXXXXXXX

Thema: **Vergleich der mechanischen Eigenschaften des Laser Engineering Net Shape-Verfahrens mit denen von gewalztem Stahl und unter Berücksichtigung des metallischen Laserstrahlschmelzens**

Unter Einsatz des LENS-Verfahrens (Laser Engineering Net Shape) auf einer Lasertec 125 DED Hybridmaschine ist beabsichtigt, im Falle von Abnutzung oder Beschädigung von Spritzgussformeinsätzen durch Aufschweißen von Material und anschließendes Nachbearbeiten eine Instandsetzung vorzunehmen. Der Hersteller der Maschine versichert eine Materialdichte von etwa 99,0 % und somit Materialeigenschaften, die denen von handelsüblichem Stahl entsprechen. Diese Präzision kann seitens des Unternehmens nicht verbindlich für die Kunden gewährleistet werden, da Erfahrungen im Unternehmen fehlen, um Aussagen zu unterschiedlichen Parametereinstellungen und variierenden Ergebnissen treffen zu können.

Im Rahmen der Bachelorarbeit ist beabsichtigt, Zug-, Kerbschlagbiege- und Druckproben mittels des LENS-Verfahrens in Verbindung mit den drei maßgeblichen Parametern (Layerhöhe, Pulvermenge und Laserleistung) aus dem Material 1.4404 anzufertigen. Ziel ist es, festzustellen, ob diese Proben vergleichbare mechanische Eigenschaften wie handelsüblicher warmgewalzter Stahl aus dem Material 1.4404 aufweisen.

Gleichzeitig sollen im LBM-Verfahren (Laser Beam Melting) ohne Veränderung der Parameter Zug-, Kerbschlagbiege- und Druckproben erstellt werden, um diese mit den Proben aus dem LENS-Verfahren zu vergleichen.

### Schwerpunkte:

- Festlegung von Zielen für die zu erreichenden Materialeigenschaften vor dem Hintergrund der anvisierten Anwendungen
- Aufstellung und Durchführung eines Versuchsplan für die verschiedenen Probenformen
- Konzeptionierung und Konstruktion der Proben im CAD (für LENS-Verfahren, LBM-Verfahren, gewalzter Stahl)
- Vorbereitung und Herstellung der Proben des LENS- und LBM-Verfahrens
- Prüfung der Zugproben nach Norm auf ihre mechanischen Eigenschaften am IWS
- Prüfung der Kerbschlagbiegeproben nach Norm auf die Kerbschlagzähigkeit am IWS
- Prüfung der Druckproben auf ihre Stauchungseigenschaften am IWS
- Vergleich der Ergebnisse der gewalzten Stahlproben mit den Proben aus dem LENS-Verfahren
- Einordnung der Ergebnisse der Proben aus dem LBM-Verfahren im Vergleich zu den Proben aus gewalztem Stahl und dem LENS-Verfahren
- Diskussion der Ergebnisse und Empfehlung für das weitere Vorgehen

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>Begriffsdefinition DED und SLM</b> .....	<b>XI</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>XII</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1    Unternehmensvorstellung.....	1
1.2    Motivation .....	1
1.3    Ziel dieser Arbeit.....	2
1.4    IWS.....	2
1.5    Inhalt dieser Arbeit .....	3
<b>2. Verfahren der additiven Fertigung</b> .....	<b>4</b>
2.1    Lasersysteme .....	5
2.1.1    CO <sub>2</sub> -Laser .....	6
2.1.2    Festkörperlaser.....	7
2.1.3    Diodenlaser.....	7
2.2    Directed Energy Deposition (DED).....	8
2.3    Laser Engineering Net Shape (LENS).....	9
2.3.1    Verfahrensprinzip .....	9
2.3.2    Laser- und Fokussiereinheit.....	10
2.3.3    Düsenform.....	11
2.3.4    Schweißstrategie .....	12
2.3.5    Pulver.....	12
2.3.6    Arbeitsgase .....	13
2.3.7    Abwandlungen des LENS-Verfahrens.....	13
2.4    Powder Bed Fusion (PBF).....	13
2.5    Laser Beam Melting (LBM).....	14
2.5.1    Verfahrensprinzip .....	14
2.5.2    Laser- und Scannereinheit.....	15
2.5.3    Belichtungsstrategie .....	17
2.5.4    Pulver.....	18
2.5.5    Arbeitsgase .....	18
2.5.6    Eigenspannungen .....	19

<b>3. Additive Anlagen von DMG MORI .....</b>	<b>20</b>
3.1 DMG MORI.....	20
3.2 Lasertec 125 DED hybrid.....	20
3.2.1 Pulver- und Schutzgasförderung .....	21
3.2.2 Laser und Düse .....	22
3.2.3 Schweißstrategie .....	23
3.2.4 Besonderheiten .....	24
3.3 Lasertec 30 dual SLM .....	24
3.3.1 Pulver- und Schutzgasförderung .....	25
3.3.2 Laser und Belichtungsstrategie .....	28
3.3.3 Besonderheiten .....	28
<b>4. Vorbereitung der Proben.....</b>	<b>30</b>
4.1 Versuchsplanung.....	30
4.1.1 Prüfung der Proben .....	31
4.1.2 Grenz- und Zielwerte .....	32
4.2 Versuchsdurchgänge.....	34
4.2.1 Probenbenennung.....	34
4.2.2 Probenherstellungsplan .....	37
4.2.3 Prüfungsplan der Proben.....	39
4.3 Vorbereitung der Daten zum Herstellen auf der DED- und SLM-Maschine .....	40
4.3.1 CAD .....	40
4.3.2 Vorbereitung der Daten für die Lasertec 125 DED hybrid Maschine.....	41
4.3.3 Vorbereitung der Daten für die Lasertec 30 dual SLM Maschine .....	42
4.3.4 Siemens NX.....	42
4.3.5 CELOS.....	43
4.3.6 Cimatron.....	43
4.4 Ausrichtung und Form der Proben .....	43
4.4.1 Ausrichtung der Proben.....	44
4.4.2 Form der Proben .....	45
4.5 Materialkennwerte .....	48
<b>5. Auswahl der Bearbeitungsparameter und Aufbau der Versuche .....</b>	<b>49</b>
5.1 Eingestellte Parameter und Schweißstrategie des LENS-Verfahrens .....	49
5.2 Eingestellte Parameter und Belichtungsstrategie des LBM-Verfahrens.....	52
5.3 Spanende Herstellung und Fertigstellung der Proben.....	55
5.4 Zugversuch.....	57
5.5 Kerbschlagbiegeversuch .....	57
5.6 Druckversuch .....	58

5.7	Schliffbilder .....	59
<b>6.</b>	<b>Auswertung der Ergebnisse .....</b>	<b>60</b>
6.1	Zugversuch.....	60
6.2	Kerbschlagbiegeversuch .....	63
6.3	Druckversuch .....	65
6.4	Schliffbilder .....	67
6.5	Zustand der additiven Proben nach den Versuchen.....	70
6.6	Auswirkung der Parameter.....	72
<b>7.</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>74</b>
	<b>Literaturverzeichnis und Quellenverzeichnis.....</b>	<b>76</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>80</b>
A.	Probenbenennung mit Bündelung in ihre jeweiligen Verfahren bzw. gewalzter Stahl .....	81
B.	Herstellungsplan der Proben .....	82
C.	Prüfungsplan der Proben .....	83
D.	Technische Zeichnung Zugproben.....	84
E.	Technische Zeichnung Kerbschlagbiegeproben.....	85
F.	Technische Zeichnung Druckproben .....	86
G.	Sammelzeichnung Zugproben.....	87
H.	Sammelzeichnung Kerbschlagbiegeproben .....	88
I.	Sammelzeichnung Druckproben .....	89
J.	Einzelmessungen der Flächenanalyse der Schliffbilder .....	90
K.	Aufnahmen der DED-Versuchsdurchgänge.....	91
	<b>Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit .....</b>	<b>93</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der additiven Verfahren mit Zuordnung zu den einzelnen Gruppen, Grün: Kunststoffverfahren, Grau: metallische Verfahren, Hellblau: andere Materialien ..	5
Abbildung 2: Schematische Darstellung des LENS-Verfahrens mit Mehrstrahldüse [26] .....	10
Abbildung 3: Darstellung der verschiedenen Düsensysteme mit Pulverfluss (in Anlehnung an [36]) ..	12
Abbildung 4: Verfahrensprinzip des LBM-Verfahrens [36] .....	15
Abbildung 5: Aufbau einer Scanner-Einheit für das LBM-Verfahren (in Anlehnung an [22]) .....	16
Abbildung 6: Grundlage der Belichtungsstrategien nach (in Anlehnung an [21]) .....	17
Abbildung 7: Produktbild der Lasertec 125 DED hybrid der Firma DMG MORI [14] .....	20
Abbildung 8: Übersicht der Userinterfaces (CELOS) mit Bauraum-, Schmelzbad-, und Abstandsüberwachung .....	21
Abbildung 9: Verschiedene Operationstypen für den LENS-Prozess .....	23
Abbildung 10: Produktbild der Lasertec 30 dual SLM der Firma DMG MORI [14] .....	24
Abbildung 11: Förderungen des Metallpulvers im rePlug-System zum Prozessraum .....	26
Abbildung 12: Schematische Förderungen des Schutzgases .....	27
Abbildung 13: Verwendete Belichtungsstrategie der Lasertec 30 dual SLM: Streifenmuster .....	28
Abbildung 14: Trockenperlen der SLM-Maschine .....	29
Abbildung 15: Vorlage L4-Versuchsplan nach Taguchi [35] .....	31
Abbildung 16: Benennungssystem der Proben am Beispiel D-Z-1-111 .....	35
Abbildung 17: Anordnung der Proben auf der Substratplatte mit Benennung des ersten Parametersatzes .....	36
Abbildung 18: Substratplatte mit der Anordnung der Proben im LBM-Verfahren, Proben von links nach rechts nummeriert, inklusive einer Reserve markiert mit X .....	37
Abbildung 19: Ausschnitt des Herstellungsplans .....	37
Abbildung 20: Ausschnitt des Probenprüfplans .....	40
Abbildung 21: Aufbau des Schweißjobs der LENS-Proben mit Aufmaß (transparent) und Soll-Proben (opak) .....	41
Abbildung 22: Beispiel Treppenversatz bei zylindrischen Geometrien in den verschiedenen Ausrichtungen .....	44
Abbildung 23: Auszug der technischen Zeichnung der Zugprobe nach DIN 50125 .....	46
Abbildung 24: Auszug der technischen Zeichnung der Kerbschlagbiegeprobe nach DIN EN ISO 148-1 .....	46
Abbildung 25: Auszug der technischen Zeichnung der Druckprobe nach DIN 50106 .....	47
Abbildung 26: Parametereinstellungsfenster in Siemens NX für die Bearbeitung des LENS-Prozesses .....	50
Abbildung 27: Laserleistungsstufen für 1400 W und 1600 W .....	51
Abbildung 28: Erklärung der Parameter der Belichtungsstrategie .....	54
Abbildung 29: Baujob SLM-Maschine mit 10 von 12 Proben, Substratplatte 300 x 300 mm .....	55
Abbildung 30: Prüfung der Zugproben .....	57
Abbildung 31: Prüfung der Kerbschlagbiegeproben .....	58
Abbildung 32: Prüfung der Druckproben .....	58
Abbildung 33: Geätzte Schliffbilder der vier Parametersätze .....	59
Abbildung 34: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Zugversuches .....	62
Abbildung 35: Druck-Spannungs-Diagramm des Druckversuches mit 400 bar- und 1500 bar-Vergleichslinie .....	66
Abbildung 36: Polierte Schliffbilder je Parametersatz, Aufnahme mit Stereomikroskop .....	68
Abbildung 37: Geätzte Schliffbilder je Parametersatz, Aufnahme mit Stereomikroskop .....	70
Abbildung 38: Entstehendes Muster bei den Versuchen .....	71
Abbildung 39: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit Markierung (rot) der Unstetigkeiten .....	72

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definition der Stufen 1 und 2 für den Versuchsplan nach Taguchi .....	31
Tabelle 2: Vollständiger Versuchsplan nach Taguchi mit eingesetzten Parametern .....	31
Tabelle 3: Materialzusammensetzung von 1.4404 nach Norm DIN EN 10088-1 Nichtrostende Stähle [4] .....	32
Tabelle 4: Mechanische Kennwerte von 1.4404 nach Norm DIN EN 10088-2 Nichtrostende Stähle [5] .....	33
Tabelle 5: Ausschnitt der Probenbenennung mit Bündelung in ihre jeweiligen Verfahren bzw. gewalzter Stahl .....	36
Tabelle 6: Überblick über die mechanischen Kennwerte der verschiedenen Lieferanten für 1.4404 ..	48
Tabelle 7: Allgemeine Parametereinstellung der SLM-Maschine .....	52
Tabelle 8: Einstellungen der Parameter für die Belichtung .....	53
Tabelle 9: Übersicht der Ergebnisse aus dem Zugversuch .....	61
Tabelle 10: Übersicht der Ergebnisse aus dem Kerbschlagbiegeversuch .....	64
Tabelle 11: Übersicht der Ergebnisse aus dem Druckversuch .....	67
Tabelle 12: Mittelwerte der Flächenmessungen aus den Unreinheiten der Parametersätze .....	69
Tabelle 13: Zusammenfassung der Mittelwerte und Standardabweichungen der DED-Ergebnisse .....	73

---

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
3D	dreidimensional
App	Application
BJ	Binder Jetting
BJT	Freistrahl-Bindemittelauftrag, Binder Jetting
C	Kohlenstoff
CAD	Computer Aided Design
CFF	Continuous Filament Fabrication
CNC	Computerized Numerical Control
CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> -He	Kohlenstoffdioxid-Stickstoff-Helium
Cr	Chrom
DED	Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung, Directed Energy Deposition
DLP	Direct Light Processing
DOD	Drop on Demand
DoE	Statistische Versuchsplanung, Design of Experiments
EBM	Elektronenstrahlschmelzen, Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
GaAlAs	Aluminiumgalliumarsenid
GaAs	Galliumarsenid
IWS	Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik
Laser	Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LBM	Laser Beam Melting
LDM-w	Laserauftragschweißen mit Draht, Laser Metal Deposition – Wire
LENS	Laser Engineering Net Shape
LMD	Laser Metal Deposition
LOM	Laminated Object Manufacturing
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
MEX	Materialextrusion, Material Extrusion
MJ	Material Jetting

---

MJF	Multi Jet Fusion
MJT	Freistrahlmateriale Auftrag, Material Jetting
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
MPA	Metall-Pulver-Auftrag, Metal Powder Application
N	Stickstoff
Nd	Neodym
Ni	Nickel
NPJ	Nano Particle Jetting
P	Phosphor
PBF	pulverbettbasiertes Schmelzen, Powder Bed Fusion
PC	Personal Computer
PEM	Pellet Extrusion Modeling
PLM	Product Lifecycle Management
S	Schwefel
s	Standardabweichung
SDL	Selective Deposition Lamination
SHL	Schichtlaminiierung, Sheet Lamination
Si	Silicium
SLA	Stereolithografie, Stereo Lithography
SLM	Selektives Laserschmelzen, Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STEP	Standard für den Austausch von Produktmodell-Daten, Standard for the Exchange of Product model data
VPP	badbasierte Photopolymerisation, vat photopolymerization
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
$\bar{x}$	Mittelwert
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
Yb	Ytterbium

---

## Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Bruchdehnung	%
a	Kerbschlagzähigkeit	J/mm <sup>2</sup>
d <sub>0</sub>	Anfangsdurchmesser der Druckprobe	mm
E <sub>s</sub>	Streckenenergie	J/mm
h <sub>0</sub>	Höhe der Druckprobe	mm
KU	Kerbschlagarbeit mit U-Kerbe	J
KV	Kerbschlagarbeit mit V-Kerbe	J
P <sub>L</sub>	Laserleistung	W
R <sub>m</sub>	Zugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
R <sub>p0,2</sub>	Dehnfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
v <sub>s</sub>	Vorschubgeschwindigkeit des Lasers	mm/min
σ <sub>d</sub>	Druckspannung	N/mm <sup>2</sup>
σ <sub>z</sub>	Spannung	N/mm <sup>2</sup>
ε <sub>d</sub>	Stauchung	%
ε <sub>z</sub>	Dehnung	%

---

## Begriffsdefinition DED und SLM

DED: Directed Energy Deposition oder Direct Energy Deposition ist die Hauptgruppe mehrerer Verfahren. Diese Bachelorarbeit behandelt das untergeordnete Verfahren LENS - Laser Engineering Net Shape.

SLM: Selektives Laserschmelzen ist unter dem Verfahren PBF - Powder Bed Fusion eingeordnet und ist unter anderem ein Eigenname der Firmen DMG MORI und Nikon SLM Solution. Eine viel verwendete Abkürzung ist LBM – Laser Beam Melting, da diese sich nicht auf einen Markennamen bezieht, sondern auf das Verfahren.

Im Verlauf der Bachelorarbeit werden die Verfahren als LENS und LBM bezeichnet, jedoch werden die Probenbezeichnungen nach den Verfahren in den Maschinennamen Lasertec 125 DED hybrid und Lasertec 30 dual SLM betitelt. Dies soll dafür sorgen, die Proben leichter auseinanderhalten zu können, da die Abkürzungen LENS und LBM Ähnlichkeiten aufweisen und es schnell zu Verwechslungen kommen kann. Weiterhin ist es leichter, die Proben den Maschinen zuzuordnen.

---

## Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Werkstoffkunde und Schweißtechnik Frau Hasselmann, Herrn Gobbert und Frau Liedtke-Scheffler, die mich mit Ihrem Wissen in vielen Punkten beraten konnten und bei den Prüfungen der Proben unterstützt haben.

Weiter möchte ich mich bei meinem dualen Praxispartner, insbesondere bei Herrn Schütt, nicht nur für die Betreuung und Unterstützung im Rahmen der Abschlussarbeit, sondern auch für die Hilfestellung und Unterstützung im gesamten Studium sowie für das vermittelte Wissen bedanken. Ebenso danke ich der Belegschaft der Werkstatt, die mir nicht nur bei der Fertigstellung der Proben geholfen, sondern mich auch über die Jahre des Studiums mit ihrem Praxiswissen unterstützt hat.

Zuletzt möchte ich mich bei Professor Telgkamp für die Unterstützung und die Betreuung vor und während der Bachelorarbeit bedanken. Die bereitgestellten Mittel und Wege, die Sie ermöglicht haben, sind auch ein Grund für die stressfreie Zeit, vor allem während des praktischen Teils der Bachelorarbeit.

## 1. Einleitung

Die Bachelorarbeit wird im Rahmen des dualen Studiums bei dem Unternehmen PWF – Doose durchgeführt. Alle spannenden und additiven Schritte werden bei dieser Firma ausgeführt. Nötige Prüfungen des Materials werden am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik durchgeführt. Im Folgenden werden die Motivation und das Ziel dieser Arbeit erläutert.

### 1.1 Unternehmensvorstellung

Die Firma PWF – Doose ist ein Kleinunternehmen mit Sitz in Henstedt-Ulzburg und ist Teil der PWF Saturn GmbH. Auf einer Produktionsfläche, die sich auf zwei Hallen aufteilt, werden komplexe Werkzeuge und Vorrichtungen für verschiedene Branchen hergestellt. Dafür stehen unter anderem mehrere 3-Achs- und 5-Achs-Fräsmaschinen, Drehmaschinen, Schleif- und Erodiermaschinen und im Bereich der metallischen additiven Fertigungsverfahren Maschinen der Verfahren LENS und LBM zur Verfügung.

Die Haupttätigkeiten sind das Konstruieren und Fertigen von Spritzgusswerkzeugen für Branchen wie Automobil- und Fahrzeugbau und Medizintechnik. Sowie das Konstruieren und Fertigen von Folgeverbund- und Tiefziefwerkzeugen in verschiedenen Branchen. Weiter werden Einzelteile und Kleinstserien auf Kundenwunsch gefertigt, unter anderem in den Branchen Luft- und Raumfahrtindustrie und Maschinen- und Anlagenbau.

### 1.2 Motivation

In vielen Bereichen des Maschinenbaus wird vermehrt an der Herstellung von Komponenten oder Baugruppen mittels der additiven Fertigung gearbeitet. Die additive Fertigung bietet neue Ansätze bei der Konstruktion, da die Designfreiheit bei vielen Verfahren stark gewachsen ist im Vergleich zur konventionellen Fertigung. So können vorherige Baugruppen mit viel Montageaufwand zu einem Bauteil umgewandelt werden oder Bauteile können mit innenliegender Geometrie für Kühl- oder Heizsysteme integriert werden. Weiterhin können Bauteile mit verschiedenen Materialien hergestellt werden, um optimierte Eigenschaften für ein Produkt zu realisieren.

So gibt es für die Instandsetzung oder Reparatur von einzelnen Bauteilen neue Ansätze. Mit einer Untergruppe des DED-Verfahrens (Directed Energy Deposition), dem LENS-Verfahren (Laser Engineering Net Shape), können Komponenten von Grund auf aufgebaut werden. Wahlweise mit verschiedenen Materialien, aber auch, um bei vorhandenen Komponenten Material hinzuzufügen. Bei dem LENS-Verfahren erfolgt dieses in einem Schweißprozess. Die Dichte soll dabei nach Aussage von Herstellern zu 99,0 % der von handelsüblichem Stahl entsprechen. Von der Dichte hängen viele mechanische Eigenschaften ab. Ist die Dichte des Materials im Volumenteil gering, sind die Werte wie Festigkeit geringer als bei einem Teil mit hoher Dichte. [19] Eine geringe Dichte ist nicht gleichbedeutend schlecht, da ein Bauteil gewollte Hohlräume aufweisen kann wie beispielsweise bei Verwendung von einer konturnahen Kühlung. Eine geringe Dichte ist fatal, wenn sie ungewollt durch Gaseinschlüsse entsteht. Dokumentationen des Herstellers fehlen, um die Aussage zu bestätigen, dass die

gefertigten Bauteile mit den gewählten Parametern zu 99,0 % an handelsübliche Materialien heranreichen

### 1.3 Ziel dieser Arbeit

Im Rahmen der Bachelorarbeit sollen die Festigkeitskennwerte aus dem Zugversuch, die Kerbschlagzähigkeit aus dem Kerbschlagbiegeversuch und die entstehende Stauchung bei einem Druckversuch ermittelt werden. Die LENS-Proben sollen in Verbindung mit den Kennwerten von gewalztem Material gebracht werden. Sowie soll ein Vergleich zu Proben gezogen werden, die im LBM-Verfahren (Laser Beam Melting) hergestellt werden. Alle Proben sollen aus dem Material 1.4404 hergestellt werden.

Es soll geprüft werden, ob das aufgeschweißte Material die gleichen Eigenschaften aufweist wie gewalztes Material. Folgend soll untersucht werden, ob ein Verwenden dieses Verfahrens für das Reparieren/Instandsetzen von Formteilen geeignet ist und für andere Anwendungen mit den eingestellten Parametern Anwendung finden kann, wie beispielsweise Herstellung von Ventilgehäusen oder Wärmetauschern. [17]

Um eine qualifizierte Aussage treffen zu können, werden die Hauptparameter Layerhöhe, Pulvermenge und Laserleistung in zwei Einstellungen verglichen.

Die Probengeometrien sollen auf einer Lasertec 125 DED Hybridmaschine hergestellt und gemäß Norm am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik (IWS) der HAW Hamburg geprüft werden. Ebenfalls werden die Proben aus handelsüblichem Stahl und aus dem LBM-Verfahren am IWS geprüft. Alle Proben werden in Zusammenarbeit mit der Firma PWF – Doose GmbH hergestellt.

Alle Proben sollen nach den jeweiligen Normen DIN 50125, DIN EN ISO 148-1 und DIN 50106 bearbeitet werden.

### 1.4 IWS

Das Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik sitzt an der HAW Hamburg und befasst sich mit verschiedenen Themen wie Werkstoffkunde, Schweißtechnik, metallischen additiven Verfahren und Robotertechnik in Verbindung mit verschiedenen Schweißtechniken. Des Weiteren stehen viele verschiedene Prüfverfahren zur Verfügung, darunter mechanisch-technologische Prüfungen, metallografische Prüfungen, zerstörungsfreie Prüfungen und Korrosionsprüfungen. Diese umfassen Zug-, Kerbschlagbiege- und Druckversuche sowie die Möglichkeit, am IWS die Vorbereitung für mikroskopische Untersuchungen durchzuführen. [52]

Geleitet wird das IWS von Professor Dr. Gerhard Biallas, der zusammen mit weiteren Mitarbeitern Labore und Vorlesungen in diesen Fachbereichen für verschiedene technische Studiengänge unterrichtet. [52]

---

## 1.5 Inhalt dieser Arbeit

### **Kapitel 2 Verfahren der Additiven Fertigung**

Das zweite Kapitel startet mit einer Einführung in die additive Fertigung und gibt eine Übersicht über die Verfahren. Weiterhin geht es in Kapitel zwei um die verwendeten metallischen Verfahren und deren technischen Komponenten, die allgemein für die Verfahren eingesetzt werden können.

### **Kapitel 3 Additive Anlagen von DMG MORI**

In diesem Kapitel werden der Aufbau, die Komponenten und die jeweiligen Besonderheiten der Lasertec 125 DED hybrid und Lasertec 30 dual SLM Maschinen erläutert.

### **Kapitel 4 Vorbereitung der Proben**

In diesem Kapitel werden die Rahmenbedingungen für die Versuche, die Parameter und nötige Grenzwerte definiert. Weiter wird auf die Planung des Prozesses eingegangen und auf die Vorbereitung der Daten der Proben. Es wird auf die Ausrichtung der Proben auf den Substratplatten sowie die verwendete Probenform eingegangen.

### **Kapitel 5 Auswahl der Bearbeitungsparameter und Aufbau der Versuche**

In Kapitel fünf werden die eingestellten und verwendeten Parameter sowie der spanende Fertigungsprozess erläutert. Weiterhin wird auf die Prüfungen Zug-, Kerbschlagbiege- und Druckversuch sowie auf die Herstellung von Schliffbildern eingegangen.

### **Kapitel 6 Auswertung und Ergebnisse**

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Prüfungen erläutert und ausgewertet. Die DED-Ergebnisse werden in Bezug auf die Proben aus handelsüblichem Stahl gesetzt und die Ergebnisse der SLM-Proben werden eingeordnet. Weiter wird auf den Zustand der Proben nach der Prüfung eingegangen und das Aussehen der Proben erläutert. Darüber hinaus wird die Bedeutung der Parameter für den DED-Prozess analysiert.

### **Kapitel 7 Fazit und Ausblick**

Die Ergebnisse werden abschließend zusammengefasst und Möglichkeiten aufgezeigt, wie der Prozess mit der Maschine Lasertec 125 DED hybrid weiter fortgeführt werden könnte. Außerdem wird aufgeführt, welche weiteren Möglichkeiten es gibt, um sich ein aussagekräftiges Bild über die Parameter und deren Ergebnisse schaffen zu können.

## 2. Verfahren der additiven Fertigung

Die Additive Fertigung ist eine Gruppe der Hauptgruppe der Urformenverfahren nach DIN 8580. In der Gruppe 1.10 sind alle Verfahren aufgeführt und nach diesen sortiert. Die Verfahren werden in fünf Untergruppen unterteilt, wobei 1.10.6 nach Norm nicht vergeben ist. [10]

Die Untergruppen teilen sich nach den Verfahren Freistrahl-Bindemittelauftrag (BJT), Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (DED), Materialextrusion (MEX), Freistrahl-Materialauftrag (MJT), pulverbettbasiertes Schmelzen (PBF) und badbasierte Photopolymerisation (VPP) auf. Viele Verfahren können dabei mehrere Materialien abdecken. Die meist verwendeten sind dabei Metalle und Kunststoffe. [10]

Nicht weiter nach Norm aufgeschlüsselt gibt es unter den fünf Untergruppen noch weitere Verfahren. Die Untergruppen dienen dabei als Sortiergruppe für die Verfahren. Unter dem BJT-Verfahren ist damit das Binder Jetting (BJ) Verfahren für Metalle zu finden. Unter DED befinden sich die Verfahren Laser Engineering Net Shape (LENS), Metall-Pulver-Auftrag (MPA) und Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) für Metalle. Für MEX gibt es bei den Metallen das Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren sowie für die Kunststoffe und zusätzlich bei den Kunststoffen das Pellet Extrusion Modeling (PEM) Verfahren. MJT ist bei Metallen mit Nano Particle Jetting (NPJ) und bei den Kunststoffen mit Material Jetting (MJ) vertreten. Unter PBF fallen für Metalle die Verfahren Elektronenstrahlschmelzen (EBM) und Selektives Laserschmelzen (SLM), das in dieser Arbeit unter dem Namen Laser Beam Melting (LBM) verwendet wird. Für die Kunststoffe gehören die Verfahren Multi Jet Fusion (MJF) und Selective Laser Sintering (SLS) dazu. Bei den Kunststoffen gibt es weiter das VPP-Verfahren, unter dem Stereolithografie (SLA) und Direct Light Processing (DLP) zu finden sind. Weniger bekannt sind Verfahren mit anderen Materialien wie Sand, Wachs oder Komposit. Dadurch fallen unter MEX die Verfahren Continuous Filament Fabrication (CFF) und PEM, unter BJT nochmals das BJ, jedoch mit Sand oder Gips, unter MJT das Drop on Demand (DOD) Verfahren und weiter gibt es das Verfahren SHL mit Selective Deposition Lamination (SDL) beziehungsweise Laminated Object Manufacturing (LOM), vgl. Abbildung 1. Das Verfahren SHL ist dabei nicht in der DIN 8580 aufgeführt, jedoch in der DIN EN ISO/ASTM 52900 erwähnt. [7] [44]

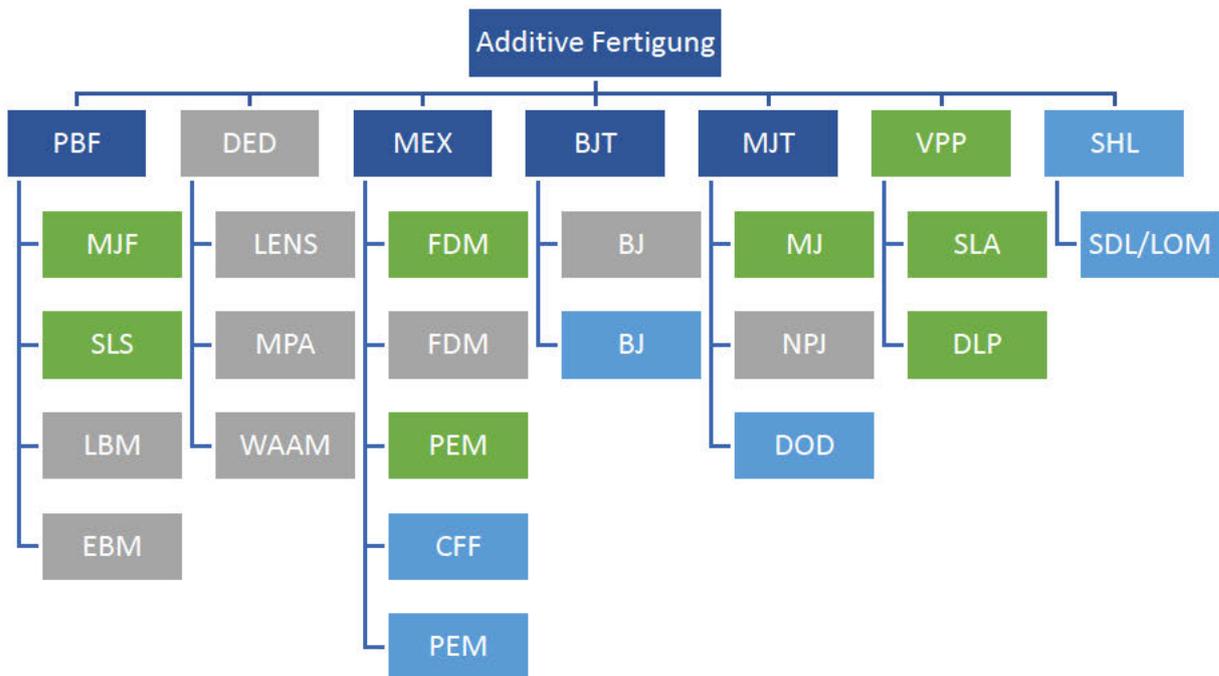


Abbildung 1: Übersicht der additiven Verfahren mit Zuordnung zu den einzelnen Gruppen, Grün: Kunststoffverfahren, Grau: metallische Verfahren, Hellblau: andere Materialien

Im weiteren Verlauf wird auf die metallischen Verfahren eingegangen, die einen Bezug zur Bachelorarbeit haben. Dazu gehören die Verfahren der Gruppe PBF mit LBM. Ein Verweis auf das EBM-Verfahren, sowie DED mit LENS und die Einordnung der Verfahren MPA und WAAM.

Die Verfahren LBM und LENS nutzen ein Lasersystem als Energiequelle zur Verarbeitung der metallischen Materialien.

## 2.1 Lasersysteme

Um Metalle aufschmelzen zu können, stehen verschiedene Lasersysteme zur Verfügung. Dabei unterscheiden sie sich in der Wellenlänge und Intensität. Laserlicht ist monochromatisch (bestimmte Wellenlänge), parallel und kohärent (frequenz- und phasengleich) und wird in einen Punkt fokussiert. Somit kann eine hohe Energiedichte von  $10^6 \text{ W/cm}^2$  erreicht werden. [24]

Laser ist die Abkürzung für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation und besteht aus den Hauptkomponenten laseraktives Medium (Kristalle, Atome Ionen oder Moleküle), einer Anregungsquelle und einem optischen Resonator (Spiegelsystem). Wenn ein Laserstrahl erzeugt wird und durch ein reflektives (Spiegel) oder transmissives (Linsen) Optik gebündelt auf ein Material trifft, entsteht eine Wechselwirkung zwischen Strahlung und Material. Ein Teil der Lichtenergie wird reflektiert, der andere Teil wird gestreut oder absorbiert. Die absorbierte Energie wandelt sich vor allen in Wärme und schmilzt das Material auf. Der Absorptionsgrad ist dabei eine materialspezifische Größe und hängt von den Faktoren Intensität, Temperatur und Wellenlänge des Laserstrahls ab. Metalle haben im ultravioletten und im sichtbaren Spektrum einen hohen Absorptionsgrad, Stähle haben dazu noch einen hohen Absorptionsgrad im Infrarot-Spektrum. [24]

Die allgemeine Materialbearbeitung beginnt bei einer Laserleistung von 1 W und reicht bis über 1000 W. Für den Bereich Metallschweißen haben sich CO<sub>2</sub>-Laser und Festkörperlaser etabliert. [24]

### 2.1.1 CO<sub>2</sub>-Laser

Ein CO<sub>2</sub>-Laser ist ein Gaslaser, welchen es in verschiedenen Bauarten gibt. Sie können quergeströmt, längsgeströmt oder diffusionsgekühlt, auch Slab-Laser genannt, sein. Allgemein sind die Laser wie oben beschrieben aufgebaut und haben eine Wellenlänge von 1060 nm und einen Wirkungsgrad von 10 %. Der optische Resonator besteht aus einem hochreflektierenden Spiegel und einem teildurchlässigen Spiegel und ist mit einem Kohlenstoffdioxid-Stickstoff-Helium-(CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He)-Gemisch gefüllt in den Teilen 1:2:10. [24]

Eine Spannung wird auf den optischen Resonator angelegt, um zwischen zwei Elektroden eine Niederdruck-Gasentladung auszulösen. Dabei wird das Kohlenstoffdioxid des Gemisches nicht direkt angeregt. Stattdessen werden die Stickstoffmoleküle durch Elektronenstöße angeregt und übertragen ihre Schwingungsenergie auf das Kohlenstoffdioxid. Helium kühlt das Gasgemisch und führt damit zu einer Stabilisierung des Prozesses. Um die Strahlungsemission aufrechtzuerhalten, muss das Gasgemisch durch Gaspumpen in Bewegung gehalten und gleichmäßig verteilt werden. Parallel dazu kühlen Wärmetauscher das Gasgemisch, damit kann eine optimale Zusammensetzung und Temperatur aufrechterhalten werden. [24]

**Quergeströimte Laser:** Bei einem querströmenden Laser wird das Gasgemisch quer zur Resonatorachse bewegt. Aufgrund des großvolumigen Entladungsraums ist eine langsame Gasströmung zur Kühlung ausreichend. Dabei kommen hauptsächlich hochfrequenzangeregte Systeme zum Einsatz. [24]

Vorteile sind die kostengünstige und kompakte Bauweise bei einer Strahlenleistung und -qualität, die ausreichend für das Schweißen sind. [24]

**Längsgeströimte Laser:** Bei einem längsgeströmten Laser strömt das Gasgemisch entlang der Resonatorachse, was eine effektive Kühlung und gleichmäßige Gasverteilung ermöglicht, um kontinuierliche Hochleistungsstrahlung zu erzeugen. [24]

Vorteile sind bei dieser Variante die gute Strahlenqualität bei geringen Investitions- und Instandhaltungskosten sowie die Varianz bei Leistungsstufen, die sich auf wenige Hundert Watt bis zu 40 kW beziehen. [24]

**Diffusionsgekühlte Laser, Slab-Laser:** Bei einem Slab-Laser erfolgt die Hochfrequenzentladung zwischen großflächigen Kupferelektroden mit geringem Abstand. Der geringe Abstand zwischen den Elektroden sorgt für eine effektive Kühlung durch Wärmeleitung. [24]

Vorteile sind die außerordentlich gute Strahlenqualität bei einer kompakten Bauweise und niedrige Betriebskosten. [24]

### 2.1.2 Festkörperlaser

Die Festkörperlaser basieren auf verschiedenen Materialien. Zwischen den Resonatorspiegeln liegt ein dotierter Laserstab, der aus Einkristallen wie Rubin, Glas oder Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) dotiert mit Chrom oder Neodym (Nd) besteht. Angeregt wird der Laserstab mit Anregungslampen, diese können Blitzlampen für gepulste Laser, Bogenlampen für kontinuierliche strahlende Laser oder Laserdioden für kontinuierliche strahlende Laser sein. [24]

Allgemein haben Festkörperlaser eine Leistung von 10 W bis 5 kW. Kontinuierlich strahlende Laser haben eine höhere Prozessgeschwindigkeit, jedoch lassen sich mit gepulsten Lasern Leistungen bis zu 20 kW erreichen. Nd:YAG-Laser mit Laserdioden haben im Gegensatz zu den anderen Anregungslampen ein Wirkungsgrad von 10 % anstatt 3 % mit einer Leistung von 10 W bis 8 kW. [24]

Rubin-Laser haben eine Wellenlänge von 694 nm, Nd:Glas-Laser von 1060 nm und Nd:YAG-Laser von 1064 nm bei einer Strahlenqualität von 25 mm x mrad. [24]

Weitere Formen sind Faserlaser und Scheibenlaser.

**Faserlaser:** Faserlaser haben eine Wellenlänge von 1070 nm. Das laseraktive Medium ist bei diesem Laser eine Glasfaser, die im Metallschweißbereich mit dem Zusatz Ytterbium oder Neodym dotiert ist. Der Resonator wird durch die Fasern gebildet, die nur die gewünschte Wellenlänge reflektieren. Sie haben einen Wirkungsgrad von 20 % und können Leistungen von bis zu 20 kW erreichen. [24]

Vorteil ist die hohe Strahlqualität (1 - 25 mm x mrad), ein wartungsarmer und unempfindlicher Aufbau sowie eine hohe Effizienz mit geringen Verlusten. [24]

**Scheibenlaser:** Ein Scheibenlaser ist ein diodengepumpter Yb:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 1030 nm. Das laseraktive Medium ist dabei eine dünne Scheibe, die von der Seite angeregt wird. Die Rückseite der Scheibe ist hochreflektierend und stellt den Spiegel des Laserresonators dar. Dabei liegt die Rückseite auf einer Kühlfläche, wodurch die Wärme effizient abgeleitet werden kann. Ein Scheibenlaser hat einen Wirkungsgrad von 25 % und kann Leistungen von 1 W bis zu 16 kW erreichen. Das Yb steht für das Element Ytterbium.

Vorteile sind die hohe Strahlqualität (2 - 12 mm x mrad) und Leistung, eine gute Fokussierbarkeit der Laserstrahlung, eine skalierbare Laserleistung und die Möglichkeit zur Bearbeitung von stark reflektierenden Materialien. [24]

### 2.1.3 Diodenlaser

Diodenlaser, auch Halbleiterlaser genannt, bestehen aus vielen Halbleiterdioden und werden elektrisch angeregt. Bei einer Diode gibt es eine n-dotierte und eine p-dotierte Schicht. Die n-dotierte Schicht hat einen Elektronenüberschuss, während die p-dotierte Schicht einen Elektronenmangel aufweist. Durch die Rekombination der Elektronen, also das Springen der

überschüssigen Elektronen in freie Elektronenlöcher, entsteht ein p-n-Übergang. Dieser Übergang wird durch elektrische Anregung verstärkt. Bei der Rekombination gibt das Elektron Energie ab, die als Lichtemission sichtbar wird. Als Halbleitermaterialien kommen Verbindungen wie Galliumarsenid (GaAs) oder Aluminiumgalliumarsenid (GaAlAs) zum Einsatz. [24]

In einem Diodenlaser werden oft mehrere Dioden in Reihe geschaltet und ergeben einen Diodenlaserbarren. Das entstehende Licht wird in einem Resonator reflektiert und fokussiert. Die typischen Wellenlängen des Lichts zum Bearbeiten von Metallen liegen zwischen 780 und 940 nm. Im Vergleich zu Festkörper- oder CO<sub>2</sub>-Lasern haben Diodenlaser eine geringere Strahlqualität. [24]

Vorteile sind die kompakte Bauweise und eine hohe Lebensdauer (30000 Stunden) bei einem Wirkungsgrad bis zu 50 %. [24]

Diodenlaser werden auch zur Anregung von Festkörperlasern wie beispielsweise Faserlasern verwendet. [32]

### 2.2 Directed Energy Deposition (DED)

Das Directed Energy Deposition Verfahren (DED) oder Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung unterteilt sich in drei Gruppen: MPA, WAAM und LENS. Die Verfahren werden im metallischen Bereich verwendet. Mögliche Energiequellen sind Laser, kinetische Energie und Lichtbogen. Weiterhin haben die Verfahren verschiedene Materialformen und können als Pulver oder Draht vorkommen. [44] Folgend können die Verfahren in verschiedene Kinematik unterteilt werden. So sind Roboter oder NC beziehungsweise Linearkinematik [54] ein Muss für diese Verfahren, um Genauigkeiten und komplizierte Geometrien realisieren zu können. Auch unter den Auftragungsmöglichkeiten gibt es Unterschiede. Es kann zwischen dem Aufschmelzen des Materials durch Wärme und dem kinetischen Auftragen von Pulverpartikeln, die durch hohe Geschwindigkeiten auf eine Oberfläche geschossen und verklebt werden, unterschieden werden. Die verschiedenen Verfahren können für eine diverse Zahl an verschiedenen Materialien wie Stahl, Titan oder Kupfer verwendet werden. [21]

Ein Vorteil dieser Verfahren ist die Möglichkeit, große Bauteile herzustellen. Einige Maschinen verfügen über eine Bauraumhöhe von mehreren Metern und können Grundplatten mit Abmessungen von bis zu 1 m<sup>2</sup> aufnehmen. Dabei kann der Materialverbrauch im Vergleich zu einer konventionellen Fertigung geringer sein, bei der das Bauteil aus einem entsprechenden Rohmaterial spanend hergestellt wird. Die Schichten werden Layer für Layer aufgetragen.

Das Substrat dient im optimalen Fall als ein Teil des fertigen Bauteils. Wenn die Substratplatte als Aufschweißgrundplatte verwendet wird, muss das Bauteil von der Platte, meistens spanend, entfernt werden.

Pulver, welches im Prozess verwendet, aber nicht mit dem Bauteil verbunden wurde, kann dem Pulverkreislauf nicht erneut hinzugefügt werden.

## 2.3 Laser Engineering Net Shape (LENS)

Laser Engineering Net Shape (LENS) auch Laser Metal Deposition (LMD) genannt, ist ein Verfahren, welches metallisches Pulver verwendet und dieses in Verbindung mit einem Laser und einem Schutzgas aufschmilzt. Die Geometrie einer Komponente wird Schicht für Schicht aufgebaut. Bei mehreren Komponenten können die Schichten parallel oder nacheinander aufgebaut werden. [55] [56]

Dieses Verfahren eignet sich gut für Panzerungen und Reparaturen von Bauteilen. Durch die mögliche Varianz und Mischung der Materialien in der Maschine etablieren sich Bauteile, die durch die Materialvarianz und ihre Kombinationen profitieren. Durch den additiven Aufbau können komplexe Geometrien wie Ventilgehäuse oder Impeller in einem Bauteil hergestellt werden. [17] [21]

Je nach Material sind Aufbauraten von 0,5 kg/h bis 1 kg/h möglich. Mögliche Arbeitsbereiche werden in Durchmesser angegeben und liegen bei einem Durchmesser zwischen  $\varnothing 500$  und  $\varnothing 1250$  mm. Der Maschinenraum ist dabei größer, da viele Hersteller einen schwenkbaren Drehtisch integrieren. So ist es möglich, Komponenten mit einer beispielsweise winkelligen Geometrie zu dem Laser auszurichten und eine Treppenstufengeometrie zu vermeiden. [14] [21] Ein Aufbau ist theoretisch bis zu einigen Metern möglich. Allerdings müssen Spannsysteme für die Substratplatten mit einkalkuliert werden, was den Bauraum verringert und somit die Höhe der Maschine beeinflusst.

Einige Maschinenhersteller rüsten LENS-Maschinen mit einer Fräseinheit aus, um geschweißte Geometrien zu ihren Endkonturen ohne Maschinenwechsel zu bringen. [21]

### 2.3.1 Verfahrensprinzip

Aus der Schweißdüse schießt kontinuierlich ein Laserstrahl, welcher auf den Arbeitsbereich trifft und diesen lokal aufschmilzt. Dazu wird über die Düse Pulver gefördert, welches im gleichen Bereich um den Laserstrahl auftrifft. Der Laser schmilzt somit das Pulver und den Grundwerkstoff auf und verschmilzt die Komponenten. Das Schweißsystem besteht aus einer Düse, Pulver und einem Schutzgas. Alternativ kann die gesamte Prozesskammer komplett abgeriegelt und mit einem Schutzgas geflutet werden. Das Schutzgas schützt den Laserstrahl, das Pulver und das Schmelzbad vor dem Sauerstoff in der Luft (Abbildung 2). [21]

Das Lasersystem verfährt mit einem eingestellten Vorschub einen vorab programmierten Weg. Es wird dabei schicht- oder zeilenweise gearbeitet, um die gewünschte Geometrie zu erzeugen. Das zuvor aufgetragene Material wird in der Schicht und in der Zeile mit aufgeschmolzen, damit eine feste Schichtverbindung entstehen kann. [21]

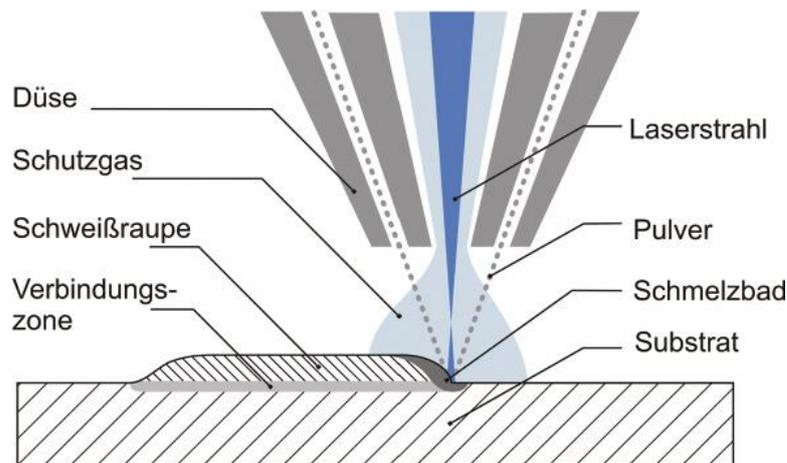


Abbildung 2: Schematische Darstellung des LENS-Verfahrens mit Mehrstrahldüse [26]

Durch die hohen Temperaturen, die im Schmelzbad durch das Aufschmelzen der einzelnen Bahnen entstehen, kann nicht sofort eine neue Schicht aufgeschweißt werden. Das Schweißbad könnte zu flüssig werden und die Geometrie würde wegfließen.

Das Pulver kann je nach Aufbau der Maschine durch verschiedene Wege transportiert werden. Dabei wird auf eine pneumatische Pulverführung oder eine Zyklon-Pulverförderung gesetzt. [21] Bei einer pneumatischen Pulverführung wird durch einen Überdruck das Material zur Schweißeinheit transportiert. Bei einer Zyklon-Pulverförderung wird das Pulver mithilfe eines Fördergases zur Schweißeinheit transportiert und davor in einem Zyklonabscheider in die Bestandteile Pulver und Gas getrennt. [28] [43]

### 2.3.2 Laser- und Fokussiereinheit

Das LENS-Verfahren kann mit verschiedenen Laserarten je nach Material ausgestattet werden. Bei hochreflektierenden Metallen wie Kupferkombinationen und Aluminiumlegierungen kann ein grüner Laserstrahl zum Einsatz kommen, anstatt ein Infrarot-Laserstrahl. Der Vorteil dabei ist, dass ein grüner Laserstrahl eine höhere Absorption besitzt, was zu einer geringeren Laserleistung führt. [56]

Allgemein werden Festkörperlaser wie Yb:YAG-Laser mit Leistungen bis zu 4000 W und 6600 W sowie Scheibenlaser verwendet. Außerdem werden CO<sub>2</sub>-Laser mit Leistungen bis zu 8000 W und einem Fokusdurchmesser bis zu 0,2 mm eingesetzt, ebenso wie Systeme, die Diodenlaser zur Anregung nutzen, im Kilowatt-Bereich. [21]

Für die erste Schicht muss der Laser eine höhere Leistung aufbringen als im restlichen Prozess, um eine ausreichende Verbindung zwischen Substratplatte und Geometrie zu erhalten. In der ersten Schicht muss der Laser das Pulver und die Substratplatte aufschmelzen.

Das Lasersystem verfährt entsprechend der Geometrie der herzustellenden Komponente. Durch schwenkbare Drehtische kann die Komponente präzise senkrecht zum Laserstrahl ausgerichtet werden, sodass der Punkt, an dem Material aufgetragen wird, immer den gleichen Abstand zur Düse aufweist und zur schweißenden Fläche ausgerichtet ist. Dadurch

bleibt der Laserstrahl optimal fokussiert und hat über den Prozess den gleichen Fokuspunkt. Der Laserstrahl wird erzeugt und durch eine Kollimatorlinse gebündelt. Weiter wird der Strahl durch ein Spiegelsystem geleitet und mittels eines dichroitischen Spiegels die benötigten Wellenlängen weitergegeben. [11] Jedes Lasersystem erzeugt einen Wellenlängenbereich mit einer minimalen und maximalen Wellenlänge. Der dichroitische Spiegel filtert die Wellenlängen heraus, die nicht für die Anwendung benötigt werden. Die verbleibende Wellenlänge trifft auf eine Fokussierlinse, die den Strahl fokussiert und zur Düse leitet. [37]

An dem Lasersystem sind bei einigen Herstellern Kameras zur Überwachung der Temperatur der Bauteile und des Schmelzbades installiert. [21]

### 2.3.3 Düsenform

Die verschiedenen Düsenformen können in Off-Axis- und Koaxialdüsen unterteilt werden. Dazu kommen noch Mischformen wie Mehrstrahldüsen, beispielsweise Dreistrahlendüsen, zum Einsatz (Abbildung 3). [55] Der Laserstrahl ist bei diesem Verfahren im Normalfall zusammen mit der Düse senkrecht zur Bearbeitungsfläche ausgerichtet.

Bei einer **Off-Axis-Düse** wird die Pulverzufuhr außerhalb der Laserstrahlachse zusammen mit dem Schutzgas von der Seite zum Fokuspunkt des Laserstrahls zugeführt. Man nennt diese unter anderem laterale Düsenzufuhr. Dabei kann die Pulverzuführung in der Düse integriert sein oder als eine zusätzliche Apparatur, wie in Abbildung 3 zu sehen, installiert sein. Durch die einseitige Zuführung muss die Verfahrrichtung beachtet werden, da es wie beim manuellen Schweißen zu einer schleppenden und stechenden Bewegung kommt. Durch die Art des Aufbaues kann dieses System einfacher an engen und schlecht erreichbaren Stellen, wie Kanälen, Pulver zuführen und verschweißen. Der Aufbau einer Off-Axis-Düse ist weniger komplex als der der anderen Düsen und damit auch günstiger in der Anschaffung. [21] [36] [42]

Das Pulver bei einer **Koaxialdüse** wird koaxial, separat vom Laserstrahl, um diesen in einen Ringspalt geführt. Dieses Düsenprinzip wird auch kontinuierliche Koaxialdüse genannt, da das Pulver kontinuierlich um den gesamten Umfang des Lasers geführt wird. Durch die Zuführung des Pulvers aus allen Richtungen gibt es keine Unterschiede bei der Fortbewegung des Lasers. So können Geometrien leichter realisiert werden. Gleich dem Pulver wird das Schutzgas koaxial geführt und ermöglicht einen guten Schutz gegen die Atmosphäre. [21] [23]

Eine **Mehrstrahldüse**, auch diskrete Koaxialdüse genannt, ist ähnlich der kontinuierlichen Koaxialdüse, unterscheidet sich jedoch durch die Aufteilung des Pulverstroms in mehrere separate Strahlen. Diese einzelnen Pulverstrahlen sind in der Schweißdüse symmetrisch um den Laserstrahl verteilt und werden als einzelne Düsen bezeichnet. Außerhalb der Düse treffen sie zusammen und bilden einen konzentrierten Pulverstrahl. Ein Pulverstrahl aus drei bis sechs Strahlen ist dabei üblich. Der Vorteil der Mehrstrahldüse zur kontinuierlichen Koaxialdüse ist die bessere Anpassung und Fokussierung des Pulverstrahls durch die Möglichkeit, die einzelnen Strahlen einzustellen. [21] [23] [42]

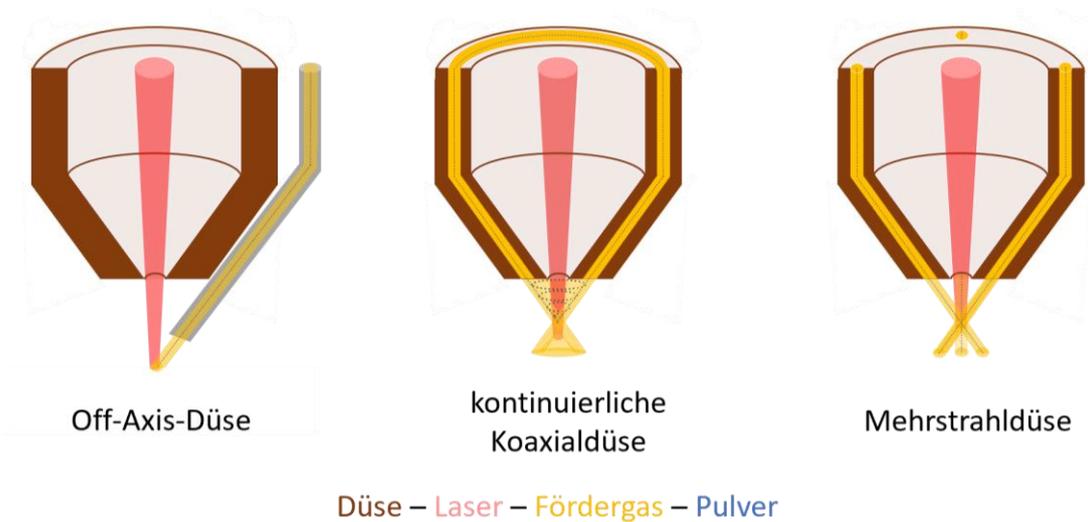


Abbildung 3: Darstellung der verschiedenen Düsensysteme mit Pulverfluss (in Anlehnung an [36])

Bei den verschiedenen Düsen muss weiter unterschieden werden, wie das Schutzgas zugeführt wird. Das Schutzgas kann zusammen mit dem Laserstrahl oder der Pulverförderung als Transportgas gefördert werden. Wenn die Prozesskammer mit Schutzgas komplett geflutet ist, ist keine weitere Schutzgaszufuhr erforderlich. Die Düsen haben typischerweise einen Arbeitsabstand von 10 bis 15 mm vom Werkstück. [21]

Die Düsen bestehen aus Kupfer, da Kupfer eine gute Wärmeleitfähigkeit hat und verschleißarm ist. Viele Düsen verfügen zusätzlich über eine Wasserkühlung, um die Düse zu schützen und die Lebensdauer zu erhöhen. Außerdem sorgt die Wasserkühlung dafür, dass Schweißspritzer schlechter an der Düse haften. [21]

#### 2.3.4 Schweißstrategie

Wie beim herkömmlichen Schweißen werden beim Pulver-Auftragsschweißen viele Schweißraupen neben- und übereinander gesetzt. Komponenten können dabei zeilenweise (Schweißraupe über Schweißraupe) oder schichtweise (Schweißraupe neben Schweißraupe) aufgebaut werden.

Bei einem schichtweisen Aufbau wird typischerweise bei jeder Schicht die Ausrichtung des Verfahrensweges um 90° gedreht, um anisotropen Materialeigenschaften entgegenzuwirken und einen gleichmäßigen Aufbau realisieren zu können. [21]

Beim Auftragsschweißen kann es bei dem Start- und Endpunkt zu Unregelmäßigkeiten durch die An- und Abfahrbewegung kommen. Es empfiehlt sich, den Startpunkt je Schicht leicht zu variieren, um dem entgegenzuwirken.

#### 2.3.5 Pulver

Allgemein schweißbare Materialien finden hier ihre Anwendung. Dazu zählen klassische Materialien wie Werkzeugstähle und Edelmetalle, aber auch Legierungen mit Titan, Nickel und Kobalt. Weitere Materialien wie Aluminium und Kupfer sind in der Entwicklung. [21]

Das Pulver wird in Behältern gelagert und muss vor dem Einsatz in einem Ofen bei 120 -140 °C für ca. 2 Stunden getrocknet werden, bevor es zur Verwendung in einen Pulvertank der Maschine gefüllt werden kann. [11] Mehrere Pulvertanks für eine Maschine sind dabei typisch, da eine weitere Eigenschaft dieses Verfahrens auch die Schweißung von gradierten Materialien ist. Einige Maschinenhersteller bieten Maschinen mit bis zu vier Pulvertanks an. Das Pulver kann auf dem Weg zur Schweißdüse in beliebigen Verhältnissen vermischt werden. [21]

Schichthöhen und -dicken entstehen unter anderem durch die Kombination aus geförderter Pulvermenge, der Vorschubgeschwindigkeit, dem Düsendurchmesser und der Layerhöhe.

Verwendete Korngrößen für das Pulver liegen zwischen 45 µm und 150 µm. Die Schichtdicke ist unter anderem stark von der verwendeten Pulvermenge abhängig. Um ein dichtes und porenreines Gefüge zu bekommen, werden Schichtdicken von 0,1 mm bis ca. 1 mm empfohlen. [11] [31]

### 2.3.6 Arbeitsgase

Für das Pulverauftragsschweißen werden die Gase Argon oder Stickstoff verwendet. Ebenfalls kann Helium für den Prozess eingesetzt werden und wird teilweise als Transportgas für das Pulver verwendet. Helium hat im Vergleich zu Argon eine bessere Wärmeleitfähigkeit. Allgemein ist ein inertes Schutzgas bei diesem Prozess notwendig, um das Pulver und das Schmelzbad vor Feuchtigkeit und damit Nässe durch die Luft zu schützen. So werden Unreinheiten in den Werkstücken vermieden und eine Oxidation minimiert. [21] [24]

Bei Materialien, wie Titan oder Aluminium, die mit Sauerstoff reagieren, sollte eine komplett abgeriegelte Prozesskammer verwendet und mit dem Schutzgas geflutet werden. Für andere Materialien ist es ausreichend, wenn das Schutzgas beim Schweißprozess Laser und Pulver von der Atmosphäre trennt und schützt.

### 2.3.7 Abwandlungen des LENS-Verfahrens

Eine Weiterentwicklung dieses Verfahrens ist das Highspeed-Laserauftragsschweißen (HS-LMD). Im Unterschied zum klassischen LMD wird das Pulver in den Laser gelenkt und kann sich vor dem Arbeitsbereich annähernd auf Schmelztemperatur erwärmen. So sind höhere Prozessgeschwindigkeiten möglich. [56]

Ähnlich dem Pulververfahren gibt es ein weiteres Verfahren, bei dem Draht (LDM-w) aus der Schweißdüse geführt und durch einen Laser sowie das Substrat aufgeschmolzen und verschmolzen wird. Dieses Verfahren ist ein Patent des Fraunhofer IPT. [20]

## 2.4 Powder Bed Fusion (PBF)

Das Powder Bed Fusion (PBF) teilt sich in zwei Verfahren auf. Zum einen das Laser Beam Melting (LBM), bei dem ein Laserstrahl zur Aufschmelzung verwendet wird, und das Electron Beam Melting (EBM), das einen Elektronenstrahl als Energiequelle nutzt. Der Laser- bzw. Elektronenstrahl wird auf eine Bauplatte gelenkt, um die gewünschte Geometrie Schicht für

Schicht aufzuschmelzen. Während sich der Laser- bzw. Elektronenstrahl weiterbewegt, erstarrt die Schmelze. Der ganze Bauraum wird dabei Schicht für Schicht mit Pulver befüllt, sodass das Bauteil oder die Bauteile komplett mit Pulver umhüllt sind. [44]

Beide Verfahren arbeiten als Grundmaterial mit metallischem Pulver. Unter das PBF-Verfahren fallen ebenfalls Kunststoffverfahren wie das Multi Jet Fusion (MJF) und das Selective Laser Sintering (SLS).

Die Pulverpartikelgrößen sind bei LBM und EBM fein und betragen Korngrößen ab 20  $\mu\text{m}$ , daher werden diese Verfahren in komplett isolierten Kammern durchgeführt. Dadurch kann die Schutzkammer vollständig mit Schutzgas geflutet bzw. evakuiert werden, um ein Vakuum zu erzeugen, ohne dass eine zusätzliche Vorrichtung erforderlich ist, die parallel zum Laser geführt werden muss. [44] [55]

Der Nachteil dabei ist, dass das Pulver in den Baukammern komplett abgesaugt werden muss, bevor die Bauteile aus der Prozesskammer entnommen werden können. Jedoch kann dieses Pulver nach Filterung dem Materialkreislauf hinzugefügt und wiederverwendet werden.

### 2.5 Laser Beam Melting (LBM)

Das Laser Beam Melting (LBM) bekannt als Selective Laser Melting (SLM) oder Laser Powder Bed Fusion (LPBF) ist ein Pulverbettverfahren, in welchem die Realisierung von verschiedenen Bauteilen möglich ist. Zum einen können beispielsweise für den Spritzgussbereich Formkerne mit angepassten innenliegenden Kühlkanälen realisiert werden. Weiterhin können geometrisch optimierte Bauteile umgesetzt werden und Baugruppen, die in einer konventionellen Fertigung in vielen Einzelteilen gefertigt und montiert werden müssten, in einem oder in weniger Bauteilen im Pulverbettverfahren umgesetzt werden. Dieses Verfahren kann Hohlräume, Inselstrukturen und Überhänge in Abhängigkeit vom Überhangswinkel mit und ohne Stützstrukturen herstellen.

#### 2.5.1 Verfahrensprinzip

Beim Laser Beam Melting (LBM) wird die metallische Pulverschicht Schicht für Schicht in den Bereichen des Bauteils mit einem Laser aufgeschmolzen und verbunden. Ausgerichtet wird der Laser durch eine Scannereinheit, die beweglich in x-y-Richtung ist. Für jede Schicht fährt die Bauplattform eine Schicht nach unten in z-Richtung und ein Beschichter verteilt gefördertes Pulver aus einem Vorratsbehälter eben und gleichmäßig auf der Oberfläche. Überschüssiges Pulver kann in einem Überlaufbehälter gesammelt werden. Beim Aufschmelzen einer Schicht wird die vorherige Schicht zum Teil mit aufgeschmolzen, um eine Verbindung der Ebenen zu realisieren (Abbildung 4). [36]

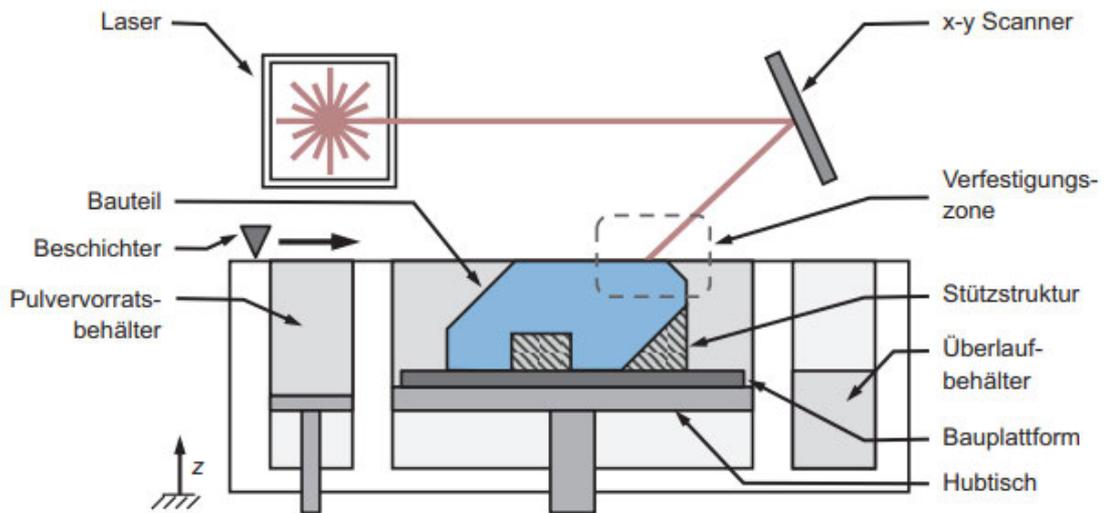


Abbildung 4: Verfahrensprinzip des LBM-Verfahrens [36]

Die Bearbeitungszeit wird durch das Belichten der Bauteile und das Beschichten der Oberfläche, auch Belichtungszeiten und Beschichtungszeiten genannt, definiert. Wichtig zu beachten ist, dass die Beschichtungszeit bei egal wie vielen Komponenten im Bauraum gleichbleibend ist. Dadurch bietet es sich an, den Bauraum möglichst effizient auszunutzen und viele Bauteile in einem Baujob zu belichten. [22]

Der Bauraum stellt dabei einen abgeschlossenen Bereich dar, in dem kein Sauerstoff von außen eindringen kann. Die Baufläche kann je nach Maschinenanbieter kreisförmig oder quadratisch gestaltet sein. Typische Größen für Substratplatten sind 250 x 250 mm oder 300 x 300 mm. Größere oder kleinere Platten sind möglich und abhängig von der Anwendung und der Branche. Die mögliche Bautiefe liegt zwischen 250 und 360 mm. Weiterhin sind auch rechteckige Substratplattenaufnahmen möglich. Einige Hersteller bieten Einsätze an, um die Größe der Substratplattenaufnahmen im Bauraum zu reduzieren und dadurch kürzere Beschichtungszeiten zu erreichen. [21]

Die aufbauende Geometrie sowie alle Stützgeometrien müssen von der Substratplatte spanend entfernt werden. Anschließend müssen die Stützgeometrien entfernt und die Oberfläche darunter bearbeitet werden. Generell ist die Oberfläche rau und für Funktionsflächen ist eine Nacharbeit erforderlich.

### 2.5.2 Laser- und Scannereinheit

Zum Schmelzen einer Schicht werden Faserlaser eingesetzt. Hersteller nutzen dabei hauptsächlich Nd:YAG-Laser und Yb:YAG-Laser. Typische Laserleistungen liegen bei 200 W bis 1000 W, bei einem Fokussdurchmesser zwischen 70 und 100  $\mu\text{m}$ . In einer LBM-Maschine können mehrere Lasereinheiten verbaut werden, um parallel an mehreren Komponenten oder einer Komponente im Bauraum zu arbeiten oder eine sogenannte Hülle-Kern-Strategie umzusetzen. [21]

In Abbildung 5 ist der Aufbau einer Scannereinheit in Verbindung mit einem Faserlaser schematisch dargestellt. Der Laserstrahl wird erzeugt und in einen Strahlaufweiter geleitet. Dieser Strahlaufweiter enthält zwei Linsen. Die erste Linse ist eine konkave Linse, die den Laserstrahl aufweitet, und die zweite Linse ist eine plankonvexe Linse, die den Laserstrahl ins Unendliche fokussiert, wodurch ein paralleles Strahlenbündel entsteht. Der Laserstrahl wird anschließend zu einem motorgetriebenen Spiegelsystem weitergeleitet. Ein Spiegel ist für die x-Ausrichtung und ein anderer für die y-Ausrichtung zuständig. Diese Spiegel arbeiten nach dem Galvanometerprinzip und können sich um ihre Längsachse drehen, wobei sie orthogonal zueinander ausgerichtet sind. [21]

Um das Schmelzen der Schicht realisieren zu können, muss anschließend eine F-Theta-Linse, auch Planfeldlinse genannt, folgen. Das Spiegelsystem beschreibt mit seiner Ausrichtung eine Kugelmantelfläche, wodurch der Fokuspunkt auf einer gekrümmten Ebene liegen würde. Eine F-Theta-Linse kann diesen Verzug korrigieren, indem sie den Strahl so ablenkt, dass der Abstand des Fokuspunktes von der optischen Achse proportional zum Scanwinkel ist. Dadurch wird es möglich, den gesamten Bauraum gleichmäßig zu belichten. [21] [46]

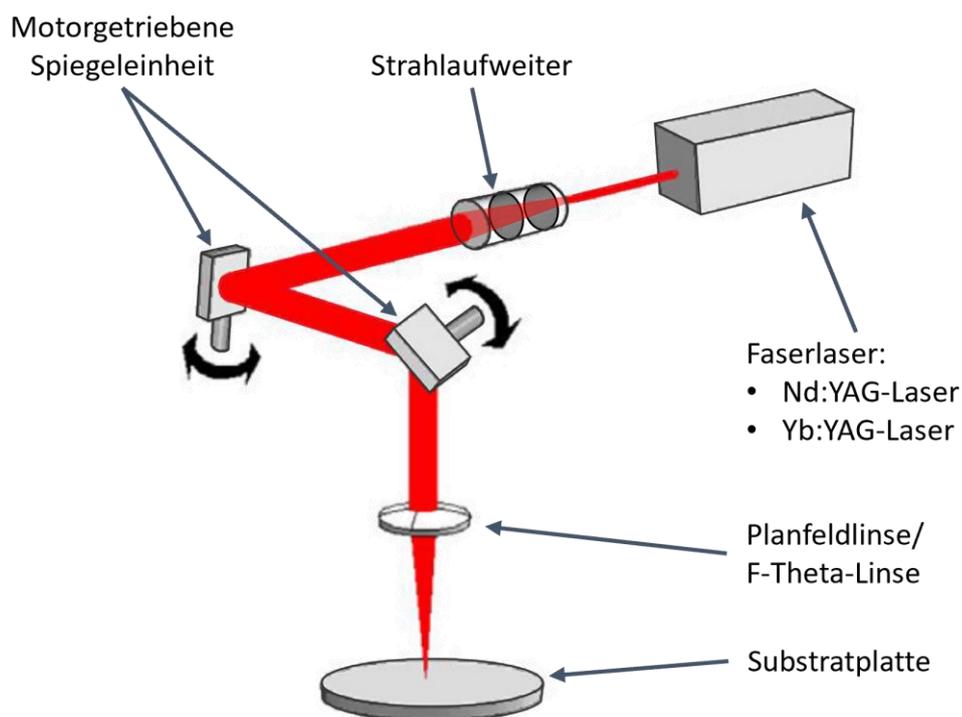


Abbildung 5: Aufbau einer Scanner-Einheit für das LBM-Verfahren (in Anlehnung an [21])

Weiterhin ist es möglich, das System, um eine Vario-Optik oder Linearschlitten zu erweitern. Eine Vario-Optik kann die Brennweite des Scannersystems variabel verändern. Eine Vario-Optik ist vorteilhaft für Anlagen mit großen Bauräumen, da sie eine für den Bauraum optimierte Fokussierung ermöglicht. Alternativ kann die gesamte Scanner-Einheit auf einem in der Z-Richtung verfahrenenden Linearschlitten montiert werden, um den Fokusabstand des Lasers einstellen zu können. [21] [34]

Wenn mit mehreren Lasern in einer Baukammer gearbeitet wird, muss darauf geachtet werden, dass der eine Laser nicht durch den Schmauch des anderen Lasers belichtet wird. Fährt der Laser durch den Schmauch des anderen Laserstrahls, kann der Strahl durch die Verunreinigung gestreut werden, sodass nicht die volle Leistung des Laserstrahls auf die zu belichtende Fläche trifft. Durch den Energieverlust kann es passieren, dass der Laserstrahl die Oberfläche nicht mehr ausreichend aufschmelzen kann. Alle Komponenten der Scanner-Einheit müssen für jeden zusätzlichen Laser erneut konfiguriert werden. [34]

### 2.5.3 Belichtungsstrategie

Die Belichtungsstrategie ist ein maßgebender Faktor zur Festigkeit der Komponenten. Es gibt verschiedene Ansätze für die Belichtung des Bauraums. In der Standardbelichtung (Abbildung 6) kann der Laser von einer Seite zur gegenüberliegenden Seite fahren und zurück. Möglich ist ebenfalls ein Verfahrenweg startend von der gleichen Seite eines Belichtungsfeldes zur gegenüberliegenden Seite oder das Verfahren in einer Verdrehung, beispielsweise 45°, zur Standardbelichtung. [22]

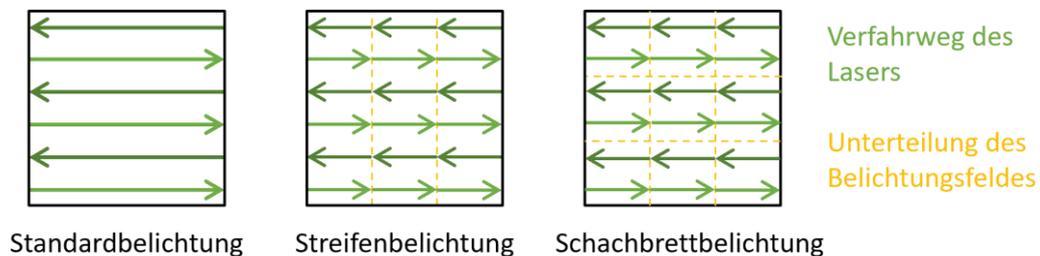


Abbildung 6: Grundlage der Belichtungsstrategien nach (in Anlehnung an [22])

Weitere Abwandlungen der Standardbelichtung sind das Streifenmuster und das Schachbrettmuster. In diesem wird das Belichtungsfeld in Streifen oder Quadrate geteilt und der Laser verfährt innerhalb dieses Streifens oder Quadrats den Verfahrweg und geht anschließend zum nächsten Streifen/Quadrat über. Die Streifen können dabei nebeneinander in Reihenfolge belichtet werden oder einzelne Streifen übersprungen werden, sodass jeder zweite Streifen belichtet wird und in der Schicht neu angesetzt wird, um die übersprungenen Streifen zu belichten. Für die Schachbrettstrategie können gleicherweise die Felder des Schachbretts auf die unterschiedlichen Weisen belichtet werden. [12]

Die Standardbelichtungsstrategie hat den Vorteil, dass eine hohe Belichtungsgeschwindigkeit durch wenige Leerfahrten realisiert werden kann, jedoch unter der Einschränkung, dass ein hoher örtlicher Wärmeeintrag zu beachten ist. Leerfahrten sind Verfahrwege, bei denen die Spiegel sich auf die Position ausrichten, ohne dass der Laser belichtet. Die Streifenbelichtung hat eine längere Leerfahrt, dadurch dass der Laser zurück auf die andere Seite und gegebenenfalls noch weiter zur Seite ausgerichtet werden muss, um den übernächsten Streifen zu belichten. Durch diese Belichtungsstrategie kann ein geringerer Wärmeeintrag realisiert werden. Die Schachbrettbelichtung hat die längsten Leerfahrten, jedoch den geringsten Energieeintrag. Je geringer der Energieeintrag ist, umso geringer können die Eigenspannungen des zu belichteten Bauteils werden. [12]

Das Ergebnis des Verfahrenswegs und der Belichtung des Lasers innerhalb eines Bauteils wird Schraffur und die Außenkontur eines Bauteils wird Kontur genannt. [12]

Die Belichtungsstrategie wird Schicht für Schicht angewandt. Um annähernd isotrope Materialeigenschaften zu erhalten, sollten die Schichten pro Schicht verdreht belichtet werden. So können in der X-Y-Ausrichtung ähnliche Festigkeitswerte erreicht werden. Die Z-Richtung ist abhängig von der Schichtverbundenheit der einzelnen Schichten. [12]

Die Belichtungsstrategien können mit einem Laser oder mit mehreren Lasern durchgeführt werden. Belichtungsstrategien wie Streifen oder Quadrate bieten sich bei der Verwendung von mehreren Lasern an einem Bauteil an. Weiter sind Strategien in der Entwicklung, die einer sogenannten Hülle-Kern-Strategie folgen. Dabei werden die Konturen mit einem Laser mit einer geringen Leistung und einem kleinen Fokus belichtet und die Schraffur mit einem Laser mit einer stärkeren Leistung sowie mit einer höheren Schichtdicke belichtet. Diese Strategie soll eine bessere Genauigkeit, Detailauflösung und Oberflächengüte der Kontur realisieren. Die innenliegende Fläche, der Kern, soll schneller aufgebaut werden, ohne Qualitätsverlust. [45]

### 2.5.4 Pulver

Als Pulver kann alles an Material aufbereitet werden, welches schweißbar ist. Gängige Materialien sind Stähle wie Edelstahl und Werkzeugstahl. Weiter können auch Aluminium- und Titanlegierungen, Kobalt-Chrom-Stahl und nickelbasierte Legierungen verarbeitet werden. [21]

Die meisten Maschinen können Schichtdicken von 10 bis 100  $\mu\text{m}$  bewältigen. Es wird mit einer durchschnittlichen Pulvergröße von 20 bis 60  $\mu\text{m}$  gearbeitet. Jedoch sind kleinere und größere Korngrößen nicht untypisch. [36] [55]

Obwohl im gesamten Bauraum Pulver vorhanden ist, sollte das Pulver nicht belichtet werden, ohne eine feste Anbindung an die Substratplatte oder ein Bauteil. Das Pulver ist mit seiner geringen Korngröße zu fein, um das Gewicht einer belichteten Schicht tragen zu können, und würde abrutschen. Weiter kann nicht angebundenes Material durch den Beschichter verschoben werden. Bereiche mit einer festen Anbindung zu einer Seite sind unter bestimmten Bedingungen mit einem Überhangwinkel bis zu 45° ohne Stützstruktur möglich. [36]

### 2.5.5 Arbeitsgase

Das Pulver wird unter einer inerten Schutzgasatmosphäre und einem Restsauerstoffgehalt von  $< 1\%$  belichtet. Häufig kommen dabei Stickstoff oder Argon zum Einsatz. Stickstoff ist dabei das günstigere Gas, jedoch muss Titan unter Argon verarbeitet werden, da es mit Stickstoff bei hohen Temperaturen reagiert und versprödet. Ein weit weniger verbreitetes Gas ist Helium oder die Verwendung eines Vakuums. [24] [34]

Eine inerte Schutzgasatmosphäre ist notwendig, um Reaktionen mit den Gasen in der Luft zu verhindern. Dadurch wird sichergestellt, dass keine Unreinheiten in den Werkstücken entstehen und eine Oxidation ausgeschlossen wird. [36]

Das Schutzgas hat unter anderem die Aufgabe, Schmauch und Schweißspritzer aus der Arbeitszone des Lasers zu transportieren, und schützt dadurch Teile, wie die Optik, des Lasersystems. In Anlagen mit einem entsprechenden Filtersystem kann ein Aufbereitungskreislauf realisiert werden, in dem das Gas gefiltert und dem Kreislauf zugeführt wird. [34]

### 2.5.6 Eigenspannungen

Aufgrund entstehender Eigenspannungen ist es wichtig, die Bauteile ausreichend mit der Bauplatte zu verbinden, um ein Abreißen des Bauteils von der Bauplatte zu verhindern. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Energie gleichmäßig auf das Bauteil aufgebracht wird. [34]

Um gegen die Eigenspannungen entgegenzuwirken, ist es teilweise möglich, den Bauraum auf eine Temperatur zwischen 200 und 250 °C vorzuwärmen und das Pulver bei dieser Temperatur zu belichten. Weniger verbreitet sind Heizsysteme bis 500 °C. Bei dieser Temperatur beginnt für einige Materialien bereits das Spannungsarmglühen, wodurch weniger Spannungen im Prozess entstehen. [34]

### 3. Additive Anlagen von DMG MORI

Die verwendeten additiven Anlagen sind von dem Hersteller DMG MORI. Im Folgenden werden die Besonderheiten der Maschine aufgeführt und Funktionsabläufe erläutert.

#### 3.1 DMG MORI

Die Firma DMG MORI ist ein Werkzeugmaschinenhersteller und in 43 Ländern mit 17 Produktionswerken und mit vielen Vertriebs- und Servicelokationen aktiv. Sie existiert seit 2013, jedoch ist die DMG MORI ein Zusammenschluss der Firmen MORI SEIKI, Gründung 1948 in Japan, und GILDEMEISTER & Comp., Gründung 1870 in Deutschland. Bis ins Jahr 2009 wurden unter diesen Unternehmen viele Firmen aufgekauft und übernommen, wie LCTec welche heute SAUER LASERTEC heißt und ihre Expertise in der Lasertechnik hat. Seit 2009 arbeiten die Firmen MORI SEIKI und GILDEMEISTER in Kooperation, bis 2013 das Unternehmen GILDEMEISTER in die MORI SEIKI aufgenommen und somit die DMG MORI SEIKI wurde. Die deutschen Standorte blieben dabei bestehen. Der Gründungsort der GILDEMEISTER, Bielefeld, ist heute der Standort für die DMG MORI Aktiengesellschaft, GILDEMEISTER Drehmaschinen sowie die DMG MORI Additive, welche für die Entwicklung und Fertigung von Pulverbettmaschinen verantwortlich ist. [13] [18] [21]

#### 3.2 Lasertec 125 DED hybrid

Die Lasertec 125 DED hybrid (Abbildung 7) ist für Auftragsschweißen und 5-Achs-Fräsbearbeitung ausgelegt und ist seit 2019 auf dem Markt. Die Schweißeinheit hat eine HSK63-Aufnahme und kann wie ein Fräs Werkzeug im System aufgerufen und ausgetauscht werden. Dadurch können Bauteile in einem Prozess abwechselnd schweißend erstellt und fräsend bearbeitet werden. Die Schweißeinheit basiert auf dem LENS-Verfahren.

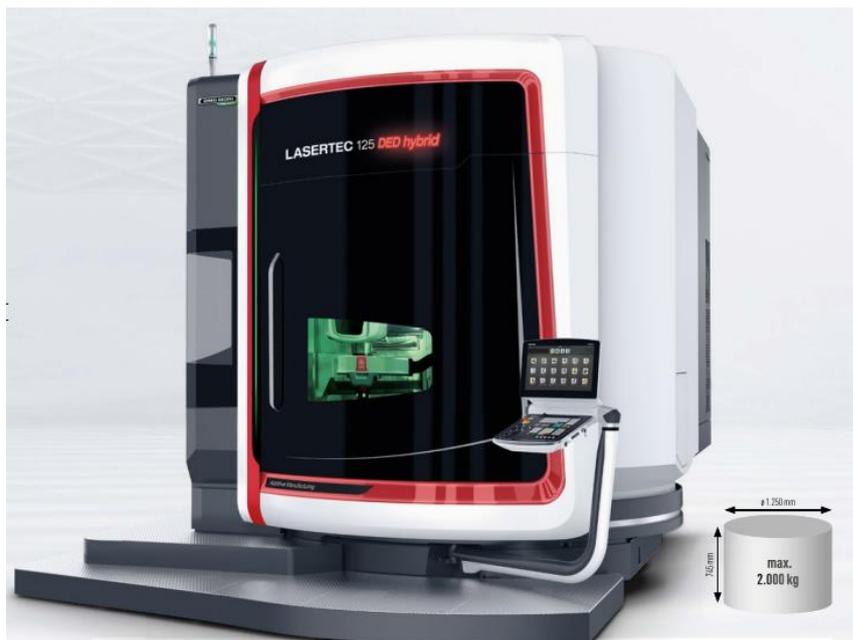


Abbildung 7: Produktbild der Lasertec 125 DED hybrid der Firma DMG MORI [14]

Die Maschine hat eine Baugrundfläche von einem Durchmesser von 1250 mm bei einer Bauhöhe von 745 mm. Im Bauraum können Bauteile bis 2000 kg bearbeitet werden. Die Maschine hat eine Gesamthöhe von 4203 mm und eine Grundfläche von 6331 mm x 7625 mm. [14]

Je nach Material und Einstellungen ist eine Aufbaurrate von 1 kg/h möglich. Weiterhin bietet die Maschine eine große Anzahl an Möglichkeiten zur Kontrolle des Prozesses. So sind Kameras am Schweißsystem und im Arbeitsraum installiert, die den Abstand der Düse zu der Arbeitsfläche erkennen oder die Temperatur im Arbeitsraum dokumentieren und durch Wärmebilder darstellen. Weiter gibt es eine adaptive Prozessregelung, welche unter anderem das Schmelzbad und die Abweichung von dem eigentlichen Schmelzpunkt analysiert. Darüber hinaus werden auch die Temperaturen des Schmelzbads und die Temperaturen der umliegenden Geometrien als ein Farbbild dargestellt. Im Userinterface (CELOS) (Abbildung 8) werden diese Daten gesammelt und angezeigt. Außerdem kann das System erkennen, wenn größere Rückstände in der Düse vorhanden sind. Diese werden über das Userinterface angezeigt. [11] [14]

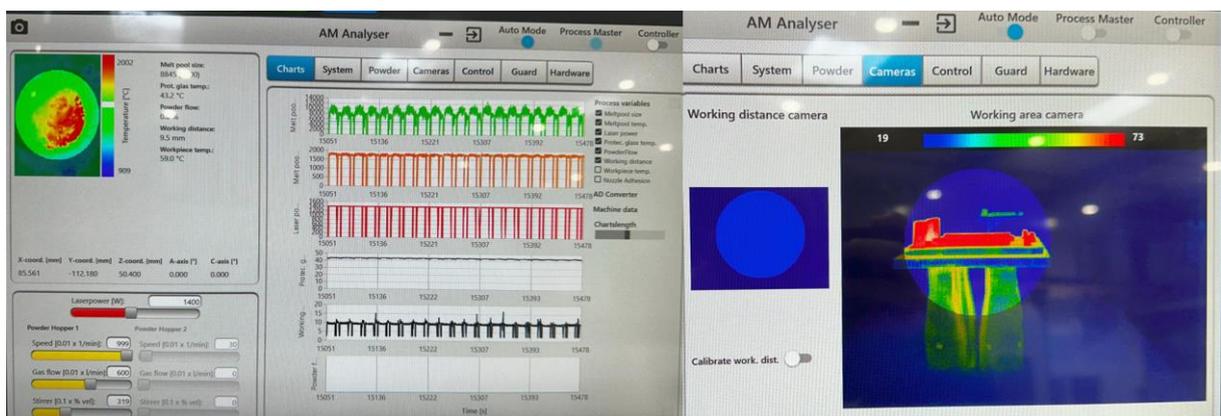


Abbildung 8: Übersicht der Userinterfaces (CELOS) mit Bauraum-, Schmelzbad-, und Abstandsüberwachung

### 3.2.1 Pulver- und Schutzgasförderung

**Pulverförderung:** Für die Förderungen des Pulvers für den Auftragsvorgang kann die Anlage auf zwei Pulvertanks zurückgreifen. Diese können ein Volumen von 5,5 Litern aufnehmen und stehen mit dem dazugehörigen System unter einem Überdruck von max. 3,5 bar. Innerhalb des Tanks rutscht das Pulver durch eine konische Geometrie in eine rechteckige Ringnut einer sogenannten Dosierscheibe. Diese dreht sich und ein Abstreifer verteilt das Pulver auf eine ebene Höhe. Um ein kontinuierliches Nachfließen des Pulvers bei rieselträgem Pulver zu garantieren, sitzt über dem Abstreifer ein Rührer im Tank, welcher das Pulver in Bewegung hält. Die Dosierscheibe dreht sich konstant. Auf der gegenüberliegenden Seite der Befüllung liegt eine Austrittsöffnung, in welcher das Pulver aus der Ringnut mit Hilfe eines Fördergases, hier Argon, abgesaugt wird und durch einen antistatischen Schlauch zur Lasereinheit transportiert wird. [25]

Für das Pulver können verschiedene Stahlsorten wie Edel-, Werkzeug- und Schnellarbeitsstahl sowie Legierungen wie Nickelbasis-, Kobalt- und Kupferlegierungen mit einer Partikelgröße von

50 bis 120 µm verwendet werden. Reaktive Materialien wie Titan und Aluminium können in dieser Anlage als Pulver nicht verarbeitet werden. [11]

Durch die zwei Pulvertanks sind gradierte Materialien sowie Multi-Materialien möglich. Bei gradierten Materialien wird das Pulver in einem einstellbaren Prozentsatz vermischt, und bei Multi-Materialien werden beispielsweise einzelne Schichten in verschiedenen Materialien aufgetragen oder nur definierte Bereiche. [14]

Jedes Pulver verhält sich anders. Bevor der Schweißprozess gestartet werden kann, sollte die Pulverrate in g/min gemessen und die Rührergeschwindigkeit auf die gewünschte Pulverrate in U/min eingestellt werden. Dazu wird eine Minute das Pulver durch die Düse gefördert und gemessen, wie viel Pulver in der Zeit gefördert wird. [11]

**Schutzgasförderung:** Das Schutzgas wird zusammen mit dem Pulver eingeleitet und transportiert dieses zur Düse. Das Hauptventil für Argon öffnet sich erst, wenn der Laserkopf in die Spindel aufgenommen wurde. [11]

Als Schutzgas können die inerten Gase Argon, Helium und Stickstoff zum Tragen kommen. DMG MORI empfiehlt für diese Maschine Argon. [11] [21]

### 3.2.2 Laser und Düse

In der Anlage wird ein fasergekoppelter Diodenlaser mit einer Leistung von 3000 W, einer Fokussierung von 0,9 mm und einer Strahlqualität von 30 mm x mrad verwendet. [38] Bei einem fasergekoppelten Diodenlaser wird eine dotierte Glasfaser wie beim Faserlaser durch Dioden angeregt. [24]

Die 125 DED hybrid verwendet eine koaxiale Pulverdüse mit einem 3 mm Düsendurchmesser und eine koaxiale Schutzgaszuführung. Für diese Düse wird im Prozess eine Arbeitsdistanz zum Auftragspunkt von 13 mm angestrebt. Die Düse zieht eine durchschnittliche Spurbreite von 2,7 mm. Alternativ kann das System mit einer 1,6-mm-Düse ausgestattet werden, indem die Düse und die Kollimatorlinse ausgetauscht werden. [11]

Aus der Düse werden Pulver, Schutzgas und Laserstrahl an die aufzutragende Stelle geführt. Die Düse ist zweiteilig aufgebaut. Der Laserstrahl trifft erst außerhalb der Düse mit dem Metallpulver zusammen. Das Schutzgas und das Pulver strömen zusammen koaxial zum Laserstrahl durch die Düse zum Werkstück. Der Laserstrahl durchläuft mittig die Düse und trifft im Arbeitspunkt von 13 mm auf das Pulver-Schutzgas-Gemisch und schmilzt das Pulver und den Arbeitspunkt auf. Durch den Vorschub in einer Richtung wird eine Einzelspur aufgetragen. Im gesamten Prozess wird die Lasereinheit durch einen Kühlkreislauf kontinuierlich gekühlt. [11]

### 3.2.3 Schweißstrategie

Für die verschiedenen Anwendungen, Flächen und Formen gibt es optimierte Operationstypen. Abbildung 9 gibt einen Überblick über die Operationen. Es wird dabei in Innenkontur, Schraffur, und Außenkontur bei der Bearbeitung unterschieden. Die ersten vier Operationen sind für den Aufbau von Flächen geeignet. [50]



Abbildung 9: Verschiedene Operationstypen für den LENS-Prozess [50]

Operation 1 bis 4 erstellt Körper, die plan in den Ebenen geschnitten sind. Operation 1 baut in einem Zick-Zack-Muster die Innenkontur auf und fährt mit einer weiteren Kontur eine Außenkontur ab. Pro Layer dreht sich die Ausrichtung der Innenkontur um 90°. Die Operation 2 verfährt in der Ebene parallel zur Geometrieform von innen nach außen oder andersrum die Kontur mit einem Versatz ab. Operation 3 und 4 sind für rotationssymmetrische Körper, wie zylindrische Geometrien, geeignet. Operation 3 ist für Volumenkörper geeignet und Operation 4 für dünnwandige Körper mit der Dicke des Düsendurchmessers. [50]

Die Operationen 5 bis 7 sind für ein Auftragen von Material auf einen zylindrischen Körper, deren Rotationsachse im rechten Winkel zur Z-Achse des Schweißsystems gerichtet ist, geeignet. Operation 5 erstellt ein Vollkörperformelement auf einem zylindrischen Körper. Operation 6, gleicht der Operation 5, kann jedoch für dünnwandige Formen verwendet werden. Operation 7 kann verwendet werden, wenn ein Außendurchmesser umhüllt oder Material auf den Durchmesser hinzugefügt werden soll. [50]

Operation 8 bis 12 sind alle Anwendungen für Freiformen. Operation 8 kann verwendet werden für eine Flächenbeschichtung mit definierter Dicke. Operation 9 kann verwendet werden bei einem Aufbau, der auf Flächen basiert. Operation 10 baut Körper mit verschiedenen Materialien auf und Operation 11 baut gekrümmte Sicken mit wählbaren Wandstärken auf. Die Operation 12 baut einlinige, dünnwandige Freiformen auf. [50]

Operationstyp 13 kann verwendet werden, wenn eine rohrartige Geometrie mit dickeren Wänden als der Düsendurchmesser erstellt werden soll. Operation 14 kann jegliche Kurve

additiv erstellen. Operation 15 dagegen ist das klassische Schweißen. Mit dieser Operation sind Punktschweißungen und Heftschweißungen von einem oder mehreren Teilen möglich. [50]

Weiterhin können die einzelnen Schichten mit verschiedenen Laserleistungen gefahren werden. Das ist wichtig, da die ersten Schichten eine höhere Leistung brauchen, um eine Verbindung mit der Substratplatte garantieren zu können. Die erste Schichtlage benötigt ca. 2200 W, die folgenden Schichten können mit 200 W Schritten pro Schicht auf die benötigte Leistung minimiert werden.

#### 3.2.4 Besonderheiten

Die Besonderheit dieser Maschine ist die Möglichkeit, zwischen der Schweißeinheit und der Fräseinheit nach Belieben wechseln zu können. Weiter können zwei verschiedene Materialien in einem Prozess abwechselnd oder in Kombination verwendet werden. Verschiedene Hersteller bieten dafür verschiedene Varianten und Nachrüstmodule an, um die Vielfalt der Pulver im Prozess zu erhöhen.

#### 3.3 Lasertec 30 dual SLM

Die Lasertec 30 dual SLM, Abbildung 10, ist eine Anlage der DMG MORI, die das Pulverbettverfahren unter der Abkürzung SLM verkauft. Das Verfahren gehört, wie unter Kapitel 2 beschrieben, zu dem LBM-Verfahren.



Abbildung 10: Produktbild der Lasertec 30 dual SLM der Firma DMG MORI [14]

Die Anlage hat einen Bauraum von 300 x 300 x 350 mm und eine Grundfläche von 7132 x 925,5 mm (geschlossene Türen) und eine Höhe von 2377 mm. [14]

Alle Bereiche der LBM-Maschine sind über Türen zugänglich. Dadurch kann das Pulver durch das rePlug-System manuell getauscht werden. Zusätzlich sind alle Filter zugänglich und können eigenständig ausgetauscht und entleert werden. Die Maschine kann Schichtdicken von 20 bis 100  $\mu\text{m}$  fahren. [14]

### 3.3.1 Pulver- und Schutzgasförderung

**Pulverförderung:** (Abbildung 11) Für jede neue Schicht wird Pulver in die Prozesskammer zur Arbeitsfläche gefördert. Das Fördern kann über das Userinterface (CELOS) manuell oder während des Druckprozesses automatisch erfolgen. Um eine Förderung des Pulvers zu realisieren, muss im Haupttank genügend Pulver vorhanden sein. Der Füllstand im Haupttank wird mittels eines Sensors überwacht und über eine Prozentanzeige visualisiert. Das Pulver wird über eine Förderwelle und den Gasfluss durch ein Ultraschallsieb geleitet und gesiebt. Anschließend erfolgt der Transport durch einen Buffertank zu einer Loaderwelle, die das Pulver zu einer Querförderwelle weiterleitet. In dieser wird das Pulver so gefördert, dass ein Pulverlift das Pulver in die Prozesskammer transportiert und es automatisch gleichmäßig über die Bauraumtiefe verteilt ist. Damit eine optimale Menge an Pulver in den Bauraum gelangt, ist hinter der Querförderwelle noch eine Dosierwelle mit Kammern geschaltet, die pro Kammer die erforderliche Menge an Pulver aufnimmt. Der Beschichter verteilt das Pulver, indem er zur gegenüberliegenden Seite des Bauraumes fährt und dann zurückkehrt. Überschüssiges Pulver wird auf dem Rückweg von dem Beschichter hinter dem Pulverlift in einen Pulverüberlauf geführt, der direkt mit der Pulverhauptkammer verbunden ist. [12]

Unter dem Ultraschallsieb befindet sich ein Behälter für das ausgesiebte Überkornpulver, dessen Füllstand von einem Sensor überwacht wird. Der Behälter kann bei Bedarf entfernt und entleert werden, wodurch es möglich ist, das Pulver zu recyceln. [12]

Im gesamten System sind Sensoren angebracht, um Füllstände an kritischen Stellen, wie in der Hauptkammer, vor dem Ultraschallsieb und im Buffertank mit oberem und unterem Sensor, anzuzeigen und gegebenenfalls zu benachrichtigen, wenn zu viel oder zu wenig Pulver sich an einer Stelle befindet. Mit einem blau ausgefüllten Kreis wird symbolisiert, dass Pulver erkannt wird. [12]

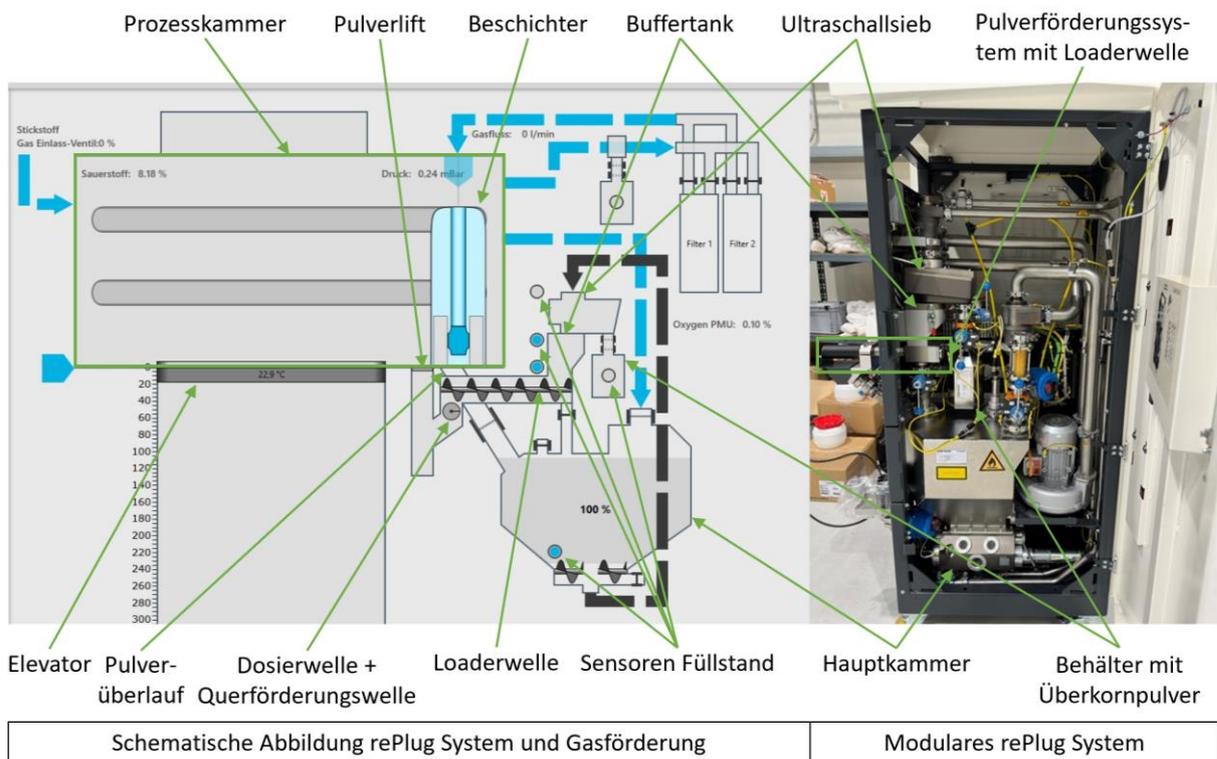


Abbildung 11: Förderungen des Metallpulvers im rePlug-System zum Prozessraum

Allgemein sind viele Materialien wie verschiedene Stahlsorten, Aluminiumlegierung, Kobalt-Chrom-Materialien, Inconel-Materialien und Titan möglich. [14]

Die Materialien befinden sich in modularen Systemen, das sogenannte rePlug-System, und können wahlweise getauscht und angeschlossen werden. Durch die Materialvielfalt muss die Maschine vor jedem Materialwechsel gründlich gesäubert werden und Pulver, welches sich noch in den Systemkomponenten wie Pulverförderung und Filtersysteme befindet, muss entleert und getauscht werden. Wenn ein Wechsel auf einen edleren Werkstoff ansteht wäre es fatal, wenn in einem Produkt für die Medizintechnik Spuren eines zu unedlen Werkstoffes zu finden sind und damit Qualifikationen nicht eingehalten werden können.

**Schutzgasförderung:** (Abbildung 12) Die Gasförderung verläuft in der Prozesskammer entgegen der Beschichtungsrichtung, um zu verhindern, dass der Laserstrahl durch seinen eigenen Schmauch beeinträchtigt wird. Durch die nötige Flutung des Bauraums ist mit einem Mindestverbrauch pro Baujob von 1000 Litern zu kalkulieren, weiter werden 150 l/h verbraucht. [12]

Zum Fluten der Prozesskammer kann in der Software-Oberfläche ein Schalter angewählt werden, um die Ventile zu öffnen. Das Gas, hier Stickstoff, wird seitlich im oberen und unteren Bereich in die Prozesskammer eingespeist. Dabei kann über eine Prozentanzeige der Sauerstoffgehalt kontrolliert werden. Der Druck steigt bei der Gaseinspeisung in der Prozesskammer auf 20 mbar über den Luftdruck. [12]

Bei einem Sauerstoffwert  $\leq 2\%$  wird ein Gasfluss aus dem Filtersystem 1 und 2 mit 200 l/min dazugeschaltet, bis der Sauerstoffgehalt auf den eingestellten Zielwert fällt. In diesem Moment wird das Ventil der Gaseinspeisung geschlossen und das Gas aus Filtersystem 1 und 2 wird auf den Zielwert gefördert, hier 1000 l/h. [12]

Im Betrieb wird das Gas kontinuierlich in die Filter 1 oder 2 durch einen Zyklonabscheider geführt. Der Zyklonabscheider ist nötig, um das mitgeführte Pulver und den Schmutz im Gas herauszufiltern. Das Gas, welches zurückgeführt wird, kann im laufenden Prozess wiederverwendet werden. Das herausgefilterte Pulver kann abgefüllt und zur neuen Aufbereitung zurückgeschickt werden. Im laufenden Baujob wird jeweils ein Filter verwendet. Alle zwei Stunden erfolgt im Bauprozess ein Wechsel zwischen Filter 1 und Filter 2. Der nicht verwendete Filter wird in der Zwischenzeit gereinigt. [12]

Über einen Motor im rePlug-System wird das Pulver in den Buffertank gefördert. Dabei erfolgt eine Überprüfung des Sauerstoffgehaltes im Förderstrom zum Buffertank. Das rePlug-System ist beim Tausch nicht komplett vom Sauerstoff abgeschnitten, weswegen im Pulver-System Sauerstoff vorhanden sein kann. [12]

Nach Abschluss des Baujobs kann der Bauraum, ohne die Prozesstür zu öffnen, manuell abgesaugt und das Pulver in die Hauptkammer zurückgeführt werden.

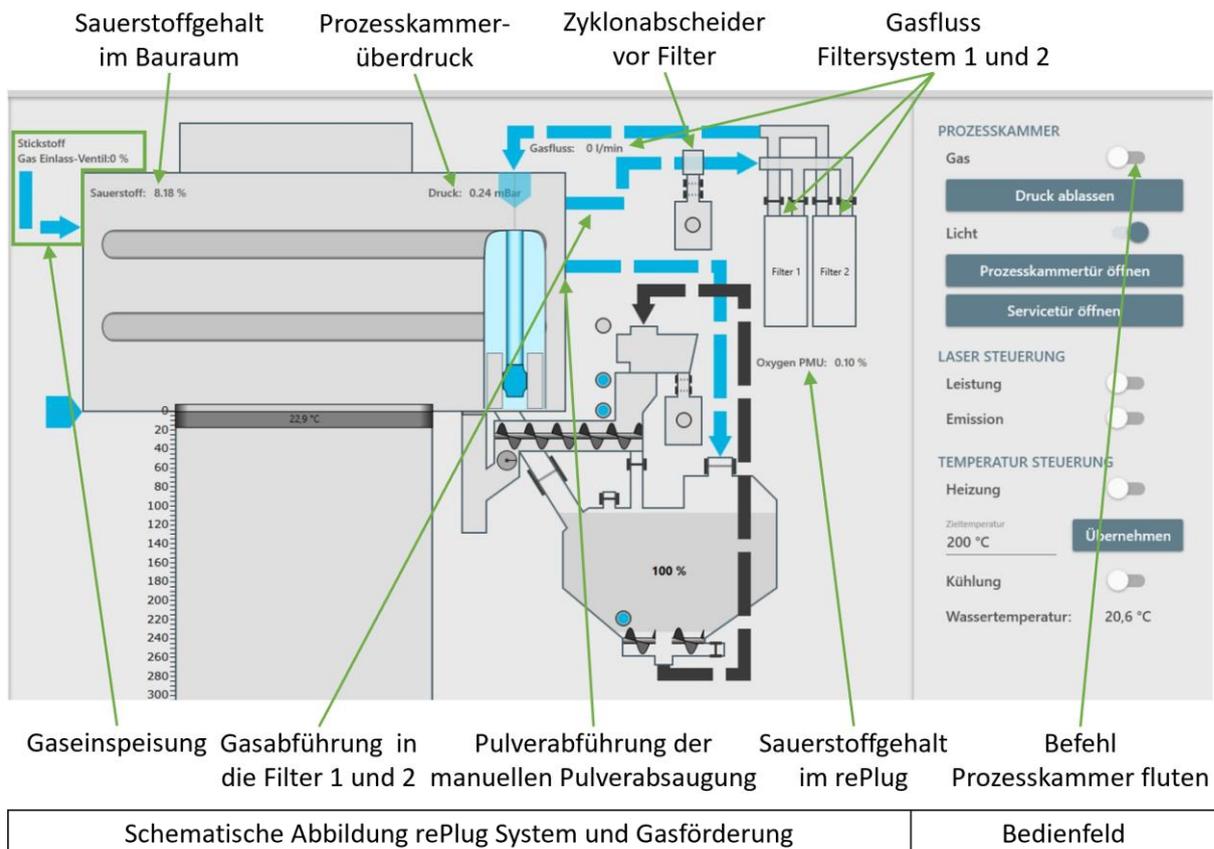


Abbildung 12: Schematische Förderungen des Schutzgases

Für die Anlage steht als Standard-Schutzgas Stickstoff zur Verfügung. Wahlweise kann auf Argon umgeschaltet werden, jedoch ist Stickstoff preiswerter als Argon und für die Verwendung mit 1.2709 und 1.4404 ausreichend, da diese Materialien im Gegensatz zu Titan nicht mit Stickstoff reagieren.

### 3.3.2 Laser und Belichtungsstrategie

Die Maschine hat zwei 600 W Faserlaser mit einem Fokusdurchmesser zwischen 70 und 200  $\mu\text{m}$  und kann durch einen Linearschlitten variabel eingestellt werden. [12] Der Bauraum kann bei Verwendung von beiden Lasern auf diese aufgeteilt und parallel gearbeitet werden. Dabei ist es softwaretechnisch nicht möglich, eine Komponente auf zwei Laser aufzuteilen, weder in den einzelnen Schichten noch in der Ebene.

Die Lasertec 30 dual SLM verwendet ein im Winkel versetztes Streifenmuster als Belichtungsstrategie. Der Winkelversatz beträgt pro Schicht  $63,5^\circ$ . Der Laser fährt die Bahnen entlang der x-Achse ab und überspringt dabei keinen Streifen. Je Streifen verfährt der Laser in Richtung der Belichtungsrichtung, die pro Schicht gleich und im Winkelversatz zur x-Achse ist, siehe Abbildung 13. Der Laser verfährt, gesehen von der y-Achse, zum positiven Bereich und fährt für den folgenden Streifen an die gleiche Seite zurück, ohne zu belichten. Weiter wird pro Schicht die Schraffur zusätzlich zum Verdrehen verschoben, um zu verhindern, dass Streifen direkt übereinander liegen. Sobald die Schraffur einer Schicht vollständig belichtet wurde, wird die Kontur des Bauteils belichtet und die nächste Schicht, nach Pulverförderung, belichtet. [12]

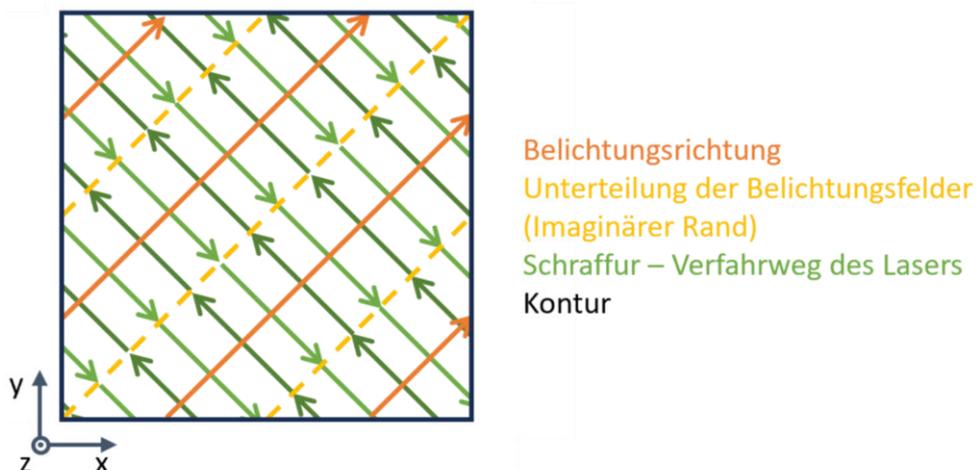


Abbildung 13: Verwendete Belichtungsstrategie der Lasertec 30 dual SLM: Streifenmuster

Belichtungsstrategien wie Schachbrettmuster sind theoretisch umsetzbar, jedoch werden Grundparametersätze dafür benötigt, die von DMG MORI nicht weiter unterstützt werden.

### 3.3.3 Besonderheiten

Diese Anlage verfügt über ein Dual-Laser-System, durch welches 80 % mehr Produktivität zur Verfügung steht. Die Anlage kann wahlweise mit einem oder zwei Lasern betrieben werden. Beide Laser können einzeln arbeiten und dabei den kompletten Bereich der 300 x 300 mm Bauplatte belichten. [14]

Die Pulversysteme sind modular austauschbar. Bei Nichtbenutzung eines Moduls kann die entstehende Feuchtigkeit im Pulver durch ein zusätzlich installiertes System minimiert werden. Dieses System wird mit der Hauptkammer verbunden, wodurch die Feuchtigkeit in einen Behälter geleitet wird, der mit Trockenperlen gefüllt ist. Diese Perlen absorbieren die Feuchtigkeit aus dem Pulvertank, siehe Abbildung 14. Gelbe Perlen symbolisieren ein trockenes Granulat, während weiße Perlen ein feuchtes Granulat repräsentieren. Durch eine Trocknung in einem handelsüblichen Backofen kann das Granulat getrocknet und erneut eingesetzt werden. Durch ein Ventil kann die Einheit manuell geöffnet und geschlossen werden.



Abbildung 14: Trockenperlen der SLM-Maschine

## 4. Vorbereitung der Proben

Um die Aussagen über die mechanischen Eigenschaften des Materials mit den verwendeten Schweißparametern, wie sie auch im Unternehmen eingesetzt werden, treffen zu können, sollen Zug-, Kerbschlagbiege- und Druckproben nach Norm gefertigt werden und am IWS geprüft werden.

Die Proben werden aus dem Material 1.4404 hergestellt und für die verschiedenen Verfahren wird das Material in verschiedenen Varianten bereitgestellt. Für das LENS-Verfahren wird Pulver bereitgestellt. Um diese Werte an einem Referenzwert messen und vergleichen zu können, werden aus Flach- und Zylinderstahl entsprechende Proben gefertigt.

Vergleichend dazu werden im LBM-Verfahren Proben aus einem Pulvermaterial hergestellt, um diese zwischen handelsüblichem gewalztem Stahl und dem LENS-Verfahren einzuordnen.

Die Probenanzahl der jeweiligen Verfahren ist laut Norm auf drei Proben empfohlen. [5] Die Probenanzahl muss dabei ausreichend sein, dass Werte, die unverhältnismäßig sind, eingeordnet werden können. Die Norm liefert dazu Mindestwerte für das Material 1.4404. Die zu prüfenden Proben sollten dabei einen ähnlichen Wert annehmen, wie für das Material 1.4404 definiert ist.

Die Thematik Schichtverbundheit und Qualität (Porenanzahl im Verhältnis zur Fläche) hat ebenso einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Materialdichtheit. Die Verkäufer der LENS-Maschine versichern eine 99,0 % Dichtigkeit des Materials. Diese gilt es mit entsprechenden Parametern für das LENS-Verfahren durch Schliffbilder zu prüfen.

Um einen Überblick über die Einflüsse der verschiedenen Parameter zu bekommen, werden die wichtigsten Parameter Pulvermenge, Laserleistung und Layerhöhe in zwei Bereichen getestet werden, in welchen in der Vergangenheit allgemein ausreichende Ergebnisse erzielt wurden.

Die Laserleistung soll dabei in den Einstellungen 1400 W und 1600 W, die Layerhöhe in den Einstellungen 1,0 mm und 1,2 mm und die Pulvermenge in den Einstellungen 10 g/min und 12 g/min getestet werden.

### 4.1 Versuchsplanung

Die Versuchsplanung wird auf der Basis eines Design of Experiments (DoE) erstellt. Es wurde zwischen einem vollfaktoriellen Versuchsplan mit acht Versuchen und einem  $L_4$ -Versuchsplan nach Taguchi mit vier Versuchen entschieden.

Die Versuche mit der LENS-Maschine befinden sich derzeit in der Anfangsphase. Mit dem  $L_4$ -Versuchsplan kann ein Überblick über die Einflussfaktoren in Verbindung mit anderen Faktoren bei einer minimalen Anzahl von Versuchen erreicht werden. Durch die reduzierte

Anzahl an Versuchen werden Ressourcen gespart, und die Ergebnisse können schneller interpretiert werden.

Nach der Taguchi-Vorlage, Abbildung 15, kann ein Versuchsplan für die verschiedenen Parameter für das LENS-Verfahren erstellt werden. Dabei bilden die Pulvermenge, die Laserleistung und die Layerhöhe die Faktoren in den Spalten und die Einstellungen die Stufen.

$L_4(2^3)$

Orthogonales Feld  $L_4$

Exp. Nr.	Spalten-Nr.		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Abbildung 15: Vorlage L4-Versuchsplan nach Taguchi [35]

Für eine Aufstellung eines Versuchsplans werden die Stufen, wie in Tabelle 1 zu sehen, belegt.

Stufe	Pulvermenge	Laserleistung	Layerhöhe
1	12 g/min	1600 W	1,2 mm
2	10 g/min	1400 W	1,0 mm

Tabelle 1: Definition der Stufen 1 und 2 für den Versuchsplan nach Taguchi

Aus der Vorlage und der Stufendefinition ergibt sich ein Versuchsplan nach Tabelle 2 mit vier Experimentnummern.

Experimentnummer	Pulvermenge	Laserleistung	Layerhöhe
1	12 g/min	1600 W	1,2 mm
2	12 g/min	1400 W	1,0 mm
3	10 g/min	1600 W	1,0 mm
4	10 g/min	1400 W	1,2 mm

Tabelle 2: Vollständiger Versuchsplan nach Taguchi mit eingesetzten Parametern

#### 4.1.1 Prüfung der Proben

Durch verschiedene Werkstoffversuche können unterschiedliche mechanische Eigenschaften ermittelt werden.

Im Zugversuch können die wichtigen Festigkeitskennwerte wie die Zugfestigkeit  $R_m$  und die Dehngrenze  $R_{p0,2}$  eines Materials ermittelt werden. Außerdem kann aus dem Versuch der Zähigkeitswert, Bruchdehnung  $A$ , ermittelt werden.

Die Zugfestigkeit  $R_m$  gibt Auskunft über die maximale mechanische Zugspannung. Nach Erreichen dieses Wertes können keine weiteren Kräfte aufgenommen werden und das Material versagt und reißt.

Die Dehngrenze  $R_{p0,2}$  beschreibt eine Spannung, die bei einer plastischen Dehnung von 0,2 % entsteht. Die Dehngrenze wird parallel zur elastischen Dehnung angesetzt, da austenitische Metalle keine ausgeprägte Streckgrenze aufweisen, an der die höchste elastische Spannung gemessen werden kann.

Die Bruchdehnung  $A$  wird gemessen, wenn die Probe das Ende der plastischen Dehnung erreicht und gerissen ist. Sie gibt Auskunft über die plastische Verformungsfähigkeit des Werkstoffes bis zum Bruch.

Im Kerbschlagbiegeversuch wird die Kerbschlagarbeit  $KU$  ermittelt, welche ein Maß für eine schlagartige Beanspruchung ist und damit die Widerstandsfähigkeit des Werkstoffes beschreibt. Die Kerbschlagzähigkeit bezieht sich auf die Querschnittsfläche der zu prüfenden Fläche der Probe und bietet einen besseren Vergleich der Proben, wenn diese nicht identisch sind.

Der Druckversuch ist das Gegenteil des Zugversuchs. Hier werden Festigkeitswerte und Verformungswerte unter Druck anstatt Zug ermittelt. Somit können das Einspritzen des Kunststoffes auf die Schweißstruktur und der dabei entstehende Druck bedingt simuliert werden.

Die Schliiffbilder können Aussagen über die Schichtanbindungen über die Dicke und über die Qualität der Porenanzahl über die Fläche geben. Weiterhin können Risse und Verschmutzungen im Material gesehen werden. Für geschweißte dreidimensionale Komponenten sollten pro Parameter Schliiffbilder in drei verschiedenen Ebenen erstellt werden, um die Verbundheit der Schichten in den verschiedenen Ebenen klar charakterisieren zu können.

#### 4.1.2 Grenz- und Zielwerte

Nach der Norm DIN EN 10088-1 hat das Material 1.4404 oder X2CrNiMo17-12-2 folgende Materialzusammensetzung, siehe Tabelle 3.

Massenanteile in % des Materials 1.4404 - X2CrNiMo17-12-2								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
0,030	1,00	2,00	0,045	0,015 - 0,030	16,5 - 18,5	2,00 - 3,0	10,0 - 13,0	0,1

Tabelle 3: Materialzusammensetzung von 1.4404 nach Norm DIN EN 10088-1 Nichtrostende Stähle [4]

In Tabelle 4 sind nach der Norm DIN EN 10088-2 für 1.4404 die mechanischen Eigenschaften zusammengefasst.

Mechanische Kennwerte des Materials 1.4404 - X2CrNiMo17-12-2, warmgewalzte Bleche				
Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung A [%]	Kerbschlagarbeit (ISO-V) KV <sub>2</sub> [J]	
quer	-	quer	längs	quer
min. 220	520 - 670	45	100	60

Tabelle 4: Mechanische Kennwerte von 1.4404 nach Norm DIN EN 10088-2 Nichtrostende Stähle [5]

1.4404 ist ein austenitischer, korrosionsbeständiger Stahl mit guten Schweißeigenschaften und einer guten Zerspanbarkeit. [5] [40]

Die Werte nach Tabelle 4 dienen als Grenzwerte für die Bewertung der mechanischen Eigenschaften. Die Proben werden im Unternehmen PWF – Dose hergestellt und nach Norm bearbeitet. Die Ergebnisse der Proben aus dem warmgewalzten Stahl dienen als Referenzwerte, da nicht alle nötigen Werkzeuge vorhanden sind, um beispielsweise eine V-Kerbe für die Kerbschlagbiegeproben herzustellen.

Im Zugversuch soll geprüft werden, ob die Materialeigenschaften von Dehngrenze (220 N/mm<sup>2</sup>), Zugfestigkeit (mind. 520 N/mm<sup>2</sup>) und Bruchdehnung (mind. 45 %) erreicht werden können. Die Ergebnisse sind für die verschiedenen Anwendungen von Bedeutung, aber vor allem für die Herstellung von Impellern. Impeller sind hochbeanspruchte Komponenten, da sie sowohl hohen Zentrifugalkräften als auch Axialkräften ausgesetzt sind. Obwohl der Zugversuch nicht alle Kräfte, die auf einen Impeller wirken, vollständig darstellen kann, bietet er eine nützliche Grundlage für den Vergleich und die Einordnung der Materialwerte.

Die Werte des Kerbschlagbiegeversuchs sind für eine mögliche Verwendung von sicherheitsrelevanten Bauteilen im Flug- und Automobilbereich entscheidend. Der zu erreichende Wert der Kerbschlagzähigkeit liegt dabei auf einer Höhe von 1,25 J/mm<sup>2</sup>.

Bei dem Druckversuch soll geprüft werden, wie standhaft das Material gegen wirkende Druckkräfte ist. Ein Mindestdruck von 400 bar, der dem Einspritzdruck beim Spritzgießen entspricht, ist dabei Voraussetzung. Je nach Kunststoffmaterial kann der Einspritzdruck bis zu 1500 bar betragen. [47] Ein Versagen der Proben wird darin festgehalten, sobald Risse im Material, Abplatzungen der Materialoberfläche oder das Zerschneiden der Proben auftreten. Der Test wird bis zu einem Druck von 330 kN durchgeführt.

Mit den Schlibbildern werden die Schichtenbindungsqualität und die Materialdichtigkeit geprüft, indem ein Porenverhältnis über die sichtbare Fläche erstellt wird. Die Verkäufer versprechen eine Dichtigkeit von mindestens 99,0 %. Dies ist damit der Grenzwert, der überprüft werden soll.

## 4.2 Versuchsdurchgänge

Für eine Einordnung der Ergebnisse der Proben wird jede Probenart dreimal hergestellt.

- Zugproben:
  - 12 Zugproben erstellt mit dem LENS-Verfahren
  - 3 Zugproben erstellt mit dem LBM-Verfahren
  - 3 Zugproben hergestellt aus gewalztem Stahl
- Kerbschlagbiegeproben
  - 12 Kerbschlagbiegeproben erstellt mit dem LENS-Verfahren
  - 3 Kerbschlagbiegeproben erstellt mit dem LBM-Verfahren
  - 3 Kerbschlagbiegeproben hergestellt aus gewalztem Stahl
- Druckproben
  - 12 Druckproben erstellt mit dem LENS-Verfahren
  - 3 Druckproben erstellt mit dem LBM-Verfahren
  - 3 Druckproben hergestellt aus gewalztem Stahl
- Schliffbilder
  - 12 Schliffbilderproben für 4 Schliffbilder (3 Proben pro Parametereinstellung) erstellt mit dem LENS-Verfahren

Insgesamt ergeben sich daraus 66 einzelne Proben. 48 Proben für das LENS-Verfahren, neun Proben für das LBM-Verfahren und neun Proben aus gewalztem Stahl.

Die Proben aus dem LENS- und LBM-Verfahren werden auf 300 x 300 mm Platten gefertigt. Es handelt sich dabei um Substratplatten der SLM-Maschine.

### 4.2.1 Probenbenennung

Um die Proben kategorisieren zu können, werden die Proben nach Abbildung 16 gekennzeichnet. Der erste Buchstabe definiert die Maschine beziehungsweise den gewalzten Stahl (D, S, W). Der nächste Buchstabe kennzeichnet die Prüfung und damit die Probenform (Z, K, D, S). Die erste Zahl kennzeichnet die Nummer der Probe (1 - 3) und bündelt die Proben einer Substratplatte. Alle Nummern eines Verfahrens werden auf einer Substratplatte gedruckt, ausgenommen die Proben des gewalzten Stahls. Die Zahlen 1 - 3 stehen für die

Herstellungsreihenfolge beim Fräsen. Die letzten drei Zahlenkombinationen (111, 122, 212, 221) stehen für die Parameterzusammensetzung nach Taguchi. Die Proben aus dem LBM-Verfahren und die aus gewalztem Stahl werden mit einem X gekennzeichnet, da keine Parameter bei der Herstellung verändert werden.

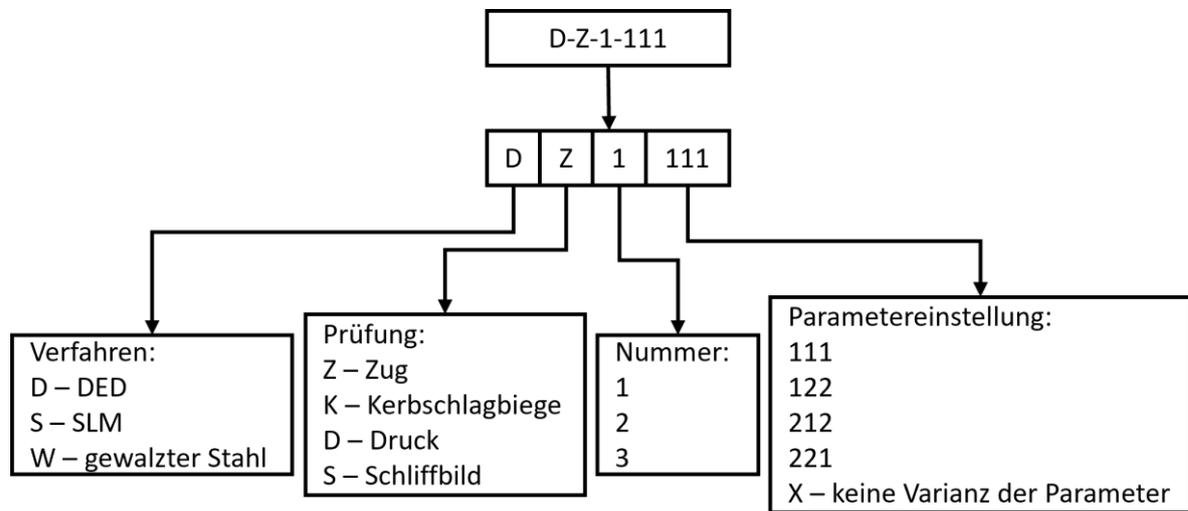


Abbildung 16: Benennungssystem der Proben am Beispiel D-Z-1-111

Die verschiedenen Definitionen von Verfahren, Prüfung, Nummer und Parametereinstellung werden mit Bindestrichen zusammengesetzt und ergeben den Namen der Probe, siehe Tabelle 5. Dadurch entstehen 66 individuelle Namen.

In Tabelle 5 sind diese in einem Ausschnitt aufgeführt (vgl. Anhang A). Die Zeilen Probenzahl dienen der Möglichkeit zum Durchzählen der Proben und haben weiter keine Bedeutung für die Prüfung.

Lasertec 125 DED hybrid		Lasertec 30 dual SLM		gewalzter Stahl	
Probenzahl	Versuchsnummer	Probenzahl	Versuchsnummer	Probenzahl	Versuchsnummer
1	D-Z-1-111	49	S-Z-1-X	58	W-Z-1-X
2	D-Z-2-111	50	S-Z-2-X	59	W-Z-2-X
3	D-Z-3-111	51	S-Z-3-X	60	W-Z-3-X
4	D-K-1-111	52	S-K-1-X	61	W-K-1-X
5	D-K-2-111	53	S-K-2-X	62	W-K-2-X
6	D-K-3-111	54	S-K-3-X	63	W-K-3-X
7	D-D-1-111	55	S-D-1-X	64	W-D-1-X
8	D-D-2-111	56	S-D-2-X	65	W-D-2-X
9	D-D-3-111	57	S-D-3-X	66	W-D-3-X
10	D-S-1-111				
11	D-S-2-111				
12	D-S-3-111				
13-24	... -122				
25-36	... -212				
37-48	... -221				

Tabelle 5: Ausschnitt der Probenbenennung mit Bündelung in ihre jeweiligen Verfahren bzw. gewalzter Stahl

Die Anordnung der Proben auf der Substratplatte wird dabei im LENS-Verfahren, wie in Abbildung 17 zu sehen, gestaltet.

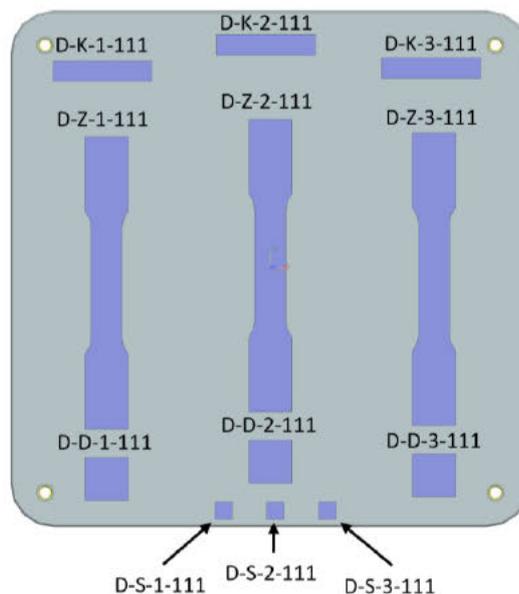


Abbildung 17: Anordnung der Proben auf der Substratplatte mit Benennung des ersten Parametersatzes

Dabei sind die verschiedenen Proben mit den gleichen Parametern untereinander angeordnet, abgesehen von den Schlibfbildproben. Diese sind aus Platzgründen am unteren Rand platziert.

Die Proben auf der Substratplatte für das LBM-Verfahren haben eine vergleichbare Anordnung, siehe Abbildung 18.

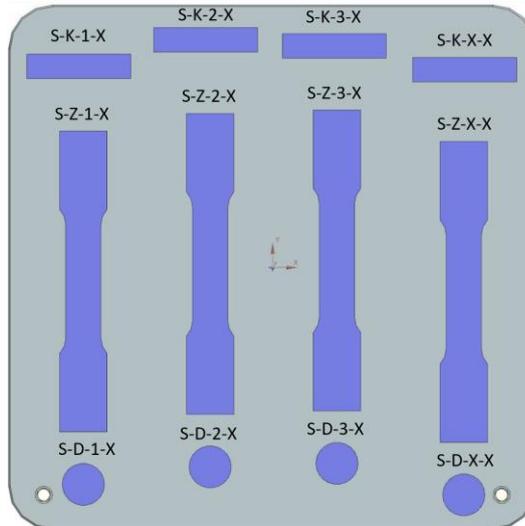


Abbildung 18: Substratplatte mit der Anordnung der Proben im LBM-Verfahren, Proben von links nach rechts nummeriert, inklusive einer Reserve markiert mit X

Für das LBM-Verfahren sind für jede Form drei Proben erforderlich. Um den Bauraum besser auszunutzen und eine mögliche Reserve bereitstellen zu können, wird jeweils eine Probe mehr als nötig belichtet.

#### 4.2.2 Probenherstellungsplan

Die Proben können durch die verschiedenen Verfahren teilweise parallel hergestellt werden. Für die 66 Proben ergibt sich ein Herstellungsplan, Ausschnitt in Abbildung 19 (vgl. Anhang B), der in die drei Bereiche DED-Maschine, SLM-Maschine und gewalzter Stahl unterteilt werden kann.

Arbeiten bei der PWF - Doose GmbH							Arbeitstag in Stunden: 8h		1. Tag	
Komponente	Aufgabe	Menge	Zeit pro Stück hh:mm:ss	Rüstzeit hh:mm:ss	Gesamtzeit hh:mm:ss	Anmerkung	1	2		
DED Substratplatte	Auftragschweißen	4	02:30:00	00:30:00	12:00:00	Pulver entfernen, Umbauen				
DED Substratplatte	Fräsen	4	02:30:00	00:30:00	12:00:00	Umbauen, Beschriften				
DED Druckprobe	Drehen	12	00:05:00		01:00:00	je 3 pro Substratplatte				
SLM Substratplatte	Belichten	1	15:20:00	02:00:00	17:20:00	2 h: Pulver absaugen				
SLM Substratplatte	Fräsen	1	02:30:00		02:30:00					
SLM Druckprobe	Drehen	4	00:05:00		00:20:00					
gewalzter Stahl Zugprobe	Fräsen	4	00:15:00		01:00:00	1 Reserve				
gewalzter Stahl Kerbschlagbiegeprobe	Fräsen	4	00:20:00	00:30:00	03:20:00	1 Reserve, 2 verschiedene Aufspannungen nötig				
gewalzter Stahl Druckprobe	Drehen	4	00:05:00		00:20:00	1 Reserve				
Additive Proben, gewalzter Stahl	Schleifen	43	00:06:00		04:18:00	Zugproben: 12 DED, 4 SLM, 4 gewalzt Druckproben: 12 DED, 4 SLM, 4 gewalzt (je 3 Proben zusammen bearbeitbar) Kerbschlagbiegeproben: 12 DED, 4 SLM				
Zwischenzeiten bei der PWF - Doose GmbH			23:46:00	03:30:00	54:08:00					

Abbildung 19: Ausschnitt des Herstellungsplans

Für die Bearbeitung stehen neben der DED- und SLM-Maschine je eine CNC-Fräsmaschine, eine Drehmaschine und eine Flachsleifmaschine zur Verfügung. Die Zeit pro Stück basiert auf Simulationswerten in Zusammenhang mit Erfahrungswerten. Geringe Umrüstzeiten sind in der Zeit pro Stück enthalten, längere Umrüstzeiten sind zusätzlich mit aufgeführt und gehen in die Gesamtzeit pro Komponente mit ein.

Die DED-Maschine erfordert eine regelmäßige Prozesskontrolle, da sich Schweißrückstände in der Düse festsetzen können. Zudem besteht die Möglichkeit, dass der Aufbau des Schweißguts zu nah an die Schweißdüse gelangt und diese festschweißt.

Die Herstellung der Proben auf einer Substratplatte dauert 2,5 Stunden. Zusätzlich wird eine halbe Stunde für das Säubern der Platte vom Pulver und das Umrüsten der Substratplatte eingeplant. Somit können an einem Arbeitstag zwei Parametersätze auf jeweils einer Substratplatte hergestellt werden. Die Proben aus dem LENS-Verfahren können anschließend auf der Substratplatte gefräst und mit einem Scheibenfräser abgetrennt werden. Der spanende Prozess benötigt pro Parametersatz weitere 2,5 Stunden.

Die SLM-Maschine kann nach Einrichten und Starten ohne Beaufsichtigung die nötigen 15 Stunden und 20 Minuten über Nacht betrieben werden. Sobald der Baujob beendet ist, muss das Pulver abgesaugt und der Bauraum sowie die Platte von dem Pulver entfernt werden. Nach spanender Bearbeitung der Platte, die eine gleiche Laufzeit von 2,5 Stunden hat, können die Druckproben nach Maß gedreht werden.

Die Zug- und Kerbschlagbiegeproben aus gewalztem Stahl können auf der Fräsmaschine hintereinander spanend bearbeitet werden. Eine Zugprobe benötigt dabei 15 Minuten zur Herstellung mit zwei verschiedenen Spannungen. Die Kerbschlagbiegeprobe benötigt 20 Minuten mit zwei Einspannungen und kann vollständig auf der Fräsmaschine fertiggestellt werden.

Die Druckproben werden auf einer Drehmaschine auf Maß gedreht und können alle mit der gleichen Spannaufnahme bearbeitet werden. Damit die Drehmaschine nicht für jeden Druckprobenparametersatz umgerüstet werden muss, werden die Druckproben parallel mit der Bearbeitung der SLM-Substratplatte angefangen.

Die zwölf Schlibfbildproben werden auf einer Seite markiert und nummeriert, damit die Ausrichtung nach dem Abtrennen nachvollziehbar ist. Im IWS werden die Proben weiterverarbeitet und aufbereitet.

Von den 72 Proben (66 Proben und 6 Reserveproben) werden 56 Proben auf Maß- und Formtoleranz geschliffen. Für das Material 1.4404 kann keine Magnetspannplatte verwendet werden, da dieses Material nicht magnetisch ist. Die Proben müssen, abgesehen von den Druckproben, einzeln in einen Spannstock aufgenommen werden. Für die Druckproben kann eine Vorrichtung für zylindrische Geometrien verwendet werden. Mit dieser ist es möglich, drei Proben gleichzeitig aufzunehmen.

Bei einer täglichen Arbeitszeit von 8 Stunden werden für die Herstellung der Proben 5 Tage benötigt. Würde hier keine parallele Bearbeitung der Proben stattfinden, müssten 54 Stunden für die gesamte Herstellung einberechnet werden, was 7 Tage entsprechen würde.

### 4.2.3 Prüfungsplan der Proben

Die Schliffbilder müssen in den verschiedenen Ebenen untersucht werden, um die Schichtanbindungsqualität und Dichte in allen Ebenen beurteilen zu können. Die Schliffbildproben werden mittig in den Ebenen getrennt und jeweils die drei Ebenen pro Parametersatz in ein Harzbett eingelassen, welches 6 Minuten aufgeheizt und 3 Minuten aushärten muss, bevor die Proben weiterbearbeitet werden können. Um die Dichte der Ebene analysieren zu können, muss das Harzbett mit den Proben poliert werden. Das Polieren und die anschließende Datenaufnahme dauern für einen Parametersatz 57 Minuten. Anschließend werden die Proben im Harzbett geätzt und die Schichtanbindung dokumentiert, wofür pro Parametersatz 32 Minuten benötigt werden. [39]

Der Zugversuch werden auf einer Galdabini Quasar 200 durchgeführt. Diese Materialprüfmaschine kann eine Kraft von 200 kN aufwenden. Nach Einrichten der Maschine können die Proben ohne weitere Vorbereitung über die Spannköpfe eingespannt und getestet werden.

Die Kerbschlagbiegeproben werden auf der Schlagprüfmaschine Galdabini Impact 450 mit einem Pendelhammer zerschlagen. Die Anlage ist für diese Probenart ausgelegt, sodass die Proben mit der Seite, auf der die U-Kerbe ist, gegen die Widerlager gedrückt und über die Länge der Probe mittig zwischen diesen durch einen seitlichen Anschlag ausgerichtet werden.

Die Druckproben werden auf einer Losenhausenwerk Zug- und Universalprüfmaschine geprüft, die einer Höchstbelastung von 35000 kg standhalten und eine maximale Kraft von 340 kN aufwenden kann. Die Proben müssen mittig auf den Tisch zwischen den Drucktellern ausgerichtet werden.

Der Zugversuch und der Druckversuch dauern inklusive Umrüstzeit pro Probe 5 Minuten. Die Umrüstzeit umfasst das Ausrichten, das Herausnehmen der Proben aus der Maschine und das Anlegen der Proben im System. Ein Kerbschlagbiegeversuch dauert inklusive Einlegen und Benennung der Probe im System 50 Sekunden.

Die Ergebnisse der Kennwerte der Proben werden digital übermittelt, wozu jede Probe eine Bezeichnung im System erhalten muss. Es ist möglich, alle Proben an einem Tag im IWS zu prüfen, vgl. Abbildung 20 und Anhang C. Die Schliffbilder können an einen weiteren Tag vorbereitet und analysiert werden.

Arbeiten im Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik						
Komponente	Aufgabe	Menge	Zeit pro Stück hh:mm:ss	Rüstzeit hh:mm:ss	Gesamtzeit hh:mm:ss	Arbeitsstag in Stunden: 8h
						1. Tag
						1 2
DED Schliffbild	Trennen	12	00:02:00	00:09:00	01:00:00	Teilen der Ebenen, Einfassen in ein Harzbett
DED Schliffbild	Polieren	4	00:12:00	00:45:00	03:48:00	Je 3 Proben in einem Harzbett und Werteaufnahme
DED Schliffbild	Ätzen	4	00:02:00	00:30:00	02:08:00	Je 3 Proben in einem Harzbett und Werteaufnahme
Zugprobe: gewalzter Stahl, DED, SLM	Prüfen	18	00:04:00	00:01:00	01:30:00	
Druckprobe: gewalzter Stahl, DED, SLM	Prüfen	18	00:04:00	00:01:00	01:30:00	
Kerbschlagbiegeprobe: gewalzter Stahl, DED, SLM	Prüfen	18	00:00:20	00:00:30	00:15:00	
Zwischenzeiten im Institut für Werkstoffkunde und			00:24:20	01:26:30	10:11:00	
Gesamtzeit von Herstellung und Prüfung der Proben			24:10:20	04:56:30	64:19:00	

Abbildung 20: Ausschnitt des Probenprüfplans

### 4.3 Vorbereitung der Daten zum Herstellen auf der DED- und SLM-Maschine

Um eine schnelle und kostengünstige Bearbeitung der Proben nach dem Druck zu gewährleisten, werden alle Proben auf den Substratplatten der SLM-Maschine hergestellt und auf diesen bis auf die Unterseite, die mit der Platte verbunden ist, vollständig gefräst. Dafür werden verschiedene Datensätze mit den Sollzuständen und mit dem Bearbeitungsaufmaß benötigt.

Die Datensätze der verschiedenen Verfahren werden so angepasst, dass die Proben auf den Platten an ähnlichen Positionen liegen. Dadurch kann ein Fräsprogramm zur spanenden Bearbeitung und zum Trennen der Proben von der Bauplatte für ein Verfahren erstellt werden. Für das andere Verfahren kann dieses Fräsprogramm als Vorlage verwendet werden, wobei noch Ergänzungen erforderlich sind.

Für ein nachträgliches Flachsleifen, um die Proben auf das Sollmaß zu bringen, sind keine weiteren 3D-Datensätze notwendig.

#### 4.3.1 CAD

Für die Proben werden über das CAD-System Siemens NX nach den Normen 3D-Datensätze und technische Zeichnungen (vgl. Anhang D - F) erstellt. Eine Umwandlung der 3D-Datensätze in ein anderes Format ist für die Herstellung der Proben mit der DED- und der SLM-Maschine nicht notwendig. Für die spanenden Prozessschritte ist eine Umwandlung der Daten in das Datenformat STEP notwendig. Diese STEP-Datei wird in Cimatron importiert, in welcher die notwendigen Fräsabläufe programmiert werden.

Für die Proben sind unterschiedliche Prozessschritte nötig, bevor die Daten an die jeweilige Maschine gesendet werden können. Je Probenart und Prozessschritt muss ein 3D-Modell mit den nötigen Maßen erstellt werden. Es müssen 3D-Modelle für die Proben mit den Fertigmaßen sowie mit Aufmaß erstellt werden. Die Daten müssen so vorbereitet sein, dass

eine Datei, im Falle der additiven Verfahren, den Aufbau mit den Sollmaßen der Proben enthält und eine andere Datei den Aufbau mit den Proben mit Aufmaß. Dadurch wird verständlich, wie die Sollteile aus den Aufmaßteilen gefertigt werden sollen. Die Proben, die aus dem gewalzten Stahl gefertigt werden, benötigen keine Modelle mit Aufmaß. In Cimatron wird ein Quader als Ist-Teil erstellt, der die Rohmaße des zugeschnittenen Materials hat, und das Fertigteil als Soll-Teil importiert.

Die additiven Proben sollen nach dem Herstellen spanend auf der Substratplatte bearbeitet werden. Durch Positionsungenauigkeiten und die geforderten Toleranzen werden die SLM-Proben mit einem Aufmaß von 2 mm in alle Richtungen beaufschlagt, außer die Seite, die mit der Substratplatte verbunden wird. Diese Seite erhält ein Aufmaß von 5 mm, um ausreichend Platz für den Scheibenfräser zu bieten und ein anschließendes Schleifen zu realisieren. Die DED-Proben erhalten ein Aufmaß von 1 mm zu jeder Seite sowie ein Aufmaß zur Verbindung zur Substratplatte von 5 mm, vgl. Anhang H-I.

#### 4.3.2 Vorbereitung der Daten für die Lasertec 125 DED hybrid Maschine

Siemens NX bietet für die Lasertec 125 DED hybrid eine zusätzliche additive Lizenz an, um den Schweißprozess im selben CAD-Programm wie die Proben zu realisieren.

Für das LENS-Verfahren in Kombination mit der DED-Maschine muss der komplette Aufbau alles beinhalten. Dazu gehören die aufzutragenden Geometrien (Proben mit Aufmaß), das Material, auf welches aufgetragen werden soll (Substratplatte), sowie der gesamte Spannaufbau, der in der Maschine verwendet werden soll (Distanztürme, Aufnahme und Adapterplatte), siehe Abbildung 21. Ein hoher Spannaufbau ist vorteilhaft, da die Wärme effizient abgeleitet wird, ohne in den Maschinentisch zu fließen. Falls eine Nachbearbeitung mit der Fräseinheit erforderlich ist, müssen Proben mit den Sollwerten eingefügt werden, um einen Soll-Ist-Vergleich durchzuführen und festzulegen, welche Kontur fräsend bearbeitet werden soll.

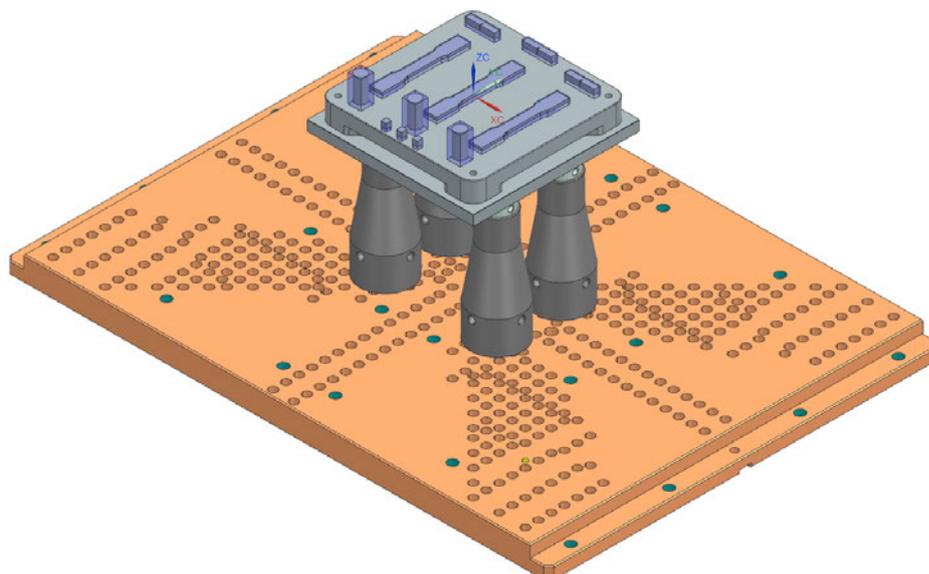


Abbildung 21: Aufbau des Schweißjobs der LENS-Proben mit Aufmaß (transparent) und Soll-Proben (opak)

Für die Probenform muss eine geeignete Operation gewählt werden. Die Proben haben einen planaren Aufbau und weisen symmetrische Eigenschaften auf. Für die Herstellung bieten sich die Operationen 1 und 2 an. Der einzige Unterschied zwischen den Operationen ist die Abfolge der Bewegungen. Operation 1 folgt einem Zick-Zack-Muster und Operation 2 fährt von innen nach außen die Außenkontur ab und vergrößert diese mit einem Offset. In Operation 1 wird jede zweite Schicht des Layers zusätzlich um 90° gedreht und der Startpunkt in jeder Schicht versetzt, wodurch isotrope Eigenschaften in X-Y-Ebene entstehen. Bei Operation 2 ist jede Schicht gleich der vorherigen. Durch die Vorteile der Operation 1, wird diese für die Proben gewählt.

Um alle Proben mit der gleichen Operation herzustellen, werden die Druckproben eckig aufgeschweißt und fräsend zu einer zylindrischen Geometrie bearbeitet.

### 4.3.3 Vorbereitung der Daten für die Lasertec 30 dual SLM Maschine

Für das LBM-Verfahren gibt es eine weitere Lizenz mit Werkzeugen, um die Vorbereitung in Siemens NX durchzuführen. Anders als bei der DED-Anwendung muss die Substratplatte nicht miteingefügt werden, da diese in der Vorlage zum Erstellen eines Druckauftrags vorhanden ist.

Mit Erstellung eines neuen Druckauftrages wird die Vorlage ausgewählt und die Komponenten, die gedruckt werden sollen, können durch Hineinziehen in die Arbeitsumgebung eingefügt und positioniert werden. Weitere Parameter wie Material mit Schichtdicke und Aufteilung, welcher Laser welche Bauteile belichten soll, können in Siemens NX mit eingestellt werden.

Nach Bereitstellen der Daten über Siemens NX kann der Baujob für die Maschine in die einzelnen Schichten geteilt und in ein Dateiformat umgewandelt werden, mit welchem die Maschine arbeiten kann. Im Maschinenprogramm CELOS können die einzelnen Schichten und die Belichtungsstrategie kontrolliert werden.

### 4.3.4 Siemens NX

Die PC-Software Siemens NX ist ein Produkt der Siemens Digital Industries Software und kommt von der Firma Unigraphics Solutions. Die erste Version kam im April 1978 heraus und wurde seitdem kontinuierlich weiterentwickelt. Im Juli 2002 wurde die Software unter dem Namen Unigraphics und der Version NX herausgebracht. Die kommenden Versionen laufen alle unter dem Softwarenamen NX mit verschiedenen Zahlen als Versionsnummer. [41]

Die Software NX ist eine lizenzbasierte Software. So können für verschiedene Anwendungen unterschiedliche Softwarepakete gekauft werden. Dabei werden Softwarelösungen für die Konstruktion, für die Simulation und für die Fertigung angeboten. Dadurch ist es möglich, für ein Produkt den kompletten Herstellungsverlauf, auch für additive Bauteile, mit einer Software zu betreuen.

Darüber hinaus bietet Siemens lizenzbasierte Werkzeuge für verschiedene Branchen sowie zusätzliche Software, wie PLM-Software, Simulationssoftware für Fertigungsplanung und

Elektrik- und Elektroniksysteme, an. Alle Softwarelösungen sind miteinander kombinierbar, um die Produktion und Wirtschaftlichkeit einer Firma zu optimieren. [51]

#### 4.3.5 CELOS

CELOS ist eine Software, die von der ADAMOS unterstützt wird. ADAMOS ist ein Zusammenschluss der Unternehmen DMG Mori, Zeiss, ASM, Engel, Dürr und Software AG. Die Firma ist im Oktober 2017 auf der Basis gegründet worden, dass ein herstellerneutrales System von verschiedenem Branchenwissen die Entwicklung von Apps, wie CELOS, vorantreiben soll. Dies wurde bis 2023 in Kooperation unter ADAMOS entwickelt. [1] [16]

CELOS ist eine App-basierte Benutzeroberfläche für die DMG MORI Maschinen. Es teilt sich in die Bereiche CELOS Xperience und Xchange. Xperience bieten an der Maschine eine Übersicht aller Möglichkeiten der Maschine. Über die Benutzeroberfläche können Prozesslaufzeiten, -parameter und -abläufe, Werkzeuge, Handbücher und weitere Anweisungen aufgerufen werden. Zudem ermöglicht die Software auch das manuelle Programmieren von Bauteilen. [15]

Xchange verbindet die Maschinen, synchronisiert Daten und soll eine vereinfachte Anbindung der Maschinen realisieren, in der weniger Verbindungen geschaffen werden müssen als bei einer Ansteuerung aller Maschinen einzeln. [15]

#### 4.3.6 Cimatron

Cimatron ist eine CAD-/CAM-Software, die speziell für den Werkzeugbau sowie Formenbau ausgelegt ist. Komponenten, die im CAD erstellt werden, können ohne eine Formatumwandlung in die CAM-Anwendung eingeladen und für eine spanende Bearbeitung programmiert werden. Zudem bietet die Software erweiterte Werkzeuge zur Erstellung von Elektroden für das Senkerodieren, welche häufig im Werkzeug- und Formenbau zur Herstellung von Kontureinsätzen eingesetzt wird.

Die Software kann in verschiedenen Lizenzierungen gekauft werden. Dabei kann die Vollversion oder die CAD- oder CAM-Anwendung erworben werden. [3]

### 4.4 Ausrichtung und Form der Proben

Nach Norm können unterschiedliche Probenformen verwendet werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Ausschlaggebend sind dafür die zur Verfügung stehenden Prüfmaschinen und die Geometrie des zu prüfenden Materials. Weiter können die Proben je nach Verfahren verschieden auf der Substratplatte ausgerichtet werden, jedoch soll der Aufbau bei den additiven Verfahren gleich sein. Es wird sich an den Möglichkeiten des LENS-Verfahrens orientiert.

Die CAD-Daten der Proben zur Prüfung sind auf Basis der aktuellen Normen konstruiert und die Zeichnungen für die Fertigung entsprechend bemaßt.

#### 4.4.1 Ausrichtung der Proben

Die Zug- und Kerbschlagbiegeproben werden liegend auf der Substratplatte hergestellt. Platzeffizienter wäre es, alle Proben stehend auszurichten, wodurch mehr Proben auf einer Substratplatte erstellt werden könnten. Allerdings wäre die Nachbearbeitung dann deutlich aufwendiger, da die Proben erst von der Substratplatte entfernt und dann bearbeitet werden müssten. Jede Probe müsste einzeln nacheinander bearbeitet werden. Zudem würde sich die Nacharbeit allgemein verkomplizieren, da die Proben in mehreren Einspannungen bearbeitet werden müssten, um alle Seiten bearbeiten zu können.

Die Zugproben haben eine Länge von 168 mm. Eine solche Länge wurde mit einer Ausrichtung zur Z-Richtung noch nicht erfolgreich auf der LENS-Maschine geschweißt, was ein weiterer Grund ist, die Proben liegend zu drucken.

Die Druckproben werden in stehender Lage erstellt, da zylindrische Geometrien allgemein mit der Achse in Z-Richtung zur Substratplatte ausgerichtet werden sollten. Bei einem liegenden Zylinder kommt es zu Treppenstufen mit einer unsaubereren Oberfläche. Durch das Teilen der Schichten waagrecht zur Achse kann ein Treppenversatz verhindert werden und eine saubere Geometrie entstehen, vgl. Abbildung 22.

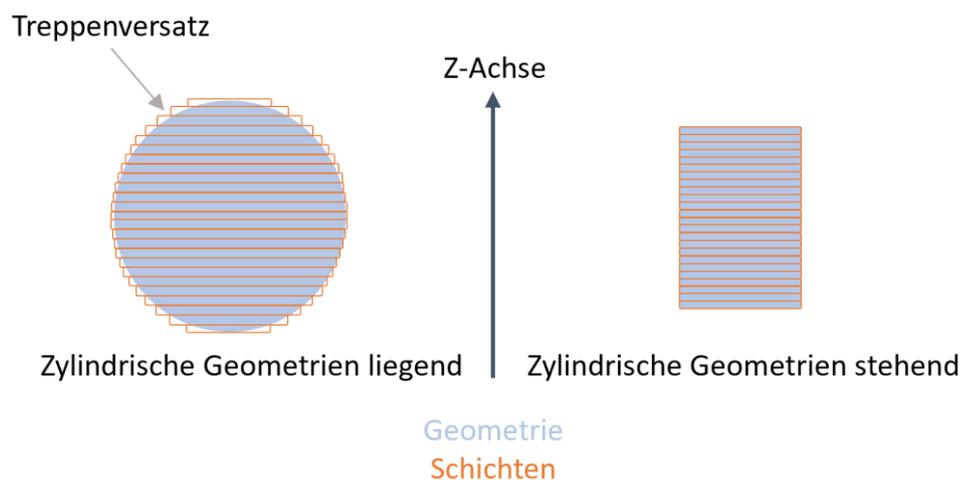


Abbildung 22: Beispiel Treppenversatz bei zylindrischen Geometrien in den verschiedenen Ausrichtungen

Innerhalb der X-Y-Ebene verbinden sich die Schichten gleichmäßiger durch die einzelnen Bahnen der Schraffur, die die nebenliegende Bahn mit aufschmelzen. Durch die Verdrehung der Bahnen in jeder Schicht weisen die Proben in der X-Y-Richtung einen isotroperen Aufbau auf als in der X-Z- bzw. der Y-Z-Richtung. Die untere Schicht wird ebenfalls mit aufgeschmolzen, weist aber eine geringere Festigkeit durch das lokale Aufschmelzen und damit eine geringere Schichtverbindung auf. In der X-Z- bzw. der Y-Z-Schicht ist somit ein anisotroper Zustand im Vergleich zur X-Y-Ebene.

Wenn die rechteckartigen Proben im LBM-Verfahren (Kerbschlagbiege- und Zugproben) im Stehen gedruckt werden, verlängert sich die Prozesszeit, da der Beschichter durch die Höhe der Proben häufiger über die Bauplatte fahren muss. Liegend entsteht eine Prozesszeit von 15

Stunden und stehend von 24 Stunden. Weiterhin muss beim LBM-Verfahren eine minimale Belichtungszeit eingestellt werden, bevor erneut beschichtet werden darf, da die Pulverförderung über das rePlug-System länger dauert als die Belichtung. Dadurch können ebenfalls längere Prozesszeiten entstehen.

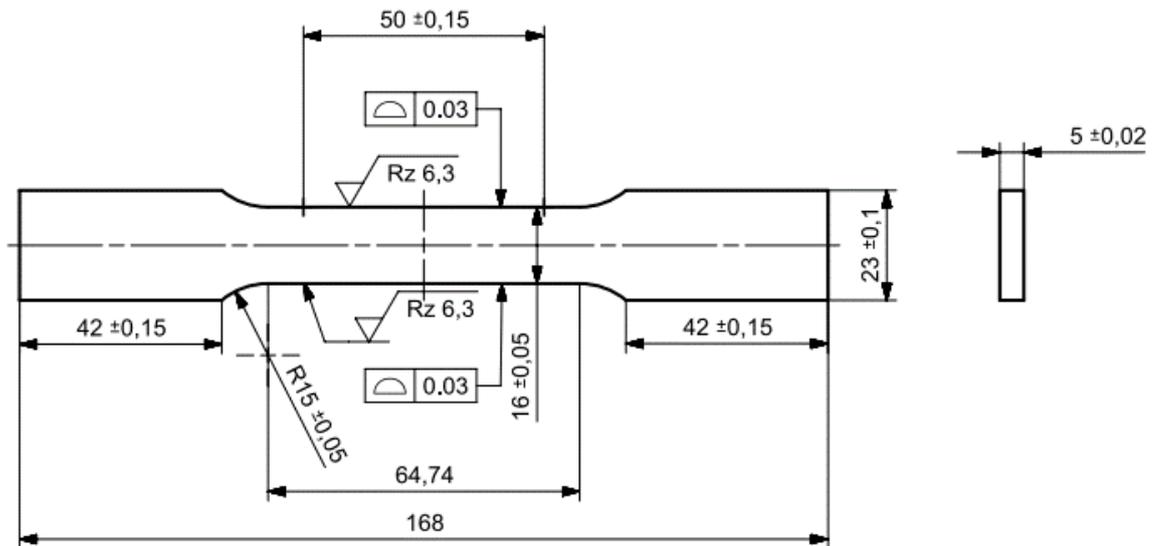
Analog zum LBM-Verfahren sollte beim LENS-Verfahren zwischen zwei Schichten eine Abkühlzeit von mindestens 25 Sekunden eingehalten werden, um ein übermäßiges Aufschmelzen und damit einen Wärmestau zu reduzieren. Das Schweißgut könnte zu flüssig werden. Liegend sind die Verfahrswege länger und die Abkühlzeit der einen Probe kann effizient genutzt werden, um die nächste Probe zu schweißen. Stehend müssten mehr Pausen eingelegt werden, damit für die Proben die nötige Abkühlzeit gewährleistet werden kann.

Im LENS-Verfahren sind Stützgeometrien nicht zu realisieren im Gegensatz zum LBM-Verfahren. Daher kommen weitere Ausrichtungen, die über liegend und stehend hinausgehen, nicht in Frage.

### 4.4.2 Form der Proben

**Zugproben:** Für die Zugproben werden Flachproben gewählt, aufgrund der Ausrichtung, der Zeitersparnis und der weiteren notwendigen Nacharbeitung. Rundproben lassen sich schwer auf der Substratplatte komplett fertigstellen, im Gegensatz zu den Flachproben, die anschließend nur auf Maß geschliffen werden müssen. Die Rundproben müssen von der Substratplatte getrennt und anschließend einzeln komplett spanend bearbeitet werden. Die Flachproben können auf der Substratplatte zusammen fräsend realisiert werden, ohne dass die Proben einzeln eingelegt werden müssen. Die Substratplatte kann über einen Messtaster in der CNC-Maschine orientiert werden. Durch das Cimatron-Programm sind die Verfahrswege definiert und die Proben können bis zum Flachsleifprozess fertiggestellt werden.

Die Proben für den Zugversuch werden nach der Norm DIN 50125 hergestellt. Es werden Flachproben nach Form E mit einer Dicke von 5 mm, einer Breite der parallelen Länge von 16 mm und einer Gesamtlänge von 168 mm hergestellt (Abbildung 23).

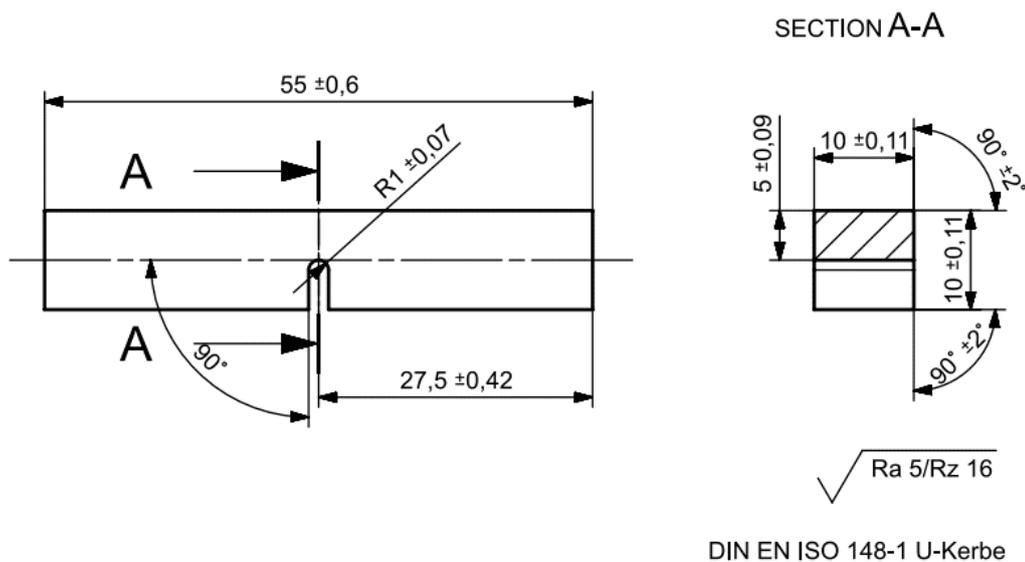


Zugprobe DIN 50125 E5 x 16 x 50

Abbildung 23: Auszug der technischen Zeichnung der Zugprobe nach DIN 50125

**Kerbschlagbiegeproben:** Die Proben werden mit einer U-Kerbe, siehe Abbildung 24, anstatt der V-Kerbe hergestellt, da diese leichter mit herkömmlichen Fräsworkzeugen herzustellen sind als eine V-Kerbe. V-Kerben werden mit einem Räumwerkzeug hergestellt, welches in der Firma nicht umsetzbar ist. Die U-Kerbe kann fräsend hergestellt werden, ohne dass Werkzeuge zusätzlich gekauft werden müssen.

Die Proben des Kerbschlagversuchs werden nach der Norm DIN EN ISO 148-1 hergestellt und geprüft. Die Norm umfasst Maße und Vorgaben für die V-Kerbe und die U-Kerbe. Für die Versuche werden Proben mit der U-Kerbe geprüft.



DIN EN ISO 148-1 U-Kerbe

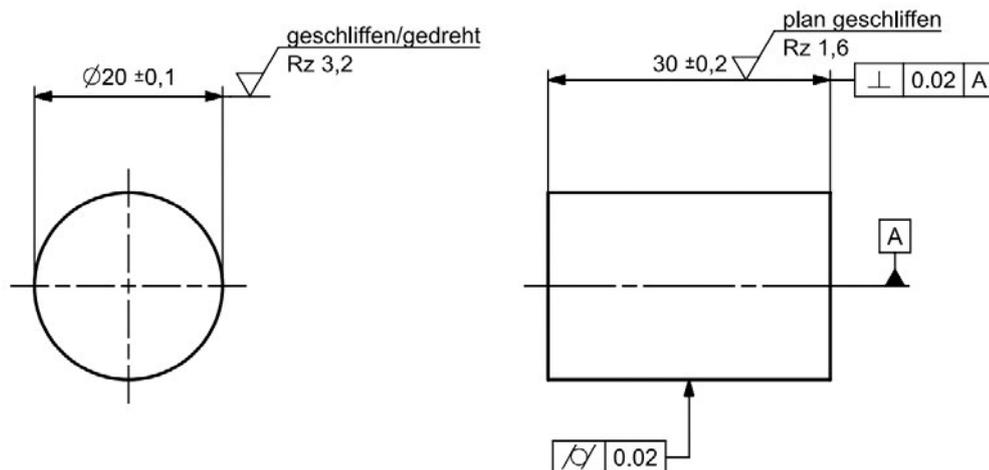
Abbildung 24: Auszug der technischen Zeichnung der Kerbschlagbiegeprobe nach DIN EN ISO 148-1

**Druckproben:** Die Druckproben werden im LENS-Verfahren als quadratische Form aufgebaut. Dies ist notwendig, da bei einer kreisförmigen Kontur, wie in Abbildung 22 dargestellt, und einer Zick-Zack-Schraffur innerhalb eines Zylinders mit den eingestellten Parametern große Lücken zwischen Kontur und Schraffur aufweisen würden.

Weiterhin kann die verwendete Operation quadratische Flächen besser verarbeiten als runde. Um die Proben unter gleichen Bedingungen herzustellen, wird die Probe daher mit Aufmaß als Quadrat aufgebaut.

Die LBM-Proben können als Zylindergeometrie belichtet werden, da die Parameter-einstellungen der Bahnen in der SLM-Maschine feiner sind. Die Proben werden weiter mit einem Aufmaß erstellt, um Lücken zwischen Kontur und Schraffur durch eine spanende Bearbeitung zu entfernen.

Die Druckproben werden nach der Norm DIN 50106 hergestellt (Abbildung 25). Die Mantelfläche der Druckproben kann nach Norm geschliffen oder gedreht werden.



Druckprobe DIN 50106

Abbildung 25: Auszug der technischen Zeichnung der Druckprobe nach DIN 50106

Die Druckproben sollen nach Norm ein Höhen-Durchmesserverhältnis zwischen 1 und 2 haben. Für die Höhe der Druckprobe  $h_0$  werden 30 mm und für den Anfangsdurchmesser  $d_0$  werden 20 mm gewählt. Mit 1,5 liegt das Verhältnis mittig zwischen den Sollwerten. [8]

$$1 \leq \frac{h_0}{d_0} \leq 2 \quad (4.1)$$

**Schliffbildproben:** Die Schliffbilder müssen in den Ebenen X-Z, Y-Z und X-Y getrennt werden, um Aussagen über Schichtverbundheit und Dichte treffen zu können. Durch den schichtweisen Aufbau unterscheiden sich die Ebenen voneinander. Die Proben haben Maße von 10 x 10 x 15 mm, damit die drei Ebenen pro Parameter in einem Harzbett zusammen aufbereitet und analysiert werden können.

#### 4.5 Materialkennwerte

Die Lieferanten der Materialien geben eigene Datenblätter mit mechanischen Kennwerten an. In der Tabelle 6 sind die Angaben zusammengefasst und geben einen ersten Eindruck davon, was von den Materialien zu erwarten ist, neben der vorgeschriebenen Mindestanforderung. Interessant ist dabei zu sehen, dass für das Pulvermaterial eine höhere Streckgrenze und eine höhere Bruchdehnung angegeben sind als für den warmgewalzten Stahl. Im Gegensatz dazu ist die Kerbschlagarbeit bei dem DED-Pulver geringer.

Material 1.4404	DIN EN 10088-2	Stahl (Marks GmbH) [40]	Pulver SLM (Höganäs) [30]		Pulver DED (DMG MORI) [14]
Erzeugungsart	warmgewalztes Blech	warmgewalzt	Pulver 15 - 45 µm		Pulver 53 - 150 µm
	-	längs	Z	X/Y	-
Streckgrenze $R_{0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	≥ 220	≥ 200	320	330	390
Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	520 – 670	500 – 700	495	565	563
Bruchdehnung [%]	≥ 45	≥ 40	64	46	36,6
Kerbschlagarbeit V-Kerbe [J]	Längs	≥ 100	160	195	105
	Quer ≥ 60				
Anmerkung	-	-	Beispielhafte erreichbare mechanische Eigenschaften		

Tabelle 6: Überblick über die mechanischen Kennwerte der verschiedenen Lieferanten für 1.4404

Die Werte der Pulverlieferanten sind mögliche erreichbare Werte für das Bauteil. Die mechanischen Eigenschaften, die schlussendlich erreicht werden, hängen von vielen Faktoren ab, wie Belichtungsstrategie und -zeit beziehungsweise Schweißstrategie und -zeit, Pulvermenge und Ausrichtung des Bauteils.

## 5. Auswahl der Bearbeitungsparameter und Aufbau der Versuche

Die Proben für die verschiedenen Herstellungsverfahren werden jeweils durch verschiedene Strategien und Bearbeitungen hergestellt. Die Proben aus den additiven Verfahren können durch eine Vielzahl an einstellbaren Parametern und Strategien hergestellt werden. Die Referenzproben aus handelsüblichem Stahl werden spanend aus dem Vollmaterial hergestellt.

Im Rahmen des LENS- und LBM-Prozesses wird den Proben keine zusätzliche Wärme als die durch den Laser einwirkende hinzugefügt. Beim Laserschweißen entsteht eine geringe thermische Belastung des Werkstücks durch die geringe Streckenenergie. Die Streckenenergie  $E_S$  ist das Ergebnis der Laserleistung  $P_L$  durch die Vorschubgeschwindigkeit des Lasers  $v_s$ . [32] [33]

$$E_S = \frac{P_L}{v_s} \quad (5.1)$$

### 5.1 Eingestellte Parameter und Schweißstrategie des LENS-Verfahrens

Mit der Maschine sind für verschiedene Materialien einige Parametereinstellungsbeispiele mitgeliefert. Bei der Programmerstellung in der Software Siemens NX können nach Auswahl einer Auftragsoperation weitere Parameter gebündelt in einem Werkzeugfenster eingestellt werden. Parameter wie Laserleistung, Pulverzufuhr und Rührergeschwindigkeit können zusätzlich nachträglich an der Maschine bearbeitet werden.

Die Prozessstartparameter für die Pulverzufuhr aus den Pulvertanks können bei Verwendung von verschiedenen Materialien einzeln gewählt werden. Zum Start wird die anfängliche Laserleistung auf 2200 W, die Pulverzufuhr auf  $400 \times 0,01$  U/min also 4 U/min, die Gaszufuhr des Trägergases auf  $600 \times 0,01$  l/min also 6 l/min und die Rührergeschwindigkeit auf  $319 \times 0,1$  % also 31,9 % für ein Material festgelegt. Weiterhin wird der Gasschutz auf  $500 \times 0,01$  l/min also 5 l/min für alle Materialien festgelegt, Abbildung 26.

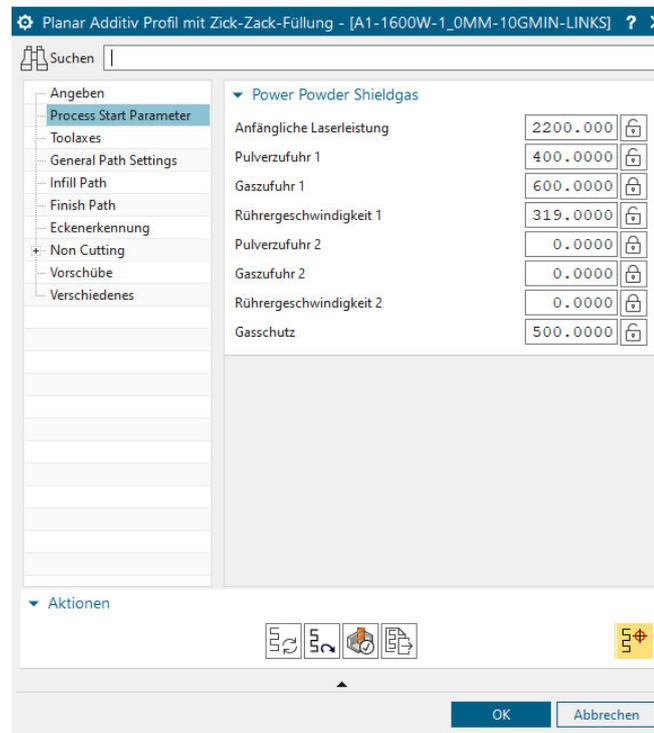


Abbildung 26: Parametereinstellungsfenster in Siemens NX für die Bearbeitung des LENS-Prozesses

Im Parametereinstellungsfenster wird der Düsentyp ausgewählt, hier 3 mm Düse, und wie der Laser zum Bauteil verfahren soll. Für diesen Baujob wird ein senkrechter Aufbau zur Arbeitsebene gewählt.

Bei den General Path Settings werden die Schichthöhe auf 1,0 mm oder 1,2 mm sowie die Abkühlzeit auf 25 Sekunden eingestellt. Anschließend kann ausgewählt werden, ob die Kontur und/oder die Schraffur bearbeitet werden soll. Es wird Kontur und Schraffur ausgewählt. Nur die Kontur oder Schraffur zu bearbeiten kann sinnvoll sein, wenn eine davon nicht gleichmäßig aufgebaut wird. Soll ab einem konkreten Maß gearbeitet werden, kann mit dem Bodenaufmaß ein Offset von der ausgewählten Null-Punkt-Fläche zur Geometrie in einem Abstand geschweißt werden.

Um eine Durchmischung und eine feste Anbindung mit dem Grundmaterial zu realisieren, müssen die ersten Schichten mit einer hohen Laserleistung bearbeitet werden und spätestens bei einer Höhe von 5 mm die eingestellte Laserleistung erreicht haben. Der Grund dafür ist, dass die Aufbauhöhe, die Höhe, bevor die Probe beginnt, 5 mm beträgt und verschiedene Layerhöhen mit verschiedenen Laserleistungen bearbeitet werden. Bei allen Kombinationen muss die angestrebte Laserleistung nach diesen 5 mm erreicht sein. Damit müssen zwei verschiedene Laserleistungsstufen eingestellt werden. Zum einen die Laserleistungsstufen bis 1400 W und die bis 1600 W, siehe Abbildung 27.

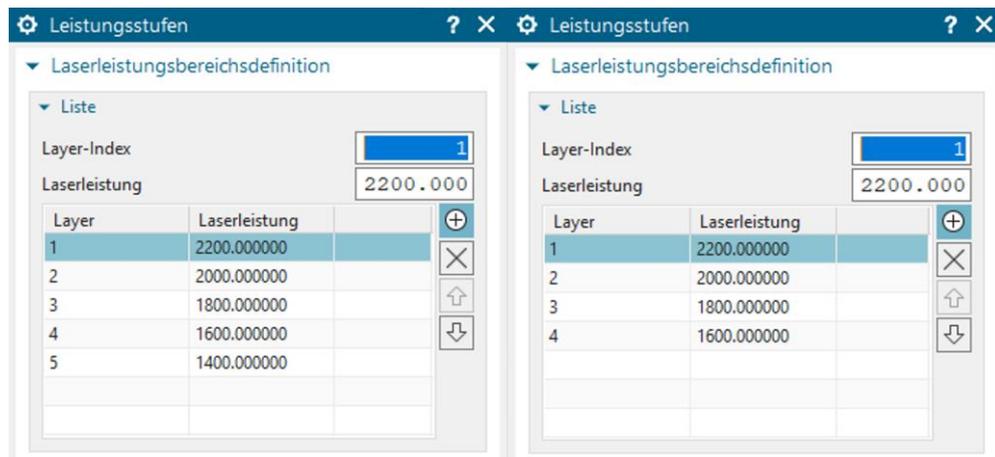


Abbildung 27: Laserleistungsstufen für 1400 W und 1600 W

Im Infill Path werden die Parameter für die Schraffur gesetzt. Die Parameter für die Füllbahnwege sind von dem ausgewählten Operationstyp abhängig. Es kann zwischen Zick-Zack und Zick ausgewählt werden. Bei Zick-Zack wird von der einen Seite zur gegenüberliegenden Seite gefahren und die gesamte Zeit geschweißt. Bei Zick wird von der gleichen Seite der Geometrie losgefahren und eine Bahn geschweißt, zurückgefahren, ohne zu schweißen, und der Vorgang wiederholt. Weiterhin müssen die minimale und maximale Seitenzustellung gewählt werden. Die vier Versuche werden mit einer maximalen Zustellung von 2,0 mm und einer minimalen Zustellung von 1,8 mm gefahren. Das bedeutet, dass bei einer effektiven Bahnbreite von 2,7 mm aus der 3 mm Düse die Bahnen eine Überlappung von 0,7 bis 0,9 mm haben. Dabei optimiert das Programm die Zustellung selbstständig an die benötigten Bahnen für die Ebene.

Die Kontur wird im Finish Path definiert. Es ist möglich, mehrere Konturbahnen zu fahren, um kürzere Schraffur-Verfahrwege zu erzielen. Weiter kann ebenfalls eine Zustellung ausgewählt werden, die beträgt 50 % des Werkzeugdurchmessers. Damit ist bei einer 3 mm Düse ein Durchmesser von 2,7 mm gemeint, also eine Zustellung von 1,35 mm. Die Proben werden mit jeweils einer Kontur gefahren. Der Startpunkt wird im Winkel je Schicht versetzt. Dieser ist einstellbar und nach der Empfehlung der Software auf 36° gesetzt.

In der Eckenerkennung können Ecken explizit markiert werden. Diese Funktion wurde jedoch nicht verwendet, da die Ecken durch das gegebene Aufmaß keine kritischen Stellen darstellen. Weiter können in Non Cutting alle Verfahrwege und Sicherheitsabstände bearbeitet werden, die keinen Einfluss auf dem schweißenden oder spanenden Prozess haben. In Vorschübe werden die Vorschübe für die Schweißeinheit eingestellt. Der Laser verfährt mit einer Geschwindigkeit von 1000 mm/min beim Schweißvorgang. Alle anderen Wege werden in Eilgang gefahren. Unter Verschiedenes kann die Darstellung der Verfahrwege bearbeitet und eingestellt werden.

Die DED-Proben werden mit einer Streckenenergie von 84 J/mm bei 1400 W und mit 96 J/mm bei 1600 W hergestellt.

## 5.2 Eingestellte Parameter und Belichtungsstrategie des LBM-Verfahrens

Die Parameter können in verschiedenen Anwendungen eingestellt werden. Zum einem gibt es Parameter, die an der Maschine selbst über CELOS angepasst werden können, vgl. Tabelle 7 und Parameter, die durch die hinterlegten Werte des gewählten Materials ausgewählt werden. Diese sind über ein Konfigurationsfenster von DMG MORI beim Vorbereiten des Baujobs in Siemens NX bedingt anpassbar. Bei diesen Parametern handelt es sich um die Parameter der Belichtungsstrategie, vgl. Tabelle 8.

Parametername	Einstellung
Heizung automatisch einschalten	Nein
Fluten automatisch einschalten, Zielwert Sauerstoff	0,1 %
Verwende benutzerdefinierten Gasfluss, Ziel Gasfluss	1000 l/min
Wiederholtes Belichten der ersten Schicht, Anzahl der Wiederholungen	2
Plattform vor dem ersten Beschichten freifahren	Nein
Minimale Schichtzeit	30 s

Tabelle 7: Allgemeine Parametereinstellung der SLM-Maschine

Bei diesem Baujob wird nach den Parametereinstellungen von DMG MORI für Edelstahl keine Heizung eingeschaltet. Dadurch muss auch die Plattform nicht freigefahren werden. Bei einer Erwärmung der Substratplatte können kleinste Pulverpartikel dafür sorgen, dass sich die Substratplatte auf Grund der Wärmeausdehnung in der Substratplatteneinlassung verkeilt.

Der Zielwert von dem Sauerstoff und dem Gasfluss kann eingestellt werden, jedoch sind die 0,1 % für den Sauerstoff und die 1000 l/min Gasfluss empfohlene Werte von DMG MORI. Die Literatur gibt einen maximalen Sauerstoffwert von 1 % an. Die Anlagen von DMG MORI können diesen unterbieten, wodurch ein besseres Gefügebild der Komponenten entsteht.

Die erste Schicht wird aufgetragen und zweimal belichtet, ohne eine neue Schicht Pulver aufzutragen. Dadurch kann eine bessere Anhaftung an die Substratplatte sichergestellt werden. Im weiteren Prozess wird jede Schicht einmal belichtet, bevor neues Pulver mit dem Beschichter verteilt wird. Sollte das Belichten einer Schicht weniger als die minimale Schichtzeit dauern, wird durch den Parameter minimale Schichtzeit ein Wert gesetzt, der abgewartet werden muss, bevor der Beschichter das Pulver erneut verteilen darf. Bei diesen Proben ist der Wert auf 30 Sekunden gesetzt. Die letzten Schichten, in denen nur noch die Druckproben belichtet werden, sind kürzer als 30 Sekunden. Wenn keine Schichtzeit festgelegt wird, könnte das rePlug-System möglicherweise nicht ausreichend Pulvervorräte fördern. In einem solchen Fall muss gewartet werden, bis genügend Pulver verfügbar ist, was zu längeren Pausen führen kann. Dies könnte dazu führen, dass das Gefüge inhomogener wird als bei mehreren gleichmäßigen kurzen Pausen.

Parametername	Einstellung
Schmelzspurbreite	70 $\mu\text{m}$
Kompensation der Schmelzspurbreite	35 $\mu\text{m}$
Layerhöhe	0,05 mm
Innenfläche Schraffurversatz	0,05 mm
Streifenmuster Schraffurabstand	0,11 mm
Streifenmuster Streifenbreite	12,0 mm
Streifenmuster Streifenversatz	0,0 mm
Streifenmuster Ausgangswinkel Drehwinkel	0,0°
Streifenmuster Schrittgröße Drehwinkel	63,5°
Streifenmuster Abstand für Zusammenführung	3,0 mm
Scannen Kontur: Laserdurchmesser	0,07 mm
Scannen Kontur: Lasergeschwindigkeit	300 mm/s
Scannen Kontur: Laserleistung	140 W
Scannen Schraffuren: Laserdurchmesser	0,07 mm
Scannen Schraffuren: Lasergeschwindigkeit	1000 mm/s
Scannen Schraffuren: Laserleistung	254 W

Tabelle 8: Einstellungen der Parameter für die Belichtung

Der standardmäßig verwendete Parametersatz für Edelstahl belichtet die Schraffur und die Kontur mit einem Fokusbildmesser von 70  $\mu\text{m}$ , was der Schmelzspur entspricht. Die Kompensation der Schmelzspur ist die Hälfte des Fokusbildmessers und beschreibt den nicht überlappenden Bereich zwischen Kontur und Schraffur. Die Layerhöhe beträgt 0,05 mm pro Schicht. Der Abstand von Kontur zur Schraffur wird über die Innenfläche Schraffurversatz eingestellt und beträgt 0,05 mm.

Das Streifenmuster ist, wie in Abbildung 28 gezeigt, aufgebaut. Ein Streifen hat eine Breite von 12 mm. In diesem befinden sich die einzelnen Zick-Zack-Richtungen der Belichtungsbahnen. Der Abstand dieser Bahnen, genannt Schraffurabstand, beträgt 0,11 mm. Die einzelnen Streifen zueinander haben einen Versatz von 0,0 mm zueinander. Das bedeutet, dass die einzelnen Schraffurbahnen einer Ebene dort starten, wo die letzte aufgehört hat, und zwischen den Bahnen kein Versatz ist. Der Winkel der einzelnen Schichten ist 63,5° zueinander verdreht. Dabei ist ein Winkel zwischen 230° und 310° nicht zulässig. Der Startwinkel ist 0° und parallel zur x-Achse, auf diesen wird direkt der Verdrehwinkel von 63,5° aufgerechnet. Die Bahnen haben eine Breite von 12 mm, durch geometriebedingte Formen kann eine Bahn auch kleiner sein, muss aber mindestens 3 mm breit sein. Das wird dadurch realisiert, dass, wenn ein Abschnitt eines Streifens geringer als 3 mm sein sollte, dieser zu dem nächsten Streifen sortiert wird. So können Bahnen auch über 12 mm breit sein. Dieser Parameter wird Abstand für Zusammenführung genannt.

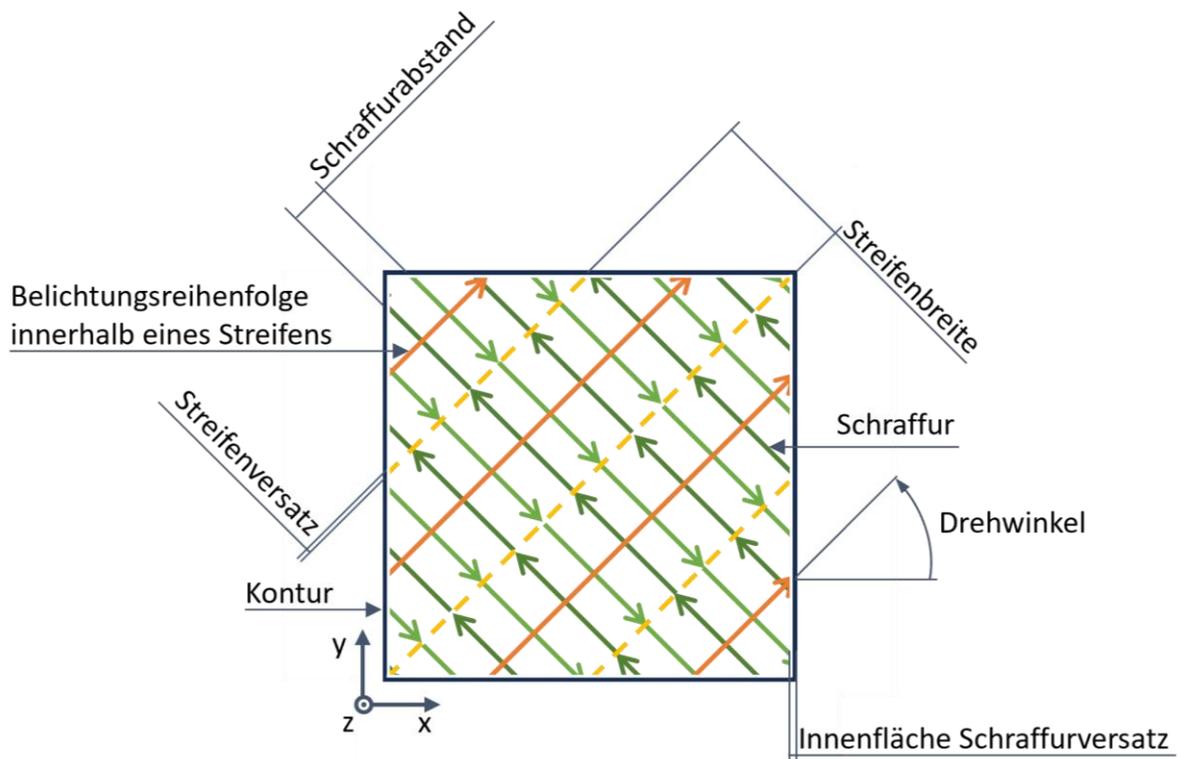


Abbildung 28: Erklärung der Parameter der Belichtungsstrategie

Die Leistungsdaten werden in Kontur und Schraffur unterteilt. Die Kontur wird mit einer Leistung von 140 W bei einer Geschwindigkeit von 300 mm/s belichtet. Im Gegensatz dazu wird die Schraffur mit einer höheren Leistung von 254 W belichtet bei einer Geschwindigkeit von 1000 mm/s. Die verbauten Laser können nicht auf ein einzelnes Bauteil aufgeteilt werden, jedoch erinnern die verschiedenen Laserleistungen von Kontur und Schraffur an die Hülle-Kern-Strategie. Die Proben werden bei einer Streckenenergie von 0,254 J/mm bei 254 W und 0,467 J/mm bei 140 W hergestellt.

Mit der Herstellung der Proben ist aufgefallen, dass die Loaderwelle des Pulverförderungs-systems verbogen ist, weswegen eine Pulverförderung über die gesamte Breite der Bauplatte nicht möglich war. Im Prozess mussten, wie in Abbildung 29 zu sehen, eine Kerbschlagbiegeprobe und eine Druckprobe im laufenden Baujob in der Steuerung entfernt werden, da kein Pulver beziehungsweise nicht genug Pulver an die entsprechenden Stellen mit dem Beschichter geliefert werden konnte. Ein weiteres Belichten der Stellen ohne Pulver wäre in diesem Fall problematisch geworden. Durch eine dauerhafte Belichtung ohne neues Pulver können große Eigenspannungen entstehen und die Proben hätten sich von der Bauplatte lösen können. Auch hätte sich eine Senke bilden können, und bei erneutem Pulverauftrag hätte loses Pulver belichtet werden können, welches keine Verbindung zum Bauteil hat. Dieses Blech kann sich lösen, und in beiden Fällen wird der Beschichter beschädigt.

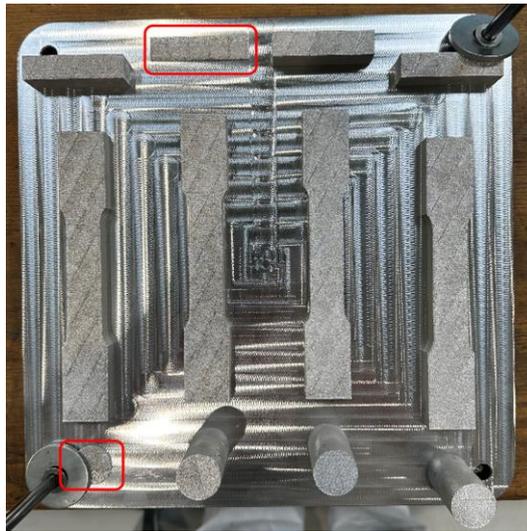


Abbildung 29: Baujob SLM-Maschine mit 10 von 12 Proben, Substratplatte 300 x 300 mm

### 5.3 Spanende Herstellung und Fertigstellung der Proben

Die Proben dienen als Referenzwert, um die additiv hergestellten Proben mit einem Wert vergleichen zu können, als ausschließlich mit den Normwerten, da nach Norm keine Werte für einen Kerbschlagarbeitswert mit U-Kerbe sowie für die Druckprüfung vorliegen.

Die Proben werden aus Rohmaterial in passende Stücke gesägt und spanend auf einer Fräs- oder Drehmaschine bearbeitet. Der Bearbeitungsprozess wird über die CAM-Anwendung der Software Cimatron realisiert. Die Daten werden dafür als STEP-Datei gespeichert, in die CAD-Anwendung von Cimatron importiert und anschließend als Cimatron-Datei gesichert, da die Konstruktion mit Siemens NX erstellt wurde.

Der Bearbeitungsprozess setzt sich aus schrumpfenden und schlichtenden Prozessen in mehreren Einspannungen zusammen. Planfräsprozesse werden mit einem Messerkopf umgesetzt und Außenkonturen können mit einem Schaftfräser realisiert werden.

Die Zugproben aus dem Rohmaterial werden in zwei Einspannungen gefräst. Das Tiefenmaß der Proben wird durch Schleifen realisiert. Auf einer CNC-Maschine wird die Form E der Zugprobe gefräst. Dazu werden die Proben über die Dicke des Materials auf dem Bearbeitungstisch der CNC-Maschine auf einer Parallelunterlage mit Pratzen fixiert. Es liegen damit drei von vier Flächen der Außenkontur frei. Ein Schaftfräser kann diese Außenkontur erst schrumpfend und anschließend schlichtend abfahren. Durch eine 180°-Drehung der Zugprobe kann die letzte Außenkontur schrumpfend und schlichtend bearbeitet werden.

Die Kerbschlagbiegeprobe aus dem Rohmaterial kann ebenfalls in zwei Einspannungen realisiert werden. Es wird Rohmaterial verwendet, welches dicker als die finale Probe ist. Die Probe wird in einem Schraubstock über die lange Seite so eingespannt, dass mehr als die Dicke der Probe über den Schraubstock hinausragt. Das Material wird zuerst plan geschruppt und anschließend die Außenkontur bis knapp vor dem Schraubstock geschruppt. Nachfolgend werden die erreichbaren Außenflächen geschlichtet. Als Nächstes wird die U-Kerbe bis knapp

vor dem Schraubstock schrappend und danach schlichtend bearbeitet. Zum Schluss wird die Probe mit einem Scheibenfräser abgetrennt. Für die zweite Spannung wird die Probe gedreht, so dass die bearbeiteten Flächen im Schraubstock wie vorher eingespannt sind. Die geforderte Dicke der Probe kann mittels Planfräsen schrappend realisiert werden. Die Nut wird anschließend von der zweiten Seite ebenfalls schrappend bearbeitet. Abschließend werden die Oberseite der Probe und die Nut geschlichtet.

Die Druckproben werden auf einer Drehmaschine aus einem Rohmaterial gedreht. Dazu wird die Planfläche schlichtend quer-plan gedreht und die Mantelfläche schrappend längs-plan gedreht bis zur Solllänge. Anschließend wird die Mantelfläche schlichtend längs-plan gedreht und die benötigte Länge mit Aufmaß abgestochen. Durch das Abstechen bleibt ein kleiner Materialrest auf der Planfläche übrig. Durch Umspannen, sodass eine Bearbeitung der anderen Planfläche möglich ist, kann durch ein quer-plan drehen der Materialrest entfernt werden. Die Planflächen der Druckproben müssen nach Norm auf Maß geschliffen werden, weswegen ein geringes Aufmaß über die Länge erforderlich ist.

Die SLM-Substratplatten können auf einer Adapterplatte auf dem Tisch der CNC-Maschine befestigt werden.

Die Proben des LBM-Verfahrens werden weitestgehend auf der Substratplatte fertiggestellt. Dazu werden zuerst die Oberflächen der Zug- und Kerbschlagbiegeproben plan gefräst. Weiter werden die Außenkonturen sowie die Nut der Kerbschlagbiegeproben geschruppt. Nachfolgend werden alle geschruppten Bahnen geschlichtet. Alle Proben werden vor dem Abtrennen mit einem Scheibenfräser nach der Probenbenennung nummeriert. Die Druckproben benötigen keine fräsende Bearbeitung, da diese nach dem Abtrennen auf einer Drehmaschine weiterbearbeitet werden. Die Dicken der Zug- und Kerbschlagbiegeproben werden auf einer Flachsleifmaschine realisiert.

Bei der spanenden Bearbeitung der Proben aus dem LENS-Verfahren werden zuerst die Schliffbildproben markiert und anschließend mit einem Scheibenfräser abgetrennt. Der weitere Bearbeitungsprozess gleicht dem der Proben aus dem LBM-Verfahren. Weiter werden aber bei allen schrappenden und schlichtenden Prozeduren die Druckproben mit bearbeitet.

Die Druckproben aus dem LENS- und LBM-Verfahren werden in zwei Spannungen auf einer Drehmaschine bearbeitet. Dazu werden die Proben auf die benötigte Länge mit Aufmaß ausgespannt und die Planfläche schlichtend quer-plan gedreht. Folgend wird die Mantelfläche schrappend längs-plan gedreht und anschließend geschlichtet. Die Probe muss, um die zweite Planfläche und die geforderte Länge mit einem geringen Aufmaß zu bekommen, umgespannt werden und quer-plan gedreht werden. Die Planflächen können nach Norm auf einer Flachsleifmaschine realisiert werden.

## 5.4 Zugversuch

Beim Zugversuch werden die Proben nach DIN EN ISO 6892-1 Zugversuch-Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur geprüft (Abbildung 30). Sie werden in einer Materialprüfmaschine an ihren Probenköpfen biegungsfrei eingespannt und gleichmäßig gedehnt, bis es zu einem Bruch kommt. Dabei ist die untere Traverse unbeweglich und die obere Traverse beweglich und zieht langsam die Probe. Über der oberen Traverse ist eine Kraftmesszelle angebracht, welche die Messdaten an einen Rechner übermittelt.

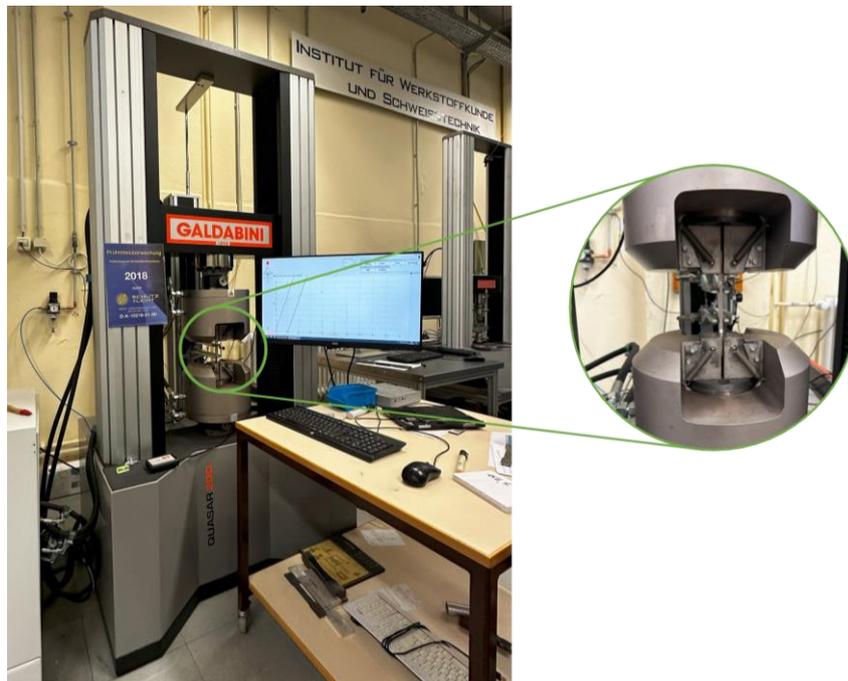


Abbildung 30: Prüfung der Zugproben

## 5.5 Kerbschlagbiegeversuch

Die Proben werden in eine Schlagprüfmaschine nach DIN EN ISO 148-1 Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy-Teil 1: Prüfverfahren gelegt, welche einen Rundumschutz vor den herausfliegenden, zerschlagenden Proben bietet (Abbildung 31). Die Proben werden mittig in die Prüfmaschine auf den Prüfplatz gelegt. Auf der einen Seite der Auflage des Prüfplatzes ist ein Anschlag vorhanden, an den die Probe zur Ausrichtung geschoben werden muss. Ein Pendelhammer schlägt auf die Probe und verformt oder zerbricht diese.

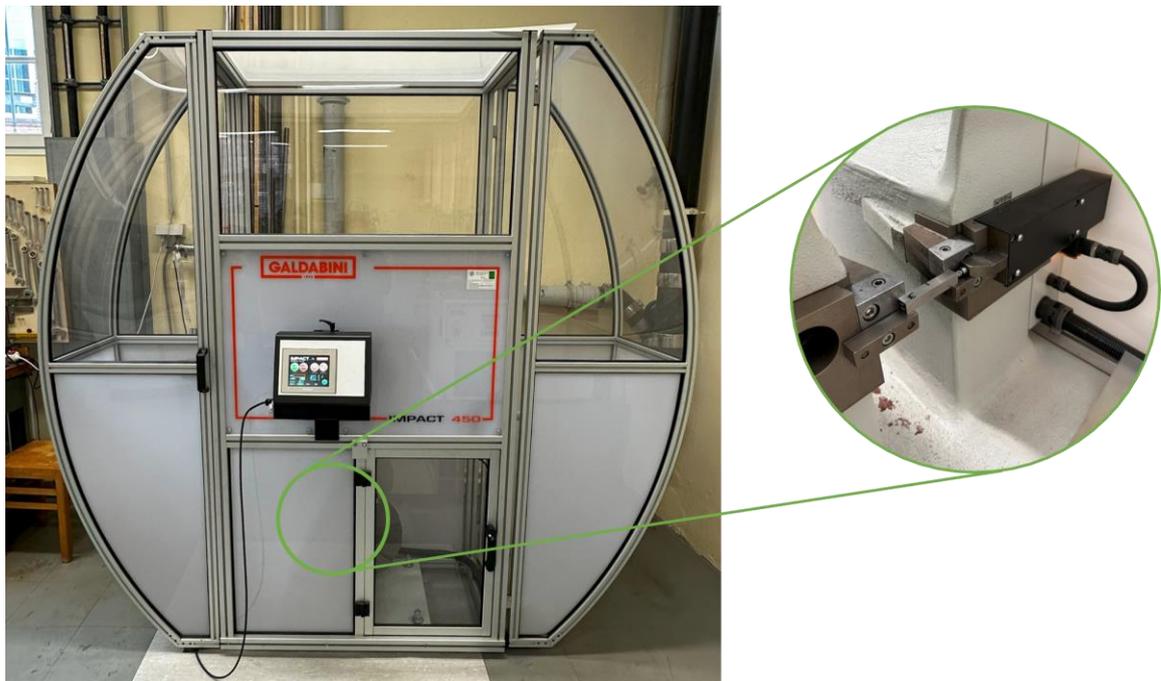


Abbildung 31: Prüfung der Kerbschlagbiegeproben

## 5.6 Druckversuch

Die Proben werden in einer Zug-Druck-Maschine mittig zwischen zwei planen Drucktellern gestellt und mit einer Kraft von 330 kN zusammengedrückt (Abbildung 32). Der Druckversuch endet, wenn eine Probe Risse bildet oder bricht oder die maximale Prüflast erreicht ist. Aus Sicherheitsgründen wird der Prüfkörper von einem Kunststoffrohr umfasst. Der Versuch wird anlehnend an die DIN 50106 Prüfung metallischer Werkstoffe-Druckversuch bei Raumtemperatur durchgeführt.

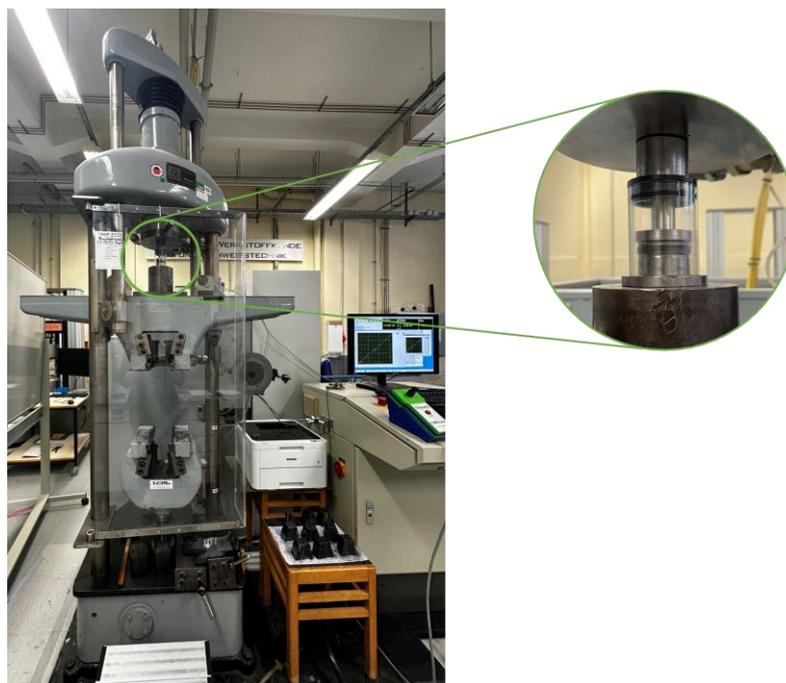


Abbildung 32: Prüfung der Druckproben

## 5.7 Schliffbilder

Um die verschiedenen Schichtanbindungen und Schichtqualität beurteilen zu können, muss die Oberfläche geschliffen, mit Diamantscheiben poliert und anschließend mit einem für austenitische Stähle geeigneten Ätzmittel geätzt werden.

Um die Schliffbilder herzustellen, wird je eine Probe eines Parametersatzes in einer der drei Ebenen (X-Y, X-Z und Y-Z) mittig getrennt und alle Proben eines Parametersatzes in einem Harzbett zusammengefasst. Anschließend werden sie mit rotierenden Schleifscheiben geschliffen und mit Diamantscheiben poliert. Dabei ist es wichtig, eine Wasserkühlung zu verwenden, damit der Werkstoff der Probe sich nicht erwärmt und dadurch verändert. Durch das Polieren sind Unreinheiten wie Poren und Oxideinschlüsse gut unter einem Auflichtmikroskop sichtbar und im Mikrobereich bestimmbar. Eine anschließende Ätzung kann neben Poren und Rissen grobe Körner, wärmebehandelte Zonen und unter anderem Schweißnahtaufbau sichtbar machen (Abbildung 33). [48]



Abbildung 33: Geätzte Schliffbilder der vier Parametersätze

## 6. Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Prüfungen werden im Folgenden zusammengefasst und Auffälligkeiten benannt. Die Proben ordnen sich nach einem Farbschema ein, in dem die DED-Proben in Diagrammen und Tabellen mit einer grünen Farbe, die SLM-Proben mit einer blauen Farbe und die W-Proben mit einer gelben Farbe gekennzeichnet sind.

### 6.1 Zugversuch

In Tabelle 9 sind die Werte aus dem Zugversuch aufgeführt. Die Werte aus dem gewalzten Stahl liegen alle entsprechend der Normwerte und übertreffen ebenfalls die Werte von Marks (vgl. Tabelle 6). Mit der Reserveprobe W-Z-4-X wurde die Maschine eingestellt und mit in die Tabelle 9 aufgenommen, da der Wert von Probe W-Z-1-X von den anderen Werten abweicht, aber im Rahmen der Norm ist. Die Dehngrenz- und Zugfestigkeitswerte aller Proben liegen über den Normwerten und den der Lieferanten. Die Dehngrenzwerte der SLM-Proben liegen dabei deutlich mit  $200 \text{ N/mm}^2$  mehr über den Werten des gewalzten Stahls. Und mit  $300 \text{ N/mm}^2$  über den Normwerten. Die DED-Proben haben einen minimalen Wert von  $368 \text{ N/mm}^2$  bei D-Z-2-112 und einen maximalen Wert von  $557 \text{ N/mm}^2$  bei D-Z-1-212. Die Proben liegen mit ihrem Minimalwert  $148 \text{ N/mm}^2$  über der Norm und  $68 \text{ N/mm}^2$  über dem Wert von DMG MORI.

Die Zugfestigkeit liegt gemäß der Norm im Bereich zwischen  $520$  und  $670 \text{ N/mm}^2$ . Die Proben aus gewalztem Stahl liegen alle verteilt dazwischen. Hier kann festgestellt werden, dass W-Z-1-X mit seinem Wert  $551 \text{ N/mm}^2$  geringer als die andern ist. Die SLM-Proben liegen alle bei  $700 \text{ N/mm}^2$  und damit über dem Normwert. Bei den DED-Proben liegen drei Proben über dem Maximalwert (D-Z-1-111, D-Z-1-212 und D-Z-2-212) und die restlichen Proben liegen verteilt zwischen  $547 \text{ N/mm}^2$  (D-Z-2-112) und  $668 \text{ N/mm}^2$  (D-Z-1-112 und D-Z-3-111) im zulässigen Bereich der Norm.

Alle additiv hergestellten Proben erreichen nicht die erforderliche Bruchdehnung von  $45 \%$ . Laut DMG MORI ist eine beispielhafte Bruchdehnung von  $36,6 \%$  möglich. An diesen Wert kommt keine der Proben heran, jedoch liegen die Proben D-Z-1-112 und D-Z-3-122 mit  $35,7 \%$  und  $35,5 \%$  dicht an diesem Wert. Die Proben aus gewalztem Stahl liegen mit mehr als  $8 \%$  über der Mindestbruchdehnung.

Die Mittelwerte bieten eine Zusammenfassung der Werte. Die W-Z-Proben haben einen Mittelwert der Dehngrenze von  $360,3 \text{ N/mm}^2$ , eine Zugfestigkeit von  $617,0 \text{ N/mm}^2$  und eine Bruchdehnung von  $54,0 \%$  und damit die geringsten Mittelwerte in der Dehngrenze und in der Zugfestigkeit zusammen mit dem Mittelwert des Parametersatzes D-Z-112. Dieser hat bei der Zugfestigkeit ebenfalls einen Wert von  $617,0 \text{ N/mm}^2$ . Ohne die Abweichung des Parameters W-Z-1-X würde der Mittelwert der Zugfestigkeit zu  $639,0 \text{ N/mm}^2$  steigen und damit über dem Mittelwert des Parametersatzes D-Z-112 liegen. In der Bruchdehnung haben die W-Z-Proben den größten Mittelwert. Die SLM-Proben haben die höchsten Mittelwerte in der Dehngrenze und in der Zugfestigkeit von  $601,7 \text{ N/mm}^2$  und  $703,7 \text{ N/mm}^2$ . Der Mittelwert der Bruchdehnung liegt mit einem Wert von  $35,9 \%$  über dem der DED-Proben. Die Mittelwerte

der Dehngrenze und Zugfestigkeit der DED-Proben reihen sich zwischen die Werte der W- und SLM-Proben ein. Die geringsten Mittelwerte hat der Parametersatz D-Z-112 in der Dehngrenze und der Zugfestigkeit. In der Bruchdehnung weist dieser Parametersatz den höchsten Wert der DED-Proben von 34,5 % auf. Der Parametersatz D-Z-221 hat den geringsten Mittelwert mit einer Bruchdehnung von 27,4 %. Die höchsten Mittelwerte der DED-Proben weist der Parametersatz D-Z-212 auf, mit einem Mittelwert von 510,3 N/mm<sup>2</sup> in der Dehngrenze und 690,7 N/mm<sup>2</sup> in der Zugfestigkeit.

Kennwert	Norm	W-Z-1-X	W-Z-2-X	W-Z-3-X	W-Z-4-X	$\bar{x}$	s
Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	220	293	393	378	377	360,3	45,43
Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	520-670	551	635	641	641	617,0	44,09
Bruchdehnung A [%]	45	53,9	53,2	53,9	55	54,0	0,74
		S-Z-1-X	S-Z-2-X	S-Z-3-X			
Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	220	609	597	599		601,7	6,43
Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	520-670	709	700	702		703,7	4,73
Bruchdehnung A [%]	45	36,2	35,6	36		35,9	0,31
		D-Z-1-111	D-Z-2-111	D-Z-3-111			
Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	220	488	517	483		496,0	18,36
Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	520-670	671	655	668		664,7	8,50
Bruchdehnung A [%]	45	34,5	32,7	34,7		34,0	1,10
		D-Z-1-112	D-Z-2-112	D-Z-3-112			
Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	220	488	368	458		438,0	62,45
Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	520-670	668	547	636		617,0	62,70
Bruchdehnung A [%]	45	35,7	32,4	35,5		35,5	1,85
		D-Z-1-212	D-Z-2-212	D-Z-3-212			
Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	220	557	494	480		510,3	41,02
Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	520-670	736	673	663		690,7	39,58
Bruchdehnung A [%]	45	33,2	33,4	33,7		33,4	0,25
		D-Z-1-221	D-Z-2-221	D-Z-3-221			
Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	220	479	488	440		469,0	25,51
Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	520-670	661	664	619		648,0	25,16
Bruchdehnung A [%]	45	29,1	27,1	25,9		27,4	1,62

Tabelle 9: Übersicht der Ergebnisse aus dem Zugversuch

Die SLM-Proben haben einen ausgeprägten elastischen Bereich, wodurch die Dehngrenze hohe Werte zwischen 597 N/mm<sup>2</sup> und 609 N/mm<sup>2</sup> annimmt. Die Dehngrenzen der SLM-Proben liegen mit 204 N/mm<sup>2</sup> über dem Maximalwert der Proben aus gewalztem Stahl. Die Zugfestigkeit hat eine positive Abweichung von 56 N/mm<sup>2</sup> zu gewalztem Stahl. Die Bruchdehnung ist geringer als bei gewalztem Stahl und hat zum kleinsten Wert einen Unterschied von 17 %.

Die Ergebnisse der SLM-Proben weisen gute Wiederholbarkeiten auf. Bei der Dehngrenze liegt die Standardabweichung bei  $6,43 \text{ N/mm}^2$ . Die Zugfestigkeit hat eine Standardabweichung von  $8,50 \text{ N/mm}^2$  und die Bruchdehnung hat eine Abweichung von  $0,31 \%$ .

Die DED-Proben weisen in den Parametersätzen eine starke Abweichung auf (vgl. Abbildung 34). Der Parametersatz D-Z-111 hat die geringsten Standardabweichungen in den Dehngrenzwerten von  $18,36 \text{ N/mm}^2$  und  $8,50 \text{ N/mm}^2$  bei der Zugfestigkeit. Der Parametersatz D-Z-112 hat die höchsten Standardabweichungen in der Dehngrenze von  $62,45 \text{ N/mm}^2$  und in der Zugfestigkeit von  $62,70 \text{ N/mm}^2$  sowie in der Bruchdehnung von  $1,85 \%$ . In den Parametersätzen D-Z-212 und D-Z-221 liegen die Werte der Standardabweichung zwischen Parametersatz D-Z-111 und D-Z-112. Außer die Standardabweichung des Bruchdehnungswertes des Parameters D-Z-212, dieser hat in der Bruchdehnung die geringste Abweichung von  $0,25 \%$ .

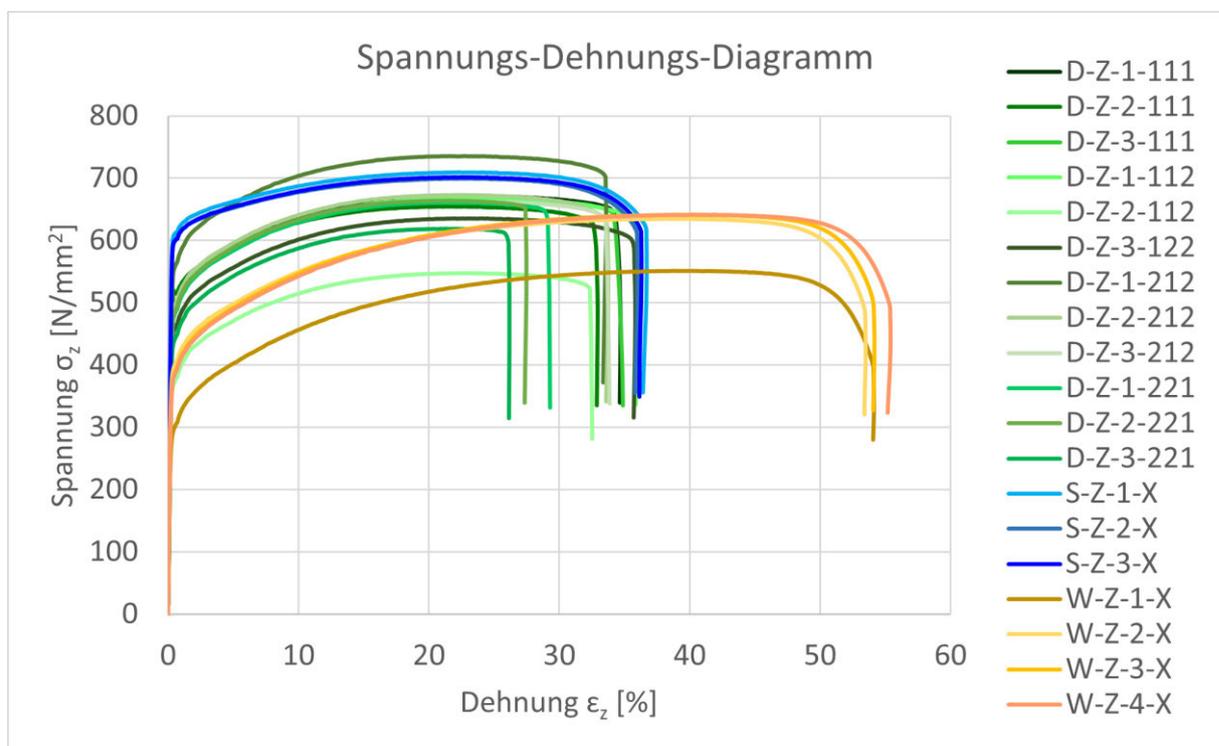


Abbildung 34: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Zugversuches

Die Proben aus gewalztem Stahl weisen Abweichungen von  $45,43 \text{ N/mm}^2$  bei der Dehngrenze,  $44,09 \text{ N/mm}^2$  bei der Zugfestigkeit und  $0,74 \%$  in der Bruchdehnung auf. Im Vergleich dazu liegt der Parametersatz D-Z-212 mit den Standardabweichungen über denen vom gewalzten Stahl. Der Parametersatz D-Z-111 liegt mit der Bruchdehnung über dem von gewalztem Stahl. D-Z-112 liegt mit allen Abweichungen über den W-Z-Proben und D-Z-221 hat ebenfalls eine höhere Bruchdehnung. Die Werte der Abweichungen der SLM-Proben liegen unter denen des gewalzten Stahls.

Wenn die Standardabweichung ohne den abweichenden Wert von W-Z-1-X bei den gewalzten Proben betrachtet wird, stellen sich vergleichbare Werte zu den SLM-Proben ein. Die Abweichung der Dehngrenze würde sich auf  $8,96 \text{ N/mm}^2$  verringern, die Zugfestigkeits-

abweichung zu  $3,46 \text{ N/mm}^2$  ändern und die Bruchdehnung auf den Wert  $0,91 \%$  steigen. Die SLM-Proben haben in der Standardabweichung der Dehngrenze und in der Bruchdehnung weiterhin geringere Werte, jedoch ist die Abweichung der Zugfestigkeit der W-Z-Proben um  $1,27 \text{ N/mm}^2$  geringer als bei den SLM-Proben.

Die DED-Proben weisen ein großes Spektrum an Werten auf. Die Bruchdehnungswerte liegen zwischen  $368 \text{ N/mm}^2$  und  $557 \text{ N/mm}^2$ . Die Zugfestigkeiten zwischen  $547 \text{ N/mm}^2$  und  $736 \text{ N/mm}^2$  und die Bruchdehnung zwischen  $25,9 \%$  und  $35,7 \%$ . Die SLM-Proben liegen mit den Zugfestigkeits- und Bruchdehnungswerten zwischen den Werten der DED-Proben. Die Dehngrenzwerte der SLM-Proben liegen  $40$  bis  $52 \text{ N/mm}^2$  über den Werten der DED-Proben.

Die Bruchdehnung der additiven Proben ist allgemein zu niedrig. Ein möglicher Grund könnte sein, dass die Proben Eigenschaften von hochfesten Stählen annehmen, die eine hohe Streckgrenze jedoch eine geringe Dehnung bis zum Bruch aufweisen. Weiter ist es möglich, dass durch die Herstellungsprozesse eine Kaltverfestigung aufgetreten ist, die zu einer Steigerung der Dehngrenze  $R_{p0,2}$  und der Zugfestigkeit  $R_m$  und zu einer Abnahme der Duktilität des Materials führt. Eine andere Möglichkeit könnten durch den Prozess entstandene Eigenspannungen sein, die die Verformbarkeit beeinträchtigen und zu einem früheren Versagen der Probe führen.

## 6.2 Kerbschlagbiegeversuch

Die Ergebnisse der Prüfungen der Kerbschlagbiegeproben sind unterhalb der Norm und der der Lieferanten. Die Normwerte  $100 \text{ J}$  und  $60 \text{ J}$  stehen für die erzielbaren Werte längs und quer zur Walzrichtung. Die SLM-Proben erreichen einen Höchstwert von  $56 \text{ J}$  und  $1,12 \text{ J/mm}^2$  (S-K-1-X). Die DED-Probe D-K-2-212 hat den geringsten Wert von  $43,2 \text{ J}$  und  $0,86 \text{ J/mm}^2$  und die Probe D-K-3-111 hat den Höchstwert von  $46,6 \text{ J}$  und  $0,93 \text{ J/mm}^2$ , vgl. Tabelle 10.

Die Kerbschlagarbeit der Norm und der Hersteller sind Werte für einen Prüfkörper mit V-Kerbe. Die Prüfkörper mit einer U-Kerbe weisen geringere Spannungszustände auf, wodurch die Kerbschlagarbeit höhere Werte annimmt. [57] Die SLM- und DED-Proben werden aufgrund der Kerbform nur mit den W-K-Proben verglichen. Die Normwerte in Tabelle 10 dienen als Information. Im Vergleich liegen die additiven Proben, obwohl die Kerbschlagarbeit höher sein sollte, unter den Normwerten. Die W-K-X-Proben weisen Maximalwerte von  $135,6 \text{ J}$  und einen Kerbschlagfähigkeitswert von  $2,71 \text{ J/mm}^2$  (W-K-1-X) und Minimalwerte von  $131,7 \text{ J}$  und  $2,63 \text{ J/mm}^2$  auf.

Die W-K-Proben haben einen Mittelwert von  $133,13 \text{ J}$  in der Kerbschlagarbeit und  $2,66 \text{ J/mm}^2$  in der Kerbschlagfähigkeit. Die Mittelwerte der additiven Proben liegen unter denen der W-K-Proben. Die SLM-Proben weisen zu den DED-Proben höhere Mittelwerte von  $55,23 \text{ J}$  und  $1,10 \text{ J/mm}^2$  auf. Unter den DED-Proben hat der Parametersatz D-K-122 die höchsten Mittelwerte mit einer Kerbschlagarbeit von  $45,60 \text{ J}$  und einer Kerbschlagfähigkeit von  $0,91 \text{ J/mm}^2$ . Die geringsten Mittelwerte zeigt der Parametersatz D-K-212 mit  $44,13 \text{ J}$  und  $0,88 \text{ J/mm}^2$ . Die Kerbschlagfähigkeit des Parametersatzes D-K-111 liegt  $0,1 \text{ J/mm}^2$  unter dem Parametersatz

D-K-122, während der Parametersatz D-K-221  $0,1 \text{ J/mm}^2$  über dem Parametersatz D-K-212 liegt.

Die Standardabweichungen der Werte der einzelnen Parametersätze haben im Gegensatz zu den Zugproben geringere Werte und zeigen regelmäßige Wiederholbarkeiten der Werte auf. Die höchste Standardabweichung hat der gewalzte Stahl, der zwischen den Kerbschlagarbeitswerten eine Abweichung von  $2,15 \text{ J}$  hat und in der Kerbschlagzähigkeit von  $0,04 \text{ J/mm}^2$ . Die nächsthöhere Abweichung hat der Parametersatz D-K-111 mit einer Abweichung der Kerbschlagarbeit von  $1,53 \text{ J}$  und einer Kerbschlagzähigkeit von  $0,03 \text{ J/mm}^2$ . Die geringste Standardabweichung hat der Parametersatz D-K-221 mit einer Kerbschlagarbeit von  $0,30 \text{ J}$  und einer Kerbschlagzähigkeit von  $0,01 \text{ J/mm}^2$ . Der Parametersatz D-K-122 weist bei der Standardabweichung der Kerbschlagzähigkeit einen gleichen Wert von  $0,01 \text{ J/mm}^2$  bei einer höheren Kerbschlagarbeit auf. Die anderen Proben ordnen sich zwischen diesen Werten ein.

Alle W-Z-X-Proben haben sich im Versuch verformt, sind jedoch nicht gebrochen. Im Gegensatz dazu sind alle additiven Proben gebrochen. Die additiven Proben liegen mit ihren Werten alle unter den Werten der W-K-X-Proben, was auf eine höhere Sprödigkeit der additiven Proben hinweist. Die SLM-Proben liegen mit den Kerbschlagarbeitswerten zwischen  $54,4 \text{ J}$  (S-K-4-X) und  $56 \text{ J}$  (S-K-1-X) und haben zu den W-K-Proben eine Differenz von  $75,7 \text{ J}$ . Die Kerbschlagzähigkeit hat eine Differenz von  $1,51 \text{ J/mm}^2$  zu dem kleinsten Wert der Proben aus gewalztem Stahl. Die SLM-Proben liegen mit über  $7,8 \text{ J}$  über dem höchsten Wert der DED-Probe (D-K-3-111) und mit  $0,16 \text{ J/mm}^2$  ebenfalls über der Kerbschlagzähigkeit.

Kennwert	Norm KV	W-K-1-X	W-K-2-X	W-K-3-X	$\bar{x}$	s
Kerbschlagarbeit KU [J]	100/60	135,6	131,7	132,1	133,13	2,15
Kerbschlagzähigkeit a [ $\text{J/mm}^2$ ]	1,25/0,75	2,71	2,63	2,64	2,66	0,04
		S-K-1-X	S-K-3-X	S-K-4-X		
Kerbschlagarbeit KU [J]	100/60	56,0	55,3	54,4	55,23	0,80
Kerbschlagzähigkeit a [ $\text{J/mm}^2$ ]	1,25/0,75	1,12	1,11	1,09	1,10	0,02
		D-K-1-111	D-K-2-111	D-K-3-111		
Kerbschlagarbeit KU [J]	100/60	44,3	43,7	46,6	44,87	1,53
Kerbschlagzähigkeit a [ $\text{J/mm}^2$ ]	1,25/0,75	0,89	0,87	0,93	0,90	0,03
		D-K-1-122	D-K-2-122	D-K-3-122		
Kerbschlagarbeit KU [J]	100/60	45,2	46,1	45,5	45,60	0,46
Kerbschlagzähigkeit a [ $\text{J/mm}^2$ ]	1,25/0,75	0,90	0,92	0,91	0,91	0,01
		D-K-1-212	D-K-2-212	D-K-3-212		
Kerbschlagarbeit KU [J]	100/60	43,7	43,2	45,5	44,13	1,21
Kerbschlagzähigkeit a [ $\text{J/mm}^2$ ]	1,25/0,75	0,87	0,86	0,91	0,88	0,02
		D-K-1-221	D-K-2-221	D-K-3-221		
Kerbschlagarbeit KU [J]	100/60	44,6	44	44,3	44,30	0,30
Kerbschlagzähigkeit a [ $\text{J/mm}^2$ ]	1,25/0,75	0,89	0,88	0,89	0,89	0,01

Tabelle 10: Übersicht der Ergebnisse aus dem Kerbschlagbiegeversuch

Die Kerbschlagarbeit und -zähigkeitswerte der DED-Proben liegen zwischen 43,2 J und 46,6 J sowie 0,86 J/mm<sup>2</sup> und 0,93 J/mm<sup>2</sup> mit den Minimal- und Maximalwerten aller DED-Proben, welche die Proben D-K-2-212 und D-K-3-111 sind. Die D-K-111-Proben haben einen Unterschied zu dem niedrigsten Wert der W-K-Proben von 85,1 J und einen Unterschied der Kerbschlagzähigkeit von 1,70 J/mm<sup>2</sup>. Der Parametersatz D-K-122 hat einen Unterschied von 85,1 J und 1,71 J/mm<sup>2</sup> zu den W-K-Proben. Die Proben D-K-212 und D-K-221 haben eine Abweichung zum gewalzten Stahl von 86,2 J und 87,1 J sowie 1,72 J/mm<sup>2</sup> und 1,74 J/mm<sup>2</sup>.

Die Kerbschlagbiegeproben weisen alle einen Verformungsbruch auf, zu erkennen an den Scherlippen, die mit einem Winkel von ca. 45° nach innen zur Bruchfläche stehen und der zerklüfteten Bruchoberfläche. [27] Ein möglicher Grund, warum die Kerbschlagarbeit so gering im Gegensatz zu den W-K-Proben ausfällt, können Eigenspannungen sein, die durch den Herstellungsprozess entstehen. Weiter zeigen die DED-Proben eine porenartige Bruchoberfläche. Poren können das Material schwächen, wodurch die Kerbschlagarbeit geringer ausfällt. Weiter sind die Schichten der DED-Proben jeweils um 90° gedreht. Eine Schichtrichtung verläuft mit und eine senkrecht zur Schlagrichtung. Demnach bieten die Schichten, die senkrecht zur Schlagrichtung zeigen, einen größeren Widerstand gegen den Schlaghammer als die Schichten, die zur Schlagrichtung ausgerichtet sind. Die Schlagarbeit wird auf den gesamten Prüfkörper bezogen. Durch die Schichten, die einer Anisotropie gleichkommt, kann die Kerbschlagarbeit geringer ausfallen. Bei den SLM-Proben können ähnliche Effekte auftreten. Im Unterschied zu den DED-Proben haben die SLM-Proben mehr Varianz in der Schichtausrichtung, wodurch isotropere Eigenschaften entstehen können und damit höhere Kerbschlagwerte.

### 6.3 Druckversuch

Für die Ergebnisse des Druckversuches stehen keine Normwerte zur Orientierung zur Verfügung. Die Proben werden direkt mit den Ergebnissen der gewalzten Stahlproben verglichen. Die Proben sind bis zur Endbelastung der Maschine geprüft. Bei einer Belastung von 400 bar, was einer Kraft von 12566,37 N und damit einer Druckspannung von 40 N/mm<sup>2</sup> entspricht, bewirkt die Stauchung  $\epsilon_d$  eine elastische Verformung und die Probe verformt sich zurück, vgl. Abbildung 35. Zur Vollständigkeit ist in der Abbildung die Auswirkung bei 1500 bar dargestellt. Diese Belastung entspricht einer Kraft von 47123,85 N und demnach einer Druckspannung von 150 N/mm<sup>2</sup>, die ebenfalls im elastischen Bereich liegt. Bis zu einer Belastung von 330 kN verformen sich die Proben, ohne dabei zu versagen.

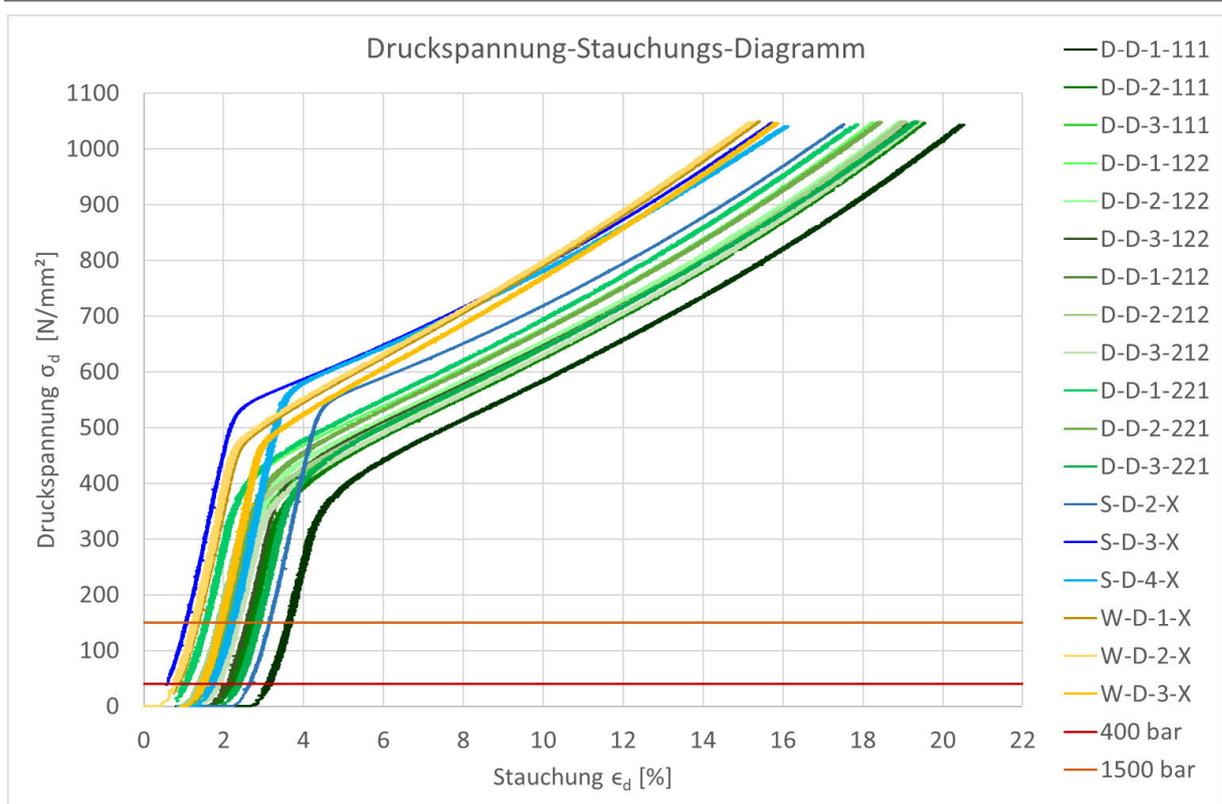


Abbildung 35: Druck-Spannungs-Diagramm des Druckversuches mit 400 bar- und 1500 bar-Vergleichsline

Die W-D-Proben haben als maximalen Stauchungswert 15,883 % (W-D-3-X) und als minimalen Wert 15,266 % (W-D-2-X) bei einem Prüfweg von 4,744 mm und 4,58 mm, vgl. Tabelle 11. Der Minimalwert der Stauchung der SLM-Proben liegt bei 15,743 % (S-D-3-X) mit einem Prüfweg von 4,719 mm und damit zwischen den Werten des gewalzten Stahls. Der Maximalwert der SLM-Proben hat eine Stauchung von 17,539 % mit einem Prüfweg von 5,140 mm (S-D-2-X). Die DED-Proben haben allgemein eine höhere Stauchung als die SLM- und W-D-Proben. Der höchste Wert der DED-Proben erreicht eine Stauchung von 20,526 % mit einem Prüfweg von 6,125 mm (D-D-1-111). Den niedrigsten Wert hat die Probe D-D-1-221 mit einer Stauchung von 17,890 % und einem Prüfweg von 5,333 mm.

Die Mittelwerte der DED-Proben liegen über den Werten der W-D- und SLM-Proben. Der Parametersatz D-D-111 weist die höchsten Mittelwerte bei der Stauchung mit 19,732 % und beim Prüfweg mit 5,889 mm auf. Die niedrigsten Werte unter den DED-Proben zeigt der Parametersatz D-D-221 mit einer Stauchung von 18,582 % und einem Prüfweg von 5,548 mm. Von allen Proben haben die W-D-Proben die geringsten Mittelwerte mit einer Stauchung von 15,523 % und einem Prüfweg von 4,649 mm. Die SLM-Proben liegen zwischen den DED- und den W-D-Proben und weisen einen Mittelwert der Stauchung von 16,473 % und einen Prüfweg von 4,897 mm auf.

Kennwerte	W-D-1-X	W-D-2-X	W-D-3-X	$\bar{x}$	s
Stauchung $\epsilon_d$ [%]	15,420	15,266	15,883	15,523	0,321
Prüfweg [mm]	4,622	4,580	4,744	4,649	0,085
	S-D-2-X	S-D-3-X	S-D-4-X		
Stauchung $\epsilon_d$ [%]	17,539	15,743	16,136	16,473	0,944
Prüfweg [mm]	5,140	4,719	4,832	4,897	0,218
	D-D-1-111	D-D-2-111	D-D-3-111		
Stauchung $\epsilon_d$ [%]	20,526	19,559	19,110	19,732	0,724
Prüfweg [mm]	6,125	5,834	5,708	5,889	0,214
	D-D-1-122	D-D-2-122	D-D-3-122		
Stauchung $\epsilon_d$ [%]	18,269	19,026	19,082	18,792	0,454
Prüfweg [mm]	5,464	5,687	5,716	5,622	0,138
	D-D-1-212	D-D-2-212	D-D-3-212		
Stauchung $\epsilon_d$ [%]	19,307	19,082	19,475	19,288	0,197
Prüfweg [mm]	5,775	5,708	5,851	5,778	0,072
	D-D-1-221	D-D-2-221	D-D-3-221		
Stauchung $\epsilon_d$ [%]	17,890	18,479	19,377	18,582	0,749
Prüfweg [mm]	5,333	5,518	5,792	5,548	0,231

Tabelle 11: Übersicht der Ergebnisse aus dem Druckversuch

Der Probensatz D-D-111 hat ein Stauchungsunterschied zum höchsten Wert der W-D-Proben von 3,277 % und eine Prüfwegdifferenz von 0,964 mm. Die Proben D-D-122 haben einen Unterschied von 2,386 % mit 0,720 mm zu den gewalzten Stahl Proben. Die Probensätze D-D-212 und D-D-221 haben zum höchsten Wert einen Unterschied von 3,199 % zusammen mit einer Differenz des Prüfwegs von 0,964 mm sowie einen Unterschied von 2,007 % mit einer Prüfwegdifferenz von 0,589 mm.

Alle Standardabweichungen liegen unter 1 % oder 1 mm. Die höchste Standardabweichung haben die SLM-Proben in der Stauchung mit 0,944 % und der Parametersatz D-D-221 mit 0,231 mm beim Prüfweg. Die Werte zeigen demnach wiederholbare Werte auf.

Allgemein weisen die additiv gefertigten Proben eine größere Verformbarkeit bei einer Belastung von 330 kN auf, was an den Stauchungswerten zu erkennen ist.

#### 6.4 Schliffbilder

Die Schliffbildproben je Parametersatz sind in einem Harzmaterial zusammengefasst. In diesen sind alle Proben gleich angeordnet. Links ist die Z-Y-Ebene, rechts die Z-X-Ebene und unten die X-Y-Ebene. Die Aufnahmen, Abbildung 36, sind mit einem Stereomikroskop aufgenommen. Mit einem Auflichtmikroskop werden auf der Ebene Z-Y und Z-X drei Flächenmessungen und zwei Messungen auf der X-Y-Ebene von 15,47 mm<sup>2</sup> bei einer 25-fachen Vergrößerung aufgenommen und die Flächen auf Unreinheiten geprüft.

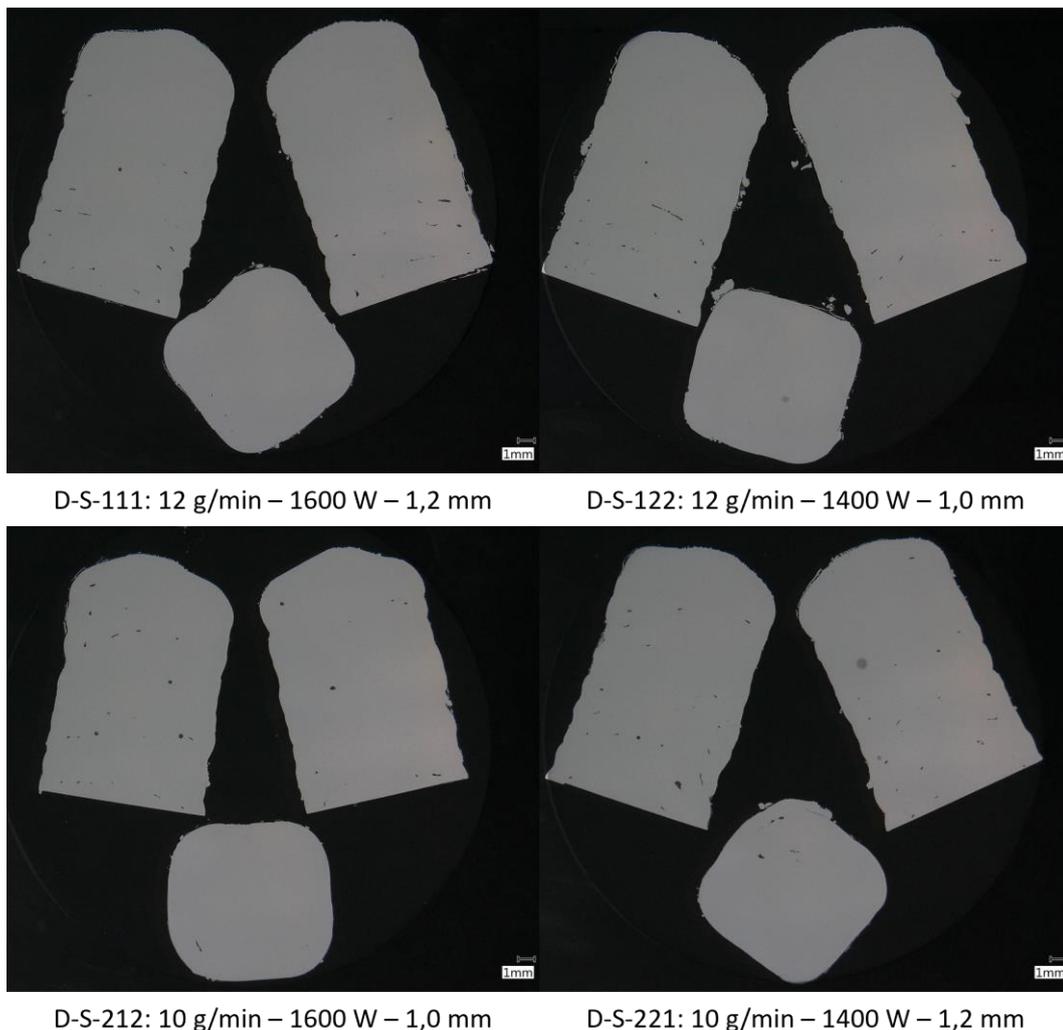


Abbildung 36: Polierte Schlibfbilder je Parametersatz, Aufnahme mit Stereomikroskop

In Tabelle 12 sind die Mittelwerte der Messungen aufgeführt. Die Mittelwerte der Flächenverhältnisse der Proben liegen alle unter 1 %, wodurch eine Dichtigkeit des Materials von über 99,0 % festgestellt werden kann. Die meisten Unreinheiten können als Oxideinschlüsse identifiziert werden. Die Probe D-S-221 hat zwei Einzelwerte, die über 1 % liegen (vgl. Anhang J). Der eine Wert beträgt 1,31 % und ist der dritte Messwert der Z-Y-Ebene. Der weitere Wert beträgt 1,36 % und ist der erste Messwert der X-Y-Ebene. Die weiteren Messungen der Probe liegen bei der Z-Y-Ebene bei 0,46 % und 0,31 %. Die zweite Messung der X-Y-Ebene beträgt 0,04 %.

Die Flächenverhältnisse der Z-Y-Ebene liegen zwischen 0,17 % und 0,69 %. Das Flächenverhältnis der Z-X-Ebene liegt innerhalb der Differenz der Z-Y-Ebene mit 0,18 % bis 0,35 %. Die X-Y-Ebene hat im Parametersatz D-S-111, D-S-122 und D-S-212 ein Flächenverhältnis zwischen 0,05 % und 0,07 %. Der Parametersatz D-S-221 hat ein Verhältnis von 0,70 % durch die erste Messung, die über 1 % liegt. Die zweite Messung reiht sich in die Reihe von unter 0,07 % ein.

Das kleinste Flächenverhältnis in der Z-Y-Ebene hat der Parametersatz D-S-111 mit 0,17 %. Das größte Verhältnis hat der Parametersatz D-S-221 mit 0,69 %. Der Parametersatz D-S-221 hat in

allen Ebenen die höchsten Werte. In der Z-X-Ebene hat der Parametersatz D-S-122 den geringsten Wert von 0,18 %.

Mittelwert D-S-111	Z-Y-Ebene	Z-X-Ebene	X-Y-Ebene
Flächensumme [mm <sup>2</sup> ]	26507,14	47510,87	7977,12
Gesamtfläche [mm <sup>2</sup> ]	15470778,41	15470778,41	15470778,41
Flächenverhältnis [%]	0,17	0,31	0,05
Mittelwert D-S-122	Z-Y-Ebene	Z-X-Ebene	X-Y-Ebene
Flächensumme [mm <sup>2</sup> ]	51324,84	28865,35	9790,10
Gesamtfläche [mm <sup>2</sup> ]	15470778,41	15470778,41	15470778,41
Flächenverhältnis [%]	0,33	0,18	0,07
Mittelwert D-S-212	Z-Y-Ebene	Z-X-Ebene	X-Y-Ebene
Flächensumme [mm <sup>2</sup> ]	68302,41	33565,68	8609,65
Gesamtfläche [mm <sup>2</sup> ]	15470778,41	15470778,41	15470778,41
Flächenverhältnis [%]	0,44	0,22	0,06
Mittelwert D-S-221	Z-Y-Ebene	Z-X-Ebene	X-Y-Ebene
Flächensumme [mm <sup>2</sup> ]	107245,26	54343,80	108106,10
Gesamtfläche [mm <sup>2</sup> ]	15470778,41	15470778,41	15470778,41
Flächenverhältnis [%]	0,69	0,35	0,70

Tabelle 12: Mittelwerte der Flächenmessungen aus den Unreinheiten der Parametersätze

Die Unreinheiten sind in den Proben verschieden verteilt. Bei D-S-111 und D-S-122 sind die Unreinheiten in der unteren Hälfte und bei D-S-212 und D-S-221 verteilt auf der gesamten Probe.

In Abbildung 37 sind die Proben geätzt dargestellt. Der Schichtaufbau ist in den einzelnen Proben gut zu erkennen. Weiter ist zu erkennen, dass die Kontur der Proben nicht parallel zur Ebene ist, sondern das Schweißgut an den Rändern hinuntergelaufen ist. In den Proben der Z-Y- und Z-X-Ebene sind in Parametersätze D-S-111 und D-S-122 in den oberen Bereichen keine Unreinheiten zwischen den Schichten zu erkennen. Das untere Drittel der Proben weist Unreinheiten in den Schichten auf. Im Gegensatz dazu weisen die Parametersätze D-S-212 und D-S-221 über die gesamten Proben Unreinheiten auf, die sich in kleinen runden oder leicht länglichen Formen zeigen. Die Parametersätze D-S-111 und D-S-122 weisen länglichere Unreinheiten zwischen den Schichten auf.

Die Proben aus D-S-111 und D-S-122 weisen in der X-Y-Ebene keine sichtbaren Unreinheiten in den Schichtenübergängen auf. Die Parametersätze D-S-212 und D-S-221 haben in den Rundungen der Proben kleine, schichtbare Unreinheiten zwischen den Schichten.

Die ersten sichtbaren Schichten haben ein höheres Aufmaß als die folgenden Schichten und sind mit höheren Laserleistungen geschweißt worden. Durch die höhere Laserleistung kann mehr Pulver geschmolzen werden, jedoch entsteht dabei eine größere Wärmeeinflusszone, wodurch unter anderem Poren entstehen. Vor allem bei einer zu hohen Leistung bei zu wenig Pulver entsteht dieser Effekt. Eine zu geringe Schicht wird aufgebaut und die folgende Schicht

kann nicht vernünftig angebunden werden oder Legierungselemente verdampfen in der Schmelze. [29]

Die Proben sollen eine Höhe von 15 mm haben. Durch die Schichthöhe von 1,2 mm kann dieser Wert nicht erreicht werden und es muss eine Schicht mehr gefahren werden und ist damit allgemein zu hoch. Jedoch ist zu erkennen, dass die Proben selbst nach dem Trennen von der Substratplatte höher als 15 mm sind. Demnach entspricht eine Schichthöhe nicht den geforderten 1,0 oder 1,2 mm und die Aufbaurate des Materials ist zu hoch.

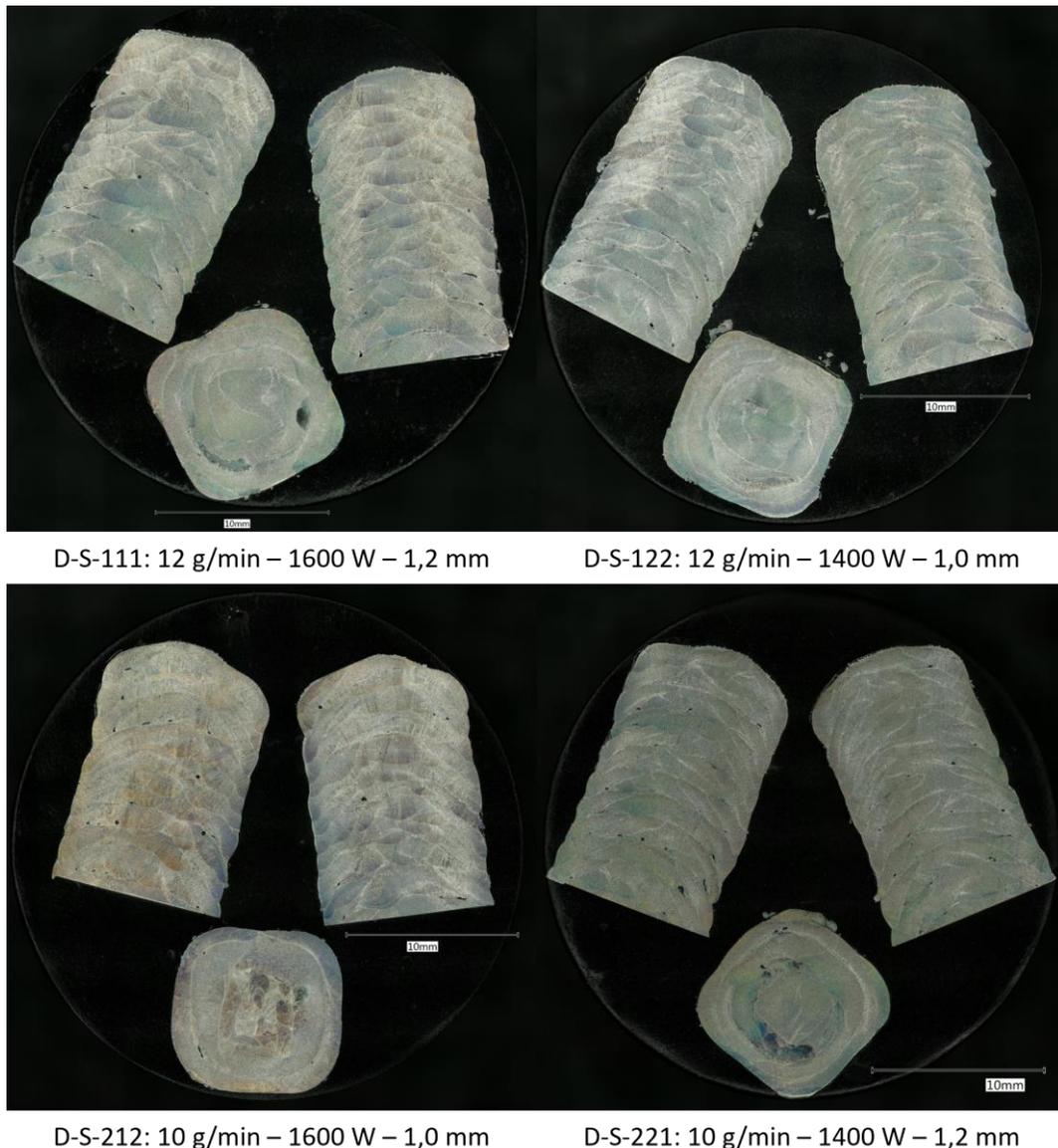


Abbildung 37: Geätzte Schliffbilder je Parametersatz, Aufnahme mit Stereomikroskop

### 6.5 Zustand der additiven Proben nach den Versuchen

Einige der DED-Proben weisen nach den Versuchen ein wiederholendes Muster auf, siehe Abbildung 38. Das Muster besteht aus parallellaufenden Rissen in der Oberfläche. Diese weisen einen Abstand von ca. 2 mm auf und entspricht damit dem eingestellten Abstand der Bahnen der Schweißstrategie von 1,8 – 2,0 mm.

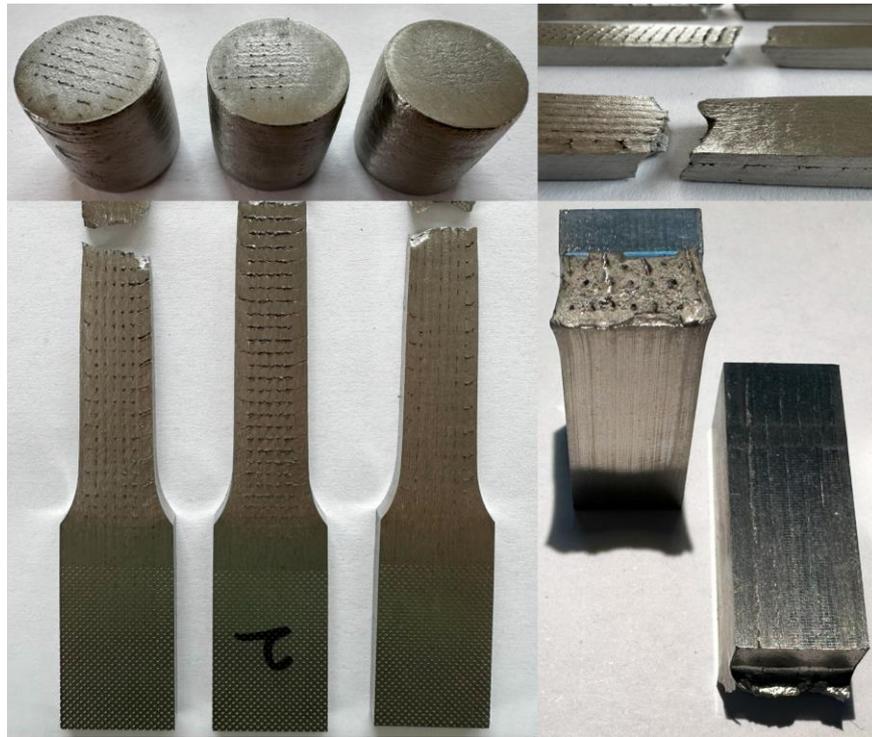


Abbildung 38: Entstehendes Muster bei den Versuchen

Die Risse sind verschieden stark ausgeprägt. Die Druckproben weisen bei einigen Proben einseitig das Muster auf oder eine raue Oberfläche. Die Risse der Zugproben verlaufen parallel oder rechtwinklig zur Zugrichtung. Die Kerbschlagbiegeproben weisen keine Risse auf, jedoch ist der Schichtaufbau durch glatte Oxideinschlüsse sichtbar. In der Bruchfläche sind bei allen DED-Proben Löcher, die den Abstand des Schichtaufbaus aufweisen.

Die Risse bei den Druck- und Zugproben zeigen sich in der äußersten Schicht, die durch die spanende Bearbeitung entsteht. Sollte die letzte Schicht parallel zur Zugrichtung verlaufen, sind die Risse weniger ausgeprägt als rechtwinklig zur Zugrichtung. Die Schichten reißen demnach entlang der Bahnüberlappung, wo die schwächste Verbindung entsteht, dadurch, dass die Schichten sich dort vermischen, aber nicht komplett verbinden.

Die DED-Proben der Druck- und Zugproben weisen im Gegensatz zu den SLM- oder W-Proben eine viel rauere Oberfläche auf. Der Schichtaufbau ist bereits nach dem spanenden Prozess durch die Oxide in der Schichtverbindung zu sehen. An diesen Stellen reißen bei den Druckproben durch den Druck die Verbindungen auf und schieben sich vermutlich leicht übereinander, wodurch die raue Oberfläche entsteht. Das Muster auf der Deckfläche entstand auf der Unterseite der Probe bei der Prüfung. Voraussichtlich entsteht das Muster dadurch, dass die Schichten nach unten gedrückt werden und sich die Bahnen durch den Druck aufweiten und damit die Verbindungen der Schichten aufreißen.

Bei den Zugproben ist es voraussichtlich das gleiche Prinzip. Durch die Zugkraft reißen die Verbindungen auf, da diese die schwächsten Stellen innerhalb der Schicht darstellen. Die Proben weisen einen Spaltbruch auf. [2] In einem Spaltbruch finden kaum Versetzungen statt. Trotzdem gibt es in dem Übergang von elastischem Bereich zu dem plastischen Bereich

Unstetigkeiten im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Abbildung 39), die auf eine Lüdersbanddehnung hinweisen könnten. Jedoch weisen die Zugproben keine typischen Dehnungen von  $45^\circ$  zur Zugrichtung auf der Oberfläche auf, wodurch eine Lüdersbanddehnung ausgeschlossen werden kann. [49]

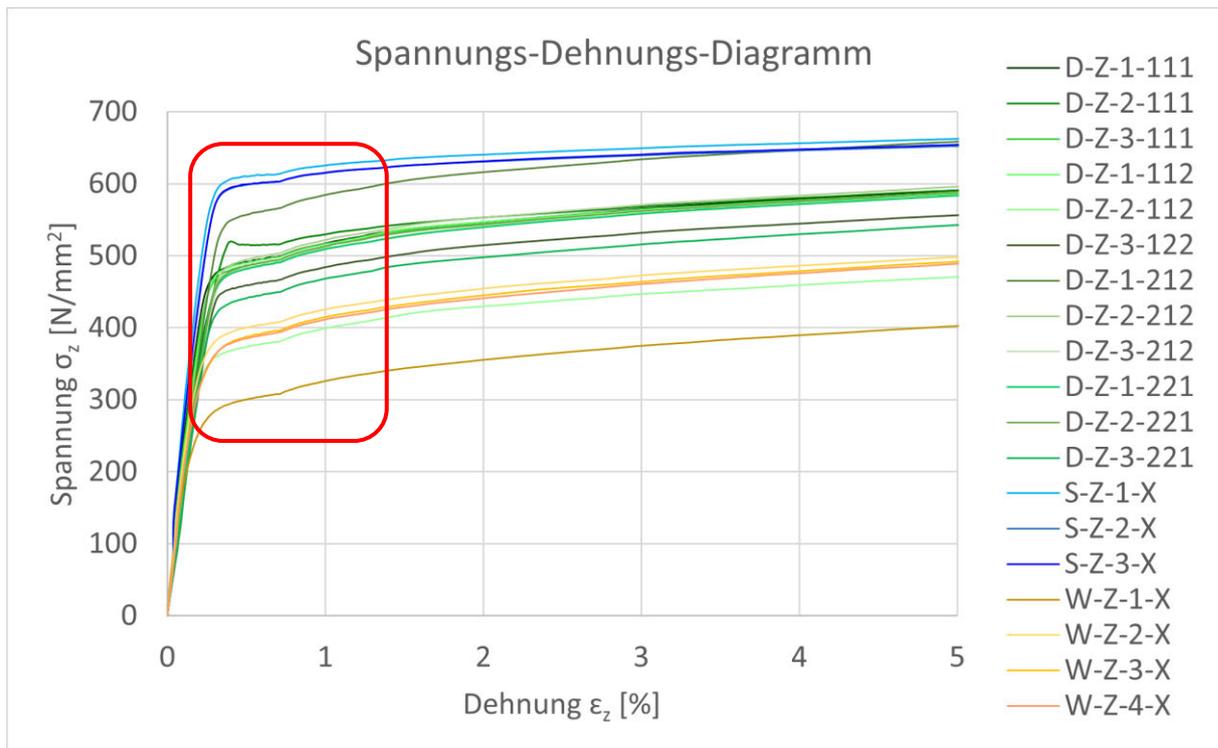


Abbildung 39: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit Markierung (rot) der Unstetigkeiten

## 6.6 Auswirkung der Parameter

Die Mittelwerte der Ergebnisse der Versuche werden in Tabelle 13 zusammen mit der Standardabweichung für die DED-Proben dargestellt.

Die Parameter zeigen keine Regelmäßigkeit bei den Standardabweichungen. Die minimalen und maximalen Werte der Standardabweichung variieren je Parametersatz. Eine niedrige Standardabweichung bietet den Vorteil, dass die Werte eine gute Wiederholbarkeit innerhalb eines Prozesses aufweisen.

Die geringste Standardabweichung innerhalb der Zugversuche hat der Parametersatz D-111 in der Dehngrenze und in der Zugfestigkeit. In der Bruchdehnung hat der D-212 die geringste Standardabweichung. Die höchste Standardabweichung hat der Parameter D-112 in allen drei Werten des Zugversuches. Innerhalb des Kerbschlagbiegeversuches hat der Parameter D-221 die geringste Standardabweichung und D-111 die höchste. Bei den Druckproben hat D-212 die geringsten Standardabweichungen und D-221 die höchste Abweichung.

Der Parametersatz mit den besten Ergebnissen über die gesamten Versuche ist der Parametersatz D-112. Im Zugversuch hat dieser die geringsten Werte, jedoch im Kerbschlagversuch die höchsten Werte. Im Druckversuch hat der Parametersatz die zweitniedrigsten

Stauchungswerte. D-112 ist der Parametersatz mit den höchsten Werten in der Standardabweichung. Der zweitbeste Parametersatz ist D-221. Er weist im Vergleich mit den anderen Parametersätzen Werte im mittleren Bereich auf und hat eine gute Standardabweichung. D-112 weist ebenfalls in der Dichtigkeit gute Werte auf und zeigt die geringste Stauchung. D-221 weist nach der Flächenanalyse die meisten Unreinheiten auf und kann trotzdem gute Werte in den Versuchen realisieren.

Kennwert	D-111		D-112		D-212		D-221	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	496,0	18,36	438,0	62,45	510,3	41,02	469,0	25,51
Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	664,7	8,50	617,0	62,70	690,7	39,58	648,0	25,16
Bruchdehnung A [%]	34,0	1,10	34,5	1,85	33,4	0,25	27,4	1,62
Kerbschlagarbeit KU [J]	44,87	1,53	45,60	0,46	44,13	1,21	44,30	0,30
Kerbschlagzähigkeit [J/cm <sup>2</sup> ]	0,90	0,03	0,91	0,01	0,88	0,02	0,89	0,01
Stauchung $\epsilon_d$ [%]	19,732	0,722	18,792	0,454	19,288	0,197	18,582	0,749
Prüfweg [mm]	5,889	0,214	5,622	0,14	5,778	0,072	5,548	0,231
Pulvermenge [g/min]	12		12		10		10	
Laserleistung [W]	1600		1400		1600		1400	
Layerhöhe [mm]	1,2		1		1		1,2	

Tabelle 13: Zusammenfassung der Mittelwerte und Standardabweichungen der DED-Ergebnisse

Allgemein sind alle Parametersätze nicht optimal. In weiteren Versuchen sollte sich auf die Optimierung der Parametersätze D-112 und D-221 konzentriert werden. Eine geringere Laserleistung von 1400 W scheint demnach bessere Ergebnisse für das Material 1.4404 zu liefern als 1600 W. Die Parametersätze mit 1600 W liefern in der Gesamtheit aller Werte schlechtere Ergebnisse als die Parametersätze mit 1400 W. Weiter kann mit mehr Pulver ein Aufbau mit weniger Unreinheiten realisiert werden. Folgend scheint es, dass die geringere Schichthöhe eine größere Durchmischung der Schichten ergibt. Das ist demnach realistisch, da der Laser die Energie auf einen Punkt fokussiert und einen geringen Abstand zur vorherigen Schicht hat und somit ein Aufschmelzen mit mehr Energie möglich ist.

## 7. Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der Bruchdehnung und der Kerbschlagzähigkeit sind zu gering und nicht ausreichend. Die weiteren mechanischen Kennwerte sind gut und entsprechen der Norm. Jedoch sind die Zugfestigkeitswerte der SLM-Proben zu hoch und haben Festigkeitswerte von  $700 \text{ N/mm}^2$  was kaltverfestigtem Material mit dem Zusatz +C700 entspricht. Weiter sind drei DED-Werte über  $670 \text{ N/mm}^2$  und einer ebenfalls über  $700 \text{ N/mm}^2$ .

Bei einer Auslegung von Bauteilen unter einer schlagartigen Belastung müssen die schlechten Kerbschlagarbeits- und Kerbschlagzähigkeitswerte berücksichtigt werden. Eine Impellerherstellung ist bedingt möglich, die Zugproben weisen hohe Werte in der Dehnung und Zugfestigkeit auf, jedoch geringe Werte in der Bruchdehnung. Folglich können hohe Kräfte ausgehalten werden, aber ein Versagen kann schneller eintreten als bei einem Impeller aus gewalztem Stahl. Mit den gewählten Parametern und dem Verarbeitungsprozess bietet die additive Herstellung keine expliziten Vorteile, außer dass Komponenten als ein Bauteil realisiert werden können. Um eine Aussage über die Lebensdauer eines additiven Produktes treffen zu können, muss mindestens eine Simulation mit den Erkenntnissen aus den Versuchen erfolgen oder Tests mit additiv hergestellten Impellern aus dem LENS-Verfahren durchgeführt werden.

Im spanenden Prozess aber auch beim Schweißen entstehen Eigenspannungen in den Bauteilen, welche zu hohen Zugfestigkeiten führen können. In einem weiteren Versuchsdurchgang sollten die Proben vor der Prüfung oder nach dem additiven Herstellungsprozess spannungsarm- oder lösungsgeglüht werden, um Kaltverfestigungen zu vermeiden.

Weiter war eine Zerstörung der Druckproben mit einer Belastung von 330 kN nicht realisierbar. Jedoch konnte die elastische Verformung bei 400 bar eindeutig erkannt werden. In einem weiteren Versuchsdurchgang können Druckproben mit kleineren Dimensionen erstellt oder eine Presse mit einer größeren Kraft gewählt werden, um einen vollständigen Druckversuch bis zum Bruch oder Riss zu realisieren, um abschließend eine vollständige Aussage über das Druckverhältnis tätigen zu können. Zu prüfen wäre weiter, ob sich die Schichtverbindungen im elastischen Bereich bei einer zyklischen Belastung, wie beim Spritzgießen, aufweiten und aufreißen würden, wie es bei den Druckproben zu sehen ist.

Die Kerbschlagbiegeproben sollten neben einer Wärmebehandlung, wenn möglich mit einer V-Kerbe, zusätzlich geprüft werden. Dadurch können Aussagen über sicherheitsrelevante Bauteile getroffen werden, die keine Abrundungen sondern scharfkantige Übergänge haben. Weiter sollte der Kerbschlagbiegeversuch bei verschiedenen Temperaturbereichen durchgeführt werden, um ein Materialverhalten bei Minus- und hohen Plusgraden tätigen zu können.

Weiter sollten die Parameter in Kombination getestet werden. Die Taguchi-Methode bietet einen guten Überblick über die Auswirkungen, jedoch kann diese durch einen vollfaktoriellen

Versuchsplan ergänzt werden, um über die restlichen Parameterkombinationen eine vollumfassende Aussage zu treffen. Alternativ wäre es möglich, sich auf die beiden Parameter mit 1400 W Laserleistung konzentrieren, da diese Leistung bessere Ergebnisse liefert als die Versuche mit 1600 W. Anlehnend an einen vollfaktoriellen Versuchsplan wären dies die Parameter mit 10 g/min, 1400 W und 1,0 mm und 12 g/min, 1400 W und 1,2 mm.

Sobald eine bessere Beherrschung der verschiedenen Parameter der Maschine sichergestellt ist, wäre es weiter interessant, den verwendeten Taguchi-Versuchsplan ein weiteres Mal durchzuführen und alle Proben in einer anderen Ebene auszurichten. Um damit weitere Aussagen über die Schichtenbindung und Festigkeit der Ebenen treffen zu können. Weiter wäre es auch interessant, Parameter wie die Schutzgasförderung oder Bahnüberlappung zu variieren, um die benötigte Schutzgasfördermasse sowie die minimale und maximale Bahnüberlappung herauszufinden.

Im Rahmen einer weiteren Arbeit könnte für die Proben auf der SLM-Maschine ein Parametersatz definiert werden für ein Schachbrettmuster. Dieser liefert geringere Eigenspannungen als die Streifenbelichtung und könnte bessere Ergebnisse der Kerbschlagarbeit und Bruchdehnung bringen.

## Literaturverzeichnis und Quellenverzeichnis

- [1] ADAMOS: ADAMOS – der digitale Marktplatz für die Industrie, <https://www.adamos.com/>, Abruf am 24.06.2024
- [2] Biallas, G.: Vorlesungsunterlagen Werkstoffprüfung, 1. Mechanisch-technologische Prüfungen, WiSe 2023/2024
- [3] Cimatron Technologies GmbH: Durchgängige CAD-/CAM-Software für den Werkzeugbau und Formenbau, <https://www.cimatron.com/de>, Abruf am 24.06.2024
- [4] DIN EN – Norm 10088: Nichtrostende Stähle – Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle, April 2024
- [5] DIN EN – Norm 10088: Nichtrostende Stähle – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung, Januar 2022
- [6] DIN EN ISO – Norm 148: Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy - Teil 1: Prüfverfahren, Mai 2017
- [7] DIN EN ISO/ASTM – Norm 52900: Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie, März 2022
- [8] DIN-Norm 50106: Prüfung metallischer Werkstoffe – Druckversuch bei Raumtemperatur, Februar 2023
- [9] DIN-Norm 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben, August 2022
- [10] DIN-Norm 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung, Dezember 2022
- [11] DMG MORI ACADEMY: Lasertec 125 3D hybrid Training manual, Bielefeld, 2016
- [12] DMG MORI ACADEMY: Training Operation LASERTEC 30 SLM, Bielefeld, Juni 2020
- [13] DMG MORI AKTIENGESELLSCHAFT: Willkommen bei DMG MORI - der Global One Company!, <https://de.dmgmori-ag.com/unternehmen/konzern>, Abruf am 12.06.2024
- [14] DMG MORI: Broschüre, Additive Technologies, Additive Manufacturing, Reinvent Your Metal Production
- [15] DMG MORI: Digitale Transformation (DX) – Wettbewerbsvorteile generieren, <https://de.dmgmori.com/produkte/digitalisierung/celos-x>, Abruf am 12.06.2024

- [16] DMG MORI: DURCHGÄNGIGE DIGITALISIERUNGSLÖSUNGEN, <https://de.dmgmori.com/news-und-media/blog-und-stories/magazin/technology-excellence-01-2018/celos-von-dmg-mori>, Abruf am 12.06.2024
- [17] DMG MORI: LASERTEC 125 DED hybrid <https://de.dmgmori.com/produkte/maschinen/additive-manufacturing/pulverdueseverfahren/lasertec-125-ded-hybrid>, Abruf am 17.05.2024
- [18] DMG MORI: Produktionsstandort Bielefeld, <https://de.dmgmori.com/unternehmen/standorte/produktionsstandorte/bielefeld>, Abruf am 12.06.2024
- [19] Evers, M.: Dichte & Porosität in der additiven Fertigung: Ein tiefgreifendes Verständnis <https://www.dichtewaage.de/blog/dichte-porosit%C3%A4t-in-der-additiven-fertigung-ein-tiefgreifendes-verst%C3%A4ndnis>, Abruf am 22.05.2024
- [20] Fraunhofer IPT: Laserbearbeitungskopf »LMD-W-20-L«, <https://www.ipt.fraunhofer.de/de/angebot/sondermaschinen/laserbearbeitungskopf-lmd-w-20-l.html>, Abruf am 27.05.2024
- [21] Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion, Carl Hanser Verlag, München, 2016
- [22] Gebhardt, A.; Kessler, J.; Schwarz, A.: Produktgestaltung für die additive Fertigung, Carl Hanser Verlag, München, 2019
- [23] Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, D.: Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing, Springer, New York, Heidelberg, Dodrecht, London, Seite 250 – 252, 2015
- [24] GSI: Internationaler Schweissfachingenieurlehrgang (SFI) Hauptgebiet 1, Abruf am 21.05.2024
- [25] GTV: Original Betriebsanleitung Pulverförderer, Luckenbach
- [26] Gumenyuk, A.; Rethmeier, M.; Graf, B.: Verschleißschutz im Werkzeugbau mittels Laser-Pulver-Auftragschweißen, [https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2014/02/24\\_graf\\_verschleisschutz\\_02j2014/24\\_graf\\_verschleisschutz\\_02j2014.php](https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2014/02/24_graf_verschleisschutz_02j2014/24_graf_verschleisschutz_02j2014.php), Abruf am 08.06.2024
- [27] Hahn, F.: Werkstofftechnik-Praktikum: Werkstoffe prüfen und verstehen, Carl Hanser Verlag, München, Kapitel 6, 2015
- [28] HD Sonderoptiken für die Lasertechnik: Zyklon, <https://hd-sonderoptiken.de/produkte/details/zyklon/>, Abruf am 03.06.2024

- [29] Heilmann, M.: Temperaturadaptive Prozessauslegung für das Laser-Pulver-Auftragschweißen, Hamburg, Seite 15 -17, Springer Vieweg, 2023
- [30] Höganäs: Datenblatt, forAM® 316L 15-45 VG, Austenitic stainless steel powder for Additive Manufacturing, 2022
- [31] Höganäs: PowderFinder, <https://www.hoganas.com/de/powder-technologies/additive-manufacturing-metal-powders/powderfinder/>, Abruf am 24.05.2024
- [32] Hügel, H.; Graf, Th.: Laser in der Fertigung: Strahlenquellen, Systeme, Fertigungsverfahren, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [33] Karl, A.: Laserauftragschweißen hochlegierter Duplexstähle, Universitätsverlag Ilmenau, 2014
- [34] Klahn, Ch.; Meboldt, M.: Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung: Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten, Vogel Communications Group, Würzburg, 2021
- [35] Klein, B.: Versuchsplanung – Design of Experiments, Einführung in die Taguchi- und Shainin-Methodik De Gruyter Oldenbourg, Berlin, Bosten, 2021
- [36] Lachmayer, R.; Lippert, R.: Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung, Springer Vieweg, Berlin, 2020
- [36] Lachmayer, R.; Rettschlag, K.; Kaierle, St.: Konstruktion für die Additive Fertigung 2019, Springer Vieweg, Berlin, Seite 213, 2020
- [37] Laser Components: Einsatzbereiche der dichroitischen Spiegelbeschichtungen, <https://www.lasercomponents.com/de/produkt/dichroitische-spiegel>, Abruf am 24.05.2024
- [38] laserline: LDM-Serie, <https://www.laserline.com/de-int/ldm-serie/>, Abruf am 04.06.2024
- [39] Liedtke-Scheffler, V.: Persönliche Mitteilung vom 19.07.2024 und 23.07.2024
- [40] MARKS: Datenblatt, Werkstoffblatt 1.4404
- [41] O. Verf.: NX (Siemens), [https://de.wikipedia.org/wiki/NX\\_\(Siemens\)](https://de.wikipedia.org/wiki/NX_(Siemens)), Abruf am 24.06.2024
- [42] Oberfläche Online: Kombikopf: Eine Laseroptik für additive und subtraktive Laserverfahren, <https://www.oberflaechen-technik.net/themen/themenwelt/sonder-themen/kombikopf-eine-laseroptik-fuer-additive-und-subtraktive-laserverfahren>, Abruf am 28.05.2024

- [43] piab: Was ist pneumatische Förderung?, <https://www.piab.com/de-de/unsere-technologien/pneumatische-forderung/>, Abruf am 03.06.2024
- [44] Ritter, S.: formnext AM Field Guide compact, September 2022
- [45] RWTH Aachen University: Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), <https://www.iop.rwth-aachen.de/cms/produktionstechnik/forschung/demonstratoren/~gvto/selective-laser-melting/>, Abruf am 23.05.2024
- [46] SCANLAB: F-Theta-Objektiv, <https://www.scanlab.de/de/service/glossar/f-theta-objektiv>, Abruf am 22.05.2024
- [47] Schütt, J.: Persönliche Mitteilung vom 15.05.2024
- [48] Schwab, R.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung für dummies, WILEY, Weinheim, 2019
- [49] Siegert, K.: Blechumformung Verfahren, Werkzeuge und Maschinen, Berlin, Seite 25-26, Springer Vieweg, 2015
- [50] Siemens NX: NX 1984.1902, Hybrid/Add Mfg Pkg for DMG 65 (NX13652)
- [52] Team Department Maschinenbau und Produktion: Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, <https://www.haw-hamburg.de/hochschule/technik-und-informatik/departments/maschinenbau-und-produktion/institute-und-einrichtungen/iws/>, Abruf am 16.05.2024
- [51] Siemens: Konstruktion, Fertigung und Lifecycle-Management, <https://plm.sw.siemens.com/de-DE/>, Abruf am 24.06.2024
- [53] tec-science: Druckversuch, <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/werkstoffpruefung/druckversuch/>, Abruf am 25.06.2025
- [54] tec-science: Kerbschlagbiegeversuch, <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/werkstoffpruefung/kerbschlagbiegeversuch/>, Abruf am 25.06.2025
- [55] Telgkamp, J.: Vorlesungsunterlagen Additive Fertigung, Kapitel 3 Technologies for AM, WiSe 2023/2024
- [56] Trumpf: Laserauftragschweißen – ein Verfahren für verschiedene Anwendungen, [https://www.trumpf.com/de\\_DE/loesungen/anwendungen/additive-fertigung/laserauftragschweissen/](https://www.trumpf.com/de_DE/loesungen/anwendungen/additive-fertigung/laserauftragschweissen/), Abruf am 24.05.2024
- [57] Weißbach, W.: Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2012

---

## Anhang

- A. Probenbenennung mit Bündelung in ihre jeweiligen Verfahren bzw. gewalzter Stahl
- B. Herstellungsplan der Proben
- C. Prüfungsplan der Proben
- D. Technische Zeichnung Zugproben
- E. Technische Zeichnung Kerbschlagbiegeproben
- F. Technische Zeichnung Druckproben
- G. Sammelzeichnung Zugproben
- H. Sammelzeichnung Kerbschlagbiegeproben
- I. Sammelzeichnung Druckproben
- J. Einzelmessungen der Flächenanalyse der Schlifffbilder
- K. Aufnahmen der DED-Versuchsdurchgänge

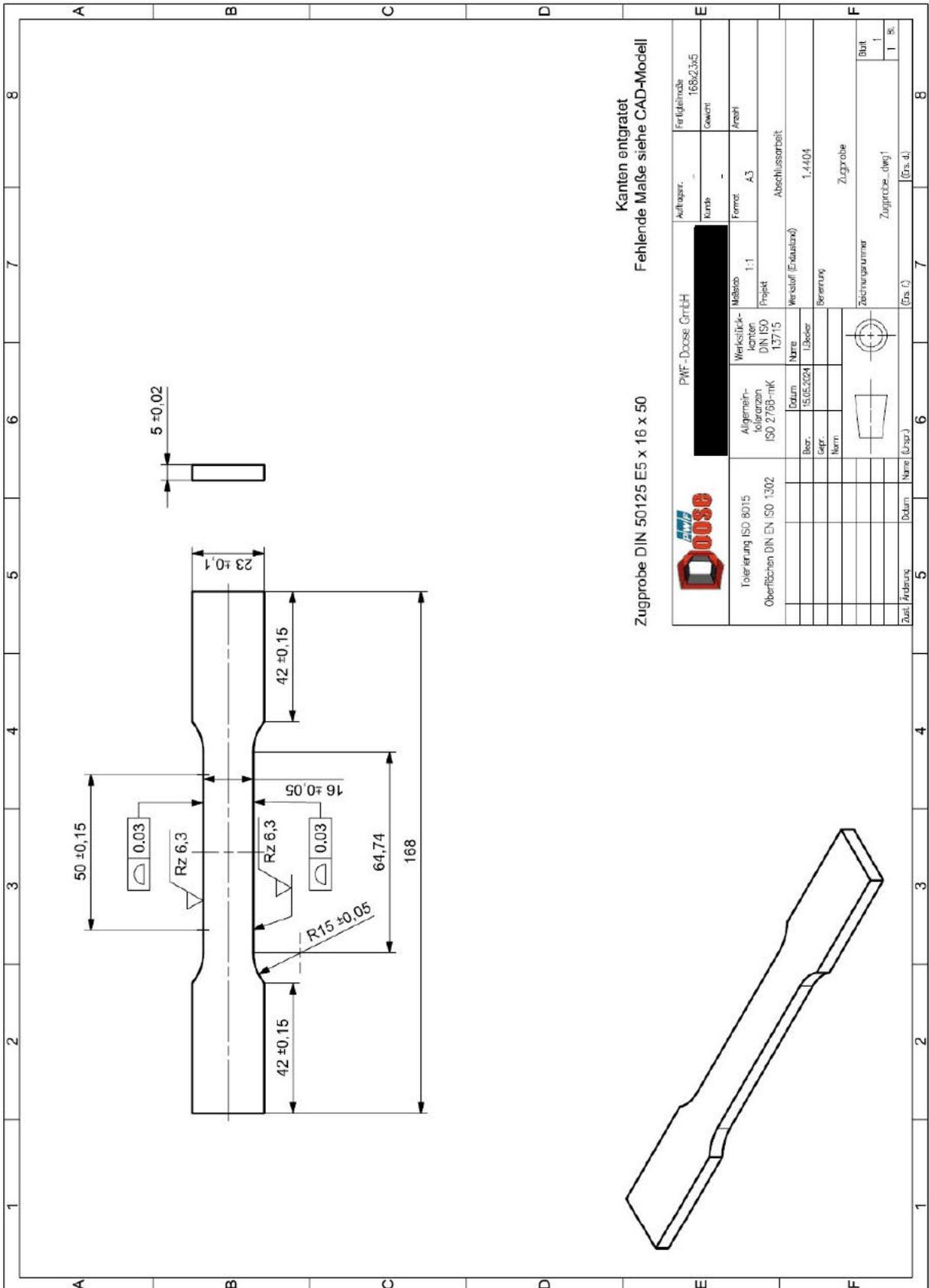
## A. Probenbenennung mit Bündelung in ihre jeweiligen Verfahren bzw. gewalzter Stahl

Lasertec 125 DED hybrid				gewalzter Stahl		Lasertec 30 dual SLM	
Proben-zahl	Versuchs-nummer	Proben-zahl	Versuchs-nummer	Proben-zahl	Versuchs-nummer	Proben-zahl	Versuchs-nummer
1	D-Z-1-111	25	D-Z-1-212	49	W-Z-1-X	58	S-Z-1-X
2	D-Z-2-111	26	D-Z-2-212	50	W-Z-2-X	59	S-Z-2-X
3	D-Z-3-111	27	D-Z-3-212	51	W-Z-3-X	60	S-Z-3-X
4	D-K-1-111	28	D-K-1-212	52	W-K-1-X	61	S-K-1-X
5	D-K-2-111	29	D-K-2-212	53	W-K-2-X	62	S-K-2-X
6	D-K-3-111	30	D-K-3-212	54	W-K-3-X	63	S-K-3-X
7	D-D-1-111	31	D-D-1-212	55	W-D-1-X	64	S-D-1-X
8	D-D-2-111	32	D-D-2-212	56	W-D-2-X	65	S-D-2-X
9	D-D-3-111	33	D-D-3-212	57	W-D-3-X	66	S-D-3-X
10	D-S-1-111	34	D-S-1-212				
11	D-S-2-111	35	D-S-2-212				
12	D-S-3-111	36	D-S-3-212				
13	D-Z-1-122	37	D-Z-1-221				
14	D-Z-2-122	38	D-Z-2-221				
15	D-Z-3-122	39	D-Z-3-221				
16	D-K-1-122	40	D-K-1-221				
17	D-K-2-122	41	D-K-2-221				
18	D-K-3-122	42	D-K-3-221				
19	D-D-1-122	43	D-D-1-221				
20	D-D-2-122	44	D-D-2-221				
21	D-D-3-122	45	D-D-3-221				
22	D-S-1-122	46	D-S-1-221				
23	D-S-2-122	47	D-S-2-221				
24	D-S-3-122	48	D-S-3-221				

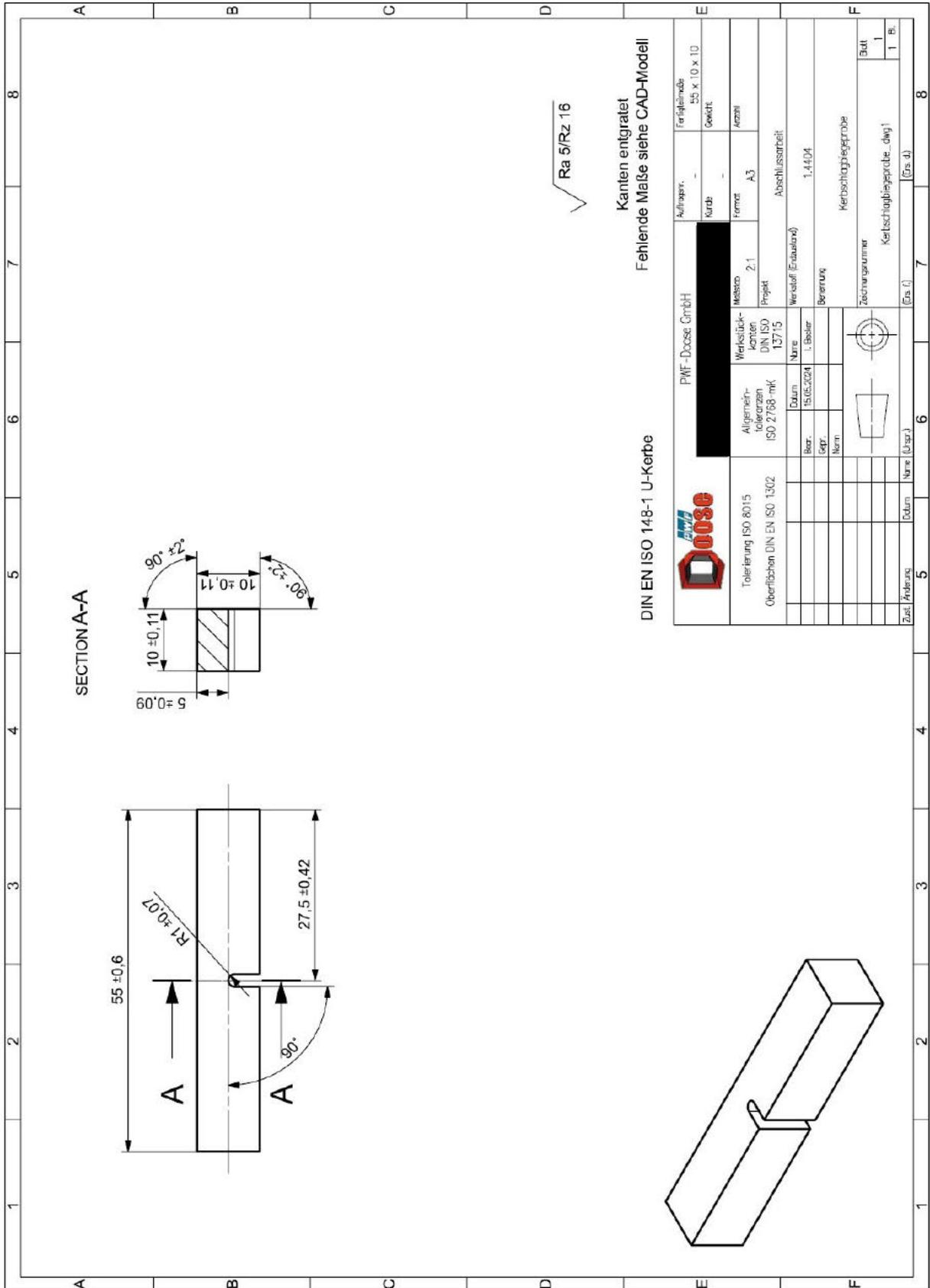




D. Technische Zeichnung Zugproben

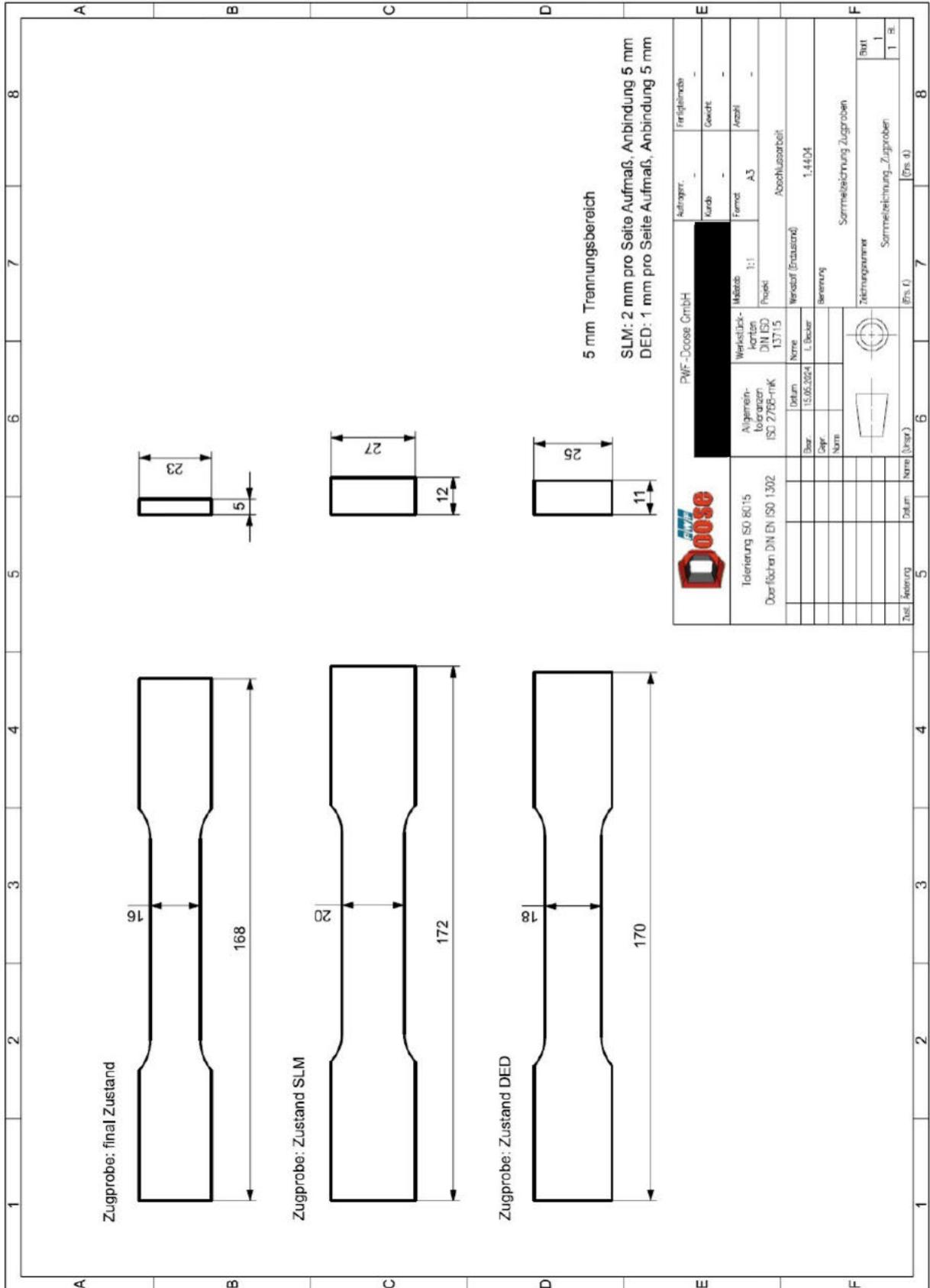


E. Technische Zeichnung Kerbschlagbiegeproben

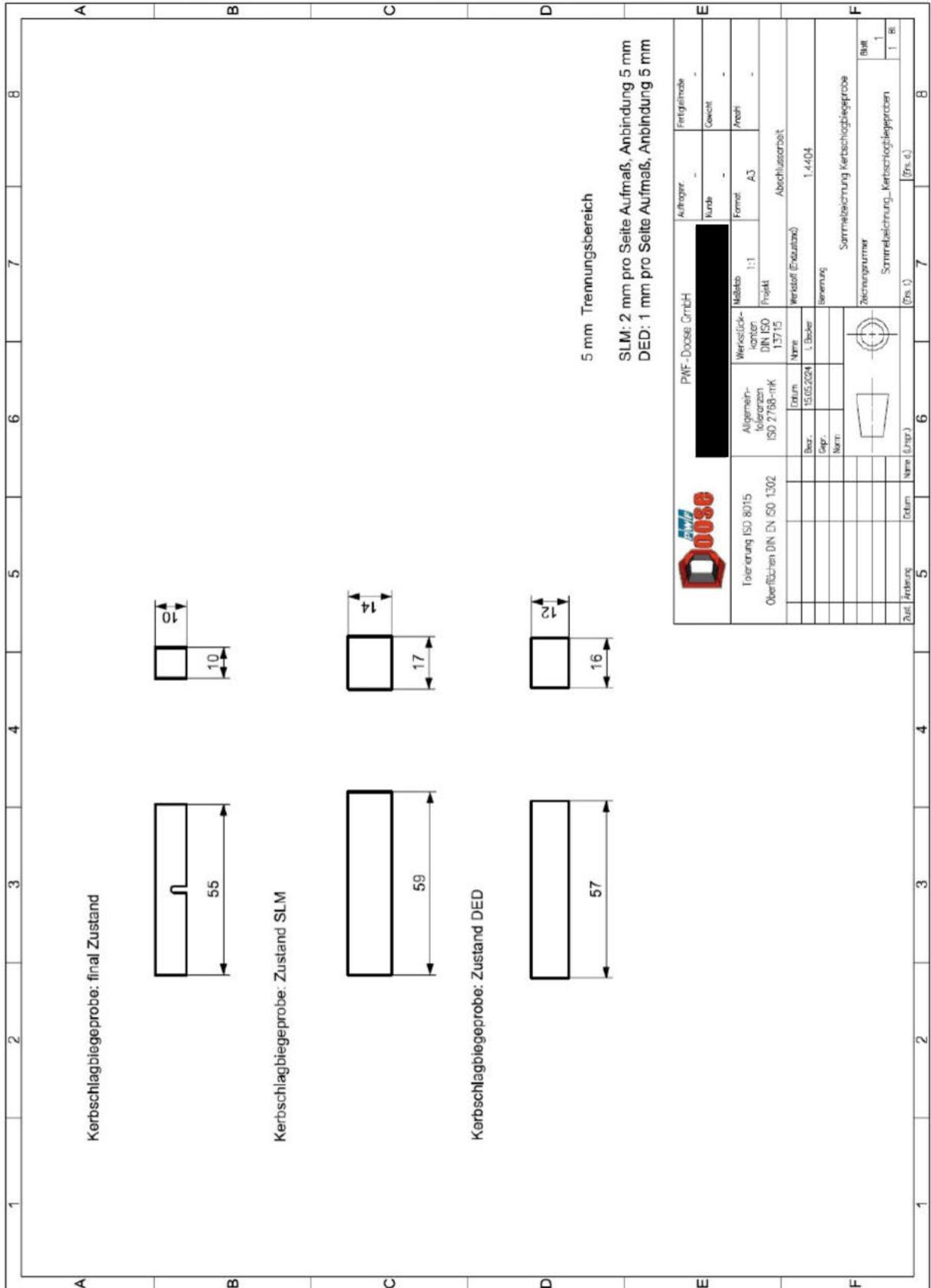




G. Sammelzeichnung Zugproben

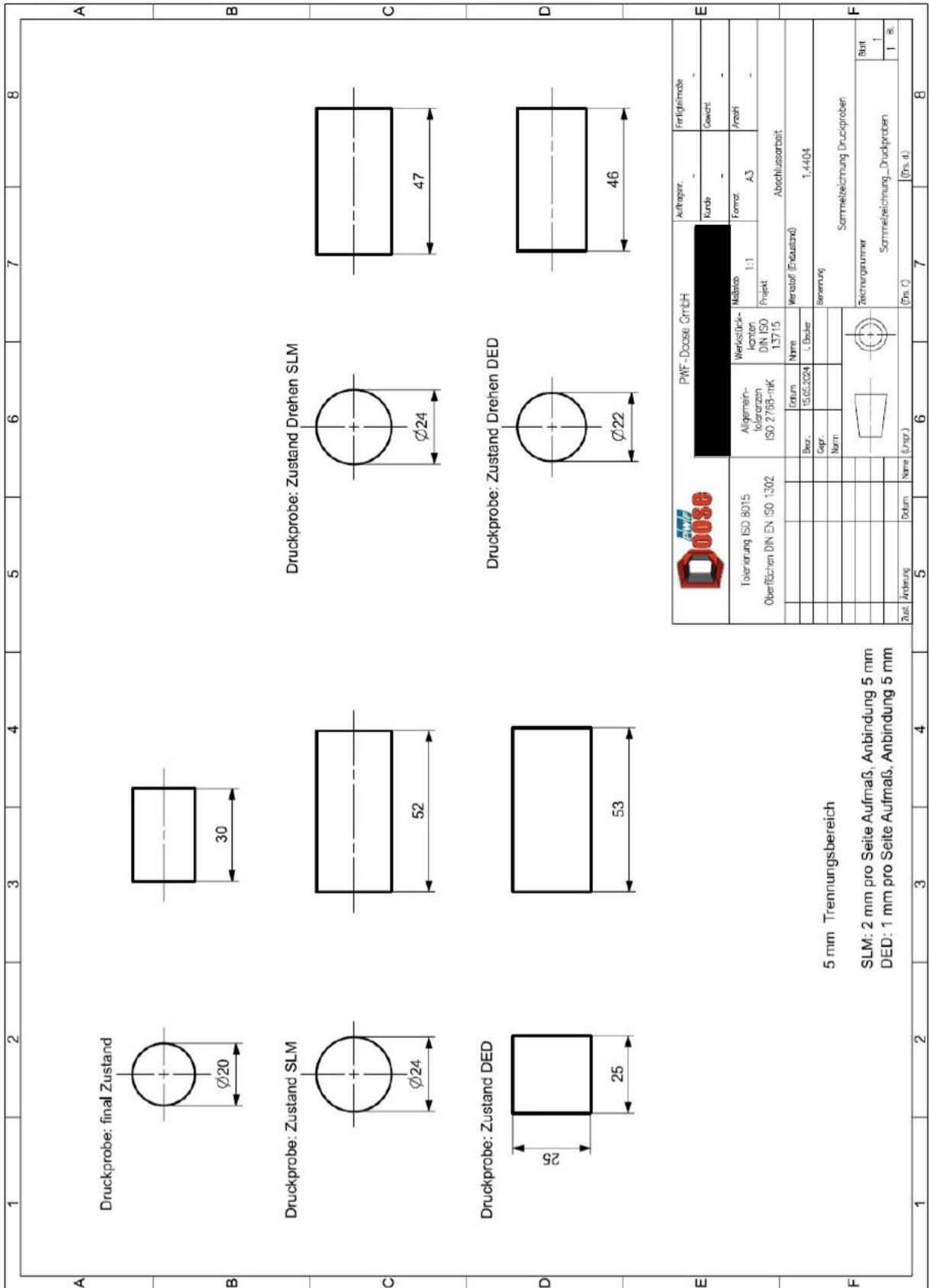


H. Sammelzeichnung Kerbschlagbiegeproben



		PWF-Drüse GmbH Auftraggeber: - Kunde: - Fertighöhe: -	
Titelerung ISO 8015 Oberflächen DIN EN ISO 1302		Werkstücke: Material: 1:1 Formel: A3 Projekt: Abschlussarbeit	
Allgemein- toleranzen ISO 2768-mK		Werkstoff (Einzustand): 1.4404	
Datum: 15.05.2024 Bear.: T. Becker Gepr.: Norm:		Zeichnungsnummer: Sammelzeichnung_Kerbschlagbiegeproben	
Zusl. Änderung: Datum Name (Lsgpr.)		Blatt: 1 1 BI	
5		7	
6		8	

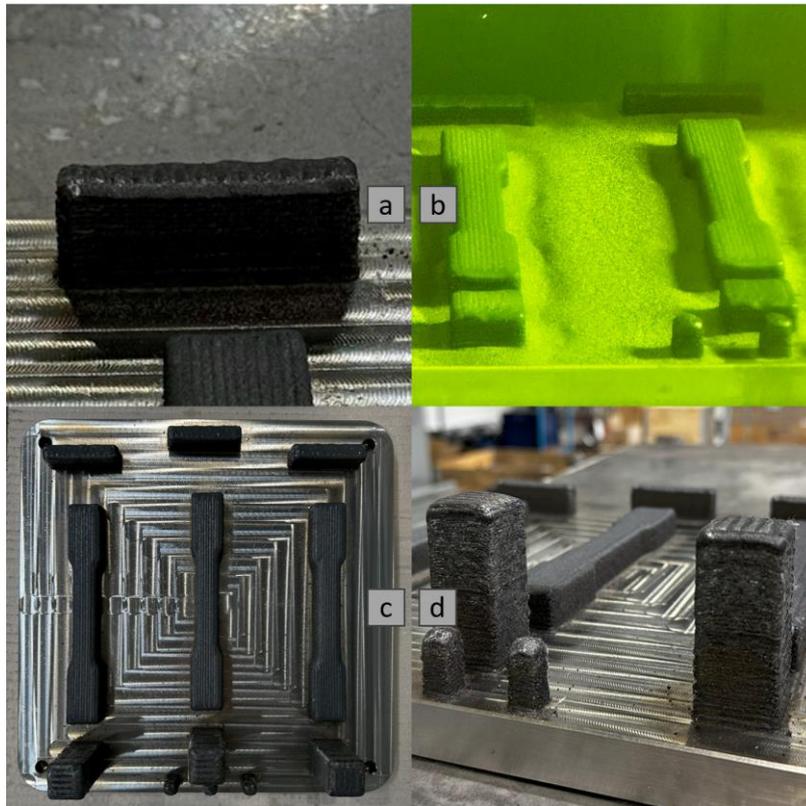
I. Sammelzeichnung Druckproben



## J. Einzelmessungen der Flächenanalyse der Schlibfbilder

Ebene	Z-Y-Ebene			Z-X-Ebene			X-Y-Ebene		
D-S-111									
Messwert	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Flächensumme mm <sup>2</sup>	7969,06	12972,89	58579,46	20394,03	15623,87	106514,7	6220,54	9733,7	9733,7
Gesamtfläche mm <sup>2</sup>	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41
Flächenverhältnis %	0,05	0,08	0,38	0,13	0,1	0,69	0,04	0,06	0,06
D-S-122									
Messwert	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Flächensumme mm <sup>2</sup>	7139,12	29031,88	117803,53	5301,96	5374,48	75919,62	9081,02	10499,18	10499,18
Gesamtfläche mm <sup>2</sup>	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41
Flächenverhältnis %	0,05	0,19	0,76	0,03	0,03	0,49	0,06	0,07	0,07
D-S-212									
Messwert	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Flächensumme mm <sup>2</sup>	32319,42	82373,84	90213,98	24849,94	68853,02	6994,08	6131,91	11087,39	11087,39
Gesamtfläche mm <sup>2</sup>	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41
Flächenverhältnis %	0,21	0,53	0,58	0,16	0,45	0,05	0,04	0,07	0,07
D-S-221									
Messwert	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Flächensumme mm <sup>2</sup>	71294,5	48128,62	202312,66	35059,04	68965,83	59006,52	209733,8	6478,39	6478,39
Gesamtfläche mm <sup>2</sup>	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41	15470778,41
Flächenverhältnis %	0,46	0,31	1,31	0,23	0,45	0,38	1,36	0,04	0,04

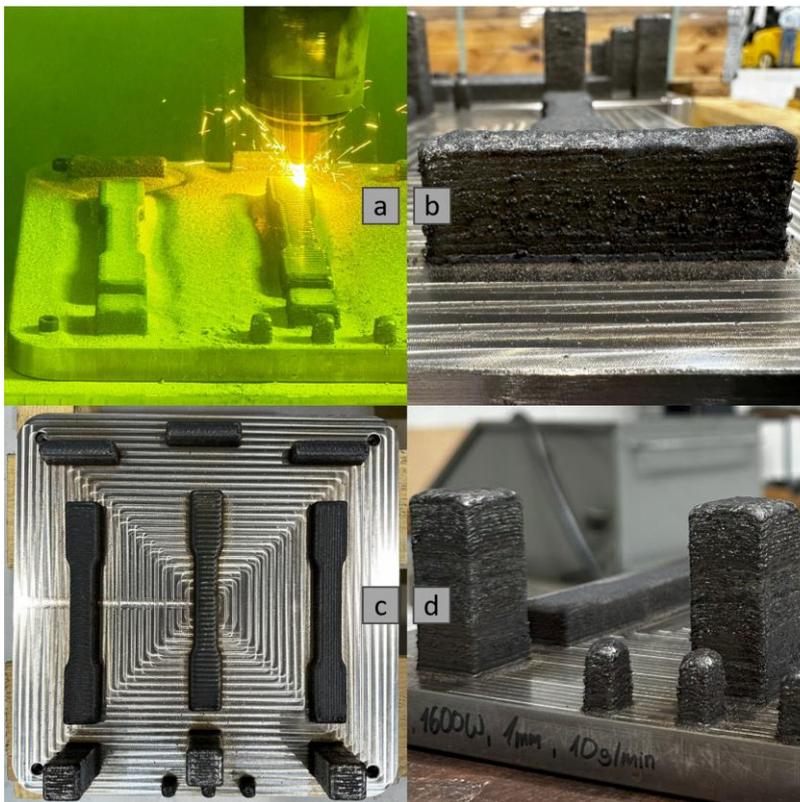
## K. Aufnahmen der DED-Versuchsdurchgänge

**D-111****12 g/min - 1600 W - 1,2 mm**

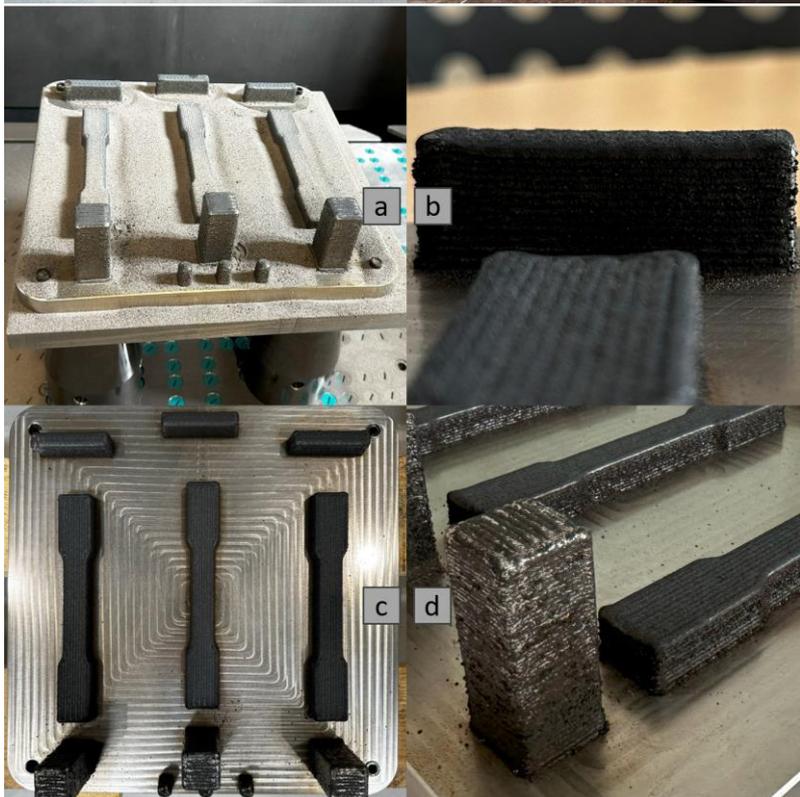
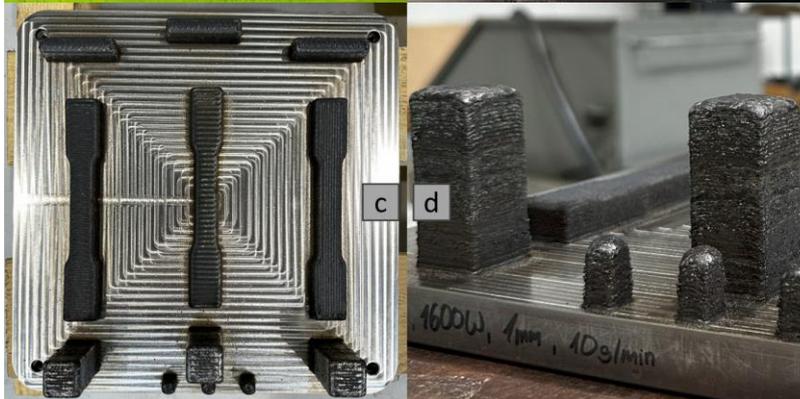
- a) Welligkeit der Kerbschlagbiegeprobe
- b) Pulverüberschuss bei Layerhöhe 8,40 mm
- c) Fertige Substratplatte von oben
- d) Ausrichtung der Schraffur bei den Druckproben

**D-122****12 g/min - 1400 W - 1,0 mm**

- a) Pulverüberschuss am Ende des Prozesses
- b) Schweißrückstände in der Düse
- c) Fertige Substratplatte von oben
- d) Strukturveränderung der Druckproben durch Schweißrückstände in der Düse

**D-212****10 g/min - 1600 W - 1,0 mm**

- a) Pulverüberschuss im Prozess bei einer Layerhöhe von 5 mm
- b) Welligkeit der Kerbschlagbiegeprobe
- c) Fertige Substratplatte von oben
- d) Unregelmäßigkeiten der Druckproben

**D-221****10 g/min - 1400 W - 1,2 mm**

- a) Pulverüberschuss am Ende des Prozesses
- b) Senkung der Kerbschlagbiegeproben
- c) Fertige Substratplatte von oben
- d) Abnahme der Oxidschicht der Druckproben



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Becker

Vorname: Isabel

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Vergleich der mechanischen Eigenschaften des Laser Engineering Net Shape-Verfahrens mit denen von gewalztem Stahl und unter Berücksichtigung des metallischen Laserstrahlschmelzens

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

01.08.2024

Ort

Datum

Unterschrift im Original