



MASTERARBEIT

Herr B.Sc.

Julian Drechsel

**Untersuchung zur generativen
Fertigung von Uhrwerksteilen**

Mittweida, 2020

Fakultät Ingenieurwissenschaften

MASTERARBEIT

Untersuchung zur generativen Fertigung von Uhrwerksteilen

Autor:

Herr B.Sc.

Julian Drechsel

Studiengang:

Physikalische Technik/ Lasertechnik

Seminargruppe:

LT17w1-M

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Horst Exner

Zweitprüfer:

Martin Erler, M.Sc.

Einreichung:

Mittweida, 03.07.2020

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2020

Faculty Engineering Sciences

MASTER THESIS

Investigation into the additive manufacturing of watch movement parts

author:

Mr. B.Sc.

Julian Drechsel

course of studies:

Physical Engineering / Laser Technology

seminar group:

LT17w1-M

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Horst Exner

second examiner:

Martin Erler, M.Sc.

submission:

Mittweida, 03.07.2020

defence/ evaluation:

Mittweida, 2020

Bibliografische Beschreibung:

Drechsel, Julian:

Untersuchung zur generativen Fertigung von Uhrwerksteilen. - 2020. - 15, 59, 8 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Masterarbeit, 2020

Referat:

Bei der vorliegenden Arbeit wird anhand von Literatur eine Einordnung des Mikro-SLM Verfahrens in die momentane Industrielandschaft vorgenommen. Es werden auf Basis grundlegender Untersuchungen zum Linienabstand, zur Rauheit und zur Strukturzeugung nach VDI 3405 mit Hilfe von Simulation die Herstellbarkeit von Strukturteilen untersucht. Die gewonnenen Kenntnisse werden auf die Untersuchungen zur Herstellung von Uhrwerksteilen angewandt. Abschließend erfolgt die Analyse der Ergebnisse und die Darstellung von Strategien zur Optimierung des Verfahrens und ein Ausblick auf die Anwendbarkeit in der Industrie.

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
2 Stand der Technik	3
2.1 Überblick additive Fertigungsverfahren	3
2.2 Verfahrensbeschreibung SLM	6
2.3 Vergleich SLM und Mikro-SLM	8
3 Versuchsaufbau und -anlage	13
4 Theoretische Grundlagen	15
4.1 Grundlagen Strahlausbreitung	15
4.2 Laser-Materie-Wechselwirkung	18
5 Simulation Mikro-SLM-Prozess	21
5.1 Slicen eines Bauteiles	21
5.2 Vorbetrachtungen für die Simulation	22
5.3 Simulation von unidirektionaler und bidirektionaler Abarbeitung	25
5.4 Simulation thermisches Verhalten im Strukturquerschnitt	27
5.5 Einfluss des Linienabstandes in der Simulation	28
6 Experimente und Ergebnisse	31
6.1 Vergleich der Simulationen mit realen Oberflächen	31
6.2 Strukturdichte in Abhängigkeit vom Linienabstand	33

6.3	Parameteruntersuchung zur Oberflächenrauheit.....	36
6.4	Untersuchung von Teststrukturen nach VDI 3405	39
7	Herstellung von Uhrwerksteilen.....	47
8	Zusammenfassung und Ausblick	56
8.1	Zusammenfassung	56
8.2	Ausblick	57
9	Literaturverzeichnis.....	61
Anlagen	65
Anlagen, Teil 1 - Oberflächenrauheit	67
Anlagen, Teil 2 - VDI 3405 Empfehlungen	71
Anlagen, Teil 3 - Unitas 6497 ETA Uhrwerk.....	73
Selbstständigkeitserklärung	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Photographie eines mechanischen Handaufzugwerkes der Firma ETA (Modell: Unitas 6497) (A) und Darstellung additiv gefertigter Teile einer Lünette eines Uhregehäuses der Firma 3D Micro Print (B) [3].....	1
Abbildung 2: Übersicht der additiven Fertigungsverfahren anhand der Verbindungstechnologien [8].....	4
Abbildung 3: „metal additive manufacturing Technology“ Landschaft mit Einordnung des Mikro-SLM Verfahrens [9].....	5
Abbildung 4: Schema des Laser-Sinterns von der 3D-CAD-Datei zum Bauteil, Firma eos [11].....	6
Abbildung 5: Übersicht über die Arten des Pulveraufzuges in SLM-Maschinen mit Klinge (A), Walze (B) und Zylinder (C)	7
Abbildung 6: Ringrakel Lasermikrosinteranlage (A), Klängenbeschichter mit Klinge oder Gummilippe (B), Walzenaufzugssystem (C) und Druckverdichter (D).....	7
Abbildung 7: Schema Mikro-SLM-Prozess mit Druckverdichter und schematische Nahaufnahme der Bearbeitungsstelle	13
Abbildung 8: Theoretische Darstellung der Ausbreitung eines Gauß'schen Strahles mit Strahlradius wz und Krümmungsradius Rz der Wellenfront.	17
Abbildung 9: Darstellung der Laserstrahlvermessung im Querschnitt und im Profil, Gaußstrahl 400 W IPG Laser bei einer Leistung von 186 W.....	18
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Strahlungsbilanz der Laserstrahlung an Materie (A) und ideale Kornanordnung im Pulverbett (B)	20
Abbildung 11: Darstellung der Konturen am Beispiel des Kronrades: Vollmaterial (A), Konturdarstellung (B), Kontur mit Innenoffset (C)	21
Abbildung 12: Darstellung der untersuchten Linienabstände von 20 μm bis 40 μm mit Überlappung der Linien	23
Abbildung 13: Darstellung Linienabstand am Kronrad: Ohne Beschleunigungsstrecken (A) mit Beschleunigungsstrecken (B), doppelter Linienabstand (C), dreifacher Linienabstand (D).....	23
Abbildung 14: Graph des verwendeten Gaußpulses von -15 μm bis +15 μm	24
Abbildung 15: Schematische Darstellung der unidirektionalen und bidirektionalen Abarbeitung.....	25

Abbildung 16: Thermisches Verhalten zwischen den Pulverkörnern im SLM-Prozess mit Absorption und Reflektion von Strahlung sowie Konvektion zwischen Korn und Luft sowie Konduktion zwischen den Pulverkörnern – Schema (A), Simulation (B).....	28
Abbildung 17: Auflichtmikroskopaufnahmen der realen Oberflächen mit 300-facher Vergrößerung der Linienabstände 20 μm (A), 30 μm (B) und 40 μm (C) mit entsprechenden Nahaufnahmen	31
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Teststrukturen mit Aufnahmen der realen Schliffbilder, aufgenommen mit Hilfe eines Laserscanningmikroskop. 20 μm (A), 30 μm (B) und 40 μm (C).....	33
Abbildung 19: Graph der erzeugten relativen Dichte über die Volumenenergiedichte mit den unterschiedlichen Linienabständen von 20 μm , 30 μm und 40 μm als Parameter [34].....	34
Abbildung 20: Bildmontage der Überlagerung der Schmelzpunkte auf gleicher Höhe der Bearbeitung zu unterschiedlichen Zeitpunkten als Falschfarbendarstellung (A) und als Phasendarstellung (B) (feste Phase grün dargestellt, Schmelzphase rot dargestellt) für 40 μm Linienabstand	35
Abbildung 21: Bildmontage der Überlagerung der Schmelzpunkte auf gleicher Höhe der Bearbeitung zu unterschiedlichen Zeitpunkten als Falschfarbendarstellung (A) und als Phasendarstellung (B) (feste Phase grün dargestellt, Schmelzphase rot dargestellt) für 20 μm Linienabstand	36
Abbildung 22: Darstellung der Parameteruntersuchung zur mittleren arithmetischen Rauheit über den Linienabstand mit der Leistung der Bestrahlung als Parameter	37
Abbildung 23: Darstellung der Parameteruntersuchung zur mittleren arithmetischen Rauheit über den Linienabstand mit der Leistung der Bestrahlung als Parameter nach dem Glasperlenstrahlen.....	38
Abbildung 24: Auflichtmikroskopaufnahmen mit 300-facher Vergrößerung der Spaltbreite 60 μm (A) und 100 μm (B).....	40
Abbildung 25: Darstellung Überhangstrukturen als Fotografie (A) sowie ausgewählte Überhanglängen als Auflichtmikroskopaufnahmen bei 100-facher Vergrößerung mit 100 μm Überhang (B), 250 μm Überhang (C) und 500 μm Überhang (D)	41
Abbildung 26: Fotografie Überbrückungen auf Substratplattform (A), Auflichtmikroskopaufnahmen Überbrückung (B) und Unterseite der Überbrückung (C)	42
Abbildung 27: Aufnahmen während des Sinterprozesses bei unterschiedlichen Schichtdicken – 1.2 mm (A), 1.51 mm (B), 1.57 mm (C) und 2.4 mm (D)	43

Abbildung 28: Auflichtmikroskopaufnahmen von Querschnitten der erstellten Wandstrukturen bei 500-facher Vergrößerung mit Neigungen von 70°-20°	44
Abbildung 29: Auflichtmikroskopaufnahmen der Neigungswinkel von Vollmaterial bei 100-facher Vergrößerung mit Neigungen von 75° bis 5°	44
Abbildung 30: Auflichtmikroskopaufnahmen verschiedener Bohrungsdurchmesser von 50 µm bis 370 µm.....	45
Abbildung 31: Explosionsdarstellung Uhrwerk der Firma ETA, Modell Unitas 6497 als SolidWorks Explosionsdarstellung mit Nahaufnahme der Unruhkonstruktion und mit Teilenummerierung	47
Abbildung 32: Darstellung Federhausbrücke (A) mit Stützstruktur hergestellt, Unruhbrücke (B) ohne Stützstruktur hergestellt.....	52
Abbildung 33: Fotografie von Originalteilen und Mikro-SLM Teilen: Anker (A), Hemmungsrad (B), Minutenrad (C) und Unruhaufbau Original (D)	53
Abbildung 34: Auflichtmikroskopaufnahmen von Mikro-SLM Teilen: Stoßsicherung (A), Rükkerstift (B) und Mitnehmer-Minutenrohr (Fotographie C und Auflichtmikroskopaufnahmen D).....	54
Abbildung 35: Fotografie von Originalteilen und Mikro-SLM-Teilen: Unruh-Rükkerstifthalter (A), Sperrrad (B), Wechselrad (C), Mitnehmer-Minutenrohr (D) und Klinke (E).....	54
Abbildung 36: Variation verschiedener Optionen von Stützstrukturen jeweils mit Nahaufnahme – Wabenstruktur (A), Kreisstruktur (B), Linienstruktur (C) und Dreiecksstruktur (D).....	58
Abbildung 37: Fotografie einer mittels Mikro-SLM hergestellten Feder	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Additive Fertigungsverfahren Technologie	4
Tabelle 2:	Vergleich SLM und Mikro-SLM	8
Tabelle 3:	Vergleich verschiedener Prozessparameter im SLM-Prozess aus ausgewählten Veröffentlichungen	10
Tabelle 4:	Vergleich verschiedener Prozessparameter ausgewählter Mikro-SLM- Veröffentlichungen	11
Tabelle 5:	Laser – und Anlagenparameter	14
Tabelle 6:	Wechselwirkung zwischen Zwei-Niveau-Systemen und Photon	19
Tabelle 7:	Vergleich der Simulationsbilder uni- und bidirektionale Bestrahlung	26
Tabelle 8:	Vergleich des Linienabstandes - Simulation	29
Tabelle 9:	Einteilung der Uhrwerksteile anhand ihrer Herstellbarkeit	48
Tabelle 10:	Oberflächenrauheitswerte ohne Nachbearbeitung	67
Tabelle 11:	Oberflächenrauheitswerte nach Glasperlenstrahlen	69
Tabelle 12:	Übersicht der VDI 3405 Strukturtests [14]	71
Tabelle 13:	Aufbau Unitas 6497 ETA Uhrwerk mit Teilebezeichnung	73

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
SLM	Selektive Laser Melting
Mikro-SLM	Mikro-Selektive Laser Melting
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
(3D-)-CAD	(3D-) Computer Assisted Drafting
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolithography
DLP	Digital Light Processing
CDLP	Daylight Polymer Printing
MJ	Material Jetting
NPJ	NanoParticle Jetting
DOD	Drop on Demand
BJS	Binder Jetting
MJF	Multi Jet Fusion
SLS	Selective Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing
LDW	Laser Deposition Welding
LOM	Lamination Object Manufacturing
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
316L	Stainless Steel 316L
EOS	Firma EOS
DXF	(2D-) Drawing eXchange Format
CW	Continuous Wave
AM	Additive Manufacturing
LHM	Laserinstitut Hochschule Mittweida

FR	Forward Roller
IPG	IPG Photonics: Fiber Laser Sources & Solutions
REM	Rasterelektronenmikroskop
HSS	High-speed Steel
DIN	Deutsche Industrie Norm
EN	Europäische Norm
ISO	International Organization for Standardization
ETA	ETA SA Manufacture Horlogère Suisse
STL	Standard Triangle Language

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$[P_{\max}]$	Maximale Leistung	W
$[\lambda]$	Wellenlänge	nm
$[d]$	Fokusbildungsdurchmesser	μm
$[v_s]$	Scangeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$[l_z]$	Schichtdicke	μm
$[d_{90}]$	Korngröße	μm
$[P_L]$	Laserleistung	W
$[h_s]$	Linienabstand	mm
$[E_V]$	Volumenenergiedichte	$\frac{J}{mm^3}$
$[f]$	Brennweite	mm
$\left[\frac{\partial}{\partial x}\right]$	Partielle Ableitung nach x	
$[E]$	Elektrische Feldstärke	$\frac{V}{m}$
$[U]$	Volt	V
$[c]$	Lichtgeschwindigkeit	$2.997 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$
$[x, y, z]$	Ortskoordinaten	m
$[n]$	Brechungsindex	
$[t]$	Zeit	s
$[A]$	Fläche	m^2

$[\varrho]$	Radius vom Ausgangspunkt einer Welle	$\varrho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ in m
$[k]$	Wellenzahlvektor	
$[\omega]$	Kreisfrequenz	$\frac{1}{s}$
$[C]$	Konstante	
$[q]$	Komplexe Größe, Variable	
$[i]$	Imaginäre Zahl	
$[r]$	Radius	m
$[\pi]$	Pi	3.14159265359 ...
$[R(z)]$	Krümmungsradius	μm
$[w(z)]$	Strahlradius	μm
$[I]$	Intensität	$\frac{W}{m^2}$
$[w_0]$	Minimaler Strahlradius	μm
$[z_R]$	Rayleigh-Länge	μm
$[h]$	Planck'sches Wirkungsquantum	$6.62607015 \cdot 10^{34} J \cdot s$
$[f, \nu]$	Frequenz	Hz
$[E_1, E_2]$	Energie	J
$[\Delta E]$	Energiedifferenz	J
$[R E_R I_R]$	Reflektion	
$[A E_A I_A]$	Absorption	
$[T E_T I_T]$	Transmission	
$[k]$	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{m \cdot K}$
$[C_p]$	Wärmekapazität	$\frac{J}{kg \cdot K}$
$[\rho]$	Dichte	$\frac{kg}{dm^3}$

$[T]$	Temperatur	K
$[v]$	Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$[S_a]$	Arithmetischer Mittelwert	μm
$[l_r]$	Strecke	m
$[Z(x)]$	Profilabweichung	
$[S_q]$	Quadratischer Mittelwert	μm
$[S_p]$	Maximale Profilspitze	μm
$[S_v]$	Minimales Profiltal	μm
$[S_z]$	Gemittelte Rautiefe	μm
$[F_H]$	Adhäsionskraft	N
$[F_G]$	Gewichtskraft	N
$[d]$	Durchmesser	m
$[W_{A,SS}]$	Wechselwirkungsarbeit	J
$[m_p]$	Masse Partikel	kg
$[g]$	Fallbeschleunigung	$9,81 \frac{m}{s}$

1 Einleitung

1.1 Motivation

Betrachtet man die heutige Industrielandschaft, so sind Begriffe wie additive Fertigung, 3D Druck und Pulverbettverfahren nicht mehr wegzudenken. Es gibt kaum ein Anwendungsgebiet das nicht von der Gestaltungsfreiheit der additiven Fertigungsverfahren profitiert. Beispielhaft sei hier die Firma Airbus genannt, die bereits vor einiger Zeit damit begonnen hat die Möglichkeit der Serienfertigung von additiv gefertigten Bauteilen zu untersuchen [1].

Während einige Bauteilhersteller versuchen die Skalierung immer weiter zu erhöhen um immer größere Bauteile zu fertigen, so findet der Schritt auch in entgegengesetzter Richtung statt. So werden immer mehr die Grenzen der kleineren Strukturen untersucht. Eine der Forschungen beschäftigt sich mit einer speziellen Art der additiven Fertigung: dem Selektiven Laserschmelzen (SLM). Dabei handelt es sich um ein laserstrahlbasiertes, additives Fertigungsverfahren bei dem eine dünne Pulverschicht durch direkte Strahlwirkung lokal vollständig umgeschmolzen wird, um eine feste Materialschicht zu erzeugen. Aus den Untersuchungen zum SLM hat sich über die Jahre herausgestellt, dass sehr kleine Strukturen nicht mit dem SLM Verfahren hergestellt werden können. So wurde für kleine Strukturen das Mikro-SLM als nächster Schritt für die Mikrobearbeitung entwickelt. Spätestens seitdem die Medizintechnik die ersten Stents mit additiven Mikroverfahren gefertigt hat stellt sich die Frage, auf welche Industriegebiete die Technologie noch angewandt werden kann [2]. Durch das eigene Interesse zu Uhrwerken (Abbildung 1A) und durch die Erfahrungen der über die Jahre untersuchten Mikrostrukturen entstand die Idee den Mikro-SLM Prozess mit der Erzeugung von Uhrwerksteilen zu verbinden.

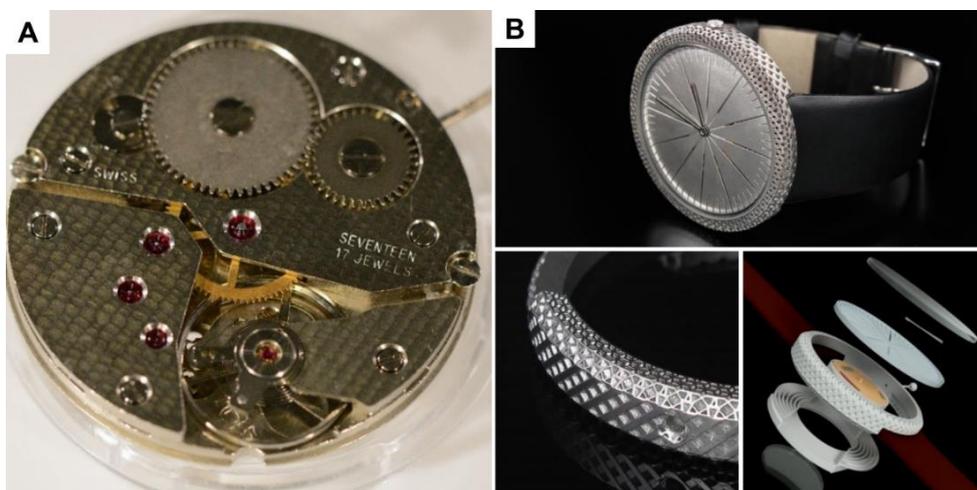


Abbildung 1: Photographie eines mechanischen Handaufzugwerkes der Firma ETA (Modell: Unitas 6497) (A) und Darstellung additiv gefertigter Teile einer Lünette eines Uhrengehäuses der Firma 3D Micro Print (B) [3]

Bei der Recherche für die vorliegende Arbeit konnte festgestellt werden, dass bereits Untersuchungen im Mikrobereich für Uhren durchgeführt wurden (Abbildung 1B). Bei diesen liegt der Fokus auf den äußeren Komponenten einer Uhr, so dass die Untersuchung der Machbarkeit von inneren Uhrwerksteilen eines Handaufzugswerkes der Firma „ETA“ SA Manufacture Horlogère Suisse nahe lag. Zudem besteht die Möglichkeit mit der additiven Fertigung weitere Designfeatures einzuarbeiten sowie die Option besondere Strukturen maschinell statt per Hand zu erzeugen.

Die Arbeit wird im Rahmen der Nachwuchsforschergruppe EilaSax geschrieben, bei der ein Kernziel die Kooperation mit der sächsischen Wirtschaft ist. Das soll als Anlass genommen werden um in einen Industriezweig zu forschen, im dem bisher der Bereich des Mikro-SLM eher nicht angewandt wird. Erbringen die Untersuchungen vielversprechende Ergebnisse, so könnte eine Forschungsk Kooperation mit der sächsischen Uhrenindustrie folgen.

1.2 Ziel der Arbeit

Das zum derzeitigen Stand der Technik verwendete Verfahren des Mikro-SLM befindet sich als Sonderform des SLM-Verfahrens in der Entwicklungsphase. Insbesondere die Untersuchung von filigranen Bauteilen wurde noch nicht näher durchgeführt. Mit Hilfe von Simulationen und Untersuchungen der Prozessparameter soll das Mikro-SLM-Verfahren zunächst analysiert werden. Weiterführende Untersuchungen zur Dichte und zur Oberflächenrauheit werden anhand hergestellter Bauteile durchgeführt. Als Hilfsmittel wird die Norm 3405 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) verwendet. Dabei handelt es sich um eine Norm die sich mit den additiven Fertigungsverfahren beschäftigt. Sie enthält hilfreiche Informationen zur Gestaltung und zur Fertigung von Teststrukturen, wie zum Beispiel Überhänge, Überbrückungen oder Spaltmaße.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen genutzt werden um die Teile eines Handaufzugswerkes zu erzeugen um die Herstellbarkeit mit Blick auf die Qualität zu untersuchen.

2 Stand der Technik

2.1 Überblick additive Fertigungsverfahren

Generative Verfahren, wie sie im deutschsprachigen Raum überwiegend genannt werden, sind international eher als additive Verfahren bekannt. Die Bezeichnung findet zunehmend auch in Deutschland immer mehr Verwendung, wie z.B. die Bezeichnungsänderung der zurückgezogenen VDI 3404 in die neu verfasste VDI 3405 zeigt:

„Generative Fertigungsverfahren – Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) – Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen (VDI 3404) [4].

„Additive Fertigungsverfahren – Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen (VDI 3405) [5].

Eine deutschsprachige Definition von additiven Fertigungsverfahren kann in unzähligen Veröffentlichungen gefunden werden. Eine jedoch sehr oft zitierte Beschreibung ist die nachfolgende:

Definition 1: *„Additive Fertigungsverfahren sind Fertigungsverfahren, bei denen das Bauteil – im Gegensatz zu subtraktiven Verfahren – durch Hinzufügen von Volumenelementen oder Schichten direkt aus digitalen 3D-Daten automatisiert aufgebaut wird oder auf einem bestehenden Werkstück weitere Volumenelemente aufgebaut werden. Wesentliches Merkmal aller Verfahren ist der Entfall produktspezifischer Werkzeuge und Vorbereitungen („werkzeuglose Fertigung).“ [6]*

International sieht die Sache etwas komplizierter aus. Einen Definitionsversuch findet man in dem Buch „Understanding Additive Manufacturing“ von Andreas Gebhardt der die Verfahren wie folgt beschreibt [7]:

„Additive Manufacturing (AM) is a layer-based automated fabrication process for making scaled 3-dimensional physical objects directly from 3D-CAD data without using part-dependent tools. It was originally called „3D-Printing“ and is still frequently called that.“

Im weiterführenden Text ist der Hinweis zu finden, dass erste Verfahren der Art bereits 1987 als „Rapid Prototyping“ oder „Generative Manufacturing“ erwähnt wurden. Interessant ist, dass die additiven Verfahren als „3D-Printing“ und umgangssprachlich als 3D-Druck bezeichnet werden. Hier muss differenziert werden, da insbesondere in den letzten Jahren die Bezeichnung für das Verfahren des Fused Deposition Modeling (FDM) in Verbindung mit Kunststoffen Verwendung findet. Für die Einordnung des Verfahrens SLM soll zunächst eine Übersicht aller additiver Fertigungstechnologien vorgestellt werden.

Tabelle 1: Additive Fertigungsverfahren Technologie

VERFAHREN	DEFINITION	BEISPIELE	MATERIAL
PHOTO-POLYMERIZATION	Selektives Härten von flüssigen monomeren Resin (z.B. Epoxid, Acryl, Vinylether) durch UV-Strahlung.	SLA, DLP, DPP	Kunststoff
MATERIAL EXTRUSION	Thermoplastisches Material wird schichtweise durch das Deponieren von Materialfäden erzeugt.	FDM	Kunststoff
MATERIAL-JETTING	Druckerköpfe deponieren das aufbauende Material (Resin) und eine Aushärtung erfolgt mit UV-Strahlung (ähnelt 2D-Druck).	MJ, NPJ, DOD	Plastik, Metall
BINDER-JETTING	Pulverpartikel werden mit Hilfe eines punktuell applizierten flüssigen Bindemittels miteinander verbunden.	BJ	Sand, Metall
POWDER BED-FUSION	Lokales aufschmelzen von vorher applizierten Pulvermaterial mit Hilfe von Laserstrahlung oder Elektronenstrahl.	SLS, SLM, EBM	Kunststoff, Metall
DIRECT ENERGY DEPOSITION	Gleichzeitige Materialzufuhr und Verarbeitung des Materials während des Auftragsprozesses.	EBAM, LDW	Metall
SHEET LAMINATION	Strukturgenerierung durch das Aufeinanderstapeln von dünnen Folien.	LOM	Papier, Verbundwerkstoffe

Die Übersicht soll in Kombination mit Abbildung 2 einen Eindruck der Vielfalt der bereits auf dem Markt existierenden additiven Fertigungsverfahren vermitteln. Die Möglichkeiten der Materialverarbeitung sind reichlich. Insbesondere im Bereich der Kunststoffverarbeitung gibt es unzählige Unterverfahren und Einordnungsmöglichkeiten, von denen einige bereits im Massenmarkt für Endverbraucher angekommen sind.

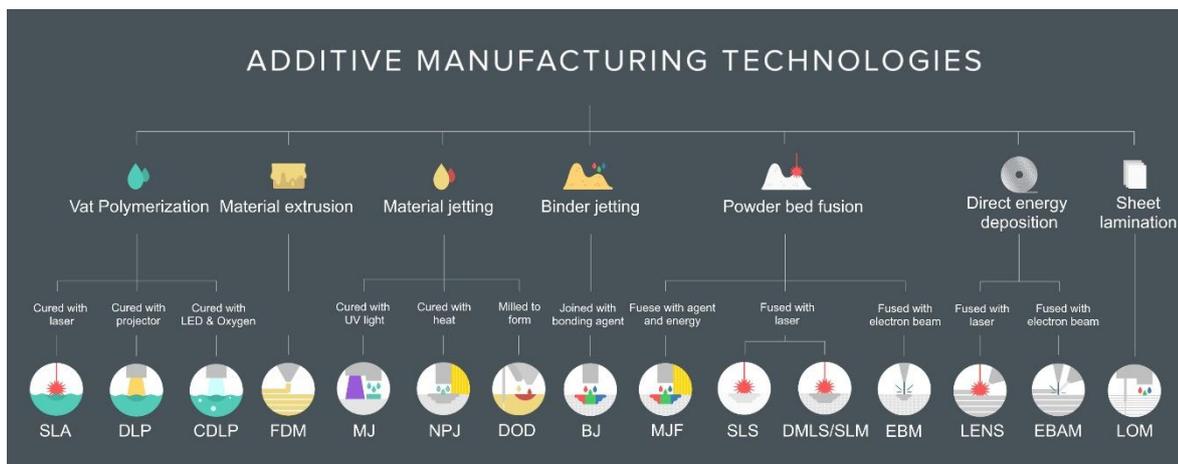


Abbildung 2: Übersicht der additiven Fertigungsverfahren anhand der Verbindungstechnologien [8]

Im Hinblick auf den Bereich der Nutzung additiver Verfahren für die Metallbearbeitung ergibt sich ein anderes Bild. Diese werden ausschließlich im industriellen Bereich verwendet, da die Verarbeitung von metallischen Werkstoffen viele prozesstechnische Besonderheiten erfordert. Ein wesentlicher Grund für das Fehlen von Maschinen für die additive Fertigung für Endverbraucher ist der höhere technologische Aufwand, der mit dem Verfahren einher geht. Metallverarbeitende additive Verfahren benötigen besondere Anforderungen bezüglich Pulverhandling, Anlagentechnik, Sicherheitsanforderungen und Material. Insbesondere bei der Arbeit mit Laserstrahlung sind hohe Schutzmaßnahmen zu treffen. Herkömmliche FDM Maschinen, wie zum Beispiel 3D-Drucker für den Heimgebrauch, benötigen einen geringen technologischen Aufwand. Um das Verfahren des SLM in die Industrielandschaft einzuordnen wird sich auf die additiven Fertigungsverfahren mit metallischen Werkstoffen konzentriert. In der Übersicht Abbildung 2 sind additiven Fertigungsverfahren dargestellt. Eine genauere Aufstellung der metallischen additiven Verfahren kann in Abbildung 3 eingesehen werden.



Abbildung 3: „metal additive manufacturing Technology“ Landschaft mit Einordnung des Mikro-SLM Verfahrens [9]

In der Übersicht ist sichtbar, dass der Bereich der pulververarbeitenden, metallischen Verfahren den größten Anteil der Technologie einnehmen. Eine Sonderform davon ist das hier besprochene Verfahren des SLM, das international eher als LPBF (laser {beam})

powder bed fusion) bekannt ist. (z.B. Kamath et.al in „Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W) [10]. Den nächsten größeren Bereich stellen die drahtbasierten Verfahren dar, während die pellet-, filament-, stab- und plattenbasierten Verfahren einen geringeren Anteil einnehmen.

2.2 Verfahrensbeschreibung SLM

Beim in der Arbeit im Mittelpunkt stehenden SLM-Verfahren wird Metallpulver selektiv komplett mit einem Laserstrahl aufgeschmolzen. In Abbildung 4 ist der Ablauf des SLM-Prozesses der Firma EOS von der 3D-CAD-Datei bis hin zum fertigen Bauteil dargestellt.

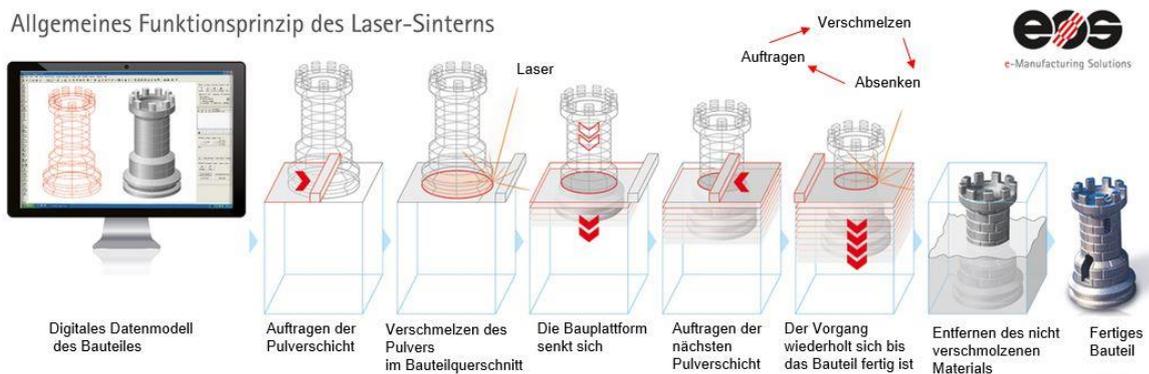


Abbildung 4: Schema des Laser-Sinterns von der 3D-CAD-Datei zum Bauteil, Firma eos [11]

Zunächst wird eine 3D-CAD-Datei, die die vektoriellen Daten der zu erzeugenden Struktur enthält, zerlegt. Dabei entstehen virtuelle Scheiben, so genannte Slices. Die Struktur des 3D-Modells wird ebenenweise so zerteilt, dass viele einzelne zweidimensionale DXF-Dateien entstehen. Unter DXF-Dateien versteht man „Drawing Interchange File Format“ Dateien. Dabei handelt es sich um ein von der Firma Autodesk entwickeltes Format zum CAD-Datenaustausch. Die Slices werden im Abstand der späteren Schichtdicke des Bauteiles erzeugt und bestimmen die vertikale Auflösung.

Anschließend werden die Dateien zur Verarbeitung an die Laseranlage übermittelt um die Struktur schichtweise zu erstellen. Dabei wird zuerst eine Pulverschicht auf die Grundplattform aufgetragen. Anschließend wird diese mit Hilfe von Laserstrahlung verschmolzen. Danach wird die Grundplattform um die eingestellte Schichtdicke abgesenkt. Pulver wird erneut aus dem Pulverreservoir aufgenommen, auf dem Substrat aufgezogen und erneut bestrahlt. Der Vorgang wiederholt sich bis die komplette Struktur erstellt ist. Anschließend wird das Bauteil aus dem nicht verschmolzenem Pulver entfernt und mit Hilfe verschiedener Methoden vom Pulver befreit.

In der Abbildung 4 wird im zweiten Arbeitsschritt als pulverauftragende Einheit ein Rechteck dargestellt, das die sogenannte Rakeleinheit schematisch zeigt. In Abbildung 5 werden verschiedene Arten der Pulveraufzugssysteme (Rakeleinheiten) vorgestellt [12]. Es

wird sich dabei auf drei primäre Systeme des Pulveraufzuges beschränkt. In Abbildung 5A ist der Aufzug mit Hilfe einer Klinge zu sehen, in Abbildung 5B mit einer Walze (FR – „Forward Roller“) und in Abbildung 5C mit Hilfe eines zylindrischen Vorschubgerätes.

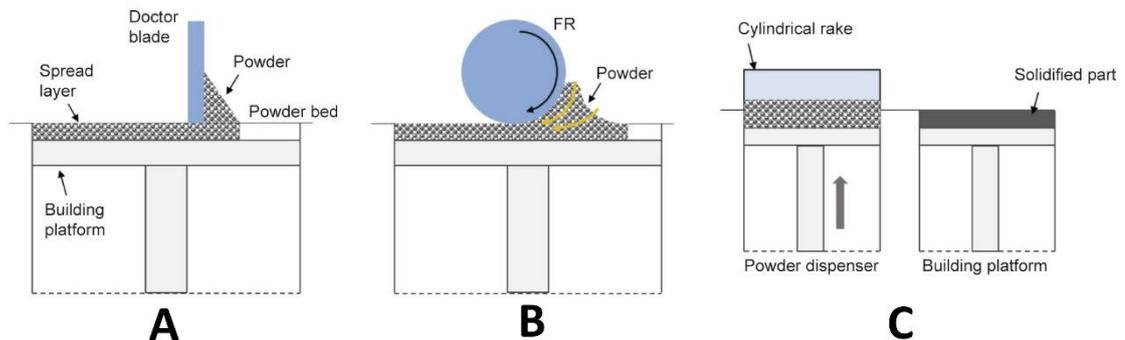


Abbildung 5: Übersicht über die Arten des Pulveraufzuges in SLM-Maschinen¹ mit Klinge (A), Walze (B) und Zylinder (C)

In der Literatur findet man unzählige Schemata zu SLM-Einheiten, doch selten Bilder der Konstruktionen. In Abbildung 6 werden vier Bilder dargestellt. Während es sich bei Bild 6B um eine Konzeptdarstellung handelt sind die übrigen Bilder reale Fotografien von Anlagen.

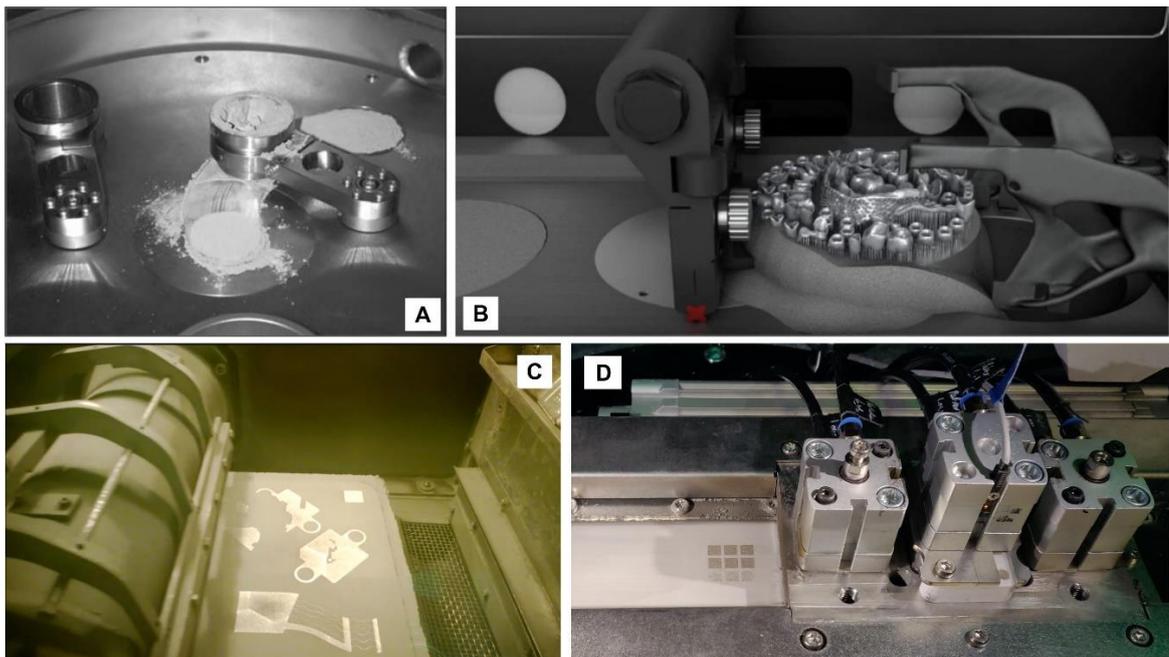


Abbildung 6: Ringrakel Lasermikrosinteranlage² (A), Klingenbeschichter mit Klinge oder Gummilippe³ (B), Walzenaufzugssystem⁴ (C) und Druckverdichter⁵ (D)

¹ [12] Fig. 11 Schematic of the existing raking systems in powder-bed AM ... S. 712

² [46] Plate 2: „Ringblade serves as rake and powder storage “ S.20

³ [47] Konzeptzeichnung „Kippbarer Beschichter“

⁴ [48] Video Pulveraufzug 3D Systems mit ProX 300 3D metal printer

⁵ Fotografie Mikro-SLM Anlage Laserinstitut Hochschule Mittweida

Dabei handelt es sich um einen Ringrakel (Abbildung 6A) wie er häufig in Lasermikrosinteranlagen verwendet wird sowie um eine Aufzugslippe, wie sie im großen Maße in SLM-Maschinen Anwendung findet (Abbildung 6B). Abbildung 6C zeigt eine Aufzugseinheit mit Walze der Firma 3D Solutions und in Abbildung 6D ist ein Druckverdichterrakel sichtbar, wie er für das Mikro-SLM-Verfahren verwendet wird.

2.3 Vergleich SLM und Mikro-SLM

Das Mikro-SLM-Verfahren ordnet sich bei der Verfahrensbeschreibung in die Reihe der SLM-Verfahren ein, wobei einige Besonderheiten vorliegen. Zunächst wird beim Mikro-SLM-Verfahren ein geringerer Fokusbereich der Laserstrahlung verwendet um feinere Strukturauflösungen zu erzeugen. Zudem kann eine dünnere Schichtdicke eingestellt werden, da für die Bearbeitung ein feineres Pulver verwendet wird.

Es stellt sich die Frage, was eigentlich der Unterschied zwischen SLM und Mikro-SLM ist, da die verwendeten Parameter sehr ähnlich erscheinen. Eine Abgrenzung hierzu wird wie folgt beschrieben [13]:

„...Typical for micro manufacturing with AM are scales like powder grain sizes lower than 10 μm , layer thicknesses under 10 μm and laser focus diameter smaller than 40 μm ...“

Es ist schade, dass nicht definiert wird ob es sich um Mikro-SLM-Verfahren handelt, wenn bereits eines der Kriterien erfüllt ist oder nur, wenn alle erfüllt sind. Es kann jedoch anhand der nachfolgenden Tabelle 2 festgestellt werden, dass die Grenzen vom SLM-Verfahren zum Mikro-SLM-Verfahren relativ unscharf sind. Die Unterschiede liegen unter anderem in der verwendeten Pulverkorngröße, der Größe des Bauraumes und den daraus resultierenden Prozessparametern.

Tabelle 2: Vergleich SLM und Mikro-SLM

	SLM	Mikro-SLM
Bearbeitungsregime	cw Strahlung	cw Strahlung
Leistung P_{\max}	bis zu 1000 W	bis zu 400 W (typisch 40 W)
Wellenlänge λ	1070 nm	1070 nm
Fokusbereich d	50-150 μm	30 μm
Strahlengeschwindigkeit v_s	0.5-2 m/s (typisch)	1-4 m/s (typisch)
Schichtdicke l_s	20-100 μm	$\leq 10 \mu\text{m}$
Korngröße Pulver	$d_{90} < 100 \mu\text{m}$	$d_{90} < 10 \mu\text{m}$
Bauraum in mm^3	z.B.: 500x280x850 (SLM@800)	40x40x20 (typisch)

Anhand der verwendeten Korngrößen im Mikro-SLM-Verfahren ergibt sich die Notwendigkeit für einen Druckverdichter. Während in SLM-Prozessen überwiegend Makropulver mit Korngrößen von $\sim 20 \mu\text{m}$ bis $< 100 \mu\text{m}$ verwendet werden spielen im Mikro-SLM-Prozess Mikropulver mit Korngrößen $d_{90} < 10 \mu\text{m}$ und kleiner eine Rolle. Mikropulver weisen im Gegensatz zu Makropulvern besondere Eigenschaften auf. Eine Haupteigenschaft des Mikropulvers ist die fehlende Rieselfähigkeit, die beim Makropulver gerade noch vorhanden ist. Bei kleiner werdenden Korndurchmessern sorgen Van-der-Waals Kräfte und Reibung dafür, dass die Fließfähigkeit nicht mehr gegeben ist. Das kann wie folgt beschrieben werden:

$$\frac{F_H}{F_G} = \frac{\pi \cdot d \cdot W_{A,SS}}{m_p \cdot g} \propto \frac{1}{d^2} \quad \text{Formel 1}^6$$

Durch die relativ raue Oberfläche der Körner wird das Verhältnis von Adhäsionskraft F_H zu Gewichtskraft F_G bei abnehmender Größe der Adhäsionspartner größer. Für Makropulver ist die Gewichtskraft größer als die Kraft zwischen den Partikeln, wodurch es trotz rauer Oberflächen besser rieselfähig ist. Daran lässt sich die Neigung zur Agglomeratbildung von Mikropulvern erklären. Je kleiner die Partikelgröße desto größer ist der Einfluss der Adhäsionskraft und der Oberflächenrauigkeit, was zu einem schlecht rieselbaren Pulver führt. Hierin liegt die Ursache der Nutzung eines Druckverdichters im Mikro-SLM Prozess. Um einen homogenen Pulveraufzug zu erreichen wird der Fließfähigkeit des Pulvers nachgeholfen, indem das Pulver durch Druck auf das Substrat aufgebracht wird.

Ein genauerer Blick in die Industrielandschaft und in die Arbeit verschiedener Institute, die sich an der Forschung mit Laserstrahlung beteiligen, lässt erkennen, dass es sich bei dem Verfahren des SLM noch immer um eine junge Technologie handelt. Eine Auswahl an Veröffentlichungen zum Thema SLM der vergangenen Jahre wird nachfolgend dargestellt. Hieraus sei besonders die Veröffentlichung von *Kamath et al.* zu erwähnen, in der zur Erzeugung von relativ dichten Bauteilen ähnliche Prozessparameter verwendet werden, wie an der Laseranlage am Laserinstitut Hochschule Mittweida (LHM) (Edelstahlpulver 316L und Laserleistungen mit bis zu 400 W) [10]. Dadurch kann ein direkter Vergleich der erzeugten relativen Dichten der Strukturen zwischen dem Verfahren SLM und Mikro-SLM durchgeführt werden.

In Tabelle 3 sind ausgewählte Veröffentlichungen der letzten Jahre dargestellt, die sich mit den Verfahren des SLM und der Verwendung von Edelstahlpulver 316L befassen. Für den Vergleich der Prozessparameter werden Veröffentlichungen der Jahre 2010-2020

⁶ $W_{A,SS}$ = flächenbezogene Wechselwirkungsarbeit, d =Korndurchmesser, m_p = Masse Partikel, g =Fallbeschleunigung

verwendet, die in ihren Ergebnissen ähnliche Werte aufweisen wie sie mit dem Verfahren des Mikro-SLM erreichbar sind. Für den Vergleich wird sich primär auf die in der VDI 3405 bestimmten Prozessparameter bezüglich der Volumenenergiedichte (E_V) beschränkt [14]. Die Volumenenergiedichte dient der Vergleichbarkeit von Ergebnissen und wird aus der Laserleistung (P_L), der Scangeschwindigkeit (v_s), dem Spurbstand (h_s) und der Schichtdicke (l_z), wie in Formel 2 dargestellt, gebildet.

$$E_V = \frac{P_L}{v_s \cdot h_s \cdot l_z} \quad \text{Formel 2}$$

Mit Hilfe der Volumenenergiedichte können sowohl SLM als auch Mikro-SLM-Prozesse miteinander verglichen werden.

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Prozessparameter im SLM-Prozess aus ausgewählten Veröffentlichungen

Veröffentlichung	Korngröße	$[P_L]$ in W	$[v_s]$ in $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	$[h_s]$ in mm	$[l_z]$ in mm	$[E_V]$ in $\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$	Dichte in %
McMaster University, Hamilton [15]	< 75 μm	<400	600, 800, 1000	0.10	0.04	62.5-104.2	93-99 \pm 1.8
Fraunhofer IWS Breslau [16]	< 63 μm	100-200	200-220	0.037	0.05	81-150	97-99
University of Southampton [17]	15-40 μm	200	1600	0.05	0.05	42	98-99
University of Minho [18]	< 50 μm	40-100	100-2000	0.07-0.15	0.02-0.04	31.7-79.9	94-99
Livermore National Laboratory [10]	< 42 μm	150-400	500-1800	0.15	0.03	28-74	>99
Catholic University of Leuven [19]	-	100-300	175-380	0.126	0.03	35-76	97-99
University of Exeter [20]	< 50 μm	87	150	0.13	0.075	59	-
Northwestern Polytechnical University, China [21]	< 20 μm	100-200	50-800	0.1-0.8	0.05-0.5	32	-
Loughborough University [22]	< 45 μm	50	100-300	0.08	0.05	42-125	96-99
inspire AG St. Gallen [23]	24-55 μm	104	175-500	0.13	0.03; 0.045	30-125	>99.5
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne [24]	< 25 μm	< 50	< 3000	0.1	0.05	87	99
Catholic University of Leuven [25]	25-53 μm	<105	100-3000	0.02-0.06	0.02-0.04	38-156	94-99

In der Übersicht der Veröffentlichungen zu SLM Verfahren wird sich auf jene beschränkt, bei denen die verwendete Volumenenergiedichte nach VDI 3405 angegeben wird oder durch die angegebenen Werte nachvollzogen werden kann. Es wird darauf geachtet, dass die genutzten Parameter in einem Bereich liegen, der auch mit dem Verfahren des Mikro-SLM erreicht werden kann. Es ist auffällig, dass im Vergleich zum Mikro-SLM Verfahren die Scangeschwindigkeit überwiegend geringer ist. Anhand der Orte der Veröffentlichungen ist erkennbar, dass das SLM-Verfahren global angewandt wird.

Die Unterschiede des Mikro-SLM-Verfahrens gegenüber den SLM-Verfahren liegen in der geringeren Korngröße des verwendeten Pulvers, der daraus resultierenden geringeren Schichtdicke im Pulveraufzug und dem geringeren Fokusbereich. Erste Untersuchungen der Art wurden am LHM bereits in den Jahren 2001/2002 zum Thema Lasermikrosintern und Micro Cladding durchgeführt [26], [27]. Zu der Zeit wurden die zwei Verfahren parallel erforscht, wobei sich aus dem Micro Cladding später das Mikro-SLM-Verfahren entwickelte. Das neu entwickelte Mikro-SLM-Verfahren wurde erstmals 2014 erwähnt: „3D Microprint von Metallen mit Laserstrahlung – verfügbare Technologien“ [28]“. Nachfolgende Tabelle 4 stellt vergleichbare Parameter in ausgewählte Mikro-SLM-Veröffentlichungen vor.

Tabelle 4: Vergleich verschiedener Prozessparameter ausgewählter Mikro-SLM-Veröffentlichungen

Veröffentlichung	Korngröße	[P_L] in W	[v_s] in $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	[h_s] in mm	[l_z] in mm	[E_V] in $\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$	Dichte in %
Laser Zentrum Hannover [29]	< 25 μm	21 (puls)	225	-	0.020	-	-
Laser Zentrum Hannover [30]	5-25 μm	50	-	-	-	-	-
ILT Aachen [31]	< 7.9 μm	100-200	-	0.030	0.010	-	~ 97
TU Darmstadt [13]	< 5 μm	<30 (puls)	300-2000	0.015- 0.045	0.005- 0.007	-	98.8-99.3
TU Darmstadt [32]	< 5 μm	40	500-1000	-	0.010	86-173	97-99
TU Hong Kong [33]	< 5 μm	40	800	0.030	0.005	-	> 95
Hochschule Mittweida [34]	< 5 μm , < 10 μm	<100	2000	0.020- 0.040	0.010	20-120	>99.5

Leider ist eine Einordnung in die Vergleichstabelle der SLM-Verfahren nur Parameterspezifisch möglich, da bei den meisten Untersuchungen noch keine Volumenenergiedichten betrachtet wurden. Die Vergleichbarkeit des Mikro-SLM-Verfahren mit SLM-Verfahren wurde erst in den letzten Jahren aufgegriffen, da der Wunsch der Industrie zur Vergleichbarkeit stetig zunahm. In den Tabellen sind die Ergebnisse der Literaturrecherche eingearbeitet. Die freien Tabellenfelder liegen darin begründet, dass nicht in allen Veröffentli-

chungen alle Prozessparameter explizit angegeben wurden. So fehlen oftmals die Angaben der Scangeschwindigkeit oder der Schichtdicke.

Ein weiterer Blick auf die in der Tabelle 4 dargestellten Veröffentlichungen lässt erkennen, dass die Mikro-SLM-Forschung sich auf vier Standorte in Deutschland konzentriert. Namentlich sind das:

- Laserinstitut Hochschule Mittweida
- Laser Zentrum Hannover
- ILT Aachen
- TU Darmstadt

Zu beachten ist, dass die Tabelle 4 keine gesamte Übersicht über alle forschenden Institute darstellt, sondern lediglich eine derer benennt, die seit geraumer Zeit in der Forschung im Bereich des Mikro-SLM tätig sind.

3 Versuchsaufbau und -anlage

Bei der für die Versuche verwendeten Forschungsanlage handelt es sich um eine Laseranlage mit einem 400 W cw (continuous wave) Faserlaser der Firma IPG. Der Laserstrahl wird aus dem 400 W Faserlaser mit einer Wellenlänge von 1070 nm über Spiegel in einen Galvanometerscanner gelenkt. Mit Hilfe der Scannerspiegel und einer 255 mm F-Theta Optik wird der Strahl auf der Bearbeitungsoberfläche auf einen Strahldurchmesser von $\sim 30 \mu\text{m}$ im Fokuspunkt fokussiert und darauf abgelenkt.

Der schematische Aufbau der Rakeleinheit kann in Abbildung 7 eingesehen werden. Hier ist der am LHM entwickelte Druckverdichter, der für das Mikro-SLM-Verfahren verwendet wird, schematisch dargestellt. Eine Fotografie des realen Druckverdichters kann in Abbildung 6C betrachtet werden. Die Notwendigkeit für den Druckverdichter ergibt sich durch die bereits genannte, geringere Korngröße des Pulvers. Um das Pulver aufziehen zu können wird bei der besonderen Aufzugseinheit mit Druck gearbeitet. Durch den Druck wird das Pulver während des Aufzuges verdichtet, da das Pulver von alleine nicht rieselt und nur wenig fließfähig ist.

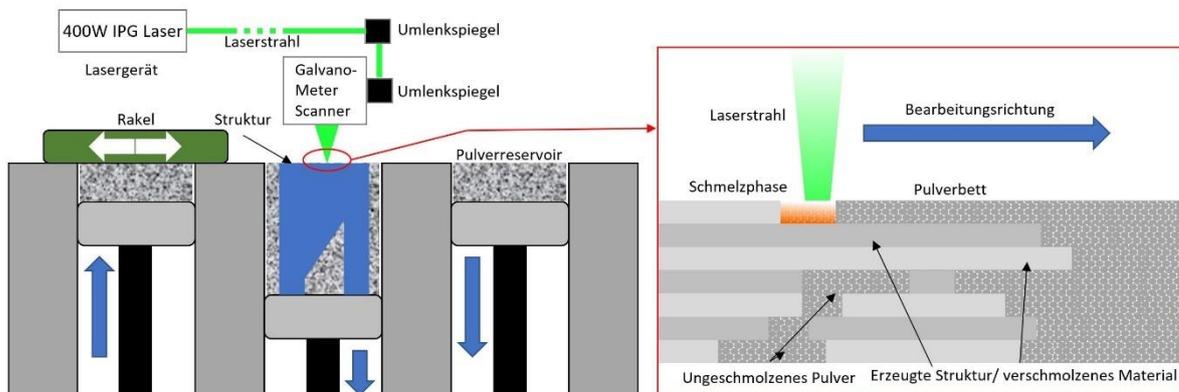


Abbildung 7: Schema Mikro-SLM-Prozess mit Druckverdichter und schematische Nahaufnahme der Bearbeitungsstelle

Für die Versuche wird Edelstahlpulver 316L, ein austenitischer, rostfreier Stahl mit einem Korndurchmesser von $d_{90} < 10 \mu\text{m}$ verwendet. Dabei handelt es sich um Pulver, bei dem 90 % der Körner einen Durchmesser von weniger als $10 \mu\text{m}$ aufweisen. In der nachfolgenden Tabelle 5 sind die wesentlichen Anlagenparameter aufgelistet. Auch wenn der Faserlaser eine maximale Leistung von 400 W bringen kann, so wird für die Versuche ein Maximum von rund 100 W verwendet, da bei einer konstanten Scangeschwindigkeit von 2 m/s die Streckenenergie für den Prozess bei höheren Leistungen zu groß wird.

Tabelle 5: Laser – und Anlagenparameter

Merkmale	Mikro-SLM Forschungsanlage
Bearbeitungsregime	cw
Laserleistung	Bis zu 400 W (~100 W typisch)
Fokusbereich	30 μm
Brennweite	255 mm F-Theta
Wellenlänge	1070 nm
Scangeschwindigkeit	2 m/s (bis 10 m/s möglich)
Prozessatmosphäre	Luft
Material	Edelstahl 316L
Korngröße	$d_{90} < 10 \mu\text{m}$

4 Theoretische Grundlagen

4.1 Grundlagen Strahlausbreitung

Für die Betrachtung der theoretischen Grundlagen des Schmelzprozesses für Mikro-SLM-Verfahren muss die Wechselwirkung von Pulverbett und Laserstrahlung genauer betrachtet werden. Hierfür wird eine schematische Darstellung des Pulverbettes dienen. Es wird davon ausgegangen, dass der Laserstrahl im räumlichen Strahlprofil ein perfektes Gaußprofil darstellt, sodass beim Auftreffen auf einer Oberfläche ein kreisförmiger Strahlquerschnitt angenommen wird. Bei der theoretischen Betrachtung wird sich an J. Eichler und H. Eichler, Laser Bauformen, Strahlführung, Anwendungen“ orientiert [35]⁷.

Die Grundlage der Ausbreitung von Laserstrahlen ist die elektromagnetische Welle, die mathematisch durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben wird. Aus den Maxwell-Gleichungen kann die Wellengleichung abgeleitet werden:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) E(x, y, z, t) = 0 \quad \text{Formel 3}$$

Dabei ist die elektrische Feldstärke E eine Funktion der Ortskoordinaten x, y, z und der Zeit t . Die Lichtgeschwindigkeit c ist durch die Geschwindigkeit im Vakuum c_0 und durch den Brechungsindex n mit $c = \frac{c_0}{n}$ gegeben. Eine einfache Lösung der Wellengleichung ist eine ebene Welle die sich nur in z -Richtung ausbreitet. Für die Anwendung interessant ist die Ausbreitung als Kugelwelle, da bei der Verwendung von Laserstrahlen zwangsweise die Ortskoordinaten in x, y und z Richtung betrachten werden müssen. Unter Verwendung der Formel 4 für Kugelwellen ergibt sich als Lösung der Wellengleichung:

$$E(\varrho) = \frac{A}{\varrho} \exp - i(k\varrho - \omega t) + C \quad \text{Formel 4}$$

$$\varrho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

⁷ Theorie Sinngemäß aus „J. Eichler und H. Eichler, Laser Bauformen, Strahlführung, Anwendungen“ Kapitel 12: „Ausbreitung von Lichtwellen“ Seite 231 ff., [35]

Hierbei handelt es sich um eine Welle, deren Radius vom Ausgangspunkt aus durch q angegeben wird. Die Amplitude der Feldstärke $\frac{A}{q}$ nimmt mit zunehmendem Radius q ab. Das Zentrum einer Kugelwelle kann beliebig gewählt werden. Legt man dieses in die komplexe z -Ebene kann durch Transformation eine komplexe Größe q eingeführt werden.

$$z \rightarrow z + iz_R = q$$

Formel 5

Durch Einsetzen in die Lösung der Wellengleichung von Kugelwellen (Formel 4) kann eine Kugelwelle mit imaginärem Zentrum erzeugt werden.

$$E(r, z, t) = \frac{A}{\sqrt{q^2 + r^2}} \exp - i \left(k\sqrt{q^2 + r^2} - \omega t \right)$$

Formel 6

$$\text{mit } r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Bei k handelt es sich um den Wellenvektor der sich aus $\left(k = \frac{2\pi}{\lambda}\right)$ bzw. $\left(k = \frac{\omega}{c}\right)$ ergibt.

Wird die Lösung im paraxialen Bereich betrachtet so gilt $r \ll |q|$.

$$\begin{aligned} E(r, z, t) &\approx \frac{A}{q} \exp - i \left(kq \sqrt{1 + \frac{r^2}{q^2}} - \omega t \right) \\ &\approx \frac{A}{q} \exp - i \left(kq \left(1 + \frac{r^2}{2q^2} \right) - \omega t \right) \\ &= \frac{B}{q} \exp \left(-i \left(\frac{kr^2}{2q} \right) \right) \exp i(\omega t - kz) \end{aligned}$$

Formel 7

Dabei ist $B = A \exp(kz_R)$. Nach Aufspaltung in Real- und Imaginärteil kann die Lösung mit den physikalischen Größen Strahlradius $w(z)$ und Krümmungsradius $R(z)$ für ein Gaußbündel wie folgt geschrieben werden:

$$E(r, z, t) \approx \frac{B}{q} \exp \left(-\frac{r^2}{w^2(z)} \right) \exp \left(-i \left(\frac{kr^2}{2R(z)} \right) \right) \exp i(\omega t - kz)$$

Formel 8

Damit ergibt sich die Lösung der Wellengleichung im achsnahen Bereich, die dem Gaußstrahl des Laserstrahles entspricht. Die Formel 8 enthält eine Lösung, die in r -Richtung durch die Gaußfunktion $\exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right)$ beschrieben wird. Die örtliche Intensitätsverteilung ergibt sich dementsprechend mit $I \sim |E|^2$ wie folgt:

$$I(r, z) = I_0(z) \cdot e^{-\frac{2 \cdot r^2}{w(z)^2}}$$

Formel 9

Dabei nimmt die Intensität mit größer werdendem Abstand von der Strahltaile ab. Betrachtet man die Intensität auf der Strahlachse, so vereinfacht sich die Formel zu:

$$I(z) = I_0(0) \cdot \frac{w_0^2}{w(z)^2}$$

Formel 10

Durch Integration erhält man den Zusammenhang zwischen der Laserleistung P und der Intensität I

$$P = \frac{\pi}{2} \omega^2 \cdot I$$

Formel 11

Mit Hilfe von Strahlradius und Divergenzwinkel kann die Ausbreitung des Gauß'schen Strahls betrachtet werden:

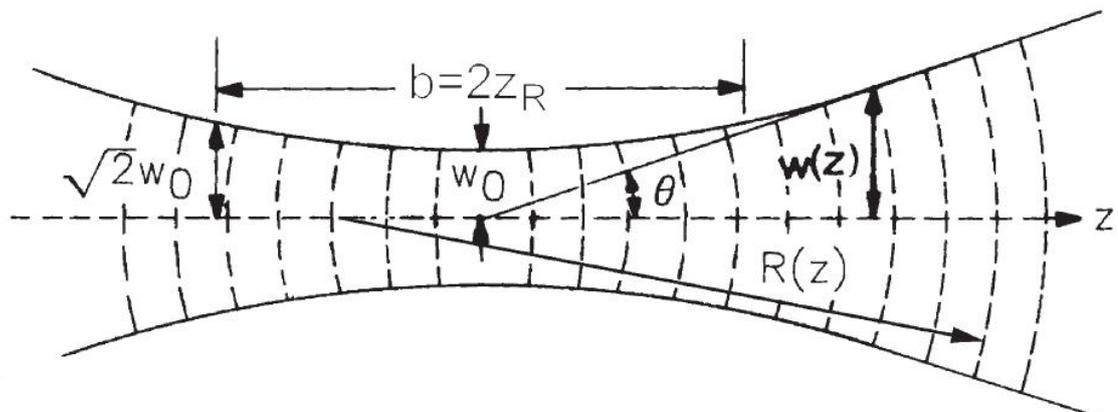


Abbildung 8: Theoretische Darstellung der Ausbreitung eines Gauß'schen Strahles mit Strahlradius $w(z)$ und Krümmungsradius $R(z)$ der Wellenfront.⁸

In Abbildung 9 ist die Darstellung der tatsächlich gemessenen Strahlkaustik erkennbar. Vergleicht man die theoretische Strahlkaustik (Abbildung 8) mit der tatsächlich aufgenommenen in Abbildung 9 kann man feststellen, dass der Laserstrahl dem theoretischen

⁸ Bild 12.3. „Ausbreitung eines Gauß'schen Strahles...“ Seite 235, [35]

Gauß sehr ähnelt. Zudem ist in der 3D-Darstellung erkennbar, dass der reale Gauß relativ rotationssymmetrisch ist.

Die Betrachtung ist notwendig, da in der nachfolgenden Simulation mit Hilfe eines idealen Gaußstrahles gerechnet wird. Würde der tatsächliche Laserstrahl massiv vom idealen Gauß abweichen wären die Ergebnisse der Simulation stark verfälscht. Da das nicht der Fall ist kann die Annahme eines idealen Gaußstrahles für die Simulation verwendet werden.

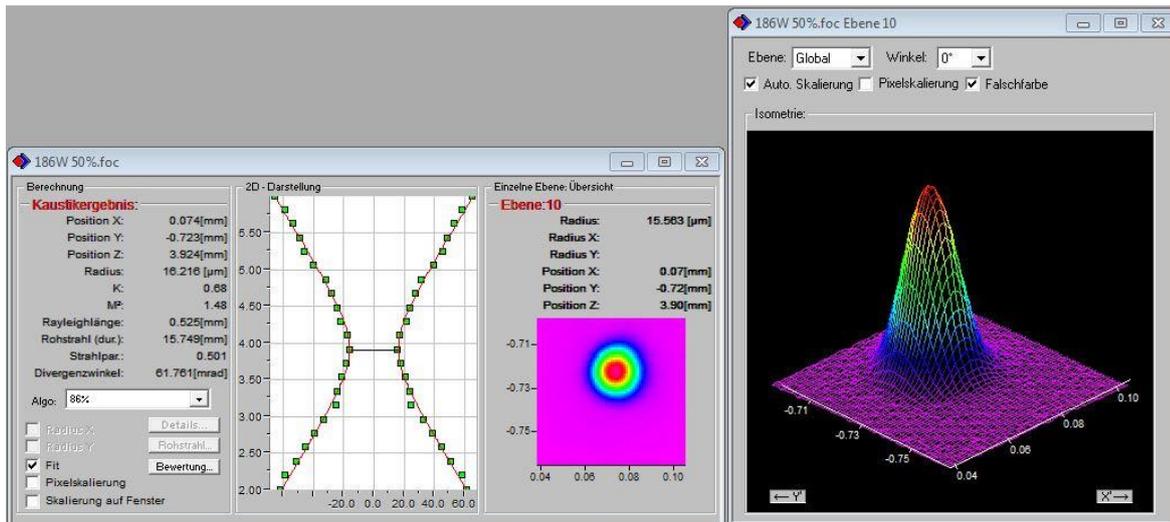


Abbildung 9: Darstellung der Laserstrahlvermessung im Querschnitt und im Profil, Gaußstrahl 400 W IPG Laser bei einer Leistung von 186 W

4.2 Laser-Materie-Wechselwirkung

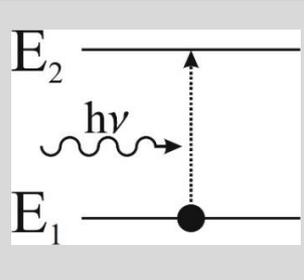
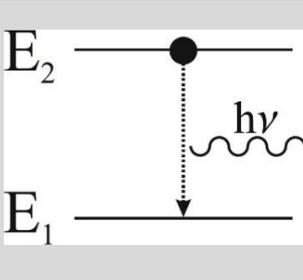
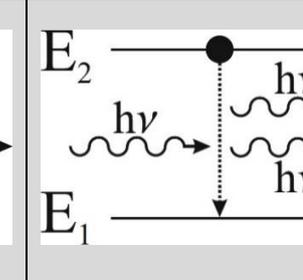
Die nachfolgende Theorie basiert auf dem Werk „Laserphysik“ von Marc Eichhorn [36]. Die Wechselwirkung von Laser und Materie ist begründet durch die Theorien von Max Planck und verschiedene Entdeckungen in den frühen Jahren der Quantenphysik. In einem der Experimente wurde gezeigt, dass ein Hohlraumstrahler, der bei konstanter Temperatur gehalten wird, ein charakteristisches Spektrum aufweist. In der Herleitung des Spektrums wurde die Annahme getroffen, dass elektromagnetische Wellen nicht kontinuierlich emittiert und absorbiert werden, sondern in festgelegten Energiebeträgen. Sie sind heute als Photonen bekannt. Die Energie der Photonen kann durch ihre Wellenlänge λ und ihre Frequenz f bestimmt werden:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Formel 12

Damit ein Photon von einem quantenmechanischen System absorbiert und emittiert wird können drei elementare Prozesse der Wechselwirkung beschrieben werden, die von Einstein untersucht wurden:

Tabelle 6: Wechselwirkung zwischen Zwei-Niveau-Systemen und Photon⁹

	Absorption	Spontane Emission	Stimulierte Emission
Schema			
Übergang	Niveau $ 1\rangle \rightarrow$ Niveau $ 2\rangle$	Niveau $ 2\rangle \rightarrow$ Niveau $ 1\rangle$	Niveau $ 2\rangle$ (angeregt) \rightarrow Niveau $ 1\rangle$
Beschreibung	Photon, das die Energie $E_{h\nu}$ in das System einbringt	Photon, das die Energie $E_{h\nu}$ zu einem spontanen Zeitpunkt in zufälliger Richtung emittiert	Eintreffendes Photon (1) erzeugt resonanten Übergang, bei dem ein zweites Photon (2) mit Energie $E_{h\nu}$ emittiert wird. Beide Photonen gleichen sich in all ihren Eigenschaften

Damit ein Photon mit Materie eine Wechselwirkung eingehen kann muss das Photon die Moleküle des Materials anregen. Dafür muss die Resonanzbedingung (stimulierte Emission) erfüllt sein. Ist das der Fall dann gibt das Photon Energie $E_{h\nu}$ an das System ab, wenn die eingebrachte Energie $E_{h\nu} > \Delta E$ ist, wobei ΔE der zu überbrückenden Energiedifferenz der Quantenübergänge der Atomhülle entspricht. Bei Metallen, z.B. dem hier untersuchten Edelstahl 316L, sind die zu überbrückenden Energiedifferenzen sehr gering im Vergleich zu Halbleitern oder Nichtleitern wie z.B. Keramiken.

Trifft ein Laserstrahl auf Materie, so kann er entweder absorbiert, reflektiert oder transmurtiert werden. Dabei ist die Summe aus Reflektion E_R , Absorption E_A und Transmission E_T

⁹ Theoretische Grundlagen basieren auf der Theorie „Laserphysik“ von Marc Eichhorn, Bilder in Tabelle 3 sind in gleicher Quelle, Seite 9, Abb. 1.2 „Wechselwirkungen zwischen einem Zwei-Niveau-System und einem Photon nach Einstein.“ Zu finden [36].

gleich der einfallenden Strahlung. Als Bilanz kann das entweder als Strahlungsbilanz oder Energiebilanz beschrieben werden:

Energiebilanz: $E_0 = E_R + E_A + E_T$

Strahlungsbilanz: $I_0 = I_R + I_A + I_T$ Formel 13

Allgemein: $R + A + T = 1$

Graphisch sieht es so aus, dass die einfallende Strahlung in absorbierte, transmutierte und reflektierte Anteile aufgespalten wird. Die theoretische Betrachtung, wie sie in Abbildung 10 dargestellt ist zeigt, dass in einem Pulverbett der transmutierte Anteil gegen Null geht, während absorbiertes und reflektiertes Anteil überwiegen.

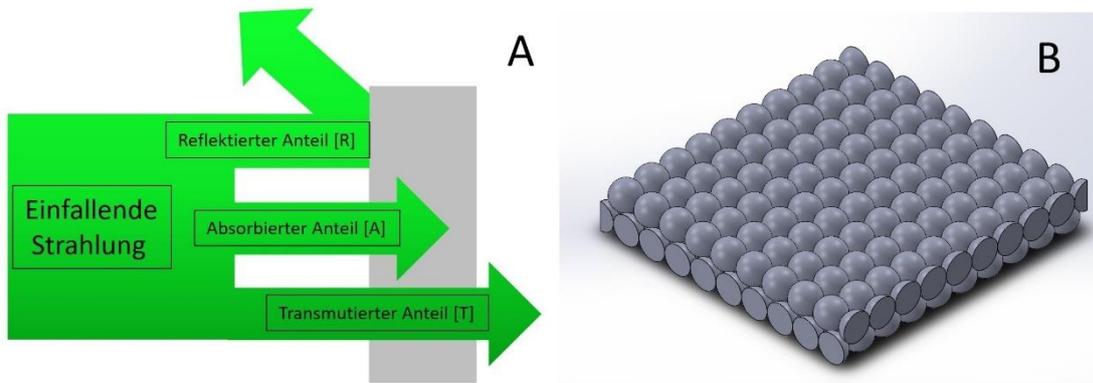


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Strahlungsbilanz der Laserstrahlung an Materie (A) und ideale Kornanordnung im Pulverbett (B)

In Abbildung 10A sind Absorption, Reflektion und Transmission an einer ebenen Fläche dargestellt. Ein Pulverbett, wie es im SLM-Prozess verwendet wird, besteht aus Kugeln oder kugelförmigen Partikeln. Die Tatsache kann auf den Mikro-SLM-Prozess nur bedingt übertragen werden. Durch die Verwendung eines Druckverdichters werden die Pulveragglomerate beim Pulveraufzug zerstört und zudem das Pulverbett verdichtet. Durch die unterschiedlich großen Partikel mit Korngrößen von 10 μm und kleiner verbleiben kleine Hohlräume trotz Verdichtens im Pulverbett, während die Oberfläche nach dem Verdichten relativ dicht aussieht. Durch die Kombination von Druckverdichter und anschließender Überfahrt der Keramikrakel im Mikro-SLM Prozess entsteht eine Struktur, die vermutlich eher einem porösen Vollmaterial als der klassischen Kugelanordnung (Abbildung 10B) entspricht. Aus dem Grund wird für die anschließende Simulation ein poröses Vollmaterial als Simulationsgrundlage verwendet.

5 Simulation Mikro-SLM-Prozess

5.1 Slicen eines Bauteiles

Für die Erzeugung von Vollmaterial im Mikro-SLM-Prozess werden Strukturen, wie bereits in Kapitel 2.2 dargestellt, gesliced. Die einzelnen Ebenen der Struktur werden anschließend mit Hilfe von Software für die Laserbearbeitung verändert und daraus DXF-Dateien erzeugt. Die Dateien enthalten die vektoriellen Informationen für die Laserbearbeitung. Das kann auf unterschiedliche Art und Weise geschehen und soll am Beispiel eines Kronrades für ein Uhrwerk vorgestellt werden. Zunächst wird aus den Slices des Volumenkörpers ein Bild der Konturen des Körpers erzeugt, da die im Laserprozess gesondert zur Füllstruktur verwendet werden. Abbildung 11A stellt den Volumenkörper sowie die erzeugte Kontur, Abbildung 11B, dar.

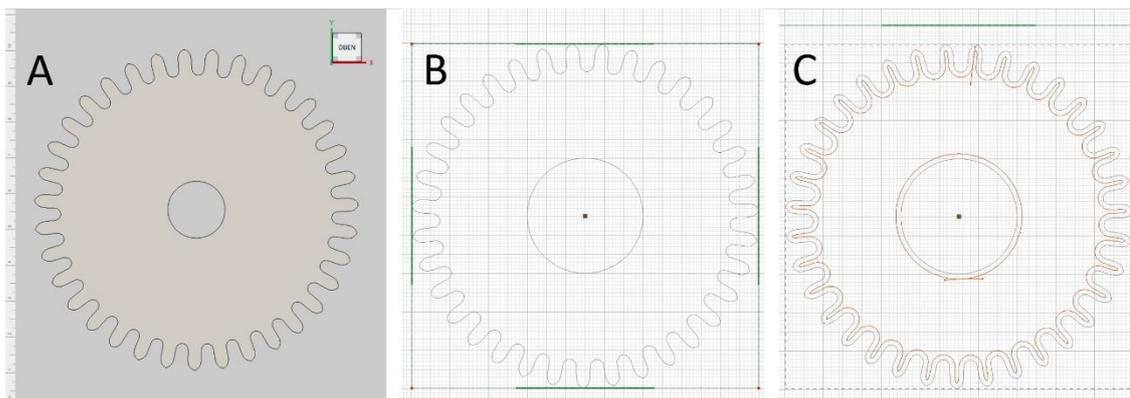


Abbildung 11: Darstellung der Konturen am Beispiel des Kronrades: Vollmaterial (A), Konturdarstellung (B), Kontur mit Innenoffset (C)

Da zur Abarbeitung der Kontur der Laserstrahl entlang dieser geführt wird, muss zur Kompensation der Außenkante der Strahldurchmesser berücksichtigt werden. Die Beam Kompensation ist notwendig, da bei der Laser-Materie-Wechselwirkung das Material aufgeschmolzen wird. Es entsteht um den Durchmesser des Fokuspunktes herum eine Schmelzphase (mehr dazu in der Simulation) die für die Erzeugung der Linienabstände berücksichtigt werden muss. Daher wird zur erzeugten Kontur ein Offset (Abbildung 11C) erstellt. Betrachtet man die Abbildung 11C genauer, so erkennt man die Beschleunigungs- und Bremsstrecken der Außenkontur (Vektorverlängerungen zu Beginn und zum Ende des Kurvenzuges). Die Abarbeitung der Kontur erfolgt in einem geschlossenen Kurvenzug der an einem definierten Punkt beginnt und endet. Die Verlängerung der Vektoren ist notwendig, da zum Beginn und zum Ende der Abarbeitung die Scannerspiegel noch nicht auf Bearbeitungsgeschwindigkeit sind, sondern noch beschleunigen. Die Scannerspiegel haben die Aufgabe den Laserstrahl auf dem Bearbeitungsfeld auszulernen. Um

die Beschleunigungsphase der Spiegel zu kompensieren schaltet der Laser entsprechend eher für die Bearbeitung ein und entsprechend später die Bearbeitung aus, da zu den Zeitpunkten Beschleunigungen stattfinden. Wenn die Beschleunigungs- und Bremsstrecken gut vermessen wurden kommt es bei der Bearbeitung weder zu Lücken noch zu Überlappungen der Kontur. Das ist notwendig und ein Qualitätsmerkmal, da etwaige Doppelbestrahlungen zu eventuellen Schmelzüberhöhungen führen, die im Prozess ungewollte Fehler erzeugen.

5.2 Vorbetrachtungen für die Simulation

Für die Simulation des Mikro-SLM-Prozesses wird die Simulationssoftware COMSOL Multiphysics¹⁰ verwendet. Da die Simulation des Prozesses extrem komplex ist, werden die nachfolgenden Vereinfachungen getroffen:

- Bei der Simulation des Prozesses wird von Edelstahl 316L in massiver Form als poröses Material ausgegangen.
- Die Simulation beschränkt sich auf die thermische Wärmeleitung innerhalb der ersten Pulverschichten.
- Die Randflächen des Simulationskörpers ermöglichen den Wärmetransport über die Enden hinaus, da lediglich ein Teil des Pulverbettes simuliert wird
- Der Laserstrahl wird mit einem idealen Gaußstrahlprofil angenommen
- Die Bestrahlung des Körpers erfolgt von oben.
- Die Reflektion und die Streuung im realen Pulverbett durch Oberflächenunebenheiten der Partikel werden vernachlässigt.
- Die im Inneren des Pulvers auftretenden Reflektionen und Streuungen werden vernachlässigt.

Die Simulation hat das Ziel den Mikro-SLM-Prozess genauer darzustellen. Zudem soll herausgefunden werden, ob bei der bidirektionalen Bearbeitung im Vergleich zur unidirektionalen Bearbeitung Vorteile oder Nachteile erkannt werden. Weiterhin soll ein genauer Blick auf die Linienseparation der Schmelzbahnen im Mikro-SLM-Prozess geworfen werden, um herauszufinden warum die besten Ergebnisse der Erzeugung von dichten Strukturen mit den entsprechenden Parametern entstehen. Hierzu soll zunächst auf die Generierung von Vollmaterialstrukturen im Mikro-SLM-Prozess eingegangen werden. Dafür erfolgt die Füllung der Vollmaterialstruktur mit der Verlängerung der erzeugten Linien. Der Abstand der Linien zueinander bestimmt im wesentlichen Maße die Erzeugung und den Aufbau der Struktur des endgültigen Bauteiles.

¹⁰ COMSOL Multiphysics Version 5.4

Idealerweise bewegt sich die Größe des Linienabstandes um den Durchmesser des Laserstrahles im Fokuspunkt, da durch das Aufschmelzen des Materials eine Schmelzbahn entsteht.

Für die Untersuchungen zur Dichte, deren Simulation und für die Erzeugung von Strukturen wird für die hier verwendete Mikro-SLM-Anlage eine Variation des Linienabstandes vorgenommen. Dafür werden die Abstände von $20\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$ und $40\ \mu\text{m}$ sowohl simuliert als auch Strukturen damit erzeugt. Die Unterschiede der einzelnen Linienabstände werden in Abbildung 12 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass bei gleicher Spurbreite nur die Überlappung eine Rolle spielt.

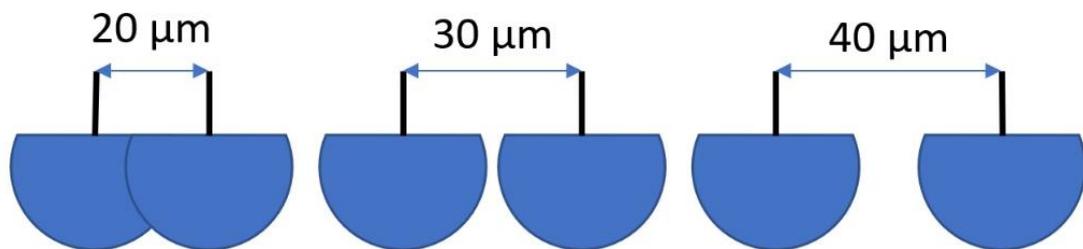


Abbildung 12: Darstellung der untersuchten Linienabstände von $20\ \mu\text{m}$ bis $40\ \mu\text{m}$ mit Überlappung der Linien

Betrachtet man die schematische Darstellung der Überlappung der Linienabstände am Beispiel des Kronrades, so sieht man, dass die Anzahl der erzeugten Schmelzbahnen signifikant variiert. Die Wahl des Linienabstandes ist nicht nur für die Erzeugung der idealen Dichte relevant, sondern hat auch für die Geschwindigkeit des Prozesses einen entscheidenden Einfluss. Insbesondere in der Industrie spielt die Prozessoptimierung hinsichtlich höherer Stückzahlen in kürzeren Zeiträumen eine wesentliche Rolle, so dass die Prozessgeschwindigkeit nicht vernachlässigt werden kann. In Abbildung 13A-D sind die variierten Linienabstände am Kronrad dargestellt.

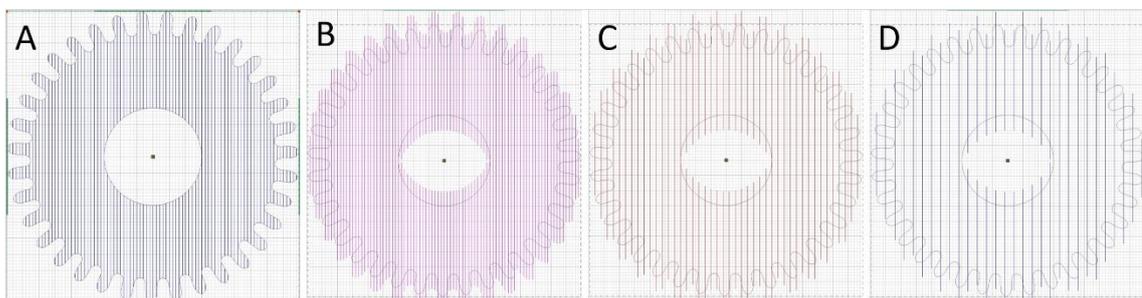


Abbildung 13: Darstellung Linienabstand am Kronrad: Ohne Beschleunigungsstrecken (A) mit Beschleunigungsstrecken (B), doppelter Linienabstand (C), dreifacher Linienabstand (D)

Zur physikalischen Betrachtung der Simulation sei folgendes ergänzt: Es handelt sich bei der Simulation um einen thermischen Prozess. Dem entsprechend wird ein physikalisches Modell der Wärmeleitung an porösen Materialien verwendet. Die Formel der Wärmelei-

tion, die für die Simulation verwendet wird entspricht der Standardeinstellung von COMSOL Multiphysics. Die Formel hinter der Physik beruht auf der Finiten Elemente Methode. Dabei handelt es sich um eine in der Computersimulation oft angewandte Methode zur Lösung physikalischer Probleme unter Verwendung numerischer Ansätze der Mathematik. Dafür wird das Problem in einem ersten Schritt als Satz von Differentialgleichungen formuliert und anschließend numerisch gelöst. Die in COMSOL Multiphysics für die Lösung der Wärmeleitung verwendete Formel ist die nachfolgende, nichthomogene Differentialgleichung:

$$\rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{\text{ted}} \quad \text{Formel 14}$$

In dieser sind Dichte ρ , Wärmekapazität C_p , Temperatur u zum Zeitpunkt t , und q als Wärmestromdichte vorgegebene Werte, die durch die internen Eigenschaften der Software definiert sind. Sie werden bei der Auswahl des Materials in COMSOL Multiphysics festgelegt. Mit Hilfe der Werte kann die Simulation durchgeführt werden. Da das Augenmerk eher auf den Ergebnissen der Simulation als der Theorie dahinter liegt, soll an der Stelle auf die Theorie der Finiten Elemente Methode von K.-J. Bathe und P. Steinke verwiesen werden [37], [38]. In beiden Abhandlungen wird die Theorie anhand thermodynamischer Beispiele erklärt.

Für die durchgeführten Simulationen ist die Abhängigkeit der Temperatur vom örtlichen und zeitlichen Verlauf des Laserstrahles von Bedeutung. Da ein idealer Gauß angenommen wird kann die Gaußfunktion in COMSOL Multiphysics für die Strahlformung verwendet werden. Dafür wird die Gaußfunktion für den Bereich von $-15 \mu\text{m}$ bis $+15 \mu\text{m}$ eingesetzt (Abbildung 14).

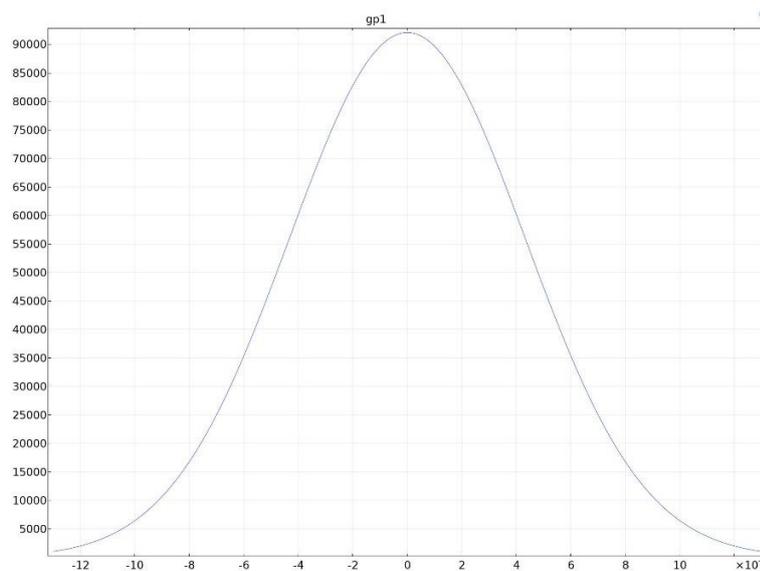


Abbildung 14: Graph des verwendeten Gaußpulses von $-15 \mu\text{m}$ bis $+15 \mu\text{m}$

Das im Abbildung 14 dargestellte Gaußprofil wird vom Startpunkt über die Oberfläche der Simulationsstruktur mit dem Fokuspunkt auf der Strukturoberfläche bewegt. Dabei wird das thermische Verhalten der Simulationsstruktur mit Hilfe der bereits genannten thermischen Wärmeleitung analysiert.

5.3 Simulation von unidirektionaler und bidirektionaler Abarbeitung

Für die Bearbeitung im Mikro-SLM-Prozess werden unter anderem zwei unterschiedliche Bestrahlungsarten angewandt, unidirektional und bidirektional. Bei der unidirektionalen Abarbeitung beginnt die Bestrahlung an einem Punkt und wird in Vektorrichtung durchgeführt. Anschließend springt der Laserstrahl zurück an den Anfangspunkt und wird um den eingestellten Linienabstand verfahren um bei der nächsten Überfahrt erneut in Vektorrichtung zu bestrahlen. Bei der bidirektionalen Abarbeitung springt der Laserstrahl nicht sondern wird um den eingestellten Linienabstand verfahren und bestrahlt auch bei der Bewegung zurück zum Startpunkt.

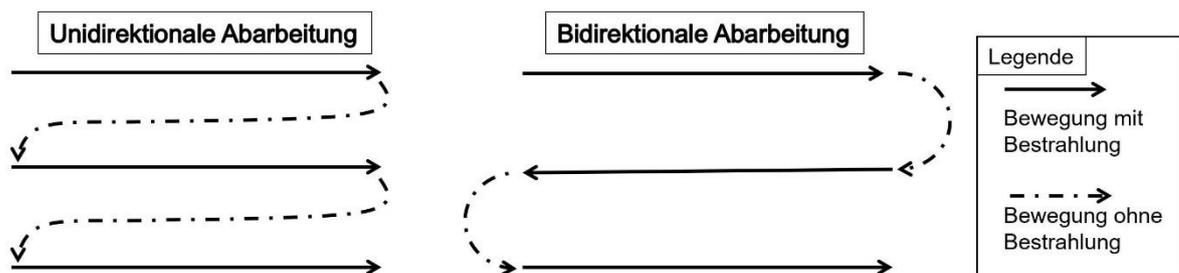


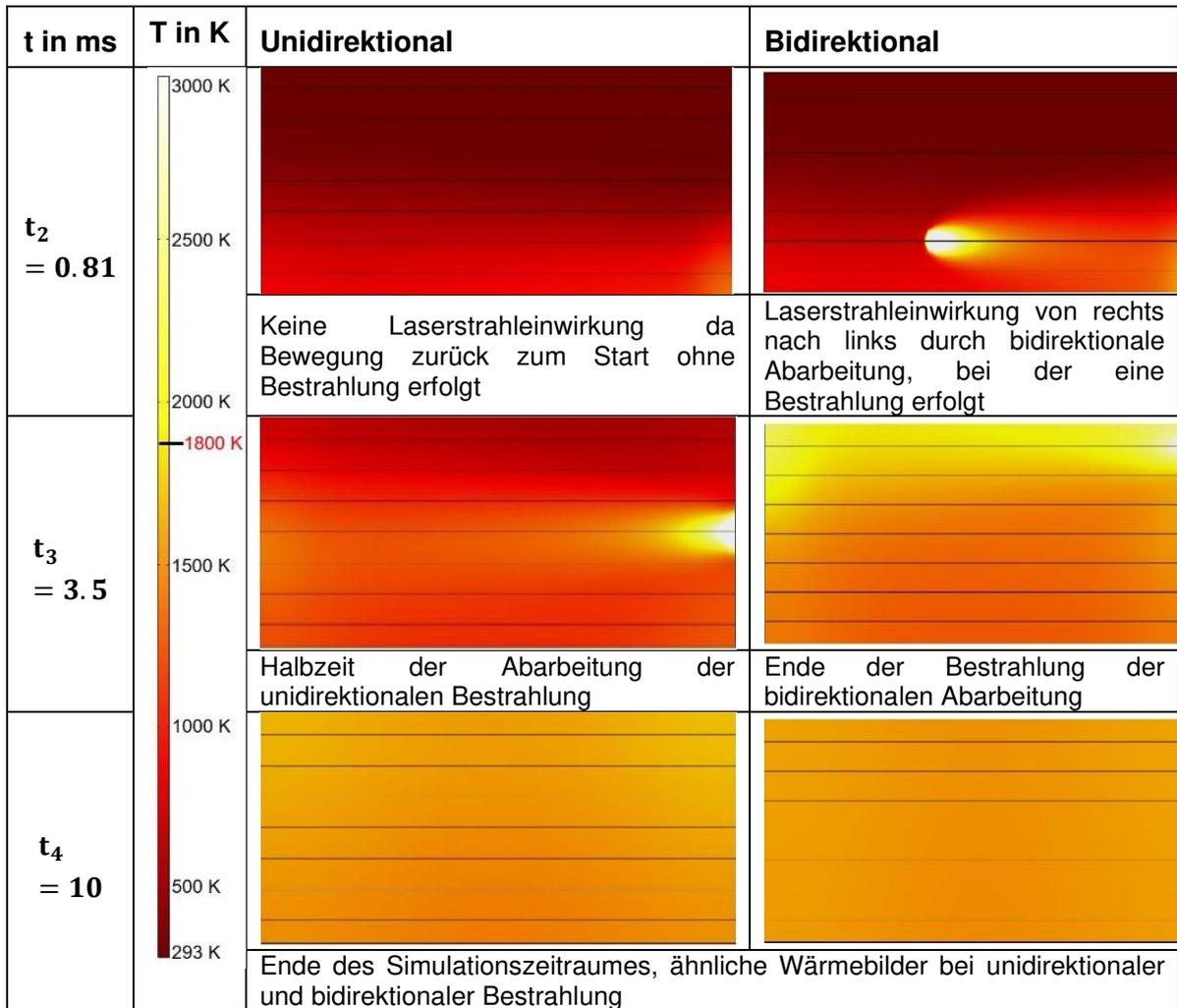
Abbildung 15: Schematische Darstellung der unidirektionalen und bidirektionalen Abarbeitung

Bei der Betrachtung der beiden Schemata lässt sich auf den ersten Blick der Unterschied der Abarbeitungsgeschwindigkeit erkennen. Das für die Simulation untersuchte Volumen hat die Abmaße von $1000 \mu\text{m} \cdot 300 \mu\text{m} \cdot 40 \mu\text{m}$ und entspricht einem kleinen, mit dem Mikro-SLM-Verfahren herstellbarem, Volumenkörper. Die nachfolgenden Bilder zeigen die Simulation zu ausgewählten Zeitpunkten (Tabelle 7). Die Falschfarbendarstellung teilt den Simulationsbereich in verschiedene Temperaturbereiche ein. Die Raumtemperatur von 293 K wird dunkelrot, die Schmelztemperatur von 1800 K wird gelb, während die Verdampfungstemperatur von rund 3000 K weiß dargestellt ist. Es treten Temperaturen weit über 3000 K im Prozess des SLM auf, doch für die einfachere Darstellbarkeit der nachfolgenden Abbildungen wird eine obere Grenze von 3000 K für die Legende eingeführt. Zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ sieht die Simulation für beide Bestrahlungsrichtungen gleich aus. Der Volumenkörper hat Raumtemperatur und der Laserstrahl beginnt die Abarbeitung. Zum Zeitpunkt $t_1 = 0.27 \text{ ms}$ sehen beide Simulationsbilder gleich aus, da der Laserstrahl am gleichen Punkt startet und mit gleicher Geschwindigkeit über das Substrat gelenkt wird. Dabei ist der Laserstrahl sichtbar, da an der Position des Strahles die Temperatur im Fokuspunkt über 3000 K steigt. Es findet sowohl Verdampfung als auch Aufschmelzung der

Struktur statt. Da in einem realen Pulverbett unterschiedlich große Korndurchmesser vorhanden sind und mehrere thermische Effekte auftreten, werden trotz der hohen Temperaturen nicht alle Körner sofort verdampft, sondern es bildet sich eine Schmelze aus, die die Struktur erzeugt. Zum Zeitpunkt $t_2 > 0.5$ ms wird ein Unterschied sichtbar. Während bei beiden Abarbeitungen der Laserstrahl mit konstanter Geschwindigkeit zurück zum Startpunkt bewegt wird, ist er bei der bidirektionalen Bestrahlung eingeschaltet und erzeugt eine Schmelzbahn. Der Unterschied wird in den nachfolgenden Zeitbereichen sichtbar. Exemplarisch sind die Zeitpunkte $t_3 = 3.5$ ms und $t_{\text{ende}} = 10$ ms in der Tabelle dargestellt, da bei t_3 die bidirektionale Bearbeitung bereits abgeschlossen ist. Bei der unidirektionalen Bestrahlung ist in dem Zeitraum etwa die Hälfte des Volumens bestrahlt. Zum Zeitpunkt t_{ende} ist die Simulation abgeschlossen. Es kann beobachtet werden, dass die unidirektionale Bearbeitung länger dauerte und dementsprechend höhere Temperaturen und ein ungleichmäßigeres Temperaturfeld gegenüber der bidirektionalen Bestrahlung sichtbar ist. Die bidirektionale Bestrahlung war nach ca. 5 ms beendet und hatte mehr Zeit zum Abkühlen. Aus dem Grund hat sich ein gleichmäßigeres Temperaturfeld gebildet. Interessant ist, dass beide Bestrahlungsarten ähnlich hohe Endtemperaturen aufweisen. Das hängt damit zusammen, dass die Wärmeleitung ein träger Prozess ist und in den ca. 10 ms, die die gesamte Bestrahlung dauert, ein kompletter Wärmeausgleich noch nicht erfolgt.

Tabelle 7: Vergleich der Simulationsbilder uni- und bidirektionale Bestrahlung

t in ms	T in K	Unidirektional	Bidirektional
$t_0 = 0$			
		Temperaturfeld zum Start, unidirektional und bidirektional gleich	
$t_1 = 0.27$			
		Temperaturfeld mit sichtbarer Laserstrahleinwirkung in Vorschubrichtung mit Falschfarbendarstellung der bestrahlten Bereiche	



Neben der offensichtlichen Erkenntnis, dass die bidirektionale Bestrahlung schneller erfolgt können keine weiteren, nennenswerten Unterschiede während der Bestrahlung beobachtet werden. Demzufolge werden die nachfolgenden Simulationen bidirektional durchgeführt. Der erste Vergleich mit der Praxis erfolgt an bidirektional erzeugten Testkörpern und wird im nachfolgenden Kapitel bearbeitet.

5.4 Simulation thermisches Verhalten im Strukturquerschnitt

Betrachtet man den Querschnitt der Schmelzstrukturen unter der Berücksichtigung der bereits dargestellten Absorptionseigenschaften, so kann für ein Pulverbett folgendes festgestellt werden. Die tatsächlichen thermischen Vorgänge bestehen neben der absorbierten und reflektierten Strahlung aus Konduktion zwischen den Pulverkörnern und Konvektion zwischen den Pulverkörnern und der dazwischen liegenden Luft. Das ist in Abbildung 16 schematisch dargestellt. Hierin liegt die Ursache, dass im SLM-Prozess nicht nur eine Pulverschicht aufgeschmolzen wird sondern dass immer mehrere Schichten miteinander verschmolzen werden. Zum einen liegt das an den Hohlräumen zwischen den Körnern durch die die Laserstrahlung in tiefere Gebiete eindringen kann, zum anderen

spielen im SLM-Prozess am Fokuspunkt sehr hohe Temperaturen eine Rolle, so dass es zum Aufschmelzen und Verdampfen von Körnern kommt. Durch thermische Effekte tritt Wärmestrahlung auf und wird an untere Pulverschichten abgeben bzw. ein tieferes Einstrahlen ermöglicht. In Abbildung 16 ist die temperaturabhängige Wärmestrahlung sichtbar, wie auch in den bereits dargestellten Simulationsbildern. Die in Abbildung 16A dargestellten Körner können schematisch als Querschnitt der Struktur verstanden werden.

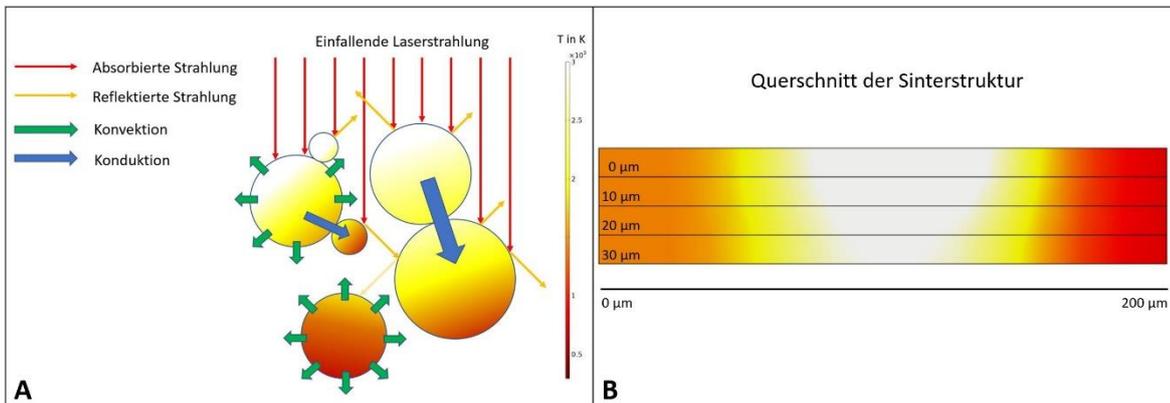


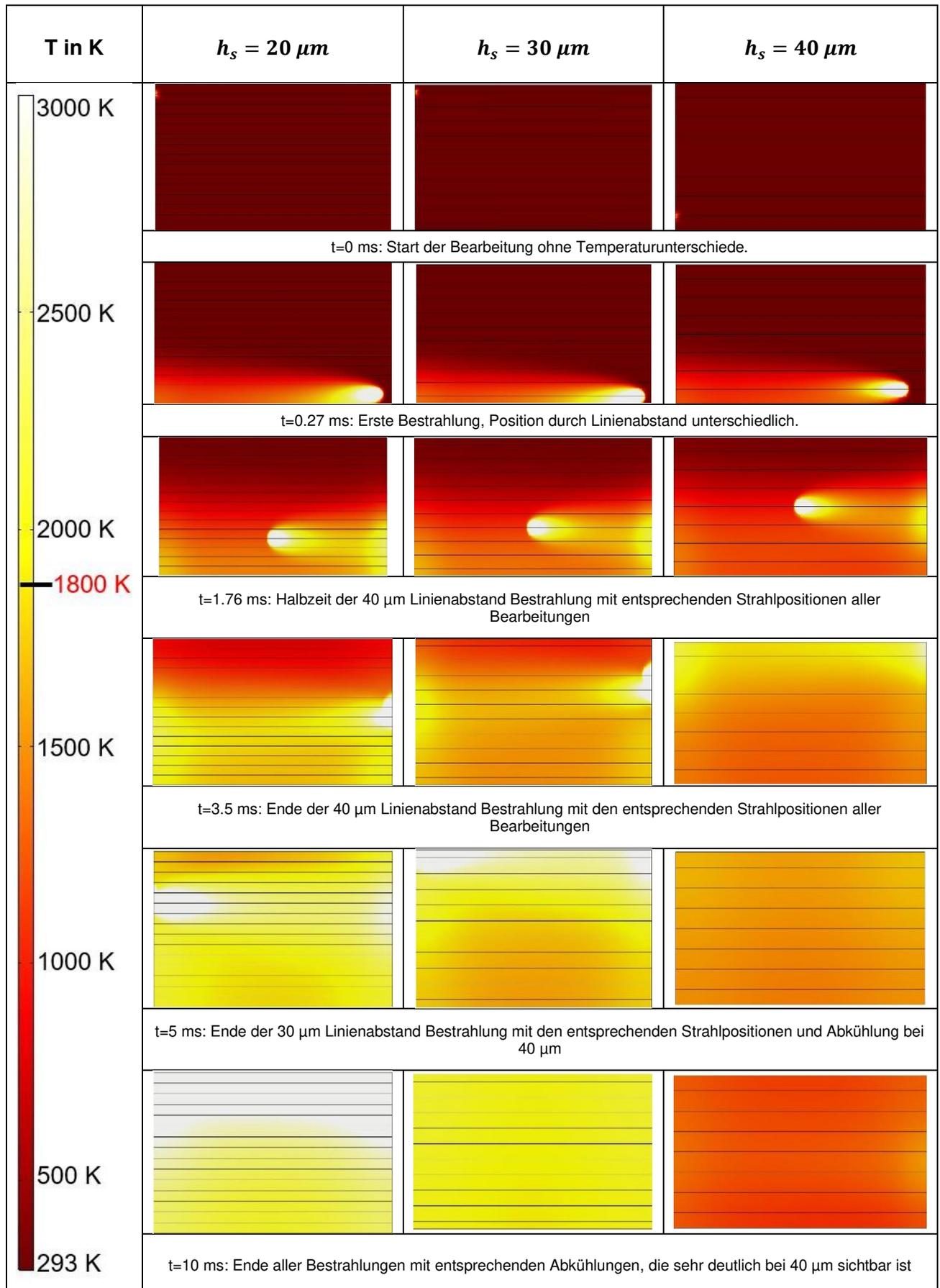
Abbildung 16: Thermisches Verhalten zwischen den Pulverkörnern im SLM-Prozess mit Absorption und Reflektion von Strahlung sowie Konvektion zwischen Korn und Luft sowie Konduktion zwischen den Pulverkörnern – Schema (A), Simulation (B)

In der Simulation der Sinterstruktur wird gezeigt, dass der wärmebeeinflusste Bereich über die Wechselwirkungszone der Laserstrahlung hinaus geht. In Abbildung 16B wird mit Hilfe der Simulation die Wärmeleitung in die Tiefe der Struktur aufgezeigt. Dabei wird anhand der in Abbildung 16A dargestellt thermischen Effekte eine über mehrere Schichten in die Tiefe entstehende Schmelze sichtbar gemacht. Die Vereinfachung der porösen Struktur ist an der Stelle sinnvoll, da das Verhalten der Pulverkörner an jeder Stelle im Pulverbett statistisch zufällig verteilt sein kann.

5.5 Einfluss des Linienabstandes in der Simulation

Wie bereits beschrieben soll der Einfluss des Linienabstandes simuliert werden. Hierfür wird COMSOL Multiphysics mit den bereits vorgestellten Einstellungen verwendet. Für die Variation des Linienabstandes werden drei unterschiedliche Szenarien generiert, wobei das bestrahlte Volumen jeweils konstant geblieben ist. In der nachfolgenden Tabelle 8 werden ausgewählte Zeitpunkte der Bestrahlung über alle drei Simulationen miteinander verglichen. Zunächst kann in Tabelle 8 beobachtet werden, dass der größte Vorteil von großen Linienabständen die kürzere Bestrahlungszeit ist. Je größer der Linienabstand desto geringer die Bestrahlungszeit und desto schneller die Abarbeitung der zu erzeugenden Strukturen. Weiterhin ist sichtbar, dass zum Start der Simulation alle Linienabstände bei einer Raumtemperatur von 293 K gleich aussehen.

Tabelle 8: Vergleich des Linienabstandes - Simulation



Mit Beginn der Simulation zum Zeitpunkt $t_1 = 0.27$ ms wird beobachtet, dass die Position der Schmelzspur in Relation zur Unterkante minimal variiert. Das hängt damit zusammen, dass mit zunehmendem Linienabstand der Abstand zur Außenkante geringer wird. Unabhängig davon ist, wie erwartet, das gleiche Schmelzbild sichtbar, da der Fokus der Bestrahlung für alle Simulationen konstant war. Zum Zeitpunkt $t_2 = 1.76$ ms zeigt sich, dass die Abarbeitung mit zunehmendem Linienabstand schneller vonstattengeht. Zudem wird beobachtet, dass durch die höhere Anzahl an Bestrahlungen die Zone der Wärmebestrahlung im bereits bestrahlten Gebiet abhängig vom Linienabstand ist. Weiterhin ist sichtbar, dass bereits Wärmeleitung in den noch zu bestrahlenden Bereichen stattgefunden hat. Hier wird festgestellt, dass bei einem Linienabstand von $20\ \mu\text{m}$ eher in einen aufgewärmten Bereich gestrahlt wird als bei $40\ \mu\text{m}$. Ob das einen Einfluss auf die zu erzeugende Struktur hat wird im Vergleich mit der Realstruktur im nachfolgenden Kapitel diskutiert.

Festgestellt wird, dass der bestrahlte Bereich für $20\ \mu\text{m}$ durch die höhere Anzahl an Überfahrten und dem daraus resultierenden höheren Energieeintrag deutlich wärmer ist als bei der $40\ \mu\text{m}$ Simulation. Zum Zeitpunkt $t_3 = 3.5$ ms ist die Bearbeitung für $40\ \mu\text{m}$ Linienabstand abgeschlossen. Es ist sichtbar, dass sich ein ungleichmäßiges Temperaturfeld ausgeprägt hat, das zu dem Zeitpunkt bereits abgesunken ist während es bei der zuletzt bearbeiteten Kante noch fast im Schmelzbereich liegt. Zum Zeitpunkt $t_4 = 5$ ms endet die Bearbeitung für den Linienabstand von $30\ \mu\text{m}$. Gleichzeitig ist für den $40\ \mu\text{m}$ Linienabstand bereits eine Abkühlung der Struktur erkennbar. Interessant ist, dass nahezu die gesamte Struktur beim $20\ \mu\text{m}$ Linienabstand nahe der Schmelztemperatur liegt. Die Menge an eingebrachter Energie im Prozess sorgt für eine deutlich stärkere Erwärmung als bei den anderen beiden Linienabständen. Zum Abschluss der Simulation bei $t_5 = 10$ ms ist eine weitere Abkühlung des $40\ \mu\text{m}$ Testfeldes erkennbar, während bei dem $20\ \mu\text{m}$ Feld eine deutlich höhere Temperatur festgestellt wird.

Als Fazit der Simulationen ergibt sich, dass die Zeit der Bearbeitung einen deutlichen Einfluss auf die Erwärmung der Struktur hat. Zudem steigt bei geringerem Linienabstand die Zahl der Überfahrten und damit die eingebrachte Volumenenergie. Daraus wird geschlossen, dass es einen Volumenenergiebereich gibt, der für die Erzeugung einer Schmelze notwendig ist. Der minimale Bereich muss durch die Variation der Linienabstände herausgefunden werden. Da bei dem Linienabstand von $40\ \mu\text{m}$ eine Schmelzspur entsteht, liegt die Vermutung nahe, dass die Verschmelzung mit den benachbarten Schmelzspuren nicht so gut funktioniert wie bei den Linienabständen von $30\ \mu\text{m}$ und $20\ \mu\text{m}$. Ob unter den Bedingungen ein Verschmelzen des Vollmaterials stattfindet wird im nächsten Kapitel betrachtet.

6 Experimente und Ergebnisse

6.1 Vergleich der Simulationen mit realen Oberflächen

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Simulationen zeigen, dass der Temperatureinfluss und die Wechselwirkungsdauer abhängig vom Linienabstand der bestrahlten Struktur sind. Der Sachverhalt wird nun mit realen Strukturen verglichen. Hierfür werden Sinterstrukturen mit entsprechenden Linienabständen im Mikro-SLM-Prozess mit den folgenden Parametern erzeugt. Wird nichts anderes angegeben wird mit einer Wellenlänge von $\lambda=1070$ nm im cw Betrieb und mit einer Scangeschwindigkeit von 2 m/s gearbeitet. Der Linienabstand wird von 20 μm bis 40 μm variiert. Die Leistung liegt, wie auch in den Simulationen, konstant bei 30 W. Es werden Volumenkörper generiert und anschließend Auflichtmikroskopaufnahmen der Oberfläche mit 300-facher Vergrößerung aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17A-C dargestellt.

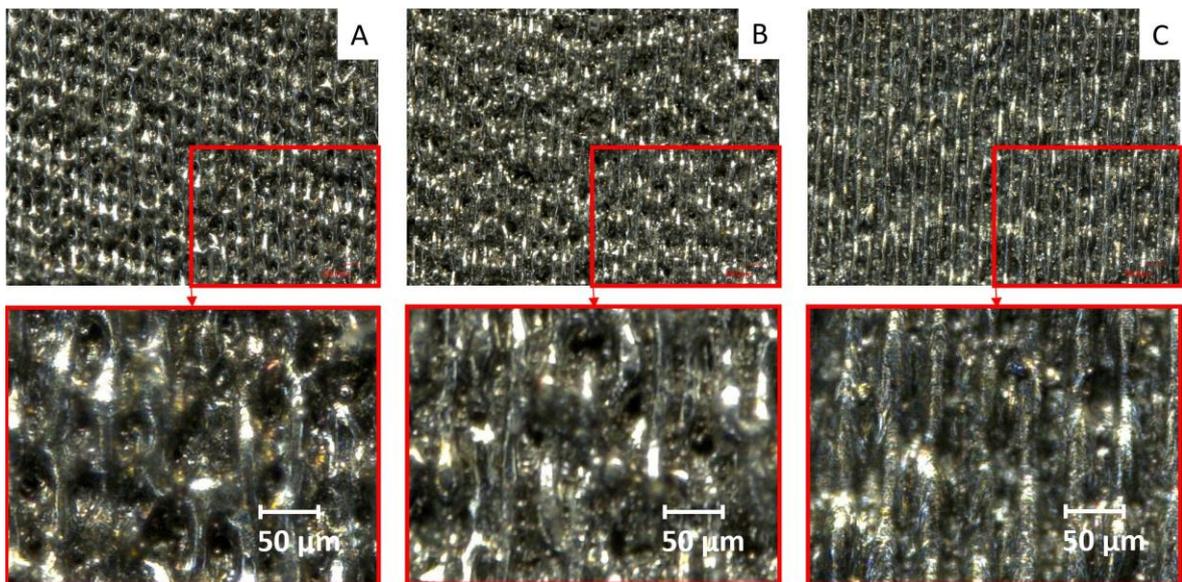


Abbildung 17: Auflichtmikroskopaufnahmen der realen Oberflächen mit 300-facher Vergrößerung der Linienabstände 20 μm (A), 30 μm (B) und 40 μm (C) mit entsprechenden Nahaufnahmen

Es wird beobachtet, dass eine raue Oberfläche mit Porenstruktur und Schmelzspuren erkennbar ist. Dabei weisen die Abbildung 17A für 20 μm und die Abbildung 17C für 40 μm charakteristische Unterschiede im Schmelzverhalten auf. Besonders erwähnenswert ist, dass bei 20 μm eine als löchrig beschreibbare Oberflächenstruktur, während bei 40 μm eine Linienstruktur entsteht. Die Ursache liegt darin, dass bei 20 μm Linienabstand der Energieeintrag in das Material wesentlich höher ist als bei 40 μm . Das ist in der Simulation anhand der Falschfarbendarstellung erkennbar, da die Bearbeitung durch die höhere Anzahl an Vektoren länger dauert und die Schmelzspuren näher aneinander liegen. Durch die höhere Schmelzenergie im Prozess wird vermutet, dass die löchrige Struktur

durch schnell verdampfende Anteile entsteht. Dabei wird bereits vorgewärmtes Material durch die direkte Bestrahlung mit dem Laser nicht aufgeschmolzen, sondern direkt verdampft und so explosionsartig aus der Schmelze katapultiert. Das Verhalten muss in weiteren Versuchsreihen untersucht werden.

Die unregelmäßigen Abstände der Löcher zueinander können durch die bidirektionale Abarbeitung erklärt werden, da hier die Schmelze abwechselnd jeweils aus einer anderen Richtung erzeugt und eine inhomogene Struktur in der später erstarrten Schmelze entsteht. Abhängig von der Schmelzdynamik erstarrt die Schmelze in der in Abbildung 17A sichtbaren Art und Weise. Im Gegensatz dazu ist bei Abbildung 17C eine Linienstruktur mit weniger tiefen Löchern erkennbar. Das deutet darauf hin, dass bei der Bearbeitung genügend Energie zum Aufschmelzen des Materials während des Prozesses eingebracht wird. Es treten identische Begleiterscheinungen wie Verdampfen und andere schmelzdynamische Effekte auf, die bei der Einstellung jedoch einen geringeren Einfluss haben. Das Ausmaß der Effekte ist abhängig von der eingebrachten Energie.

Die Oberfläche in Abbildung 17B zeigt eine Mischung der beiden bereits vorgestellten Ergebnisse bei der ebenfalls eine löchrige Struktur erkennbar ist. Sie ist jedoch nicht so stark ausgeprägt wie bei Abbildung 17A. Die experimentell erzeugten Strukturen zeigen das durch die Simulation erwartete Verhalten. Eine höhere Anzahl von Überfahrten bei geringeren Linienabständen bringt mehr Energie in das Material ein. Eine Auswirkung des Verhaltens auf die relative Dichte der erzeugten Strukturen wird im nachfolgenden Kapitel anhand der Querschliffe untersucht.

6.2 Strukturdichte in Abhängigkeit vom Linienabstand

Die für die Anwendung im Mikro-SLM-Prozess wichtigste Frage ist die nach der relativen Dichte der erzeugten Strukturen. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen wurden bereits in einer eigenen Veröffentlichung dargestellt [34]. Sie spielen im Zusammenhang mit den Simulationsergebnissen hier nochmal eine wichtige Rolle, da die Ergebnisse der Dichteuntersuchungen durch die Simulationsergebnisse weiter fundiert und besser erklärt werden können. Für die Untersuchung der Dichte werden Teststrukturen in Form von Volumenkörpern hergestellt, die eine Kantenlänge von 6 mm x 6 mm haben. Die Herstellung erfolgt pyramidenförmig, wobei die eingebrachte Energie mit zunehmender Höhe der Struktur variiert wird. Schematisch und in den entstandenen Strukturen kann das in Abbildung 18 betrachtet werden. Dabei wird die eingebrachte Volumenenergiedichte zwischen $20 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ (unten) und $120 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ (oben) variiert. Das wird für die Testfelder von 20 μm (A), 30 μm (B) und 40 μm (C) jeweils vier Mal durchgeführt um anschließend mit Hilfe einer Grauwertuntersuchung die Dichte zu bestimmen.

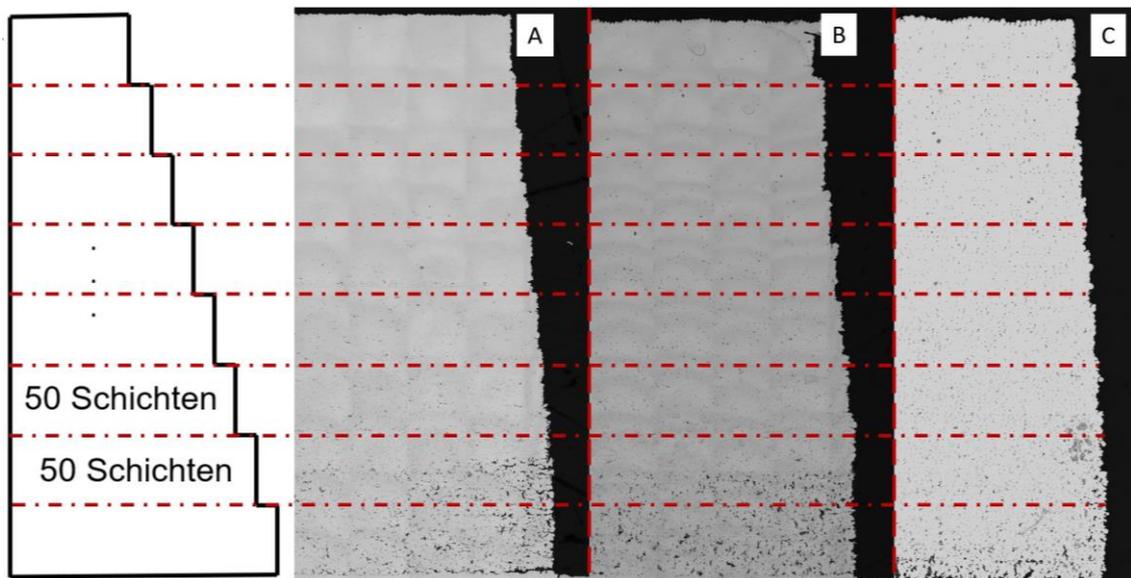


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Teststrukturen mit Aufnahmen der realen Schlifffbilder, aufgenommen mit Hilfe eines Laserscanningmikroskop¹¹. 20 μm (A), 30 μm (B) und 40 μm (C)

Bei der Grauwertuntersuchung wird die Summe aller Pixel in einem Bildausschnitt verwendet und anschließend die schwarzen Pixel in Relation zu den grauen Pixeln gesetzt. Dabei werden Filter angewandt um zu differenzieren, wann ein Pixel grau ist bzw. wann ein Pixel als schwarz zählt und somit als Pore erkannt wird. Die Ergebnisse werden mit Programmen zur Grauwertbestimmung verglichen, die am LHM eingesetzt werden. Die Untersuchungen werden für jeweils vier Testkörper durchgeführt und anschließend wird ein Mittelwert anhand der gemessenen relativen Dichten gebildet. Die Dichteergebnisse

¹¹ Olympus Laserscanningmikroskop, 20-Fache Vergrößerung

können im nachfolgenden Graph betrachtet werden. Es sei erwähnt, dass in der erwähnten Veröffentlichung eine Dichteuntersuchung für Korngrößen im Bereich von $d_{90} < 10 \mu\text{m}$ und $d_{80} < 5 \mu\text{m}$ durchgeführt wurde [34]. Bei der Herstellung von Teststrukturen mit der Mikro-SLM-Anlage unter Verwendung von $5 \mu\text{m}$ Pulver hat sich gezeigt, dass die Kombination keine idealen Strukturen ergibt. Aus dem Grund wird auf die Verwendung des sehr feinen Pulvers verzichtet und empfohlen, das Thema in zukünftigen Forschungsprojekten einfließen zu lassen. Die entstandene relative Dichte für die verwendete Korngröße von $10 \mu\text{m}$ kann in Abbildung 19 betrachtet werden. Es ist sichtbar, dass für die drei simulierten Linienabstände von $20 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ und $40 \mu\text{m}$ Dichten von mehr als 99.5 % nur mit den ersten beiden Linienabständen erzeugt werden können. Der Schwellenwert von 99.5 % stammt aus einer Veröffentlichung in der die folgende Aussage getroffen wurde [39], [sic!]:

„One has to be aware that a remaining porosity in the range of about 0.5% can not be avoided in powder bed based processes like Selective Laser Melting or Selective Laser Sintering. There will always be a remaining porosity in the parts produced. The goal is to minimise this remaining porosity, where as the definition of an acceptable porosity is dependent on the process of comparison.“

Dementsprechend wird hier für das Mikro-SLM-Verfahren ein Schwellenwert von 99.5 % als Ziel gesetzt. Es wurden noch keine Untersuchungen durchgeführt um herauszufinden, bis zu welchem Prozentsatz man diese Schwelle herabsetzen könnte. Vergangene Untersuchung insbesondere von Strukturen, die wasser- und gasdicht sein sollten, haben ergeben, dass ein Bereich $>99 \%$ angestrebt werden muss.

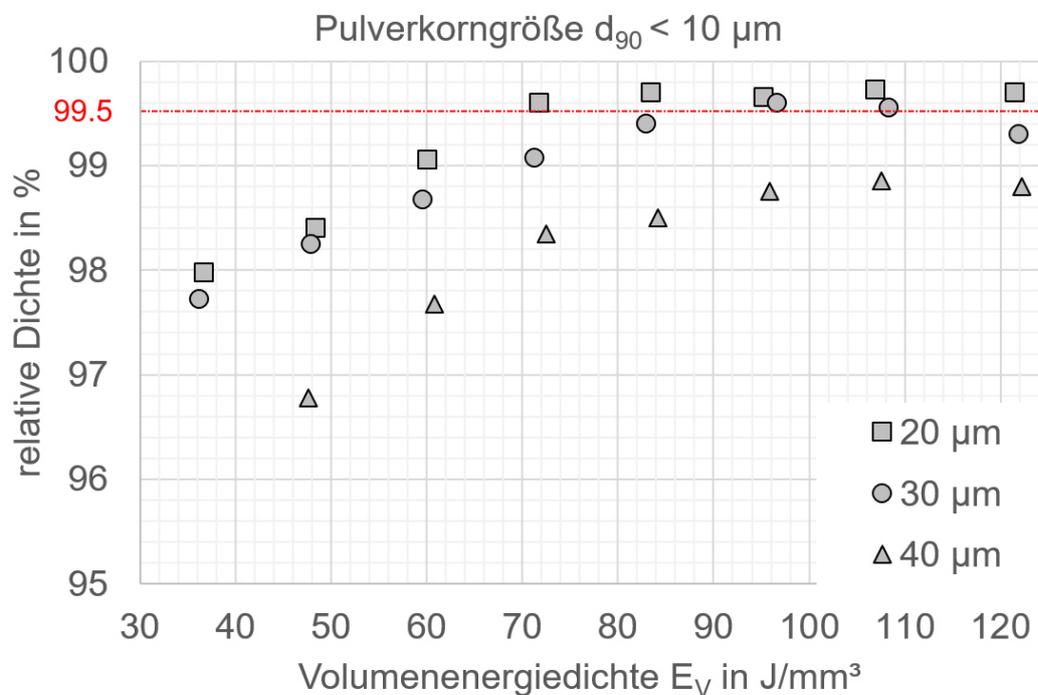


Abbildung 19: Graph der erzeugten relativen Dichte über die Volumenenergiedichte mit den unterschiedlichen Linienabständen von $20 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ und $40 \mu\text{m}$ als Parameter [34]

Die simulierten Ergebnisse können keine Aussage über die erzeugte relative Dichte treffen, da zur Simulation ein poröses Vollmaterial verwendet wird. Es kann jedoch das simulierte Verhalten analysiert und mit den real erzeugten Strukturen verglichen werden. Hier hat sich gezeigt, dass die erzeugten Strukturen von 20 μm , 30 μm und 40 μm das bereits beschriebene Schmelzverhalten aufweist. In Volumenenergie ausgedrückt bewegt man sich im Bereich von $60 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ für 20 μm und damit im Dichtebereich von 99 %. Für 30 μm bewegt man sich um die $40 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ und damit im Dichtebereich von 98 %. Bei 40 μm ist man mit einer Volumenenergiedichte von ca. $30 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ nicht mehr im Bereich bis 95 % relativer Dichte. Das kann auch in Bezug auf die bereits vorgestellten Oberflächenuntersuchungen als Ursache haben, dass die eingetragene Volumenenergiedichte für 40 μm nicht ausreichend groß ist um die Pulverschicht sowohl innerhalb der Schicht als auch in Verbindung zu den unteren Schichten porenfrei zu verschmelzen. Auch bei 20 μm und 30 μm reichte in dem Volumenenergiedichtebereich die eingebrachte Energie noch nicht vollständig aus um über den angestrebten Schwellenwert zu kommen. Da bei der Simulation ein Wert für die eingebrachte Energie gewählt werden musste wird an der Stelle darauf hingewiesen, dass die Falschfarbendarstellung der Simulation bei höheren Leistungen ähnlich aussehen würde und nicht repräsentativ für die tatsächlichen Ergebnisse ist. Was der Simulation entnommen werden kann, ist das Schmelzverhalten der einzelnen Linienabstände innerhalb der Schichten. Das kann in Abbildung 20 für 40 μm Linienabstand eingesehen werden:

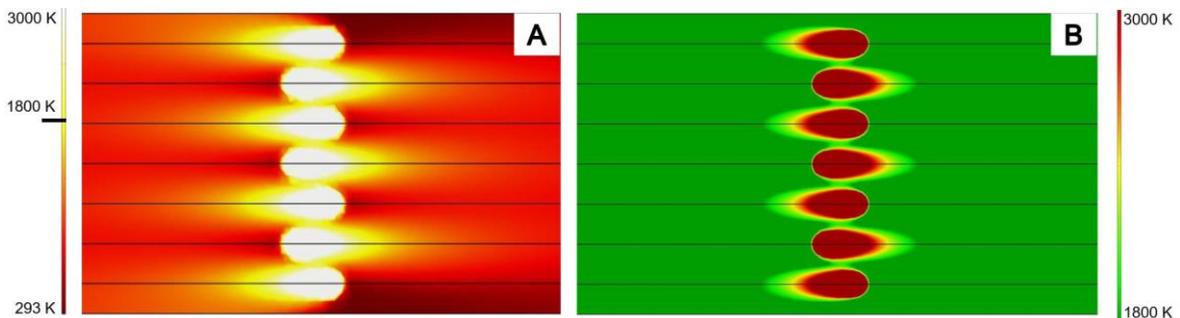


Abbildung 20: Bildmontage der Überlagerung der Schmelzpunkte auf gleicher Höhe der Bearbeitung zu unterschiedlichen Zeitpunkten als Falschfarbendarstellung (A) und als Phasendarstellung (B) (feste Phase grün dargestellt, Schmelzphase rot dargestellt) für 40 μm Linienabstand

Hier ist eine klare Tendenz in den Ergebnissen der relativen Dichte erkennbar. Mit höheren Temperaturen und geringerem Linienabstand geht eine Erhöhung der relativen Dichte einher. Mit steigendem Linienabstand reicht die eingebrachte Energie nicht aus um die Schichten dicht miteinander zu verschmelzen. Betrachtet man die Phasendarstellung, Abbildung 20B, der Simulation am gleichen Ort in der Vorschubrichtung zu verschiedenen Zeitpunkten, so erkennt man, dass der Schmelzbereich nicht ausreichend groß ist um mit der benachbarten Bahn zu interagieren.

Eine vergleichbare Darstellung für den Linienabstand von 20 μm in Abbildung 21 lässt erkennen, dass die Überlagerung hier wesentlich ausgeprägter ist. Wie zu erwarten über-

lappen die Schmelzbereiche wesentlich stärker was zu einer besseren Verschmelzung der Pulverkörner miteinander und der Pulverschichten zueinander führt.

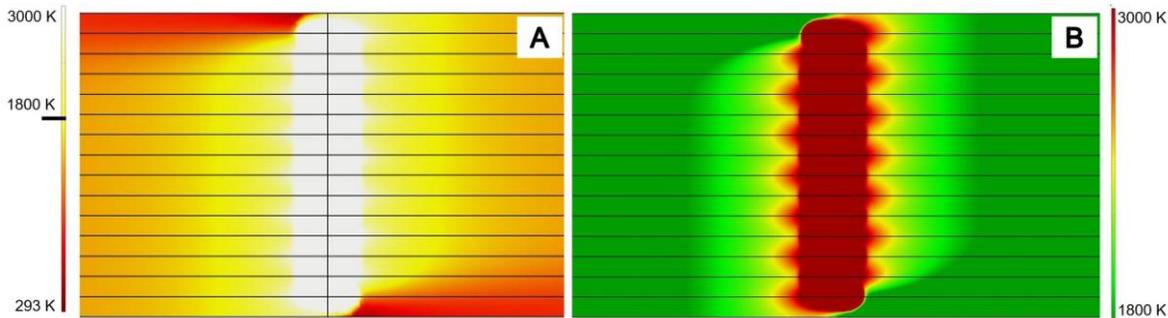


Abbildung 21: Bildmontage der Überlagerung der Schmelzpunkte auf gleicher Höhe der Bearbeitung zu unterschiedlichen Zeitpunkten als Falschfarbendarstellung (A) und als Phasendarstellung (B) (feste Phase grün dargestellt, Schmelzphase rot dargestellt) für 20 µm Linienabstand

Mit Bezug auf die Abbildung 19 und anhand der durchgeführten Dichteuntersuchungen kann festgestellt werden, dass zum Erzeugen von Vollmaterial mit der gewünschten relativen Dichte von 99.5 % ein Linienabstand von 30 µm noch ausreichend ist, während ab 40 µm eher eine poröse Struktur entsteht.

6.3 Parameteruntersuchung zur Oberflächenrauheit

Um die Praxistauglichkeit der erläuterten Ergebnisse zu untersuchen werden verschiedene Testteile gefertigt. Dafür soll die erzielte Oberflächenrauigkeit der Deckfläche mit Hilfe einer Parametervariation ermittelt werden. Eine ganzheitliche Untersuchung aller Flächen bezüglich der Rauigkeit war im Rahmen der Arbeit nicht möglich. Da jedoch für Uhrwerksteile die Deckflächen geringste Rauigkeiten aufweisen müssen wird die Untersuchung in den Mittelpunkt gestellt. Ziel ist eine möglichst geringe Rauigkeit bei einer möglichst kleinen Nachbearbeitungszeit, da durch die Reduzierung der Rauigkeit eine Verbesserung der optischen Effekte, eine verringerte Reibung sowie weniger Anhaftungen und eine bessere Beweglichkeit einher gehen.

Für eine weitere Testreihe werden die erzeugten Strukturen nachträglich glasperlengestrahlt, da das ein zeitlich wenig aufwendiger Schritt ist um die Oberflächenrauigkeit zu verbessern. Für die Variation der Rauigkeit werden quadratische Testkörper mit den gleichen nachfolgenden Aufbauparametern erstellt:

$$P_L = 33 \text{ W}, v_s = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}, h_s = 20 \text{ µm}, l_s = 10 \text{ µm}, \text{ ohne outline}$$

Nach der letzten Strukturschicht wird eine Variation der Parameter von 5 µm Linienabstand bis 45 µm Linienabstand und mit einer Bearbeitungsleistung von 17 W bis 49 W durchgeführt. Es wird auf die Grundstruktur genau eine weitere Bestrahlung in der gleichen Richtung wie die letzte erzeugte Schicht durchgeführt ohne erneut aufzutragen. Die sich daraus ergebende Matrix wird mit Hilfe eines Laserscanningmikroskop untersucht.

Hieraus werden die Oberflächenrauheiten aller Teststrukturen ermittelt. Dafür wird die zu untersuchende Oberfläche mit einem Laserstrahl bestrahlt, der von der Oberfläche diffus zurückgestreut und mit Hilfe eines Detektors analysiert wird. Durch die unterschiedlichen Strukturhöhen trifft der Laserstrahl auf unterschiedliche Positionen im Detektor und kann analysiert werden. Fehler können bei der Triangulationsmethode durch Schattenbildung der Profilspitzen entstehen, wenn der Auftreffwinkel des Laserstrahles einen bestimmten Wert überschreitet, da hier die Reflektion nicht mehr Richtung Detektor erfolgt.

Mit der Methode der Rauheitsmessung kann eine Übersicht über alle erzeugten Teststrukturen erstellt werden. In Abbildung 22 wird das Ergebnis der Rauheitsmessung graphisch dargestellt.

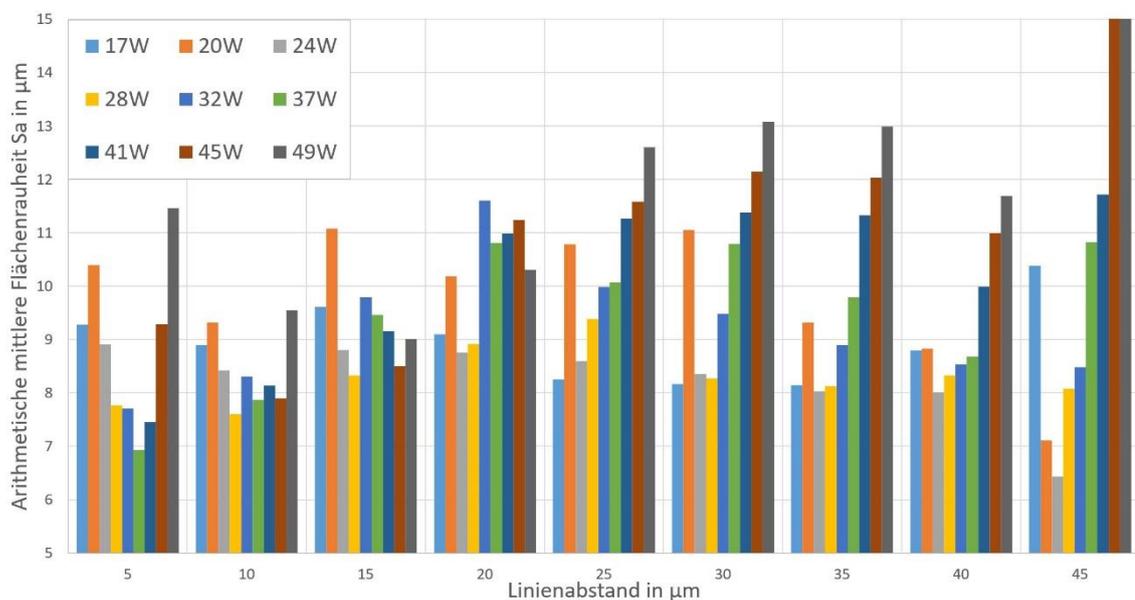


Abbildung 22: Darstellung der Parameteruntersuchung zur mittleren arithmetischen Rauheit über den Linienabstand mit der Leistung der Bestrahlung als Parameter

Eine Tabelle über alle gemessenen Rauheiten kann in den Anlagen Teil I eingesehen werden. Nachfolgend wird, wenn von Rauheit gesprochen wird, soweit nichts anderes angegeben, die mittlere arithmetische Flächenrauheit S_a betrachtet. Die in Abbildung 22 dargestellten Rauheiten variieren mit einem minimalen S_a von 6 μm bis zu einem maximum von $S_a > 15 \mu\text{m}$ deutlich. Die Abweichungen kommen zunächst durch die Art und Weise der Strukturherstellung zustande. Wie bereits dargestellt ist die Erzeugung von Strukturen durch die unterschiedlich hohe Volumenenergiedichte die in das Material eingebracht wird vom Schmelzverhalten abhängig.

Es ist in Abbildung 22 erkennbar, dass alle Bearbeitungen mit verschiedenen Leistungen unterschiedliche Rauheiten aufweisen. Das kann durch die bereits dargestellte Schmelzbadynamik und die Entstehung von Verdampfung bei höheren Leistungen die zu größeren Rauigkeiten führen, erklärt werden. Bei geringeren Leistungen wird vermutet, dass die eingebrachte Energie nicht ausreichend groß ist um das Pulverbett vollständig homogen

aufzuschmelzen so dass die Rauigkeit ebenfalls erhöht ist. Es wird beobachtet, dass die Variation der Rauigkeiten bei den jeweiligen Linienabständen sehr gemischt ist. Als Ergebnis ergibt sich, dass mit einer Laserleistung von 24 W und einem Linienabstand von 45 μm der geringste Rauigkeitswert mit $S_a = 6.5$ messbar ist. Es zeigt sich, dass für jeden Linienabstand ein idealer Leistungswert gefunden werden kann. Es lässt sich eine Tendenz der erzeugten Rauigkeiten erkennen, nach der eine zu geringe Bestrahlungsleistung für eine wenig raue Struktur ebenso ungünstig ist wie eine zu Hohe.

Für die weiteren Untersuchungen soll anschließend an die Betrachtung eine Nacharbeitung der Schichten erfolgen um eine Optimierung der Rauigkeit zu erhalten. Hierfür wurden die Teststrukturen mit Glasperlen mit einem Druck von ~ 2 bar bestrahlt. Da die Besonderheit des Glasperlenstrahlens im Gegensatz zum Sandstrahlen darin liegt, dass die Kugeln eher glättend als abrasiv wirken, wurde sich für die Form der Nacharbeitung entschieden. In Abbildung 23 können die Ergebnisse der Rauheitsuntersuchung nach der gleichen Messmethode wie in Abbildung 22 betrachtet werden.

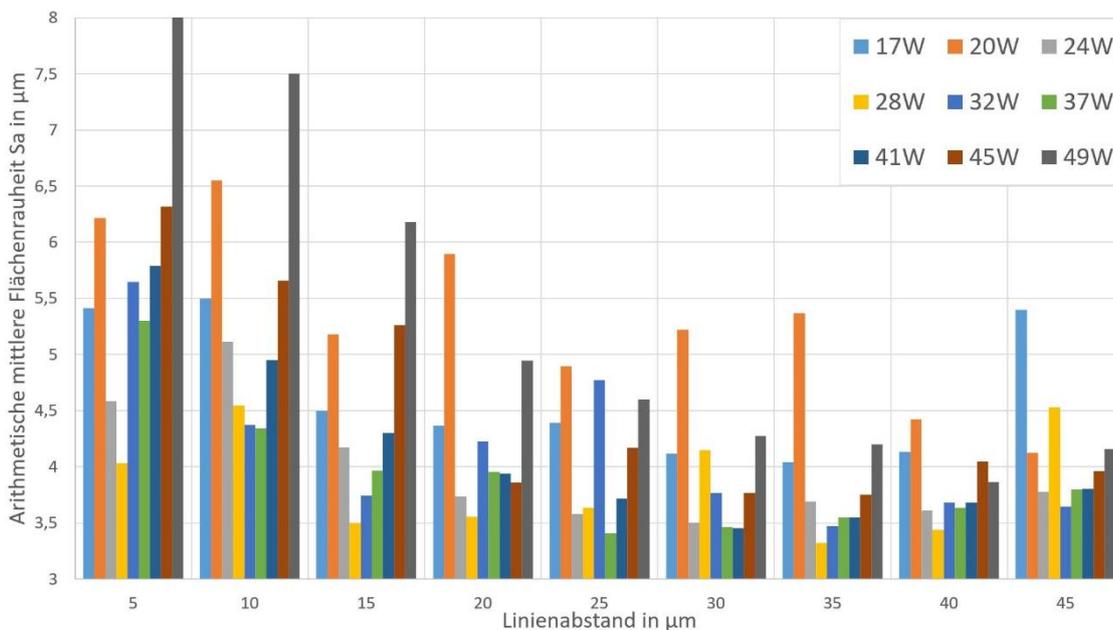


Abbildung 23: Darstellung der Parameteruntersuchung zur mittleren arithmetischen Rauheit über den Linienabstand mit der Leistung der Bestrahlung als Parameter nach dem Glasperlenstrahlen

Es zeigt sich, dass sich die Rauigkeit signifikant verändert und die mittlere Rauigkeit im gesamten kleiner wird. Maximale Rauigkeiten von $S_a > 15 \mu\text{m}$ werden auf Werte von $S_a \approx 5 \mu\text{m}$ reduziert. Das Glasperlenstrahlen sorgt nicht unbedingt für eine Verbesserung bereits guter Rauigkeiten, sondern ist in der Lage besonders raue Strukturen anzupassen. Das kann der Tatsache entnommen werden, dass die Rauigkeit von $5 \mu\text{m}$ nach dem Glasperlenstrahlen zwar optimiert wird, jedoch der Wert der Verbesserung nicht so groß ist wie bei anderen Testfeldern. Insbesondere Strukturen, die mit hohem Linienabstand erzeugt werden profitierten überdurchschnittlich gut vom Glasperlenstrahlen. Durch die mechanischen Einflüsse der auftreffenden Glasperlen wird die Struktur geglättet.

Mit Abbildung 23 kann festgestellt werden, dass es mit dem Mikro-SLM-Verfahren und dem anschließendem Glasperlenstrahlen möglich ist mittlere Oberflächenrauheiten von $S_a = 3.5 \mu\text{m}$ herzustellen. Das größte Problem am Glasperlenstrahlen ist, dass es die filigranen Strukturen die mit dem Mikro-SLM-Verfahren erzeugt werden, zerstört. Dadurch besteht weiterer Optimierungsbedarf des Mikro-SLM-Verfahrens um zusätzliche Bearbeitungsschritte zu vermeiden. Das ist im Rahmen der Arbeit nicht möglich, doch einige Strategien die zur weiteren Verbesserung der Rauigkeit dienlich sein könnten sind die folgenden:

- Variation der Leistung und des Linienabstandes
- Variation der Anzahl der Überfahrten
- Variation der Bestrahlungsrichtung
- Verschiebung des Linienabstandes bei mehrmaligen Bestrahlungen
- Zusätzlicher Pulveraufzug während der Oberflächenbearbeitung
- Pulveraufzug mit feinerem Pulver als abschließende Schicht
 - Variation von Leistung und Linienabstand mit feinerem Pulver

6.4 Untersuchung von Teststrukturen nach VDI 3405

Die VDI 3405 empfiehlt Teststrukturen um eine Vergleichbarkeit additiver Fertigungsverfahren sicherzustellen [14]. Es wurde eine Auswahl von Bauteilen getroffen die für das gewählte Projekt mit dem Mikro-SLM-Verfahren am nutzbringendsten erschienen. Einige Untersuchungen wurden bereits früher am Laserinstitut Hochschule Mittweida durchgeführt. Beispielfhaft wurde die dünnste erreichbare Wandstärke mittels Mikro-SLM-Verfahren bei $50 \mu\text{m}$ erreicht.

Einschränkungen ergaben sich z.B. bei der Untersuchung des minimalen Neigungswinkels von freistehenden Wänden. Durch die Bearbeitung des am LHM eingesetzten Druckverdichters bleibt ein Anstoßen an der Struktur während des Mikro-SLM-Prozesses nicht aus, so dass sehr filigrane Bauteile durch die auftretenden Scherkräfte mechanisch beschädigt werden. Das Problem ist bei den Untersuchungen in Kapitel 6 aufgetreten. Ein Vorteil der Nutzung des Druckverdichters ist die Erzeugung einer homogenen Pulverschicht. Dazu sind für die Bearbeitung von filigranen, freistehenden Bauteilen jedoch umfangreiche Justagearbeiten erforderlich. Das Verfahren muss optimiert werden.

Dementsprechend wird eine Auswahl an Strukturen zur genaueren Untersuchung ausgewählt. Dabei handelt es sich um:

- Spaltmaße
- Überhänge
- Überbrückungen
- Neigungen
- Bohrungsdurchmesser

Für die Gestaltung der Bauteile mit dem Mikro-SLM-Prozess haben die aufgezählten Strukturen einen großen Einfluss. Freistehende Wände, Dickensprünge und Zylinderstifte werden nicht betrachtet. Soweit nicht anders angegeben werden die nachfolgenden Strukturen mit den folgenden Parametern erstellt:

$$P_L = 33 \text{ W}, v_s = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}, h_s = 20 \text{ } \mu\text{m}, l_s = 10 \text{ } \mu\text{m}, \text{ mit outline (gleiche Parameter)}$$

Spaltmaß

Für die Untersuchung werden unterschiedliche Spaltmaße erzeugt, deren Breite in 10 μm Sprüngen variiert. Bei der Betrachtung der Strukturen mittels Auflichtmikroskopaufnahmen bei 100-facher Vergrößerung wird festgestellt, dass eine erste Separation der Wände bei ca. 60 μm erfolgt. Betrachtet man die Nahaufnahmen der Oberfläche zeigt sich, dass die Strukturen bei 10 μm Spaltmaß bis 40 μm Spaltmaß definitiv geschlossen sind. Das hängt damit zusammen, dass beim Slicen der Konturen eine Linie auf der Außenkante der Struktur erzeugt wurde und ohne Offset gearbeitet wird.

Ab etwa 50 μm beginnen die Spalten etwas offener zu werden. Das hängt damit zusammen, dass bei der Bestrahlung die Konturlinien weit genug auseinander liegen um langsam eine Separation zu erzeugen. Jedoch kann in Abbildung 24 festgestellt werden, dass bei einer Vergrößerung um das 300-fache die erste wirkliche Separation bei rund 60 μm (A) erfolgt.

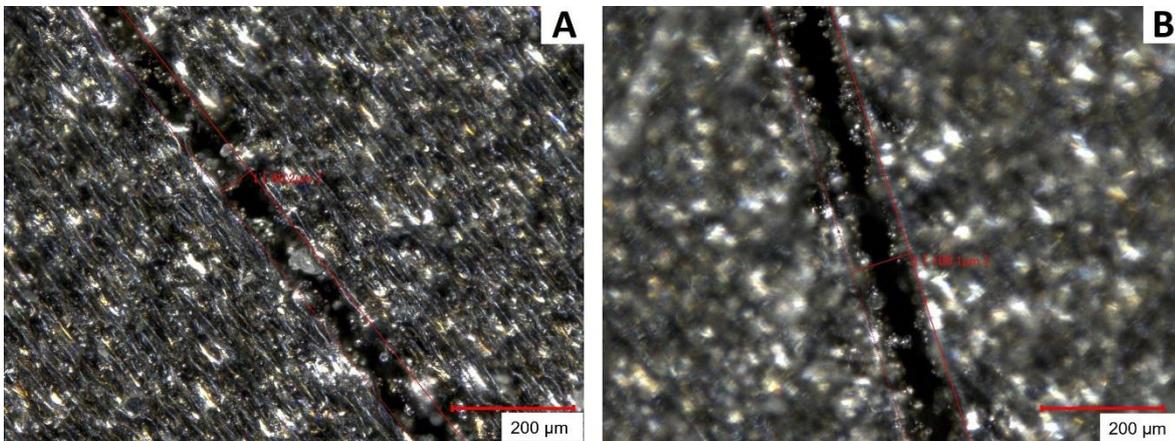


Abbildung 24: Auflichtmikroskopaufnahmen mit 300-facher Vergrößerung der Spaltbreite 60 μm (A) und 100 μm (B)

Auch wenn einzelne Pulverkörner im Spalt vorkommen und geringe Anhaftungen an den Kanten sichtbar sind, so wird für die Untersuchung der Wert als erste, freie Spur, gewählt. In vorausgegangenen Untersuchungen wurden minimale Spaltmaße von 50-100 μm als Minimum untersucht. Das minimale Maß kann anhand der Untersuchung validiert werden, wobei in Abbildung 24B erkennbar ist, dass bei einer 100 μm breiten Spur der Spalt überwiegend frei ist.

Überhänge

Für die Untersuchungen zu den Überhängen wurden zunächst 1 mm² große Quader als Grundstruktur erstellt. Auf denen werden anschließend mit variabler Größe Rechtecke aufgesetzt, die an einer Seite einen Überhang bilden. Die aufgebauten Stifte können in der nachfolgenden Abbildung 25 in 100-facher Vergrößerung betrachtet werden.

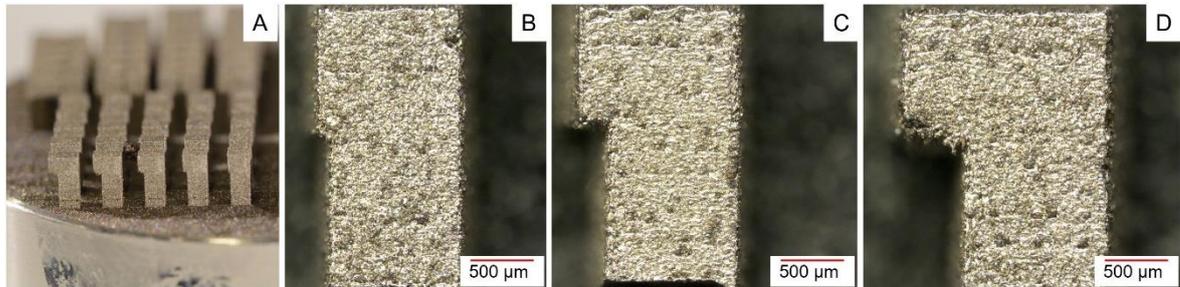


Abbildung 25: Darstellung Überhangstrukturen als Fotografie (A) sowie ausgewählte Überhanglängen als Auflichtmikroskopaufnahmen bei 100-facher Vergrößerung mit 100 µm Überhang (B), 250 µm Überhang (C) und 500 µm Überhang (D)

Üblicherweise können im Mikro-SLM-Prozess Überhänge nur mit kleinen Längen hergestellt werden, da bei der Erstellung eine Bearbeitung im Pulverbett stattfindet. Bei kurzen Überhängen wie Abbildung 25B ist das jedoch problemlos möglich, da eine gute Anbindung an die vorher erstellte Struktur stattfindet. Bei größer werdenden Überhängen wie in Abbildung 25D kann jedoch beobachtet werden, dass sich an der Übergangsstelle von Grundstruktur zu Überhang eine Schräge ausbildet. Das kommt zustande, weil der Überhangstruktur im Pulverbett eine Basis zum Anschmelzen fehlt. Sie bildet sich erst über mehrere Schichten aus, so dass die endgültige Länge des Überhanges erst Später erreicht wird. Der Überhang wird trotzdem aufgebaut. Es ist also möglich mit dem Mikro-SLM Prozess Überhänge zu erzeugen. Für die Anwendung der Uhrwerksteile ist das von Bedeutung, da manche Strukturen kleine oder größere Überhänge aufweisen und so eine Erzeugung nicht nur bei den Teststrukturen, sondern auch für die Uhrwerksteile möglich sein müsste.

Überbrückungen

Einer der Extremfälle der additiven Fertigung ist die Erstellung von Überbrückungen. Gegenüber der Bearbeitung im losen Pulverbett kommt dem Prozess hier jedoch zu Gute, dass trotz der Bearbeitung im Pulverbett eine Anbindung der Struktur an das Substrat bereits erfolgt ist. Die überhängende Struktur verbindet sich mit dem bereits vorhandenen Strukturstück und wird nicht, wie bei der losen Bearbeitung im Pulverbett, verschoben sondern hat einen Fixpunkt zum weiteren Strukturaufbau. Da Überbrückungen ähnlich wie Überhänge aufgebaut werden, soll nachfolgend der Fokus auf Überbrückungen liegen, da diese in der späteren Strukturuntersuchung der Testteile noch eine besondere Rolle spielen.

In Abbildung 26A wird gezeigt, dass kleine Überbrückungen bis rund 1.5 mm problemlos aufgebaut werden. Bei weiterführenden Untersuchungen wird festgestellt, dass die 1.5 mm keinesfalls ein Grenzwert sind, sondern dass Überbrückungen bis zu 4 mm bei einer Stegbreite von 0.5 mm erzeugt werden können. Eine der Überbrückungen wird in Abbildung 26B bei 100-facher Vergrößerung dargestellt.

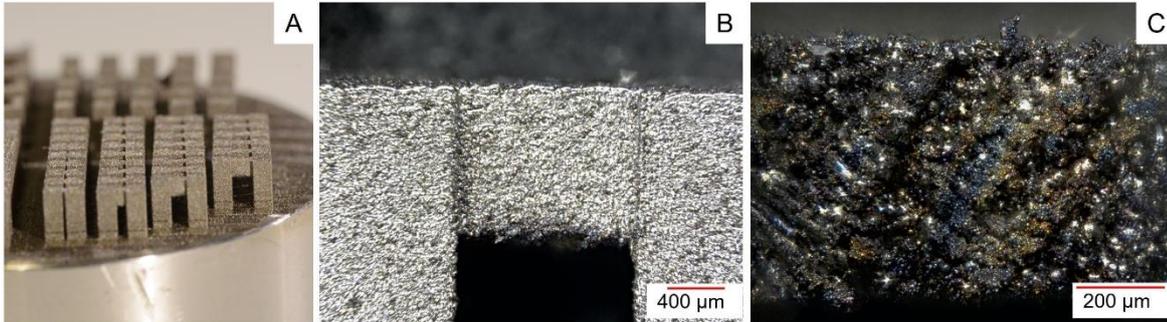


Abbildung 26: Fotografie Überbrückungen auf Substratplattform (A), Auflichtmikroskopaufnahmen Überbrückung (B) und Unterseite der Überbrückung (C)

Es ist deutlich erkennbar, dass die Unterseite der Überbrückung eine größere Rauigkeit aufweist als es an den anderen Flächen sichtbar ist. Zudem lässt sich an den Übergängen von Seitenstützen zur Brücke selbst eine bogenförmige Struktur ausmachen. Die Anbindung erfolgt zunächst an den seitlichen Stützen, bevor eine Verschmelzung der Strukturen der Überbrückung erfolgt. Das kann bei größer werdenden Brücken besser betrachtet werden. Mit zunehmender Überbrückungslänge steigt die Rauheit an der Unterseite. Interessant ist die deutliche Schwarzfärbung der Unterseite in Abbildung 26C. Wie bereits erwähnt kommt es bei der Bearbeitung im Pulverbett direkt nicht zu einer Verschmelzung mit vorherigen Schichten, sondern eher zu einem teilweisen Verbrennen und spratzigen Verhalten des Pulverbettes, wodurch die Anzahl der Anhaftungen, bei der Generierung der Struktur, steigt.

Exemplarisch für den Aufbauprozess aller Testkörper kann in Abbildung 27 der Bauprozess anhand von Überbrückungen und Bohrungen während des Sintervorganges betrachtet werden. Dafür werden während der Bearbeitung Aufnahmen bei Schicht 120 (A), 151 (B), 157 (C) und 240 (D) erzeugt. Anhand der Abbildung kann beobachtet werden, dass die bereits beschriebene Erzeugung von Überbrückungen mit den Stützen beginnt (A). Das Pulverbett ist anhand der gräulichen Färbung erkennbar. Anschließend wird im Pulverbett die Überbrückung bestrahlt (B) welche deutliche Farbunterschiede gegenüber den verschmolzenen Strukturen aufweist. Die eher dunklen und matt wirkenden Farben deuten auf die fehlende Verschmelzung nach der Bestrahlung hin. In Abbildung 27C ist nach sechs Schichten bereits erkennbar, dass die Überbrückungen beginnen komplett zu verschmelzen, wobei das bei kürzeren Überbrückungsstrecken schneller geht. Die teilweise verschmolzenen Brücken sind anhand ihrer silber-weißen Verfärbung erkennbar. Am Ende der Bearbeitung von Schicht 240 (D) sind über die gesamte Länge die Brücken komplett verschmolzen. Die weißliche Verfärbung ist ein Hinweis darauf. Hier liegt auch die Ursache dafür, dass Überbrückungen eine raue Unterseite haben. Der Prozess benötigt

einige Zeit oder eine bestimmte Schichtdicke im Pulverbett eine geschlossene Struktur auszubilden.

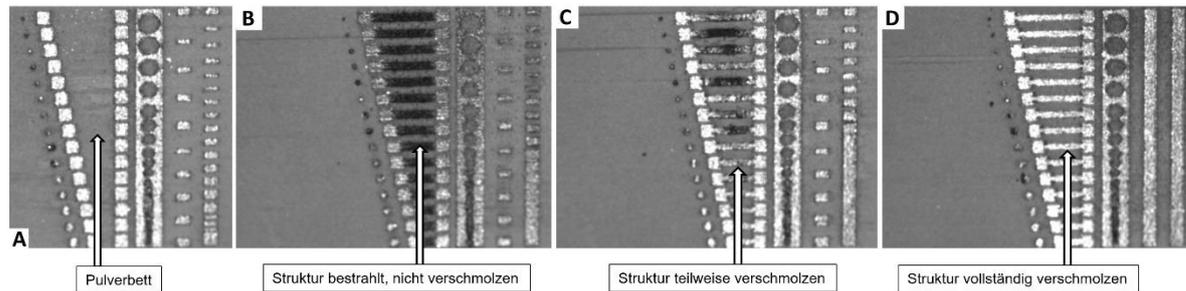


Abbildung 27: Aufnahmen während des Sinterprozesses bei unterschiedlichen Schichtdicken – 1.2 mm (A), 1.51 mm (B), 1.57 mm (C) und 2.4 mm (D)

Neigungen

Für die Untersuchung der Neigungswinkel werden freistehende Wände verwendet um den minimalen Winkel dünner Wände zu bestimmen. Mit Stützstrukturen war der Aufbau von freistehenden Wänden möglich, da die vorliegenden Scherkräfte des Prozesses so gering wie möglich gehalten werden konnten. In Abbildung 28 sind Querschliffe der erzeugten Wände bei 500-facher Vergrößerung dargestellt. Die eingestellte Wandstärke liegt dabei bei rund $50\ \mu\text{m}$. Das entspricht dem für den Mikro-SLM-Prozess minimal möglichen noch aufbaubaren Wert. Die Herstellung von dünnen Wänden ist immer eine Herausforderung. Das trifft im besonders auf die Erzeugung von geneigten Wänden zu, da bei zunehmender Neigung die Bestrahlungsspuren immer weiter in das Pulverbett wandern und der Überlapp der Linien zu den vorherigen Ebenen immer kleiner wird. Das geht mit einer erhöhten Rauheit der erzeugten Wandstrukturen einher. Die Gradangaben der Wände bezieht sich auf die Bauteilorientierung, wobei eine vertikale Wand durch den Winkel von 90° repräsentiert wird. Horizontal aufgebaute Strukturen haben dem entsprechend eines Winkels von 0° .

Die nachfolgenden Wände können bis zu einer Neigung von 20° aufgebaut werden. Bei Neigungen von weniger als 20° findet kein Aufbau der Wände mehr statt, da zwar eine Bestrahlung erfolgt, der Bereich der Anhaftung an die vorherige Ebene aber so gering wird, dass durch die Überfahrt des Druckverdichters keine Stabilität mehr gegeben ist. Die Wände brechen schon während der Erzeugung ab und sorgen durch die abgebrochenen Teile eher für weitere Fehler im Aufbauprozess.

Eine Möglichkeit hier Abhilfe zu schaffen wäre die Verwendung einer flexiblen Rakel, die die auftretenden Kräfte etwas reduziert, jedoch nach dem Aufzug wieder in Ihre Ursprungsform zurückkehrt.

Da für die Untersuchten Mikro-SLM-Bauteile jedoch meist eine Anbindung an Strukturen stattfindet und Wände nicht einzeln freistehend aufgebaut werden müssen wurden neben den Einzelwänden auch massivere Strukturen erzeugt.

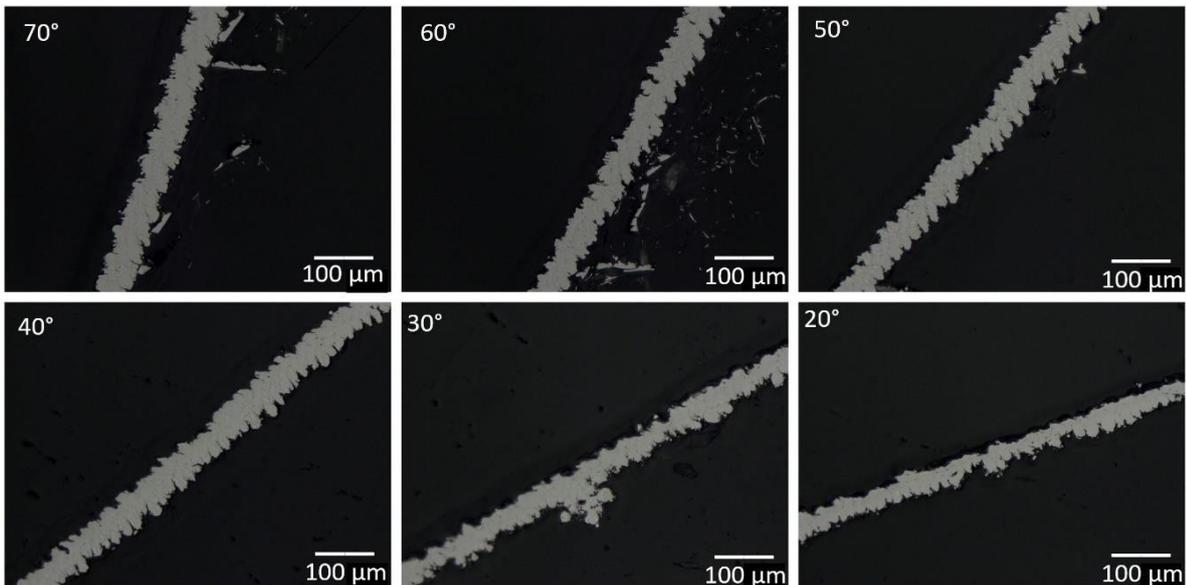


Abbildung 28: Auflichtmikroskopische Aufnahmen von Querschnitten der erstellten Wandstrukturen bei 500-facher Vergrößerung mit Neigungen von 70°-20°

In Abbildung 29 können die Neigungswinkel von 75° bis 5° in 100-facher Vergrößerung als Vollmaterialstrukturen betrachtet werden. Das Vollmaterial ist in der Lage den Scherkräften der Rakel eine entsprechende Stabilität zu widerstehen. Damit ist ein Aufbau von geringeren Neigungen möglich.

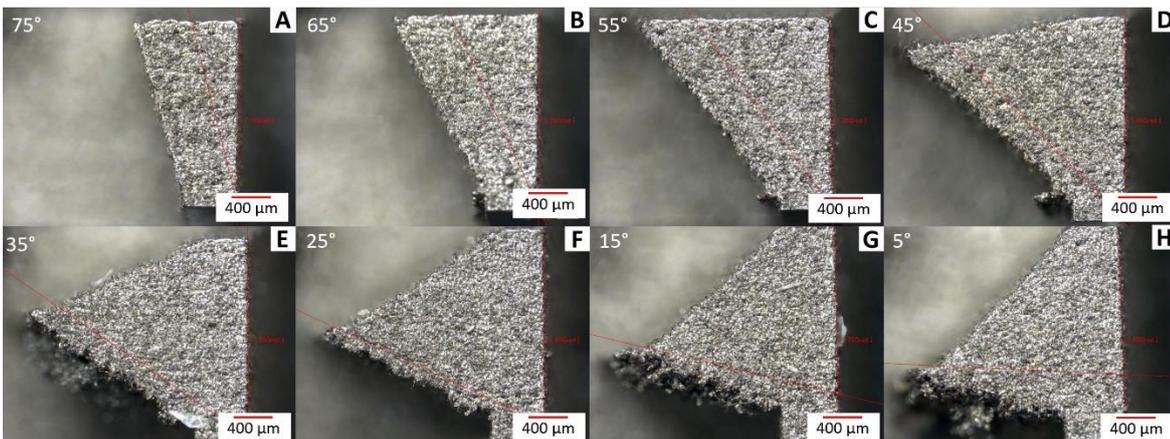


Abbildung 29: Auflichtmikroskopische Aufnahmen der Neigungswinkel von Vollmaterial bei 100-facher Vergrößerung mit Neigungen von 75° bis 5°

Mit dem Mikro-SLM-Verfahren können sowohl einzelne Wände mit Stützstrukturen bis zu einem Winkel von 20° als auch Vollmaterial bis zu einem Winkel von 5° hergestellt werden.

Die in Abbildung 29(E-H) erkennbaren Neigungen weisen Schmelzspritzer auf. Sie werden während des Aufbauprozesses produziert, wenn die eingebrachte Energie bedingt durch die Neigung über einen größeren Bereich des Pulverbettes verteilt wird. Das tritt bei größeren Neigungen zunehmend auf, da hier die Bestrahlung mehr im erfolgt. Wie auch bei den Einzelwänden erkennbar steigt dadurch die Rauigkeit an der Unterseite der Neigung durch den Überlapp der Schmelzspuren.

Der Effekt wird durch die Tiefenschärfe der Auflichtmikroskopaufnahmen noch verstärkt.

Bohrungen

Es werden Bohrungen mit den definierten Parametern erzeugt. Sie werden ohne Outline erstellt und sind in Abbildung 30 dargestellt. Der geringste Bohrungsdurchmesser der durchgehend erzeugt werden kann liegt bei $50\ \mu\text{m}$. Das entspricht dem geringsten erzeugten Spaltmaß. Die erkennbaren Rauheiten an den Innenflächen der Bohrungen sind Anhaftungen die während der Bearbeitung im Pulverbett entstehen und im Prozess nicht ausgeschlossen werden können. Dadurch kann eine Nachbearbeitung nötig sein.

Ihre Sichtbarkeit wird durch die Tiefenschärfe der Aufnahme noch verstärkt.

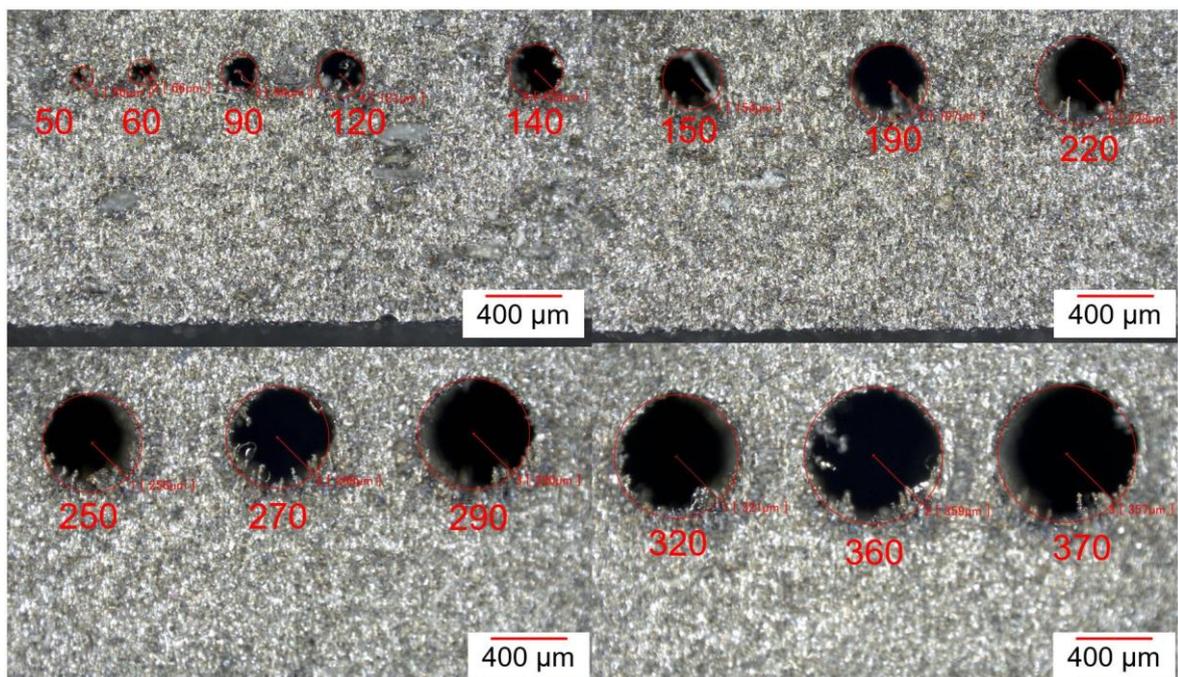


Abbildung 30: Auflichtmikroskopaufnahmen verschiedener Bohrungsdurchmesser von $50\ \mu\text{m}$ bis $370\ \mu\text{m}$

Zusammenfassend wird für alle erzeugten Strukturen festgestellt, dass mit dem Mikro-SLM-Verfahren die ausgewählten VDI-Testkörper problemlos herstellbar sind.

Der minimale erzeugbare Spaltabstand liegt bei $50\ \mu\text{m}$. Überhänge, die einer Neigung von 0° entsprechen können bis zu einer Länge von $500\ \mu\text{m}$ generiert werden. Überbrückungen sind mit Längen bis zu $4\ \text{mm}$ möglich, wobei hier ein Kompromiss zwischen Länge

der Überbrückung und der Rauigkeit der Unterseite gefunden werden muss. Mit zunehmender Überbrückungslänge ist eine bogenförmige Struktur erkennbar, die für manche Anwendungen nachteilig sein könnte.

Für Neigungen kann gesagt werden, dass freistehende Wände mit Stützstrukturen bis zu einem Winkel von 20° , Vollmaterialneigungen sogar bis 5° herstellbar sind.

Für Bohrungen wurde ein minimaler Durchmesser von $50\ \mu\text{m}$ herausgefunden.

Die Werte können durch geschickte Konstruktion noch verbessert werden, indem man mit Outline und einer Variation des Linienabstandes arbeitet. Für die Erstellung von Uhrwerksteilen sind die Ergebnisse vielversprechend und werden im nachfolgenden Kapitel an praktischen Beispielen betrachtet.

7 Herstellung von Uhrwerksteilen

Um eine praxisnahe Anwendung für die gefundenen Ergebnisse der vorhergehenden Untersuchungen vorzustellen befasst sich das Kapitel mit der additiven Fertigung von Teilen eines Schweizer Uhrwerkes der Firma ETA. Dazu wird das Modell Unitas 6497 gewählt.

Um die Teile fertigen zu können muss zunächst mit Hilfe von vorhandenen Dokumentationen das Uhrwerk in SolidWorks nachgebaut werden. Das ist zum einen notwendig um die Funktion und den Aufbau des Uhrwerkes zu verstehen, zum anderen sind für die Herstellung von additiv gefertigten Teilen STL-Dateien notwendig die so in der Art nicht zugänglich sind. In Abbildung 31 ist die Explosionsdarstellung des Uhrwerkes mit der vom Hersteller verwendeten Teilenummerierung dargestellt. Die einzelnen Teilebezeichnungen sind im Anhang Teil 3 in Tabelle 14 aufgelistet.

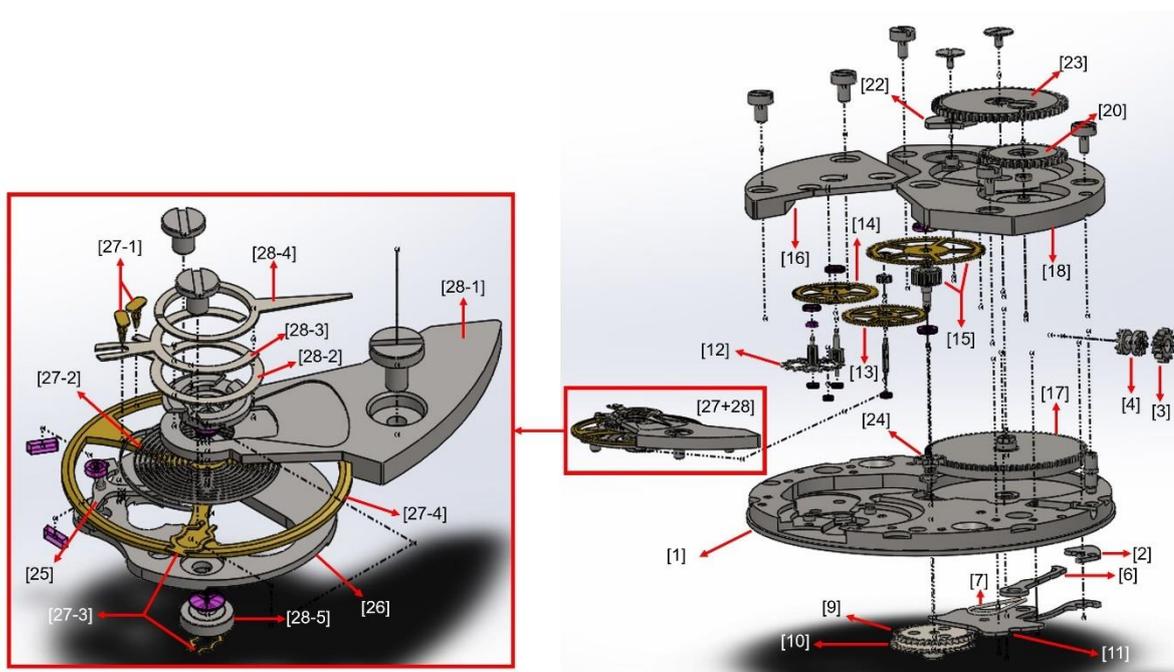
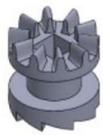
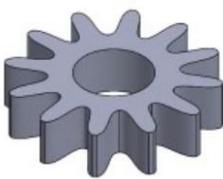


Abbildung 31: Explosionsdarstellung Uhrwerk der Firma ETA, Modell Unitas 6497 als SolidWorks Explosionsdarstellung mit Nahaufnahme der Unruhkonstruktion und mit Teilenummerierung

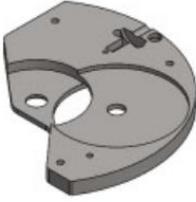
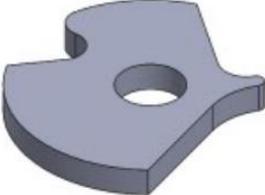
Beim Blick auf die Darstellung zeigen sich die unterschiedlichen Teilegrößen. Bei einem Uhrwerksdurchmesser von 38 mm ergeben sich einige sehr filigrane Bauteile. Es wird versucht jedes Teil des Uhrwerkes herzustellen. In Tabelle 10 sind die einzelnen Teile des Uhrwerkes mit ihrer Teilenummerierung aufgeführt. Die Herstellbarkeit wird anhand eines Ampelsystems eingeordnet. Dabei werden herstellbare Teile grün, eingeschränkt herstellbare Teile gelb und nicht produzierbare Teile rot markiert. Die Funktionalität der Teile wird nicht überprüft. Erfolgreich hergestellte Teile besitzen in der Tabelle einen Bezug zur entsprechenden Abbildung.

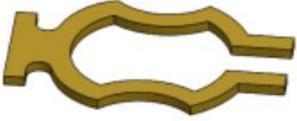
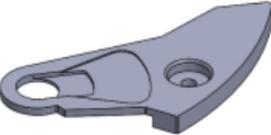
Die Teile wurden alle mit den gleichen Parametern für die Erzeugung von Vollmaterial aufgebaut ($P_L = 33 W$, $v_s = 2 \frac{m}{s}$, $h_s = 20 \mu m$, $l_s = 10 \mu m$, mit outline).

Tabelle 9: Einteilung der Uhrwerksteile anhand ihrer Herstellbarkeit

Nr.	Bezeichnung	Bild	#	Begründung
(0)	Schrauben			Herstellung von Gewinde noch nicht erprobt, theoretisch aber herstellbar
(1)	Werkplatte			Substratgröße des Anlagenbau- raums nicht ausreichend groß um Bauteil zu erzeugen, theoretisch aber mit Supportstruktur herstell- bar
(2)	Winkelhebel			Mit Stützstruktur herstellbar, da Pins auf beiden Seiten der Struk- tur angebracht sind
(3)	Aufzugtrieb			Herstellbar
(4)	Kupplungstrieb			Herstellbar mit Stützstruktur oder Überhang um Aussparung in der Mitte zu erzeugen
(5)	Aufzugswelle			nicht Herstellbar, da bei stehen- dem Aufbau die Gefahr durch Abscherung vom Substrat be- steht, und bei liegendem Aufbau kein Gewinde entsteht
(6)	Kupplungs- triebhebel			Herstellbar
(7)	Kupplungs- triebfeder			Herstellbar, technologisch aber nicht sinnvoll, da ein gebogener Draht die gleiche Aufgabe erfüllt
(8)	Zeigerstellrad			Herstellbar

Nr.	Bezeichnung	Bild	#	Begründung
(9)	Zwischen-Zeigerstellrad			Herstellbar
(10)	Wechselrad			Herstellbar (Abbildung 35C)
(11)	Winkelhebel-raste			Herstellbar
(12)	Hemmungsrade			Herstellbar, aber doppel-seitige Pins erfordern Stützstruktur (Abbildung 33B)
(13)	Kleinbodenrad			Herstellbar, Original aus Messing (Stellvertretend Abbildung 33C)
(14)	Sekundenrad			Herstellbar, Original aus Messing (Stellvertretend Abbildung 33C)
(15)	Minutenrad			Herstellbar, Original aus Messing (Abbildung 33C)
(16)	Räderwerkbrücke			Herstellbar (ähnlich Abbildung 32B)
(17)	Federhaus			Nicht herstellbar, da geschlossenes System mit innenliegender Feder

Nr.	Bezeichnung	Bild	#	Begründung
(18)	Federhausbrücke		■	Herstellbar, jedoch Stützstruktur notwendig da viele beidseitige Hohlräume den Aufbau erschweren (Abbildung 32A)
(19)	Kronring		■	Herstellbar
(20)	Kronrad		■	Herstellbar (Abbildung 35C)
(21)	Klinkenfeder		■	Herstellbar, technologisch aber nicht sinnvoll, da ein gebogener Draht die gleiche Aufgabe erfüllt
(22)	Klinke		■	Herstellbar (Abbildung 35E)
(23)	Sperrrad		■	Herstellbar (Abbildung 35B)
(24)	Mitnehmer-Minutenrohr		■	Herstellbar, stößt an Auflösungsgrenze des Verfahrens (Abbildung 34F, Abbildung 35B)
(25)	Anker		■	Schwierig herstellbar, da beidseitige Pins Stützstruktur erfordern, sehr filigranes Teil
(26)	Ankerbrücke		■	Herstellbar

Nr.	Bezeichnung	Bild	#	Begründung
(27-1)	Rückerstift		1	Herstellbar, stößt an Auflösungsgrenze des Verfahrens, Original aus Messing (Abbildung 34E)
(27-2)	Spirale			2
(27-3)	Stoßsicherung		3	
(27-4)	Unruhring			4
(28-1)	Unruhbrücke		5	
(28-2)	Spiralklötzchenhalter			6
(28-3)	Unterer Rückerstift-Halter		7	
(28-4)	Oberer Rückerstift-Halter			8
(28-5)	Stoßsicherung		9	

Bei den Teilen in Abbildung 32 handelt es sich um Objekte, bei denen der Versuch mit Stützstruktur und der Versuch mit Überbrückung zur Bauteilgenerierung durchgeführt wird. In Abbildung 32A ist die Federhausbrücke mit einer Gitterstruktur als Stützstruktur dargestellt. Hier findet ein additiver Aufbau statt, jedoch ist zur Weiterverwendung des Bauteiles Nacharbeit notwendig. In Abbildung 32B werden die Überbrückungseigenschaften der vorausgegangenen Untersuchungen getestet. Es wird festgestellt, dass eine Bauteilgenerierung auch im losen Pulverbett stattfindet, was die Untersuchungen zur Überbrückung bestätigt. Die bereits genannten Nachteile bei der Erzeugung von Überbrückungen lassen sich nicht gänzlich verhindern. Es ist eine unebene Struktur erkennbar, da der Überbrückungsprozess einige Zeit benötigt, ehe sich eine geschlossene Schicht einstellt. Für kleine Längen ist die Bearbeitung im losen Pulverbett der Verwendung von Stützstrukturen vorzuziehen, da die Menge der Nacharbeiten wesentlich geringer ist als eine komplette Stützstruktur zu entfernen.

Für die Herstellung von Bauteilen mit dem Mikro-SLM-Prozess sind solche Strukturen besser geeignet, die technologisch ohne Stützstruktur oder Überhänge erzeugt werden können. Dabei handelt es sich um Zahnräder oder flache Bauteile.

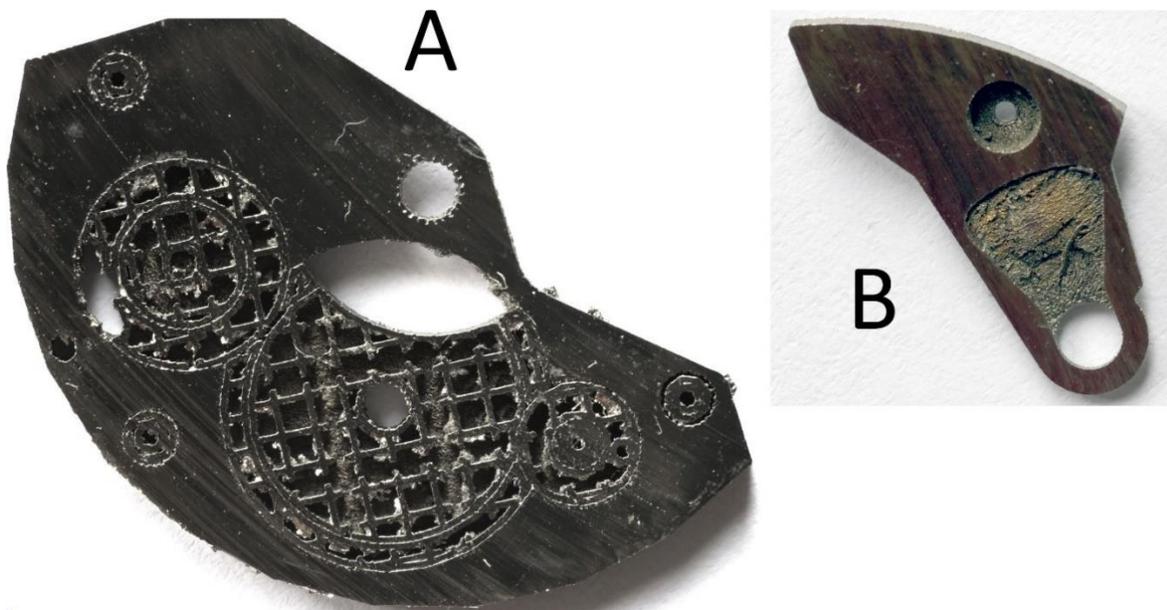


Abbildung 32: Darstellung Federhausbrücke (A) mit Stützstruktur hergestellt, Unruhbrücke (B) ohne Stützstruktur hergestellt

In Abbildung 33 sind einige der Teile dargestellt. Dabei handelt es sich um Anker, Hemmungsräder, Minutenrad und den Unruhaufbau (Abbildung 33A-D). Die Bauteile sind von ihrer Struktur her einfach herzustellen, benötigen aber Stützstrukturen, da sie eine Bauteilkombination darstellen. Durch das Minutenrad geht z.B. eine Welle, welche beidseitig aus ihm herausragt und dementsprechend nur mit Stützstruktur aufbaubar ist. In Abbildung 33C wird das Minutenrad ohne diese Welle aufgebaut, da das für die additive Fertigung einfacher ist.

Hemmungsrad und Anker werden mit Stützstrukturen aufgebaut und benötigen entsprechende Nachbearbeitung. Es ist erkennbar, dass filigrane Teile wie der Anker (Abbildung 33A) schwieriger herstellbar sind als z.B. ein Zahnrad. Auch das Hemmungsrad, was mit Stützstruktur erzeugt wird ist im Vergleich zum Original noch ausbaufähig. Die Ursache dafür liegt in der Wahl der Stützstruktur, die für die Teile noch nicht ideal ist. Hier kann erneut die wirkende Kraft des Druckverdichters als vermutete Ursache genannt werden, da für die Teile zu hohe Scherkräfte während des Aufbauprozesses nachteilig wirken.

Eine mögliche Optimierung für die Teile ist die Verwendung einer Schutzstruktur um das Bauteil herum während der additiven Fertigung, die die wirkenden Scherkräfte im Prozess absorbiert. Zudem ist es, wie auch beim Minutenrad, im Fall des Hemmungsrades möglich das Zahnrad und den notwendigen Pin separat zu fertigen um auf eine notwendige Stützstruktur verzichten zu können. Der erforderliche, zusätzliche Konstruktionsaufwand ist nicht Bestandteil der Arbeit.

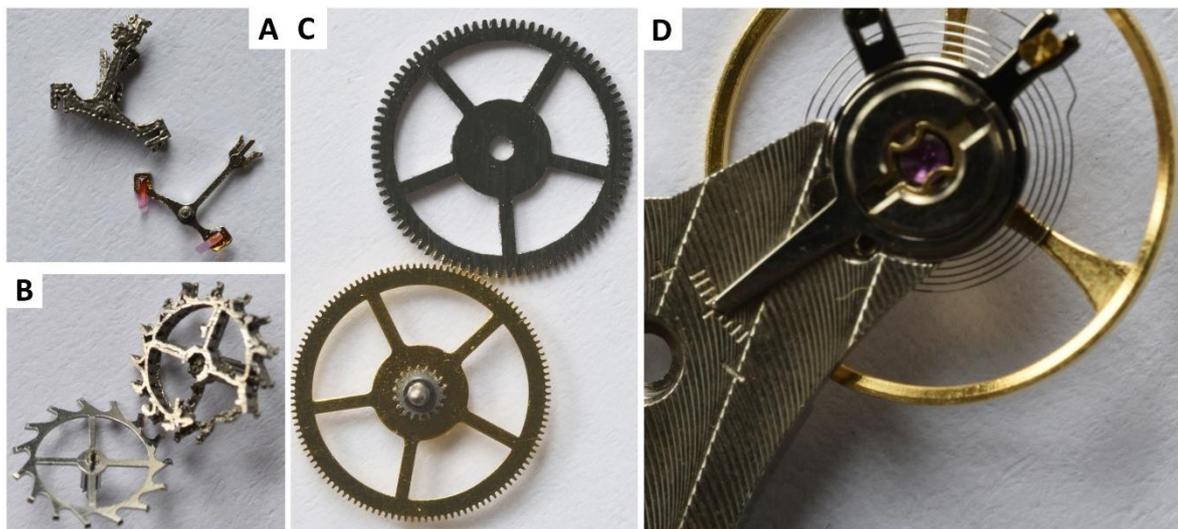


Abbildung 33: Fotografie von Originalteilen und Mikro-SLM Teilen: Anker (A), Hemmungsrad (B), Minutenrad (C) und Unruhaufbau Original (D)

Die Teile in Abbildung 34 stoßen bei Ihrer Herstellung an die Auflösungsgrenzen des Mikro-SLM-Verfahrens. Sie sind durch ihre Bauart gut herstellbar, (insbesondere Abbildung 34A und C/D) enthalten im Fall des Rückerstiftes jedoch nicht mehr die konstruktiv erforderliche Nut. Sie wird bedingt durch die geringe Größe Ihrer Struktur nicht mehr aufgebaut. Hier kann eventuell noch mit geschickter Konstruktion ein besseres Ergebnis erzielt werden doch wird vermutet, dass das Spaltmaß unterhalb der minimal möglichen Breite liegt.

Die Stoßsicherung ist herstellbar, das Mitnehmer-Minutenrohr weist an einigen Punkten noch Übergänge auf, die bei dem Originalteil so nicht vorkommen.

Die Teile in Abbildung 35 lassen sich ausnahmslos gut herstellen. Dabei handelt es sich um Unruhteile (A) das Sperrrad (B), Wechselrad (C), Kronrad (D) und Klinke (E) um nur

einige zu nennen. Es sind noch kleinere Optimierungen noch notwendig um dem Originalteil zu entsprechen. Ein Beispiel dafür sind die Ritzelabstände in Abbildung 35B, C und D.

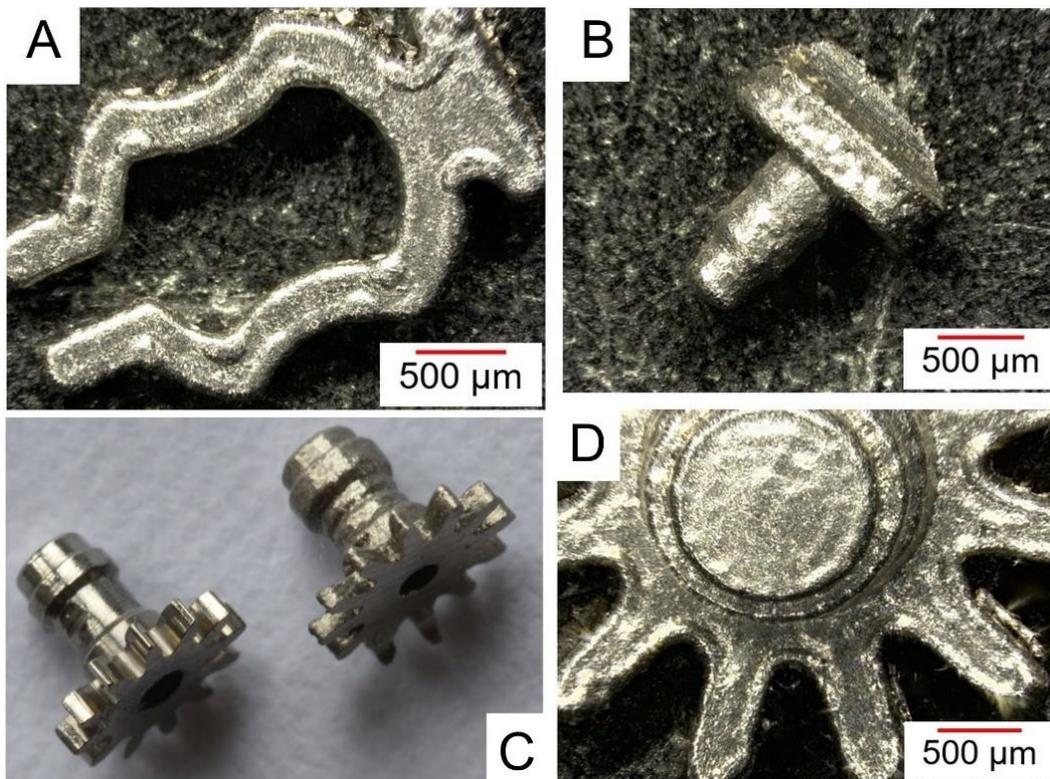


Abbildung 34: Auflichtmikroskopaufnahmen von Mikro-SLM Teilen: Stoßsicherung (A), Rickerstift (B) und Mitnehmer-Minutenrohr (Fotographie C und Auflichtmikroskopaufnahmen D)

Teile, die flächig auf dem Substrat aufliegen können, eignen sich am besten zur Herstellung mit dem Mikro-SLM-Verfahren. Exemplarisch kann hier neben den bereits vorgestellten Bauteilen der Kupplungstriebhebel und die Winkelhebelraste genannt werden, die ebenfalls aufgebaut wurden. Die Teile profitieren am meisten von der additiven Fertigung, da hier neben Materialeinsparungen zusätzliche Designfeatures eingebaut werden können.

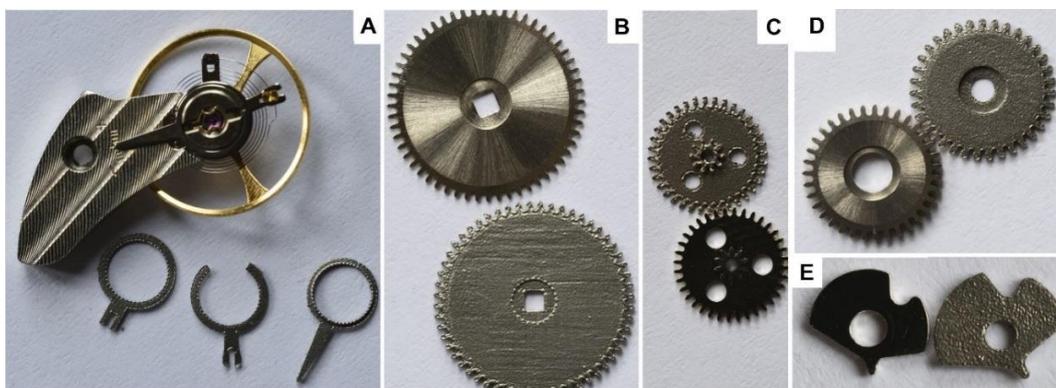


Abbildung 35: Fotografie von Originalteilen und Mikro-SLM-Teilen: Unruh-Rickerstifthalter (A), Sperrrad (B), Wechselrad (C), Mitnehmer-Minutenrohr (D) und Klinke (E)

Bei der Herstellung der Uhrwerksteile kann festgestellt werden, dass die Konstruktion und die Herstellung der Komponenten einen wesentlichen Arbeitsaufwand benötigten, so dass zum Abschluss der Arbeiten trotz größten Bemühungen keine Bauteile in ein laufendes Uhrwerk eingebaut wurden. Es wird vermutet, dass sich das Mikro-SLM-Verfahren für die Herstellung der überwiegenden Anzahl von Teilen eines Uhrwerks eignet. Kombiniert man die Technologie der additiven Fertigung mit den Möglichkeiten der gestalterischen Freiheit, die das Verfahren mit sich bringt, so können Teile des Uhrwerkes hinsichtlich Gewichts, Materialverwendung und Designfeatures noch weiter optimiert werden. Besonders bei den Zahnrädern und den Gehäuseteilen können durch die additive Fertigung weitere Designelemente hinzugefügt werden, so dass die weitere Betrachtung der Herstellung durchaus sinnvoll erscheint.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Die Arbeit beschäftigt sich mit der generativen Fertigung von Uhrwerksteilen.

Der erste Abschnitt ordnet das SLM-Verfahren- und das Mikro-SLM-Verfahren in die heutige Industrielandschaft ein. Es werden anhand verschiedener Veröffentlichungen der vergangenen Jahre Übersichten über die erreichbaren Parameter für beide Verfahren erstellt. Es erfolgt ein Vergleich.

Nachfolgend geht es im weiteren Verlauf um die allgemein verwendete Anlagentechnik bei SLM-Prozessen und im speziellen für die Versuche des Mikro-SLM-Verfahrens um die verwendete Versuchsanlage. Dabei wird auf verschiedene Rakelarten eingegangen und die Besonderheiten des im Mikro-SLM-Prozess verwendeten Druckverdichters hervorgehoben.

Aufbauend auf den notwendigen, theoretischen, Grundlagen für die verwendeten Prozesse wird eine Prozesssimulation durchgeführt. Die Simulation beschäftigt sich mit den unterschiedlichen Bearbeitungsregimen unidirektional und bidirektional. Hier wird die Vermutung, dass außer der Bearbeitungsgeschwindigkeit kein besonderer Einfluss im Prozess entstand, validiert. Aufgrund der Ergebnisse werden alle nachfolgenden Simulationen und Versuche bidirektional, zur Minimierung der Bearbeitungsgeschwindigkeit, durchgeführt. Weitere Simulationen beziehen sich auf den Linienabstand der Strukturen. Die Variation des Linienabstandes zwischen 20 μm , 30 μm und 40 μm wird durchgeführt. Als ideale Werte ergeben sich Linienabstände von 20 μm und 30 μm . Die Ergebnisse decken sich mit praktisch durchgeführten Untersuchungen und werden untereinander verglichen.

Anschließend werden Untersuchungen von Teststrukturen in Anlehnung an die VDI 3405 zur Evaluierung des Mikro-SLM-Verfahrens nach SLM-Standards durchgeführt. Es wird sich in den Untersuchungen auf die Erzeugung von relativer Dichte, Oberflächenrauheit und Geometrie konzentriert. Hierbei kann festgestellt werden, dass Strukturen bis zu einer relativen Dichte von $\sim 99.5\%$ mit Linienabständen von 20 μm und 30 μm herstellbar sind. Die beste erreichbare Oberflächenrauheit beträgt nach der Bearbeitung mit dem Laserstrahl $S_a=7\ \mu\text{m}$. Zudem werden aufgrund der äußeren Umstände Strategien vorgestellt, um die Rauheit weiter zu optimieren. Bei der Geometrieerzeugung werden die einzelnen Untersuchungen von Spaltmaß, Überhängen, Überbrückungen, Neigungen und Bohrungen durchgeführt. Für die erstellten Geometrien kann festgestellt werden, dass minimale Spaltmaße mit 50 μm herstellbar sind. Überhänge können bis zu einer Länge von 500 μm erstellt werden. Überbrückungen können bis zu 4 mm aufgebaut werden, wobei hier beobachtet wird, dass mit zunehmender Brückenlänge eine Verschmelzung im freien Pulver-

bedeutet mehr Zeit benötigt als bei kurzen Distanzen. Freistehende, dünne, geneigte Wände mit einer Wandstärke von $50\ \mu\text{m}$ sind bis zu Neigungswinkeln von 20° erstellbar. Für Teststrukturen die auf Vollmaterial basierten sind Neigungen bis zu 5° möglich.

Minimale Bohrungsdurchmesser liegen bei etwa $50\ \mu\text{m}$.

Die aus den Untersuchungen erzielten Ergebnisse werden für die praktische Herstellung von Uhrwerksteilen verwendet. Es wird eine Einteilung der Uhrenbauteile anhand eines Ampelsystems in herstellbar, mäßig herstellbar und nicht herstellbar getroffen. Ein Großteil der Uhrwerksteile wird mit dem Mikro-SLM-Verfahren erzeugt und analysiert. Dabei wird bestehender Optimierungsbedarf aufgezeigt und anhand von Vorschlägen diskutiert.

8.2 Ausblick

Feinmechanische Bauteile lassen sich mit dem Mikro-SLM-Verfahren herstellen. Um den hohen qualitäts- und technologischen Anforderungen des gewählten Produkts zu entsprechen sind verschiedene, erweiterte Lösungsansätze möglich.

Die verwendeten Simulationen können um den Bereich der Schmelzbaddynamik erweitert werden um ein noch besseres Verständnis der metallurgischen Prozesse beim Mikro-SLM-Verfahren zu erreichen.

Für die Optimierung der Oberflächenrauheiten müssen Prozesse entwickelt werden, die differenzierte Ansätze für eine verbesserte Qualität ohne entsprechende Nachbearbeitung der Teile bieten.

Für die Untersuchungen nach VDI 3405 lässt sich feststellen, dass sie mit Einschränkungen auch auf das Mikro-SLM-Verfahren angewandt werden können. Besonders das Fließverhalten der feinkörnigen Pulver muss für Korngrößen $d_{80} < 5\ \mu\text{m}$ angepasst werden um kleinere Schichtdicken und damit feinere Auflösungen und vermutlich eine höhere Präzision (Qualität) zu erreichen. Erste Untersuchungen haben ergeben, dass kleinere Schichtdicken möglich wären.

Ein weiterer Optimierungspunkt des Verfahrens liegt in der Anlagentechnik. Besonders die Mechanik der Rakel bietet hier einen weiteren Entwicklungsspielraum um die Erzeugung von besonders filigranen Strukturen zu ermöglichen. Eine Option könnte die Verwendung von Schutzstrukturen sein um die Scherkräfte während der Bauteilgenerierung aufzunehmen. Das führt jedoch zu erhöhtem Materialeinsatz und längeren Bauzeiten und ist ökonomisch nicht sinnvoll. Andere Ansätze können die Reduktion der auftretenden mechanischen Kräfte durch eine überarbeitete Konstruktion, z.B. eine flexible Rakel, sein. Dabei würde sich die Rakel bei direktem Kontakt mit der Oberfläche der Bearbeitungsebene verformen und anschließend in ihre Ausgangsform zurückkehren. Dazu muss eine Lösung gefunden werden um die starke Pulververdichtung beizubehalten ohne dabei die Strukturen im Aufbau zu behindern.

Für die Erstellung von Uhrwerksteilen zeigte sich, dass verschiedene Teile gefertigt werden können. Insbesondere muss eine Optimierung der Stützstrukturen gefunden werden. Eine Möglichkeit der Verbesserung bietet hier die Variation der Strukturen. In nachfolgender Abbildung 36 sind verschiedene Muster vorgestellt, die als Stützstruktur für den Mikro-SLM-Prozess verwendet werden können. Sie wurden mit dem Mikro-SLM-Verfahren erzeugt. Dabei handelt es sich um eine Wabenstruktur (A), eine Kreisstruktur (B), eine Linienstruktur (C) und eine Dreiecksstruktur (D). Welche Struktur die Anforderungen am besten erfüllt ist nicht bekannt. Dafür sind weitere Untersuchungen erforderlich.

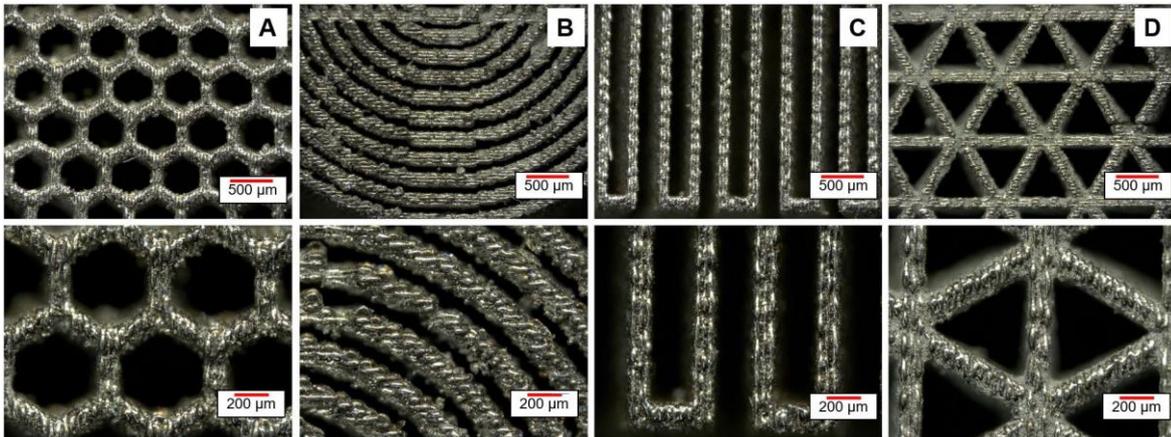


Abbildung 36: Variation verschiedener Optionen von Stützstrukturen jeweils mit Nahaufnahme – Wabenstruktur (A), Kreisstruktur (B), Linienstruktur (C) und Dreiecksstruktur (D)

Zudem könnte mit verschiedenen Anbindungsoptionen experimentiert werden. Insbesondere der Übergang von Stützstruktur zu Bauteil kann hierbei betrachtet werden. Mit den Ergebnissen einer solchen Untersuchung wird sich die Anzahl der zu erzeugenden Bauteile erhöhen.

Die möglichen technologischen Vorteile des Mikro-SLM-Verfahrens zeigen sich besonders bei der testweise hergestellten Feder (Abbildung 37), die auch entsprechende Eigenschaften einer Feder aufweist. Sie ist in der Lage eine Federwirkung zu erzeugen. Sie kann auf eine bestimmte Länge elastisch gedehnt werden und springt anschließend in ihre Ursprungsform zurück. Eine Aussage hinsichtlich der Konstanz der Federwirkung und weiterer Parameter ist zurzeit nicht möglich und muss weiter untersucht werden.

Es lässt sich annehmen, dass die erzeugten Materialeigenschaften im Bauteil bei dünnen Strukturen auf ein wenig sprödes Material hindeuten. Die Dehnungseigenschaften gleichen denen von unbehandeltem Edelstahl.

Die Herstellung von Federn wurde so in der Art noch nicht mit dem Mikro-SLM-Verfahren durchgeführt. Interessant ist in dem Zusammenhang eine weiterführende Untersuchung der Spannungen während der Bearbeitung im Pulverbett. Dazu müssen jedoch Lösungen für ein Messverfahren gefunden werden.

Somit eröffnen sich verschiedene Forschungsgebiete in unterschiedlichen Bereichen, die von der verbesserten, mathematischen Simulation der Vorgänge bis zu werkstoffwissenschaftlichen Untersuchungen der erzeugten Bauteile reichen.



Abbildung 37: Fotografie einer mittels Mikro-SLM hergestellten Feder

9 Literaturverzeichnis

- [1] S. Soller, A. Barata und et.al., „Selective Laser Melting (SLM) of Inconel 718 and Stainless Steel Injectors for Liquid Rocket Engines,“ Munich- Germany, Vernon-France, 2016.
- [2] A. G. Demir und B. Previtali, „Additive manufacturing of cardiovascular CoCr stents by selective laser melting,“ *Material and Design*, Bd. 119, pp. 338-350, 2017.
- [3] 3D Micro PRINT, „www.3dmicroprint.com,“ 05 Juni 2020. [Online]. Available: <http://www.3dmicroprint.com/files/2016/12/Case-study-watch.pdf>. [Zugriff am 05 Juni 2020].
- [4] VDI, *VDI-Richtlinie 3404*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2009.
- [5] VDI, *VDI-Richtlinie 3405*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2014.
- [6] M. Baldinger, B. Leutenecker und M. Rippel, „Strategische Relevanz generativer Fertigungsverfahren,“ *Industrie Management*, Bd. 29, Nr. 2, pp. S. 11-14, 2013.
- [7] A. Gebhardt, *Understanding Additive Manufacturing*, München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [8] AMPOWER, „am-power.de,“ 13 Januar 2020. [Online]. Available: <https://am-power.de/en/insights/metal-additive-manufacturing/>. [Zugriff am 13 Januar 2020].
- [9] AMPower, „Technology overview metal Additive Manufacturing,“ 02 Mai 2020. [Online]. Available: <https://am-power.de/en/un kategorisiert/metal-additive-manufacturing/>. [Zugriff am 02 Mai 2020].
- [10] C. Kamath, B. El-Dasher, G. F. Gallegos, W. E. King und A. Sistro, „Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. 74, pp. 65-78, 29 May 2014.
- [11] eos, „<https://www.eos.info>,“ 13 Januar 2020. [Online]. Available: https://www.eos.info/additive_fertigung/fuer_technologie_interessierte. [Zugriff am 13 Januar 2020].
- [12] B. Nagarajan, Z. Hu, X. Song, W. Zhai und J. Wei, „Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives,“ *Engineering 5*, Bd. 5, Nr. 4, pp. 702-720, 2019.
- [13] J. Fischer, M. Kniepkamp und E. Abele, „Micro Laser Melting: Analyses of Current Potentials and Restrictions for the Additive Manufacturing of Micro Structures,“

Proceedings of the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium, pp. 22-35, 2014.

- [14] VDI3405, *Additive Fertigungsverfahren*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013.
- [15] M. Yakout, M. Elbestwai und C. Stephen, „Density and mechanical properties in selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L,“ *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 266, pp. 397-420, April 2019.
- [16] T. Kurzynowski, K. Gruber, W. Stopyra, B. Kuczicka und E. Chlebus, „Correlation between process parameters, microstructure and properties of 316 L stainless steel processed by selective laser melting,“ *Materials Science & Engineering: A*, Bd. 718, pp. 64-73, 2018.
- [17] S. M. Yusuf, Y. Chen, R. Boardman, S. Yang und N. Gao, „Investigation on Porosity and Microhardness of 316L Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting,“ *3D Printing of Metals*, Bd. 7, p. 64, 2017.
- [18] G. Miranda, S. Fraia, F. Bartolomeu, E. Pinto, S. Madeira, A. Mateus, P. Carrreira, N. Alves, F. S. Silva und O. Cravalho, „Predictive models for physical and mechanical properties of 316L stainless steel produced by selective laser melting,“ *Materials Science and Engineering: A*, Bd. 657, pp. 43-56, 2016.
- [19] J.-P. Kruth, J. Deckers, E. Yasa und R. Wauthlé, „Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method,“ *Journal of Engineering Manufacture*, Bd. 226, Nr. 6, pp. 1-12, 2012.
- [20] S. Dadbakhsh, L. Hao und N. Sewell, „Effect of selective laser melting layout on the quality of stainless steel parts,“ *Rapid Prototyping Journal*, Bd. 18, Nr. 3, pp. 241-249, 2012.
- [21] R. Li, J. Liu, Y. Shi, L. Wang und W. Jiang, „Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. 59, pp. 1025-1035, 2012.
- [22] B. Liu, R. Wildman, C. Tuck, I. Ashcroft und R. Hagur, „Investigation the effect of particle size distribution on processing parameters optimisation in selective laser melting process,“ *Additive manufacturing research group*, pp. 227-238, 2011.
- [23] A. B. Spierings, N. Herres und G. Levy, „Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts,“ *Rapid Prototyping Journal*, Bd. 17, pp. 195-202, 2011.
- [24] I. Yadroitsev und I. Smurov, „Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape,“ *Physics Procedia*, Bd. 5, Nr. B, pp. 551-560, 2010.
- [25] E. Yasa, T. Craeghs, M. Badrossamay und J.-P. Kruth, „Rapid Manufacturing Research at the Catholic University of Leuven,“ in *Workshop On Rapid Technologies*, Leuven, 2009.

- [26] E. R., R. Bohme, R. P., K. S. und E. H., „Lasermikrobearbeitung im Vakuum,“ *Lasermagazin*, Bd. 6, p. 22, 2001.
- [27] H. Exner und A.-M., „Laser beam sintering of thin alumina coatings on steel,“ in *Proceedings of 8th International Conference on Ceramic Processing Science*, 2002.
- [28] R. Ebert und F. Ullmann, „3D Microprint von Metallen mit Laserstrahlung–verfügbare Technologien,“ *Tagungsband Laser in der Elektronikproduktion und Feinwerktechnik*, pp. 107-119, 2014.
- [29] M. Gieseke, V. Senz, M. Vehse, S. Fiedler, R. Irsig, M. Hustedt, K. Sternberg und et.al., „Additive manufacturing of drug delivery systems,“ *Biomedical Engineering/ Biomedizinische Technik*, Bd. 57, Nr. SI-1-Track-S, pp. 398-401, 2012.
- [30] C. Noelke, M. Gieseke und S. Kaierle, „Additive manufacturing in micro scale,“ *Journal of Laser Applications*, Bde. %1 von %22013-1, pp. 1-6, 2013.
- [31] M. Schniedenharn, M. Belting, R. J. S. Batista, W. Meiners und A. Weisheit, „Micro scale laser based additive manufacturing for metals,“ *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, pp. 1-6, 2013.
- [32] M. Kniepkamp, J. Fischer und E. Abele, „Dimensional accuracy of small parts manufactured by micro selective laser melting,“ *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF)*, pp. 1530-1537, 2016.
- [33] R. C. Roberts und N. C. Tien, „3D printed stainless steel microelectrode arrays,“ *Proceedings of the 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, pp. 1233-1236, 2017.
- [34] J. Drechsel, M. Erler, R. Ebert und H. Exner, „Pulver- und Prozessuntersuchung für die generative Fertigung von Edelstahlbauteilen mittels Mikro-SLM,“ *Scientific Reports 11. Mittweidaer Lasertagung*, pp. 125-129, 2019.
- [35] J. Eichler und H. Eichler, *Laser Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*, Berlin: Springer Heidelberg, 2010.
- [36] M. Eichhorn, *Laserphysik*, Heidelberg: Springer, 2013.
- [37] K.-J. Bathe, *Finite-Elemente-Methoden*, 2. Aufl., Berlin: Springer, 2002.
- [38] P. Steinke, *Finite-Elemente-Methode*, Berlin: Springer, 2004.
- [39] A. B. Spierings und G. Levy, „Comparison of density of stainless steel 316L parts produced with selective laser melting using different powder grades,“ in *SFF Symposium 2009*, St. Gallen, 2009.
- [40] H. M. Jens Bliedtner, *Lasermaterialbearbeitung: Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele*, München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2013.

- [41] W. Demtröder, „Experimentalphysik 2,“ in *Elektrizität und Optik*, Kaiserslautern, Springer Verlag, 2017, p. 183ff.
- [42] A. W. Momber und R.-R. Schulz, *Handbuch der Oberflächenbearbeitung*, Berlin: Birkenhäuser, 2006.
- [43] A. Streek, P. Regenfuss, R. Ebert und H. Exner, „Laser micro sintering - a quality leap through improvement of powder packing,“ *Proceedings of the 19th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 297-308, 2008.
- [44] R. Lachmayer, R. B. Lippert und T. Fahlbusch, *3D-Druck beleuchtet*, Hannover: Springer Verlag, 2016.
- [45] HUBS, 3D, „Additive Manufacturing Technologies,“ 13 Januar 2020. [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/get/am-technologies/>. [Zugriff am 02 05 2020].
- [46] P. Regenfuss, L. Hartwig, S. Klötzer, R. Ebert, T. Brabant, T. Petsch und H. Exner, „Industrial freeform generation of microtools by laser micro sintering,“ *Rapid Prototyping Journal Vol. 11*, Bd. 11, Nr. 1, pp. 18-25, 2005.
- [47] Trumpf, „trumpf.de,“ 16 Januar 2020. [Online]. Available: https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/maschinen-systeme/additive-fertigungssysteme/truprint-1000/. [Zugriff am 16 Januar 2020].
- [48] 3. Systems, „www.youtube.com,“ 3d Systems, 19 Dezember 2013. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=X-t_lvCDvuo. [Zugriff am 20 Juni 2020].

Anlagen

Teil 1: Oberflächenrauheit.....	A-I
Teil 2: VDI 3405 Empfehlungen.....	A-III
Teil 3: Unitas 6497 Uhrwerk.....	A-V

Anlagen, Teil 1 - Oberflächenrauheit

Tabelle 10: Oberflächenrauheitswerte ohne Nachbearbeitung

Nr.	Leistung in W	Hatch in [μm]	Sq[μm]	Sp[μm]	Sv[μm]	Sz[μm]	Sa[μm]
1	17	5	13.582	146.054	108.465	254.519	9.278
2	17	10	12.801	136.515	111.831	248.346	8.897
3	17	15	13.743	143.338	110.545	253.883	9.608
4	17	20	12.785	146.127	108.365	254.492	9.097
5	17	25	11.702	147.021	97.754	244.775	8.247
6	17	30	11.665	147.862	98.031	245.893	8.169
7	17	35	11.479	159.39	89.975	249.364	8.149
8	17	40	12.062	147.516	89.002	236.518	8.794
9	17	45	14.926	147.58	106.902	254.482	10.383
10	19.54	5	14.8	145.669	106.198	251.867	10.394
11	19.54	10	13.269	140.219	117.649	257.868	9.314
12	19.54	15	15.345	141.198	110.838	252.035	11.073
13	19.54	20	14.069	139.773	102.522	242.295	10.179
14	19.54	25	15.042	150.977	95.604	246.581	10.785
15	19.54	30	15.5	165.143	93.605	258.748	11.045
16	19.54	35	13.194	147.132	97.819	244.951	9.317
17	19.54	40	12.591	149.8	103.054	252.854	8.831
18	19.54	45	9.797	119.605	101.077	220.682	7.105
19	23.98	5	12.73	129.293	107.809	237.102	8.909
20	23.98	10	11.779	116.491	133.456	249.947	8.418
21	23.98	15	12.111	114.633	123.494	238.128	8.803
22	23.98	20	12.046	135.153	105.974	241.127	8.76
23	23.98	25	11.705	112.718	128.619	241.337	8.592
24	23.98	30	11.572	128.846	105.787	234.633	8.353
25	23.98	35	11.118	133.121	95.737	228.858	8.031
26	23.98	40	11.082	128.111	88.656	216.768	8.017
27	23.98	45	8.998	119.611	114.012	233.623	6.431
28	28.2	5	10.823	105.356	117.642	222.998	7.764
29	28.2	10	10.467	110.216	98.441	208.657	7.601
30	28.2	15	11.505	126.535	118.331	244.867	8.328
31	28.2	20	12.185	121.013	99.6	220.613	8.915
32	28.2	25	12.742	122.208	109.107	231.315	9.382
33	28.2	30	11.355	119.891	109.248	229.139	8.268
34	28.2	35	11.401	136.872	85.942	222.814	8.13
35	28.2	40	11.333	125.779	110.671	236.45	8.323
36	28.2	45	11.348	112.057	115.628	227.685	8.078
37	32.19	5	11.033	111.728	116.987	228.714	7.712
38	32.19	10	11.793	105.426	115.399	220.824	8.306
39	32.19	15	13.365	135.96	117.968	253.928	9.792
40	32.19	20	15.602	146.163	130.333	276.497	11.6

41	32.19	25	13.206	128.394	126.78	255.174	9.985
42	32.19	30	12.683	123.169	99.071	222.24	9.479
43	32.19	35	12.156	121.378	94.185	215.563	8.897
44	32.19	40	11.798	123.275	92.681	215.956	8.533
45	32.19	45	11.982	112.868	122.184	235.052	8.478
46	36.59	5	9.708	104.102	107.702	211.804	6.933
47	36.59	10	11.336	112.382	128.127	240.508	7.87
48	36.59	15	13.146	127.27	115.445	242.715	9.464
49	36.59	20	14.608	117.974	126.799	244.774	10.81
50	36.59	25	13.336	111.108	130.766	241.874	10.071
51	36.59	30	14.048	124.006	103.807	227.814	10.793
52	36.59	35	13.097	121.535	104.873	226.409	9.791
53	36.59	40	11.844	122.577	89.313	211.889	8.682
54	36.59	45	15.243	124.135	118.793	242.928	10.825
55	40.74	5	10.487	114.536	107.62	222.156	7.454
56	40.74	10	11.815	121.732	124.226	245.958	8.134
57	40.74	15	12.668	113.914	112.762	226.676	9.154
58	40.74	20	14.991	117.847	132.582	250.429	10.986
59	40.74	25	14.774	123.809	111.445	235.254	11.271
60	40.74	30	14.823	123.02	115.688	238.708	11.383
61	40.74	35	15.831	133.631	108.886	242.517	11.326
62	40.74	40	13.488	122.98	104.551	227.531	9.99
63	40.74	45	16.317	117.767	137.729	255.496	11.715
64	44.99	5	13.45	107.391	122.686	230.077	9.291
65	44.99	10	11.179	109.336	122.563	231.899	7.9
66	44.99	15	12.057	111.829	109.312	221.141	8.498
67	44.99	20	16.162	128.387	136.827	265.214	11.24
68	44.99	25	15.298	118.322	116.532	234.853	11.579
69	44.99	30	15.772	119.735	116.368	236.104	12.146
70	44.99	35	15.919	150.844	120.161	271.005	12.027
71	44.99	40	14.747	125.567	102.215	227.782	10.992
72	44.99	45	20.42	125.723	122.557	248.28	15.073
73	49.06	5	15.942	125.594	113.025	238.619	11.457
74	49.06	10	13.466	121.701	111.303	233.003	9.55
75	49.06	15	12.75	123.786	116.317	240.103	9.013
76	49.06	20	14.683	131.573	126.968	258.542	10.307
77	49.06	25	16.938	120.553	110.779	231.331	12.604
78	49.06	30	17.006	129.816	132.227	262.043	13.077
79	49.06	35	16.957	126.414	118.5	244.914	12.988
80	49.06	40	15.74	138.901	105.232	244.133	11.689
81	49.06	45	36.432	158.005	126.568	284.573	25.17
			Sq[μm]	Sp[μm]	Sv[μm]	Sz[μm]	Sa[μm]
Zählung			82	82	82	82	82
Durchschnitt			13.5	127.9	111.5	239.5	9.6
Max.			36.432	165.143	137.729	284.573	25.17
Min.			8.998	104.102	85.942	208.657	6.431

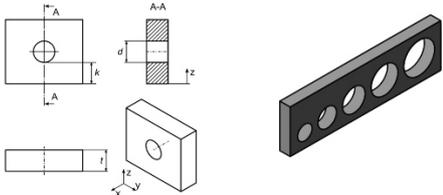
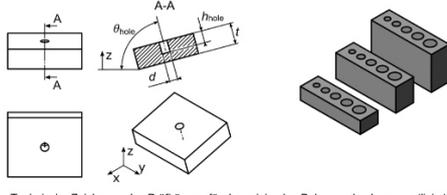
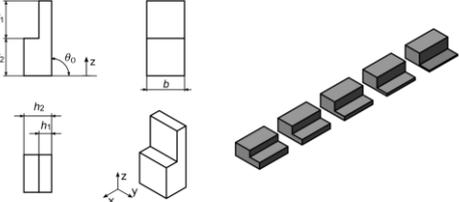
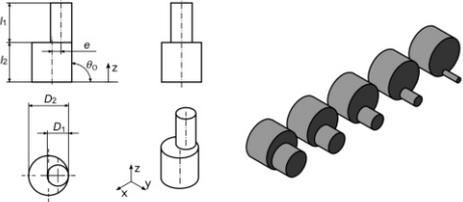
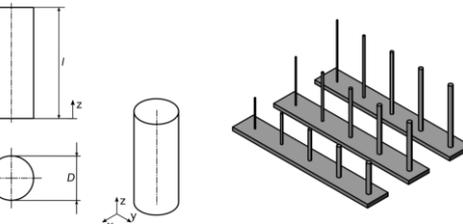
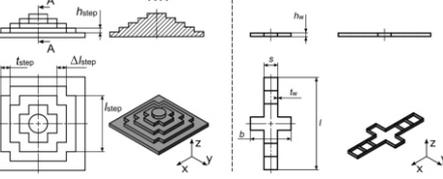
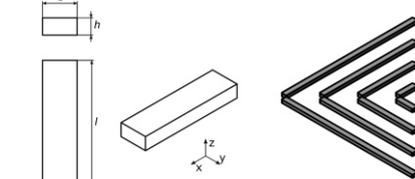
Tabelle 11: Oberflächenrauheitswerte nach Glasperlenstrahlen

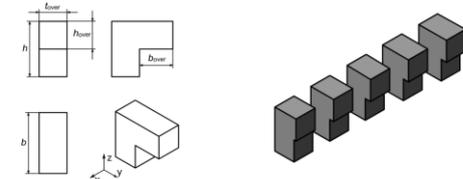
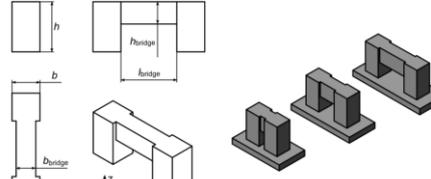
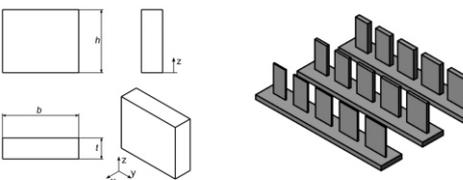
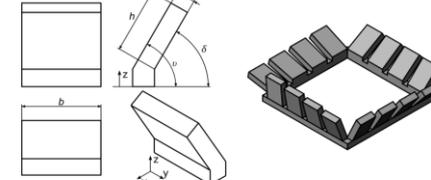
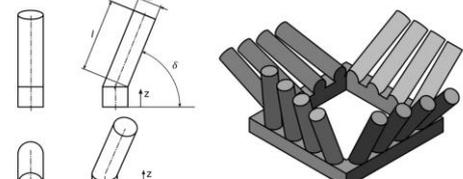
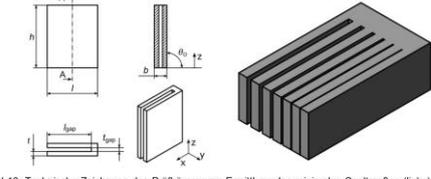
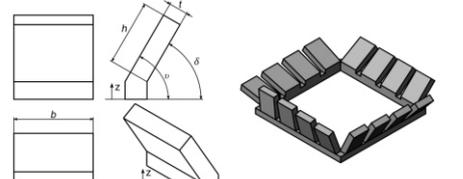
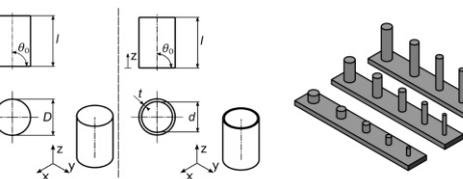
Nr.	Leistung in W	Hatch in [μm]	Sq[μm]	Sp[μm]	Sv[μm]	Sz[μm]	Sa[μm]
1	17	5	7.16	88.036	94.841	182.877	5.415
2	17	10	7.603	88.504	100.297	188.801	5.497
3	17	15	6.053	74.888	96.716	171.605	4.501
4	17	20	5.74	98.231	95.947	194.178	4.369
5	17	25	5.931	84.02	91.428	175.448	4.391
6	17	30	5.43	91.22	81.024	172.244	4.116
7	17	35	5.488	94.194	78.862	173.056	4.04
8	17	40	5.472	90.053	71.439	161.492	4.133
9	17	45	7.985	105.444	109.134	214.579	5.397
10	19.54	5	8.318	104.308	93.419	197.728	6.217
11	19.54	10	8.863	93.921	100.535	194.456	6.552
12	19.54	15	7.244	97.816	99.94	197.757	5.178
13	19.54	20	7.697	120.163	90.274	210.437	5.895
14	19.54	25	6.482	111.492	67.861	179.353	4.893
15	19.54	30	6.958	97.749	95.713	193.463	5.218
16	19.54	35	7.132	96.095	86.325	182.421	5.369
17	19.54	40	5.98	91.93	79.871	171.801	4.425
18	19.54	45	5.676	103.374	81.041	184.415	4.121
19	23.98	5	6.005	74.595	97.498	172.092	4.585
20	23.98	10	6.896	80.391	104.759	185.15	5.112
21	23.98	15	5.475	67.586	91.171	158.757	4.176
22	23.98	20	5.011	66.186	102.536	168.722	3.737
23	23.98	25	4.749	69.735	96.386	166.121	3.581
24	23.98	30	4.635	71.449	95.886	167.335	3.505
25	23.98	35	4.884	81.241	99.981	181.222	3.693
26	23.98	40	4.801	78.285	88.892	167.177	3.611
27	23.98	45	5.021	92.191	93.208	185.399	3.779
28	23.98	5	5.382	67.679	111.921	179.599	4.031
29	28.2	10	5.98	68.46	102.034	170.494	4.545
30	28.2	15	4.645	66.482	111.52	178.003	3.499
31	28.2	20	4.736	63.102	105.96	169.062	3.556
32	28.2	25	4.793	68.608	90.621	159.229	3.635
33	28.2	30	5.613	68.8	103.119	171.919	4.15
34	28.2	35	4.419	71.097	89.323	160.42	3.32
35	28.2	40	4.738	74.419	89.027	163.446	3.439
36	28.2	45	6.019	88.722	89.332	178.054	4.531
37	32.19	5	7.55	83.276	112.84	196.116	5.646
38	32.19	10	5.831	74.455	115.96	190.415	4.372
39	32.19	15	5.017	63.817	111.865	175.682	3.742
40	32.19	20	5.628	80.497	61.807	142.304	4.225
41	32.19	25	6.474	91.42	102.36	193.78	4.773
42	32.19	30	5.093	68.103	102.963	171.066	3.767
43	32.19	35	4.623	71.949	92.278	164.227	3.475

44	32.19	40	5.477	75.416	88.517	163.932	3.68
45	32.19	45	4.908	79.877	86.687	166.564	3.647
46	36.59	5	7.178	83.3	107.114	190.414	5.301
47	36.59	10	5.653	58.215	115.152	173.367	4.342
48	36.59	15	5.329	80.223	113.063	193.286	3.968
49	36.59	20	6.346	77.632	115.707	193.339	3.953
50	36.59	25	4.477	71.091	78.929	150.02	3.409
51	36.59	30	4.617	70.974	104.898	175.873	3.464
52	36.59	35	4.787	76.239	82.109	158.348	3.55
53	36.59	40	4.99	85.275	114.738	200.013	3.634
54	36.59	45	5.035	83.854	88.937	172.791	3.796
55	40.74	5	7.805	84.636	116.115	200.75	5.789
56	40.74	10	6.499	81.434	107.769	189.204	4.952
57	40.74	15	5.685	70.899	107.043	177.942	4.301
58	40.74	20	5.487	64.038	99.966	164.004	3.942
59	40.74	25	4.952	60.485	91.258	151.743	3.718
60	40.74	30	4.599	66.586	101.098	167.685	3.452
61	40.74	35	4.794	71.046	97.928	168.974	3.549
62	40.74	40	4.913	73.032	95.587	168.619	3.681
63	40.74	45	5.442	94.5	94.537	189.037	3.805
64	44.99	5	8.652	87.851	117.996	205.846	6.315
65	44.99	10	7.489	82.376	115.944	198.32	5.655
66	44.99	15	6.992	78.505	112.601	191.106	5.261
67	44.99	20	5.171	79.65	102.623	182.272	3.861
68	44.99	25	6.297	72.655	118.895	191.549	4.17
69	44.99	30	5.083	77.821	87.859	165.681	3.769
70	44.99	35	5.036	76.863	100.914	177.777	3.751
71	44.99	40	5.38	79.486	99.929	179.415	4.045
72	44.99	45	5.334	79.408	93.132	172.541	3.959
73	49.06	5	12.134	94.589	163.472	258.061	8.883
74	49.06	10	9.79	96.086	113.754	209.84	7.499
75	49.06	15	8.332	102.901	119.551	222.452	6.182
76	49.06	20	7.208	80.011	117.749	197.76	4.946
77	49.06	25	6.659	79.222	100.509	179.731	4.602
78	49.06	30	5.998	100.736	102.652	203.388	4.278
79	49.06	35	5.576	76.906	86.82	163.727	4.199
80	49.06	40	5.167	65.042	94.14	159.182	3.866
81	49.06	45	5.494	78.608	74.871	153.479	4.159
			Sq[μm]	Sp[μm]	Sv[μm]	Sz[μm]	Sa[μm]
Zählung			81	81	81	81	81
Durchschnitt			6	81.3	98.9	180.1	4.439
Max.			12.134	120.163	163.472	258.061	8.883
Min.			4.419	58.215	61.807	142.304	3.320

Anlagen, Teil 2 - VDI 3405 Empfehlungen

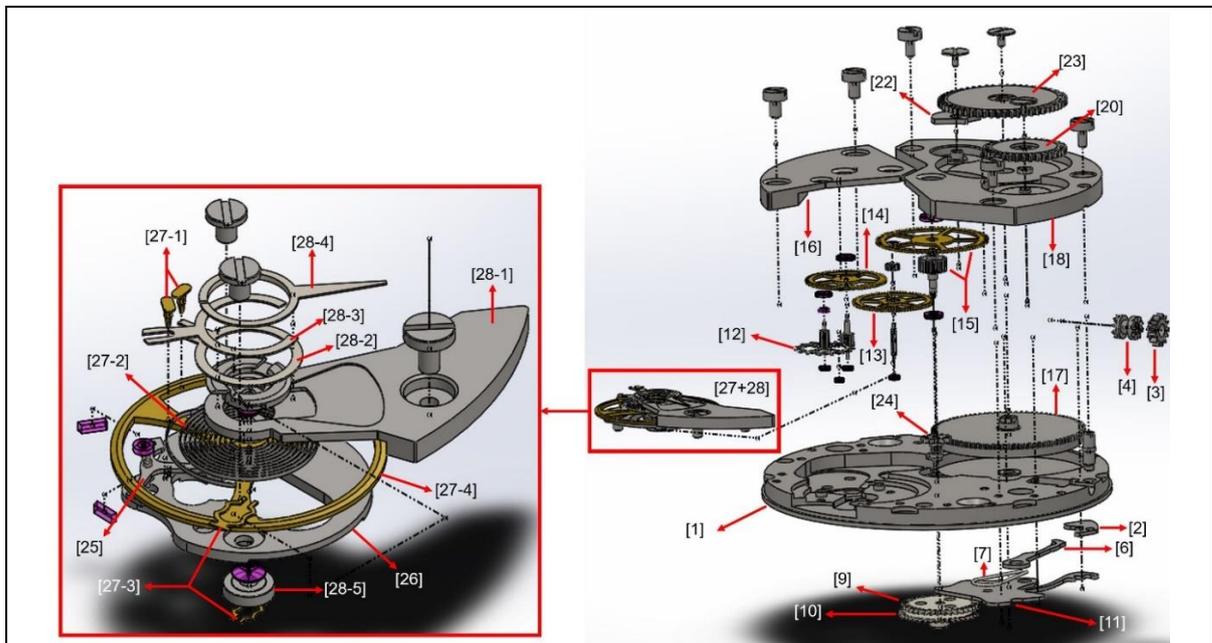
Tabelle 12: Übersicht der VDI 3405 Strukturtests [14]

 <p>Bild 3. Technische Zeichnung des Prüfkörpers für den maximalen waagerechten Bohrungsdurchmesser (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>d Bohrungsdurchmesser k Abstand zur Bauebene t Bauteildicke</p>	 <p>Bild 2. Technische Zeichnung des Prüfkörpers für den minimalen Bohrungsdurchmesser (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>θ_{bohr} Orientierung der Bohrung d Bohrungsdurchmesser h_{bohr} Bohrungstiefe t Bauteildicke</p>
<p>Bohrungsdurchmesser waagrecht</p>  <p>Bild 9. Technische Zeichnung des Prüfkörpers zur Ermittlung von Dicksprüngen an Quadern (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>θ_0 Bauteilorientierung b Bauteilbreite h_1 Höhe des kleinen Quaders h_2 Höhe des großen Quaders l_1 Länge des kleinen Quaders l_2 Länge des großen Quaders</p>	<p>Bohrungsdurchmesser senkrecht</p>  <p>Bild 8. Technische Zeichnung des Prüfkörpers für Dicksprünge an Zylindern (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>θ_0 Bauteilorientierung D_1 Durchmesser des kleinen Zylinders D_2 Durchmesser des großen Zylinders e Exzentrizität h_1 Länge des kleinen Zylinders h_2 Länge des großen Zylinders</p>
<p>Dicksprünge Quader</p>  <p>Bild 18. Technische Zeichnung des Prüfkörpers zur Beurteilung von Eigenspannungen und Verzug</p> <p>b Bauteilbreite h Bauteilhöhe l Bauteillänge h_{tr} Trägerhöhe l_{tr} Trägerlänge</p>  <p>Bild 19. Technische Zeichnung des Prüfkörpers für Schriften</p> <p>a Zeichnerabstand h Abbildungshöhe h_{lin} Linienbreite h_{scr} Schriftgröße</p>	<p>Dicksprünge Zylinder</p>  <p>Bild 6. Technische Zeichnung des Prüfkörpers für den minimalen freistehenden Zylinderstift (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>D Zylinderstiftdurchmesser l Bauteillänge</p>
<p>Eigenspannung, Verzug und Schrift</p>  <p>Bild 17. Technische Zeichnung des Prüfkörpers zur Bestimmung der Maßhaltigkeit vollvolumiger Bauteile (links) und dünnwandiger Bauteile (rechts)</p> <p>b Bauteilbreite h_{st} Stufenhöhe h_{st} Wandhöhe l Bauteillänge l_{st} Stufenlänge Δl_{st} Längenänderung der Stufe s Wandabstand s_{st} Stufenbreite t_w Wanddicke</p>	<p>Freistehender Zylinderstift</p>  <p>Bild 16. Technische Zeichnung des Prüfkörpers zur Bestimmung der Maßhaltigkeit (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>b Bauteilbreite h Bauteilhöhe l Bauteillänge</p>
<p>Maßhaltigkeit Bauteile</p>	<p>Maßhaltigkeit Kanten</p>

 <p>Bild 12. Technische Zeichnung des Prüfkörpers zur Ermittlung des maximalen freitragenden Überhangs (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>b Bauteilbreite b_{over} Überhangbreite h Bauteilhöhe h_{over} Überhanghöhe l_{over} Überhangdicke</p>	 <p>Bild 11. Technische Zeichnung des Prüfkörpers zur Ermittlung der maximalen freitragenden Überbrückung (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>b Bauteilbreite b_{bridge} Stiegbreite h Bauteilhöhe h_{bridge} Stieghöhe l_{bridge} Stieglänge</p>
<p>Maximal freitragender Überhang</p>	<p>Maximal freitragende Überbrückung</p>
 <p>Bild 4. Technische Zeichnung des Prüfkörpers für die minimale und maximale freistehende Wände (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>b Bauteilbreite h Bauteilhöhe t Bauteildicke</p>	 <p>Bild 5. Technische Zeichnung des Prüfkörpers für den minimalen Neigungswinkel freistehender Wände (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>δ Downskin-Winkel (Neigungswinkel) ϕ Upskin-Winkel b Bauteilbreite h Bauteilhöhe t Bauteildicke</p>
<p>Minimal freistehende Wände</p>	<p>Minimaler Neigungswinkel, freistehende Wände</p>
 <p>Bild 7. Technische Zeichnung des Prüfkörpers für den minimalen Neigungswinkel freistehender Zylinderstifte (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>δ Neigungswinkel = Downskin-Winkel D Zylinderstiftdurchmesser l Bauteillänge</p>	 <p>Bild 13. Technische Zeichnung des Prüfkörpers zur Ermittlung des minimalen Spaltmaßes (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>θ_0 Bauteilorientierung b Baubreite h Bauteilhöhe l_{gap} Spalttiefe l Bauteillänge l_{sp} Spaltlänge t Wanddicke t_{gap} Spaltstärke</p>
<p>Minimaler Neigungswinkel, freistehender Zylinder</p>	<p>Minimales Spaltmaß</p>
 <p>Bild 15. Technische Zeichnung des Prüfkörpers zur Ermittlung der Oberflächenqualität (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>δ Downskin-Winkel (Neigungswinkel) ϕ Upskin-Winkel b Bauteilbreite h Bauteilhöhe t Bauteildicke</p>	 <p>Bild 10. Technische Zeichnung des Prüfkörpers zur Ermittlung der Rundheit (links) und Kombinationsmöglichkeit des Prüfkörpers (rechts)</p> <p>θ_0 Bauteilorientierung D Außendurchmesser d Innendurchmesser l Bauteillänge t Wanddicke</p>
<p>Oberflächenqualität</p>	<p>Rundheit</p>

Anlagen, Teil 3 - Unitas 6497 ETA Uhrwerk

Tabelle 13: Aufbau Unitas 6497 ETA Uhrwerk mit Teilebezeichnung



Nummer	Bauteil	Nummer	Bauteil
1	Werkplatte	19	Kronrad Ring
2	Winkelhebel	20	Kronrad
3	Aufzugtrieb	21	Klinkenfeder
4	Kupplungstrieb	22	Klinke
5	Aufzugswelle	23	Sperrrad
6	Kupplungstriebhebel	24	Mitnehmer-Minutenrohr
7	Kupplungshebelfeder	25	Anker
8	Zeigerstellrad	26	Ankerbrücke
9	Zwischen-Zeigerstellrad	27	Unruh, montiert
10	Wechselrad	27-1	Rückerstift
11	Winkelhebelraste	27-2	Spirale
12	Hemmungsrade	27-3	Stoßsicherung
13	Kleinbodenrad	27-4	Unruhring
14	Sekundenrad	28-1	Unruhbrücke
15	Minutenrad	28-2	Spiralklötzchentträger
16	Räderwerkbrücke	28-3	Unterer Rückerstift Halter
17	Federhaus, vollständig	28-4	Oberer Rückerstift Halter
18	Federhausbrücke	28-5	Stoßsicherung

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, 03.07.2020

Julian Drechsel