

**Einflussuntersuchung variabler Laserspotgrößen auf die
Produktivitätssteigerung und Homogenisierung der mechanischen
Bauteileigenschaften beim pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzen von
Polyamid 12**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der
Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Lars Meyer, M. Sc.
aus
Oberhausen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt
Prof. Dr. Ing. Henning Zeidler

Tag der mündlichen Prüfung: 29.10.2024

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Beschäftigung am Lehrstuhl Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen entstanden. Durch interne und externe Einflüsse mussten sich die Prioritäten auf dem Weg zur Dissertation mehr als einmal ändern. Und dennoch erfuhr ich einen stetigen Rückhalt, der mich immer wieder auf Kurs gebracht hat.

Mein besonderer Dank gilt in diesem Kontext Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt, der mir über die Jahre am Lehrstuhl immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Das entgegengebrachte Vertrauen und die gewährten Freiheiten haben mich auf meinem beruflichen Werdegang sehr geprägt und eröffnen mir auch heute noch neue Sichtweisen auf Herausforderungen jeder Art.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler vom Lehrstuhl für Additive Fertigung der Technischen Universität Bergakademie Freiberg für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie die offene Kommunikation und die zielführenden Denkanstöße danken.

Für die stets sehr gute und enge Zusammenarbeit im BMBF-Verbundprojekt „HiPer-LS“ möchte ich mich bei allen Beteiligten recht herzlich bedanken. Ohne den Input, die Ressourcen und die fortwährende Erreichbarkeit der Projektpartner wäre ein so großes Vorhaben nicht möglich gewesen. Einen besseren Start in das Berufsleben hätte ich mir nicht wünschen können.

Ferner gilt mein Dank allen (auch ehemaligen) Mitarbeitern des Lehrstuhls, die mit mir ein Stück des Weges gegangen sind. Herrn Dr.-Ing. Stefan Kleszczynski danke ich für die Übernahme des Korrektorats und den stets kollegialen Austausch. Frau Livia Carmen Wiedau danke ich für die angenehme Büroatmosphäre, die bereichernden Gespräche und die erfahrene Unterstützung. Einen großen Dank möchte ich den Herren Manuel Sax und Robin Brassat aussprechen, die als meine ehemaligen Hilfswissenschaftler durch ihre fachspezifischen Stärken wesentlich zum Aufbau der Versuchsanlage und zur Durchführung der Versuchsreihen beigetragen haben.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Dr.-Ing. Thomas Reinhard für die Übernahme des Korrektorats und der ausführlichen Nachbesprechung mit inspirierenden Impulsen.

Für die bedingungslose Unterstützung während meiner akademischen Ausbildung und beruflichen Verwirklichung gebührt meinen Eltern ein großer Dank. Meinen zwei Töchtern Mina und Thea danke ich sehr für die tägliche Erinnerung daran, dass es noch so vieles mehr im Leben gibt. Abschließend gilt der größte Dank meiner Frau Sabine. Danke für die Unterstützung, den Rückhalt und die Liebe, die du mir in jeder Lebenslage gibst.

Prioritäten verändern sich,
aber Träume sind beständig

Kurzfassung

Das Powder Bed Fusion – Laser Beam / Polymers (PBF-LB/P) gewinnt aufgrund seiner flexiblen Einsatzmöglichkeiten und der Designfreiheit zunehmend an Bedeutung für kleine bis mittlere Serienproduktionen. Jedoch werden die Potenziale dieser Technologie durch verfahrensinhärente Anisotropie der Bauteileigenschaften, welche sich durch deren schichtweisen Aufbau begründen lässt, nicht vollständig erschlossen. Die relevanteste Anisotropie ist innerhalb der mechanischen Eigenschaften zu finden, deren Kennwerte aus dem eindimensionalen Zugversuch von der Positionierung und Orientierung der Bauteile im Bauraum abhängen. Die Ausprägung dieser Anisotropie ist unter anderem von dem verwendeten Anlagensystem abhängig und zeigt, dass in der Anlagenentwicklung noch Potenziale zu erschließen sind.

Entsprechende dem aktuellen Stand der Technik werden in dieser Arbeit neue Ansätze zur Steigerung der Produktivität und der Homogenisierung der Bauteileigenschaften betrachtet. Um diese Zielsetzung zu erreichen, wird eine PBF-LB/P-Anlage entwickelt und in Betrieb genommen, die mit innovativen Ansätzen zur Prozessstabilität und Energieeinbringung eine Prozessbeschleunigung durch vergrößerte Laserspotdurchmesser erreichen soll. Nach der Untersuchung robuster Prozessparameter wurden aufeinander aufbauend erst eindimensionale, dann zweidimensionale und schlussendlich dreidimensionale Versuchsreihen zur Erzeugung homogener Schmelzen und Probekörper mit Laserspotdurchmessern bis zu 2,2 mm durchgeführt.

Das Potenzial dieser Innovation wird durch die Validierung und Optimierung mit Zugprüfkörpern aufgezeigt. Es wird festgestellt, dass die Verwendung vergrößerter Laserspots unter robuster Prozessführung zu homogenen mechanischen Bauteileigenschaften führen kann. Dabei wird ersichtlich, dass die Laserspotvergrößerung nicht ausschließlich für die isotropen Bauteileigenschaften verantwortlich ist. Vielmehr ist die Kombination aus einem robusten Prozess, differenziertem Temperaturmanagement und der erzielten Prozessbeschleunigung entscheidend. Diese gewonnenen Erkenntnisse liefern neue Ansätze, die es zukünftig zu berücksichtigen gilt.

Abstract

Powder Bed Fusion - Laser Beam / Polymers (PBF-LB/P) is becoming increasingly important for small to medium-sized series production due to its flexible application options and freedom of design. However, the potential of this technology is not fully utilised due to the process-inherent anisotropy of the component properties, which can be explained by its layered structure. The most relevant anisotropy can be found within the mechanical properties, whose characteristic values from the one-dimensional tensile test depend on the positioning and orientation of the components in the build volume. The extent of this anisotropy depends, among other factors, on the system used and indicates that there is still potential to be unlocked in system development.

In line with the current state of the art, new approaches to increasing productivity and homogenising part properties are considered in this thesis. In order to achieve this purpose, a PBF-LB/P system is being developed and put into operation, which is intended to achieve process acceleration through increased laser spot diameters using innovative approaches to process stability and energy input. Following the investigation of robust process parameters, first one-dimensional, then two-dimensional and finally three-dimensional series of tests were carried out to produce homogeneous melts and test specimens with laser spot diameters of up to 2.2 mm.

The potential of this innovation is demonstrated by validation and optimisation with tensile test specimens. It is established that the use of enlarged laser spots can lead to homogeneous mechanical component properties under robust process control. It becomes clear that the laser spot enlargement is not solely responsible for the isotropic component properties. Rather, the combination of a robust process, differentiated temperature management and the achieved process acceleration is decisive. These findings provide new approaches that need to be considered in the future.

I. Formelsymbole

D_s	mm	Schichtstärke
E_A	J/mm ²	Flächenenergiedichte
E-Modul	Mpa	Elastizitätsmodul
E_V	J/mm ³	Volumenenergiedichte
ϵ_B	%	Bruchdehnung
f	mm	Brennweite
F_{KOMP}	mm	Spurbreitenkompensation der Füllung
H	mm	Hatchabstand
HV	V	High Voltage
K_{KOMP}	mm	Strahlkompensierte Kontur
P_L	W	Laserleistung
R	%	Reflexionsgrad
R_Z	μm	Rauheitskennwert einer Oberfläche
S_B	mm	Spurbreite
S_D	mm	Laserspotdurchmesser
v_L	mm/s	Scangeschwindigkeit
Vol.-%	%	Volumenprozent
w_f	mm	Fokusbereich
x-/y-/z-	mm	Raumrichtung im kartesischen Koordinatensystem
Z_R	mm	Rayleighlänge
ΔT	K	Temperaturdifferenz delta T
σ_M	MPa	Zugfestigkeit
$T(\lambda)$	%	Transmissionsgrad in Abhängigkeit zur Wellenlänge
λ	μm	Wellenlänge
w_0	mm	Rohstrahldurchmesser

II. Abkürzungen

3D	dreidimensional
3MF	3D Manufacturing Format
AF	Additive Fertigung
Ag	Argentum / Silber
AM	Additive Manufacturing
AMF	Additive Manufacturing File
ANOVA	Varianzanalyse
AOM	Akkustooptischer Modulator
AR	Antireflexion
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATC	Advanced Temperature Control
Au	Aurum / Gold
BJT	Binder Jetting
CAD	Computer aided Design
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CrNi	Chrom-Nickel
DDK / DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie / Differential Scanning Calorimetry
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOE	Design of Experiments
DTM	Desk Top Manufacturing
Duraform PA	PA12 Pulver von 3D-Systems
EN	Europäische Norm
EOS	Electro Optical Systems
F	Füllung
FKZ	Förderkennzeichen
FLM	Fused Layer Modelling
He	Helium
HP	Hewlett-Packard
ISO	International Standards Organization
K _{SO} LL	Sollkontur
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LS	Laser-Sintern
LSM	Laser Strahlschmelzen
LW	Laser-Window
MCT (HgCdTE)	Quecksilber-Cadmium-Tellurid
MJF	Multi Jet Fusion
n	Brechungsindex
N ₂	Stickstoff
Nd:YAG-Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
O ₂	Sauerstoff
OEM	Original Equipment Manufacturer
PA 12	Polyamid 12
PA 2200	PA 12 Pulver von EOS
PA 6	Polyamid 6
PA 613	Polyamid 613

PBF/LB-P	Powderbed Fusion / Laser Beam Polymer
PC	Polycarbonat
PEEK	Polyetheretherketon
PoOS	Post Objective Scanning
PrOS	Pre Objective Scanning
PS	Polystyrol
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
STL	Surface Tessellation Language
S _v	Scanvektor
TEM-Mode	Transversale Elektromagnetische Mode
ThF ₄	Thoriumflourid
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ZnSe	Zinkselenid

III. Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufbau der Arbeit.....	1
2	Grundlagen und Stand der Technik.....	4
2.1	Kategorisierung der Additiven Fertigung	4
2.2	Die Prozesskette	5
2.3	Das STL-Datenformat.....	5
2.4	Anwendungsbereiche.....	8
2.5	Marktsituation.....	8
2.6	Stand der Wissenschaft und Technik	10
2.6.1	Powder Bed Fusion – Laser Beam/Polymer	11
2.6.2	Entwicklung und Stand der Anlagentechnik.....	13
2.6.3	Resultierende Bauteileigenschaften.....	29
3	Überblick und Zielsetzung	33
4	Auslegung und Inbetriebnahme der Versuchsanlage	36
4.1	Methodische Entwicklung der Versuchsanlage.....	37
4.2	Innovation der Funktionseinheiten	40
4.3	Reduzierung der Belichtungszeit.....	48
4.4	Realisierung der Versuchsanlage.....	49
5	Versuchseinrichtung und Durchführung	52
5.1	Identifizierung geeigneter Anlagenparameter	52
5.1.1	Untersuchung des Pulverauftrags	53
5.1.2	Untersuchungen der Energieeinbringung	54
5.2	Durchgeführte Untersuchungen und verwendete Probekörper.....	55
5.2.1	Versuche zur Pulverpackungsdichte.....	55
5.2.2	Versuche zur resultierenden Oberflächengüte	57
5.2.3	Versuche zur Spurbreite und entstehenden Schmelze	58
5.2.4	Versuche zur Bauteildichte.....	60
5.3	Verifizierung und Validierung der Parameter für variierende Spotgrößen.....	62
6	Ergebnisse und Diskussion	65
6.1	Charakterisierung der Versuchsanlage.....	65
6.1.1	Ergebnisse zum Pulverauftrag und zu den vorherrschenden Prozesstemperaturen....	65
6.1.2	Energieeinbringung mittels Laser	68
6.2	Bauteilauswertung	70
6.2.1	Ergebnisse zur Pulverpackungsdichte	70
6.2.2	Ergebnisse zur resultierenden Oberflächengüte.....	72
6.2.3	Ergebnisse zur Spurbreite und entstehenden Schmelze.....	76

6.2.4	Ergebnisse zur Bauteildichte	82
6.3	Verifizierung und Validierung der Parameter für variierende Spotgrößen.....	111
6.3.1	Verifizierung der Standardparameter	112
6.3.2	Validierung und Optimierung der Standardparameter.....	113
6.4	Diskussion und Einordnung der Ergebnisse	118
7	Zusammenfassung und Ausblick	125
8	Literaturverzeichnis.....	128
9	Abbildungsverzeichnis.....	143
10	Tabellenverzeichnis	146
11	Anhang.....	147

1 Einleitung und Aufbau der Arbeit

Globale Pandemien, Unfälle an stark frequentierten Routen und regionale Krisen haben in den letzten Jahren aufgezeigt, wie empfindlich die global und intermodal aufgebauten Lieferketten sind [1]. Diese Instabilität gefährdet die Versorgungssicherheit und offenbart die Abhängigkeit von nicht beeinflussbaren Faktoren. Eine erforderliche Neuerung alter Lieferketten führt jedoch dazu, dass die Anforderungen neu definiert werden müssen. Während in der Vergangenheit hauptsächlich die ökonomischen Aspekte einer Lieferkette im Vordergrund standen, kommen aktuell weitere Aspekte der Resilienz, der Ökologie und der dezentralen Produktion vor Ort hinzu. [1, 2]

Teil der Lösung könnte die Additive Fertigung (AF engl.: AM) sein. Diese ist im Vergleich zu den konventionellen Fertigungsverfahren wie Gießen, Drehen und Fräsen eine junge Technologie, die jedoch dank der Forschung und Entwicklung bereits eine hohe Technologiereife erlangt hat. Aus Sicht der deutschen Industrie ist die Additive Fertigung mittelfristig eine der bedeutsamsten Zukunftstechnologien [3]. In den letzten Jahren haben einzelne additive Verfahren aufgrund ihrer vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und der damit verbundenen Vorteile an Bedeutung im industriellen Produktionsprozess gewonnen. Anders als bei subtraktiven Verfahren üblich werden die Materialvolumina zusammengefügt, die später das fertige Bauteil darstellen. Diese innovativen Technologien ermöglichen die direkte Herstellung von Bauteilen aus digitalen Modellen und im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren Flexibilität im Design, eine anpassungsfähige Möglichkeit der Fertigung von schnell benötigten Bauteilen sowie eine Reduktion von Materialabfall. Ein besonders vielversprechendes Verfahren in diesem Kontext ist aufgrund der hohen Technologiereife, der mechanisch belastbaren Bauteile und der Produktivität das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen von Kunststoffen (PBF-LB/P), auch bekannt als Laser-Sintern (LS) [4–6].

Das PBF-LB/P zeichnet sich durch seine Fähigkeit aus, ohne Werkzeuge oder Formen komplexe Geometrien und funktionale Bauteile ohne die Notwendigkeit von Stützkonstruktionen herzustellen. Dieser Prozess nutzt einen Laserstrahl, um feines Pulvermaterial schichtweise zu verschmelzen und so dreidimensionale Objekte zu erzeugen. Bereits einige Bauteile, die mittels PBF-LB/P hergestellt wurden, haben den Einzug in die Serienfertigung geschafft und finden Anwendung in verschiedenen Industriezweigen, von der Automobilindustrie bis zum Sondermaschinenbau [6, 7]. Diesem Beispiel folgend ist das Streben nach einer Implementierung additiver Fertigungsverfahren in den Produktionsprozess bei vielen Unternehmen stark ausgeprägt [8, 9].

Trotz dieser vielversprechenden Perspektiven existieren Hemmnisse, die einer flächendeckenden Verbreitung des PBF-LB/P im industriellen Ausmaß entgegenstehen. Obwohl das Verfahren eines der produktivsten der Additiven Fertigung darstellt, ist die Produktivität der Anlagensysteme im direkten Vergleich mit konventionellen spanenden oder urformenden Fertigungsverfahren als deutlich geringer anzusehen. Hinzu kommt eine kleinere Materialauswahl als bei konventionellen Fertigungsverfahren. Das liegt beispielsweise an den hohen prozesseitigen Anforderungen, die an das Materialsystem gestellt werden. Die Pulverpartikelverteilung und die Verzugsneigung seien beispielhaft erwähnt. Weiterführende Gründe sind die noch nicht vollständig ausgeschöpften Möglichkeiten der Additiven Fertigung zur Funktionsintegration, die iterativ von spezialisierten Konstrukteuren und entgegen dem

gelernten Wissen umgesetzt werden müssen. Diese neuartige Herangehensweise fordert einen Paradigmenwechsel vom fertigungsgerechten hin zum funktionsgerechten Konstruieren. Damit einher gehen gestiegene Anforderungen an die Konstruktion beispielsweise hinsichtlich bionischer Strukturen oder Funktionsintegrationen.

Ein wesentliches Hemmnis der Integration der Additiven Fertigung in bestehende Produktionsabläufe stellt die verfahrensinhärente Bauteilanisotropie dar, die zu ungleichmäßigen mechanischen Eigenschaften in unterschiedlichen Belastungsrichtungen des Bauteils führt. Diese orientierungsbedingte Anisotropie ist eine bislang nicht überwundene Herausforderung. Darüber hinaus erfüllen die derzeit geringe Reproduzierbarkeit und Produktivität der Anlagen nicht die hohen Standards, die in der industriellen Produktion erforderlich sind [10].

Diese Arbeit setzt an den genannten Herausforderungen an und zielt darauf ab, bestehende Anlagenkonzepte zu innovieren. Durch die zusätzliche Ergänzung eines Energieeintrages mittels Laserspotvergrößerung sollen die Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften untersucht werden. Diese Vorgehensweise verspricht, die Homogenität der mechanischen Eigenschaften gefertigter Bauteile zu verbessern und somit die Anisotropie zu verringern.

Die Systematik dieser Arbeit wird in Abbildung 1-1 dargestellt. Nach der Einleitung folgt in Kapitel II eine Übersicht über die Prozesskette, die Anwendungsgebiete und die Marktsituation der Additiven Fertigung im Allgemeinen. Weiterführend beschreibt das Kapitel den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik des PBF-LB/P und geht dabei insbesondere auf die Energieeinbringung mittels Laserstrahl ein. Zusätzlich werden anlagenspezifische Einflüsse auf die Produktivität und Pulverpackungsdichte im Prozess sowie deren Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften behandelt.

Kapitel III liefert einen Überblick über den bisherigen Kenntnisstand und zeigt den bestehenden Handlungsbedarf auf. Anhand einer Forschungsfrage und passender Forschungshypothesen wird die Zielsetzung dieser Arbeit verdeutlicht.

Darauf aufbauend wird in Kapitel IV eine realisierte Versuchsanlage vorgestellt, die sich durch zentrale Innovationen im Vergleich zu kommerziellen Anlagen auszeichnet. Die neuen Ansätze und ihre Vorteile im Produktionsprozess werden erörtert.

Die Beschreibung und Durchführung der Versuche werden in Kapitel V behandelt. Zudem wird die Systematik der verwendeten Prüfkörper sowie der experimentellen Methoden aufgezeigt. Der Aufbau des Kapitels entspricht dabei den durchgeführten Versuchsreihen, die teilweise aufeinander aufgebaut sind.

Gemäß der Struktur der Versuchsbeschreibung werden in Kapitel VI die Ergebnisse präsentiert, diskutiert und validiert. Ergänzend ist ein Unterkapitel enthalten, das eine Diskussion der Resultate sowie deren Einordnung beinhaltet.

Abschließend werden in Kapitel VII die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Es werden notwendige Handlungsfelder für zukünftige Entwicklungen in Aussicht gestellt, um die Herausforderungen der Additiven Fertigung weiter zu adressieren und das Potenzial des PBF-LB/P weiter zu erschließen.

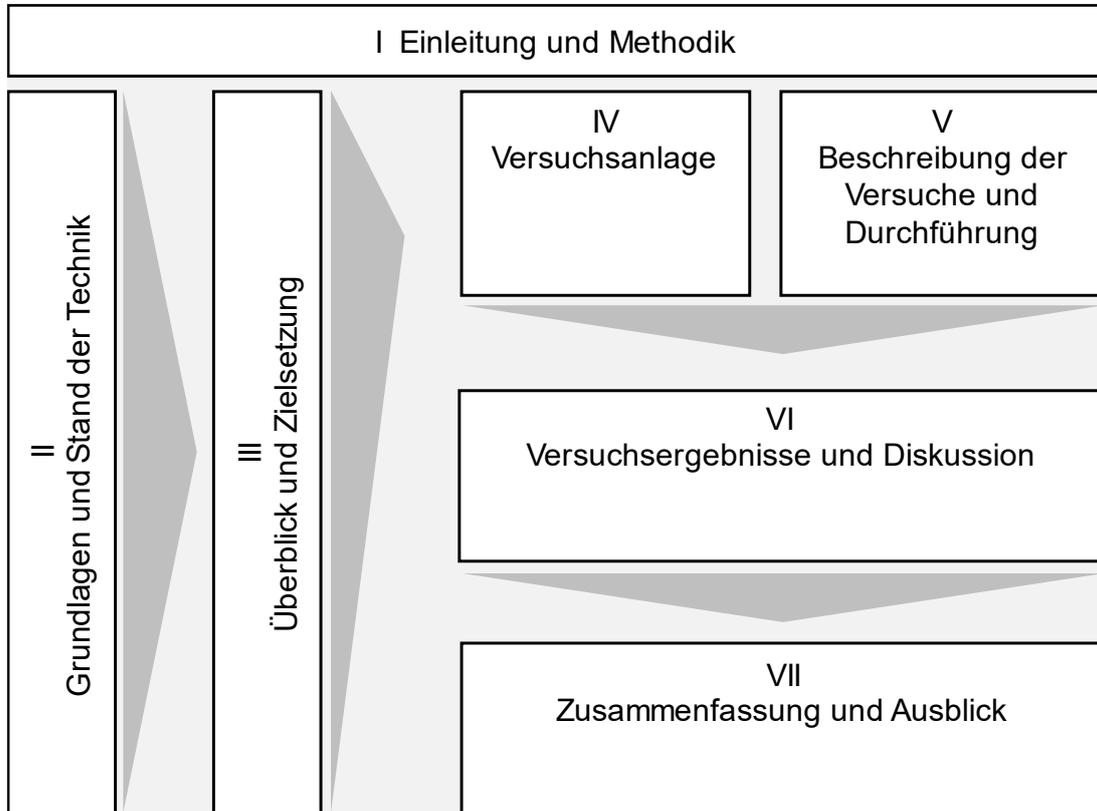


Abbildung 1-1: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Durch die systematische Untersuchung und Optimierung des PBF-Prozesses trägt diese Arbeit dazu bei, die bestehenden Barrieren in der Additiven Fertigung zu überwinden und die Technologie für eine breitere industrielle Anwendung vorzubereiten. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für die Herstellung leistungsfähiger Bauteile mit isotropen mechanischen Eigenschaften, die den steigenden Anforderungen der modernen Industrie gerecht werden.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Anders, als der aktuell aufkommende Technologietrend vermuten lässt, handelt es sich bei der Additiven Fertigung nicht um eine neuartige Technologie. Ein Verfahren zur detaillierten dreidimensionalen Kartenerstellung wurde bereits 1892 patentiert; dieses erinnert charakteristisch an die moderne Additive Fertigung [11]. Hierbei werden Wachsplatten entsprechend den Höhenlinien einer Karte ausgeschnitten und so zusammengefügt, dass eine maßstabsgetreue und detaillierte dreidimensionale Abbildung einer Landschaft entsteht. Die moderne Additive Fertigung unterscheidet sich von den benannten Verfahren dadurch, dass die notwendigen Teilschritte automatisiert aus einem CAD-Modell abgeleitet werden. Die Grundlagen für die gegenwärtige Additive Fertigung wurden durch die Etablierung von drei voneinander unabhängigen Erfindungen begünstigt: durch die photoreaktiven Polymere [12], den Laser [13] und den Computer [14]. Diese drei Erfindungen erlaubten es Charles Hull, 1984 ein Verfahren zum Patent anzumelden, das den ersten vollautomatisierten additiven Fertigungsprozess realisierte und folglich die Geburtsstunde der Stereolithographie beschrieb [15]. Weitere Verfahren, die auf der automatisierten schichtweisen Generierung eines Bauteils basieren, wurden in den darauffolgenden Jahren entwickelt und kommerzialisiert, darunter das 1986 von Deckard zum Patent angemeldete Laser-Sintern (LS oder PBF-LB/P) [16], das Laserstrahlschmelzen (LSM oder PBF-LB/M) [17] und das Fused Layer Modeling (FLM oder MEX) [18]. Während das MEX-Verfahren hauptsächlich Anwendung im Prototyping und im privaten Umfeld findet, wird dem PBF-LB/M und dem PBF-LB/P ein hohes Potenzial zur Massenproduktion mit der Losgröße 1 zugeschrieben [19–21].

2.1 Kategorisierung der Additiven Fertigung

Im Gegensatz zu subtraktiven Verfahren wie Drehen oder Fräsen haben die additiven Fertigungsverfahren das Erzeugen eines Bauteils durch das Aneinanderfügen von Materialvolumina gemein. Die Entwicklung der Additiven Fertigung hat seit ihrer Kommerzialisierung stark zugenommen. So gibt es heute sieben Prozesskategorien mit verschiedenen Verfahren, die additiv Bauteile fertigen und eine Vielzahl an Materialien verarbeiten können [22].

Aufgrund der stetig zunehmenden Relevanz der additiven Fertigungsverfahren bei der Prototypen- und Serienteileproduktion sind bereits viele Versuche unternommen worden, die additiven Fertigungsverfahren inklusive der gesamten Prozesskette zu klassifizieren. Die Nomenklaturen sind innerhalb der Literatur nicht einheitlich und es erscheinen viele verschiedene Bezeichnungen für dasselbe Verfahren. Dies liegt unter anderem an der unterschiedlichen Herangehensweise der Einteilungen [23]. Innerhalb der DIN 8580 werden konventionelle Fertigungsverfahren betrachtet und in sechs Hauptgruppen untergliedert [24]. Diese – Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Ändern der Stoffeigenschaften – orientieren sich am Verfahrensprinzip, mit dem ein Stoff in seinen Eigenschaften verändert wird. Nachteilig an dieser Vorgehensweise ist, dass die additiven Fertigungsverfahren stets als Verfahrenskombination zu betrachten sind. Das PBF-LB/P lässt sich beispielsweise gemäß der DIN 8580 in die Gruppe des Urformens, des Fügens, des Beschichtens und des Ändern der Stoffeigenschaften eingliedern.

Anders als die DIN 8580 definiert die VDI-Richtlinie 3405 mit den additiven Fertigungsverfahren eine eigene Verfahrensgruppe [25]. Zielsetzung sind die detaillierte Einteilung der Verfahren sowie die Einführung einer einheitlichen Nomenklatur, da sich im Verlauf der Entwicklung der additiven Fertigungsverfahren verschiedene Begrifflichkeiten,

unter anderem Schutznamen, etabliert haben. Dies führt zu einer erschwerten Kommunikation, die durch die einheitliche Nomenklatur der VDI 3405 verbessert werden soll. Kategorisiert werden die additiven Fertigungsverfahren hierbei nach dem Materialzustand. Die erste Einteilung erfolgt über den Aggregatzustand, eine spätere in einer weiteren Differenzierungsstufe über das Ausgangsmaterial, das für das Verfahren verwendet wird. Darauf folgt die Einteilung in die unterschiedlichen Verfahrensprinzipien wie Schmelzen, Kleben und Polymerisieren, bis schlussendlich die einzelnen additiven Verfahren über die verwendeten Werkzeuge vollständig kategorisiert und benannt werden. Das PBF-LB/P ist demnach ein additives Fertigungsverfahren, das einen pulverförmigen Feststoff mittels Laserstrahl aufschmilzt und die erzeugten Einzelschichten miteinander verbindet.

Die VDI 3405 kann bei der einheitlichen Nomenklatur behilflich sein, ist jedoch nicht international anerkannt und verabschiedet. Im Hinblick auf die internationale Klassifizierung ist dem 2015 erschienenen und 2018 ergänzten Entwurf der DIN EN ISO / ASTM 52900 ein weiterer Schritt zur einheitlichen Nomenklatur und Begriffsdefinition innerhalb der Additiven Fertigung gelungen [26]. Die Einteilung der Verfahren erinnert dabei systematisch an die Vorgehensweise der VDI-Richtlinie 3405. Betrachtet werden die Art des Werkstoffs, der Verschmelzungszustand, das Ausgangsmaterial, die Materialverteilung, das AF-Grundprinzip und die Prozesskategorie. Gemäß der mittlerweile veröffentlichten DIN EN ISO 52900 wird empfohlen, das PBF-LB/P als pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen von Polyamid 12 (PBF-LB/P/PA 12) zu kategorisieren [22]. Aufgrund der international anerkannten Nomenklatur werden fortan die Begrifflichkeiten dieser Norm verwendet.

2.2 Die Prozesskette

Die Prozesskette der Additiven Fertigung lässt sich in drei Bereiche unterteilen, die je nach Fertigungsverfahren einen unterschiedlichen Aufwand beinhalten können. Unterschieden werden hierbei der Pre-Prozess, der In-Prozess sowie der Post-Prozess [25]. Alle genannten Teilprozesse haben wesentlichen Einfluss auf das spätere Bauteil. Im Pre-Prozess werden alle für den Bauprozess notwendigen Operationen durchgeführt. Dazu gehören die Orientierung und Positionierung des Bauteils im Bauraum, die Erstellung von Hilfsgeometrien wie Stützen und das sogenannte Slicen, bei dem das Bauteil virtuell in Scheiben geteilt wird. Zur Konvertierung der nativen Konstruktionsdateien wird das Bauteil in ein approximierendes Dateiformat überführt und dann nach definierten Schichtstärken zerlegt [20]. In Abhängigkeit vom verwendeten Verfahren werden anschließend die notwendigen Vektoren in die jeweiligen Querschnitte des Bauteils implementiert, die für den Fertigungsprozess notwendig sind. Die meisten bisherigen additiven Fertigungsverfahren haben gemein, dass ein Bauprozess mit diesen Scheiben vollautomatisiert mit gewählten Parametereinstellungen durchgeführt werden kann. Ein signifikanter Unterschied liegt in den zu verarbeitenden Materialien und der verfahrensspezifischen Erzeugung und Verbindung der Einzelschichten zueinander zu einem vollständigen Bauteil.

2.3 Das STL-Datenformat

Um ein Bauteil in die einzelnen Schichten zu zerlegen und somit den additiven Aufbau zu ermöglichen, ist ein bestimmtes Datenformat erforderlich. Ein über ein CAD-Programm erstelltes virtuelles 3D-Modell wird hierzu in das ‚Surface Tessellation Language‘(STL)-Datenformat konvertiert [27, 28]. Dieses ermöglicht es, dass das Modell skaliert und virtuell in

z-Richtung in abstandsdefinierte Querschnitte unterteilt wird. Das STL-Dateiformat ist nicht standardisiert, kann jedoch von jeder additiv arbeitenden Anlage verarbeitet werden. Daneben wurden viele weitere Formate entwickelt, die jedoch keinen Standard in der Industrie setzen konnten [29]. Beispiele sind das AMF- und das 3MF-Format [30–32]. Bei allen genannten Formaten wird die vorgegebene Hülle des CAD-Modells mit Hilfe von Dreiecken approximiert. Jede Ecke der Dreiecke besitzt eine x-, eine y- und eine z-Komponente, mit denen das Dreieck definiert wird, und einen Normalenvektor, der die Außenseite des Bauteils kennzeichnet [33]. Diese Art der Volumenerzeugung ist jedoch lediglich eine Annäherung an die reale Bauteilgestalt. Die Auflösung dieser Darstellung wird bei komplexen Bauteilgeometrien durch die Anzahl der Dreiecke bestimmt. Beispielsweise wird für gekrümmte Flächen eine signifikant höhere Anzahl an Dreiecken benötigt, als es für ebene Flächen eines Quaders der Fall ist. Abbildung 2-1 verdeutlicht, dass die Anzahl der notwendigen Dreiecke von der Krümmung einer Fläche abhängig ist. Als Beispiel dient hierbei eine Parabel, die durch eine kontinuierlich zunehmende Krümmung bis zum Scheitelpunkt gekennzeichnet ist. [34, 35]

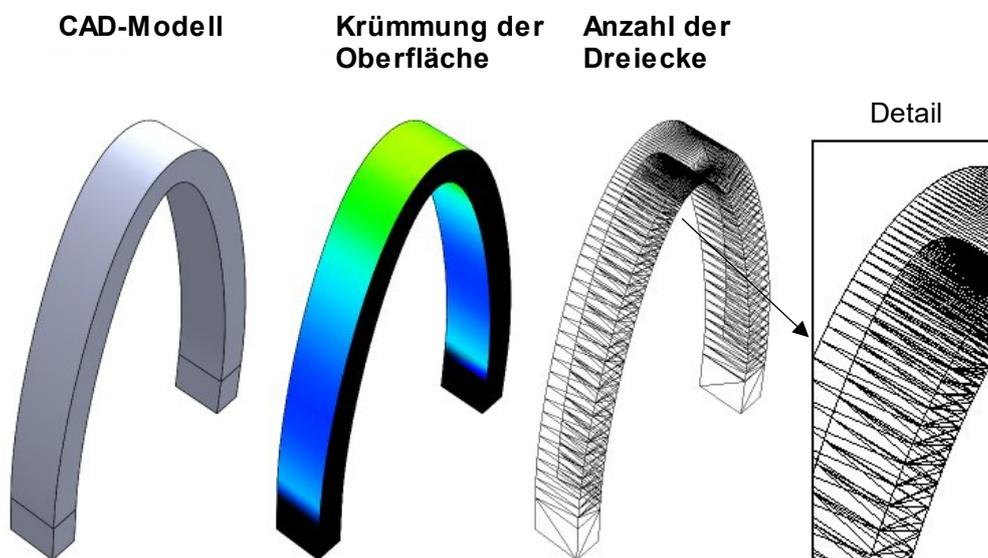


Abbildung 2-1: Verdeutlichung der Konvertierung in das STL-Format in Abhängigkeit von der Krümmung am Beispiel einer modellierten Parabel

Während plane Flächen durch zwei Dreiecke exakt approximiert werden können, ist die Anzahl der Dreiecke bei gekrümmten Flächen abhängig vom Detaillierungsgrad und unterliegt stetig einem Fehler in der Darstellung [36]. Es kann erkannt werden, dass ebene, rechteckige Flächen durch zwei Dreiecke exakt abgebildet werden können, während größere Krümmungen einer Oberfläche die Anzahl der notwendigen Dreiecke erhöhen. Je stärker die Fläche gekrümmt ist, umso mehr Dreiecke müssen für die gleiche Qualität der Approximation verwendet werden. Benachbarte Dreiecke nutzen im STL-Format keine Verknüpfung des gemeinsamen Punktes, sondern erzeugen eine redundante Datenmenge. Die Anzahl der benötigten Dreiecke beeinflusst die Dateigröße. Früher, als die Rechenleistung noch stark begrenzt war, stellte dies eine Herausforderung dar. Heute ist die Dateigröße normalerweise kein Hindernis mehr, sodass der Detaillierungsgrad im Vordergrund steht. Wünschenswert ist, dass der Detaillierungsgrad der Approximation den der Anlage übersteigt, damit im späteren Bauteil keine Dreieckflächen in der Oberfläche erkennbar sind. Ist ein ausreichend detailliertes

STL-Format vorhanden, kann mit der Zerlegung des Modells in abstandsdefinierte Scheiben begonnen werden. Dieser Vorgang wird als Slicen bezeichnet. Mit den Scheiben kann die Anlage einen Bauprozess einrichten und aus den virtuellen Einzelschichten des Modells ein physikalisches Bauteil fertigen [37, 38].

Ein Nachteil der Methodik, Bauteile schichtweise zu erzeugen, besteht darin, dass die Darstellung von gerundeten Flächen durch den sogenannten Treppenstufeneffekt begrenzt wird. Dieser hängt von der Krümmung und der Positionierung des Bauteils im Bauraum ab, kann diesen jedoch in Abhängigkeit von der zu fertigenden Geometrie nicht verhindern [39]. Eine günstige Positionierung im Bauraum ist erreicht, wenn die Krümmung einer Fläche orthogonal zur z-Achse maximal ist. Abbildung 2-2 verdeutlicht die Auswirkungen des Treppenstufeneffekts in Abhängigkeit von der Oberflächenorientierung zur Baurichtung. Im unteren Teil des Bauteils überwiegt die verfahrensimmanente raue Oberfläche, die durch Pulveranhaftung bestimmt wird. Dieser Effekt wird zunehmend vom konstant größer werdenden Treppenstufeneffekt überlagert.

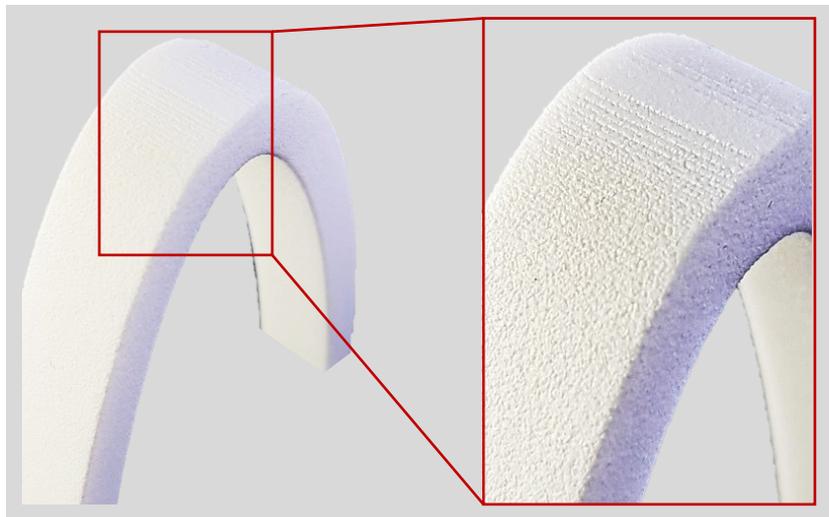


Abbildung 2-2: Veranschaulichung des Treppenstufeneffekts in Abhängigkeit von der Krümmung und der Position

Das STL-Format bietet keine Möglichkeit, Informationen über die beabsichtigten Funktionen eines Bauteils zu übermitteln. Diese verfahrensbedingten Gegebenheiten erfordern vom Anwender der Technologie besondere Aufmerksamkeit, um optimierte Produktionsergebnisse zu erzielen [40]. Mechanische Eigenschaften, erreichbare Toleranzen, Funktionsflächen und Maßhaltigkeit können durch die Positionierung im Baufeld beeinflusst werden [41].

Unter Berücksichtigung der dreidimensionalen Anordnung der Bauteile, der gewünschten Bauteileigenschaften und der möglichst hohen Bauteildichte im Bauvolumen ist die Erfahrung des Anlagenbedieners ein wesentlicher Faktor für die erfolgreiche Einrichtung eines Bauprozesses. Die Kombination aus den vorhandenen Freiheitsgraden der Positionierung, der Bauteiloptimierung und der Kosteneffizienz ermöglicht noch keine vollständig automatisierte und zufriedenstellende Prozessvorbereitung.

2.4 Anwendungsbereiche

Im Zusammenhang mit der Additiven Fertigung stehen häufig die Begriffe Rapid Prototyping (RP), Rapid Tooling (RT) und Rapid Manufacturing (RM) als kategorische Anwendungsbereiche [37, 42].

Das Rapid Prototyping ist die Nutzung der additiven Fertigungsverfahren, um Prototypen schnell und effizient herzustellen. Ein Prototyp ist die erste physikalische Umsetzung eines Produktentwurfes oder einer Komponente und kann weitestgehend in Konzeptmodell, Geometrieprototyp, Funktionsprototyp und technischer Prototyp differenziert werden [43]. Das tatsächliche Endprodukt muss weder aus dem gleichen Material oder gleichermaßen gefertigt worden sein noch die gleichen Eigenschaften wie die Prototypen aufweisen.

Beim Rapid Tooling werden Vorrichtungen, Werkzeuge, Sandkerne und Gussformen für die Serienanwendung erstellt. Insbesondere können dank des Verfahrensprinzips Spritzgusswerkzeuge mit konturnahen Kühlkanälen ausgestattet werden, die die Zykluszeit und den Verzug des Produktes minimieren können. Weiterführend bietet die Verarbeitung von Sandkernen die Möglichkeit zur komplexen Realisierung von Kühlkanälen in Gussbauteilen. Ergänzend können feinere Strukturen als hochaufgelöstes Wachsmo­dell erstellt werden. Diese können mit Keramik beschichtet werden und dienen als verlorene Form, beispielsweise bei der Herstellung von Schmuck.

Im Vergleich zum Rapid Tooling, bei dem die Produkte das Serienteil erzeugen, stellen die Bauteile aus dem Rapid Manufacturing das Serienprodukt dar. Das Rapid Manufacturing ist demnach die Serienfertigung mit additiven Fertigungsverfahren oder allgemein der werkzeuglose Produktbau [37, 44]. Die erzeugten Bauteile werden in der Produktserie verwendet und entsprechen nach dem Durchlauf der Prozesskette allen Eigenschaften, die vom Produkt verlangt werden.

Die Anwendungsfälle werden häufig im produzierenden Unternehmen variiert und zeigen die flexiblen Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie auf [9, 45]

2.5 Marktsituation

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Verfahren sowie die Bestrebungen für eine eindeutige Kategorisierung zeigen die Etablierung der additiven Fertigungsverfahren neben den konventionellen Verfahren auf. Dabei handelt es sich in der Regel nicht um eine rein substituierende, sondern um eine ergänzende Technologie innerhalb der Fertigungstechnik. Das hohe Potenzial entsprechender Fertigungstechnologien wird in diversen Berichten, Studien zur Marktsituation und Geschäftsmodellen dargestellt [46, 47]. So zeigt eine Studie der AUTONOMIK für Industrie 4.0 die breite Anwendbarkeit an zwölf beispielhaften Branchen auf [48]. Dabei wird die nationale Zahl der Unternehmen, die im Bereich der Additiven Fertigung und deren Güter tätig sind, auf 1000 geschätzt, von denen ca. 90 % als Mittelstand deklariert werden. Aus einer weltweiten repräsentativen Umfrage aus dem Jahr 2023 geht hervor, dass der Anteil additiv gefertigter Bauteile im Serieneinsatz signifikant steigt [9]. Die untersuchten Branchen sind unter anderem in der Elektroindustrie, im Medizinbereich und im Automotive-Bereich angesiedelt und zeigen die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten.

Das Wachstum der Branche rund um die Additive Fertigung ist seit der Kommerzialisierung signifikant und zeigt weiteres Potenzial auf [5, 49–52]. Im Zeitraum von 2010 bis 2022 konnten durchschnittliche Wachstumsraten des Marktes für die Additive Fertigung von 24,55 % mit

einer Abweichung von 7,82 % verzeichnet werden [53]. Das gesamte Marktvolumen von 2022 wird dabei mit über 18 Milliarden US-Dollar beziffert und teilt sich in Dienstleistungen und Produkte auf. Die Verbreitung dieser Technologie wird ebenfalls durch die wachsende Anzahl an Systemherstellern und vertriebenen Produktionsanlagen belegt. So existierten 2008 bereits 29 Systemhersteller, die in diesem Jahr über 5000 Anlagen verkauft haben [51, 45]. Der Entwicklung entsprechend wurden 2022 schätzungsweise mehr als 29 000 industrielle Anlagen verkauft. Diese Zahl beinhaltet nicht die für den privaten Gebrauch geeigneten Systeme, deren Anzahl signifikant höher ist [54, 53]. Aktuelle Zahlen aus 2022 weisen auf 286 Anlagenhersteller hin, die Anlagen für den industriellen Gebrauch fertigen und verkaufen.

Entscheidend für die anhaltend positive Entwicklung auf dem Markt und den zunehmenden Einfluss der Additiven Fertigung sind verschiedene Faktoren, die sich anhand eines ‚magischen Dreiecks‘ beschreiben lassen. Die Zielgrößen, die sich gegenseitig divergent beeinflussen und so die Bezeichnung ‚magisch‘ etabliert haben, sind Qualität, Zeit und Kosten [55]. Die Divergenz liegt durch die teilweise Ausschließlichkeit der Zielgrößen vor, sodass bei der Umsetzung einer Lösung zumindest auf eine Zielgröße verzichtet werden muss [56]. Unternehmen sind in der Regel stets bemüht, diese unvereinbaren Zielgrößen bezogen auf ihre Anwendungen bestmöglich miteinander abzustimmen und sich so am Markt zu positionieren. Beispielhafte Maßnahmen zur Optimierung der Faktoren in Bezug auf die Additive Fertigung sind in Abbildung 2-3 dargestellt. Eine erhöhte Qualität der Bauteile kann etwa durch eine In-Line-Prozesskontrolle erreicht werden. Durch die kontinuierliche Überwachung jeder Einzelschicht im additiven Prozess können die an die Bauteile gestellten Anforderungen erfüllt und Ausschussbauteile vermieden werden [57–59]. Weiterführend ist die Verwendung mehrerer Laserspots eine Möglichkeit, die Prozessgeschwindigkeit zu erhöhen [60, 61]. Eine Kostenreduktion könnte dagegen durch die zunehmende Automatisierung der Arbeitsabläufe im Post-Pressing realisiert werden [62].

Weiterentwicklung der Anlagensysteme und die Auswirkungen auf das Magische Dreieck

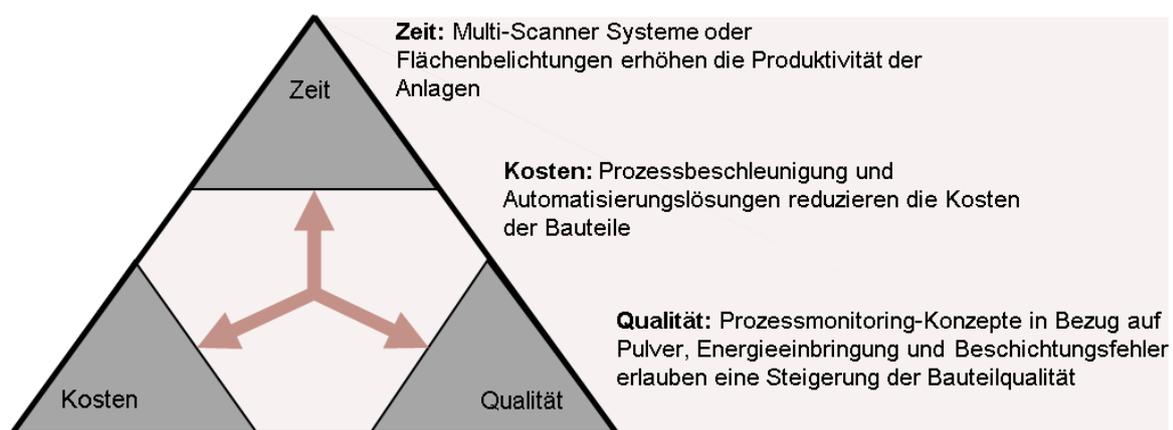


Abbildung 2-3: Die Optimierung des magischen Dreiecks durch neue Anlagengenerationen in der Additiven Fertigung in Anlehnung an [55]

Die aufgezeigten Ansätze zur Optimierung des magischen Dreiecks sind lediglich eine Auswahl der Möglichkeiten, die der Additiven Fertigung dazu verhelfen können, sich in der Serienfertigung zu etablieren. Aktuell wird zwei Verfahren, die dem pulverbettbasierten Verfahren angehören und mittels Laserstrahl die Bauteilquerschnitte sukzessive erzeugen,

dabei großes Potenzial zugesprochen: dem PBF-LB von Metallen und jenem von Kunststoffen [21, 49]. Trotz der noch signifikanten Verbesserungspotenziale dieser Verfahren haben verschiedene Unternehmen den Mehrwert dieser Technologien bereits erkannt und setzen die genannten Verfahren erfolgreich in der Produktion ein [63, 64]. Während das Laserstrahlschmelzen (LPBF-LB/M) Metalle verarbeitet und auf Stützgeometrien angewiesen ist, verarbeitet das PBF-LB/P thermoplastische Kunststoffe und kann den zur Verfügung stehenden Bauraum optimierter nutzen, da keinerlei Stützgeometrien für die Bauteile benötigt werden. Trotz dieses Vorteils wird von den Anwendern der Technologie noch signifikanter Handlungsbedarf beispielsweise innerhalb der Produktivität (Zeit), der Reproduzierbarkeit der Bauteile (Qualität) und der Materialentwicklung (Kosten) gesehen [65].

Der Überblick über die aktuelle Marktsituation zeigt sowohl, dass die Mehrwerte der Additiven Fertigung erkannt und genutzt werden, als auch, dass eine ausreichende technologische Reife vorhanden ist, um Serienanwendungen mit dieser Fertigungstechnologie zu etablieren. Der gleichzeitige Anstieg der Anlagenhersteller weist zugleich darauf hin, dass noch wesentliche Verbesserungspotenziale in der technischen Weiterentwicklung der Hard- und Software vorhanden sind.

2.6 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Stand der Wissenschaft und Technik wird nachfolgend in Bezug auf das PBF-LB/P betrachtet. Zunächst wird auf den Fertigungsprozess und die darin enthaltenen Prozessschritte eingegangen. Weiterführend wird die Anlagentechnik betrachtet. Eine Übersicht der Entwicklung innerhalb der Laser-Sinter-Anlagen ermöglicht dabei die zeitliche Einordnung der Entwicklung verschiedener vorgestellter Anlagensysteme. Über die Betrachtung der optischen Systeme einer Anlage erfolgt die Darstellung der Energieeinbringung und deren Relevanz bezüglich der resultierenden Bauteileigenschaften.

2.6.1 Powder Bed Fusion – Laser Beam/Polymer

Das PBF-LB/P erzeugt im Einklang mit anderen additiven Fertigungsverfahren einzelne Querschnitte und fügt diese in einem Fertigungsschritt zusammen, um ein physikalisches Bauteil sukzessive zu generieren. Am weitesten verbreitet ist der Einsatz eines CO₂-Lasers zum lokalen Aufschmelzen des pulverförmigen Materials. Der fokussierte Laserstrahl kann keine flächendeckende Sinterung erzeugen, weshalb das Aufschmelzen eines Bauteilquerschnittes durch die Bewegung des Laserfokus entlang der Bauteilkontur erzeugt wird. Dies wird mit Hilfe eines Scannersystems realisiert, das den Laserstrahl in x- und y-Richtung ablenken kann. Der Aufbau einer PBF-LB/P-Anlage wird in Abbildung 2-4 dargestellt.

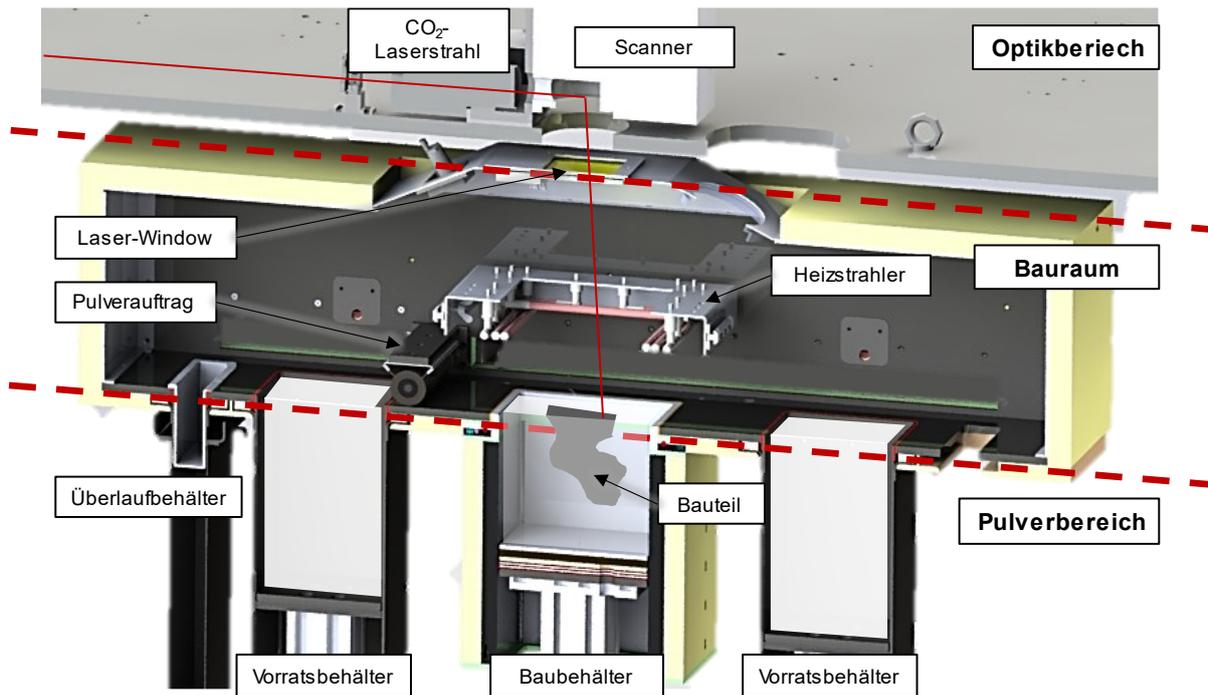


Abbildung 2-4: Verfahrensprinzip des Laser-Sinterns

Der Bauprozess lässt sich in die vier nachfolgenden Schritte einteilen, die sich Schicht um Schicht fortwährend wiederholen, bis der letzte Querschnitt des Bauteils erzeugt wurde [20, 21, 25]:

1. Auftragen

Es wird mit einer Walze oder einer Rakel neues Pulver aus dem zuvor bereitgestellten Vorrat auf die Bauplattform aufgetragen. Somit entsteht eine neue Pulverschicht auf der zuvor gesinterten Fläche.

2. Vorheizen

Die neu aufgetragene Pulverschicht kann prozessbedingt nicht dieselbe Temperatur wie das Baufeld aufweisen, weshalb sie zunächst vorgeheizt werden muss. Voraussetzung für das Starten des Belichtens ist ein vorgeheiztes Baufeld, das eine Pulverbetttemperatur nur wenige °C unterhalb des Materialschmelzpunktes aufweist.

3. Belichten

Die für den Übergang in die Schmelze benötigte Energiedifferenz zum Vorheizen wird vom Laser eingebracht. Beim Belichten wird der aktuelle Querschnitt des Bauteils in die Pulveroberfläche gesintert. Die Eindringtiefe des Lasers ist dabei höher als die Schichtstärke und erzeugt somit eine Verbindung zur darunterliegenden Schicht.

4. Absenken

Die Bauplattform senkt sich um eine Schichtstärke nach unten. Gleichzeitig wird neues Pulver zum Auftragen der neuen Schicht zur Verfügung gestellt.

Vor und während des Bauprozesses wird der Bauraum mit beheiztem Stickstoff (N_2) geflutet, um den dortigen Sauerstoffanteil (O_2) auf vom Material abhängige 0,1–3,5 Vol.-% zu senken. Denn durch einen zu hohen Sauerstoffanteil kann das verwendete Material oxidieren und somit geringere mechanische sowie optische Eigenschaften am späteren Bauteil erzeugen [66]. Um das Pulver im Bereich der Bauplattform auf die gewünschte Temperatur kurz unterhalb des Schmelzpunktes vorzuheizen, ist direkt über der Bauplattform ein Heizstrahler installiert. Der Laser sintert die Querschnitte des Bauteils durch eine Öffnung im Heizstrahler. Durch die kurze Entfernung zur Bauoberfläche soll eine homogene Beheizung der Pulveroberfläche gewährleistet werden. Zusätzlich wird der Bauraumzylinder von außen beheizt, um ein zu starkes Abkühlen und einen damit verbundenen Verzug im fortgeschrittenen Bauprozess zu verhindern.

Nach Abkühlen des inneren Pulverkuchens auf weniger als 50 °C können die Bauteile entnommen und das verbleibende Pulver kann teilweise in den Recycling-Kreislauf übergeführt werden. Zur Aufbereitung des Pulvers werden die alten Anteile mit neuem Pulver vermischt. Das Mischverhältnis Neu- zu Altpulver beträgt in der Regel mindestens 30 : 70 bis zu 50 : 50 [67, 68]. Beim Mischen und Sieben lädt sich das Pulver aufgrund von Reibung elektrostatisch auf und verändert somit seine rheologischen Eigenschaften. Die elektrostatische Aufladung durch Reibung tritt besonders bei Isolatoren auf und ist somit auch bei Kunststoffpulvern zu beobachten [69]. Deshalb sollte dem Pulver ausreichend Verweilzeit gegeben werden, um sich an der Umgebung entladen zu können und optimale Ergebnisse der Schichtauftragung zu gewährleisten [70].

Eine Besonderheit dieses Verfahrens beruht darauf, dass sich mit dem ersten Eingriff des Lasers ein durch die Vorwärmtemperatur ermöglichtes fortwährendes Zwei-Phasen-Mischgebiet einstellt, in dem sowohl die Schmelze als auch der Feststoff koexistieren können. Aus dieser Gegebenheit haben Alscher und Schmachtenberg die Theorie der quasi-isothermen Prozessführung entwickelt, was das Prozessverständnis sowie die Anforderungen an Laser-Sinter-Materialien erhöht hat [71, 72]. Die gewonnenen Erkenntnisse nutzte Rietzel [73], um weitere Materialien für das PBF-LB/P zu qualifizieren und die Theorie des quasi-

isothermen Prozesses durch den Nachweis schichtübergreifender Sphärolithe zu bestätigen. Die Erkenntnisse von Alscher konnten anhand der Durchführung von isothermen dynamischen differenzkalorimetrischen Analysen (DDK) und des Nachweises der materialabhängigen Neigung von isothermer Rekristallisation erweitert werden.

2.6.2 Entwicklung und Stand der Anlagentechnik

Der Ursprung dieser Technologie liegt in der Idee und den ersten Laborversuchen des Laser-Sinter-Verfahrens im Jahr 1980 an der Universität von Texas in Austin [74]. Seitdem hat sich das Verfahrensprinzip über Dekaden nicht grundlegend geändert. Die Kommerzialisierung wurde durch die Entwicklung der ‚Sinterstation 2000‘ von DTM im Jahr 1992 realisiert [74]. Das Unternehmen Electro Optical Systems (EOS) entwickelte mit der ‚EOSINT P 350‘ ein von DTM unabhängiges Anlagenkonzept, das 1994 veröffentlicht wurde [75]. Mit der Übernahme von DTM durch 3D Systems haben sich im Jahr 2001 zwei Unternehmen auf das PBF-LB/P spezialisiert und nahmen lange Zeit eine dominierende Rolle auf dem Markt ein. Die Anlagensysteme wurden auf Basis der bestehenden Entwürfe kontinuierlich weiterentwickelt und lieferten die Grundlagen für zahlreiche neue Anlagengenerationen. Viele Innovationen des Marktes in Bezug auf Laser-Sinter-Anlagen sowie -Materialien wurden lange Zeit durch Patente geschützt, bevor diese ausliefen oder technisch umgangen wurden, sodass sich neue Akteure am Markt etablieren konnten. Eine erste Variation des Prozesses fand im Jahr 2016 mit dem Multijet Fusion (MJF) statt, wobei das Unternehmen HP erstmalig eine Flächenbelichtung mit Hilfe von Absorber-Tinten umsetzte und so die Produktivität ohne Lasereingriff erhöhen konnte [76]. Kurz darauf wurde ein ähnliches Anlagenkonzept vom deutschen Anlagenhersteller Voxeljet vorgestellt, der seinen Ursprung im Freistrahls-Bindemittelauftrag (engl. binder jetting, BJT) hat, veröffentlicht [77, 78] (vgl. Abbildung 2-5).

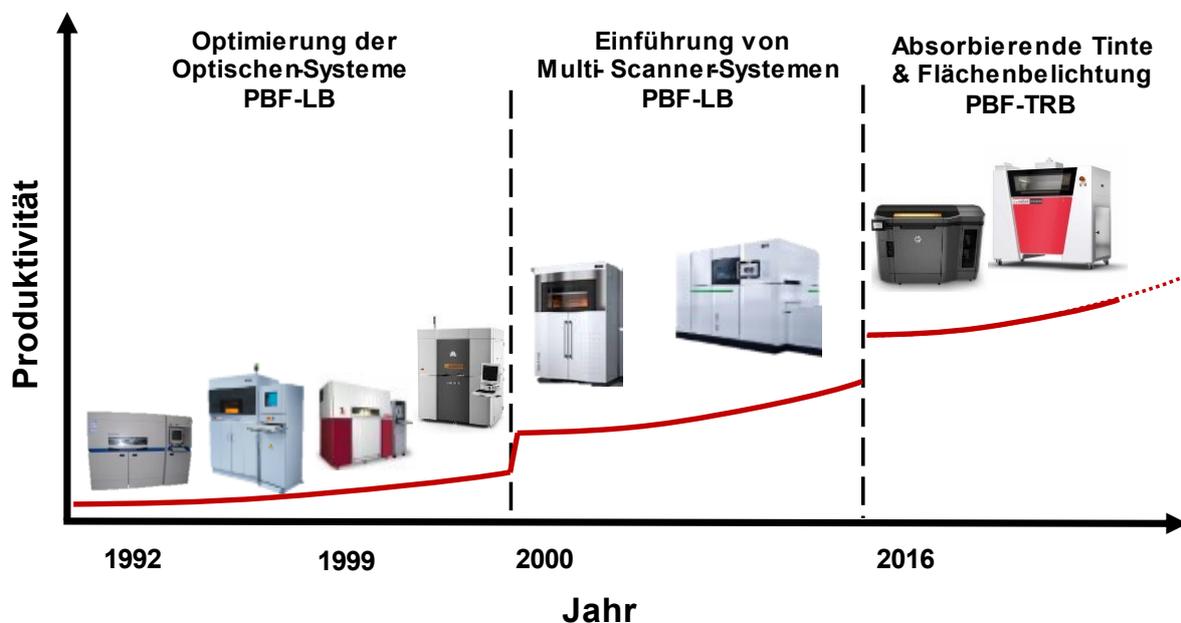


Abbildung 2-5: Entwicklung der Anlagentechnik seit 1992 bis zu aktuellen Produktionsanlagen
Bildquellen [60, 61, 76, 78–81]

Obwohl das PBF-LB/P eines der produktivsten additiven Verfahren darstellt, ist die Produktivität der Anlagensysteme im direkten Vergleich mit konventionellen spanenden oder urformenden Fertigungsverfahren als deutlich geringer anzusehen. Dies liegt an den zumeist langen Aufheiz- und Abkühlphasen und der batchweisen Produktion. Der generelle Aufbau einer Laser-Sinter-Anlage ist herstellerunabhängig und besteht aus einem optischen System, einer Baukammer sowie einem definierten Materialfluss von Ausgangsmaterial und Bauteilen. Auf die einzelnen Komponenten wird nachfolgend eingegangen.

Im optischen System sind die Scannereinheit, die Fokussiereinheit, die Fokus-Shift-Kompensation, die Umlenkspiegel für den Strahlengang und der Laser als Werkzeug verbaut. Bedingt durch die Bauform liegt der Bauraum unterhalb des Optiksystems. Im Bauraum werden die einzelnen Pulverschichten aufgetragen und vorgeheizt und nach dem Lasereingriff wird die Bauplattform wieder um eine Schichtstärke nach unten gefahren (vgl. Kapitel 3.1). Während des Bauprozesses ist der Bauraum mit Inertgas geflutet, sodass keine unerwünschten Oxidationen mit Sauerstoff stattfinden können. Die Laserstrahlung wird durch ein Fenster in den Bauraum gekoppelt, was zugleich einen Schutz der Optikkomponenten vor aufkommendem Staub und Kondensat darstellt. Die Zuführung des Ausgangsmaterials kann über Vorratsbehälter geschehen, die das Material innerhalb der Prozesskammer zur Verfügung stellen, oder kontinuierlich von außen erfolgen. Beide Vorgehensweisen haben anlagenspezifische Vor- und Nachteile bezüglich Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit. Während 3D Systems auf die innenliegende Materialzufuhr setzt, erfolgt bei EOS-Anlagen in der Regel eine kontinuierliche Pulverzufuhr von außen, beispielsweise aus einem zentralen Pulversilo.

Optische Systeme

Zur Erzeugung eines Bauteils ist es notwendig, pro Bauteilschicht selektive Bereiche eines Pulverbettes aufzuschmelzen und einen Verbund mit den darunterliegenden Schichten zu schaffen. Das selektive Aufschmelzen einzelner Bereiche wird durch die punktuelle Einbringung von Energie erzeugt. Die vorwiegend angewendete Energieeinbringung zur Erzeugung der Bauteilquerschnitte wird innerhalb einer Laser-Sinter-Anlage in der Regel durch einen CO₂-Laser realisiert. Grundlegende Komponenten des optischen Systems sind der Laser, Umlenkspiegel und das Scannersystem (vgl. Abbildung 2-6) [82, 83].

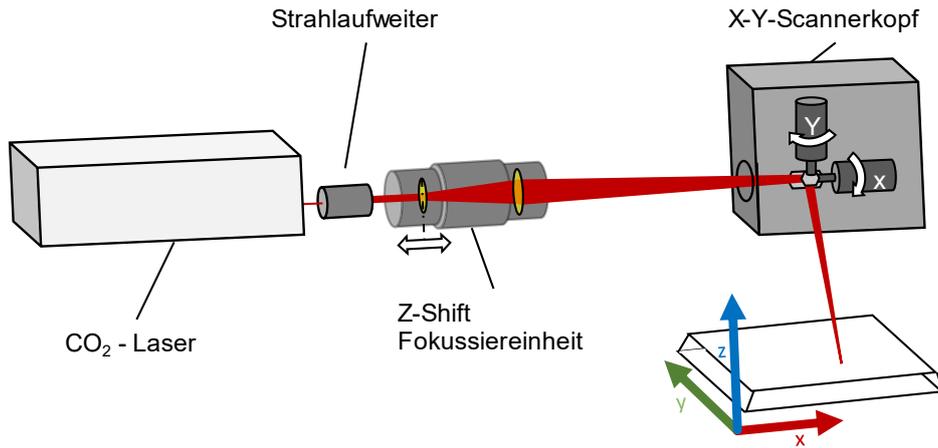


Abbildung 2-6: Schematischer Aufbau eines Optiksystms nach [80]

Der CO₂-Laser wird mit einer Wellenlänge im infraroten Bereich von 10,6 μm betrieben und arbeitet entweder kontinuierlich, im Impulsbetrieb oder gütgeschaltet [84]. Wie bei vielen vorkommenden Molekülgaslasern werden die energetischen Übergänge zwischen den Vibrations-Rotations-Niveaus der angeregten Moleküle genutzt, um ein Laserlicht zu erzeugen [85]. Es werden Gasmischungen von CO₂, N₂ und He innerhalb eines Resonators mittels einer High-Voltage(HV)-Energiequelle stimuliert und auf ein höheres Energieniveau angeregt. Durch das Ändern der Energielevel zurück auf ein tieferes Energieniveau werden Photonen emittiert und es entsteht Laserstrahlung. Dabei können zwei Übergänge des ν_3 -Levels in das tiefere ν_1 - oder $2\nu_2$ -Energielevel stattfinden, die unterschiedliche Wellenlängen von 9,6 μm und 10,6 μm emittieren (vgl. Abbildung 2-7). [86]

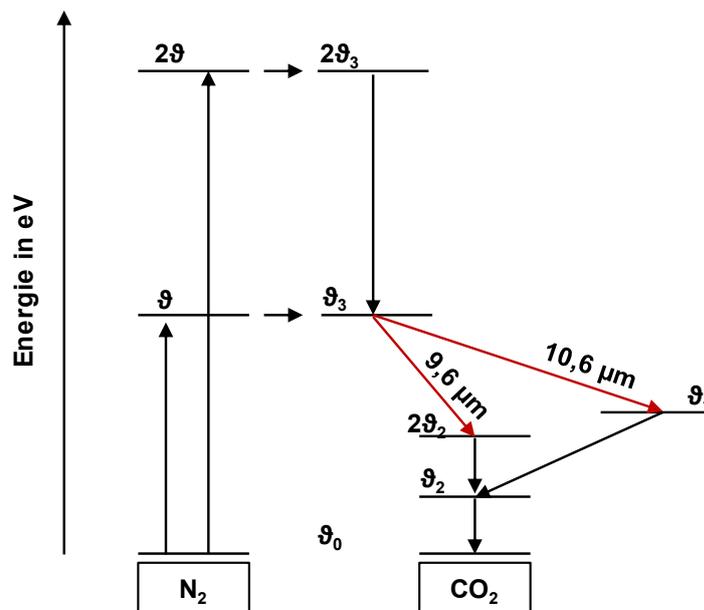


Abbildung 2-7: Anregung der Gasmoleküle beim CO₂-Laser in Anlehnung an [83]

Die Linie der höchstmöglichen Verstärkung befindet sich auf ebenjener 10,6- μm -Wellenlänge, weshalb aus Effektivitätsgründen die emittierte Wellenlänge beim CO₂-Laser häufig mit 10,6 μm angegeben wird [87]. Über ein wellenlängenselektierendes Element wie ein Beugungsgitter kann ein stabiler Laserbetrieb mit einer gewünschten Wellenlänge gewährleistet werden. Die entstehende Strahlung wird im Resonator, der bauartabhängig beispielsweise durch zwei planparallele koaxiale Spiegel realisiert werden kann, durch Mehrfachreflexion verstärkt, bis die Laserstrahlung den Resonator durch einen Bereich des teilweise transmittierenden Resonatorspiegels verlässt. Dabei ist die Bauform, speziell die Länge des Resonators, dafür verantwortlich, welche Wellenlängen weiter verstärkt werden oder sich durch destruktive Interferenz auslöschen [88]. Innerhalb des vom Resonator verstärkten Gauß-Profiles befindet sich eine Bandbreite an Moden, die ebenfalls zur Grundmode (TEM₀₀) im Grundzustand v_0 verstärkt werden [89]. Unter einer Mode kann eine elektromagnetische Eigenschwingung verstanden werden. Zur Reduzierung der Verstärkung höherer Moden werden deshalb bei vielen Gaslasern die Resonatoren zugunsten der höheren Strahlqualität klein gewählt, obwohl damit ein Leistungsverlust einhergeht [84].

Der austretende Rohstrahl eines CO₂-Lasers der TEM₀₀-Mode ist folgerichtig als monochromatisch und kohärent anzusehen. Die Intensitätsverteilung liegt durch die im Resonator erzeugte Verstärkung mit einem gaußförmigen Profil vor, wobei die Strahlqualität im Allgemeinen bei CO₂-Lasern als hoch anzusehen ist. Ein Maß für die Qualität gibt der dimensionslose Wert der Strahlenkennzahl M^2 wieder, der in den Datenblättern von Lasern zu recherchieren und gemäß der DIN EN ISO 11146-1 genormt ist [90]. Laser mit einem M^2 unterhalb von 2 werden als nahezu grundmodig betrachtet. Industriell angewendete CO₂-Laser weisen ein M^2 von 1,1 bis 1,5 auf. Für CO₂-Laser lassen sich jedoch auch Werte bis zu 1,05 M^2 erzielen [87]. Die Strahlqualität macht Aussagen darüber, wie gut ein Strahl im Vergleich zu einem idealen Gauß-Profil fokussierbar ist. Dementsprechend wird somit eine Aussage über die Divergenz des Strahls θ_0 getätigt, die bei den technischen Anforderungen und der Auslegung eines minimalen Fokusedurchmessers w_f berücksichtigt werden muss.

Fokussiert wird der CO₂-Laser mittels einer Linse aus Zinkselenid (ZnSe), einem optischen Kristallwerkstoff, der im vorhandenen Wellenlängenbereich einen charakteristisch hohen Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ von ca. 70 % bei einem Brechungsindex von 2,5 bis 2,3 besitzt (vgl. Abbildung 2-6). Durch die Verwendung periodischer Antireflexionsschichten (AR), die aus Zinksulfid (ZnS) und Thoriumfluorid (ThF₄) bestehen, kann der Transmissionsgrad $\tau(10,6 \mu\text{m})$ auf > 99 % angehoben werden [91, 92]. Der Rohstrahl wird zunächst aufgeweitet, da er in der Regel einen zu geringen Durchmesser besitzt, um den gewünschten Fokusedurchmesser realisieren zu können. Zudem wird so bei höheren Laserleistungen durch eine Verteilung der Flächenenergie eine zu hohe thermische Beanspruchung der optischen Geräte vermieden. Der minimale Fokusedurchmesser w_f eines Gauß-Strahls ist gemäß Formel 2-1 mit der Wellenlänge des Lasers λ , der Brennweite der Fokussieroptik f und dem Rohstrahlradius w_0 des fokussierenden Bauelements ausreichend genau zu bestimmen.

$$w_f \approx \frac{2\lambda f}{\pi w_0} \quad (2-1)$$

Mit der Strahlausbreitung am Ort der Linse $w(z_1)$ folgt Formel 2-2, die den Zusammenhang des wegabhängigen Fokusradius beschreibt:

$$w(z_1) = w_f \times \left[1 + \left(\frac{z_1}{z_R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-2)$$

Dabei entspricht die Rayleighlänge z_R dem Abstand der verdoppelten Querschnittsfläche ausgehend von der Strahltaile:

$$z_R = \frac{n \times \pi \times w_f^2}{\lambda} \quad (2-3)$$

Weiter beschreibt n den Brechungsindex des Mediums und λ die Wellenlänge des Lasers.

Die Zusammenhänge der Formeln 2-1 bis 2-3 werden in Abbildung 2-8 verdeutlicht.

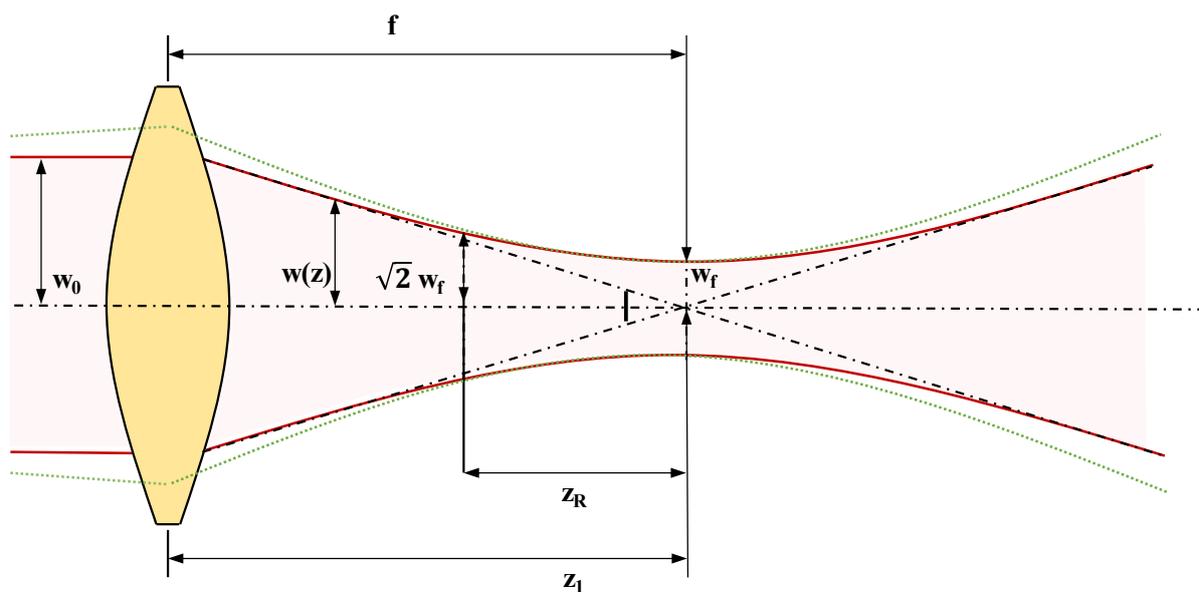


Abbildung 2-8: Fokussierung eines Laserstrahls gemäß [82, 86, 89]

Die dargestellten Formeln sind auf den idealisierten Gauß-Strahl anwendbar. Die gestrichelte grüne Linie soll den Unterschied zwischen einem realen und einem idealen Gauß-Strahl verdeutlichen. Der reale Strahl ist dabei durch einen größeren Divergenzwinkel, also eine geringere Strahlqualität im Vergleich zum idealen Strahl, gekennzeichnet. Es gilt, dass im Eingangsstrahl immer eine Divergenz vorherrscht und so der minimale Fokusradius durch die Strahlqualität begrenzt ist. Der Einfluss der verwendeten Wellenlänge ist dabei ebenfalls zu beachten und besagt, dass eine höhere Wellenlänge auch einen größeren minimalen Fokusradius zur Folge hat. Ferner kann aus Formel 2-1 erkannt werden, dass der Eingangsradius des Strahls vor der Fokussierlinse (w_0) möglichst groß sein sollte,

um den Fokus minimieren zu können. Die Brennweite f ist dabei ebenfalls so gering wie möglich zu wählen, um den technisch minimal möglichen Fokus zu realisieren.

Zur gezielten Umlenkung des Laserstrahls auf die Pulverbettoberfläche werden Scannereinheiten verwendet. Diese bestehen in der Regel aus zwei Galvanometer-Spiegeln, die unabhängig voneinander den Strahl in x- oder y-Richtung umlenken können. Anders als beispielsweise bei einem Nd:YAG-Laser können die Strahlen nicht in eine Glasfaser eingekoppelt werden, weshalb Spiegel zur Strahlführung bei CO₂-Lasern benötigt werden [93]. Ein solcher Spiegel besteht aus einer planaren Substratplatte, die mit einer Goldschicht (Au) bedampft wird [88]. Obwohl Silber (Ag) einen marginal höheren Reflexionsgrad (R) für die verwendete CO₂-Laserwellenlänge besitzt, werden Goldspiegel aufgrund der Stabilität gegenüber oxidativen Umwelteinflüssen bevorzugt eingesetzt. In der Umsetzung bedeutet dies zumeist einen offenen Strahlengang in die Apertur der optischen Geräte und in Bezug auf das PBF-LB/P, bei dem feinstpulvrige Materialien verarbeitet werden, besondere Anforderungen an die Optik-Bank bezüglich des Staubschutzes.

Aus diesem Grund ist die Optik-Bank einer Laser-Sinter-Anlage in der Regel ein hermetischer Bereich, der eines sogenannten Laser-Windows (LW) zum Einkoppeln des Laserstrahls in den Bauraum bedarf. Im Falle der Verwendung eines CO₂-Lasers wird für diese Funktion, wie auch für die Fokussierung mittels Linsen, ZnSe mit einer Antireflexionsbeschichtung verwendet. Zusätzlich zur staubschützenden Funktion, die vorrangig im Pre-Prozess bei der Befüllung der Anlage benötigt wird, schützt das Laser-Window die optischen Komponenten vor Kondensatablagerungen, die sich auf den Spiegeln und Linsen der optischen Einheit bilden könnten und zu langfristigen Leistungsverlusten führen können. Um dies zu vermeiden, werden je nach Anlagentyp verschiedene Ansätze einer Freiblasvorrichtung genutzt, die der Sicherstellung einer konstanten Entkoppelung des Laserstrahls dienen. Um die Energie positionsgetreu und möglichst homogen in das Pulverbett zu lenken, sind weitere optische Komponenten notwendig.

Verantwortlich für die zielführende Umlenkung des Laserstrahls ist ein sogenannter Scannerkopf. Diese dynamische Einheit besteht aus zwei Spiegeln, die den Strahl unabhängig voneinander in x- bzw. y-Richtung des Baufeldes umlenken können (vgl. Abbildung 2-6). Dabei werden in der Steuerkarte verschiedene Einstellungen zur synchronen Ansteuerung des Scansystems vorgenommen [94]. Realisiert wird die Bewegung mit zwei Galvanometer-Scannern, die mit Hilfe von Encodern hohe Dynamiken und Positionsaufösungen erreichen können. Durch eine Überlagerung beider Umlenkungen kann jede Position innerhalb der Bildfeldgröße angefahren werden. Unter der Berücksichtigung, dass eine Auslenkung eines Laserstrahls über ein Bildfeld bei einer konstanten Brennweite eine Veränderung der Fokusslage hervorruft, müssen diese Effekte ausgeglichen werden. Um den Fokus-Shift zu kompensieren, haben sich zwei mögliche Konstellationen durchgesetzt. Unterschieden werden kann hierbei zwischen zwei Hauptgruppen bezüglich der Scannerposition im Strahlengang: Pre Objective Scanning (PrOS) oder Post Objective Scanning (PoOS) [82]. Bei der PrOS-Variante werden die Umlenkungen vor der Fokussierung des Strahls durchgeführt, während beim PoOS die Umlenkung nach der Fokussiereinheit geschieht.

Ein F-Theta-Objektiv würde gemäß dieser Kategorisierung demnach in die PrOS-Gruppe einsortiert, da die Scannereinheit die Strahlen bereits abgelenkt hat, bevor der Strahl fokussiert und dessen Fokusslage als Funktion der Auslenkung auf einem vorgegebenen Arbeitsfeld korrigiert wird. Bei einem F-Theta-Objektiv, auch als Planfeld-Linse bezeichnet, handelt es sich um eine Meniskus- oder plankonvexe Sammellinse, die den Fokusdurchmesser in der

Bearbeitungsebene eines Galvosystems möglichst konstant hält. Durch die Verwendung eines auf das Baufeld abgestimmten Objektivs mit mehreren Linsenpaaren kann die Abbildung optimiert und Abbildungsfehler können minimiert werden.

Ein PoOS-System wird durch die dynamische Fokussierung mit schnell bewegter Teleskopoptik beschrieben. Dabei findet die Fokussierung vor der Scannereinheit statt und wird mittels verschiebbarer Linsenpaare realisiert. Deren Verschiebung zueinander hat direkte Auswirkung auf die Brennweite und kompensiert so aktiv die Verschiebung der Fokusslage zur Baufeldebene bei der Auslenkung der Galvanometer-Spiegel. Damit sind die Anwendungsfälle des PoOS in der Regel zahlreicher. Weiterführend erlaubt die dynamische Fokussierung die Realisierung von 3D-Scan-Anwendungen, die es ermöglichen, den Fokus auf einer nicht planaren Fläche anzupassen, was beispielsweise bei Lasergravuren auf gewölbten Oberflächen erforderlich ist.

Die Hauptaufgabe der optischen Komponenten ist es, den Laserstrahl fokussiert und mit hoher Qualität in die Baukammer zu leiten. Durch die genaue Positionierung und das Zusammenspiel von niedrigen Einschalt- und Ausschaltzeiten können die einzelnen Bauteilquerschnitte, die im Bauprozess sukzessive erstellt und miteinander gefügt werden, mit hoher Detailauflösung und Geschwindigkeit erzeugt werden. Die notwendige Energie wird vom Laser eingebracht, wobei ihre Homogenisierung zu einem großen Teil von der verwendeten Scanstrategie abhängt.

Scanstrategien

Die Scanstrategie ist die Systematik, mit der die einzelnen Scanvektoren einen einzelnen Querschnitt beim Prozessschritt des Belichtens durch Abfahren eines Laserspots erzeugen. Unter der Annahme, dass ein fokussierter Laserspot durch Absorption Energie in die Pulverbettoberfläche einbringt, kann von einem hohen lokalen Temperaturgradienten ausgegangen werden [95, 96]. Ziel einer Scanstrategie kann es sein, die Einflüsse des Temperaturgradienten zu minimieren und eine homogene Temperaturverteilung der Schmelze, die direkten Einfluss auf die Bauteileigenschaften hat, zu fördern. Dieses Ziel wird ebenfalls unter dem Begriff des homogenen Energieeintrages verstanden, obwohl die Gründe für einen inhomogenen Energieeintrag mannigfaltiger sind.

Bei der Betrachtung der Scanstrategie wird zwischen der Belichtung der Querschnittsfläche eines Bauteils und der Belichtung der äußeren Kontur unterschieden. Aktuelle Scanstrategien in kommerziellen Anlagen umfassen innerhalb der Flächenbelichtung ausschließlich gerade Scanvektoren, die auf verschiedene Arten in den Querschnitt eingearbeitet werden können. Um den Energieeintrag möglichst homogen zu gestalten, haben sich alternierend drehende unidirektionale oder mäanderförmige Scanvektoren sowie Schachbrettmuster etabliert [97, 98]. Jedoch werden auch hierbei keine realen Splines und Kreisbahnen realisiert. So werden gerundete Außenkonturen ebenfalls durch ein Aneinanderketten vieler geradliniger Scanvektoren approximiert, was auch durch die Verwendung des STL-Datenformats begründet ist.

Die verwendete Nomenklatur der einstellbaren Parameter, die für die Erzeugung eines Bauteilquerschnittes auszuwählen sind, können Abbildung 2-9 entnommen werden.

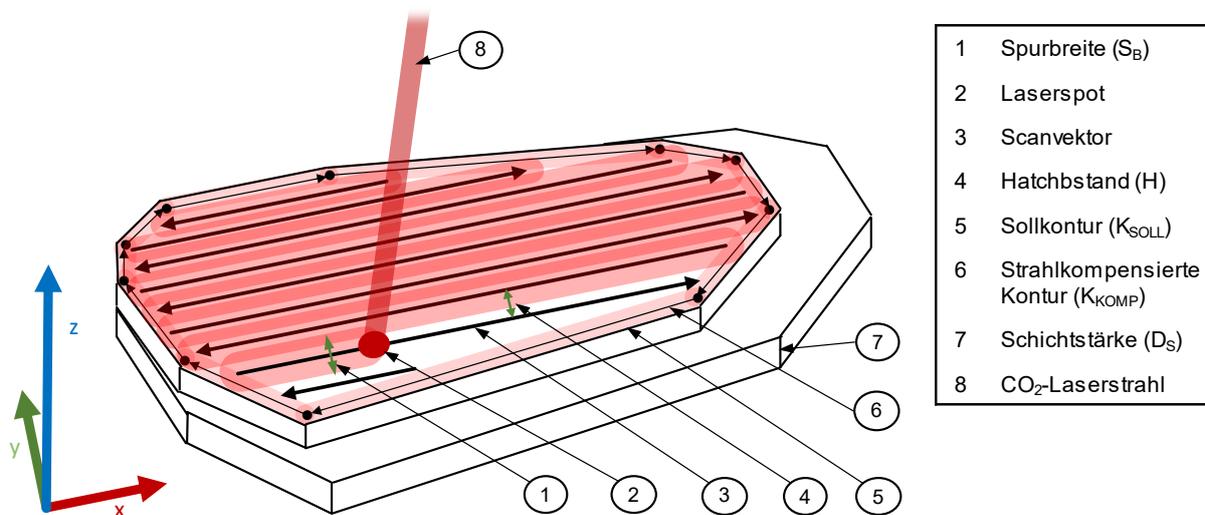


Abbildung 2-9: Nomenklatur und visuelle Zuweisung der Prozessparameter

Zu erkennen sind unterschiedliche Parameter, die sich in die Kontur- sowie die Füllbelichtung einteilen lassen. Die in Abbildung 2-9 gezeigten Pfeile stellen jeweils exemplarisch einen Scanvektor dar, der beim Erzeugen des Querschnittes durch das wiederholte Anfahren des Startpunktes, das Einschalten des Lasers, das Abfahren sowie das Ausschalten des Lasers am Endpunkt gekennzeichnet ist. Das systematische Abfahren dieser Vektoren wird als Scanstrategie bezeichnet. Diese kann nach den Anforderungen an einen homogenen Energieeintrag angepasst werden. Inhomogene Energieeinträge führen im Laser-Sinter-Prozess zu unvorhergesehenen inhomogenen Bauteileigenschaften und sollten demnach vermieden werden. Die Anpassungen können bereits bei der Datenaufbereitung vorgenommen werden oder durch die Optimierung der Anfahrpunkte innerhalb vorgegebener Vektorenkonstellationen erfolgen.

Aufgrund der Mannigfaltigkeit der Begriffe wird nachfolgend die in dieser Arbeit verwendete Nomenklatur mit den genutzten Kürzeln und kurzen Erläuterungen in Tabellenform dargestellt.

Tabelle 2-1: Nomenklatur zur Scanstrategie

Nr.	Nomenklatur	Kürzel	Beschreibung
1	Sollkontur	K_{SOLL}	Kontur des Bauteils aus den Schichtdaten des STL-Formats
2	Strahlkompensierte Kontur	K_{KOMP}	Parameter [mm] zur Strahlverschiebung der Kontur in das Innere des Bauteils
3	Füllung	F	Beschreibt die Scanvektoren im Inneren eines Bauteilquerschnittes
4	Spurbreitenkompensation der Füllung	F_{KOMP}	Parameter [mm] zur Korrektur der Querschnittsbelichtung in das Innere des Bauteils

5	Scanvektor	\vec{S}_V	Im Querschnitt des Bauteils generierter Vektor mit definiertem Start und Endpunkt, der vom Laserspot mittig abgefahren wird
6	Hatchabstand	H	Parameter[mm]-Abstände der Scanvektoren im jeweiligen Bauteilquerschnitt
7	Spurbreite	S_B	Beschreibt die resultierende Breite der Schmelze eines Scanvektors
8	Laserleistung	P_L	Parameter [W] zur nominellen Einstellung der Laserleistung
9	Laserspotdurchmesser	S_D	Durchmesser des Lasers, der auf eine absorbierende Oberfläche trifft
10	Scangeschwindigkeit	v_L	Geschwindigkeit des Laserspots auf der zu bearbeitenden Oberfläche
11	Schichtstärke	D_s	Parameter [mm] zur Festlegung der Achsenbewegung des Baubehälters

Die Belichtung eines Bauteilquerschnittes erfolgt zumeist nach zwei Vorgehensweisen [94]. Die konventionelle Methode beruht darauf, die einzelnen Scanvektoren des Querschnittes direkt anzufahren und im Moment der beginnenden Beschleunigung den Laser einzuschalten. Dabei werden exakte Abstimmungen zwischen den vorherrschenden Delays benötigt, die sich aus der Masseträgheit der Spiegel und den spezifischen Fall-Rise-Times des Lasers ergeben. Bei dieser Variante hat der Laserspot beim Einschalten seine Sollgeschwindigkeit noch nicht erreicht und beschleunigt bzw. bremst innerhalb des zu fertigenden Querschnittes. Die Laserleistung wird an die geringere Geschwindigkeit in der Regel nicht angepasst, sodass in die äußeren Bereiche mehr Energie eingetragen wird als in das Innere eines Querschnittes. Dieser Effekt kann durch Leistungsspitzen, wie sie beim Einschalten eines Lasers vorkommen, verstärkt werden und zu erhöhten scanvektorlängenabhängigen Temperaturgradienten innerhalb eines Bauteils führen.

Um die Homogenität der Energieeinbringung weiterführend zu optimieren, kann das sogenannte Skywriting für den Füllbereich eines Bauteils verwendet werden. Diese Form des Abfahrens einzelner Scanvektoren basiert darauf, dass ein Punkt außerhalb des Bauteilquerschnittes angefahren wird, der als Verlängerung des eigentlichen Scanvektors gesehen werden kann. Auf diesem außen liegenden Bereich wird der Spiegel bis zur Sollgeschwindigkeit beschleunigt und beim Eindringen des Laserspots in den Querschnitt wird der Laser eingeschaltet. Beim Verlassen des Querschnittes wird der Laser folgerichtig ausgeschaltet, bevor die Verzögerung der Spiegel und die darauffolgende neue Positionierung durchgeführt werden (vgl. Abbildung 2-10). Vorteil dieser Methode ist, dass die Geschwindigkeit, mit der der Laserspot einen Querschnitt erzeugt, im Vergleich zur konventionellen Variante konstant ist. Leistungsspitzen des Lasers sind jedoch auch bei diesem Vorgehen noch vorhanden, wobei deren Auswirkungen auf ein Minimum reduziert werden können. [99, 100]

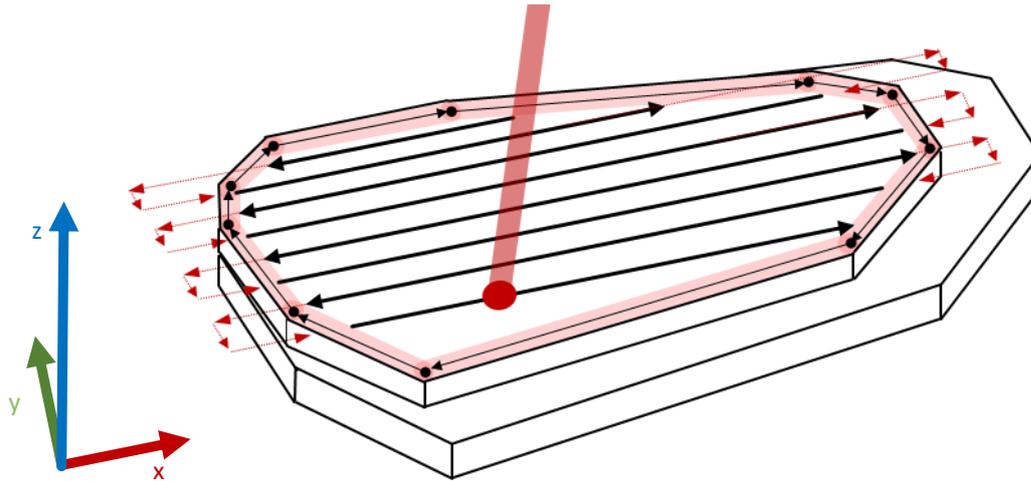


Abbildung 2-10: Veranschaulichung der Skywriting-Scanbewegung

Eine häufig angewendete Strategie zur homogenen Energieeinbringung, die unabhängig von der Nutzung von Skywriting ist, ist der sogenannte Kreuz-Scan. Hierbei werden die Scanvektoren alternierend von Schicht zu Schicht eines entstehenden Bauteils um 90° rotiert (vgl. Abbildung 2-11). Im Vergleich zu unidirektionalen, parallelen Scanstrategien bietet diese Vorgehensweise den Vorteil, dass die mechanischen Eigenschaften der Bauteile eine höhere Isotropie aufweisen, als es bei parallelen Scanstrategien der Fall ist [101].

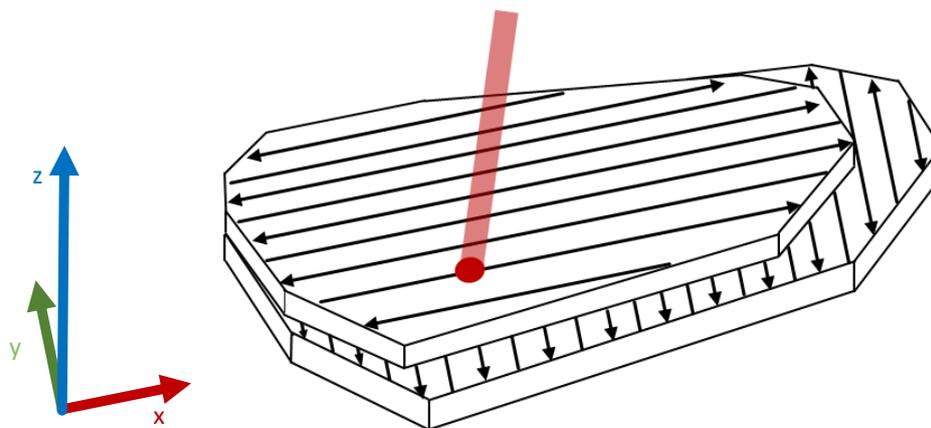


Abbildung 2-11: Veranschaulichung des schichtweise alternierenden Kreuz-Scans

Fortgeschrittene Scanstrategien befassen sich mit der Thematik von Sonderfällen im Querschnitt der Füllbelichtung. Die angesprochene hohe Designfreiheit der Additiven Fertigung verlangt ggf. spezielle Lösungen bei Bauteilen, deren Querschnitte Freiflächen, mehrere Außenkonturen und/oder besonders filigrane Elemente enthalten. Die Verweilzeit der einzelnen Querschnitte, die nacheinander entstehen, die Sprünge innerhalb eines getrennten Querschnittes sowie Ober- und Unterseiten eines Bauteils können gemäß dem Stand der Technik differenziert betrachtet und optimiert werden. Diesbezüglich seien beispielhaft die Funktionen der rotierenden Scanreihenfolge der Querschnitte, die blockweise Aufteilung der

Gesamtfläche, die Edge-Scanstrategie und die Optimierungen der Oberflächen via Up- und Down-Skin-Parameter genannt [100].

Bei der rotierenden Scanreihenfolge (rotate scan order) wechselt die Belichtungsreihenfolge, mit dem Ziel, die Verweilzeit der erzeugten Querschnitte bis zum nächsten Beschichten über die Bauteile gleich zu verteilen. Mit dieser Vorgehensweise wird vermieden, dass Einflüsse der Verweilzeit offenliegender Querschnitte zu unterschiedlichen Bauteileigenschaften innerhalb eines Bauprozesses führen. Bei einer blockweisen Aufteilung des Querschnittes wird von einem Sorted Fill gesprochen. Dieser kommt zum Einsatz, wenn einzelne Scanvektoren beispielsweise durch vorhandene Freiflächen unterbrochen werden. Bei kleinen Unterbrechungen wird die Bewegung des Scanners fortgesetzt und der Laser beim Überfahren der Freifläche ausgeschaltet. Übersteigt die Ausschaltzeit jedoch die Umkehrzeit der Scannerbewegung, wird der Querschnitt in Blöcke innerhalb der Scanvektoren unterteilt, die mit der Freifläche in Verbindung stehen und nacheinander belichtet werden, um die Effizienz der Belichtung zu erhöhen. Der Edge-Parameter kommt bei dünnen Querschnitten zum Einsatz, bei denen lediglich ein Scanvektor, zumeist mit verringerter Energieeinbringung, abgefahren wird. Durch die Verringerung der Laserleistung reduziert sich ebenfalls der Fokusbereich, wodurch die Detailgetreue verbessert werden soll. Weitere Einstellungen wie die Up- und Down-Skin-Parameter zielen darauf ab, die Ober- und Unterseiten eines Bauteils mit angepassten Parametern zu fertigen, sodass die Darstellung des Körpers optimiert wird. Beispielsweise kann es notwendig sein, die ersten Schichten eines großflächigen Bauteils mit geringerer Energiedichte zu fertigen, um ein unkontrolliertes Aufwachsen durch kumulierte Energiezufuhr bei nachfolgenden Schichten zu verringern.

Bauteile, die durch einzelne Scanvektorlinien beschrieben werden, die mit einem definierten Abstand zueinander über die gesamte Querschnittsfläche verteilt werden, können einen zusätzlichen verfahrensspezifischen Fehler aufweisen, der unter dem Begriff Hatchlinienkonformität bekannt ist. Rüsenberg beschreibt diese Fehlerquelle in [102, 103] als eine variierende Anzahl an Scanvektoren im Bauteilquerschnitt für identische Bauteile in Abhängigkeit von der Positionierung im Baufeld. Als Ursache hierfür wird die Auflösung des Hatches betrachtet, die besonders bei filigranen Bauteilen mit wenigen Scanvektoren einen signifikanten Einfluss auf die Anzahl der Scanvektoren und somit auf den Gesamtenergieeintrag des Bauteilquerschnittes nimmt. Der Hatchabstand ist zwar frei einstellbar, orientiert sich jedoch am Koordinatenursprung der Prozesssoftware. So kann es je nach Lage im Bauraum dazu kommen, dass ein Bauteil, das sich am vorgegebenen Rastermaß der Linienabstände orientiert, mehr Scanvektoren beinhaltet als ein anderes. Folglich ist der Energieeintrag zweier Bauteile bei identischer Querschnittsfläche unterschiedlich und führt somit auch zu abweichenden Bauteileigenschaften.

Energieeinbringung

In einer PBF-LB/P-Anlage wird die benötigte Wärmeenergie zu einem Großteil von den Heizstrahlern und Heizelementen eingebracht. Diese haben das Ziel, die Temperatur möglichst genau im Verarbeitungsfenster des Materials zu halten. Dieses Verarbeitungsfenster kann anhand einer dynamischen Differenzkalorimetrie (DDK, engl. DSC) ermittelt werden. Bei einer solchen wird eine Materialprobe parallel zu einer Referenzprobe mit einer festgelegten Heiz- und Abkühlrate erwärmt und der Wärmestrom wird gemessen. Dieser variiert zwischen Material- und Referenzprobe bei exo- oder endothermen Vorgängen bzw. Phasenänderungen. Bei einer Phasenumwandlung muss folgerichtig der notwendige

Wärmestrom der Probe verändert werden, um die Heiz- bzw. Abkühlrate einhalten zu können. Solche Phasenumwandlungen können beispielsweise das Aufschmelzen und die Rekristallisation eines thermoplastischen Materials darstellen (vgl. Abbildung 2-12). Die Messung beginnt unter Raumtemperatur und einer festgelegten Heizrate, beispielsweise 15 K/min. Das Material wird kontinuierlich weiter erwärmt und zeigt einen Peak des Wärmestroms beim Aufschmelzvorgang. Der Beginn des Schmelzpeaks wird Onset der Schmelztemperatur genannt und die integrierte Fläche unter dem Schmelzpeak liefert einen quantifizierten Wert der Schmelzenthalpie H_M (engl. melt). Nach dem vollständigen Aufschmelzen wird die Probe mit einer definierten Kühlrate wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Der erste Peak im Wärmestrom ist dabei die Rekristallisation. Zu beachten ist, dass die Rekristallisation aus der Schmelze bei einer tieferen Temperatur als das Aufschmelzen stattfindet. Durch die jeweiligen Onsets der Schmelze und der Rekristallisation wird in der DDK das theoretisch nutzbare Verarbeitungsfenster des Materials bestimmt.

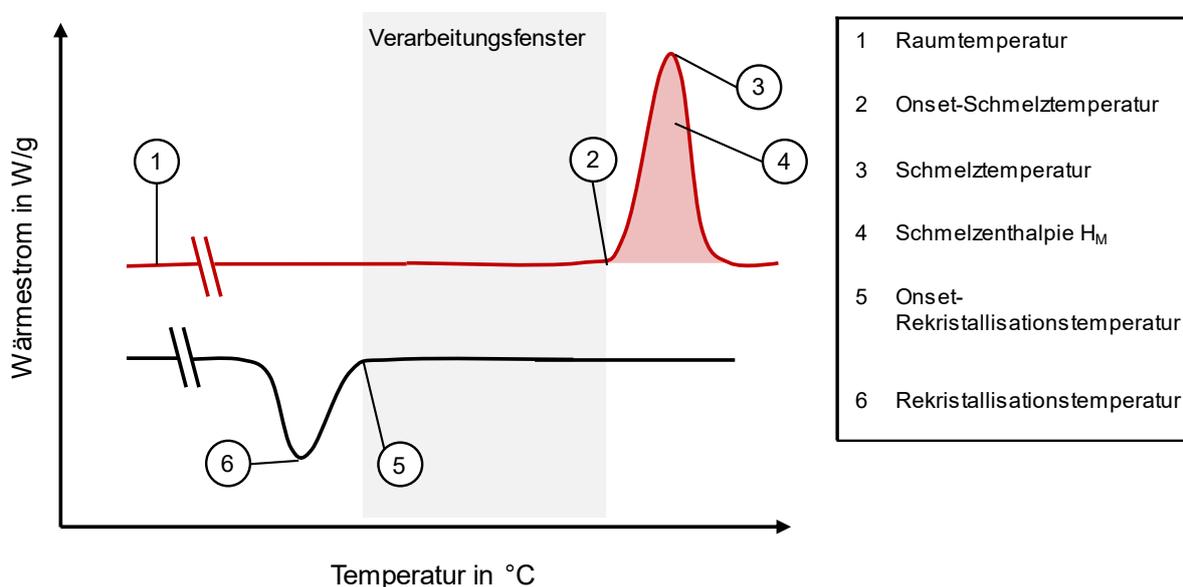


Abbildung 2-12: Schematische Darstellung einer DDK mit Markierung relevanter Temperaturen und Materialkennwerten für den PBF-LB/P-Prozess

Im PBF-LB/P-Prozess wird die Bauraumtemperatur ca. 5 bis 10 °C unterhalb der Onset-Schmelztemperatur gewählt, um ein Zwei-Phasen-Mischgebiet von Feststoff und Schmelze ermöglichen zu können.

Die noch notwendige Energie, um einen Bauteilquerschnitt zu erzeugen, wird von einem Laser zur Verfügung gestellt. Die genannten Parametervariationen und Scanstrategien haben zum Ziel, die Energieeinbringung unter Berücksichtigung der Detailgetreue, der mechanischen Eigenschaften oder eines auf die eigenen Anforderungen abgestimmten Mittelwegs zu optimieren. Die Charakterisierung und differenzierte Betrachtungen der Homogenisierung des Energieeintrages beim PBF-LB/P wurden bereits in zahlreichen Veröffentlichungen publiziert.

Die erste Erwähnung eines CO₂-Lasers als Werkzeug beim Schweißen von Polymeren erfolgte 1972 in [104]. Ziel dieser Untersuchungen war es, ein Polyethylen niedriger Dichte mit einem schnellen, kontaktlosen und reproduzierbaren Verfahren verschweißen zu können. Es

zeigte sich, dass der CO₂-Laser für viele Polymere hinsichtlich der Absorption und Eindringtiefe bei niedrigen Laserleistungen aufgrund der geringen Wärmeeinflusszone geeignet ist. In [105, 106] wurden frühe Studien zur Interaktion von Laserstrahlung mit Festkörpern beim Laserzuschnitt und Laserschweißen betrachtet. Hierbei wurden ebenfalls CO₂-Laser als Energiequelle untersucht, wie sie auch noch heute in PBF-LB/P-Anlagen verwendet werden. Die Rahmenbedingungen eines Laser-Sinter-Prozesses wurden hierbei jedoch nicht eingehalten. Eine an das PBF-LB/P angepasste Betrachtung lieferte Sun 1991 in [107] durch die Untersuchung des Absorptions- und Reflexionsverhaltens von Pulverbettoberflächen unter Berücksichtigung der thermischen Randbedingungen. Das erstellte optische Submodell beinhaltet unter anderem Ansätze zur Berücksichtigung der Wellenlänge des Lasers, des Einfallwinkels sowie der Partikelgrößenverteilung. Die experimentellen Untersuchungen wurden mit einem Nd-YAG- und einem CO₂-Laser durchgeführt, um das Modell zu validieren. Die Ergebnisse zeigten, dass der errechnete Wert des Absorptionskoeffizienten β tendenziell höher ist als der gemessene, jedoch die Abhängigkeit von den Partikelgrößen gut dargestellt werden kann. Eine Schlussfolgerung aus den Untersuchungen ist, dass Partikel > 45 μm mehr Hohlräume in Schüttungen aufweisen, was einer Strahlenfalle gleichzusetzen ist und somit die vollständige Absorption einfallender Strahlen ermöglicht.

Ein verbreiteter Wert, der häufig in der Literatur genutzt wird, ist die Energiedichte. Diese kann differenziert als Flächenenergiedichte E_A , auch bekannt als Andrews-Zahl, oder Volumenenergiedichte E_V betrachtet werden (vgl. Formel 2-4 bzw. 2-5). Während [108] die Flächenenergiedichte einführte, arbeiteten weiterführende Untersuchungen von [101], [73] und [109] mit der Volumenenergiedichte oder erstellten Vergleiche beider Varianten [110].

$$E_A = \frac{P_L}{v_L * H} \quad (2-4)$$

$$E_V = \frac{P_L}{v_L * H * D_s} \quad (2-5)$$

Die Energiedichte wird verwendet, um die signifikanten Parameter der Laserleistung P_L , der Scannergeschwindigkeit v_L , des Scanlinienabstandes vom Hatch H und ggf. der Schichtstärke D_s in einem Wert zu repräsentieren, und zeigt die vom Laser in das Pulverbett eingebrachte spezifische Energiemenge auf. Basierend auf der eingebrachten Energie wurden in vielen Arbeiten die resultierenden Bauteileigenschaften aus dem Laser-Sinter-Prozess korreliert [101, 111]. Auf die Unterschiede beider Varianten der Energiedichte wurde unter anderem explizit in [112] eingegangen. Obwohl die einzelnen Parameter einen linearen Einfluss auf den repräsentativen Wert der Energiedichte besitzen, ist ihr Einfluss auf die resultierenden Bauteile nicht linear und stark an vorherrschende Bedingungen geknüpft, die eine stabile Prozessführung erlauben. Beispielsweise kann die Spurbreite nicht beliebig hoch gewählt werden, um eine zu hohe Laserleistung zu kompensieren, da hierbei geometrische und materialspezifisch-thermische Restriktionen gelten. Aufgrund des hohen Einflusses der

Schichtstärke auf die mechanischen Bauteile wird in vielen Studien die Volumenenergiedichte genutzt.

Als die für den Energieeintrag signifikanten Größen wurden in [108] die Laserleistung und die Spotgeschwindigkeit deklariert. Die Untersuchungen gingen aufgrund der schnellen Verfahrbewegung des Laserspots und der geringen Wärmeleitfähigkeit des Materials von einem eindimensionalen Modell aus. Die Simulationen zeigten, dass die Wechselwirkungszeit der sich vom Strahldurchmesser abhängig überlappenden Scanvektorlinien mit der Scanvektorlänge korreliert und so maßgeblich für die eingebrachte Energie in das Material verantwortlich ist. Der Einfluss der Spotgröße wurde dabei als klein bzw. nicht vorhanden bezeichnet, jedoch ohne einen experimentellen Beweis für diese These zu liefern. Da der Einfluss der Spotgröße jedoch einen direkten Einfluss auf die Wechselwirkungszeit eines einzelnen Pulverpartikels hinsichtlich der Laserstrahlung hat, untersuchten Williams und Deckard in [113] dagegen die Einflüsse der Verarbeitungsparameter inklusive der Variation des Laserspots. Die experimentellen Ergebnisse zeigten eine signifikante Zunahme der Dichtewerte und des E-Moduls unter Anwendung eines vergrößerten Laserspots. Zudem konnte in Simulationen der Temperaturgradient innerhalb des Schmelzbades deutlich reduziert werden, was zu einer homogenisierten Schmelze und geringeren Zersetzungerscheinungen und folglich höheren Bauteildichten führt. Eine Anpassung der Scanstrategien zur Herstellung realer Bauteilquerschnitte mit der Variation von großen und kleinen Querschnittsflächen wurde hierbei jedoch nicht weiter betrachtet.

Die Thematik der Energieeinbringung mittels Laserstrahlung innerhalb des Laser-Sinter-Prozesses wurde detailliert von Keller in [95] behandelt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Prozessgrößen der Laserleistung, der Spotgeschwindigkeit, des Hatches und der Vorheiztemperatur signifikante Parameter für die Verarbeitung darstellen. Berücksichtigt wurden unter anderem auch die resultierenden Einflussgrößen wie Intensität, Energiedichte, Überlappungsvariable, Scanlänge und Wechselwirkungszeiten einzelner Scanvektoren. Unter Betrachtung der eindimensionalen Wärmeleitung und der eingebrachten Energie wurden Arbeitsbereiche für verschiedene Materialien erstellt, in denen eine sichere Verarbeitung möglich ist. Diese Arbeitsbereiche berücksichtigen die Temperaturverteilung im Querschnitt und wurden modellhaft in Form einer geforderten Mindestabkühlzeit zwischen den Scanvektoren formuliert. Zwar ging Keller auf die Strahlkaustik ein und beschrieb einen aufgeweiteten Strahldurchmesser durch Verschiebung der Fokusebene, aber die Auswirkungen auf den Prozess und die resultierenden Bauteileigenschaften wurden dabei nicht weiter untersucht.

In [114] untersuchte Nöken die Eindringtiefe der Laserstrahlung anhand von Einzelschichten unter verschiedenen Parametervariationen beim Werkstoff Polystyrol (PS). Dabei wurde der Zusammenhang zwischen der Energieeinbringung und der resultierenden Schichtstärke analysiert. Ein wesentliches Ergebnis war, dass die eingebrachte Energiemenge einen signifikanten Einfluss auf die Schichtstärke hat. Die Untersuchungen wurden mit einem konstanten Laserspotdurchmesser durchgeführt, weshalb die Variablen durch die Laserleistung, den Hatchabstand und die Scannergeschwindigkeit vollständig definiert wurden.

Anlagenmodifikationen

Der grundlegende Aufbau einer Laser-Sinter-Anlage hat sich seit der Markteinführung über Jahrzehnte weitgehend nicht geändert (vgl. Abbildung 2-4). Neue Anlagengenerationen wurden mit aktueller Hardware und verbesserter Software angeboten, mit dem Ziel, die Qualität der Bauteile, die Reproduzierbarkeit und die Produktivität zu verbessern. Dies ermöglichte es den Anwendern, alte Anlagengenerationen durch Nachrüstungen weiterhin in der Produktion zu nutzen. Durch den Austausch von Pyrometern, Heizstrahlern, Scannersystemen und Beschichtungseinheiten können selbst mit den ersten kommerziell erhältlichen Anlagensystemen qualitativ hochwertige Bauteile erzeugt werden. Die Upgrades können sowohl von OEMs als auch von diversen Systemanbietern bezogen werden.

Verschiedene Anlagenmodifikationen wurden beispielsweise von der Firma LSS Laser Sinter Service GmbH durchgeführt, wodurch eine alte DTM SinterStation 2500 signifikante Reproduzierbarkeits- und Produktivitätssteigerungen erfahren kann. Mit den erhältlichen Upgrade-Kits werden verschiedene Verbesserungspotenziale der bestehenden Anlagensysteme von DTM ab der Modellreihe SinterStation 2500 ausgeschöpft. So kann bereits durch einen Austausch der Pyrometer die Temperaturdrift bei hohen Bauprozessen verringert und damit die Reproduzierbarkeit der Anlage verbessert werden. Hierzu werden die vorhandenen Pyrometer durch die temperaturstabilen Infrarotsensoren optris® CT LT ersetzt. Dieses Upgrade wird als ATC – Advanced Temperature Control bezeichnet [115, 116]. Der Anlagenhersteller 3D Systems ist unter anderem dieser Temperaturdrift mit einer neuen Regelung unter der Bezeichnung HiQ begegnet. Durch die Verwendung eines im Bauraum befindlichen Blackbodys kalibriert sich die Anlage im laufenden Betrieb bei jeder Schichtgenerierung, sodass beschlagene Pyrometeroptiken zu keiner Temperaturdrift im Prozess führen. Diese im Prozess befindliche Kalibrierung der Pyrometer befindet sich noch in heutigen Anlagen von 3D Systems. Weiterführend bietet LSS ein Upgrade unter der Bezeichnung Uniheat für den Heizstrahler einer DTM SinterStation 2500 an [117]. Damit werden die inhärenten Temperaturunterschiede weitestgehend an original verbaute Keramik-Heizer angepasst, sodass die Temperaturverteilung auf der Baufeldoberfläche homogenisiert wird (vgl. Abbildung 2-13).

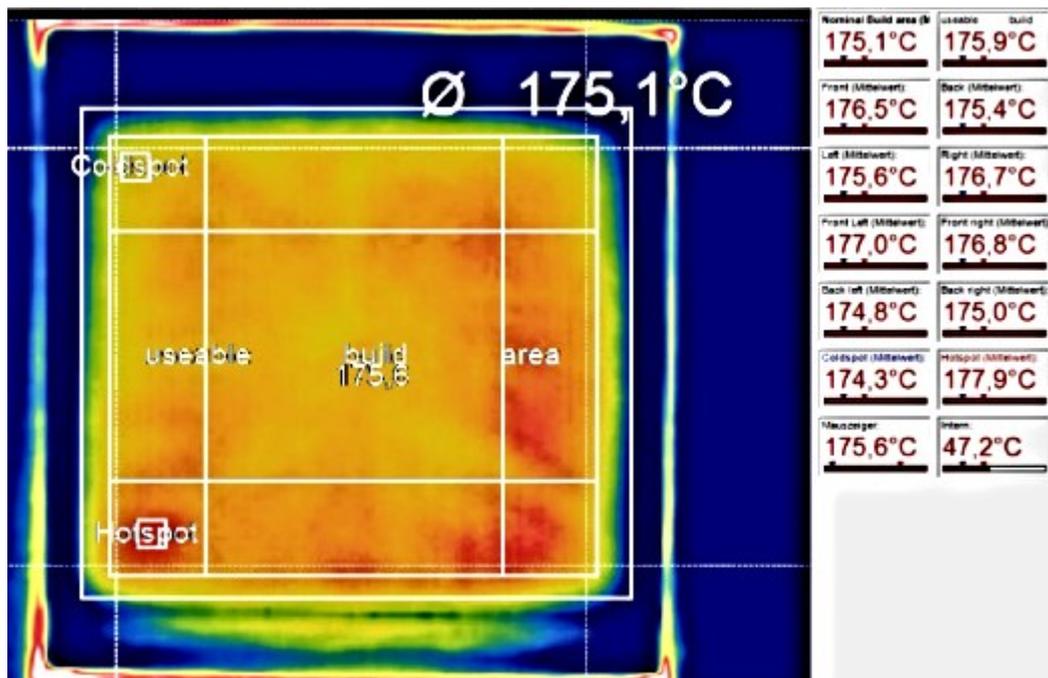


Abbildung 2-13: Temperaturverteilung im Baufeld nach Upgrade [115]

Den größten Eingriff in die bestehende Anlagentechnik im Portfolio stellt das Scannerupgrade dar [118]. Bei diesem wird der analoge Scanner durch einen digitalen Closed-Loop-Scanner ersetzt, der Füllscangeschwindigkeiten von 12,7 m/s zulässt. Mit Hilfe der Upgrades können insgesamt bis zu 14,65 mm/h Baufortschritt erzielt werden, was einer Produktivitätssteigerung von 310 % gegenüber der Originalkonfiguration entspricht. Umgerechnet auf ein Baufeld von 380 mm x 330 mm ergibt sich ein Baufortschritt von 1,8 l/h [118, 119]. Damit kann die Anlagenproduktivität theoretisch auf ein ähnliches Niveau wie bei einer aktuell noch häufig anzutreffenden Fertigungsanlage wie einer 3D Systems sPro 60 HD-HS angehoben werden, wobei entstehende Nebenzeiten des Vorheizens und des Pulverauftrags nicht berücksichtigt werden [21].

Weiterführende Modifikationen von Laser-Sinter-Anlagen zur Optimierung der Fertigung lassen sich in verschiedenen wissenschaftlichen Publikationen finden. Beispielsweise untersuchte Niino in [120] eine zweistufige Verdichtung des aufzutragenden Pulvers und dessen Einflüsse auf die Prozessstabilität und die resultierenden mechanischen Eigenschaften. Um dies zu erreichen, wurde im ersten Schritt mit einer gegenläufigen Walze eine definierte dickere Schicht aufgetragen, die im Nachgang mit einer gleichläufigen Walze weiter verdichtet wurde. Mit dieser Anpassung konnte eine Erhöhung der Komprimierung des Pulvers um 15 % im Baufeld erreicht werden, obwohl die Prozessstabilität bei einer starken Verdichtung gefährdet ist. Die gebauten Proben zeigten eine Verbesserung aller mechanischen Eigenschaften der lasergesinterten Bauteile und das Potenzial des Pulverauftrags für die Optimierung des Gesamtprozesses.

Ergänzend untersuchte Drexler in [121] den thermischen Einfluss des Pulverauftrags auf den Laser-Sinter-Prozess sowohl in einer kommerziellen als auch in einer Forschungsanlage. Variiert wurden dabei die Auftragsgeschwindigkeiten der Pulverauftragswalzen. Unabhängig von der Anlage zeigten die Temperaturen der Auftragswalzen einen negativ logarithmischen

Verlauf als Funktion des Baufortschrittes und ließen Rückschlüsse auf die Grenzschichttemperatur zwischen alter und neu aufgetragener Pulverschicht im Baufeld zu. Diese Erkenntnisse fordern für die Zukunft ein Temperaturmanagement für den Pulverauftragsmechanismus.

Lohn untersuchte in [122] mit einem Forschungsaufbau einer Laser-Sinter-Anlage verschiedene Aspekte des Pulverauftrags sowie den Energieeintrag durch aufgeweiteten Laserfokus. Die Anlage wurde zum Qualifizieren diverser Materialien aufgebaut und betrachtete die Möglichkeit einer innovativen Auftragsstrategie für Materialien mit geringer Rieselfähigkeit. Hierzu wurde das Material zunächst mechanisch auf die Bauplattform gerieselt, im folgenden Schritt nivelliert und anschließend verdichtet. Der Spot variierte in den Untersuchungen zwischen 0,23 mm und 0,5 mm und die nominell maximale Laserleistung betrug 50 W. Verarbeitet wurden die Materialien PA 12, PA 6 und PA 613, wobei die Verarbeitung des PA 6 als störungsanfällig bezeichnet wurde. Folgeuntersuchungen bezüglich der Lasereinwirkzeit sollten durchgeführt werden.

Aus den aufgeführten Bestrebungen der Anlagenmodifikation wird ersichtlich, dass einzelne funktionale Komponenten und Baugruppen einer PBF-LB/P-Anlage großen Einfluss auf die Zielgrößen Prozesses haben können. Zudem führt eine Weiterentwicklung der Anlagensysteme zu einer gesteigerten Produktivität bei gleichzeitiger Verbesserung der Bauteilqualität. Durch diese Optimierungen können beispielsweise sowohl die Kosten pro Stück als auch die mechanischen Eigenschaften verbessert werden. Die Weiterentwicklung der Anlagensysteme ist damit die einzige Möglichkeit, gleichzeitig hinsichtlich aller drei Größen des ‚magischen Dreiecks‘ Verbesserungen zu erzielen, und sollte vorrangig als Technologietreiber angesehen werden (vgl. Kapitel 2.5). Wenngleich vereinzelt Optimierungen alter Anlagentechnik und deren positiver Effekt auf die Bauteileigenschaften bekannt sind, weisen auch neue Anlagensysteme signifikante Schwachstellen auf. Diese zeigen sich beispielsweise in der geringen Materialauswahl und der noch immer vorhandenen Anisotropie der Bauteile, die nach dem bisherigen Stand der Technik nicht vermeidbar sind.

2.6.3 Resultierende Bauteileigenschaften

Die qualitätsbestimmenden Eigenschaften eines lasergesinterten Bauteils hängen von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Neben vermeintlich trivialen eigenschaftsbestimmenden Einflüssen wie Material, Konstruktion und Post-Processing können auch unscheinbare Einflüsse wie Pulververdichtung, Strahlqualität und Laser-Pulver-Wechselwirkung über eine erfolgreiche Anwendung der Technologie entscheiden. Eine umfängliche Darstellung der Komplexität des PBF-LB/P lieferte Wegner in [109], wobei 276 direkte und indirekte Einflüsse identifiziert und in ein Ishikawa-Diagramm integriert wurden. Diese Einflüsse wurden nach der 6M-Methode in Gruppen gegliedert, die unterschiedliche Auswirkungen auf die Bauteilqualität haben. In den Gruppen Methode, Maschine, Mitwelt, Material, Mensch und Messungen (6M) befinden sich diverse Einflussgrößen, die sich gruppenübergreifend signifikant beeinflussen können. Beispielsweise sind der Fokusdurchmesser, die Einschmelztiefe, die Laserleistung und die Laserwellenlänge unweigerlich über den Energieeintrag in das Material miteinander verknüpft, obwohl sie verschiedenen Gruppen angehören. Eine eindeutige Zuweisung der Einflussgrößen zu den resultierenden Bauteileigenschaften kann demnach bis heute nicht vollumfänglich vorgenommen werden, was einen großen Einfluss auf die Eignung zum Serienbauteil hat.

Der Zusammenhang zwischen den verwendeten Parametern und den resultierenden mechanischen Bauteileigenschaften ist bezüglich des Stands der Technik innerhalb des PBF-LB/P hinlänglich dokumentiert. Gemäß der Literatur ist das meistuntersuchte Material Polyamid 12 (PA 12). Die Systematik der Studien unterscheidet sich dabei zwischen Einzelversuchen mit einer variablen Stellgröße [101, 123–125] und statistisch durchgeführten Versuchsplänen (DOE) verschiedener Verfahren, die ebenfalls Wechselwirkungen zwischen den Haupteinflussfaktoren identifizieren können [126, 127]. Weiterführende Untersuchungen wurden an weiteren Polymeren, beispielsweise an Polycarbonat (PC) [128–130], Polystyrol (PS) [114, 131–133] und Polyetheretherketon (PEEK) [134, 135], durchgeführt. Immer wiederkehrende Parameter der Belichtung, die einen dominierenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile haben, waren in den vorliegenden Arbeiten vorherrschend die Laserleistung, der Hatchabstand und die Scannergeschwindigkeit. Diese Parameter wurden in vielen Arbeiten betrachtet und bestimmen nach Formel 2-4 die verwendete Flächenenergiedichte E_A . Weitere signifikante Einflüsse ließen sich bei der Variation der Belichtungsanzahl, der Schichtstärke und der Orientierung der Bauteile im Baufeld beobachten, die jedoch als übergeordnete Parameter der Prozessvorbereitung betrachtet werden können. Die Energiedichte stellte sowohl als Flächenenergiedichte E_A als auch als Volumenenergiedichte E_V eine wesentliche Vergleichsgröße bei den Untersuchungen zur Optimierung der Bauteileigenschaften dar. Dies ergibt sich daraus, dass die eingebrachte Energiedichte ein pragmatischer Repräsentant von drei bzw. vier Parametern innerhalb vorgegebener geometrischer und physikalischer Restriktionen ist. So kann bei gegebener Spotgröße der Spurweitenabstand nur in den vorgegebenen Dimensionen der Überlappung variiert werden und bestimmt zugleich die maximal einzubringende Laserleistung, die durch die thermische Zersetzungsgrenze des Materials vorgegeben ist. Das Bestreben, möglichst viel Energie bei kurzer Wechselwirkungszeit in den Bauteilquerschnitt einzubringen, ist bei aktuellen Laser-Sinter-Anlagen sowohl für eine hohe mechanische Belastbarkeit als auch für eine schnelle und somit kostenoptimierte Produktion der Bauteile ausschlaggebend. Dem gegenübergestellt sind jedoch die vorherrschenden Materialeigenschaften wie die Wärmeleitfähigkeit, die Zersetzungstemperatur, die Schmelzenthalpie und die Rekristallisationstemperatur. Einen Überblick über bereits durchgeführte Untersuchungen zur eingebrachten Energiedichte in Korrelation zu den erreichten mechanischen Kennwerten lieferte [109]. Ein wesentliches Merkmal der betrachteten Studien ist, dass die Proben eine signifikante Anisotropie in Abhängigkeit von der Orientierung bezüglich der Aufbaurichtung aufwiesen. Wegner stellte diesbezüglich repräsentativ die gemittelten Abweichungen der Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen prozentual gegenüber, da diese mechanischen Kennwerte die höchsten Abweichungen voneinander aufwiesen. Die gemittelte prozentuale Abweichung der Zugfestigkeit von liegenden und stehenden Zugproben belief sich auf 14,1 % und jene der Bruchdehnung auf 29,1 %, wogegen das E-Modul mit einer Abweichung von lediglich 5 % als isotrop angenommen werden konnte. Zwar wurden bei genauerer Betrachtung homogenere Eigenschaften bei höheren Energiedichten verzeichnet, jedoch wurde aufgrund der weiterhin hohen Schwankungen der Kennwerte darauf geschlossen, dass die Energiedichte nicht die alleinige Erklärung für die Anisotropie lasergesinterter Bauteile sein kann. Weitere Ansätze aus [136, 137], die eine zweifache Belichtung der Querschnitte betrachteten, führten zu einem Angleichen der Bruchdehnung auf 2,6 % Differenz, was sich jedoch stark auf die Produktivität des Verfahrens und somit auch negativ auf die Kosten auswirkt.

Ein Zusammenhang zwischen der Reproduzierbarkeit und diversen Einflüssen der Bauteilorientierung, der Platzierung im Bauraum, der vorherrschenden Pulverqualität sowie

des verwendeten Anlagensystems zeigt, dass die Bauteilisotropie von vielen gruppenübergreifenden Einflussgrößen abhängt [138–140]. In [125] wurden Probekörper bei unterschiedlichen Baufeldtemperaturen und konstant gehaltenen Energiedichten gefertigt; sie zeigten bis zu 4 % höhere Bauteildichten bei höheren Pulverbetttemperaturen. In [141] untersuchte Monzón mit Hilfe einer Varianzanalyse (ANOVA) neben den bekannten Einflüssen die Einflussparameter unterschiedlicher Anlagensysteme von DTM/3D Systems und EOS sowie deren jeweiliges Ausgangsmaterial Duraform PA und PA 2200. Es wurden jeweils zwei Anlagen einer DTM Sinterstation 2500 plus und einer EOS P380 verwendet. Die Ergebnisse zeigten, dass die Laserleistung, die Schichtstärke und das genutzte Anlagensystem maßgeblich die entstehenden mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Für die Geometrietreue ist hingegen die verwendete Pulverqualität bestimmend. Eine wesentliche Erkenntnis liegt darin, dass die Konstrukteure nicht nur die Aspekte der Additiven Fertigung, sondern auch anlagenspezifische Gegebenheiten zu berücksichtigen haben. Durch die Verwendung von Ausgangsmaterialien unterschiedlicher Hersteller kann die Aussage jedoch auch den unterschiedlichen Materialien zugesprochen werden. In [142] wurde eine Versuchsreihe zur Alterung des Materials PA 2200 auf einer EOS Formiga P100 und einer DTM 2500 mit High-Speed-Upgrade durchgeführt. Die Materialien wurden in einem Ofen und einer Laser-Sinter-Anlage differenziert gealtert und es wurden die Auswirkungen der Pulverqualität bei unterschiedlichen Energiedichten für beide Anlagen untersucht. Es zeigte sich, dass die für einen Prozess benötigte Materialqualität anlagenspezifisch betrachtet werden muss und die Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften durch die Wahl robuster Parameter bei beiden Anlagentypen positiv beeinflusst werden kann. Gealterte Materialien können demnach durch die Verwendung höherer Energiedichten bis zu einem ermittelten Grenzwert optimiert werden. Der Einfluss auf die alterungsbedingten Oberflächendefekte der Bauteile, auch als Orangenhaut bekannt, konnte jedoch nicht vermieden oder reduziert werden.

Die Prozessoptimierung des PBF-LB/P hinsichtlich Packungsdichte und Oberflächengüte wurde ebenfalls in der Literatur thematisiert. Insbesondere wurde in [143] der Einfluss einer erhöhten Packungsdichte im Laser-Sinter-Prozess analysiert. Der Fokus lag dabei auf den Auswirkungen auf die Eigenschaften der resultierenden Schmelze. Als Experiment wurden Einzelschichten in Pulverbetten hergestellt, die aus unterschiedlich manuell verdichteten Pulvercontainern mit variablen Heizraten stammten. Die Untersuchungen zeigten, dass eine höhere Packungsdichte tendenziell zu geringeren Eindringtiefen des Lasers führt, was wiederum eine reduzierte Porosität in der Einzelschicht des Bauteils zur Folge hat. Weiterhin zeigten computertomographische Aufnahmen, dass bei erhöhten Packungsdichten der Einfluss der Heizrate auf die Bildung eines porenarmen Schmelzpool merklich reduziert wird.

Ein zweistufiger Verdichtungsprozess mit einer Auftragswalze wurde in [120] beschrieben. Der erste Schritt erzeugte eine stärkere Schicht als benötigt und der Auftrag erfolgte durch eine gegenläufige Walze. Nachfolgend war der zweite Schritt dadurch gekennzeichnet, dass die Bauplattform auf die Sollposition zurückfuhr und die überstehende Schicht mit einer gleichläufigen Bewegung der Auftragswalze verdichtet wurde. Die Ergebnisse zeigten eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und eine Reduzierung des Verzuges als Resultat der erhöhten Packungsdichte. Ein zweistufiger Auftragsprozess ist jedoch instabil sowie nicht wirtschaftlich und sollte im Sinne der potenziellen Serienfertigung des Laser-Sinter-Prozesses vermieden werden. Konzeptionell bedingt ergab die erhöhte Verdichtung der Pulverschüttung eine Verschiebung der Bauteile im Bauvolumen. Diese war teilweise so signifikant, dass die Deformationen zu einem Ausschuss des Probekörpers führten.

Die resultierende Packungsdichte einer Rakel und der Pulverauftrag durch eine gegenläufige Walze wurden in der Dissertation von [144] miteinander verglichen. Dabei war die gegenläufige Rotationsgeschwindigkeit der Auftragswalze nicht variabel, sondern wies eine lineare Abhängigkeit von der translatorischen Bewegungsrichtung auf. Die Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass der Einsatz einer Rakel tendenziell zu einer höheren Packungsdichte führt. Innerhalb der Arbeit konnte der Einfluss der Rotation der Auftragswalze nicht umfassend untersucht werden. Des Weiteren kamen Proben mit einem geringen Pulvervolumen zum Einsatz, was den Einfluss der Seitenwände auf die erreichten Packungsdichten möglicherweise beeinträchtigt hat.

In [145] wurden Untersuchungen zur Oberflächenrauheit und zur Packungsdichte in Bezug auf verschiedene Alterungsstufen des Ausgangsmaterials PA 2200 durchgeführt. Aufgrund der Beschränkungen des Anlagentyps konnten dabei keine Variationen der Auftragsparameter berücksichtigt werden und waren auch nicht Teil der Untersuchungen. Die Ergebnisse zeigten tendenziell keine signifikante Verringerung der Packungsdichte, jedoch nahm die Standardabweichung mit zunehmenden Alterungsstufen zu. Eine Korrelation zwischen der Packungsdichte und der Oberflächenrauheit wurde nicht untersucht.

Die in diesem Kapitel aufgeführten Arbeiten zeigen auf, dass die resultierenden Bauteileigenschaften eines Laser-Sinter-Bauteils von vielen variablen Einflüssen abhängen. Es wurden bereits zahlreiche Untersuchungen theoretischer und empirischer Natur bezüglich des Energieeintrages, der Reproduzierbarkeit der Anlagentechnik und der Optimierung der Bauteileigenschaften durchgeführt. Zudem wird ersichtlich, dass noch immer große Potenziale in der Optimierung der Anlagensysteme zur Produktivitätssteigerung und Reproduzierbarkeit bestehen.

Mit der Weiterentwicklung der Anlagensysteme haben sich sowohl die Produktivität als auch die Qualität der Bauteile verbessert. Folgerichtig kann die Anlagentechnologie als ein entscheidender Faktor für die Technologiedurchdringung und breitflächige Anwendung des PBF-LB/P gesehen werden. Eine Möglichkeit, die Produktivität der Anlagen bei gleichzeitig erhöhter Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität zu optimieren, bietet die Variation des Laserspots auf der Bauteilebene, die auch Fokusvariation genannt wird. Um diese Methode realisieren zu können, sind jedoch Anpassungen der Scanstrategie zur Erhaltung der Detailgetreue notwendig. Die Homogenisierung der Bauteileigenschaften korreliert neben dem Energieeintrag des Lasers auch mit dem Temperaturmanagement des verwendeten Anlagensystems und bedarf demzufolge ebenfalls einer Optimierung, um Bauteile mit möglichst geringen anisotropen Verhalten generieren zu können.

3 Überblick und Zielsetzung

Das PBF-LB/P ist eines der produktivsten additiven Fertigungsverfahren mit einem hohen Potenzial zur individualisierten Massenfertigung von Kunststoffbauteilen [9, 19–21]. Dabei werden Bauteile in einer Anlage batchweise durch vier wiederkehrende Prozessschritte sukzessive gefertigt. Sie entsprechen in vielen Fällen den industrietypischen Anforderungen und haben bereits Einzug in bestehende Prozessketten der Serienfertigung gehalten [6, 7]. Es werden jedoch weiterhin mannigfaltige Ansätze zur Optimierung der gesamten Prozesskette gefunden, von den Materialien und deren Handling [146–148] über Prozessoptimierungen bis hin zu fortgeschrittener Prozessüberwachung [149–151]. Das meistverwendete Material basiert auf PA 12, was mit dessen herausragender Verarbeitungseigenschaft in Bezug auf die Anforderungen des PBF-LB/P erklärt werden kann [21, 71]. Hierzu gehören die hohe Schmelzenthalpie, die geringe Neigung zur Rekristallisation und die große Temperaturspanne, in der ein Zwei-Phasen-Mischgebiet aufrechterhalten werden kann (vgl. Abbildung 2-12) [4, 71]. Die betreffend das Standardmaterial gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf weitere Kunststoffe übertragen. Neue Materialsysteme, die anfangs viel Bediener-Know-how erforderten und ausschließlich mit qualitativen Abstrichen verarbeitet werden konnten, lassen sich mit verbessertem Temperaturmanagement neuer Anlagensysteme und angepasster Rezeptur verhältnismäßig unkompliziert qualifizieren [152–154].

Die Anlagentechnik entwickelt sich seit der Kommerzialisierung kontinuierlich zu produktiveren Anlagensystemen, da hierdurch die Kosten der Bauteile signifikant gesenkt werden können. Diese Produktivitätssteigerungen werden hauptsächlich durch schnellere Scannersysteme, Multi-Scanner-Systeme oder eine Abwandlung des Prozesses von der punktförmigen zur Flächenbelichtung der Bauteilquerschnitte mit Absorbierertinten erzielt. Alte Anlagen können ebenfalls mit kommerziell erhältlichen Upgrade-Kits eine signifikante Produktivitätssteigerung gegenüber dem Ursprungszustand erfahren. Hierzu gehören Scanner- und Heizstrahlerupgrades sowie Verbesserungen des Temperaturmanagements, die einen hohen Einfluss auf die resultierenden Bauteileigenschaften haben. Anlageninhärente Einflüsse bleiben jedoch erhalten. Der Einfluss des Anlagensystems auf die Bauteileigenschaften wurde bereits in verschiedenen Untersuchungen beschrieben [155], auch wenn der Energieeintrag einheitlich über einen CO₂-Laser erfolgte. Dabei sind die optischen Systeme einer Laser-Sinter-Anlage mit CO₂-Laser auf einen möglichst minimalen Fokus ausgelegt. Dieser ist kreisrund und weist eine gaußförmige Leistungsdichteverteilung und einen typischen Durchmesser von ca. 0,5 mm auf. Durch das Scannersystem und festgelegte Parameter wird der Laserspot anhand vorher definierter Scanvektoren linienweise über das Baufeld bewegt und erzeugt durch das schnelle Ein- und Ausschalten des Lasers den jeweiligen Vektor und durch Aneinanderfügen der einzelnen Vektoren den Bauteilquerschnitt. Die Parameterwahl und die Bestimmung der Abfahrwege definieren dabei den Energieeintrag in einen Bauteilquerschnitt und stellen die Scanstrategie dar. Die Energieeinbringung ist dabei für die resultierenden Bauteileigenschaften maßgebend, da sie den Übergang zur Schmelze und den Verbund mit der darunterliegenden Schicht verantwortet.

Neben innovativen Ansätzen zur Energieeinbringung [97, 156–158] beziehen sich die publizierten Arbeiten mehrheitlich auf das Prinzip des quasi-isothermen Laser-Sinterns. Dieses liefert die thermischen Rahmenbedingungen für ein Zwei-Phasen-Mischgebiet von Feststoff und Schmelze, die während des Bauprozesses koexistieren können. Erst beim Abkühlen des gesamten Bauraumes entsteht der Festkörper, was die hohen mechanischen Eigenschaften der Bauteile aus dem PBF-LB/P begründet. Es wurde ein großer Aufwand

betrieben, um die Zusammenhänge der Bauteilorientierung oder des Energieeintrages zu analysieren. Bei experimentellen Untersuchungen zum Einfluss des Energieeintrages wurden vor allem die Parameter Laserleistung P_L , Scangeschwindigkeit v_S und Hatchabstand H betrachtet [159]. Basierend auf der vorhandenen Anlagentechnik sind den Einstellungsmöglichkeiten dieser Parameter bei konstantem Laserspotdurchmesser jedoch enge Grenzen gesetzt. Dennoch werden diesen Parametern zum Energieeintrag mittels Laser übergeordnete Wechselwirkungen auf die Bauteileigenschaften zugeschrieben, da bereits innerhalb der engen Parametergrenzen signifikante Effekte auf die Bauteile beobachtet wurden.

Die bisherige Anlagentechnik des PBF-LB/P ist aufgrund verfahrensinhärenter Prozessabläufe und der Besonderheit des Energieeintrages durch eine stets präsente Anisotropie und eine mangelnde Reproduzierbarkeit der erzeugten Bauteile charakterisiert [41]. Gründe werden diesbezüglich unter anderem in der inhomogenen Temperaturführung des Prozesses [4, 160], im schichtweisen Aufbau [161–163] oder in der Orientierung der Bauteile im Bauraum [164, 165] gesehen. Anhand der bisher erarbeiteten Erkenntnisse ist es noch nicht gelungen, einen PBF-LB/P-Prozess so zu gestalten, dass mit akzeptablem Aufwand isotrope Bauteileigenschaften resultieren können. Vielmehr ist eine orientierungsabhängige Anisotropie bereits hinlänglich bekannt und wird dem Konstrukteur in Form von Materialdatenblättern, die die Kennwerte differenziert nach Aufbaurichtung beziffern, und Konstruktionsrichtlinien als besondere Anforderung mitgeteilt.

Aus dem Überblick wird ersichtlich, dass die Kenntnisse aus der Wissenschaft in der Praxis bislang nicht vollumfänglich umgesetzt werden konnten, um die grundlegende Problematik der anisotropen Bauteileigenschaften zu lösen. Behandelte Ansätze beziehen sich zumeist auf Parametervariationen in unterschiedlichen Umfängen. Eine signifikante Anisotropie der Bauteile in Abhängigkeit von der Orientierung im Bauraum bleibt jedoch bestehen. Bisherige Fortschritte auf dem Gebiet der isotropen Bauteileigenschaften wurden ausnahmslos auf Kosten der Produktivität erzielt und können so nicht als Fortschritte der Technologie angesehen werden. Aus diesem Grund setzt die vorliegende Arbeit bei der Homogenisierung der Bauteileigenschaften an. Auch wenn die Anlagen- und Materialsysteme eine hohe technologische Reife erlangt haben, sind die Unterschiede in den kommerziellen Anlagensystemen signifikant und auf die Bauart sowie den Energieeintrag zurückzuführen [166]. Um dieser Problemstellung zu begegnen, ist es notwendig, die bestehenden Anlagenkonzepte auf ihre technologischen Stärken und Schwächen zu analysieren und in ein neues Anlagenkonzept zu überführen. Dabei sollen bekannte Stärken vorherrschender Anlagensysteme mit eigenen Innovationen kombiniert werden. Darauf basierend soll ein Anlagenkonzept ausgearbeitet und realisiert werden. Aktuelle Anlagensysteme weisen eine undifferenzierte Steuerung ihrer Heizleistung auf. Zudem ist der Prozess anfällig gegenüber Störgrößen. Dies ist auf eine inhomogene Vorheizung und das Auftreten sogenannter ‚Cold-Spots‘ zurückzuführen, welche das Kondensieren des Materials auf dem Laser-Window oder eine vorzeitige Rekristallisation der Bauteile verursachen können. Aufgrund dieser prozessinhärenten Störgrößen ist es notwendig, die bauteileigenschaftsbestimmenden Einflüsse im PBF-LB/P-Prozess anlagenseitig zu optimieren.

Die aus diesem Kontext hergeleitete Forschungsfrage lautet folglich: Welchen Einfluss haben die anlagenspezifischen Rahmenbedingungen wie Prozessgeschwindigkeit, das Temperaturmanagement und die Belichtung auf die Homogenität der Bauteileigenschaften?

Folgende Forschungshypothesen werden aufgestellt, um die Zielsetzung genauer definieren zu können:

1. Um homogene Bauteileigenschaften erhalten zu können, müssen die Rahmenbedingungen eines homogenen Energieeintrages von der Anlagentechnik zwangsläufig erfüllt sein.
2. Ein robuster Prozess ist zur Sicherstellung gleichmäßiger Prozessbedingungen von besonderer Bedeutung und muss bereits bei der Anlagenauslegung berücksichtigt werden.
3. Die resultierenden Bauteileigenschaften des PBF-LB/P sind ein Resultat der Energieeinbringung des Vorheizens, des Lasers sowie der Prozessgeschwindigkeit.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage sind neue Impulse der Anlagentechnik notwendig, um systematisch einzelne bislang kaum berücksichtigte Prozesszusammenhänge experimentell untersuchen zu können. Zielsetzung dieser Arbeit ist es daher, eine Versuchsanlage mit verbessertem Temperaturmanagement und neuen Impulsen der Energieeinbringung zu entwickeln. In der Anlage sollen prozesssichere Parameter für das Standardmaterial PA 2200 qualifiziert, dreidimensionale Bauteile mit einem vergrößerten Laserspot hergestellt und deren Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften und die Prozesszeit charakterisiert werden.

Eine signifikante Vergrößerung des Laserspots wird betrachtet, um die Potenziale dieser Variation analysieren zu können. Bei einer Vergrößerung des Laserspots müssen die resultierenden Spurbreiten S_B der Schmelze in Abhängigkeit von der Spotgröße definiert sein, um den korrekten Hatchabstand H für ein homogenes Schmelzbad der jeweiligen Bauteilquerschnitte sicherzustellen. Ausgehend von der Annahme, dass die verlängerte Wechselwirkungszeit mit dem Laserspot nicht ausreicht, um die Spurbreiten signifikant zu steigern, muss die Laserleistung ebenfalls mit den größeren Laserspots signifikant erhöht werden.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse werden Parametersätze für variierende Laserspotgrößen qualifiziert, die eine Homogenisierung der mechanischen Bauteileigenschaften ermöglichen und so die Anisotropie der Bauteile in Abhängigkeit von der Orientierung vermeiden.

4 Auslegung und Inbetriebnahme der Versuchsanlage

Kommerzielle Anlagensysteme bieten häufig nicht die Parameterfreiheit, die eine Forschungsstelle zur Realisierung innovativer Ansätze benötigt. Die einstellbaren Parameter, wie sie beim Stand der Technik beschrieben wurden, sind an spezielle Materialien, die größtenteils von den Anlagenherstellern vertrieben werden, angepasst. In Zusammenarbeit mit EOS und dem Fraunhofer ILT wurden die Kernkompetenzen als Bestandteil des Forschungsprojektes HiPer-LS (FKZ 02PN2096) an der Universität Duisburg-Essen gebündelt und anhand der nachfolgenden Versuchsanlage realisiert. Durch den hohen Grad der Entwicklungs- und Fertigungstiefe wurden innovative Parametervariationen ermöglicht, die somit die Grundlage der Untersuchungen dieser Arbeit bildeten.

4.1 Methodische Entwicklung der Versuchsanlage

Die Versuchsanlage in Abbildung 4-1 benötigt insgesamt eine Aufstellfläche von 2,6 m x 1,34 m und ist durch den prinzipiellen Aufbau mit Optik-Bank, Maschinengestell und Peripheriegeräten gekennzeichnet.

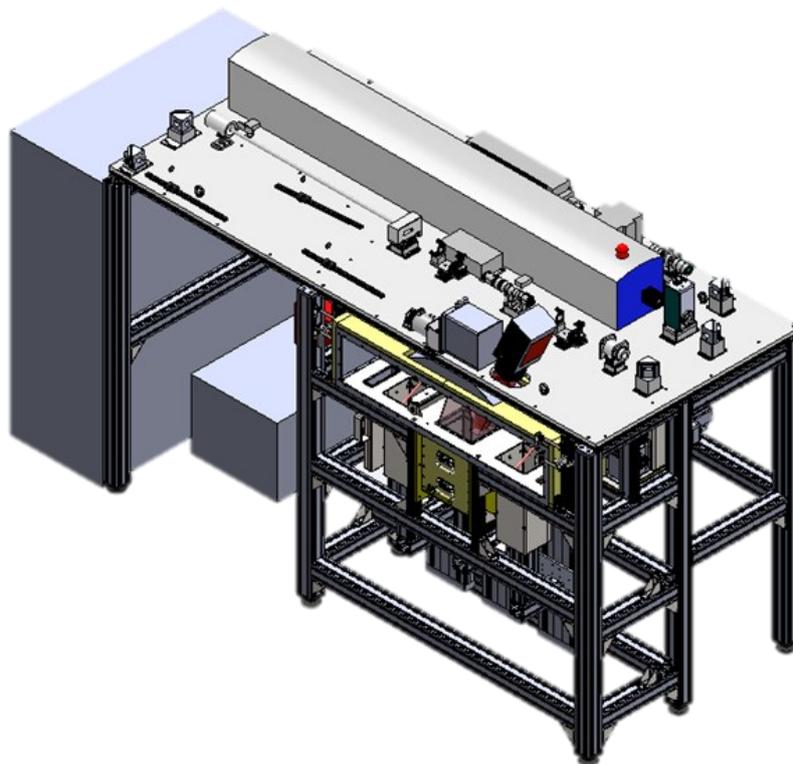


Abbildung 4-1: Baugruppe der Versuchsanlage als CAD-Modell

Um die Steifigkeit und Tragfähigkeit des Rahmen-Aufbaus zu gewährleisten, wurde ein Aluminiumprofil mit einem 80 mm x 80 mm Querschnitt verwendet. Der Bauraum ist vom Gestell und der Umgebung durch die Nutzung von Schichtsilikatplatten thermisch entkoppelt und beinhaltet zwei Pulvorrats- und Überlaufbehälter sowie einen entnehmbaren Baubehälter mit einem Volumen von 190 mm x 140 mm x 280 mm. Dieses Konzept wurde aufgrund des optimierten Vorheizens der aufzutragenden Pulverschicht gewählt. Beheizt wird

das zu verarbeitende Material über Infrarotstrahler der schnellen Mittelwelle, die sich jeweils über den Vorratsbehältern und über dem Baufeld befinden. Unterstützt wird die Temperaturführung durch Rahmen- und Mantelheizungen, die das vorzeitige Auskühlen der Bauteile im Bauraum verhindern. Zum Pulverauftrag kann eine beheizte Walze oder wahlweise eine Rakel verwendet werden.

Der Ablauf der Konstruktion der Versuchsanlage orientierte sich an der VDI-Richtlinie 2221 bzw. 2222, die einen Konstruktionsprozess in sieben aufeinanderfolgende Arbeitsschritte gliedert und diese den einzelnen Konstruktionsphasen zuordnet (vgl. Abbildung 4-2) [167, 168]. Der erste Arbeitsschritt ist das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung. Das Ergebnis wird in Form einer Anforderungsliste dokumentiert [169]. Diese ist die Grundlage jeder weiteren Arbeit. Anhand dieser Anforderungsliste müssen Funktionsstrukturen und prinzipielle Lösungen gefunden werden, die der Aufgabenstellung gerecht werden. Je nach Komplexität der Funktion können verschiedene Vorgehensweisen zu deren Erfüllung herangezogen werden. Bei der Gliederung in realisierbare Module ist die Konzeptionierung bereits abgeschlossen und geht in die Phase des Entwurfes über. Es wird die modulare Struktur der Gesamtanlage definiert. Ein Modul ist dabei eine aus mehreren Einzelementen bestehende Einheit eines Gesamtsystems, die ausgetauscht oder ersetzt werden kann [170]. Auf Basis der modularen Struktur wird mit der Gestaltung der maßgebenden Module begonnen. Die Überprüfung der Funktionalität und der Schnittstellen steht dabei im Vordergrund, da diese in der Regel nachträglich lediglich mit erhöhtem Aufwand umgestaltet werden können und ebenfalls einen großen Einfluss auf nachfolgende Konstruktionsarbeiten ausüben können. Die Gestaltung der Versuchsanlage erfolgt nach den Vorentwürfen. Während innerhalb Letzterer teilweise Platzhalter und sogenannte Dummies vorhanden sein können, werden hierbei alle Einzelteile einer Baugruppe unter Berücksichtigung aller relevanten Entscheidungen ausgearbeitet. Hierzu gehören beispielhaft die ‚Make or Buy‘-Entscheidung, die Auswahl des verfügbaren Fertigungsverfahrens mit den erreichbaren Toleranzen und die notwendigen Festigkeitsnachweise kritischer Bauteile. Das Zusammenspiel der Einzelteile und Module muss dabei stets berücksichtigt werden, was die genaue Definition der vorherrschenden Schnittstellen notwendig macht. Die Ausarbeitung der Ausführungs- und Nutzungsangaben führt zu einer Vervollständigung der Anlagendokumentation und dient als Grundlage der weiteren Realisierung und Bedienung der Versuchsanlage.

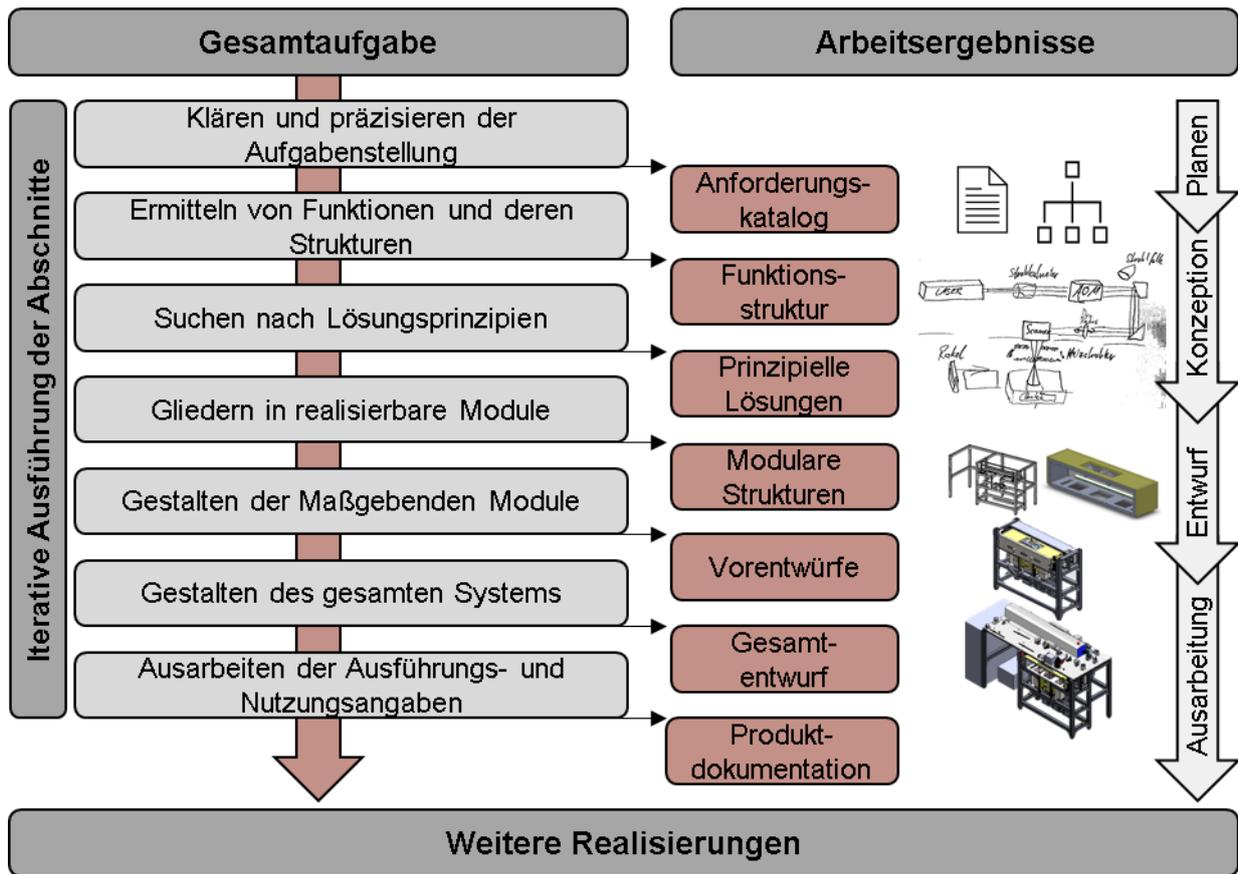


Abbildung 4-2: Darstellung der methodischen Entwicklung von Lösungsprinzipien und technischen Systemen der Versuchsanlage in Anlehnung an [165-167]

Die Aufgabenstellung hinsichtlich der Anfertigung der Versuchsanlage bestand darin, eine möglichst flexible und leicht modifizierbare Anlage zu realisieren, die in der Lage ist, innovative Parameter zu testen. Neben den Grundfunktionen einer Laser-Sinter-Anlage sollten zusätzliche Schwachstellen, die an kommerziellen Anlagen identifiziert wurden und zu einer Verringerung der Reproduzierbarkeit führen, optimiert werden (vgl. nachfolgendes Kapitel). Ein modularer Aufbau ermöglicht die Montage der einzelnen Bauteile in Baugruppen sowie den Austausch einzelner Baugruppen über definierte Schnittstellen zur Gesamtbaugruppe. Die Baugruppen umfassen das Grundgestell, den Bauraum, die Prozesskammer, den Getriebekasten und die Pulverauftragseinheit.

Das Grundgestell fixiert die einzelnen Baugruppen und dämpft die durch mechanische Komponenten verursachten Schwingungen. Es muss zudem eine parallel zur Pulverbettoboberfläche ausgerichtete Aufnahme und Fixierung der Optik-Bank gewährleisten. Um die Flexibilität des Versuchsaufbaus für eventuell auftretende Änderungen sicherzustellen, wurde die Konstruktion des Gestells mit Hilfe von Aluminium-Nutprofilen der item Industrietechnik realisiert [171, 172]. Diese ermöglichen einen flexiblen Zusammenbau und den Austausch einzelner Komponenten, ohne dass eine Neukonstruktion der gesamten Anlage erforderlich ist. Die Nuten in den Profilen erlauben die flexible Verbindung zweier Profile auf verschiedene Arten. Standardmäßig erfolgt die Montage auf Stoß, sie kann jedoch durch spezielle Beschläge auch variabel gestaltet werden. Der Grundaufbau orientierte sich an einem bestehenden Anlagensystem. Auf dem Markt haben sich insbesondere zwei

Anlagenkonzepte durchgesetzt: die der Firmen EOS und 3D Systems [173]. Der Aufbau dieser beiden Anlagentypen unterscheidet sich im Wesentlichen durch das Pulvermanagement: Bei EOS erfolgt die Pulverzuführung kontinuierlich während des Prozesses mittels Pulverschüttung vor der Pulverauftragseinheit. Im Gegensatz dazu realisieren Anlagen von 3D Systems die Pulverzuführung durch Vorratsbehälter [21]. Dieser Vorrat wird entgegen der Bewegung des Baubehälters nach oben transportiert, wodurch Material für das Pulverauftragssystem bereitgestellt wird. Die Vorteile dieses Ansatzes sind die unkomplizierte Realisierung und die präzise Vorheizung der Vorratsbehälter, denen allerdings die Nachteile der begrenzten Materialmenge und des vergrößerten Bauraumvolumens gegenüberstehen. Da jedoch die thermische Prozessführung im Sinne der Reproduzierbarkeit wesentlich ist und der längere Verfahrensweg des Pulverauftragssystems durch eine erhöhte Verfahrensgeschwindigkeit kompensiert wird, wurde die Versuchsanlage mit Vorratsbehältern realisiert.

Der Bauraum ist die Baugruppe, die im Prozess die Bauteile in einem Pulverbett fixiert und pro Schicht eine definierte Strecke nach unten fährt, bis der Bauprozess beendet ist. Die Genauigkeit dieser Verfahrenseinheit ist entscheidend für die entstehende Schichtstärke und den Aufbau der Bauteile. Es dürfen keine Erschütterungen oder Vibrationen an die Bauteile weitergegeben werden, da diese sonst ihre Position im Bauraum verlieren würden. Der Behälter ist entnehmbar und mit dreizehn Heizelementen ausgestattet, um eine homogene Temperierung des Baubehälters und eine definierte Abkühlung des Bauprozesses nach dessen Ende zu ermöglichen. Alle Heizelemente sind mit Thermoelementen ausgestattet, was eine präzise Temperaturführung über die gesamte Prozesszeit ermöglicht.

Die Prozesskammer ist neben dem Bauraum die zentrale Baugruppe. Gemäß dem festgelegten Prinzip müssen zwei Vorratsbehälter und drei Heizstrahler mit einzelnen Regelkreisen, einer Inertgaszufuhr und Schnittstellen zu Messmitteln und Laseroptik implementiert werden. Die Prozesskammer muss ausreichend dicht sein, um eine Inertgasatmosphäre im Prozess zu gewährleisten. Aufgrund der hohen Anforderungen an die thermische Stabilität ist auf eine thermische Entkoppelung des Moduls zu achten. Ein Zugang zu den Bau- und Vorratsbehältern soll dabei das Beschicken und Warten der Anlage vereinfachen. Während des Bauprozesses soll eine Sichtkontrolle durch den Anlagenbediener möglich sein.

Im Getriebekasten befinden sich die mechanischen Komponenten, die für den Pulverauftrag verantwortlich sind. Hierzu gehören die Lineareinheit inklusive Kettentrieben und Elektromotoren sowie deren Endschalter. Mit diesen Komponenten wurden Verfahrensgeschwindigkeiten des Pulverauftragsmechanismus von bis zu 450 mm/s erreicht. Der Pulverauftrag kann sowohl durch eine Rakel als auch durch eine rotierende Walze erfolgen und die Traverse, die in den Bauraum ragt, ist ebenfalls mit Schichtsilikatplatten entkoppelt, um einen Wärmetransport nach außen zu vermeiden. Die Rotation der Walze ist unabhängig von der translatorischen Verfahrensgeschwindigkeit wählbar. Dadurch wurden eine gleich- und gegenläufige Rotation der Auftragswalze realisiert, was neue Auftragsstrategien zur Erhöhung der Pulverpackungsdichte eröffnet.

Die Steuerung der Versuchsanlage erfolgt durch eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) von WAGO. Dabei handelt es sich um die WAGO 750-8062 mit dem SPS-Controller PFC200 [174]. Diese Steuereinheit bietet aufgrund ihrer modularen Bauweise den Vorteil, dass bei Bedarf zusätzliche Steuerkarten implementiert werden können. Dies ermöglicht es,

weitere Aktoren, Sensoren, Motorantriebe oder Ein- bzw. Ausgänge in die bestehende Struktur der Anlage zu integrieren.

Nach dem Zusammenbau der einzelnen Teilbaugruppen können diese auf ihre Funktionalität überprüft und zu Testzwecken in Betrieb genommen werden. Notwendige Anpassungen werden daher frühzeitig erkannt. Der Fokus liegt hierbei auf der Einhaltung der Fertigungs- und Baugruppentoleranzen. Des Weiteren werden die Schnittstellen der einzelnen Komponenten definiert und in das Gesamtkonzept integriert. Grundlegende Funktionen wie die Regelung einzelner Heizstrahler und die Inbetriebnahme eines Schrittmotors mit der SPS werden getestet. Zur genauen Anordnung der Heizstrahler im Baufeld werden diese mittels Thermographie charakterisiert und in ein mathematisches Modell integriert, um einen optimierten Energieeintrag in das Baufeld zu gewährleisten.

Die Versuchsanlage besteht im Wesentlichen aus 171 Profilen, 1200 Zukaufteilen und mehr als 300 Einzelanfertigungen. Dazu gehören unter anderem drei Präzisionslineareinheiten, eine Hochtemperaturlinearachse, zwei Antriebsmotoren des Pulverauftrags, Gas- und Elektroleitungen sowie zahlreiche elektronische Komponenten zur Steuerung und Regelung. Realisiert wurden die einzelnen Module je nach Gegebenheiten und Anforderung gemäß der Bottom-up- oder der Top-down-Methode [175]. Zur Reduzierung nachträglicher Änderungen wurden auch bei gewähltem Bottom-up-Ansatz möglichst viele Bauteile der Baugruppe parametrisiert [170, 176]. Nach der Auslegung und Konstruktion wurde das Grundgestell der Anlage erweitert, um die Optik-Bank aufnehmen zu können. Die ursprüngliche Stellfläche von 1650 mm x 862 mm musste auf 2600 mm x 1332 mm vergrößert werden, um ausreichend Platz für die Optik-Bank zu schaffen. Die Schnittstellen bestehen aus acht aufrecht stehenden Aluminiumprofilen mit Maschinenfüßen, die zusätzlich durch Querstreben verbunden sind. Basierend auf der Position der Scannereinheit und dem Arbeitsabstand wurde eine konstruktive Lösung zur Integration der Thermographie-Kamera in die Versuchsanlage entwickelt, um Thermogramme während der Belichtung der Querschnitte aufnehmen zu können.

4.2 Innovation der Funktionseinheiten

Die Versuchsanlage zeichnet sich durch innovative Ansätze aus, die den Laser-Sinter-Prozess sowohl produktiver als auch reproduzierbarer gestalten sollen. Basierend auf bestehenden Anlagensystemen verschiedener Hersteller wurden die jeweiligen Vorteile genutzt und es erfolgten entsprechende Adaptierungen und Optimierungen. Die relevantesten Innovationen und Umsetzungen werden beispielhaft in diesem Kapitel erörtert, um ein Gesamtbild der Anlagentechnik zu erhalten, das sich an vielen Stellen signifikant vom Stand der Technik differenziert.

Spülung des Laser-Windows

Das Laser-Window stellt die energetische Schnittstelle zwischen Optik-Bank und Bauraum dar. Seine Hauptaufgabe besteht darin, die Optikkomponenten vor Staub- und Kondensatbildung des Prozesses zu schützen sowie eine möglichst verlustfreie Transmission der Laserstrahlen zu ermöglichen (vgl. Kapitel 2.6). Die Bildung von Staub und Kondensat auf diesen Einheiten lässt sich im laufenden Prozess kaum verhindern, da die hohe Position und die vergleichsweise niedrige Oberflächentemperatur einen Kondensatniederschlag

begünstigen [20, 21]. Ansätze der laminaren Schutzgasführung oder Temperierung des Fensters zur Lösung dieser Problematik werden im industriellen und wissenschaftlichen Umfeld verfolgt [109, 177]. Die Notwendigkeit dieser Maßnahme besteht darin, dass aktuell das Laser-Window einer Anlage nach jedem Baujob gereinigt werden sollte und bei langen Baujobs auch die Transmission verringert sein kann. Wenn die Rückstände auf dem Laser-Window eine geringere Einkoppelung der Laserleistung verursachen, kann dies zu verringerten mechanischen Eigenschaften der Bauteile führen und den fehlerfreien Ablauf von Bauprozessen gefährden.

In dieser Arbeit wurde der Ansatz einer Freiblasvorrichtung mit möglichst laminarer Strömung herangezogen. Durch die Verwendung eines Stickstoffstroms sollte Kondensat und Staub davon abgehalten werden, mit dem Laser-Window in Kontakt zu geraten. So wird eine dortige Ablagerung verhindert und das Kondensat setzt sich an unkritischen Stellen im Bauraum ab. Als besondere Anforderung der Konstruktion sind die geringen Platzverhältnisse und die große Fläche des Laser-Windows von 90 mm x 70 mm zu nennen. Ziel war es, die laminare Strömung entlang einer parallelen Ebene des Laser-Windows zu ermöglichen, bevor sie in turbulente Strömung übergeht. Zur Umsetzung einer laminaren Strömung wurde eine Kombination von Verteiler und Düse genutzt, die gemäß der Vorgehensweise für Produktentwicklung durch Simulationsergebnisse und iterative Verbesserungsschritte konstruiert und validiert wurde [178]. Der Verteiler basierte auf einem Kleiderbügelverteiler, wie er bei der Produktion von Kunststofffolien verwendet wird. Bezugnehmend auf den weg- und querschnittsabhängigen Widerstand gegen das Fluid mussten bei der Auslegung dieses Verteilers die Rahmenbedingungen eines komprimierbaren Fluids angewendet werden. Dabei sollte die Funktionalität betriebspunktunabhängig ausgelegt werden, damit spätere Anpassungen am Betriebspunkt keine oder nur geringfügige Auswirkungen auf die Linearität der Strömung besitzen [179]. Ziel der Auslegung war es, dass die Simulationsergebnisse einen gleichmäßigen Austritt aus der Düse mit möglichst identischen Fluidgeschwindigkeiten über den Düsenaustritt zeigen. So kann eine möglichst langanhaltende stabile laminare Strömung erreicht werden [180]. Unter Berücksichtigung der geringen Platzverhältnisse wurde eine etagenweise funktionalisierte Sandwichbauweise angewendet, die eine Austauschbarkeit der einzelnen Funktionsbauteile ermöglicht. Zur ersten qualitativen Strömungsanalyse wurde die Software SOLIDWORKS FlowXpress verwendet. Die Rahmenbedingungen wurden mit 20 °C Raumtemperatur, einem Volumenstrom von 100 ml/s (entspricht 6 l/min) und einem Umgebungsdruck von 101 325 Pa definiert (vgl. Abbildung 4-3). Sie konnten im Versuchsstand durch die Verwendung eines digitalen Durchflussschalters vom Typ SMC PFM750-F01-B-M sichergestellt werden [181].

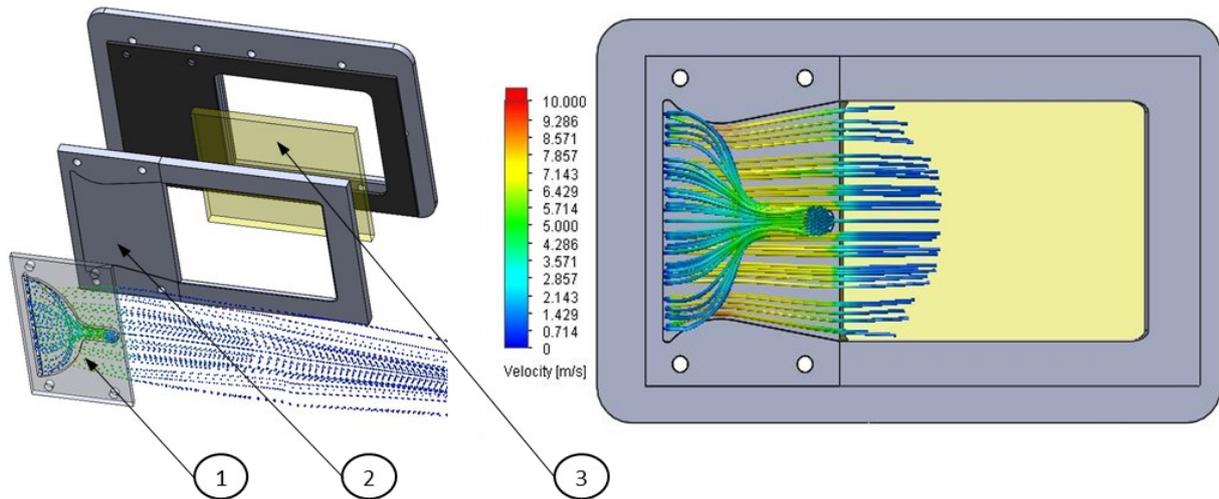


Abbildung 4-3: Laser-Window – Veranschaulichung der Simulationsergebnisse mit FlowXpress

Ein winkelförmiger Steckverbinder für die Gasführung befindet sich auf der Unterseite der Baugruppe und leitet den Gasstrom in den Kleiderbügelverteiler (1). Nach dessen Passieren wird der flache Gasstrom um 180° umgelenkt und in der nächsten Ebene durch eine Düse (2) geringfügig verengt, was die Stromgeschwindigkeit der äußeren Bereiche im Vergleich zum innenliegenden Fluidstrom anhebt. Diese Maßnahme ermöglicht eine verlängerte stabile laminare Strömung im Randbereich des Laser-Windows (3). Zu berücksichtigen ist, dass die anzuströmende Fläche des Laser-Windows planar zur Fläche des Austrittes der Düse liegt. Gemäß der Strömungssimulation erfolgt so eine homogenisierte und lineare Anströmung aus dem schlitzförmigen Austritt der Freiblasvorrichtung. Ihre Stabilität im stationären Betrieb hängt dabei maßgeblich von vorhandenen Störströmungen ab. Diese werden innerhalb einer Laser-Sinter-Anlage charakteristisch durch den Heizstrahler und die erzeugten Konvektionsströme verursacht. So wird im Verlauf über das Laser-Window aus einer stabilen eine instabile laminare Strömung, die ungeachtet vorhandener Störgrößen eine geregelte Flussrichtung aufweist und demnach noch die angedachte Schutzfunktion des Laser-Windows erfüllen kann [180].

Bauplatzform

Die beheizte Bauplatzform ist insbesondere in der frühen Bauphase des Prozesses relevant. Durch die Materialanhäufung unterhalb der dünnen Pulverschicht am Behälterboden sind ein Auskühlen der Bauteile und daraus resultierend deren ungleichmäßige Kristallisation wahrscheinlich. Im fortgeschrittenen Bauprozess isoliert die Pulverschicht ausreichend, um die Bauteile vor vorzeitiger Unterkühlung und übermäßigem Verzug zu schützen. Zu Beginn eines Bauprozesses fehlt diese Schicht jedoch, weshalb im Normalfall mit einer Bauplatzformheizung den oben genannten Effekten entgegengewirkt wird, was signifikant zur Stabilisierung des Prozesses beiträgt. Untersuchungen zufolge ist der Energieeintrag im Bauplatzformbereich jedoch aufgrund der technischen Umsetzung mit Heizdrähten und Heizpatronen zumeist inhomogen. Dies reduziert die Problematik des beginnenden Prozessverzuges, kann diesen Effekt jedoch nicht gänzlich verhindern [160, 182]. Aus diesem Grund wurde im Piston eine Heizschnur in einem Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit und Materialstärke verbaut. Zwei

Versionen wurden im Verlauf der Versuchsreihen realisiert: eine aus reinem Kupfer und eine aus einer Aluminiumlegierung. Die Stärken beider Materialien wurden auf 10 mm festgelegt und es wurde eine Nut von 3,5 mm x 3,5 mm zur Einfassung einer Heizschnur auf der Unterseite vorgesehen. Während auf Letzterer abwechselnd Silikonmatten und ein Distanzblech zur Abdichtung verwendet wurden, diente auf der Oberseite dieser Sandwich-Bauart eine 5-mm-Platte aus CrNi-Stahl dem Schutz der Kupferplatte und der homogenisierten Wärmeabgabe. Die Silikondichtungen wurden durch eine Lage Schichtsilikatplatten vor der Wärme der eingebetteten Heizschnur geschützt [183, 184].

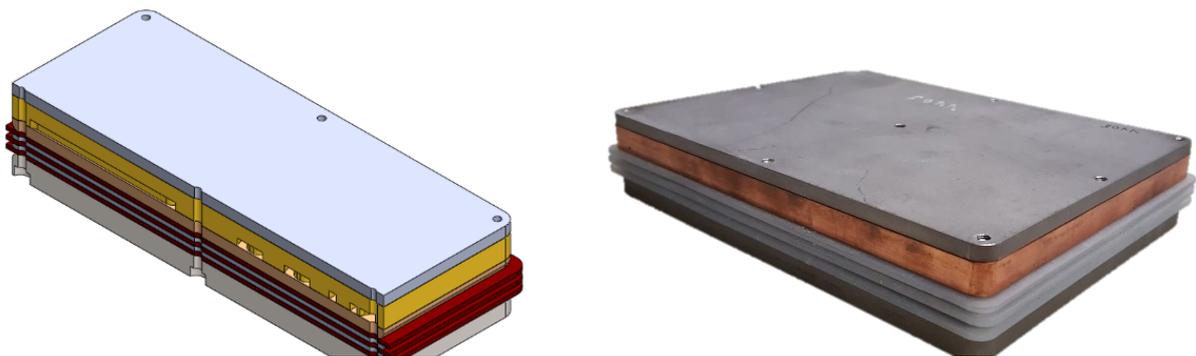


Abbildung 4-4: Gegenüberstellung der Bauplattform aus dem CAD-Modell (Schnittansicht) und jener aus der realisierten Baugruppe

Ergänzend zur Bauplattform wurde ein Baubehälter aus einer Aluminiumlegierung mit insgesamt zwölf Heizpatronen mit jeweils 200 W entwickelt. Diese sind wechselbar und erlauben ein definiertes Heizverhalten, da jede Heizpatrone ein integriertes Thermoelement (Typ J) besitzt und einzeln geregelt wird. Die Heizelemente sind im Wechselbehälter vertikal angeordnet, sodass auf jeder der vier Baubehälterwände drei Heizpatronen mit einer Länge von 250 mm für eine homogene Temperaturverteilung sorgen. Im Wechselrahmen der Anlage befinden sich weitere vier Heizpatronen, die vertikal angeordnet sind und so einen definierten Temperaturgradienten von der Bauraumkammer zum Baubehälter zulassen. Eine Schale aus Schichtsilikat mit einer Stärke von 30 mm isoliert den Baubehälter gegen Einflüsse von außen.

Flexibles Pulverauftragssystem

Ein weiteres Merkmal der Versuchsanlage ist die flexible Gestaltung des Pulverauftragssystems. Dieses kann sowohl mit einer Rakel als auch mit einer gegenläufigen Walze betrieben werden. Die Halterung der Rakel erlaubt einen unkomplizierten Austausch verschiedener Rakeln des Herstellers EOS sowie von Eigenentwicklungen. Die Walze kann ihre Rotationsgeschwindigkeit unabhängig von ihrer translatorischen Bewegungsrichtung ausführen und erlaubt so die Untersuchung des Einflusses der Rotationsgeschwindigkeit auf den Materialauftrag und die resultierenden Prozessgrößen.

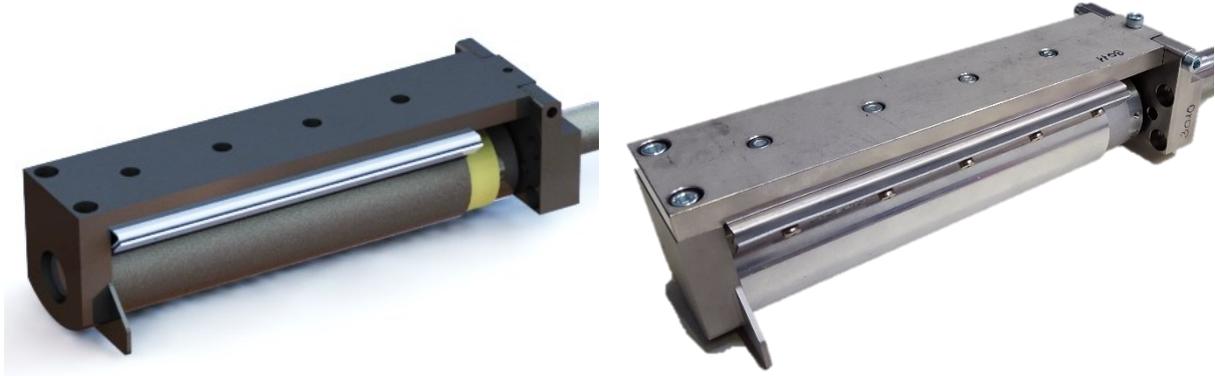


Abbildung 4-5: Gegenüberstellung der Walze aus dem CAD-Modell und jener der realisierten Baugruppe

Eine Herausforderung besteht bei Auftragswalzen zumeist in der massiven Bauart, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist und so zum Auskühlen des Materials beim Auftrag führen kann [121]. Daher wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, um diesen Effekt zu vermeiden: Eine Heizpatrone im Inneren der Walze kann zur aktiven Beheizung verwendet werden, was bei Hochtemperaturwerkstoffen zur prozesssicheren Verarbeitung notwendig sein kann. Eine thermische Entkoppelung wurde durch den Einbau eines Silikatplattenelements realisiert, was den starken Wärmetransport in den unbeheizten, kühleren Getriebekasten der Anlage verhindert.

Prozesskammer und Temperaturmanagement

Die Prozesskammer verfügt über einen Mehrzonen-Heizstrahler und emittiert im infraroten Spektralbereich der schnellen Mittelwelle. Dies ermöglicht eine rasche Reaktion auf Regelgrößenänderungen und bietet einen hohen Absorptionsgrad bei der Verwendung von Polymeren. Ausgestattet ist der Baubehälter mit drei beheizten Zuführungen für das Inertgas, wovon eine an den Vorratsbehältern liegt und eine über der Laser-Window-Spülung realisiert wird. Zur Vermeidung von Kältebrücken wurde das gesamte Gehäuse der Prozesskammer mit 30 mm starken Schichtsilikatplatten ummantelt und so vom Gestell und den anderen Komponenten thermisch entkoppelt. Der Zugang zur Baukammer wurde durch eine isolierte Schwenktür realisiert, die klein gehaltene und vierfach verglaste Sichtfenster zur visuellen Prozesskontrolle besitzt. Innenliegende Kanten wurden mit Silikonnähten versehen, um die Inertgasatmosphäre gewährleisten zu können. Eine kontinuierliche Überwachung des Restsauerstoffs wurde über eine im Bauraum positionierte Breitband-Lambda-Sonde umgesetzt [185].

Aufgrund des hohen Einflusses der Oberflächentemperatur auf die späteren Bauteileigenschaften wurde bei der Auslegung des Heizstrahlers besonders darauf geachtet, dass eine möglichst homogene Oberflächentemperatur vorherrscht. Untersuchungen zeigen, dass der kumulierte Wärmeeintrag des Heizstrahlers nicht nur auf der Oberseite zu Temperaturunterschieden führt, sondern auch im fortgeschrittenen Bauprozess bis hin zur Abkühlung eine Rolle spielt [186–189]. Aus diesem Grund wurde ein Heizstrahlersystem mit acht Kanälen zur Regulierung der Heizstrahler ausgelegt, wovon zwei Regelkreise für die

Vorratsbehälter und sechs für das Baufeld verwendet werden. Die Regelgröße wird von insgesamt drei Punktpyrometern vom Typ Optris CT LT ermittelt, was Istwerte für den Bauraum und die jeweiligen Vorratsbehälter liefert. Zum Aufheizen wurden Infrarotstrahler der schnellen Mittelwelle verwendet. Diese zeichnen sich durch eine kurze Aufheizzeit von 4 s und eine emittierten Wellenlänge im Maximum von 1,4 μm bis 1,7 μm aus [190]. Auf Grundlage dieser Daten wurde ein flexibel anpassbares und dynamisches Heizstrahlersystem umgesetzt, das nach Messung eine Oberflächentemperatur mit einer Temperaturdifferenz (ΔK) zwischen Cold- und Hot-Spot im Bereich von maximal 3,45 K aufweist (vgl. Abbildung 4-6). Ermittelt wurde dieser Wert mit einer flächendeckenden Temperaturmessung einer Thermographie-Kamera. Das verwendete System ist eine Infratec ImageIR 5345 mit MCT (HgCdTE)-Detektor und einem kalibrierten Messbereich von 2,5 μm bis 5,5 μm [191]. Die Messung wurde im laufenden Bauprozess unter einem Winkel von 25° zur Baufeldnormalen ohne Korrekturfaktoren durchgeführt, da lediglich die Temperaturverteilung für diese Betrachtung relevant ist.

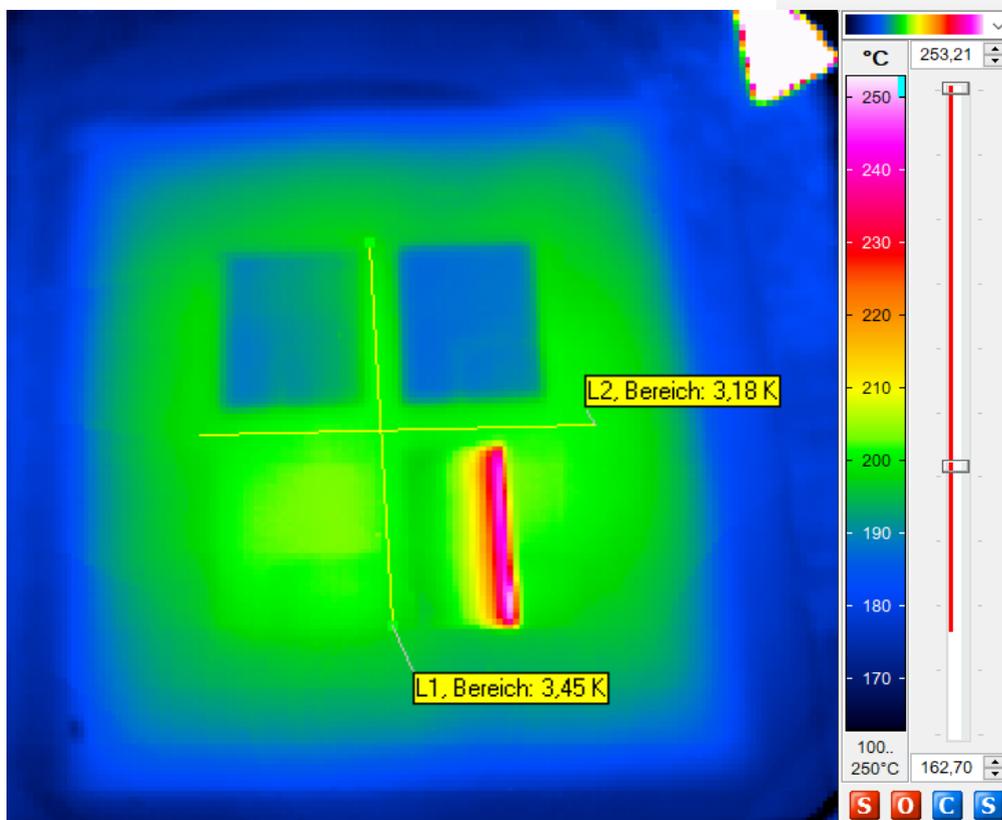


Abbildung 4-6: Thermogramm des Bauraumes zur Ermittlung der Temperaturverteilung während eines Bauprozesses

Der Wert von 3,45 K ist im Vergleich zu bestehenden oder aufgerüsteten Anlagensystemen mit einer Temperaturdifferenz von 5 K bis 10,6 K als signifikante Verbesserung zu sehen [4, 189]. Es gilt bei der Betrachtung der Temperaturhistorie jedoch weiterhin zu beachten, dass alle acht Regelkreise des Heizstrahlers auf eine Stellgröße reagieren. Somit ist der Einfluss, der von massiven Bauteilen und deren Temperaturstrahlung ausgeht, nicht berücksichtigt.

Optische Komponenten

Während die bisher beschriebenen Innovationen durch die Behebung bestehender Schwachstellen in kommerziellen Anlagen erreicht wurden, bezieht sich die nachfolgende Innovation auf eine neuartige Scanstrategie und Energieeinbringung. Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, haben sich zwei verschiedene Scannersysteme in den Anlagensystemen für Laser-Sinter-Anlagen auf dem Markt etabliert, die entweder mit aktiven oder passiven Komponenten die Fokusalagenverschiebung beim Auslenken der Scannerspiegel kompensieren: die F-Theta-Linse und die dynamische Fokussiereinheit. Um die Energieeinbringung in das Pulverbett zu optimieren, wurde an der aufgebauten Versuchsanlage die Spotaufweitung durch gezielte Defokussierung auf der Pulverbettoberfläche erreicht. Diese wurde durch eine definierte Fehlstellung der dynamischen Fokussiereinheit realisiert.

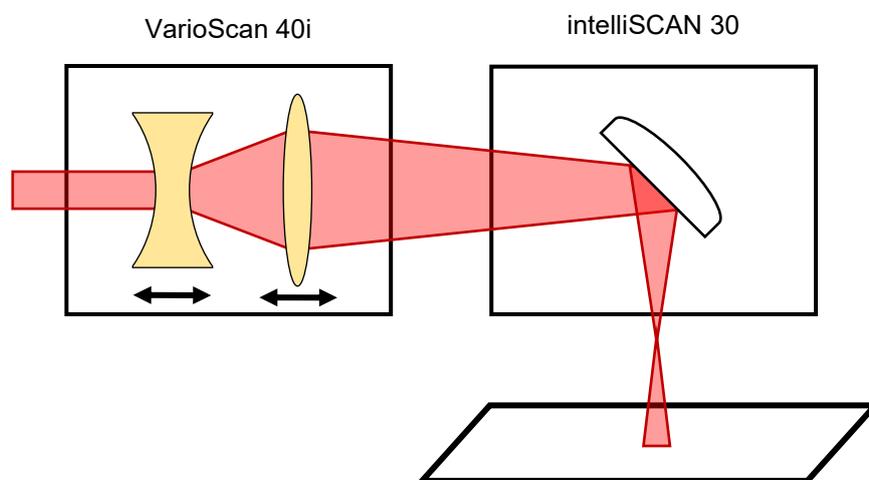


Abbildung 4-7: Laserspotvergrößerung durch definierte Fehlstellung der dynamischen Fokussiereinheit

Angelehnt an die Maschinenrichtlinie DIN ISO 12100 wurde die Fokussierung auf die maximale Auslenkung der Fokussiereinheit auf der Pulverbettoberfläche ausgelegt [192]. Folgerichtig wurde die Spotaufweitung durch eine Erhöhung der Fokussierung in den Bauraum umgesetzt. Durch dieses Vorgehen ist sichergestellt, dass der Laser auch bei einer Fehlstellung der Fokussiereinheit nicht genug Energie aufbringen kann, um den Baubehälterboden zu beschädigen oder zu durchdringen.

Die Defokussierung des Laserspots führt dazu, dass die Energie des Lasers auf eine größere Fläche trifft, und erlaubt bei konstanter Verfahrensgeschwindigkeit eine erhöhte Laser-Pulverbett-Wechselwirkungszeit. So kann mehr Energie in das Pulverbett eingebracht werden und die geringere Heizrate schädigt das Material weniger. Besonders signifikant ist die Möglichkeit der Prozessbeschleunigung bei großen Belichtungsflächen. Um sie sicherzustellen, wurde für die Versuchsreihen ein FEHA-SM600E-Laser verwendet. Dieser zeichnet sich durch eine Leistung von bis zu 600 W im Dauerbetrieb, eine CO₂-typische Wellenlänge von 10,6 μm und eine lineare Polarisation aus [193]. Damit verfügt der Laser über ausreichende Energiereserven, die voraussichtlich bei der Vergrößerung des Laserspots benötigt werden.

Akustooptischer Modulator

Nicht berücksichtigt bei der Planung der Ressourcen wurden die erhöhte Fall- und Rise-Time des Lasers, die über das gesamte Leistungsspektrum des FEHA-Systems oberhalb von 100 μs liegen. Mit diesen hohen Ein- und Ausschaltzeiten können im Bauprozess kurze Scanvektoren nicht mit ausreichender Qualität erzeugt werden. Weiterführend könnte bei diesem Lasersystem die erhöhte Schaltgeschwindigkeit zu Fehlzündungen führen, was den Bauprozess durch inhomogene Energiezuführung destabilisiert. Zur Realisierung der für den Laser-Sinter-Prozess geforderten Schaltzeiten wurde ein sogenannter akustooptischer Modulator (AOM) verwendet. Dieses Bauteil basiert auf dem Prinzip der Bragg-Beugung und kann durch die Verwendung eines Germanium-Kristalls den eingehenden Laserstrahl ablenken. Durch das Einkoppeln von Schallwellen in den Kristall können sowohl die Auslenkung als auch die Leistung des Laserstrahls definiert gesteuert werden. Die Optik war aus sicherheitstechnischen Gründen so ausgelegt, dass der AOM den Laserstrahl im nicht angeregten Zustand in eine Strahlfalle und im eingeschalteten Fall in den vorgesehenen Strahlengang leitet. Die daraus resultierenden Schaltzeiten befinden sich im Bereich um 11 μs . Damit sind die Fall- und Rise-Time des Systems auf einem besseren Stand als bei standardmäßig verwendeten Lasersystemen in bestehenden Anlagensystemen, deren Fall- und Rise-Time typischerweise bei ca. 75 μs liegen [155, 194]. Der verwendete AOM besitzt eine Apertur von 12 mm Höhe und 30 mm Breite, um den hohen Laserleistungen standzuhalten und die thermischen Effekte zu minimieren. Obwohl diese Auswahl gemäß dem Datenblatt die bestmögliche Option darstellt, entstanden bereits bei Laserleistungen oberhalb von 200 W thermische Linseneffekte, die eine Degradation des Laserstrahls hervorrufen. Diese waren so groß, dass eine undefinierbare Verschiebung der Fokusslage um bis zu 7 mm beobachtet wurde. Als Folge dieser unerwarteten Problemstellung war der Laser lediglich bis maximal 200 W verwendbar, sodass ca. 400 W Leistungsreserve zugunsten einer konstanten Fokusslage nicht genutzt werden konnten.

Variabler Laserspotdurchmesser

Ziel des vergrößerten Laserspots waren die Produktivitätssteigerung großer Querschnitte und eine Optimierung des Energieeintrages. Gleichzeitig mussten die Detailgetreue und die Prozessstabilität erhalten bleiben. Diese Zielsetzung konnte durch die dynamische Spotgröße innerhalb eines Bauteilquerschnittes realisiert werden. Innenliegende Bereiche wurden hierbei mit einem großen Spotdurchmesser erzeugt und in filigranen Bauteilbereichen wurde der Spotdurchmesser – und damit einhergehend der Hatch (Spurbreitenabstand) – verringert, bis er schlussendlich im Fokus auf der Bauteilkontur lag. Um diese Zielsetzung erreichen zu können, war eine Anpassung der gängigen Scanstrategie an die Verwendung größerer Fokussdurchmesser notwendig. Das nachfolgende Beispiel in Abbildung 4-8 der Kantenerzeugung mittels eines vergrößerten Spotdurchmessers soll die Herausforderung der Verwendung von mehreren verschiedenen Spotdurchmessern aufzeigen.

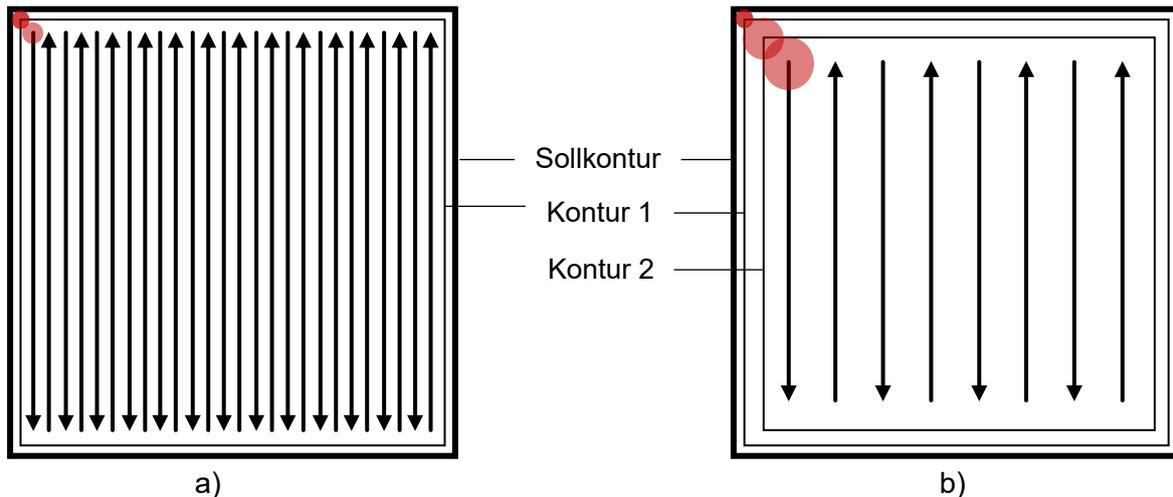


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Scanvektoren mit a) fixem Laserspot und b) variablem Laserspot

Zu erkennen ist der Umstand, dass lediglich eine Konturlinie für die Erstellung eines Bauteilquerschnittes mit kleinen Spotgrößen, jedoch viele einzelne Fülllinien (Hatches) notwendig sind. Im Vergleich dazu sind für große Spotdurchmesser wenige Hatchlinien, allerdings mehrere Konturen mit variablen Spotdurchmessern erforderlich. Wäre der Spotdurchmesser konstant, so würden signifikante Abbildungsfehler in Form von Abrundungseffekten der äußeren Kanten auftreten. Vorteilhaft bei einem vergrößerten Spot ist die verlängerte Wechselwirkungszeit zwischen Pulver und Laser. Diese kann dazu führen, dass das Material schonender aufgeschmolzen und nicht überhitzt wird. Die erzeugte Wärme kann durch innere Wärmeleitungseffekte verbessert an die unterliegenden Schichten abgegeben werden und führt nicht so schnell zu Zersetzungseffekten während der Belichtung. Bei den innenliegenden Konturen eines vergrößerten Laserspots kann theoretisch auf die Präzision der äußeren Kontur verzichtet werden, sodass hierbei zusätzlich von einer signifikanten Reduzierung der Belichtungszeit auszugehen ist.

4.3 Reduzierung der Belichtungszeit

In diesem Kapitel erfolgt eine theoretische Betrachtung der Innovationen und deren Einflusses auf die Produktivitätssteigerung sowie die Verbesserung der Reproduzierbarkeit im Vergleich zum Stand der Technik. Ausgehend von einem maximalen Spotdurchmesser von 2 mm werden die Möglichkeiten und die Notwendigkeiten neuer Scanstrategien betrachtet.

Die Prozesszeit setzt sich im Allgemeinen aus den Zeiten für Achsbewegungen, Pulverauftrag, Vorheizen und Belichten zusammen. Die nachfolgende Betrachtung bezieht sich auf das Belichten der Bauteilquerschnitte, also auf die unmittelbare Erzeugung der Bauteile im Prozess. Wie beschrieben, können anhand von größeren Spotdurchmessern Bauteilquerschnitte mit einer signifikant geringeren Anzahl von Scanlinien erzeugt werden. Hierdurch ergeben sich die größten Potenziale der Produktivitätssteigerung. In Abbildung 4-9 wurde eine repräsentative Querschnittsfläche einer liegenden Zugprobe von 170 mm x 10 mm angenommen. Verglichen werden aktuelle Anlagensysteme mit einem Spurbreitenabstand von 0,25 mm und einer Scangeschwindigkeit von 3 m/s bis zu 16 m/s.

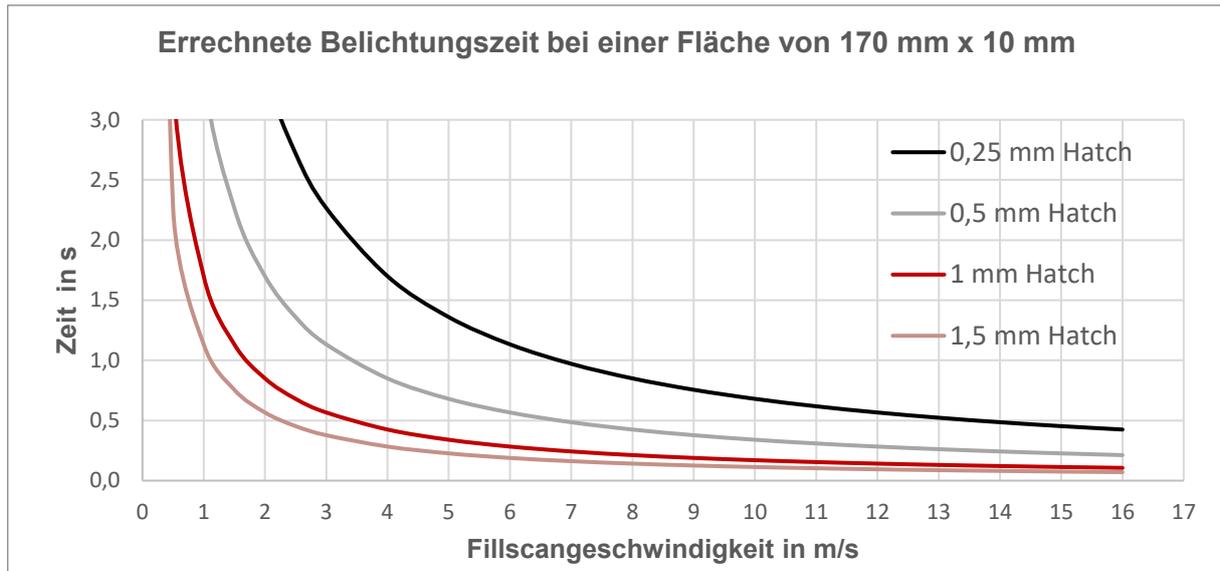


Abbildung 4-9: Theoretische Belichtungszeit als Funktion des Hatchabstandes

Unter der Berücksichtigung, dass hierbei keine Nebenzeiten, großvolumigen Bauteile und konventionellen Scanstrategien aufgeführt sind, lassen sich bei einer Scangeschwindigkeit von 4000 mm/s mit einem verwendeten Hatchabstand von 1 mm theoretische Produktivitätssteigerungen der Belichtung von 400 % erreichen. Diese erste Einschätzung ist jedoch fiktiv, da die Belichtungszeit von weiteren Faktoren wie Sprüngen des Laserspots, der Konturbelichtung und der gewählten Scanstrategie abhängt.

Unter der Prämisse, dass die Detailgetreue des Prozesses erhalten bleiben soll, kann davon ausgegangen werden, dass mehrere Laserspotdurchmesser zur Erzeugung eines Querschnittes herangezogen werden müssen. So kann eine für das PBF-LB/P eher unübliche Scanstrategie wie Hülle-Kern verwendet werden, um unterschiedliche Spotgrößen miteinander kompatibel zu machen. Eine genauere Betrachtung der vorherrschenden Bauteilquerschnitte, der notwendigen Scanvektoren und der Nebenzeiten erlauben eine präzisere Vorhersage der resultierenden Prozesszeit.

4.4 Realisierung der Versuchsanlage

Die aufgezeigten Innovationen und Ansätze wurden anhand einer Versuchsanlage am RTC-Duisburg umgesetzt. Die Realisierung der Optikkomponenten erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ILT [155]. Bei den zu betrachtenden Versuchsreihen wurden ausschließlich die gaußförmigen Intensitätsverteilungen des Lasers berücksichtigt. Eine Übertragbarkeit auf bereits bestehende Laser-Sinter-Anlagen kann so sichergestellt werden. Der Aufbau der Versuchsanlage umfasst einen Laser, einen Strahlaufweiter, einen AOM, eine dynamische Fokussiereinheit und einen Scanner (vgl. Abbildung 4-10). Der Rohstrahl des Lasers wurde auf den maximalen Wert der vorhandenen Aperturen aufgeweitet, um die optischen Komponenten zu schonen und einen möglichst geringen Fokusdurchmesser realisieren zu können (vgl. Formel 2-1).

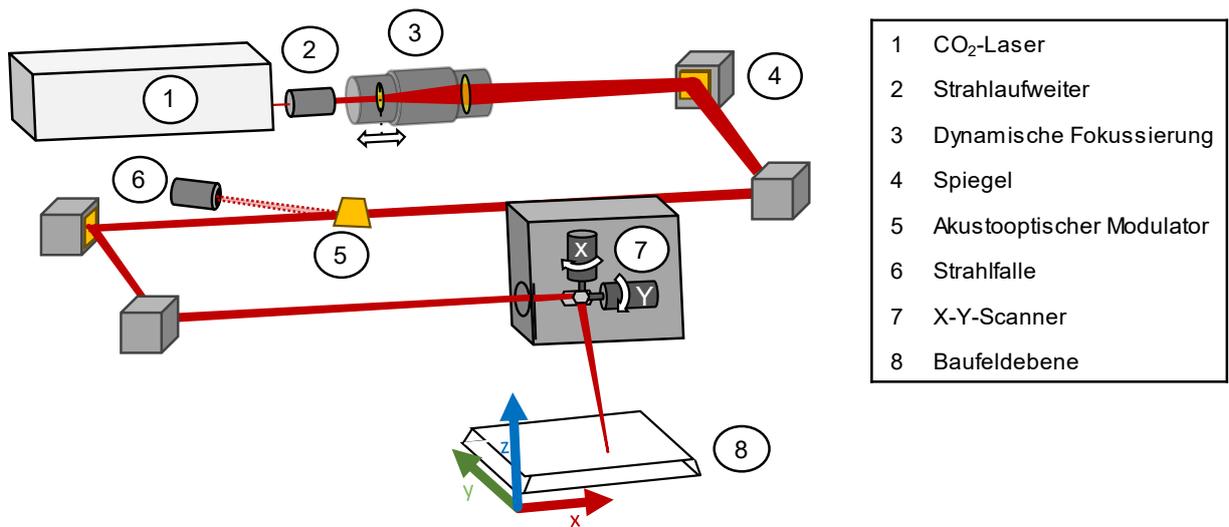


Abbildung 4-10: Optiksystem der Versuchsanlage

Gemäß den vorliegenden Datenblättern und der Auslegung wäre ein maximaler Fokusdurchmesser von 4,3 mm realisierbar. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Eingangsstrahldurchmesser von 14 mm in die Fokussiereinheit umgesetzt wird. Dieser Wert ist jedoch nur mit hohen Leistungsverlusten und Beugungseffekten realisierbar, weshalb auf die Aperturgröße ein Quotient von 1,5 angewendet wurde. So ergibt sich eine maximale Eingangsgröße des Strahls von 9,3 mm. Die Spotgrößen des Systems belaufen sich auf einen Durchmesser von minimal 0,47 mm und maximal 2 mm. Diesbezüglich ist anzumerken, dass der minimale und der maximale Durchmesser mit zwei unterschiedlichen Betriebspunkten des Lasers erreicht wurden. Der erste Betriebspunkt liegt bei einer Ausgangsleistung des Lasers von 50 W und der zweite bei 206 W. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades der optischen Komponenten ergibt sich somit eine maximale Laserleistung auf der Baufeldebene von 30,9 W oder 134 W, in Abhängigkeit vom gewählten Betriebspunkt. Mit diesen Einstellungen können sowohl kleine Industrieanlagen abgebildet als auch die Grenzen des Energieeintrages im Vergleich zum Stand der Technik überwunden werden. Die aufgebaute Versuchsanlage ist in Abbildung 4-11 dargestellt.



Abbildung 4-11: Versuchsanlage im betriebsbereiten Zustand

Die Versuchsanlage ermöglichte die Untersuchung. Die nachfolgende Tabelle zeigt die technischen Spezifikationen der Versuchsanlage im Überblick.

Tabelle 4-1: Spezifikationen der Versuchsanlage

Merkmal	Anlagenspezifikation
Bauraumvolumen (x/y/z)	190 x 140 x 290 mm
Präzisionsoptik	dynamische Fokussiereinheit
Lasertyp	FEHA SM600E 600 W
Laserleistung	bis zu 134 W auf der Baufeldebene
Laserspotdurchmesser	von 0,47 bis zu 2 mm
Scannergeschwindigkeit	bis zu 4000 mm/s
Geschwindigkeit Pulverauftrag	bis zu 600 mm/s mit Rakel oder Walze
Heizstrahler	8 Zonen mit kumulierten 3200 W
Bauraumheizer	16 Heizpatronen mit kumulierten 3200 W
Bauplatzform	eingebettete Heizschnur mit 250 W
Aufstellfläche	2,6 m x 1,34 m
Software	EOSPRINT / SLM Machine, CODESYS

5 Versuchseinrichtung und Durchführung

Neben der im vorherigen Kapitel vorgestellten Versuchsanlage wurden zusätzlich kommerzielle Anlagensysteme herangezogen, darunter eine DTM 2500 HS ATC und eine EOS Formiga P100.

Die DTM 2500 wurde mit einem HS- und ATC-Upgrade (vgl. Kapitel 3.2.4) und einem eigens entwickelten Heizstrahlersystem auf den Stand aktueller Anlagentechnik gebracht. Das Heizsystem besitzt insgesamt 32 Zonen und besteht aus Heizstrahlern der schnellen Mittelwelle, die ihr Wellenlängenmaximum im Spektrum von 1,4 μm bis 1,74 μm emittieren. So wird einerseits eine homogene Temperierung des Baufeldes und andererseits eine Minimierung der Nebenzeiten erreicht. Der Auftragsmechanismus wurde dagegen im Originalzustand belassen und erlaubt lediglich die Variation der Auftragsgeschwindigkeit. Die Rotation der Walze ist durch eine feste Verzahnung direkt von Letzterer abhängig und kann nicht variiert werden.

Die nachfolgenden Versuchsreihen zielten darauf ab, den Laserspotdurchmesser zu vergrößern und die Versuchsanlage für die Produktion von Bauteilen zu qualifizieren. Im Zuge dessen wurden kommerzielle Anlagensysteme als Referenzpunkte eingesetzt, um die anlagenspezifischen Unterschiede und Gemeinsamkeiten im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik zu identifizieren. Dies sollte die Entwicklung von Methoden zur Qualifizierung neuer Parameter erleichtern. Eine Vorstellung der verwendeten Prüfkörper sowie deren Herstellungsbedingungen hilft dabei, die Vorgehensweise dieser Arbeit zu verdeutlichen.

5.1 Identifizierung geeigneter Anlagenparameter

Bei einer neu aufgebauten Versuchsanlage sind die geeigneten Parameter zur stabilen Prozessführung neu zu definieren. Angefangen wurde mit den anlagenspezifischen Prozessparametern, wie sie bei der Materialqualifizierung neuartiger Materialsysteme bei kommerziellen Anlagen angewendet werden. Dies beinhaltete die Ermittlung geeigneter Auftragsparameter, die Sicherstellung der Materialzufuhr und das Temperaturmanagement innerhalb der Prozesskammer und insbesondere des Bauraumes. Eine Charakterisierung der in das Baufeld eingebrachten Laserleistung unter variierenden Fokusdurchmessern stellte dabei eine notwendige Bedingung dafür dar, robuste Belichtungsparameter zu ermitteln.

Die Belichtungsparameter wurden systematisch erst eindimensional, dann zweidimensional und darauffolgend in dreidimensionaler Konstellation betrachtet. Dabei dienten kommerzielle Anlagen als Stützstelle zur iterativen Entwicklung der Parameter innerhalb der Versuchsanlage. Die eindimensionale Untersuchung war die Charakterisierung einer Einzelspur, während die zweidimensionale Auswertung die erfolgreiche Generierung einer Bauteilschicht mit variierendem Fokus analysierte. Sobald verbundene Einzelschichten zu einem Schmelzbad zusammenfließen, wurde eine zweidimensionale Betrachtung vorgenommen. Die dreidimensionale Untersuchung erfolgte, wenn mehrere Schichten eines Bauteils erfolgreich generiert und miteinander gefügt waren. Eine Form der dreidimensionalen Belichtungsparameter stellten sogenannte Dichtewürfel oder -quader dar, die bei der Auswertung der einzustellenden Belichtungsparameter unter anderem Rückschlüsse auf den Energieeintrag zuließen.

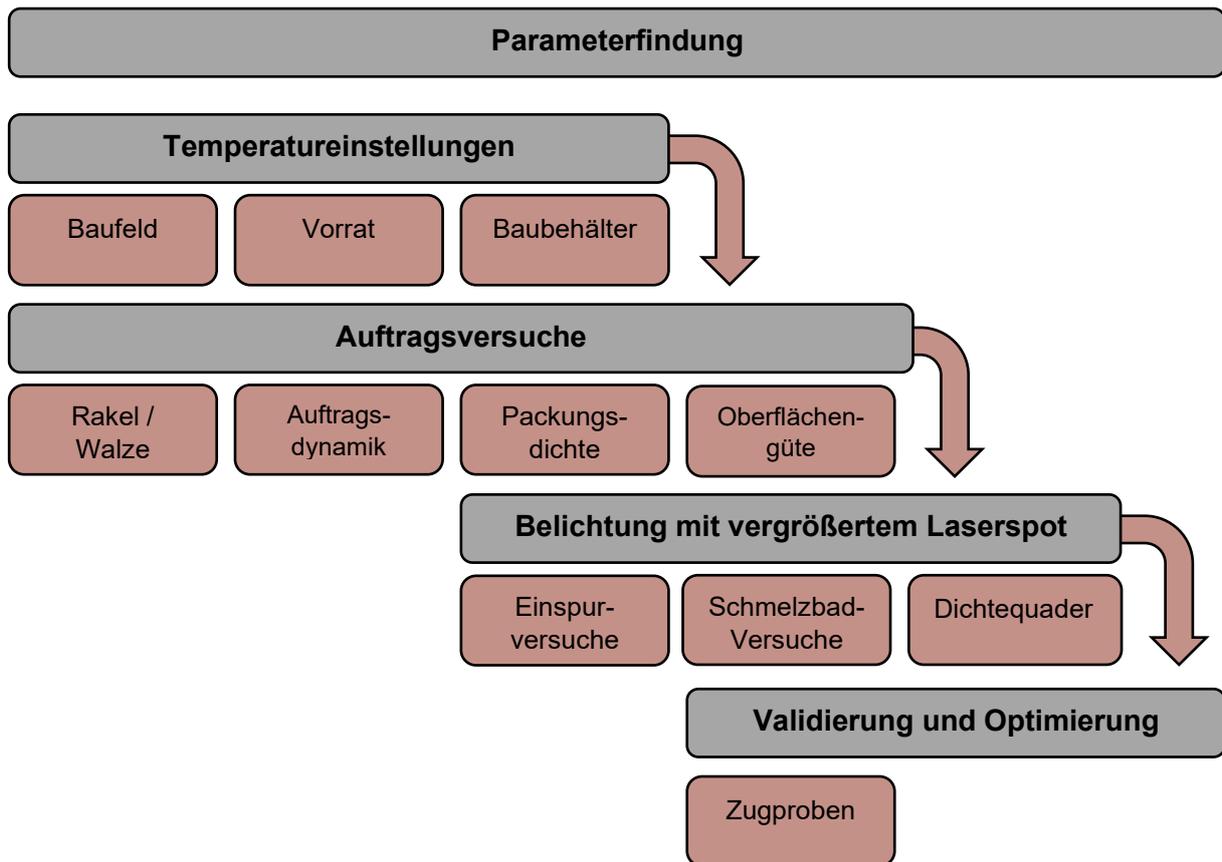


Abbildung 5-1: Schaubild zur Parameterfindung an der Versuchsanlage

5.1.1 Untersuchung des Pulverauftrags

Einer der vier wesentlichen Prozessschritte des PBF-LB/P ist der Pulverauftrag [121]. Das Fließ- und Auftragsverhalten von Pulver kann mit diversen Additiven positiv beeinflusst werden und ist maßgeblich für die Prozessstabilität und die Reproduzierbarkeit verantwortlich [195]. Alternativ befassen sich Anlageninnovationen mit der Optimierung des Pulverauftrags. In [120] wurde erstmalig eine erhöhte Kompression des Pulverbettes im Prozess durchgeführt. Als Folge daraus haben sich alle mechanischen Eigenschaften der Bauteile verbessert, wenn auch die Prozessführung signifikant erschwert wurde. Der Einfluss der Packungsdichte auf die Dichte lasergesinterter Bauteile wurde ergänzend in [196] dargestellt. Aufgrund einer erhöhten Packungsdichte nehmen die Eindringtiefe des Lasers und auch die Porosität der Bauteile ab. Weiterführende Untersuchungen bezüglich der erreichten Packungsdichte mit unterschiedlichen Durchmessern und Rotationsgeschwindigkeiten der Walzen sowie einem Vergleich zum Klingenauftrag wurden in [197, 198] durchgeführt, um die anlageninhärenten Unterschiede im Auftrag zu verdeutlichen.

Die Auftragsversuche hatten das Ziel, einen zuverlässigen und qualitativ hochwertigen Pulverauftrag der Einzelschichten zu gewährleisten. Im Allgemeinen wurden Schichtstärken von 0,08 mm bis 0,15 mm verwendet, da hierbei ein Optimum zwischen Produktivität und inhärenten Abbildungsfehlern durch den Treppenstufeneffekt vorliegt. Die Pulverbettoberfläche sollte glatt und möglichst eben sein, ohne Wellen und Fehlstellen durch Anhaftungen am Beschichter oder Verrücken der im Bauraum liegenden Bauteile. Ist der Auftrag zu langsam, erhöhen sich die Nebenzeiten und das Verfahren wird unproduktiver. Wird

der Auftrag dagegen zu schnell durchgeführt, können Oberflächendefekte, ein Pulverüberwurf an senkrecht zur Auftragsrichtung liegenden Bauteilkanten oder Verunreinigungen der Anlagentechnik durch erhöhte Staubentwicklung auftreten. Bei der Verwendung eines neuen Anlagensystems sind die Parameter für einen soliden Pulverauftrag neu zu bestimmen. Im aufgebauten Anlagensystem kann zwischen Auftragsrakel und -walze gewählt werden, wobei sich die Systematik der Parameterfindung bis auf wenige Ausnahmen ähnelt.

Zur Bestimmung des optimierten Pulverauftrags wurden innerhalb der Versuchsanlage zwei Auftragsrakeln und eine -walze mit insgesamt drei verschiedenen Materialien untersucht. Die Auftragsgeschwindigkeit wurde beim Pulverauftrag mittels gegenläufiger Walze konstant bei 127 mm/s gehalten, während die Rotationsgeschwindigkeit in neun Abstufungen von 5,5 U/min bis zu 203,7 U/min variiert wurde. Die Auftragsversuche mit Rakel wurden hingegen mit höheren Auftragsgeschwindigkeiten von bis zu 607 mm/s durchgeführt.

Beim für diese Arbeit verwendeten PA 12 handelt es sich um das Versuchspulver von EOS mit der Bezeichnung PA 2200 [199]. Das PA 6 hingegen bestand aus Restbeständen des von Solvay vertriebenen SINTERLINE® PA6 (XP 1501/F) [200] bzw. des heutigen ULTRASINT® PA6 von BASF [201]. Beim Polybutylenterephthalat (PBT) handelt es sich um ein Prototypenmaterial, das als Versuchspulver zur Verfügung stand und bei kommerziellen Anlagen einen qualitativ niedrigen Pulverauftrag zulässt. Nach jeder Schicht wurden Aufnahmen der Oberfläche unter Seitenbelichtung realisiert (vgl. Abbildung 6-2). Die so entstehenden Schatten auf der Pulveroberfläche lassen anhand einer Schwellenwertanalyse quantitative Bewertungen des Pulverauftrags zu.

Der Schwellenwert wurde mit der Software GIMP Version 2.10.28 anhand eines fest platzierten Bildausschnittes von 1000 x 2000 Pixeln ermittelt. Somit wurden 2 MP für die Schwellenwertanalyse herangezogen. Die Weißanteile auf dem Bild wurden entfernt und in ein Histogramm überführt, um die prozentualen Anteile der Verschattung zu quantifizieren.

Das Auftragsverhalten einer Pulverschüttung hängt unter anderem von deren Temperatur ab [202–204]. Aus diesem Grund wurde als Erstes die materialabhängige Baufeldtemperatur mittels Glazing-Point-Versuch bestimmt. Ziel dieser Maßnahme war es, die Baufeldtemperatur möglichst nahe an den Schmelzpunkt des Materials zu führen, um die Unterschiede der DDK und der in der Anlage angezeigten Temperaturen anzupassen (vgl. Abbildung 2-12). Hierzu wurde das Material im Bauraum aufgetragen und die Anlage wurde inertisiert sowie gleichmäßig hochgeheizt. Das Hochheizen erfolgte dabei kleinschrittig in 0,5-°C-Schritten, bis sich ein erster Glanz auf der Oberfläche bildete. Die Temperatur im Moment des Aufschmelzens der Pulverbettoberfläche ist dabei der Glazing-Point.

Die Ausformung und Homogenität dieses Aufschmelzens können über eine Sichtkontrolle bereits erste Aufschlüsse über den homogenen Energieeintrag der Heizstrahler liefern. Eine Thermographiekamera kann ergänzend verwendet werden, um die Homogenität der Oberflächentemperatur qualitativ und quantitativ bewerten zu können. Hierzu müssen im Moment der Messung alle Störquellen abgeschaltet werden, um ein aussagekräftiges Thermogramm zu erhalten.

5.1.2 Untersuchungen der Energieeinbringung

Die definierte Energie zur Erzeugung der Bauteilquerschnitte wird beim PBF-LB/P vom Laser zur Verfügung gestellt. Folglich ist eine genaue Bestimmung der im Baufeld ankommenden

Energiemenge unerlässlich, um den Energieeintrag im Prozess steuern zu können. Hierzu wurde eine Laserleistungsmessung nach dem Passieren der Optik auf der Baufeldebene durchgeführt. Verwendet wurde das Messsystem Ophir BeamTrack F150A-BB-26 und die Auswertung erfolgte in Kombination mit der Software StarLab [205]. Die Laserleistung wurde schrittweise in 10 %-Intervallen von 0–100 % angepasst.

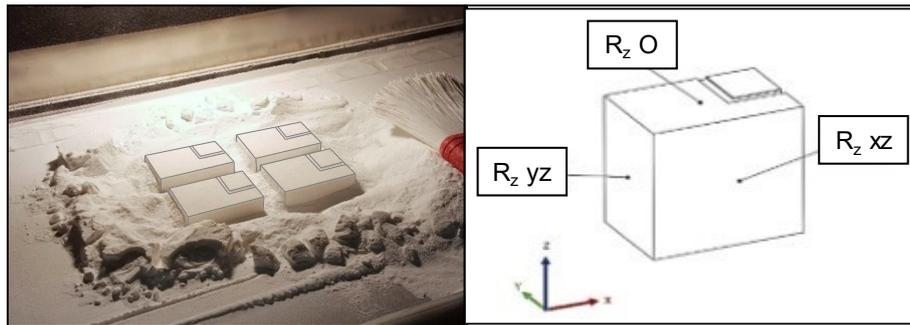
Als Ergebnis entstand eine Laserleistungskennlinie, die in die Anlagensoftware implementiert wurde. Dies ermöglichte im Betrieb eine Einstellung der Laserleistung in Watt und erleichterte die Planung der Versuchsreihen. Da die Versuchsanlage mit zwei Betriebspunkten lief, wurden zwei Laserleistungskennlinien erstellt und hinterlegt.

5.2 Durchgeführte Untersuchungen und verwendete Probekörper

In diesem Kapitel werden die Versuche erläutert, die mit Probekörpern durchgeführt wurden. Letztere sowie die damit einhergehenden Zielgrößen werden beschrieben und geben einen ersten Eindruck von der systematischen Erarbeitung der Parameter. Versuche zur Pulverkonsolidierung und zum Energieeintrag stellten die Grundlage für die Versuche mit aufgeweitetem Laserspotdurchmesser dar. Die Parameterfindung für größere Laserspotdurchmesser erfolgte systematisch anhand der Betrachtung von Einzelspuren und Schmelzbädern sowie anhand von Dichteprüfkörpern. Für eine anschließende Validierung und Optimierung der mechanischen Eigenschaften wurden Zugprüfkörper verwendet.

5.2.1 Versuche zur Pulverpackungsdichte

Ein Vorteil des PBF-LB/P ist die Fertigung von Bauteilen ohne Stützkonstruktionen. Daraus resultierende Vorteile gehen mit der Anforderung einher, dass das umliegende Pulverbett dicht genug ist, um die entstehenden Bauteile fixieren zu können und die resultierende Schmelze daran zu hindern, die umliegende Pulverschüttung zu infiltrieren. Zudem entstehen beim Phasenübergang in die Schmelze inhärent weniger Poren bei höherer Packungsdichte. Eine optimierte Pulverschüttung hat demnach positive Auswirkungen auf die Prozessstabilität, die resultierenden Bauteileigenschaften und die Oberflächenrauheit der Bauteile [21, 120]. Die im Bauprozess vorherrschende Packungsdichte wurde anhand von dünnwandigen Bauteilen, die einen innenliegenden Hohlraum aufweisen, festgestellt. Die Packungsdichtecontainer wurden während ihrer Fertigung im Prozess mit dem Pulver befüllt und versiegelt. Sie wurden aus dem Bauprozess entnommen, gesäubert und mit dem innenliegenden Pulver gewogen. Anschließend wurden die Container geleert, das innere Volumen wurde mit einem Messschieber (Auflösung 0,01 mm) bestimmt und die Masse der vollständig geleerten und gereinigten Packungsdichtecontainer wurde anhand einer Feinwaage (Auflösung 0,001 g) ermittelt. Ausgestattet waren diese Bauteile mit einer Sollbruchstelle, die das Entleeren vereinfachte. Die verwendeten Packungsdichtecontainer wiesen mit Ausnahme der Sollbruchstelle eine Wandstärke von 1 mm auf und die inneren Maße von 30 mm x 45 mm x 45 mm erzeugten ein großes Pulverprobenvolumen von 60 750 mm³. Damit konnte sichergestellt werden, dass die Randeffekte möglichst wenig Einfluss auf die Messung der Packungsdichte hatten und die Flächen für darauffolgende Messungen der Oberflächenrauheit ausreichend waren. Letztere wurde auf der Oberseite, der Unterseite sowie den beiden vorhandenen Seitenflächen in Aufbaurichtung untersucht. Differenziert wurde hierbei zwischen den Seitenflächen, die parallel zur Auftragsrichtung (Fläche XZ) liegen, und jenen, die senkrecht zur Auftragsrichtung (Fläche YZ) liegen.



a) Probekörperorientierung im Bauraum

b) Messflächen der Probekörper

Abbildung 5-2: Probekörper und Messstellen

Mit der Versuchsanlage wurden zwei Variationen der Rakel, eine in flacher (ID-Nr.: 2200-4119) und eine in abgerundeter (ID-Nr.: 1213-0109) Ausführung, untersucht (vgl. Abbildung 5-3). Beide Alternativen haben unterschiedliche Anwendungsfälle beim PBF-LB/P. Die abgerundete Klinge ist für die Standardmaterialien wie PA 2200 optimiert, während die flache Version eher für Sondermaterialien wie thermoplastische Elastomere (TPE) oder thermoplastische Polyurethane (TPU) ausgelegt ist. Die Rundung der Standardrakel erzeugt eine Kompression der Pulverschüttung vor dem Beschichter und optimiert die Packungsdichte im Prozess [206]. Elastisch verformbare Materialien hingegen verdichten sich durch diesen Vorgang nicht, sondern weiten sich nach der elastischen Verformung wieder unkontrolliert auf, was zu einer geringen Auftragsqualität führt und für den Prozess hinderlich ist. Aus diesem Grund wurden für diese Materialien flache Rakeln verwendet, die bei geringerer Verdichtung des Materials eine glatte Pulverbettsoberfläche, wie sie für den Laser-Sinter-Prozess vonnöten ist, erzeugen können. Die gegenläufig rotierende Auftragswalze besitzt dagegen einen Durchmesser von 45 mm. Bei konstant gehaltener Auftragsgeschwindigkeit wurde ihre Rotation in vier Abstufungen von 5,5 U/min bis 45 U/min variiert. Die Probekörper wurden gleichmäßig in den vier Quadranten des Bauraumes positioniert. So wurden pro Parametervariation vier Probekörper gefertigt. Auf eine Fokusstufenvariation wurde bei diesen Versuchen verzichtet und stattdessen wurde ein repräsentativer Standardparameter aus den Vorversuchen verwendet. Jede Messung wurde mindestens dreimal durchgeführt, um den Mittelwert und dazugehörige Standardabweichungen darstellen zu können.



Abbildung 5-3: Vergleich der flachen und abgerundeten Rakel

Zu Vergleichszwecken wurden die Probekörper ebenfalls mit kommerziellen Anlagensystemen gefertigt. Geeignet für den Pulverauftrag mit gegenläufiger Walze war die DTM 2500 (26,5 U/min bei 76,25 mm Walzendurchmesser), während die Rakelversuche mit einer EOS Formiga P 100 realisiert wurden. Zu beachten gilt, dass der Auftrag bei der EOS-Anlage als Wischbewegung umgesetzt wurde, was zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten je nach Lage im Bauraum führte.

5.2.2 Versuche zur resultierenden Oberflächengüte

Die Oberflächenrauheit der Bauteile ist eine verfahrensinhärente Gegebenheit und kommt durch das pulverförmige Ausgangsmaterial und den schichtweisen Bauprozess zustande. Die erzeugte Schmelze verbindet sich mit dem Bauteil und wird vom umliegenden Pulver in Form gehalten, während einzelne Pulverpartikel partiell umschlossen werden und zugleich eine Art Negativ der einzelnen Partikel auf dem Bauteil hinterlassen wird. Die nachgelagerte Bearbeitung der Bauteile mit dem Ziel der Verringerung der Oberflächenrauheit ist Bestandteil vieler Veröffentlichungen [207–212]. Dabei wurden sowohl mechanische Verfahren wie Schleifen, Trowalisieren und Strahlen als auch chemische Verfahren durch Interaktion der Bauteiloberfläche mit einem Wirkmedium betrachtet. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Oberfläche nachträglich durch eine Beschichtung zu glätten [213]. Alle genannten Verfahren haben gemein, dass ihre Effizienz maßgeblich von der ursprünglich vorherrschenden Oberflächenrauheit abhängt, weitere Kosten entstehen und kein universeller Ansatz für die Bauteil- und Materialvielfalt des PBF-LB/P etabliert ist. Eine Ausnahme bildet diesbezüglich das händische Reinigen mittels Strahlen mit nicht abrasiven Mitteln wie Glasperlen, um die noch anhaftenden Pulverrückstände schonend zu entfernen.

Die taktile Oberflächenmessung wurde in dieser Arbeit mit einem Rauheitsmessgerät der Firma Mitutoyo und einer Tastnadel mit einem Radius von 10 µm realisiert. Wie aus Abbildung 5-4 ersichtlich, wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 21920-2 jede Messung mit fünf Einzelmessungen (jeweils betreffend 5 mm Länge) durchgeführt und der Mittelwert wurde als Ergebnis genutzt (vgl. Formel 5-1) [214, 215]. Für jede der zu untersuchenden Flächen wurde die Messung dreimal an verschiedenen Stellen durchgeführt. Der verwendete Rauheitswert ist der R_z -Wert, der beim PBF-LB/P zum Vergleich einzelner Bauteile gebräuchlich ist.

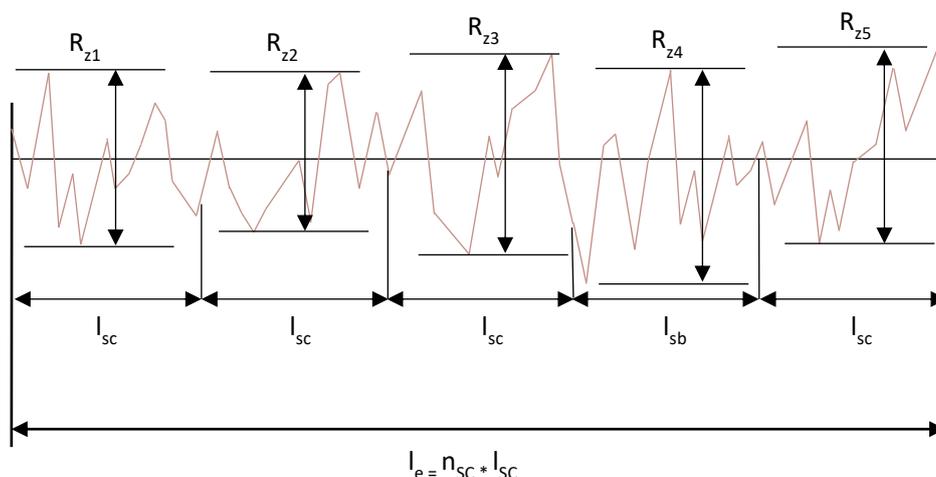


Abbildung 5-4: Ermittlung des Oberflächenrauheitswertes R_z

Die Formel für den R_z -Wert lautet:

$$R_z = \frac{1}{n_{SC}} \sum_1^{n_{SC}} R_{zi}$$

5-1

Die Oberflächenrauheit wurde repräsentativ an den Probekörpern der Packungsdichte gemessen (vgl. Kapitel 6.2.1). Dabei wurden stets Flächen gemessen, die keinen verfahrensinhärenten Treppenstufeneffekt aufweisen.

5.2.3 Versuche zur Spurbreite und entstehenden Schmelze

Die Ermittlung von prozessfähigen Parametern erfolgte zunächst anhand von ein- sowie zweidimensionalen Probekörpern. Hierbei war der Energieeintrag einer einzelnen Schicht in Bezug auf den verwendeten Fokusbereich differenziert zu betrachten. Zur Ermittlung des benötigten Energieeintrages wurde ein Probekörper entwickelt, der variierende Abstände der Hatchlinien darstellen kann. Die einzelnen Laserspuren, die sich prozentual um jeweils 10 % voneinander entfernen, mussten für die Auswertung in Form gehalten und vor äußeren Einflüssen geschützt werden. Hierfür wurde ein Grundkörper mit bereits ermittelten prozessstabilen Parametern der Fokusstufe 0 erzeugt. Die Einzelspuren bildeten dabei ein zweites Bauteil, um diesem im Vergleich zum Grundkörper unterschiedliche Parameter zuweisen zu können (vgl. Abbildung 5-5).

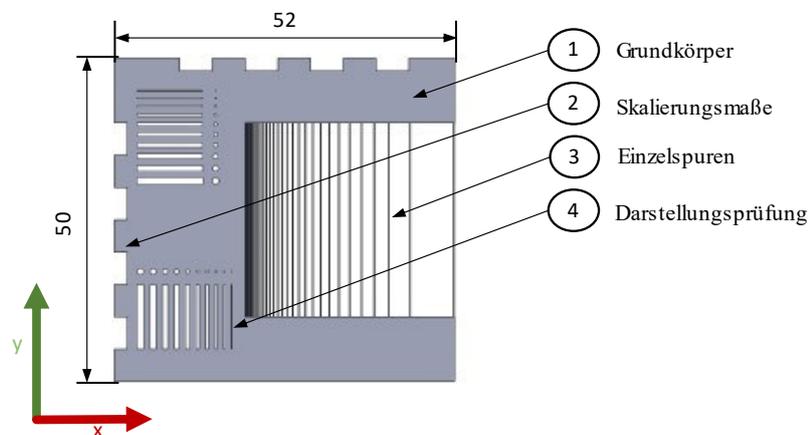


Abbildung 5-5: Probekörper zur Untersuchung von Einzelspuren

Der Grundkörper bestand aus einem 2 mm starken U-förmigen Gestell, das die äußeren Maße von 52 mm x 50 mm aufwies. Kennzeichnend war dabei eine Aussparung, die zur Aufnahme der Einzelspuren vorgesehen war. Da bei der Generierung des Hatches die Skalierung der Bauteile signifikanten Einfluss auf die resultierenden Ergebnisse hat, wurden in den Grundkörper zusätzlich Skalierungsmaße in x- sowie in y-Richtung eingebracht. So konnte der Einfluss eines eventuell auftretenden Skalierungsfehlers im Nachgang bei der Auswertung korrigiert werden. Zusätzlich bot der Grundkörper die Option, die Darstellungen von

Spaltmaßen in x- und in y- Richtung sowie Bohrungen im Bereich von 1 mm bis 0,15 mm zu überprüfen.

Die Einzelspuren wurden durch insgesamt 29 Stege realisiert, wobei mit einem minimalen Spurabstand von 0,2 mm begonnen wurde. Der Abstand wurde 27-mal um jeweils 10 % zum vorherigen Spurbreitenabstand gesteigert, bis zu einem Maximum von 3,27 mm. Abschließend wurde eine Einzelspur mit dem noch verbleibenden Abstand zum Ende des Grundkörpers von 6,7 mm erzeugt, um die Generierung einer Einzelspur mit minimierten thermischen Wechselwirkungen mit den bereits erzeugten Einzelspuren bei jeder Fokusstufe zu gewährleisten.

Als Auswertungsverfahren hat sich aufgrund der empfindlichen Einzelspuren die berührungslose Vermessung anhand bildgebender Software als zielführend erwiesen. Hierzu wurden digitale Fotodokumentationen beider Seiten des Probekörpers mit einer hochauflösenden Digitalkamera erstellt, die mittels Bildbearbeitungssoftware durch Einfügen eines Maßstabes ausgewertet werden konnten. Verwendet wurde hierfür eine Canon EOS 40D mit einem EF-S-Objektiv und einer Brennweite von 85 mm. Der Maßstab wurde anhand von händischen Messungen mittels Messschieber, anhand der äußeren Maße des Grundkörpers sowie anhand von abgelichtetem Millimeterpapier kalibriert, während die Proben unter Zuhilfenahme einer Schablone reproduzierbar unterhalb des montierten Kamerasystems platziert wurden.

Es wurden elf verschiedene Fokusstufen von 0 bis 10 realisiert, wobei die Fokusstufe 0 den minimalen und die Fokusstufe 10 den maximal resultierenden Spotdurchmesser darstellt. Die verwendete Laserleistung für die unterschiedlichen Fokusstufen belief sich auf mindestens 35 W (Fokusstufe F0) und auf maximal 131,3 W (Fokusstufe F10). Diese Werte wurden in Voruntersuchungen und anhand der angepassten Scannergeschwindigkeit von 4000 mm/s im Vergleich zur gewählten Stützstelle festgelegt. Somit ergaben sich aufsteigende Werte der Laserleistung, die den Fokusstufen gemäß Tabelle 5-1 zugeordnet wurden.

Tabelle 5-1: Laserleistung nach Fokusstufe

Fokusstufe	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PL [W]	35	43,5	46,4	58,6	62,2	80,2	91,6	106,7	116,3	130,3	131,3

Die Fokusgeschwindigkeit wurde konstant auf 4000 mm/s gehalten, was unter Berücksichtigung der Apertur dem maximalen Wert des Scannersystems entspricht und im Sinne der Produktivitätssteigerung zielführend ist. Die verwendete Schichtstärke betrug konstant 0,1 mm.

Als Stützstelle wurde der Probekörper ebenfalls mit einer EOS Formiga P100 unter Verwendung der Standardparameter ‚mechanic‘ mit 176 °C Bauraumtemperatur, einer Schichtstärke von 0,1 mm, einer Laserleistung von 21 W und einer Scannergeschwindigkeit von 2,5 m/s gefertigt. So konnte ein direkter Vergleich mit einer kommerziellen Anlage erfolgen, der bei der richtigen Auswertung und Deutung der Proben herangezogen werden konnte.

Ausgewertet wurden die Prüfkörper je Fokusstufe nach der resultierenden Spurbreite, der Eindringtiefe und der aus den variierenden Spurbreiten resultierenden Energiedichte. Ziel war

es, den notwendigen Spurbreitenabstand zur Erzeugung eines homogenen Schmelzfilms in Abhängigkeit von verschiedenen Fokusstufen zu ermitteln und so die Grundlage für die Generierung dreidimensionaler Bauteile mit aufgeweitetem Fokus zu erarbeiten.

Aufgrund der gegenüber mechanischer Einwirkung empfindlichen Einzelspuren wurde von diesen eine Fotodokumentation angelegt und sie wurden mittels Software über ein Referenzmaß vermessen. Hierfür wurden eine Spiegelreflexkamera vom Typ Canon EOS 40D sowie ein Lichtmikroskop vom Typ Olympus BX-51 verwendet. Zur Bestimmung der Eindringtiefe wurden die Proben in Epoxidharz eingebettet, mit einem vollautomatischen Rotationsmikrotom vom Typ Meditome A 550 in Querschnitte zerteilt, dokumentiert und ausgewertet. Alle Prüfkörper wurden mit einem zu 50 % aufgefrischten PA-2200-Pulver von EOS gefertigt. Zum Schutz der sensiblen Einzelspuren wurden die Proben unter reduziertem Druck von ~ 2 bar bis 2,5 bar mit Glasperlen gestrahlt, was noch zu Anhaftungen einzelner Partikel an den Proben führen kann.

5.2.4 Versuche zur Bauteildichte

Ausgehend von den Ergebnissen der ein- und zweidimensionalen Versuchsreihen wurde mit den erarbeiteten Parametern weiterführend ein dreidimensionales Bauteil erzeugt. Die Verwendung einer einfachen Geometrie wie jener des Dichtequaders bietet viele Vorteile für die Prozessoptimierung. Ein Dichtequader ist ein dreidimensionales Bauteil, das mit der Angabe von drei Seitenlängen vollständig beschrieben werden kann. Unter anderem sind solche Proben schnell, mit geringem Aufwand und prozesssicher zu fertigen. Die unkomplizierteste Auswertung der Bauteildichte kann mittels Messschieber bzw. -schraube und Feinwaage erfolgen. Bei unförmigen Bauteilen besteht die Option einer Messung nach dem archimedischen Prinzip. Weitere Untersuchungen wie Farbinfiltrations- und Dünnschnittanalysen können ergänzend herangezogen werden, um die Aussagekraft der Probekörper weiter zu erhöhen. Damit eignen sich Dichtequader dazu, viele verschiedene Parameter in einem Bauprozess zu untersuchen und so eine Parameteroptimierung durchzuführen.

Die Bauteildichte korreliert dabei mit den mechanischen Kenngrößen der Zugfestigkeit, des E-Moduls und der Bruchdehnung und lässt Rückschlüsse auf die Parameterwahl und die Qualität der verwendeten Pulvermischung zu [19]. Bei prozessstabilem, aber zu geringem Energieeintrag ist eine verringerte Bauteildichte durch nicht aufgeschmolzene Bereiche und eckige Poren zu beobachten. Letztere wirken beim Versagen des Bauteils wie eine Sollbruchstelle und können Rissausbreitungen induzieren [21, 216]. Bei einer Erhöhung des Energieeintrages reduzieren sich diese Poren bis zu einem Bereich, in dem eine maximale Bauteildichte und folgerichtig optimierte mechanische Kennwerte erreicht werden können. Wird der Energieeintrag weiter erhöht, bilden sich erneut vermehrte Poren, die als Folge thermischer Degradation des Materials als runde Gaseinschlüsse erkennbar sind und die mechanischen Eigenschaften der Bauteile ebenfalls reduzieren [21]. Während der Energieeintrag den Verlauf der Bauteildichte bestimmt, wird das erreichbare Maximum von anderen Kenngrößen der Pulverqualität beeinflusst. Eine niedrige Viskosität der Schmelze führt beispielsweise aufgrund der höheren Beweglichkeit der Moleküle innerhalb der Schmelze und einer optimierten Entgasung zu dichteren Bauteilen mit verbesserten mechanischen Eigenschaften [217]. Daher wird das gealterte Pulver in der Praxis mit Neupulver vermischt, wodurch sich die Pulverpartikelverteilung verändert. Dies hat einen direkten Einfluss auf die resultierende Packungsdichte [218], die neben der direkten Korrelation mit der Bauteildichte

[120] auch die Eindringtiefe des Lasers [219], die Wärmeleitfähigkeit des Pulvers [71] und die Oberflächenrauheit der Bauteile [220] bestimmt.

Die aufgeführten Erläuterungen verdeutlichen, dass die Bestimmung der Bauteildichte zu weitreichenden Rückschlüssen auf die Prozessqualität führen kann und eine gute Grundlage für weitere Optimierungen darstellt. Die verwendeten Messmethoden dieser Arbeit werden nachfolgend dargestellt.

Manuelle Messmethode

Zur manuellen Auswertung der Bauteildichte ist eine weitestgehend fehlerfreie Herstellung der Probekörper notwendig. Bedingt ist dies durch die händische Erfassung des Volumens durch Vermessung der parallel zueinander liegenden Außenflächen. Jede Verformung des Bauteils, wie sie durch Übersinterung, Verzug oder Verschieben im Bauraum zustande kommen kann, führt zu einer Verfälschung des Ergebnisses und gilt daher als besonders empfindlich [196]. Sofern die Rahmenbedingungen erfüllt sind, können wahlweise mit einem Messschieber oder einer Bügelmessschraube die Höhe, die Breite und die Tiefe dreimal ermittelt werden. Daraus wird der Mittelwert gebildet und gemäß Formel 5-2 wird das Verhältnis zwischen Masse und Volumen, also die Dichte, bestimmt.

$$\rho_{Bauteil} = \frac{m}{V} = \frac{m}{\overline{H} \cdot \overline{B} \cdot \overline{T}} \quad 5-2$$

mit

ρ – Dichte

m – Masse

V – Volumen

Archimedisches Prinzip

Eine weitere Methode stellt die Messung nach dem archimedisches Prinzip dar. Hierbei wird der Auftrieb eines Körpers in einer bekannten Flüssigkeit in Relation zum Gewicht des Körpers in Luft gesetzt. Die Formel basiert auf dem Hintergrund, dass ein in Flüssigkeit eingetauchter Körper gleich viel Auftriebskraft erzeugt wie das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit. Bei einer bekannten Dichte der Flüssigkeit, in diesem Falle von Ethanol, ergibt sich nachfolgende Formel 5-3:

$$\rho_{Bauteil} = \frac{m_{Luft}}{m_{Luft} - m_{Medium}} \cdot \rho_{Medium} \quad 5-3$$

mit

$\rho_{Bauteil}$ – zu bestimmende Dichte des Körpers

ρ_{Medium} – Dichte des Prüfmediums (Ethanol = 0,7884 g/cm³ bei 21 °C)

m_{Luft} – Masse des Körpers in Luft

m_{Medium} – Masse des Körpers im Prüfmedium

Der Aufbau der Messung ist nach der DIN EN ISO 1183 – Verfahren A genormt [221, 222]. Zu erkennen ist ein Aufbau mit einer Feinwaage, die das schnelle Messen einer Probe in Luft und in einer Flüssigkeit erlaubt, auch wenn diese Verformungen oder Hinterschnitte aufweist.

Verfahrensbedingt sind die Oberflächen beim PBF-LB/P eher rau. Aus diesem Grund muss bei der Messung darauf geachtet werden, dass die Oberfläche der Testkörper vollständig benetzt ist und keine Blasen anhaften. Ebenfalls ist die Auswertung bei offenporig porösen Bauteilen problematisch, da die Prüfflüssigkeit das Bauteil infiltrieren kann und so das Gewicht der Probe verfälschen würde. Ein vollständig infiltrierter Probekörper würde so fälschlicherweise mit der Feststoffdichte gleichgesetzt. Daher muss beim Messen darauf geachtet werden, ob während und nach dem Eintauchen in die Prüfflüssigkeit dem Körper Luftblasen entweichen. Die Temperatur des Ethanol muss ebenfalls ermittelt und die temperaturabhängige Dichte des Mediums muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Ergänzende Untersuchungen der Bauteildichte wurden mittels Farbinfiltration nach [111, 223] und anhand von Dünnschnitten der Probekörper durchgeführt, um die Ergebnisse umfangreich analysieren zu können. Mikrotom-Dünnschnitte werden zur Durchlichtmikroskopie verwendet, um die werkstofftechnische Beschaffenheit der Proben beurteilen zu können [224]. Hierzu werden Dünnschnitte aus der Mitte der Probe mit einer Stärke von 10 µm erzeugt und zwischen zwei Objektträgerplatten fixiert. Dabei wird die Probe zunächst mit dem Grobschnittbereich der Klinge in dickeren Schichten abgetragen, bevor der Feinschnittbereich der Klinge für die Probenentnahme verwendet wird [225]. Bei Letzterer kann die Probe mit Wasser oder Ethanol benetzt werden, um ein besseres Abgleiten der Klinge an der Probe zu ermöglichen. Diese Vorgehensweise soll das Einbringen von Artefakten, Defekte und übermäßige Deformation der Probe verringern. Dennoch ist bei Kunststoffen mit einer Längung des Probenquerschnittes von bis zu 30 % zu rechnen [103, 226]. Das verwendete Mikroskop ist ein BX51/BX52-Systemmikroskop des Herstellers Olympus, das die erstellten Proben unter polarisiertem Durchlicht und 40-facher Vergrößerung aufnimmt.

5.3 Verifizierung und Validierung der Parameter für variierende Spotgrößen

Ausgehend von den vorangegangenen Erkenntnissen wurden auf der x/y-Ebene liegende und stehende Zugproben in jeder Fokusstufenvariation erfolgreich hergestellt. Eine Zugprobe ist ein Prüfkörper, der unter anderem Aussagen über die mechanischen Eigenschaften der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und des E-Moduls beim einachsigen Spannungszustand zulässt. Beim PBF-LB/P ist die Zugprobe aufgrund ihrer speziellen Form ein multifunktionaler Probekörper, der auch für die Messung der Oberflächenrauheit oder des Verzuges eines Bauteils herangezogen werden kann. Die Kennwerte dienen vorwiegend zur Auslegung statisch beanspruchter Bauteile und können zur Überprüfung und Optimierung der Fertigungsparameter herangezogen werden. Dabei besteht eine Zugprobe zumeist aus zwei Einspannbacken, die die Kraftübertragung auf den geringeren Materialquerschnitt anhand definierter Rundungen realisieren und so zu einer Sollbruchstelle im mittleren Bereich der Probe führen. Um den Bruch einer Probe herbeizuführen, werden die Backen stoßfrei und kontinuierlich mit definierten Geschwindigkeiten auseinandergezogen. Die dabei aufgewendeten Kräfte werden wegabhängig gemessen und können gemäß verschiedenen Zielgrößen ausgewertet werden. [224, 227]

Die in diesen Versuchen verwendete Zugprobe war ein Vielweckkörper Typ 1A nach der DIN EN ISO 3167 und der DIN EN ISO 20753 (vgl. Abbildung 5-6) [228, 229]. Die Gesamtlänge der Probe betrug 150 mm, die Länge des schmalen parallelen Teils 80 mm.

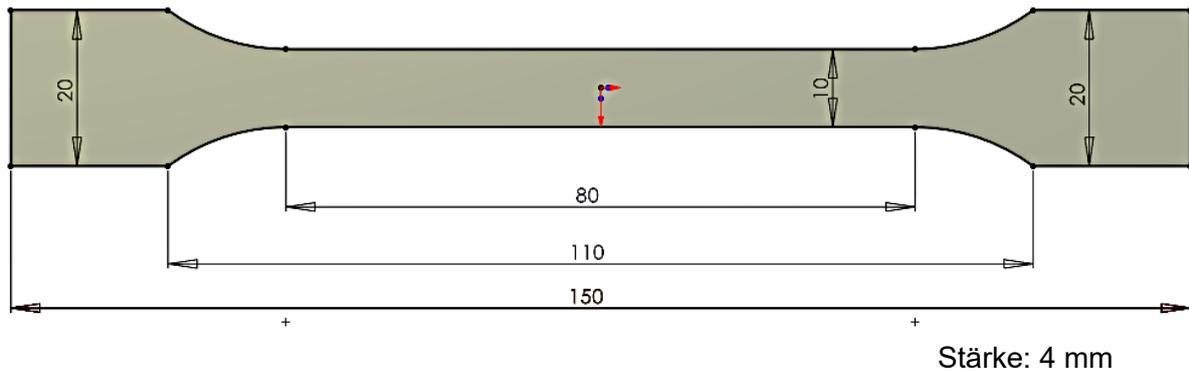


Abbildung 5-6: Verwendeter Vielweckprüfkörper Typ 1A nach der DIN EN ISO 20753

Es handelte sich demnach um eine ungekerbte, längliche und im Querschnitt rechteckige Zugprobe. Die Proben wurden zuvor mit Glasperlen gestrahlt und in Anlehnung an die DIN EN ISO 527 bzw. DIN EN ISO 20753 beim Industriepartner Festo SE & Co. KG. gezogen. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur und mit 10 N Vorkraft durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit v_t betrug 1 mm/min zur Prüfung des E-Moduls und anschließend 25 mm/min bis zum Bruch der Probe. Die verwendete Zugprüfmaschine ist eine Zwick UPM 1476 Universalprüfmaschine des Herstellers Zwick / Roell GmbH. Der Probenquerschnitt wurde jeweils durch eine Messung mit einer eingespannten Bügelmessschraube (Mitutoyo ZS) ermittelt (vgl. Abbildung 5-7).



Abbildung 5-7: Zugprüfung und Querschnittsermittlung der Proben

Die Auswertung erfolgte softwareseitig mit Darstellung der Spannungs- bzw. Dehnungskurve sowie mit den Einzel- und Mittelwerten aller durchgeführten Zugversuche in einem Durchgang. Der Spannungs- bzw. Dehnungsverlauf enthält neben der Klassifizierung der Duktilität unter anderem die Kennwerte der Zugfestigkeit σ_M , der Bruchdehnung ϵ_B und des Elastizitätsmoduls E und kann zur Berechnung des Arbeitsaufnahmevermögens eines Kunststoffes verwendet werden.

Um die Ergebnisse der Bauteildichte vollumfänglich verifizieren zu können, wurden zwei Baujobs mit allen Fokusstufen durchgeführt. Im ersten Baujob wurde mit den Fokusstufen F0 bis F4 und im zweiten Baujob mit den Fokusstufen F5 bis F10 gefertigt. Hinsichtlich jeder Fokusstufe wurden fünf Proben gebaut und ausgewertet. Abbildung 5-8 verdeutlicht die signifikant unterschiedliche Anzahl der Scanvektoren im Bauteilquerschnitt einer liegenden Zugprobe.

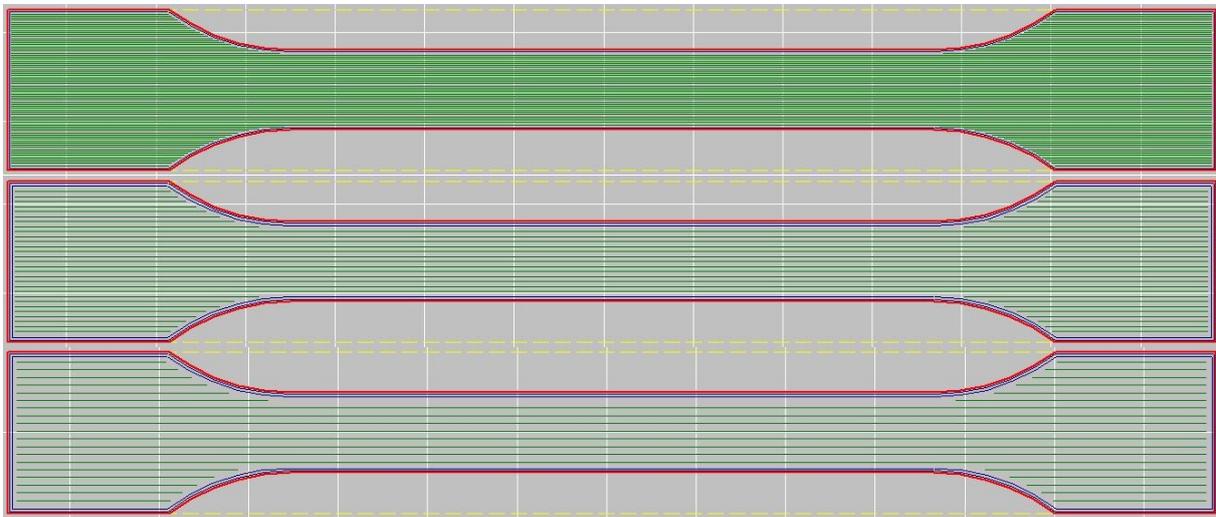


Abbildung 5-8: Beispielhafte Generierung der Scanvektoren in der Prozesssoftware für die Fokusstufen F0, F5 und F10 (v. o. n. u.)

Nach erfolgter Verifizierung wurden die Parameter gemäß der Planung für statistisch abgesicherte Versuchsreihen in einem 2^2 -vollfaktoriellen Versuchsplan mit Zentralpunkt einer Validierung unterzogen. Der verifizierte Standardparameter bildete hierbei den Zentralpunkt der jeweiligen Fokusstufen. Variiert wurden die Laserleistung und der Hatchabstand, während die Scannergeschwindigkeit konstant auf 4000 mm/s gehalten wurde und die Schichtstärke durchweg 0,1 mm betrug. Für jede Fokusstufe wurden sowohl stehende als auch liegende Zugproben in fünf verschiedenen Parametervariationen und in dreifacher Ausfertigung erstellt. Diese Versuchsreihe diente zusätzlich der Optimierung der mechanischen Kennwerte, da hierbei explizit auf die hatchkonforme Ausrichtung der Bauteile geachtet wurde.

6 Ergebnisse und Diskussion

Das nachfolgende Kapitel bezieht sich auf die in Kapitel 5 vorgestellten Versuchsreihen. Sein Aufbau entspricht jenem des vorangegangenen Kapitels, sodass ein direkter Bezug zwischen Versuchsaufbau und Ergebnissen sichergestellt werden kann. Abschließend wird eine Optimierung der validierten Parameter erörtert und es erfolgt eine Diskussion der Resultate und deren Einordnung im Kontext der Arbeit.

6.1 Charakterisierung der Versuchsanlage

Bei der Inbetriebnahme einer Versuchsanlage ist es relevant, einzelne Komponenten, Baugruppen und das Gesamtsystem zu erproben. Durch dieses Vorgehen können die Verbesserungen und Grenzen validiert und dem Stand der Technik gegenübergestellt werden. Zudem ermöglicht eine Identifizierung von konstruktiven oder auslegungstechnischen Schwachstellen deren Kompensation oder Korrektur, sodass der Gesamtprozess zuverlässig durchgeführt werden kann.

6.1.1 Ergebnisse zum Pulverauftrag und zu den vorherrschenden Prozesstemperaturen

Ein wesentlicher Bestandteil des Laser-Sinter-Prozesses ist die zuverlässige und qualitativ hochwertige Materialkonsolidierung. Jede Einzelschicht muss demnach fehlerfrei aufgetragen werden, um einen stabilen Prozess realisieren zu können. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Schwellenwertanalyse, wie sie in Kapitel 6.1.1 beschrieben wurde. Dabei wurde der Schatten der Unebenheiten des Pulverauftrags erfasst und in Prozent dargelegt. Folglich stehen hierbei niedrige Werte für einen qualitativ hochwertigen und hohe Werte für einen nicht ausreichenden Pulverauftrag. Ein qualitativ hochwertiger Schichtauftrag ist ab einem Verschattungsanteil von $\sim 25\%$ erreicht. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass auch kleinere Anteile, die auf tiefe Risse oder übermäßige Materialüberwürfe zurückzuführen sind, für eine geringe Auftragsqualität sprechen können. Diese Anomalien konnten von der Schwellenwertanalyse nicht erkannt werden und es musste ergänzend eine Sichtkontrolle durchgeführt werden.

Abbildung 6-1 zeigt die Auftragsqualität im Zusammenhang mit unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten der Auftragswalze im Versuch mit drei repräsentativen Materialien aus Kapitel 6.1.1: PA 12, PA 6 und PBT.

Es zeigte sich, dass das PA 6 mit der Walze über den gesamten Versuchsbereich glatt aufgetragen werden konnte. Eine höhere Rotationsgeschwindigkeit erzeugte dabei tendenziell eine rauere Oberfläche, die aber dennoch als qualitativ hochwertig betrachtet werden kann. Beim PA 12 hingegen ist der Pulverauftrag mit den Standardparametern zwar als ausreichend zu bezeichnen, jedoch stellte sich eine Verbesserung der Auftragsqualität bei höheren Rotationsgeschwindigkeiten ein. Ein ähnliches Verhalten wurde beim Versuchspulver PBT beobachtet, dessen Auftragsqualität erst bei erhöhten Drehzahlen der Walze eine Verarbeitung im Laser-Sinter-Prozess zulässt.

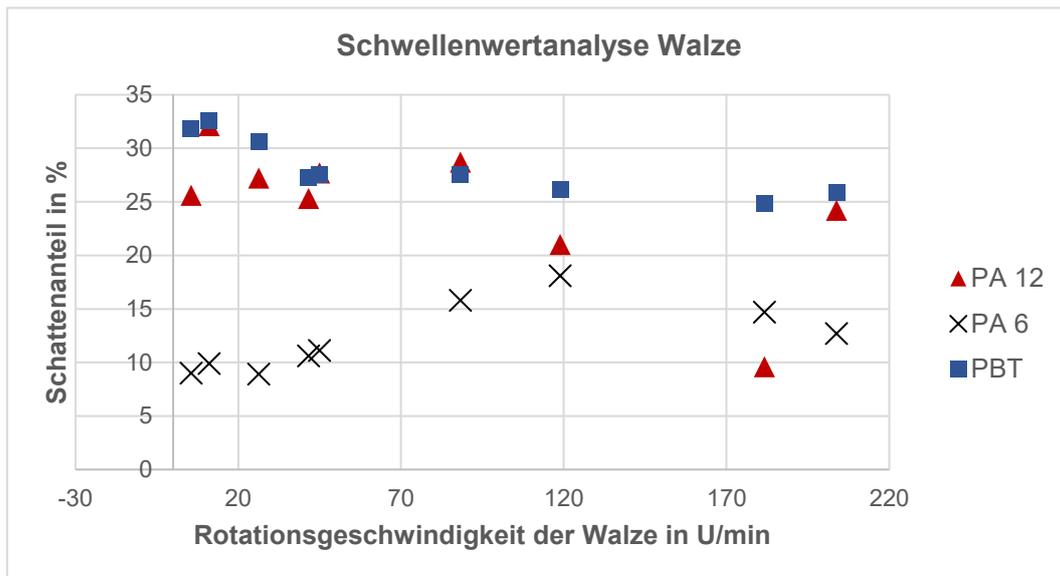
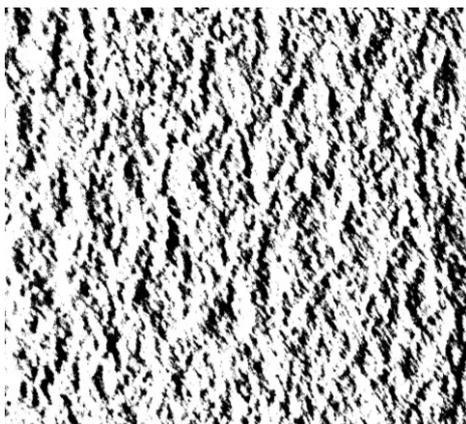


Abbildung 6-1: Qualitätsbewertung Pulverauftrag mit Walze bei 127 mm/s

Zu berücksichtigen ist hierbei, dass das PBT unterhalb der Drehzahl von 88,3 U/min starke Zerklüftungen in der Pulverbettoberfläche aufwies. Aus diesem Grund repräsentieren die teilweise noch akzeptablen Werte der Schwellenwertanalyse nicht die Untersuchungsergebnisse, da die Tiefe der Defekte in der Oberfläche nicht berücksichtigt werden. Oberhalb der genannten Drehzahl ergaben sich keine Oberflächendefekte und die ermittelten Werte können somit als repräsentativ angenommen werden.

Rotationsgeschwindigkeit 26,3 U/min



Rotationsgeschwindigkeit 181,7 U/min

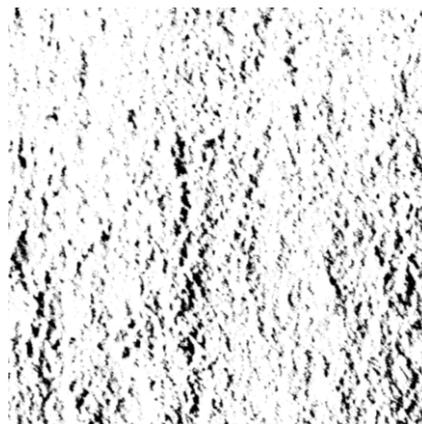


Abbildung 6-2: Seitenlichtaufnahmen des PBT zur Auswertung anhand der Schwellenwertanalyse

Ergänzende Untersuchungen zum Pulverauftrag wurden mit zwei verschiedenen Rakeln durchgeführt (vgl. Abbildung 6-3). Da hierbei keine Rotationsgeschwindigkeit eingestellt werden kann, wurde die translatorische Geschwindigkeit des Auftragsmechanismus von 127 mm/s bis zu 607 mm/s variiert. Die Ergebnisse zeigten, dass bei allen verwendeten

Materialien die runde Raketgeometrie zu bevorzugen ist, da hierbei höhere Oberflächenqualitäten erreicht werden. Zudem bestätigte sich bei niedrigen Auftragsgeschwindigkeiten der qualitativ hochwertige Auftrag des PA-6-Materials. Ebenfalls zu erkennen ist, dass bei zunehmender Auftragsgeschwindigkeit die Qualität des Pulverauftrags abnimmt. Lediglich das PA-12-Pulver erlaubt einen qualitativ hochwertigen Auftrag mit einer Rakel bei translatorischen Geschwindigkeiten von 367 mm/s. Ein Pulverauftrag des PBT-Materials mittels Rakel kann aufgrund der Versuchsergebnisse hingegen ausgeschlossen werden.

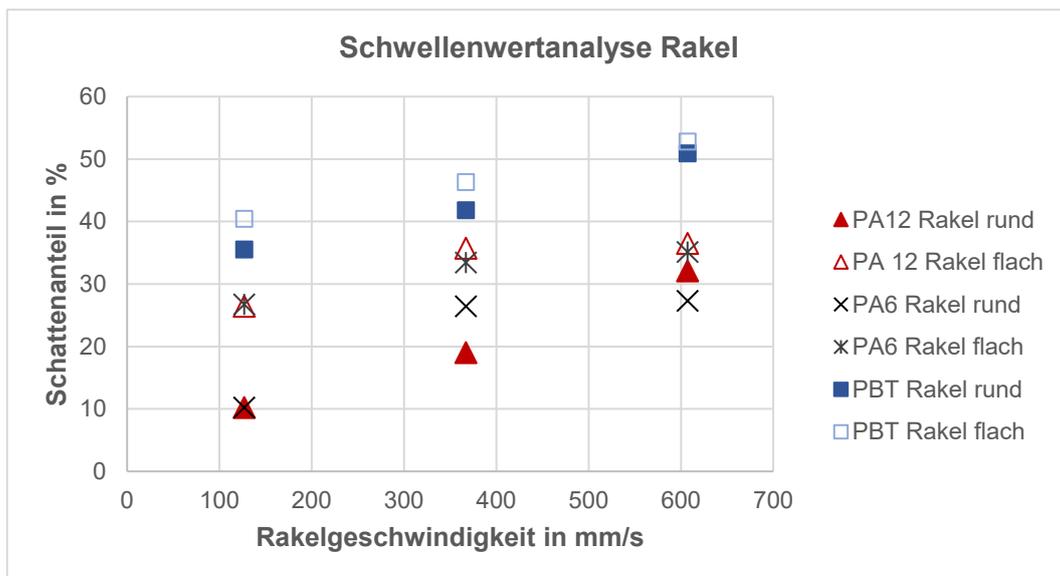


Abbildung 6-3: Qualitätsbewertung Pulverauftrag Rakel

Die Untersuchungen zeigen, dass ein qualitativ hochwertiger Pulverauftrag sowohl mit einer gegenläufig rotierenden Auftragswalze als auch mit einer Rakel erfolgen kann. Die Ergebnisse lassen zudem einen Vergleich beider Auftragsmechanismen zu. Dieser zeigt, dass innerhalb der Versuchsanlage höhere Auftragsqualitäten des Standardmaterials mit einer Rakel erreicht werden können. Für die Verarbeitung von herausfordernden Materialien wie PBT konnte hingegen nachgewiesen werden, dass diese nur mit einer Walze erfolgen kann. Da in den Hauptversuchen ausschließlich PA 12 verwendet wurde, werden zukünftige Versuche ausschließlich mit der runden Rakel durchgeführt.

Nachdem die Prozessbefähigung des Auftragsmechanismus erprobt wurde, mussten die Prozesstemperaturen bestimmt werden. Zielführend sind in diesem Kontext die Ermittlung des Glazing-Points, die Maximierung der Vorratstemperatur und die Anpassung der Rahmen- und Baubehältertemperatur für ein stabiles Prozessverhalten. Überprüft wurden die Ergebnisse mit einer Thermographiekamera, die der Identifizierung der kältesten und heißesten Temperaturen sowie des resultierenden ΔT auf der Bauraumoberfläche diene. Der Glazing-Point der Versuchsanlage wurde bei 177,5 °C erreicht. Unter Berücksichtigung, dass die Schmelztemperatur von PA 2200 gemäß Datenblatt bei 184 °C liegt [199], ist dieser Wert plausibel, da das Aufschmelzen des Polymers bereits vor dem definierten Schmelzpunkt einer DSC-Analyse beginnt. Die Baufeldtemperatur wurde dahingehend auf 167,5 °C festgelegt und erzielte im Thermogramm eine geringe Temperaturspannweite im Baufeld von 3,45 K mit einer

Standardabweichung von 0,9 K (vgl. Abbildung 4-6). Die Temperaturen der Vorratsbehälter konnten jeweils auf 113 °C angehoben werden, ohne einen negativen Einfluss auf das Auftragsverhalten zu nehmen. Bezüglich des Baufeldvolumens wurde die Temperatur der Bauplattform auf 90 °C und jene der Seitenwände des Baubehälters auf 110 °C festgesetzt. Die Temperatur des eingeleiteten Stickstoffs, der zum Spülen des Laser-Windows und zur Inertisierung der Anlage dient, wurde auf den Sollwert von 80 °C eingestellt. So konnte eine prozessbedingte Ablagerung von Staub und Kondensat auf dem Laser-Window nahezu vollständig vermieden werden.

Die durchgeführten Versuche zeigen die Befähigung der Anlagentechnik für den Laser-Sinter-Prozess. Die Potenziale der unterschiedlichen Auftragsmechanismen wurden anhand von Schwellenwertanalysen und verschiedenen Materialsystemen quantifiziert. Es zeigte sich, dass beim Standardmaterial sowohl die gegenläufige Walze als auch die Rakel eine qualitativ hochwertige Pulverbettoberfläche erzeugen können. Lediglich bei Materialien mit verringerter Fließfähigkeit produziert die gegenläufige Walze im Vergleich zur Rakel glattere Pulverbettoberflächen.

6.1.2 Energieeinbringung mittels Laser

Gemäß [155] wurde die Versuchsanlage mit zwei Betriebspunkten realisiert. Der erste Betriebspunkt erzeugt eine Laserleistung des Rohstrahls von ca. 50 W und weist einen minimalen Fokusbereich von 470 µm auf. Die im System hinterlegte Leistungskurve zeigt eine maximale Laserleistung von 30,9 W auf dem Baufeld, was eine Folge des Wirkungsgrades des optischen Systems ist (vgl. Abbildung 6-4).

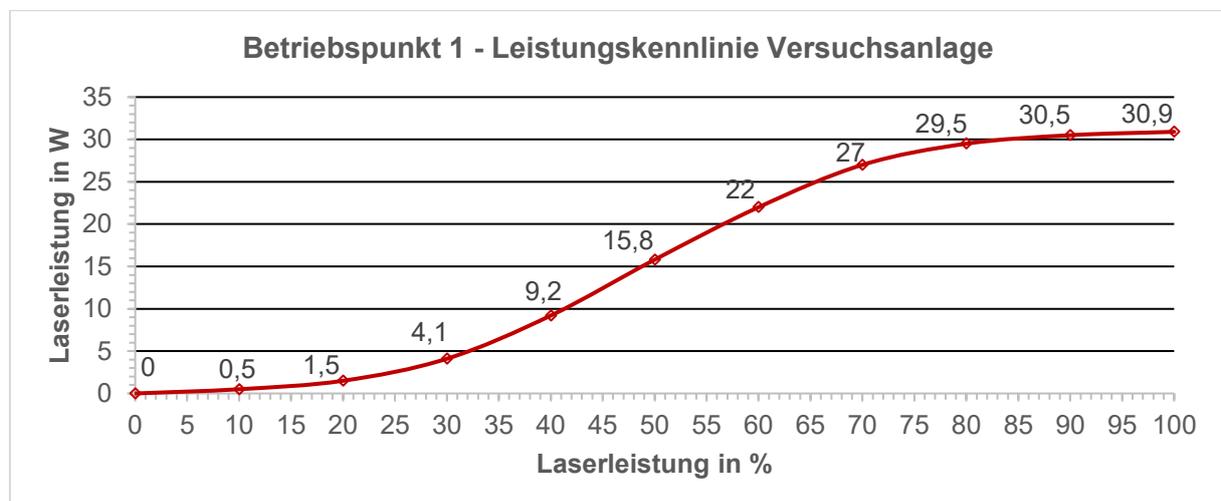


Abbildung 6-4: Laserleistungskennlinie bei Betriebspunkt 1

Der Verlauf zwischen Messgröße [W] und Stellgröße [%] entspricht dem typischen Verlauf einer Laserleistungskennlinie. Damit kann dieser Betriebspunkt der Versuchsanlage mit dem Stand der Technik bei kommerziellen Anlagen, beispielsweise der Formiga P100, verglichen werden, sodass anlagenspezifische Unterschiede ausgearbeitet werden können [230].

Weiterführend ist der zweite Betriebspunkt durch eine Laserleistung des Rohstrahls von ca. 206 W charakterisiert. Nachfolgend wird unter Berücksichtigung der vorhandenen

Leistungsverluste des Optiksystems sowie der Leistungsmodellierung des AOM die charakteristische Leistungskennlinie des Gesamtsystems dargestellt (vgl. Abbildung 6-5).

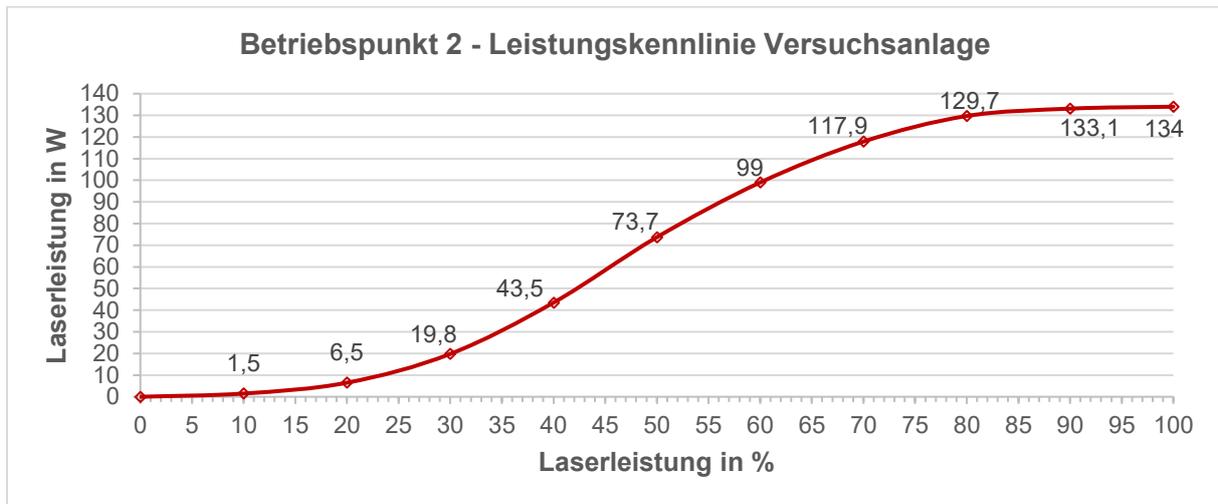


Abbildung 6-5: Leistungskennlinie bei Betriebspunkt 2

Mit einer kontinuierlichen Ausgangsleistung des Lasers von 206 W wurden auf dem Baufeld minimal 0 W und maximal 134 W erreicht. Der Wirkungsgrad des Optiksystems betrug damit ~ 65 %. Auch bei dieser Leistungskennlinie ist zu erkennen, dass diese bei einer prozentualen Erhöhung der Laserleistungsmodellierung nicht linear ansteigt, sondern eine charakteristische S-Funktion beschreibt. Die ermittelten Laserleistungen wurden in Intervallen von 10 % in das System implementiert und bildeten durch lineare Interpolation zueinander die Stellgröße der Steuerungseinheit für die zugewiesene Laserleistung im Prozess.

Die Ergebnisse der Strahlkaustik zeigten, dass die Eingangsleistung auf den AOM konstant gehalten werden sollte und somit ein Wechsel zwischen den Betriebspunkten in einem Prozess ausgeschlossen ist. Bedingt ist dies durch die Entstehung einer thermischen Linse im Germanium-Kristall des AOM und die damit einhergehende Fokuslagenverschiebung. Diese Effekte sind unerwünscht, können jedoch nicht mit anderen optischen Bauteilen kompensiert werden. Die Messungen aus [155] wurden herangezogen, um die theoretische Spotgröße der insgesamt elf Fokusstufen im zweiten Betriebspunkt zu extrapolieren (vgl. Abbildung 6-6). Es war ersichtlich, dass die Variation der Fokusstufe keine lineare Veränderung des Spotdurchmessers erzeugt, sondern eine Parabel approximiert.

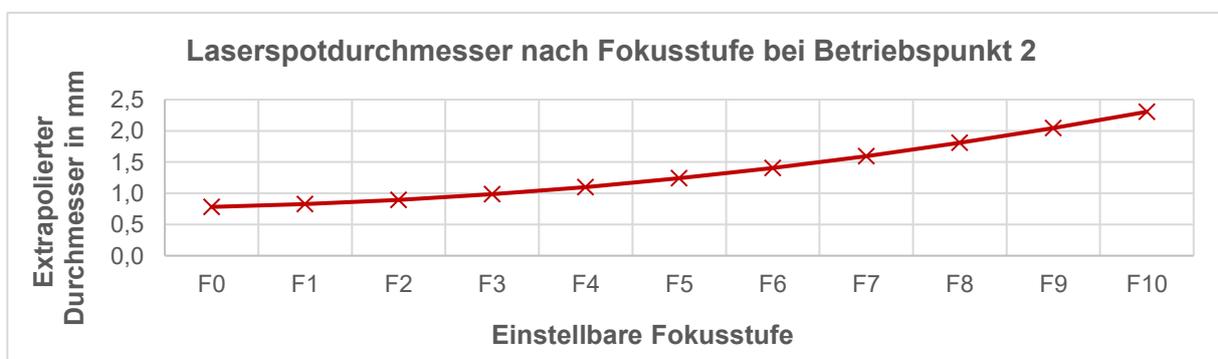


Abbildung 6-6: Extrapolierter Spotdurchmesser auf der Baufeldebene

Die Einschränkungen der verwendeten Hardware führten dazu, dass die theoretisch möglichen Spotdurchmesser nicht realisiert werden konnten. So lag der maximale Laserspotdurchmesser S_D bei 2,3 mm und der minimale bei 0,781 mm im zweiten Betriebspunkt. Die nachfolgenden Versuchsreihen wurden aufgrund der technischen Realisierung der Versuchsanlage mit einem der beiden Betriebspunkte durchgeführt, was Auswirkungen auf die untersuchten Bauteileigenschaften haben kann und berücksichtigt werden muss.

Im Verlauf der Versuche fielen diverse Störgrößen auf, die auf den Status einer Versuchsanlage zurückzuführen sind. Hierzu gehören beispielsweise, dass der AOM nicht in der Lage war, die Laserstrahlung vollständig in die Strahlfalle abzulenken. Es ergab sich, dass ein Opferbauteil in jeden Bauprozess integriert werden musste, um die Position der Scannerspiegel auf einen Bereich außerhalb der relevanten Probekörper sicherzustellen. Ebenfalls konnten Leistungsschwankungen des Lasers in beiden Betriebspunkten nicht vermieden werden. Sie beliefen sich im ersten Betriebspunkt auf bis zu 3 W und im zweiten auf bis zu 5 W. Ein signifikanter Einfluss auf die Bauteilqualität als Folge einer auftretenden Schwankung der Laserleistung konnte in [231] bereits bei einer Fluktuation um 3,6 W nachgewiesen werden. Diese Leistungsschwankung wurde zusätzlich von einer betriebszeitabhängigen Drift überlagert. Aus diesem Grund wurde nach Bedarf die Ausgangsleistung des Lasers im Prozess manuell auf den Sollwert korrigiert.

Als Zwischenfazit kann festgehalten werden, dass die Versuchsanlage mit zwei Betriebspunkten arbeiten muss, die jeweils eine eigene Laserleistungskennlinie in der Prozesssoftware besitzen. Es können somit Laserspotdurchmesser S_D von 0,47 mm bis zu 2 mm realisiert werden. Bei der Betrachtung des Energieeintrages wurden diverse Herausforderungen für den Laser-Sinter-Prozess identifiziert. Unter der Berücksichtigung, dass es sich um eine Versuchsanlage handelt, deren Spezifikationen sich mit allen genannten Einschränkungen dennoch signifikant vom Stand der Technik unterscheiden, wurden die Versuchsreihen mit pragmatischen Lösungsansätzen fortgeführt. Hierzu gehört beispielsweise die Implementierung eines Opferbauteils, die die nicht zu erklärende Durchlässigkeit des AOM für die bevorstehenden Prozesse egalisiert.

6.2 Bauteilbewertung

Die nachfolgenden Versuchsreihen bauten in ihrer Zielsetzung aufeinander auf. Unter Betrachtung der jeweils geltenden Betriebspunkte sollten robuste Prozessparameter evaluiert werden. Die Versuche zur Packungsdichte dienten dem robusten Prozess und der Erarbeitung zum Stand der Technik. Darauf aufbauend wurden Einzelspuren und Schmelzbäder mit verschiedenen Laserspotdurchmessern erzeugt und charakterisiert. Die Ergebnisse der Charakterisierung ließen die Herstellung von dreidimensionalen Bauteilen und die Betrachtung der geltenden Prozesszusammenhänge wie der resultierenden Bauteildichte und Oberflächenrauheit zu, bevor die ermittelten Parameter anhand von Zugproben validiert und einer Diskussion unterzogen wurden.

6.2.1 Ergebnisse zur Pulverpackungsdichte

Für die Versuche zur Packungsdichte erfolgte der Pulverauftrag durch die Versuchsanlage differenziert mit einer Rakel und einer gegenläufigen Walze. Ergänzende Untersuchungen wurden mit kommerziellen Anlagen, wie der DTM 2500 und der EOS Formiga P100,

durchgeführt. Die Versuche wurden nicht in Bezug auf eine Produktivitätssteigerung, sondern hinsichtlich einer Reproduzierbarkeitsverbesserung durch einen optimierten Pulverauftrag vorgenommen (vgl. Kapitel 5.2.1). Aus diesem Grund wurde zunächst Betriebspunkt 1 im Versuchsstand verwendet, um dem Stand der Technik kommerzieller Anlagensysteme zu entsprechen. In Abbildung 6-7 sind die Ergebnisse hinsichtlich der aus dem Prozess resultierenden Packungsdichte für die Versuchsanlage und die DTM dargestellt. Bei einer konstanten Auftragsgeschwindigkeit von 127 mm/s wurden nachfolgende Werte erreicht: Die DTM 2500 erzielte eine Packungsdichte von 41,3 %, die Formiga P 100 eine solche von 42,7 %. Die flache Rakel erreichte in der Versuchsanlage einen Wert von 40,6 %, die abgerundete Rakel einen von 42,4 %. Die Standardabweichungen aller Proben liegen bei weniger als 0,5 % und sind somit gering. Besonders auffällig ist jedoch die signifikant niedrigere Standardabweichung bei der abgerundeten Rakel.

Wie bereits in diversen Studien beschrieben wurde, erreicht eine abgerundete Rakel im Vergleich zu einer gegenläufigen Walze höhere Packungsdichten [144, 145]. Diese Ergebnisse wurden hinsichtlich der Versuchsanlage bestätigt. Bei dieser erzielte der ausgewählte Parameter, der als Referenz für die kommerzielle Anlage diente, eine Packungsdichte von 42,1 %. Dieser Wert liegt unter jenem der abgerundeten Rakel, sowohl betreffend die Versuchsanlage als auch betreffend die kommerzielle Anlage.

Vorversuche haben gezeigt, dass eine geringere Rotationsgeschwindigkeit zu erhöhten Packungsdichten führt. Demnach wurde die Rotationsgeschwindigkeit schrittweise um ca. 40 mm/s verringert, während die translatorische Geschwindigkeit konstant gehalten wurde, um eine optimierte Verdichtung des Ausgangsmaterials zu erzielen. Bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 5,5 U/min wurde die minimale Rotationsgeschwindigkeit erreicht, bei der ein stabiler Prozess möglich scheint. Geschwindigkeiten unterhalb dieser Grenze führten zu einer zu starken Verdichtung des Pulverbettes, was sich in Unebenheiten und Rissen äußerte.

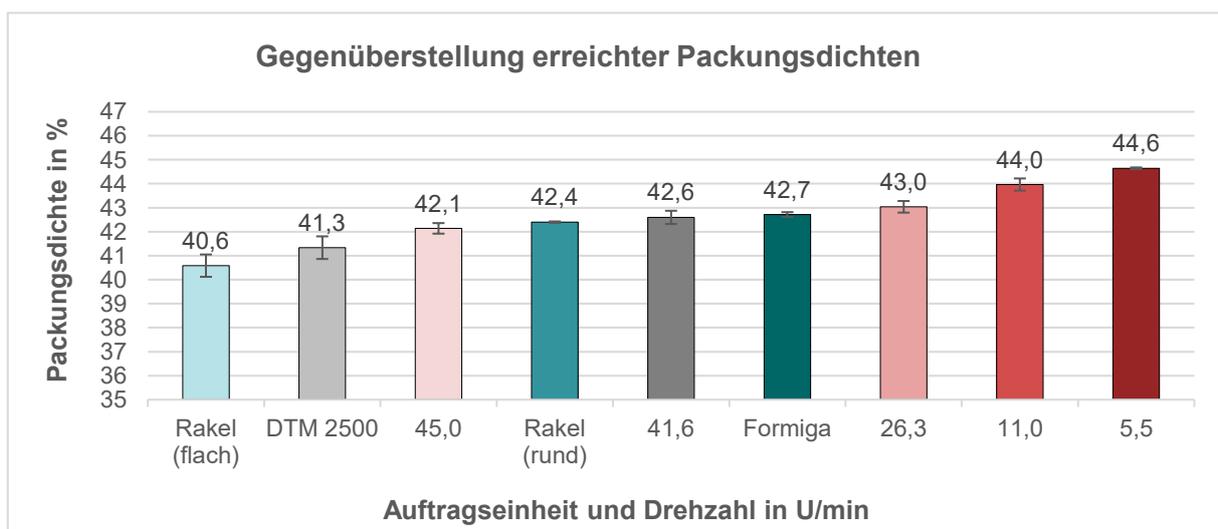


Abbildung 6-7: Erreichte Packungsdichten nach Auftragsmechanismus und differenzierten Drehzahlen

Durch die geringe Rotationsgeschwindigkeit von 5,5 U/min konnte die Packungsdichte auf bis zu 44,6 % gesteigert werden, was jedoch zuungunsten der Prozessstabilität erreicht wurde. Es konnten lediglich 2 statt 4 Probekörper ausgewertet werden. Im Vergleich zu konventionellen Anlagensystemen wurde in der Versuchsanlage durch diese Optimierung eine Erhöhung der Packungsdichte um 3,3 % absolut erreicht.

Die Ergebnisse zur im Prozess vorherrschenden Packungsdichte verdeutlichen, dass im Vergleich zu einer kommerziellen Anlage mit einer gegenläufigen Walze bei Standardparametern eine abgerundete Rakel das Pulver höher verdichtet. Die flache Rakel hingegen erzielt die geringste Packungsdichte, was die Notwendigkeit einer Anpassung der Rakelgeometrie an das verwendete Ausgangsmaterial unterstreicht, um optimale Ergebnisse zu erreichen. Weiterführend wird ersichtlich, dass bei einer parametrisierbaren Umdrehungsgeschwindigkeit der Auftragswalze eine Optimierung hin zu höheren Packungsdichten bei geringeren Umdrehungsgeschwindigkeiten im Vergleich zum Stand der Technik erfolgt [132]. Um einen stabilen Prozess sicherzustellen, muss jedoch ein Mindestmaß an Rotation vorhanden sein, die die Pulverschüttung in eine Rotation versetzt, um einer zu starken Komprimierung entgegenzuwirken.

6.2.2 Ergebnisse zur resultierenden Oberflächengüte

Die im Versuch zur Pulverpackungsdichte erzeugten Bauteile wurden ergänzend auf die resultierenden Oberflächenrauheiten untersucht. Ausgehend davon, dass das umliegende Pulver die Stützfunktion der entstehenden Schmelze übernimmt, waren signifikante Auswirkungen der im Prozess vorherrschenden Packungsdichte auf die Interpenetration der Schmelze in das umliegende Pulver zu erwarten. Untersucht wurden die R_z -Werte der Ober- und Unterseite sowie jene der Flächen in Aufbaurichtung senkrecht (R_{zXZ}) und parallel (R_{zYZ}) zur Bewegung der Auftragseinheit (vgl. Kapitel 6.2.1).

Die Auswirkungen unterschiedlicher Packungsdichten auf die Oberflächenrauheit werden in Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9 veranschaulicht. Hierbei werden die R_z -Messwerte der untersuchten Oberflächen präsentiert. Es ist allgemein bekannt, dass die Ober- und Unterseiten des Bauteils ohne Treppenstufeneffekt eine höhere Qualität aufweisen als die Seitenflächen. Dies kann beispielsweise mit dem Schichtbauprinzip und minimalen Verschiebungen der Bauteile beim Pulverauftrag begründet werden.

Der Vergleich beider Rakeln zeigt, dass die runde Rakel mit ca. 2 % höherer Packungsdichte geringere Rauheitswerte an allen Oberflächen des Bauteils erzeugte. Der geringste R_z -Wert befindet sich auf der Unterseite des Bauteils und beträgt 56,3 μm . Die Oberseite weist mit einem R_{zO} -Wert von 58 μm ein vergleichbares Qualitätsniveau auf. Ein Qualitätsverlust war bei den Seitenflächen der Bauteile zu verzeichnen, wo die mittlere Rauheitstiefe auf Werte von mehr als 90 μm ansteigt. Die höchste Oberflächenrauheit wurde bei der flachen Rakel mit 108,3 μm gemessen.

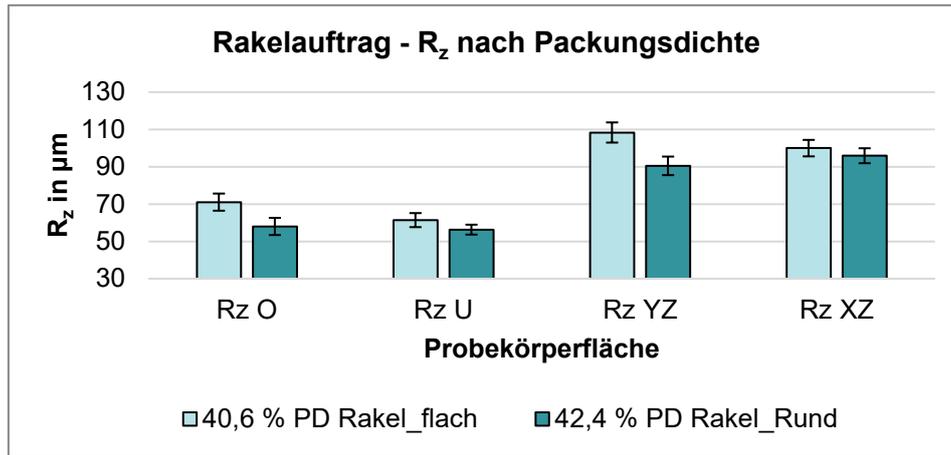


Abbildung 6-8: Vergleich der Oberflächenrauheit unterschiedlicher Rakelgeometrien

Bei der Analyse beider Ergebnisse zeigt sich, dass die abgerundete Rakel im Vergleich zu anderen Varianten sowohl hinsichtlich der Packungsdichte als auch hinsichtlich der Oberflächenrauheit im Laser-Sinter-Prozess tendenziell bessere Ergebnisse lieferte. Es war zu beobachten, dass sich die Oberflächen in Aufbaurichtung ebenfalls voneinander unterscheiden. Die Verdichtung des Ausgangsmaterials beeinflusst die Oberfläche RzYZ, die senkrecht zur Auftragsrichtung liegt. Dieser Effekt kann darauf zurückzuführen sein, dass bei geringer Verdichtung ein Überwurf des Pulvers über die Einfallkante des geschmolzenen Bauteilquerschnittes erfolgt. Dies würde bedeuten, dass bei einer alternierenden Beschichtungsrichtung nur jede zweite Schicht im Randbereich des Querschnittes ausreichend Ausgangsmaterial aufweist und so die Oberflächenrauheit beeinflusst wird.

Der Vergleich gegenläufiger Walzen für den Pulverauftrag wird in Abbildung 6-9 gezeigt. Die geringste Packungsdichte erzielte die kommerzielle DTM 2500 mit durchschnittlich 41,3 %. Dies äußerte sich in besonders glatten Ober- und Unterseiten des Bauteils von ca. 47 µm bei einer maximalen Standardabweichung von +/- 3,7 µm sowie in auffällig rauen Oberflächen an den Seiten von bis zu 134 µm bei einer erhöhten Standardabweichung von 17 µm.

Die Versuchsanlage lieferte höhere RzO- und RzU-Werte und im Gegensatz dazu geringere Rauheitswerte an den Seitenflächen. Alle Standardabweichungen der jeweiligen Einzelversuche lagen in einem niedrigen Bereich von < 6 %. Der aus der Versuchsanlage resultierende Rauheitsmittelwert der Ober- und Unterseite lag bei etwa 70,8 (+/- 7) µm, während er an den Seitenflächen ca. 90 (+/- 3,4) µm betrug. Die Seitenflächen hatten damit durchschnittlich eine um ca. 27 % höhere Rauheit als die Ober- und Unterseiten. Dieser Qualitätsunterschied war bei einer Sichtkontrolle der Proben ohne Hilfsmittel zu erkennen.

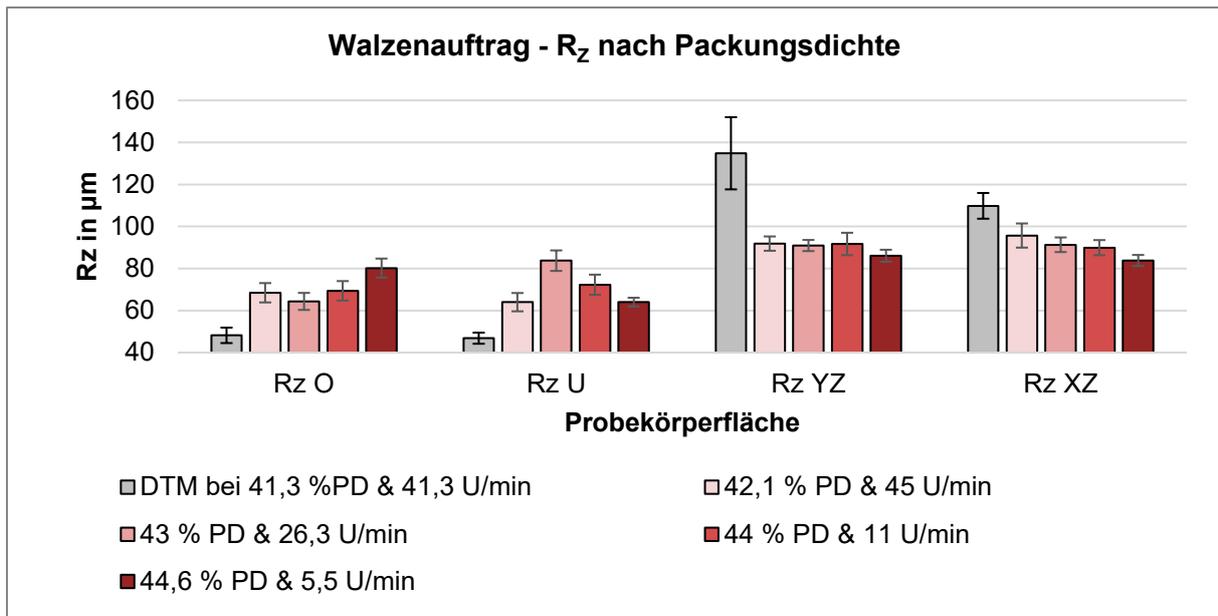


Abbildung 6-9: Oberflächenrauheit nach Packungsdichte beim Auftrag mittels gegenläufiger Walze

Bei einer genaueren Betrachtung der einzelnen Bauteilflächen könnten die Ergebnisse so verstanden werden, dass bei der Versuchsanlage die Rauheit der Oberseiten bei Erhöhung der Packungsdichte zunimmt. Erst wenn die Betrachtung der Unterseite hinzugefügt wird, fällt auf, dass das Verhalten der erreichten Packungsdichte und der resultierenden Rauheit zwischen Ober- und Unterseite gegenläufig ist. Eine mögliche Erklärung liegt in der Besonderheit der oberen und unteren Oberflächen eines Bauteils, auch Up-Skin und Down-Skin genannt. Bei kommerziellen Anlagen können bei diesen Oberflächen gesonderte Belichtungsparameter mit einem angepassten Energieeintrag verwendet werden [100, 232]. Der Energieeintrag beeinflusst wiederum die Temperatur und reziprok die Viskosität der Schmelze, die sich um die Pulverpartikel legt und die Rauheit der Bauteile bestimmt [21, 233, 234]. Es kann folglich festgehalten werden, dass ohne Anpassung des Energieeintrages die Ober- und Unterseiten eines Bauteils gegenläufige Rauheitstrends aufweisen können. Zudem ist eine Packungsdichte im optimierten Bereich dadurch gekennzeichnet, dass möglichst geringe Rauheitsunterschiede zwischen Ober- und Unterseite auftreten.

Die erhöhten Rauheitswerte der y/z-Fläche lassen sich damit erklären, dass es einen Schwellenwert der im Prozess vorherrschenden Packungsdichte gibt, der erreicht werden sollte. Trotz der tendenziell höheren Oberflächenrauheit auf den Seitenflächen war besonders bei der y/z-Fläche ein signifikanter Qualitätsverlust der Oberflächenrauheit vorzufinden, sobald die Packungsdichte einen Wert unterhalb von 42 % erreichte. Die Seitenflächen zeigten signifikante Unterschiede der durchschnittlichen Rauheit von 90 µm bis 134 µm. Gleichartige Ergebnisse wurden bei den Rakelversuchen erzielt, was durch den alternierenden Überwurf des Pulvers über die Einfallkante des belichteten Bauteilquerschnittes erklärt wird. Da die Auftragsgeschwindigkeit bei allen Versuchen konstant bei 127 mm/s gehalten wurde, kann dieser Effekt auf eine zu geringe Verdichtung des umliegenden Materials zurückgeführt werden. Eine weitere Erhöhung der Packungsdichte hatte auf die y/z-Fläche keinen kennzeichnenden Einfluss, während auf der x/z-Fläche bei zunehmenden Packungsdichten niedrigere Rauheiten von 95,7 µm bis minimal 83,8 µm resultierten.

Die Auftragsmechanismen werden in Abbildung 6-10 nach ihrem Mittelwert und der Standardabweichung hinsichtlich aller betrachteten Flächen aufgetragen, um einen Kennwert der Reproduzierbarkeit des Pulverauftragsystems zu erhalten. Den geringsten Mittelwert erreichte die runde Rakel mit einer durchschnittlichen Rauheit von $R_z = 75,2$ ($\pm 18,1$) μm . Die flache Rakel erzielte einen Mittelwert von 85 ($\pm 19,5$) μm . Die geringsten Standardabweichungen lagen mit ca. $10 \mu\text{m}$ bei der Beschichtung mit gegenläufiger Walze bei der Versuchsanlage vor. Dabei erreichten die Oberflächenrauheiten je nach U/min durchschnittlich $78,5 \mu\text{m}$ bis maximal $82,5 \mu\text{m}$. Mit einem Rauheitswert von $84,9 \mu\text{m}$ und einer hohen Standardabweichung von $38,4 \mu\text{m}$ erzeugte das Auftragssystem der kommerziellen Anlage die größten Rauheitsdifferenzen in den erstellten Bauteilflächen.

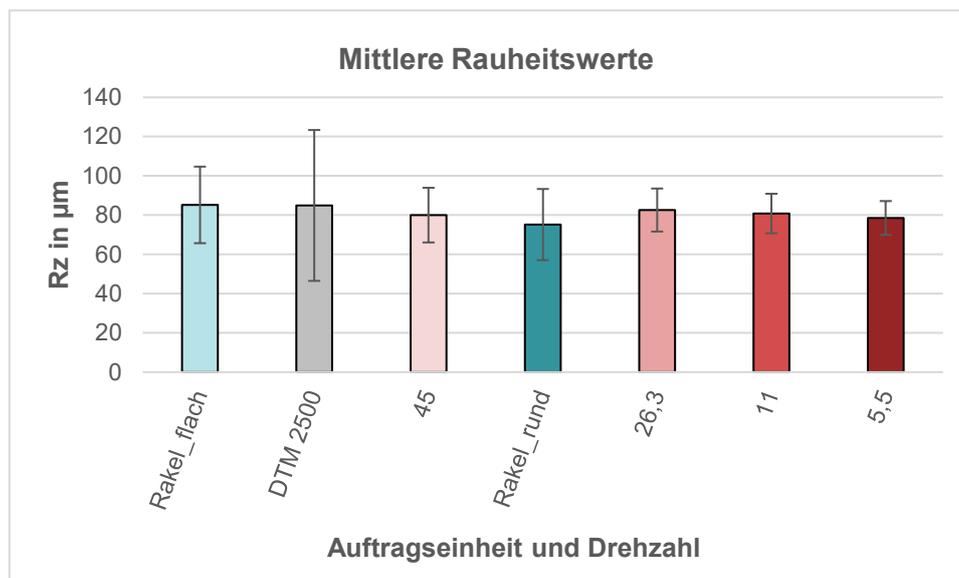


Abbildung 6-10: Reproduzierbarkeit der Auftragsmechanismen anhand der Oberflächenrauheit

Die zusammengefassten Ergebnisse zeigen, dass eine Annäherung der Oberflächenrauheit der betrachteten Flächen bei höheren Packungsdichten erfolgt. Dieser ermittelte Trend ist unabhängig von der verwendeten Anlage und vom Auftragsmechanismus und verdeutlicht, dass die Packungsdichte einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenrauheit hat. Letztere ist an den Seitenflächen der Bauteile am höchsten und sollte dahingehend optimiert werden, dass sie an allen Flächen gleich ist. Dies hätte den Vorteil, dass die Oberflächenrauheit weniger von der Orientierung des Bauteils abhängen würde. Besonders vorteilhaft wäre dies bei einer chemischen Nachbehandlung, deren Ergebnis ebenfalls von der vorliegenden Oberflächenqualität abhängt [232]. Abgesehen vom Stufeneffekt der aufeinandergelegten Einzelschichten wäre somit die Oberflächenqualität eines additiv gefertigten Bauteils weitestgehend konstant.

Unterschiede in der Oberflächenrauheit, die von der Orientierung der Fläche eines Bauteils abhängen, sind in der Additiven Fertigung gut dokumentiert und werden als prozessbedingt akzeptiert. Insbesondere der Treppenstufeneffekt, der durch die übereinanderliegenden Schichten entsteht, gilt als unvermeidlich. Er ist besonders ausgeprägt bei flachen Neigungswinkeln zur Baufeldebene und führt zu merklichen Unebenheiten auf der Oberfläche des Bauteils [101, 21, 20]. Optimierungen des Treppenstufeneffekts können durch geringere

Schichtstärken oder Textierungen der Bauteiloberfläche erreicht werden [101, 235]. Beim Schichtenaufbau spielt die Form des Schmelzbades eine entscheidende Rolle. Abhängig von der Ausprägung des gaußförmigen Intensitätsprofils muss die Konturbelichtung unterschiedlich tiefe Rillen ausgleichen. Die erzielte Packungsdichte hat dabei einen signifikanten Einfluss auf die Ausformung des Schmelzbades. Ist sie höher, führt dies zu einem gleichmäßigeren und stabileren Schmelzbad, was zu einer verbesserten Oberflächenqualität des Bauteils beiträgt [143].

6.2.3 Ergebnisse zur Spurbreite und entstehenden Schmelze

Bei den Einzelspurversuchen wurde erstmalig der aufgeweitete Fokusspot S_D im Bauprozess realisiert. Um möglichst reproduzierbare Ergebnisse erzielen zu können, musste folglich die Pulverpackungsdichte im Prozess ebenfalls reproduzierbar sein. Da der Walzenmechanismus im Verlauf der Versuche Verschleißerscheinungen aufgezeigt hat, wurden nachfolgende Untersuchungen ausschließlich mit der Standardrakel (ID-Nr.: 1213-0109) durchgeführt. So konnte der Einfluss variierender Packungsdichten auf die resultierenden Bauteileigenschaften minimiert werden.

Die Fokusstufen wurden von F0 bis F10 variiert und zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurden die Versuche zweifach durchgeführt und ausgewertet. Die Auswertung der Einzelspurprobekörper erfolgte in Abhängigkeit von der jeweiligen Fokusstufe. Als Vergleichswert für eine kommerzielle Anlage wurde die Spurbreite einer EOS P100 herangezogen. Signifikante Parameter sind hierbei die Breite der Einzelspur S_B , der Hatchabstand H zu Beginn eines homogenen Schmelzbades (H_h) und die resultierende Volumenenergiedichte E_V , die sich aus den Abständen zwischen den Einzelspuren, der verwendeten Laserleistung und der konstanten Schichtstärke von 0,1 mm ergibt. Die Untersuchungen der Einzelspuren in zwei Versuchsreihen ergaben, dass mit Ausnahme der höchsten Fokusstufe reproduzierbare Ergebnisse bezüglich der Spurbreite S_B erzielt wurden (siehe Abbildung 6-11). Die mit dem Mikroskop ermittelten Einzelspurbreiten der Fokusstufen 0 bis 10 zeigten, dass die Spurbreite bis F2 nur geringe Änderungen aufwies und zwischen 0,55 mm und 0,7 mm schwankte. Ab F3 veränderte sie sich konstant bis zur höchsten Fokusstufe, wobei in der zweiten Versuchsreihe zwischen F9 und F10 nur marginale Änderungen beobachtet wurden. Die geringste Spurbreite von 0,55 mm wurde bei F2 der Versuchsreihe 1 festgestellt, die größte von 2,28 mm bei F10 derselben Versuchsreihe.

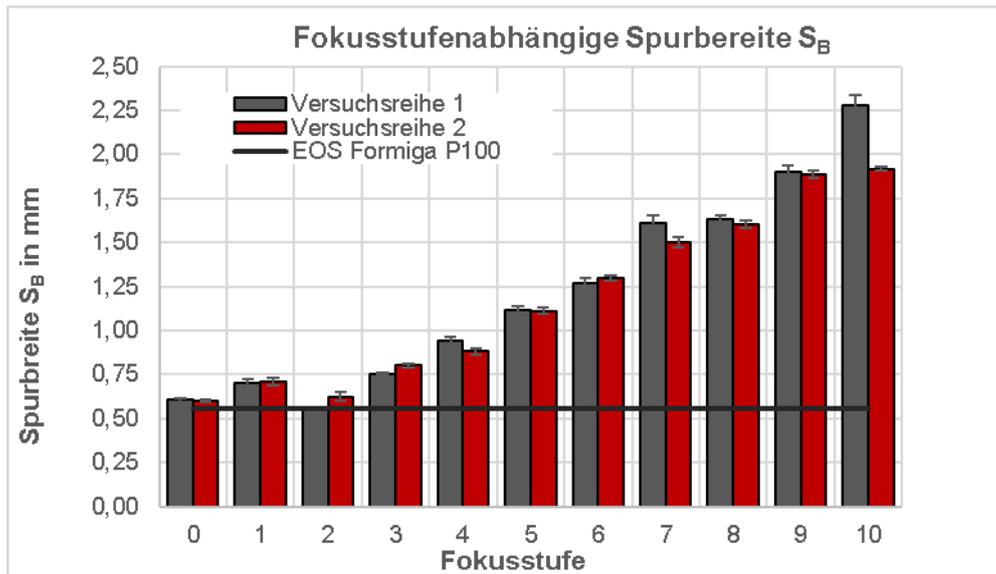


Abbildung 6-11: Ergebnisse zur Spurbreite S_B in Abhängigkeit von der Fokusstufe

Bei niedrigen Fokusstufen zeigten die Ergebnisse teils unerwartetes Verhalten. Die Verringerung der Spurbreite bei F2 könnte auf ein leistungsspezifisches Verhalten des in der Versuchsanlage verbauten AOM hinweisen. Zuverlässige Spurbreitenvariationen bewegten sich zwischen 0,6 mm bei Fokusstufe 0 und 1,9 mm bei Fokusstufe 9. Alle Einzelspuren zeigten Unterschiede in der Eindringtiefe, die von ca. 150 μm beim kleinsten Fokus bis 220 μm bei F10 reichte, was auf die verlängerte Wechselwirkungszeit zwischen Fokusdurchmesser und Pulverbettoberfläche zurückzuführen sein könnte.

Der Probekörper erlaubte neben der Ermittlung der Einzelspurbreite auch die Untersuchung der Wechselwirkung zweier nebeneinander liegenden Spuren. Die Auswertung eines Prüfkörpers aus der EOS Formiga P100 zeigte eine Einzelspurbreite von 0,553 mm. Beim selben Probekörper lag jedoch bereits ab einem Spurbreitenabstand von 0,43 mm ein homogenes Schmelzbad vor. Unter Berücksichtigung der Einzelspurbreite von 0,553 mm ist diese Beobachtung nachvollziehbar, wobei die resultierende Volumenenergiedichte in diesem Fall lediglich 0,196 J/mm^3 betrug. Im Vergleich zu den standardmäßigen Prozessparametern, bei denen die Volumenenergiedichte E_V bei 0,35 J/mm^3 liegt, ist die Abweichung als hoch einzustufen.

Die signifikante Differenz zwischen dem standardmäßigen Hatchabstand von 0,25 mm und dem Abstand von 0,43 mm beim bereits entstehenden homogenen Schmelzbad deutete darauf hin, dass ein Korrekturfaktor zur Übertragbarkeit der Ergebnisse des Prüfkörpers auf die resultierenden Spurbreitenabstände notwendig ist. In Abbildung 6-12 ist Zone III als Bereich des homogenen Schmelzbades dargestellt, ab dem Einzelspuren nicht mehr zu erkennen sind. Der Übergang von Zone II zu Zone III wurde als Kennwert für den Hatchabstand zur beginnenden homogenen Schmelze verwendet.

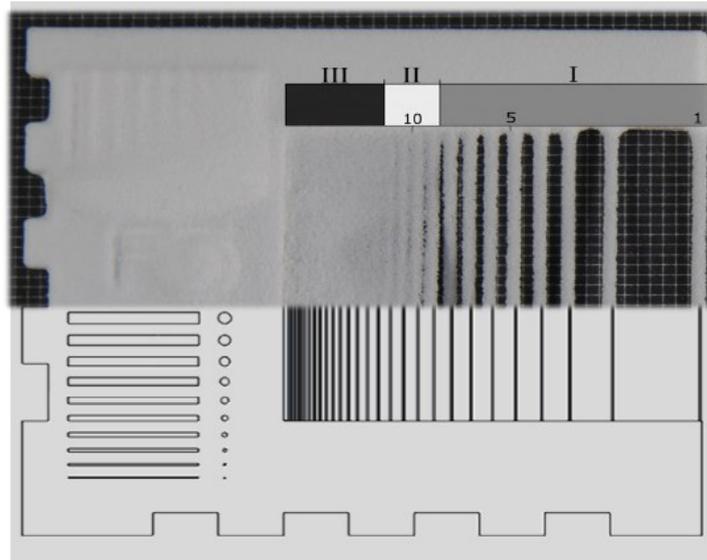


Abbildung 6-12: Einteilung der Zonen am Probekörper

Die Validierung dieser Vorgehensweise erfolgte durch die Auswertung der kleinsten Fokusstufe bei der Versuchsanlage. Diese zeigte im Vergleich zur P100 bei F0 eine um ca. 0,05 mm breitere Einzelspur von 0,6 mm. Auch bei dieser Probe lag der Hatchabstand H für ein homogenes Schmelzbad bei 0,457 mm, mit einer resultierenden Energiedichte von $0,192 \text{ J/mm}^3$, was einer Abweichung von lediglich 2 % gegenüber der Stützstelle entspricht.

Bedingt durch die reproduzierbaren Ergebnisse der kommerziellen und der Forschungsanlage wurde ein Korrekturfaktor eingeführt, um den prozesssicheren Hatchabstand H direkt aus dem beginnenden homogenen Schmelzfilm H_h ermitteln zu können. Dabei handelt es sich um den Quotienten aus H_h und dem empfohlenen Prozessparameter für den Hatchabstand H der kommerziellen Anlage von 0,25 mm. Somit wurde der dimensionslose Korrekturfaktor von 0,591 bestimmt, der direkt zur Ermittlung des einstellbaren Anlagenparameters H als Resultat der ersten homogenen Schmelzfilmbildung verwendet werden konnte. Die Auswertung der Probekörper der jeweiligen Fokusstufen können Abbildung 6-13 entnommen werden. Es wurde ein voraussichtlicher Spurbreitenabstand von 0,27 mm bei F0 bis 0,85 mm bei F10 errechnet.

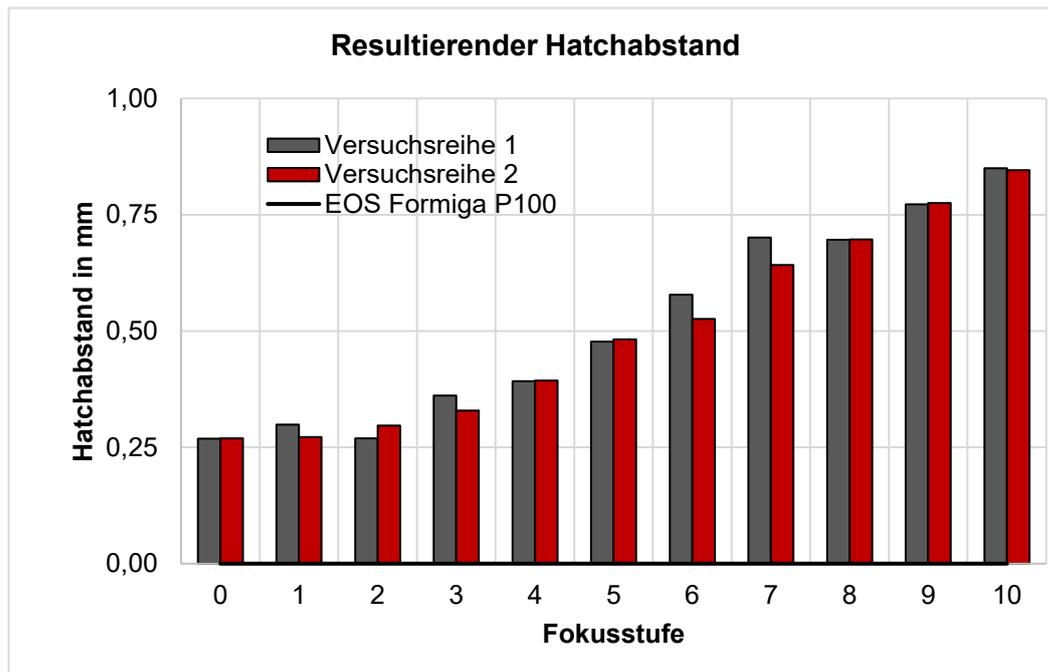


Abbildung 6-13: Errechneter Hatchabstand H in Abhängigkeit von der Fokusstufe

Wie zu erkennen ist, weisen die Ergebnisse der homogenen Schichtbildung und jene der Einzelspuren einen ähnlichen Verlauf auf. Dies deutet auf eine korrekte Auswertung der Einzelspuren hin, obwohl die Handhabung der filigranen Einzelspuren herausfordernd war. Die Resultate sind in sich logisch, da eine zunehmende Einzelspurbreite bei einer Verringerung des Spurbreitenabstandes eher befähigt ist, ein homogenes Schmelzbad zu erzeugen.

Die so ermittelten Anlagenparameter sollten nachfolgend mit den Querschnitten der Einzelspuren überprüft werden. Maßgeblich für die erfolgreiche Schichtgenerierung ist neben der Herstellung eines homogenen Schmelzbades die Eindringtiefe, also die erzeugte Einzelschichtstärke. Diese sollte je nach Material bei der 1,5- bis 2,5-fachen Schichtstärke der Anlage liegen, sodass eine qualitativ hochwertige Verbindung zur darunterliegenden Schicht stattfinden kann [73, 236].

Zur Bewertung der Schichtanbindung wurde die Querschnittsform der Einzelspuren und Schmelzbäder herangezogen. Da die Intensitätsverteilung des Laserstrahls einer Gauß-Verteilung entspricht, wurde erwartet, dass der resultierende Querschnitt der Einzelspur diese Intensitätsverteilung wiedergibt (vgl. Abbildung 6-14). Zu sehen sind drei repräsentative Fokusstufen (F0, F5 und F10).

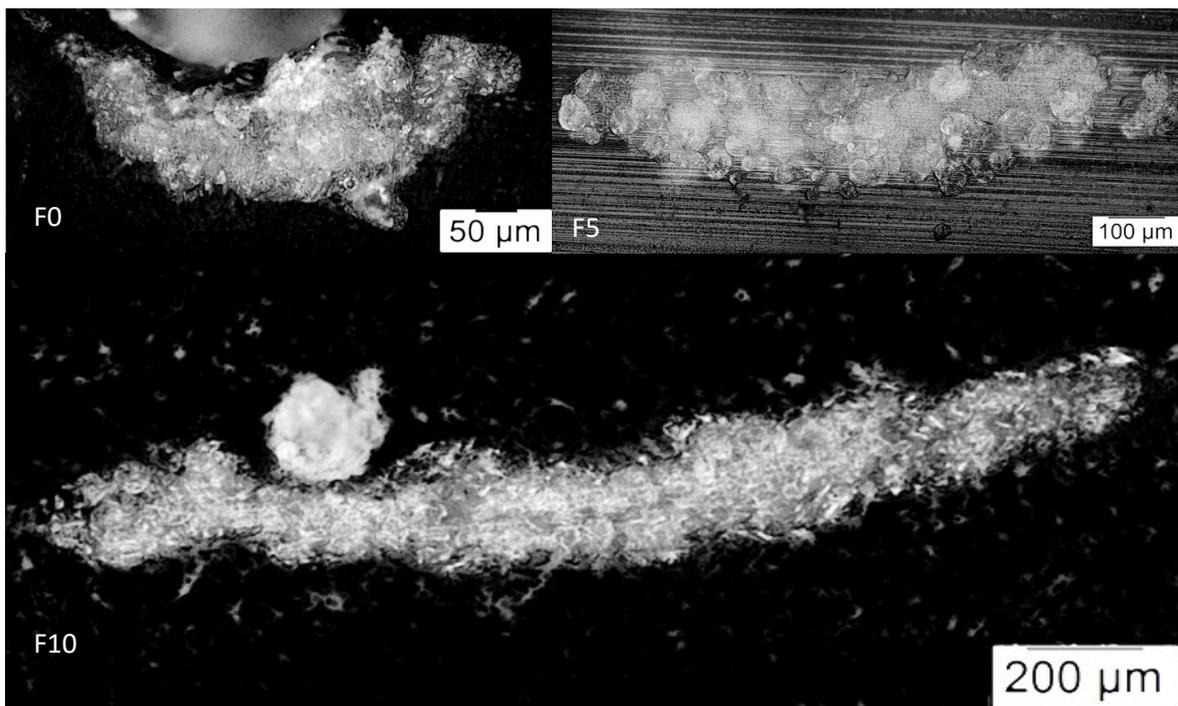


Abbildung 6-14: Querschnitte der Einzelspuren ausgewählter Fokusstufen

Die Fokusstufe 0 war durch eine nach unten abgerundete Form charakterisiert, die an ein Kreissegment erinnert. Dahingegen wurde diese Form bei größeren Fokusstufen in die Breite gestreckt. Die Form der Einzelspur veränderte sich an den Seitenflächen nicht signifikant, sodass bei einer breiteren Einzelspur von einer konstanten Überlappung zur Ausbildung eines homogenen Schmelzbades ausgegangen werden kann. Es ist zu erkennen, dass sich die Breite der Spuren überproportional zur Eindringtiefe entwickelte. Zudem können bei F5 vereinzelte Pulverpartikel erkannt werden, die darauf schließen lassen, dass der Energieeintrag weiter erhöht werden sollte. Die Eindringtiefe der Einzelspuren und des entstehenden Schmelzbades lag bei Werten zwischen 0,15 mm bei F0 und 2,2 mm bei F10, was in beiden Fällen auf eine ausreichende Energieeinbringung zum Verbund der darunterliegenden Schicht schließen lässt. Die Eindringtiefe der Schmelzen konnte bei höheren Fokusstufen mit bis zu 0,405 mm gemessen werden, ohne sichtbare Zersetzungseffekte. Diese Beobachtung lässt vermuten, dass mit einem aufgeweiteten Fokus mehr Energie in das Material eingebracht werden kann, ohne es thermisch zu schädigen.

Abbildung 6-15 zeigt anhand von drei repräsentativen Fokusstufen die maximalen Energiedichten, die realisiert wurden, und die resultierenden Einschmelztiefen. Betrachtet werden F0, F5 und F10. Die Energiedichte der niedrigsten Fokusstufe erstreckte sich von $0,14 \text{ J/mm}^3$ bis $0,3 \text{ J/mm}^3$. Die damit maximal erreichte Schichtstärke belief sich auf $200,3 \mu\text{m}$. Da die verwendeten Energiedichten unterhalb der standardmäßig verwendeten Energiedichte der P100 liegen ($0,34 \text{ J/mm}^3$), lässt sich ein weiterer Anstieg der erzielbaren Schichtstärke auf bis zu $220 \mu\text{m}$ erwarten. Ein signifikanter Unterschied war bei den realisierbaren Energiedichten mit vergrößertem Fokus zu erkennen. Hierbei wurden Schichtstärken bis $288,7 \mu\text{m}$ bei F5 und $0,7 \text{ J/mm}^3$ und bis $400,6 \mu\text{m}$ bei F10 und $0,94 \text{ J/mm}^3$ festgestellt. Der Abfall der Schichtstärken in den größeren Fokusstufen kann ein Indiz für bereits eintretende

Zersetzungseffekte sein und signalisiert die oberen Grenzen des materialabhängigen Energieeintrages.

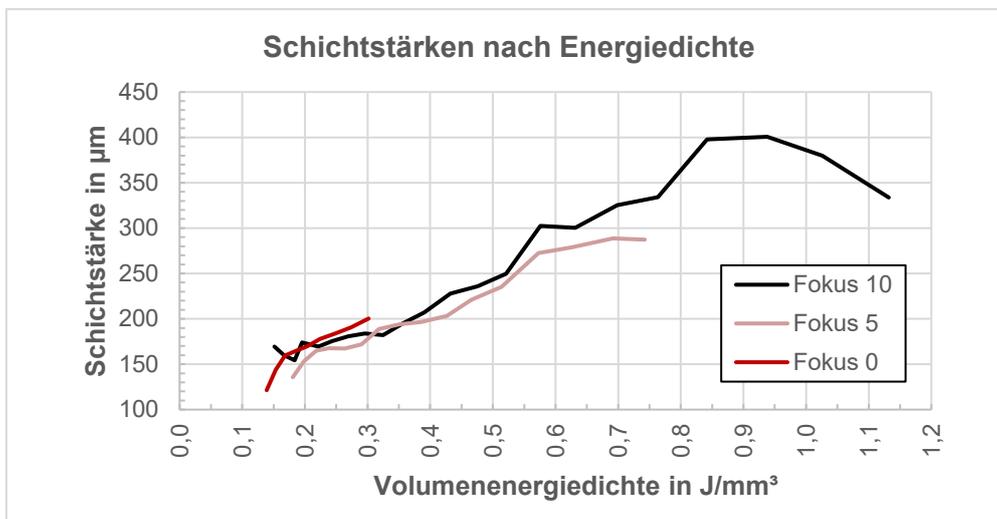


Abbildung 6-15: Erreichbare Schichtstärken nach resultierender Energiedichte

Es konnten sowohl eine Einzelspur mit einer Breite von bis zu 2,28 mm als auch eine zweidimensionale Fläche mit Spurbreiten von maximal 0,85 mm erfolgreich hergestellt werden. Zudem konnten die passenden Anlagenparameter für die Erzeugung dreidimensionaler Bauteile mit aufgeweiteten Fokusdurchmessern evaluiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass durch einen vergrößerten Fokus mit den daraus resultierenden Anlagenparametern eine Beschleunigung des Prozesses realisierbar ist.

Die Erzeugung der Bauteilquerschnitte hat einen Einfluss auf die Dauer des PBF-LB/P-Prozesses. Gemäß dem Stand der Technik wird zugunsten einer detailgetreuen Darstellung ein möglichst kleiner Fokusdurchmesser verwendet, der einen geringen Spurbreitenabstand zulässt. Erweitert wurde der Stand der Technik mit einem größeren und dynamisch variablen Fokus, der einen signifikant höheren Spurbreitenabstand realisieren kann, um großflächige Bauteile mit geringerem Zeitaufwand belichten zu können. Diese Untersuchung zeigte eine geeignete Vorgehensweise auf, wie Anlagenparameter bei neuen Optiksyste men qualifiziert werden können. Die Einzelspurbreiten sowie die variierenden Hatchabstände konnten mit einem Probekörper zuverlässig ermittelt werden und erlauben die Implementierung prozessbefähigender Parametersätze für unbekannte Fokusgrößen.

Gemäß der Betrachtung der Produktivitätssteigerung in Kapitel 4.3 wurden die aktuellen Ergebnisse neu bewertet (vgl. Abbildung 4-9). Im Vergleich zum Stand der Technik zeigte sich, dass eine Reduktion der Belichtungszeit durch eine Vergrößerung des Fokusspots möglich ist. Im Experiment konnten erfolgreich Schmelzfilme mit einem Hatchabstand von 0,85 mm realisiert werden. Bei einer Scannergeschwindigkeit von 4000 mm/s, wie sie maximal in der Versuchsanlage verwendet werden kann, betrug die Belichtungszeit des Querschnittes daher 0,5 s anstatt 1,7 s, was einer Beschleunigung von 240 % entspricht. Die ursprünglich angedachten 400 % konnten somit nicht erreicht werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die tatsächlich erzielbaren Beschleunigungen unter anderem von der Bauteilgeometrie, der

erreichbaren Scannergeschwindigkeit und der Scanstrategie abhängen. Große Fokusdurchmesser können jedoch durch die hohe Eindringtiefe zu innovativen Scanstrategien weiterentwickelt werden. Zukünftige Fillscanstrategien könnten darauf abzielen, nur jede zweite oder dritte Schicht eines Bauteils zu belichten, während die Kontur in jeder Schicht gefertigt wird. Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen auf, dass diese Strategie zu ähnlichen Bauteileigenschaften führen kann wie die klassische Belichtung in jeder Einzelschicht [237]. So kann sowohl der Detaillierungsgrad beibehalten als auch die Produktivität gesteigert werden.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass ein vergrößerter Fokus nicht immer eine ausreichende Anbindung an die Kontur gewährleisten kann. Eine doppelte Konturbelichtung, bei der mit einer Fokusstufe zwischen dem großen Fokus im Fillbereich und der detaillierten Kontur gearbeitet wird, ist als zielführend zu erachten (vgl. Kapitel 5.2.2). Die Belichtungszeit stellt zudem nur einen Teil der Prozesszeit dar und sollte beim Ziel der Prozessbeschleunigung nicht als alleiniger Stellhebel betrachtet werden. Neben der Bauteilbelichtung entfallen im Prozess weitere Zeiten auf den Pulverauftrag und das Vorheizen der frischen Pulverschicht.

Der Nachweis, dass eine Fokusspotaufweitung zu homogenen Schmelzbädern führen kann und eine ausreichend tiefe Schmelze zur Schichtanbindung erzielt, ist Grundvoraussetzung für den Verbund zweier aufeinander generierter Bauteilschichten. Diese Grundvoraussetzung wurde unter Verwendung eines Probekörpers sowie dessen erfolgreicher Auswertung geschaffen. Nachfolgende Untersuchungen befassten sich mit der Fertigung dreidimensionaler Bauteile und deren Eigenschaften.

6.2.4 Ergebnisse zur Bauteildichte

Um dreidimensionale Bauteile mit unterschiedlichen Laserspotgrößen erzeugen zu können, müssen prozessvalide Parameter vorliegen. Diese wurden in den vorigen Versuchen erst eindimensional anhand von resultierenden Spurbreiten und darauf aufbauend zweidimensional durch die Charakterisierung der entstehenden Schmelze ermittelt. Die Erkenntnisse dieser Versuche wurden aufgegriffen und für den dreidimensionalen Aufbau von Dichtequadern herangezogen.

Vorversuche

Die Versuchsreihen zur Bauteildichte dienten der Erprobung und Optimierung der Parametersätze für vergrößerte Laserspotdurchmesser. Sie unterschieden sich von den bisherigen Untersuchungen in der aufeinander aufbauenden Schichtgenerierung, die zur Erstellung eines Bauteils notwendig sind. Für die nachfolgenden Versuche wurde ausschließlich Betriebspunkt 2 (200 W) verwendet, um den vergrößerten Laserspots ausreichend Energie zur Generierung der Schmelze bereitzustellen. Auf Basis der Ergebnisse vorangegangener Versuchsreihen konnten Vorversuche zur dreidimensionalen Bauteilerstellung durchgeführt werden. Zunächst wurde auf dem Stand der Technik aufgebaut, weshalb die Laserleistung auf 30,9 W reduziert wurde. Folglich musste die Geschwindigkeit des Hatchings verringert werden, um ausreichend Energie für aufgeweitete Fokusstufen zur Verfügung zu stellen. Zur Kompensation der Eckenverrundung und für einen verbesserten Übergang zwischen der innenliegenden Schmelze und der Kontur wurde bei vergrößerten Spotdurchmessern eine doppelte Kontur gefahren, die einmal mit Standardparametern und

einmal mit aufgeweitetem Spotdurchmesser realisiert wurde. Die Probekörpermaße betragen dabei 10 mm x 15 mm x 10 mm (x, y, z). Die Ergebnisse der Vorversuche zeigten jedoch signifikante Unterschiede zwischen der Soll- und der Istform auf, die sich in Form von Rillenbildung an zwei der vier Flächen in Aufbaurichtung äußerten. Diese Defekte verstärkten sich, je größer der Spotdurchmesser eingestellt war (vgl. Abbildung 6-16).

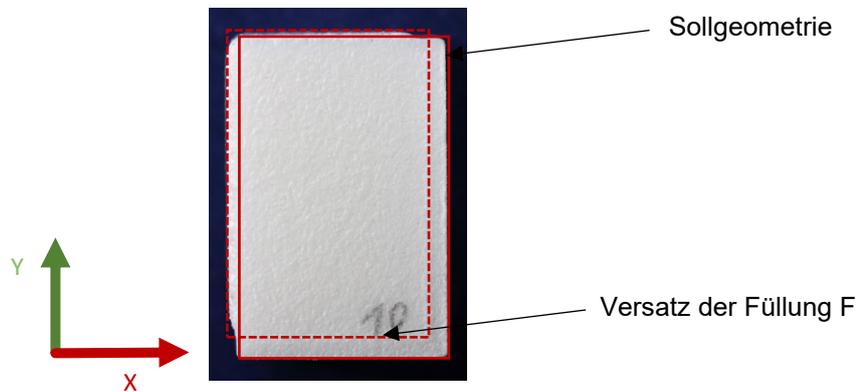


Abbildung 6-16: Verschiebung des Füllmusters zur Kontur am Beispiel von Fokusstufe 10

Die verwendeten Energiedichten beliefen sich auf $0,35 \text{ J/mm}^3$ für den Hatch, $0,15 \text{ J/mm}^3$ für Kontur 1 mit variablem Fokus und $0,2 \text{ J/mm}^3$ für Kontur 2 mit konstanter Fokusstufe 0. Es war zu erkennen, dass die Füllung F der Dichtewürfel in zwei Richtungen verschoben zur Sollkontur K_{SOLL} war und bei großen Fokusstufen über die Kontur hinausragte. Dies geschah in negativer x- und positiver y-Richtung. Eine Überprüfung der Anomalien auf Thermopapier wurde durch Auslesen der Scannerspiegelpositionen ergänzt und bestätigte die Annahme, dass diese Defekte weder aus einer Abweichung der Scannerspiegel noch aus dem Betriebspunkt resultierten. Folglich könnte von einem nicht zentrierten Eingang der aufgeweiteten Laserstrahlung in den Scanner, einem weiteren Einfluss des AOM oder einer Kombination von beiden Fällen ausgegangen werden. Aufgrund der Komplexität der Strahlkalibrierung und laufender Versuche wurde die Qualifizierung mit dem Wissen um diesen Umstand fortgesetzt.

Die Vorgehensweise der Versuche wird in Abbildung 6-17 dargestellt. Die ersten Versuchsreihen bezogen sich auf die Anpassung des Parameters der Strahlkompensation und die Beachtung der Hatchkonformität. Weiterführend wurde auf eine alternative Skin-Core-Scanstrategie gewechselt, um die Geometriegetreue der Bauteile zu wahren. Abschließend wurde die doppelte Konturbelichtung erneut aufgegriffen und anhand der Kenntnisse aus den vorangegangenen Versuchsreihen weiter optimiert.

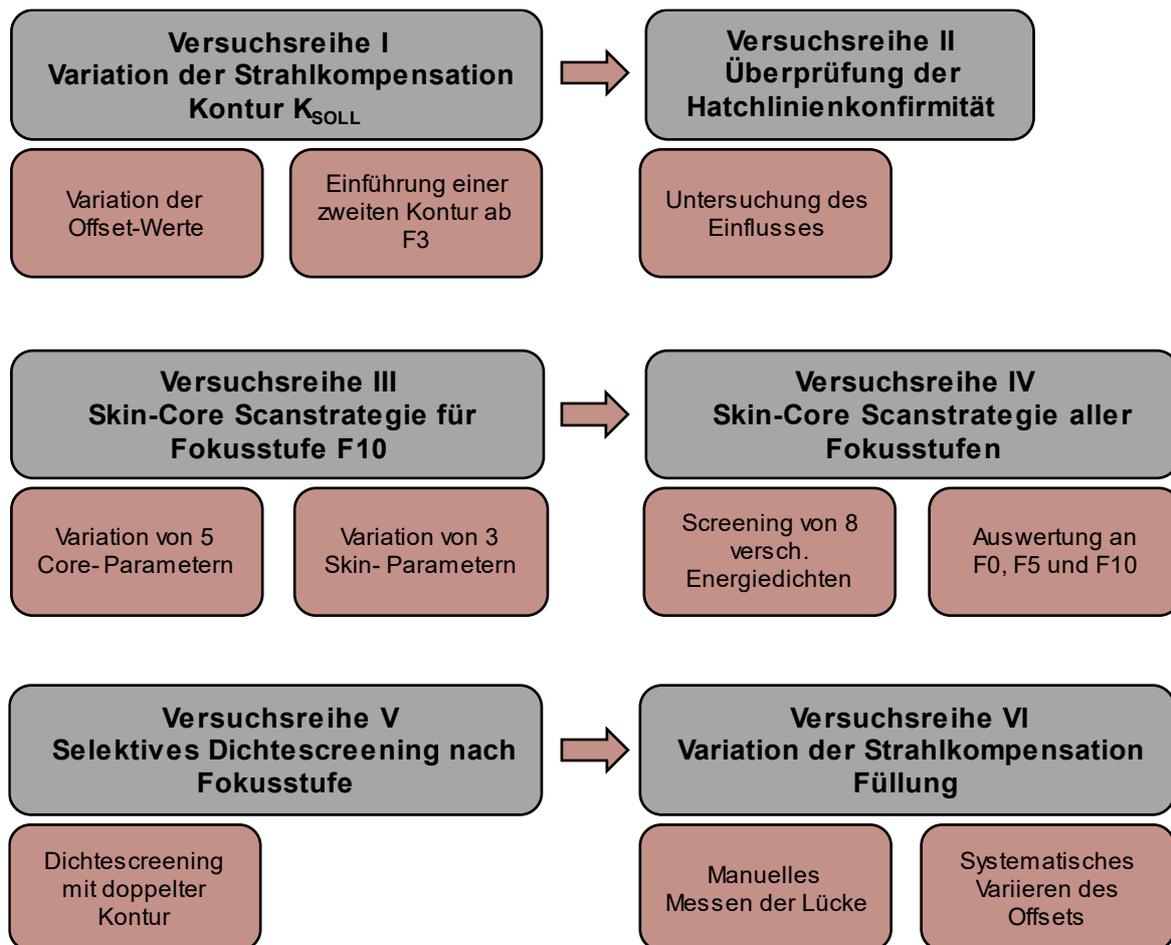


Abbildung 6-17: Ablauf der Versuchsreihen zur Bauteildichte

Versuchsreihe I – Variation der Kontur-Strahlkompensation

Nachfolgende Untersuchungen befassten sich notwendigerweise mit verschiedenen Ansätzen zur Optimierung und Sicherstellung einer hohen Qualität der Bauteile unter Verwendung von vergrößerten Laserspotdurchmessern. Die herangezogenen Dichtequader hatten eine Höhe von 10 mm sowie eine Breite von 10 mm und unterschieden sich je nach Fokusstufe in der Länge (von 11 mm in Differenzierung von jeweils 0,1 mm) voneinander. In dieser Versuchsreihe wurde die Anpassung der Strahlverschiebung auf der Grundlage der realen Spurbreiten durchgeführt (vgl. Kapitel 6.2.3). Zudem wurden zwei Konturen mit unterschiedlichen Fokusstufen realisiert. Um die Kontur weiter nach außen zu verschieben, wurde eine Anpassung der Strahlverschiebung vorgenommen, sodass ein Überschreiten der Hatchlinien vermieden werden sollte. Hierfür wurde der Offset von Kontur 2 von 0,15 mm auf -0,04 mm verringert. Eine Anpassung der ersten Kontur erfolgte resultierend aus den jeweiligen eingestellten Fokusstufen ebenfalls durch eine Verringerung des Offsetwertes. Die Volumenenergiedichte der Füllung wurde konstant auf 0,385 J/mm³ gehalten. Kontur 1 (innen) verfuhr mit 0,22 J/mm³ und die äußere Kontur (Kontur 2) mit 0,15 J/mm³. Die Ergebnisse zeigen, dass zwar eine Verbesserung erzielt wurde, jedoch noch immer eine signifikante Rillenbildung ab Fokusstufe 3 resultierte (vgl. Abbildung 6-18).

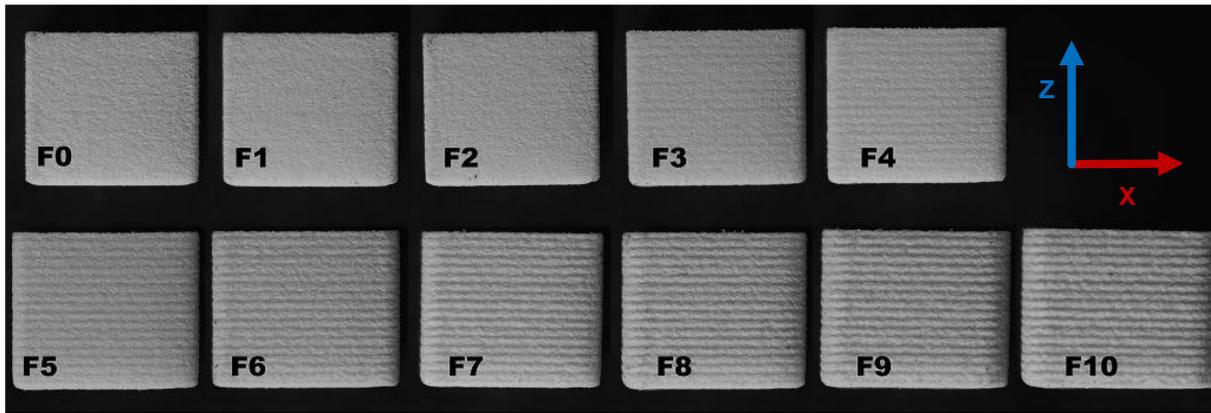


Abbildung 6-18: Auswirkungen der Füllmustersverschiebung nach Fokusstufe

Die Darstellung zeigt die Rückseite (x/z-Ebene) des Dichtequaders zur Illustration des Effekts der Rillenbildung, eines Phänomens, das schon in früheren Experimenten beobachtet wurde. Ab Fokusstufe 3 war dieser Effekt deutlich sichtbar. Er nahm mit jeder weiteren Vergrößerung des Laserspots zu. Interessanterweise führt das Verhältnis der Abmessungen des Dichtequaders in der Aufbaurichtung zur Anzahl der Erhöhungen und Vertiefungen zu einem ungefähren Teilungsfaktor von 3. Dies deutet darauf hin, dass äußere Störungen wie Bewegungen des Quaders während des Pulverauftrags oder Fehler im Scannersystem unwahrscheinlich sind, da solche Störungen typischerweise zu einem alternierenden Muster mit einem Teilungsfaktor von 2 führen würden. Speziell eine Bewegung würde alle zwei Schichten zyklisch erkennbar sein und durch den Kontakt des Beschichters mit dem Prüfkörper während des Prozesses bemerkt werden. Daher können mechanische oder optische Einflüsse als Ursache ausgeschlossen werden. Die Bildung der Schichten muss durch eine Schwankung der eingesetzten Energie während des PBF-LB/P-Prozesses verursacht worden sein. Die Protokollierung der Laserleistung für jede Schichtbelichtung über insgesamt 50 Schichten ergab den nachfolgenden Verlauf.

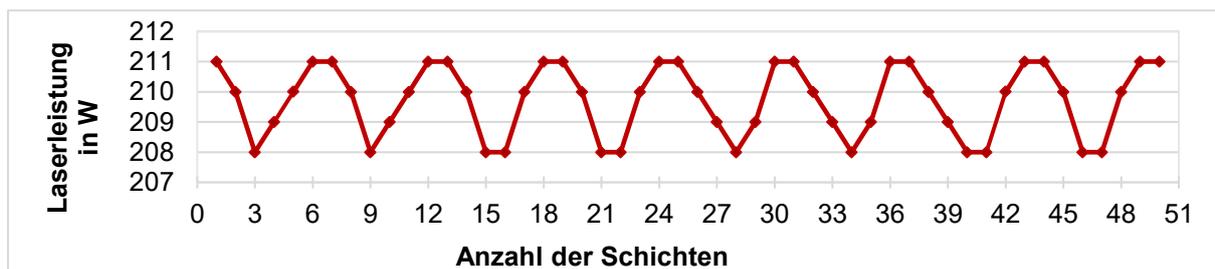


Abbildung 6-19: Getriggerte Laserleistungen im Bauprozess

In der untersuchten Stichprobe wurden alternierende Fluktuationen der Laserausgangsleistung im Spektrum von 208 bis 211 W festgestellt, was einer Abweichung von ca. 1,4 % entspricht. Diese Variation befindet sich innerhalb der vom Hersteller spezifizierten Toleranzgrenzen. Eine Analyse der Laserleistungsmaxima und -minima im Kontext der entsprechenden Schichtanzahl offenbarte, dass nach ca. jeder dritten Schicht ein Wechsel zwischen einem Leistungsabfall und einem -anstieg stattfand. Dies korreliert mit den

beobachteten Phänomenen der Rillenbildung und bietet eine plausible Erklärung für deren Auftreten. Im Zustand erhöhter Laserleistung führt der gesteigerte Energieinput zu einem vermehrten Aufschmelzen des Materials, was wiederum eine Expansion bzw. Kontraktion der belichteten Schicht nach sich zieht. Der genaue Prozentsatz der Energie, der in das Pulver eingebracht wird, bleibt jedoch unbestimmt. Nöken [114] beobachtete, dass mit zunehmender Energiedichte des Laserstrahls die Breite des im Pulverbett entstehenden Linienprofils signifikant stärker ansteigt als die Tiefe. Daraus folgerte er, dass die Wärmeausbreitung nahe der Oberfläche effizienter verläuft als der Wärmetransfer in tiefere Schichten. Dieser Effekt erklärt die beobachteten Rillenbildungseffekte bei den Phasen erhöhter Laserleistung. Das periodische Muster der Leistungsschwankungen deutet auf einen internen Regelmechanismus hin, der darauf ausgerichtet ist, die Laserausgangsleistung innerhalb definierter Grenzen stabil zu halten. Eine weitere mögliche Ursache für diese Schwankungen könnte eine Variation der Steuerspannung sein, die von einem Computer zur Regulierung der Laserleistung eingesetzt wird. Zum Zeitpunkt der Datenerhebung war der Laser in einem betriebsbereiten Zustand. Trotz langer Beobachtungszeiträume wurde keine Reduzierung der Leistungsschwankungen festgestellt.

Die Resultate der Kontur-Strahlverschiebung werden in Abbildung 6-20 dargestellt. Diese zeigt eine vergleichende Analyse der Dichtewürfel, durchgeführt mittels einer manuellen Messmethode und der archimedischen Methode. Vergleichsdaten aus der Fachliteratur weisen für PA 12 eine Feststoffdichte zwischen $1,02 \text{ g/cm}^3$ und $1,14 \text{ g/cm}^3$ aus [238, 239]. Für lasergesinterte Bauteile aus dem Material PA 12 (PA 2200) des Herstellers EOS wird eine erreichbare Dichte von $0,9\text{--}0,95 \text{ g/cm}^3$ angegeben, wobei hierbei auf eine nicht öffentlich bekannte, interne Prüfmethode von EOS zur Dichtebestimmung verwiesen wird. Zudem wird betont, dass sowohl die Dichte als auch die mechanischen Eigenschaften der Bauteile in Abhängigkeit von den gewählten Belichtungsparametern sowie der Positionierung der Prüfkörper im Bauraum variieren können [199].

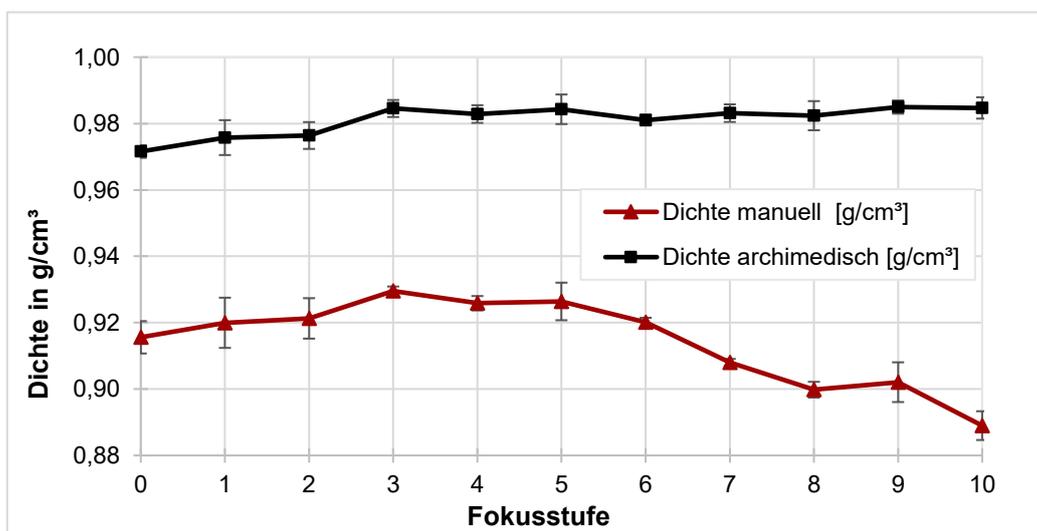


Abbildung 6-20: Vergleich der manuellen und der archimedischen Dichtemessung

Die vorliegenden Daten zeigen die Mittelwerte der Dichtemessungen für die Fokusstufen F0 bis F10 basierend auf drei Dichtewürfeln mit identischen Verfahrensparametern, jedoch unterschiedlichen Positionen im Baufeld, inklusive der zugehörigen Standardabweichungen.

Die Untersuchung umfasste drei separate Gruppen von Dichtewürfeln für jede Fokusstufe, positioniert am linken und rechten Rand sowie in der Mitte des Baufeldes, um eine umfassende Beurteilung der positionsabhängigen Dichteveränderungen zu ermöglichen (siehe Abbildungen 4-6 und 4-10). Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die archimedische Methode im Vergleich zur klassischen Messmethode konsistent höhere Dichtewerte lieferte, die über alle Fokusstufen hinweg nahezu gleichbleibend waren. Bis zu Fokusstufe F5 waren die Kurvenverläufe und Standardabweichungen beider Methoden nahezu identisch. Ab Fokusstufe F5 zeigte sich jedoch ein Dichteabfall bei der manuellen Messmethode, während die mittels der archimedischen Methode ermittelten Dichtewerte leicht anstiegen, was die direkte Vergleichbarkeit beider Vorgehensweisen einschränkt. Der Verlauf nach der manuellen Methode erscheint zuverlässiger, da eine Abnahme der Dichte mit zunehmendem Strahldurchmesser aufgrund der Verbindungsstelle zwischen Kontur und Füllung erwartet wird. Dies führt zu einer erhöhten Porosität der Würfel durch unvollständige Versinterung, was bei Anwendung der archimedischen Methode eine Infiltration der Messflüssigkeit in die Porenstrukturen und damit eine scheinbare Dichteerhöhung bewirken kann. Ab Fokusstufe F5 war dieser Effekt deutlich erkennbar, wodurch die Archimedes-Methode zu fälschlich erhöhten Dichtewerten führen kann. Zur weiteren Überprüfung wurden auch in späteren Versuchsreihen beide Messmethoden vergleichend eingesetzt. Die bisher erreichten Dichtewerte blieben hinter den Referenzwerten von Probekörpern einer Formiga P100 von EOS zurück, die bei $0,973 \text{ g/cm}^3$ (manuell) bzw. $0,993 \text{ g/cm}^3$ (archimedisch) liegen, was die Notwendigkeit weiterer Optimierungen der Prozessparameter unterstreicht.

Die manuell ermittelten positionsabhängigen Dichteverteilungen sind in Abbildung 6-21 dargestellt. Diese zeigt drei Säulen für jede Fokusstufe, die die erreichte Dichte in Abhängigkeit von der Position im Baufeld veranschaulichen. Die Fokusstufen F0 bis F2 sowie F5 und F10 wiesen eine Zunahme der Dichte am rechten Baufeldrand auf. Ein gegenläufiges Verhalten zeigte F9.

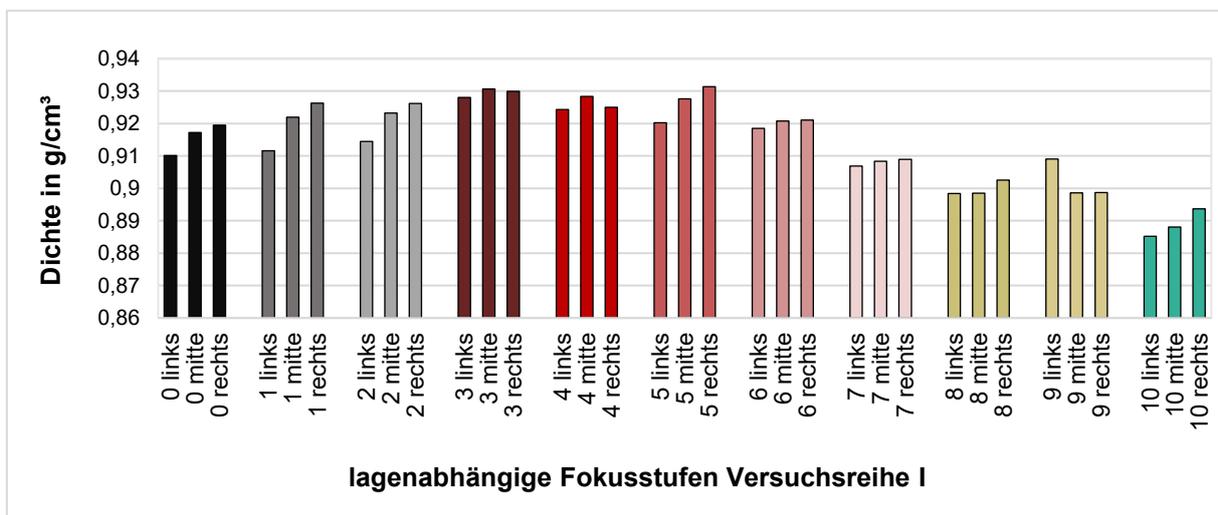


Abbildung 6-21: Darstellung der Einflüsse auf die Bauteildichte nach Position im Bauraum

Die höchsten Spannweiten der Ergebnisse befanden sich in der Größenordnung von $0,01 \text{ g/mm}^3$, was eine nicht signifikante Abweichung bei der Ermittlung der Bauteildichte durch die Genauigkeit des Messschiebers von $0,02 \text{ mm}$ bedeutet. Die festgestellten

Dichteschwankungen variierten mit minimalen Steigerungen von 0,22 % bei F7 bis hin zu Erhöhungen von 1,61 % bei F1 und lagen somit nahe der zweifachen relativen Standardabweichung von 0,82 % bei einem Mittelwert von 0,92 g/cm³.

Zusammenfassend zeigt die Versuchsreihe auf, dass dreidimensionale Körper in Form von Dichtewürfeln fokusstufenabhängige Oberflächendefekte aufweisen. Eine Verringerung der Kontur-Offset-Werte und eine zweite Kontur zwischen der ersten und der Füllung hatten das Ziel, den Versatz zwischen der Sollkontur K_{SOLL} und dem Füllmuster zu kompensieren. Die Geometrietreue der Prüfkörper konnte so erreicht werden. Es zeigten sich jedoch weitere Oberflächendefekte, die periodisch in Abhängigkeit von der Schichtzahl und der auftretenden Laserleistungsschwankungen auftraten. Dieser Effekt wurde durch die Verwendung von großen Laserspotdurchmessern verstärkt.

Weiterführend zeigt ein Vergleich zwischen der manuellen Dichtebestimmung und der archimedischen Messmethode unterschiedliche Verläufe der Bauteildichten. Sofern die Bauteile eine hohe Geometrietreue aufweisen, kann die manuelle Messmethode reproduzierbar angewendet werden. Im Vergleich dazu können bei der archimedischen Methode poröse Baukörper infiltriert werden und so den Dichtewert erhöht darstellen. Diese Vorgehensweise sollte folglich nur genutzt werden, wenn eine ausreichende Dichte des Bauteils sichergestellt ist. Ein Einfluss der Positionierung im Baufeld wurde ebenfalls überprüft. Zwar konnten vereinzelt Differenzen von bis zu 0,01 g/mm³ in Abhängigkeit von der Position erkannt werden, aber diese wurden aufgrund der Messgenauigkeit der Messmittel als nicht signifikant eingestuft.

Versuchsreihe II – Einflussuntersuchung der Hatchlinienkonformität

Die folgende Versuchsreihe zur Hatchlinienkonformität baute auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Versuche auf und zielte darauf ab, die Effekte einer Ausrichtung der Probekörper im Baufeld, die übereinstimmend mit den resultierenden Hatchlinien verläuft, zu untersuchen. Die Parameter blieben bezugnehmend auf die erste Versuchsreihe konstant. Es wurde angestrebt, dass die Anzahl der Scanvektoren S_V maximiert wird und keine Lücken zur Kontur entstehen, um innere Defektstellen, die durch bisherige Messmethoden nicht erfasst werden konnten, zu vermeiden. Diese könnten andernfalls die ermittelten Dichtewerte verfälschen und zu Fehlinterpretationen führen. Die Ausrichtung der Prüfkörper basierte ausschließlich auf der in EOSPRINT visualisierten Positionierungsgenauigkeit, wobei die Übereinstimmung mit der realen Auflösungsfähigkeit der Anlage nicht definiert war. Zur Vergleichsmessung wurde die manuelle Dichtemessung genutzt, da gemäß Abbildung 6-20 die Bauteile bei hohen Fokusstufen eine offenporige Struktur aufwiesen, die keine Differenzierung der Bauteildichte zwischen den Fokusstufen zulässt.

Abbildung 6-22 stellt die vergleichende Dichtemessung zwischen freier und hatchlinienoptimierter Positionierung der Dichtequader mittels manueller Methode dar. Ein direkter Vergleich zeigt, dass durch die gezielte Ausrichtung und Dimensionierung der Würfel die Dichtewerte nahezu über alle Fokusdurchmesser hinweg verbessert werden konnten. Die Kurvenverläufe beider Versuchsreihen ähneln sich, was auf eine hohe Reproduzierbarkeit des Prozesses sowie der manuellen Messmethode hindeutet.

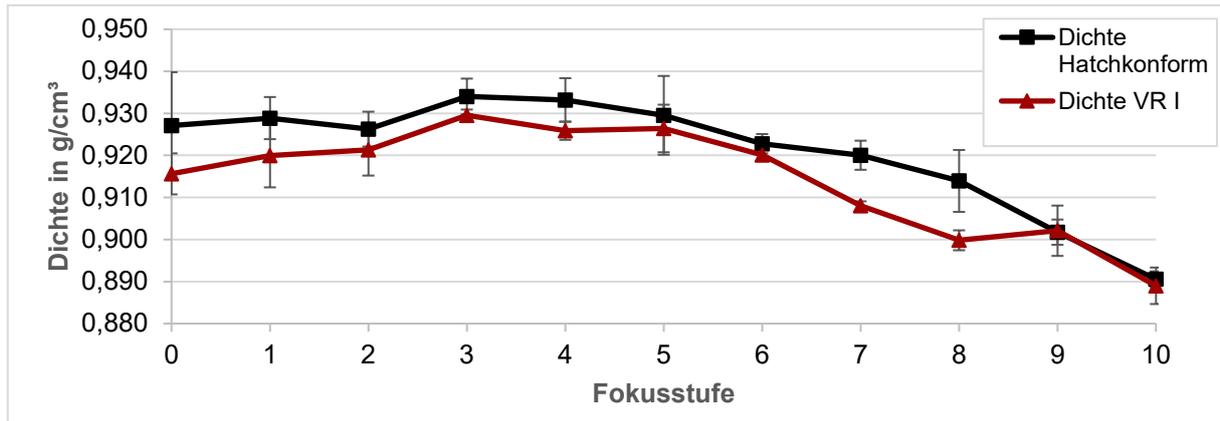


Abbildung 6-22: Auswirkung der konformen Ausrichtung auf die Bauteildichte nach Fokusstufe

Die Variabilität der Standardabweichungen, die durch die manuelle Messung mittels Messschieber entsteht, war jedoch unterschiedlich ausgeprägt. Die charakteristisch raue Oberfläche und Kantenunschärfe des PBF-LB/P, das typische Einfallen der letzten Oberflächenschicht und die weiterhin beobachteten Rillenbildungen führten zu Unsicherheiten in der Volumenbestimmung. Zudem zeigte Fokusstufe F2, die im Prozess als einzige Schmachspuren während der Belichtung aufwies, einen leichten Abfall der Dichtewerte im Vergleich zur vorangegangenen Untersuchung. Dies kann auf einen zu hohen Energieeintrag und die daraus resultierende Bildung von Gasblasen hindeuten. Vorversuche zeigten, dass die Spurbreite S_B bei Fokusstufe F2 im Vergleich zu anderen Stufen einen reduzierten Querschnitt aufwies, was eine höhere Flächenenergiedichte bedeuten könnte, die die Dichte reduziert (vgl. Abbildung 6-11).

Aus den Ergebnissen der Versuchsreihen lässt sich das Ziel der optimierten Energiezufuhr unter Berücksichtigung variierender Spotgrößen ableiten. Es sollen angepasste Scanstrategien und Parameter erarbeitet werden, die die Balance zwischen unzureichender und übermäßiger Energieeinbringung unter Berücksichtigung der Verschiebung der Scanvektoren ermöglichen. Zu wenig Energie führt zu unvollständiger Verschmelzung der Pulverpartikel und somit zu einer porösen Struktur, während zu viel Energie Gasblasenbildung und somit eine Verringerung der Bauteildichte verursacht. Die Ergebnisse zeigen auf, dass die hatchlinienkonform ausgerichteten Probekörper eine höhere Dichte aufweisen. Eine Berücksichtigung der Hatchlinienkonformität ist besonders bei kleinen Querschnitten sowie bei großen Laserspotdurchmessern S_D relevant, da hierbei jeder Scanvektor eine signifikante Auswirkung auf den Energieeintrag ausübt. Da die Verschiebung der Kontur und der Füllung jedoch noch immer vorhanden ist, wird im nächsten Kapitel eine neue Scanstrategie verwendet, um diesem Effekt entgegenzuwirken.

Versuchsreihe III – Skin-Core-Scanstrategie am Beispiel von Fokusstufe F10

Die Verschiebung der Füllung bei vergrößerten Laserspotdurchmessern muss mit geeigneten Gegenmaßnahmen kompensiert werden. Passend könnte der Wechsel der Scanstrategie auf die Skin-Core-Belichtung sein. Hierbei wird das Bauteil in einen äußeren Bereich (Skin) und einen innenliegenden Bereich (Core) unterteilt. Beide lassen sich unabhängig voneinander parametrisieren und liefern so die Möglichkeit der qualitativ hochwertigen Bauteilgenerierung

durch die Kombination der Verwendung von großen und kleinen Laserspotdurchmessern in einem Bauteil. In der vorliegenden Versuchsreihe wurden drei Varianten von Hülle-Kern-Parametern analysiert, die sich durch die Anzahl der Hatchlinien in der Hüllschicht unterschieden. Für die Dimensionierung der Hülle (Skin) wurden Konfigurationen gewählt, die eine, zwei bzw. drei Scanvektoren ermöglichen. Bezeichnet werden diese Variationen als Skin 1 (S1) bis Skin 3 (S3). S1 erhielt eine Breite von 0,8 mm, S2 eine solche von 1 mm und S3 eine solche von 1,3 mm. Parallel dazu wurde der Strahlversatz (Beam-Offset) für das Kernhatching in fünf unterschiedlichen Stufen (Coreparameter C1 bis C5) modifiziert, um den optimierten Parametersatz zu ermitteln, der die Kompensation von inneren Lücken im Bauteil durch eine Kombination beider Variablen ermöglicht. Als repräsentativer Fokus für die gesamte Versuchsreihe diente die Einstellung F10 mit einem Hatchabstand von 0,85 mm, da angenommen wurde, dass bei dieser Konfiguration die Effekte der Parameteranpassungen besonders deutlich hervortreten.

Abbildung 6-23 zeigt die Belichtungsschemata für die Corebelichtungen C1 bis C5 von links nach rechts, wobei C1 den größten Offset aufwies, bei dem der äußere Rand des Laserfokus lediglich die innere Kontur tangiert. C5 hingegen zeigt den minimalen Offset des Hatchings, bei dem der Laserspot mit seinem Zentrum direkt entlang der Kontur verläuft und gleichzeitig die äußere Kontur tangiert. Die schrittweise Verringerung des Beam-Offsets von C1 bis C5 erfolgte linear. Die Schemata illustrieren den Kern der Belichtungsstrategie, ergänzt durch eine variierende Hüllstärke (S1–S3), um Lückenbildung im Bauteilinneren auszugleichen und gleichzeitig der Rillenbildung an den Außenflächen entgegenzuwirken.

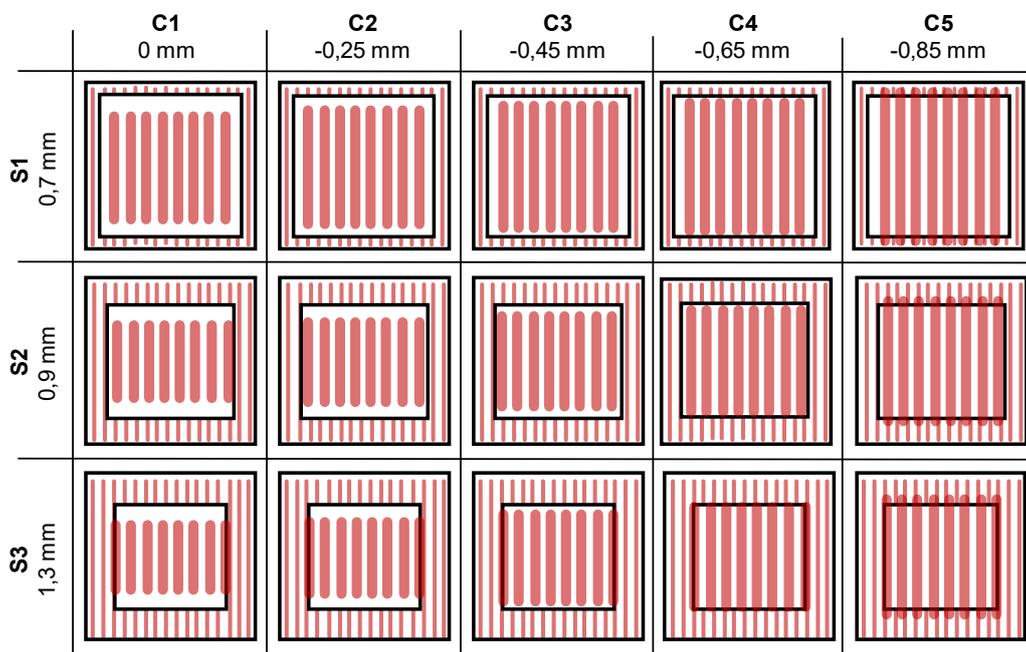


Abbildung 6-23: Gegenüberstellung der variierenden Skin-Core-Belichtungen mit resultierenden Scanlinien

Die Veranschaulichung der Hülle-Kern-Strategie verdeutlicht, dass die Füllung im Vergleich zur doppelten Kontur weiter in den inneren Bereich des Bauteils verschoben wurde. Folgerichtig wird voraussichtlich die aus dem Versatz resultierende Rillenbildung im späteren

Bauteil weniger auffallen. Dennoch ist eine gewissenhafte Betrachtung dieser Scanstrategie ratsam, da Lücken im Bauteilinneren entstehen können, der Energieeintrag aufgrund variierender Spotgrößen, Laserleistungen und Wechselwirkungszeiten inhomogen sein könnte und die Bauzeiten durch diese Scanstrategie signifikant erhöht werden könnten. Erste Anhaltspunkte dieser Problemstellungen lassen sich bereits im Prozess beobachten. Die Sichtkontrolle des Prozesses und eine Darstellung der Skin- und Coreparameter-Kombinationen finden sich nachfolgend in Abbildung 6-24.

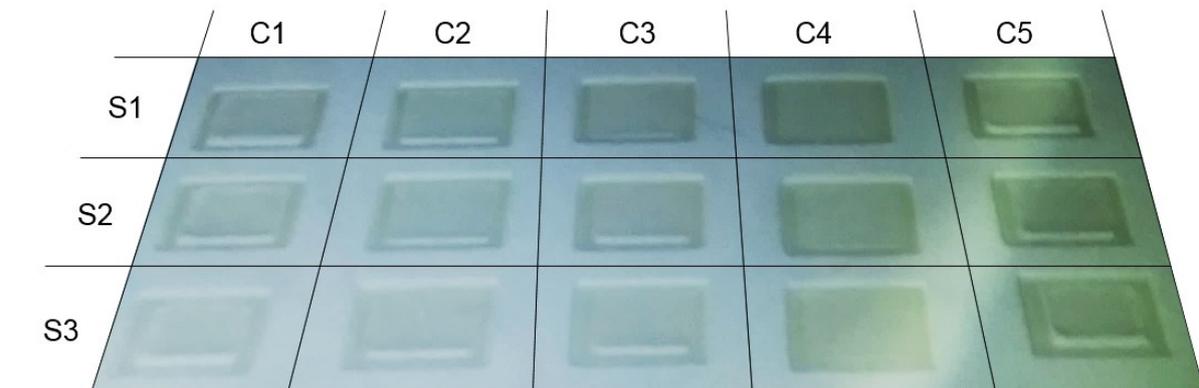


Abbildung 6-24: Gegenüberstellung der variierenden Skin-Core-Belichtungen im Bauprozess

Auffallend ist insbesondere das Verhalten von C5, der nach den eingestellten Parametern die größte Überlappung von Füllung und Skin aufwies. Entgegen der Erwartung zeigte sich eine Zunahme der Lückenbildung zwischen Kern und Hülle statt einer Reduktion. Dies deutet auf eine softwareseitige Begrenzung hin, die die Strahlverschiebung im Sonderfall, dass diese gleich dem Hatchabstand (0,85 mm) ist, auf einen ursprünglichen Wert nahe C1 zurücksetzt. Basierend auf den sichtbaren Schmelzbädern erscheint C4 als die potenziell geeignete Parameterkombination für weitere Untersuchungen. Die kurzen Scanvektoren der Hülle führten bei den Proben zu einer erhöhten Rauchentwicklung. Der alternierende Kreuz-Scan, der die Schichten abwechselnd in x- und y-Richtung belichtet, führte zu einem sich abwechselnden Rauchen an den horizontalen bzw. vertikalen Seitenflächen der Würfel. Dies wurde beim Überhitzen der Schmelze durch die kurzen aufeinanderfolgenden Belichtungen der Vektorlinien beobachtet und legt nahe, dass eine Anpassung der Laserleistung für kurze Vektorlinien innerhalb einer Schicht erforderlich sein könnte.

Vereinzelt zeigten die Probekörper starke Übersinterungen. Daher wurde für die anschließende Auswertung der Dichteverteilung aufgrund der Geometrieunabhängigkeit die archimedische Methode herangezogen. Abbildung 6-25 verdeutlicht die erreichten Dichtewerte für die verschiedenen Skins in Abhängigkeit von den Coreparametern C1 bis C5 für die ersten beiden Riegen. Die dritte Riege zeigte identische Verläufe, weshalb auf den Anhang 11-1 verwiesen wird. C4 wies eine optimale Übereinstimmung von Hülle und Kern mit hohen Dichtewerten über $0,98 \text{ g/cm}^3$ auf, obwohl C3 trotz sichtbarer Lückenbildung Dichtewerte derselben Größenordnung erreichte. Dies könnte auf die alternierende Belichtung zurückzuführen sein, die die Lücken bei jeder zweiten Schicht erfolgreich verschließen kann.

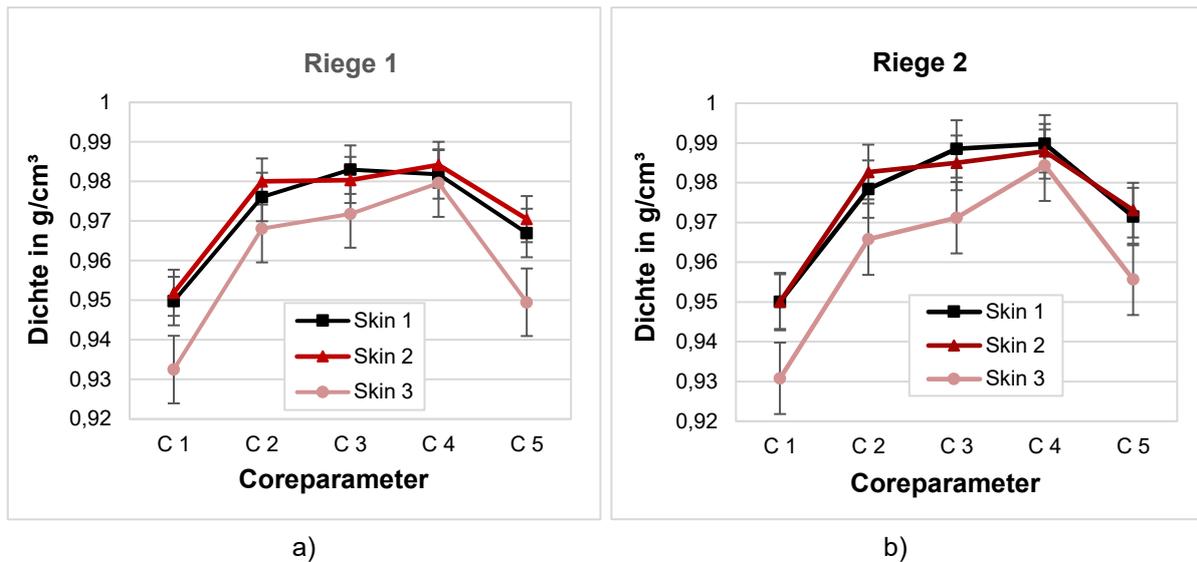


Abbildung 6-25: Bauteildichte in Abhängigkeit von der Bauhöhe a) Riege 1 b) Riege 2

S1 und S2 erreichten den Ergebnissen zufolge hohe Dichtewerte, während S3 mit drei Scanvektoren in der Hülle aufgrund einer ausgeprägteren Lückenbildung im Übergang von Hülle zu Kern keine vergleichbaren Dichtewerte erzielen konnte. Daher schied der S3-Parameter für weitere Untersuchungen aus. Die deutlichen Veränderungen der Dichtewerte beim Übergang von C1 zu C2 sowie von C4 zu C5 illustrieren den signifikanten Einfluss der Kernbelichtungsstrategie auf die resultierende Bauteildichte.

Im Vergleich zu Dichtewerten, die in Vorversuchen auf einer Formiga P100 von EOS mit fünf Würfeln pro Riege erzielt wurden und durchschnittlich $0,993 \text{ g/cm}^3$ betragen, lagen die mit S1 in Riege 1 erreichten Dichtewerte von $0,983 \text{ g/cm}^3$ bzw. jene von S2 von $0,984 \text{ g/cm}^3$ nahe an den Werten einer kommerziellen Anlage. Die in der dritten Riege erzielte Dichte von S1 von $0,9924 \text{ g/cm}^3$ entspricht jener der kommerziellen Anlage.

Besonderes Interesse galt den Coreparametern C3 und C4, die die höchsten Dichtewerte aufwiesen. C3 zeichnete sich im Vergleich zu C4 durch eine höhere Geometriegetreue und eine gleichmäßigere Oberflächenbeschaffenheit aus und wurde daher für weitere Untersuchungen bevorzugt. C4 lag zudem kritisch nahe am Dichteabfall des C5-Parametersatzes. Abbildung 6-26 veranschaulicht diese Beobachtungen und zeigt Fotos der Dichtewürfel unter Variation der Coreparameter, wobei mit zunehmender Coregröße das Phänomen des Aufwachsens an den Seitenflächen verstärkt auftrat und selbst durch eine Hülle mit drei Hatchlinien nicht vollständig kompensiert werden konnte. Die geometriegetreuesten Würfel resultierten in den Konfigurationen C1 und C5, die jedoch die niedrigsten Dichtewerte aufwiesen, was auf interne Defektstellen hinweist, die die Materialdichte reduzieren.



Abbildung 6-26: Betrachtung der entstandenen Probekörper mit den Sollmaßen 10 mm x 10 mm x 10 mm (x, y, z)

Im direkten Vergleich bot C3 eine geringere Ausprägung des Aufwachsens bei gleichzeitig hoher Geometrietreue und nahezu identischen Dichtewerten zu C4. Zur weiteren Optimierung des C3-Parametersatzes mit einem Offset von 1,01 mm wurde ein Dichtescreening durchgeführt, das Energiedichten von 0,385 J/mm³ bis zu 0,531 J/mm³ berücksichtigte. Die Ergebnisse dieser Dichteanalyse mittels archimedischer Messmethode werden in der nachfolgenden Abbildung 6-27 dargestellt.

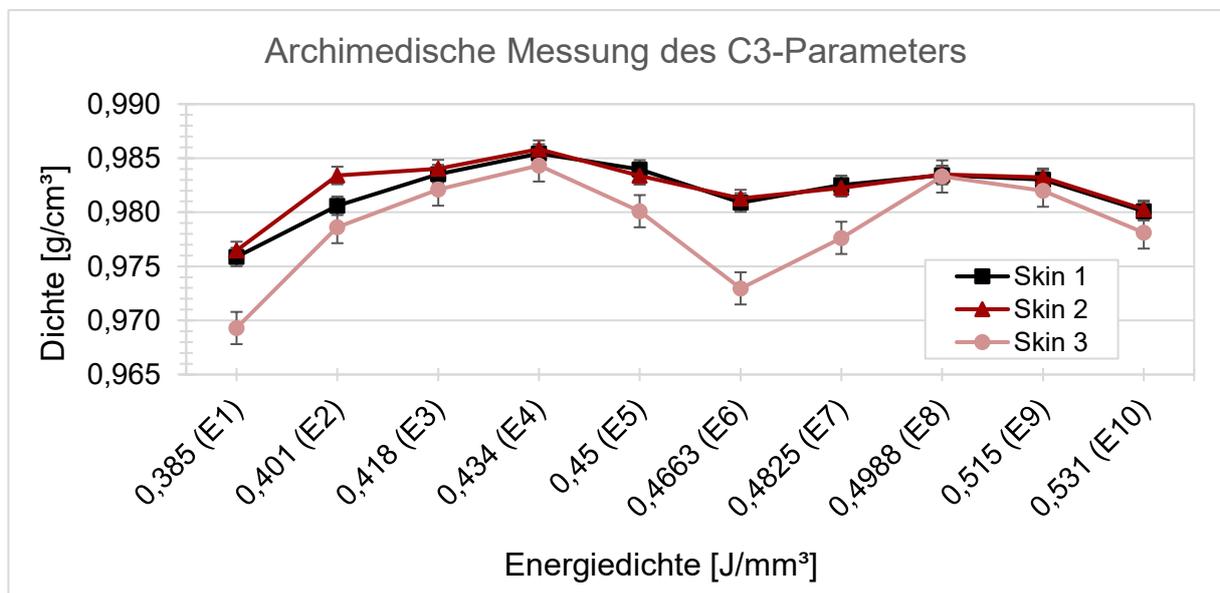


Abbildung 6-27: Dichtescreening des C3-Parameters unter Variation der Energiedichte

Im Rahmen der Untersuchung wurde der Dichteverlauf von C3-Prüfkörpern unter variierender Volumenenergiedichte im Bereich von 0,385 J/mm³ bis 0,531 J/mm³ für drei unterschiedliche Skins innerhalb der vordefinierten Variationen S1 bis S3 analysiert. Die Dichteverläufe von S1 und S2 waren vergleichbar, was die Hypothese erlaubt, dass eine einzelne Scanlinie im Skin

zur Kompensation der vorliegenden internen Defekte ausreicht. Beide Kurven zeigen eine maximale Dichte von etwa $0,986 \text{ g/cm}^3$ bei einem Energieinput von $0,434 \text{ J/mm}^3$. Nicht erklärbar bleibt, dass bei allen drei Skins zwei lokale Dichtemaxima liegen. Theoretisch wäre ein kontinuierlicher Anstieg der Dichte mit zunehmendem Energieinput bis Erreichen eines Maximums und anschließendem Abfall aufgrund von Porenbildung durch Gasentwicklung zu erwarten. Konträr dazu zeigten alle Skins nach dem ersten Dichteabfall unter stetiger Steigerung der Energiedichte ein erneut auftretendes Maximum, was ein bisher unerklärliches Phänomen darstellt. S3 wies auch in dieser Versuchsreihe unbefriedigende Eigenschaften auf und war somit ungeeignet für eine weitere Betrachtung zur Optimierung der Materialdichte. Als Veranschaulichung für die äußere Erscheinung der Dichtewürfel wird exemplarisch S1 in Abbildung 6-28 präsentiert.



Abbildung 6-28: Bauteile mit C3-S1-Parametern und variierender Energiedichte

Zu sehen ist der mit dem Energieeintrag steigende Effekt des Aufwachsens an den Seitenflächen. Allerdings zeigte sich bei genauerer Betrachtung eine Reduktion dieses Effekts beim Übergang von S1E4 zu S1E5 sowie von S1E8 zu S1E9 und zu S1E10 trotz steigenden Energieeintrages. Zu erwarten wäre der gegenteilige Fall, dass ein Aufwachsen durch Erhöhung des Energieeintrages begünstigt wird und sich somit von E1 zu E10 in die jeweilige x-, y- oder z-Richtung steigert. Zurückzuführen ist dies auf die Platzierbarkeit der Würfel in der Software EOSPRINT. Der Abstand der Scanlinien im Kern bzw. in der Hülle war festgelegt durch die in Vorversuchen ermittelten Spurbreiten. Da die Hülle und der Kern mit unterschiedlichen Fokusdurchmessern belichtet wurden und die Spurbreiten dieser Fokusstufen kein Vielfaches voneinander waren, kam es zu Herausforderungen bei der Platzierung. Eine konforme Ausrichtung der Scanvektoren im Kern führte daher nicht zu konform ausgerichteten Scanvektoren in der Kontur und vice versa. So kam es zwangsläufig zur Notwendigkeit einer Kompromissbildung beim Positionieren, die die geometrische Gestalt beeinflussen kann. Weiterhin war ein ‚Verschieben‘ der Scanlinien im Querschnitt des Bauteils beim Positionieren nicht möglich. Die Scanlinien befinden sich softwareintern auf einer fixen Position – auf einer Ebene hinter der Platzierungsebene – und bilden so ein ‚Gitter‘, auf dem das Bauteil positioniert werden muss. Überlagern sich bei einer Hülle-Kern-Scanstrategie die beiden Ebenen zur Belichtung der Hülle und des Kerns, kommt es zu Problemen dabei, die Scanvektoren in Hülle und Kern gleichzeitig konform zu halten. Daher wurde zunächst die Füllung im Kern positioniert und auf maximale Linienanzahl ausgerichtet und anschließend die

Füllung der Hülle optimiert, um einen Kompromiss aus maximal möglicher Belichtung im Kern und sauberer Belichtung der Hülle zu erhalten.

Für Prüfkörper ohne Hülle-Kern-Scanstrategie konnte bereits eine Methode entwickelt werden, die die Maße des Körpers so adaptiert, dass eine optimierte Belichtung möglich ist. Hierzu wurden die Dimensionen auf ein Vielfaches der innenliegenden Hatchlinien angepasst. Dies ist allerdings nur für Bauteile mit experimentellem Zweck sinnvoll, bei denen die Maße des Körpers irrelevant sind. Zielführend muss zukünftig softwareintern eine optimierte Anzahl an Scanvektorlinien generiert werden, eventuell unter dynamischer Anpassung des Laserfokus, ohne dass dabei Lücken im Inneren entstehen. Andernfalls würde eine additivgerechte Konstruktion eines Bauteils die vorherige Analyse eines definierten Hatchabstandes erfordern, was bei komplexen Bauteilen einen hohen Zeitaufwand darstellen würde und dadurch unwirtschaftlich wäre. Zusätzlich würde sich dieser Effekt mit zunehmendem Fokusbereich verschärfen, da ein solcher aufgrund seiner größeren Spurbreite noch weniger Spielraum in der konstruktiven Dimensionierung lässt als ein kleiner Fokusbereich.

Ein unkontrolliertes Aufwachsen des Bauteils bedeutet einen zu hohen Energieeintrag in das Pulverbett. Folglich wachsen die Bauteile in die Pulverschüttung hinein und erzeugen eine Schmelze außerhalb der Sollkontur. Diese Bereiche eines Bauteils sind zumeist porös und können daher die Ergebnisse einer Messung nach dem archimedischen Prinzip verfälschen. Aus diesem Grund wurde das Aufwachsen der Proben untersucht, um Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit der Messmethode zu erhalten. Die Messung erfolgte manuell mit dreifacher Wertermittlung; die Ergebnisse werden in Abbildung 6-29 präsentiert. Die Volumina wurden durch digitale Messschieber basierend auf den Dimensionen Höhe (z), Breite (x) und Tiefe (y) bestimmt.

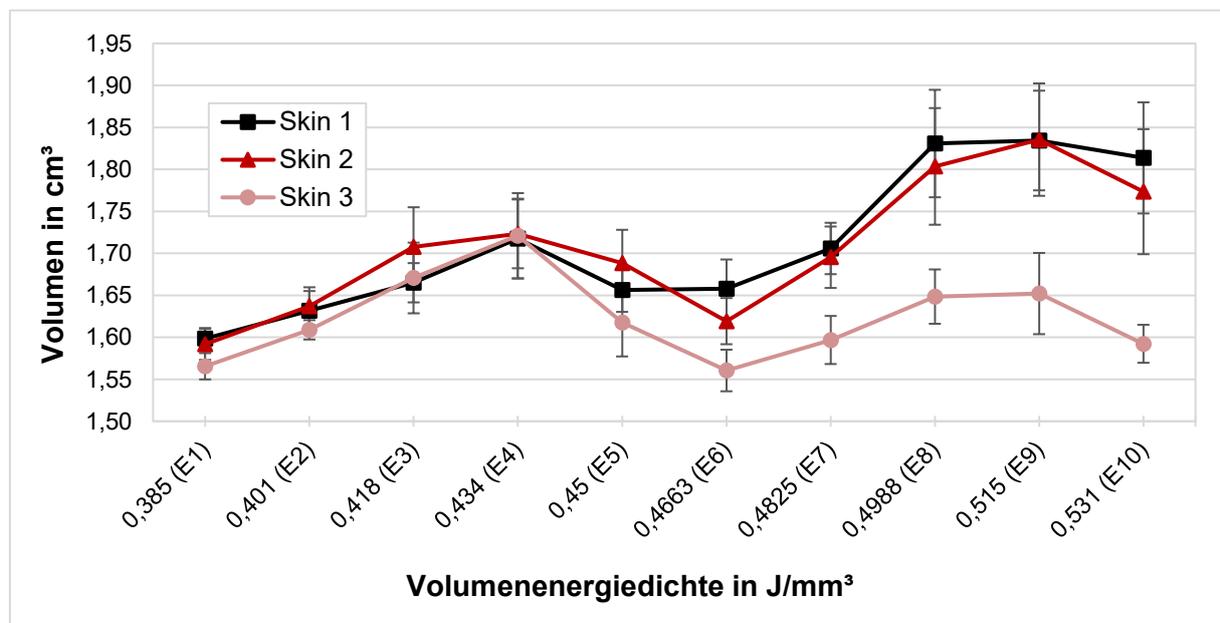


Abbildung 6-29: Volumetrische Analyse betreffend den C3-Parameter der Skins S1 bis S3

Es zeigte sich, dass das Volumen der Dichtewürfel mit der angewendeten Energiedichte korrelierte. Wie bereits anhand Abbildung 6-28 diskutiert, spiegelte sich die ungleichmäßige Expansion der Würfelseitenflächen in den Kurvenverläufen wider. Bis zur vierten Energiedichtestufe erhöhte sich das Volumen aller Skins nahezu simultan, bis E6 nahm es dann ab und anschließend stieg es erneut an. Eine Ausnahme bildete S3, bei dem das Volumen nicht im gleichen Maße anstieg, was darauf hinweist, dass S3 mit drei Scanvektoren den Wachstumseffekt am effektivsten kompensiert. Die Standardabweichungen der dargestellten Kurven folgten einem Muster analog jenem der Volumina: Größere Volumina resultierten in größeren Standardabweichungen aufgrund der erhöhten Fehleranfälligkeit bei den manuellen Messungen gewölbter Seitenflächen. Demgegenüber verursachten geringere Volumina kleinere Standardabweichungen, da flache Seitenflächen weniger anfällig für lokale Messungenauigkeiten sind. Eine tiefergehende Analyse der individuellen Messungen von Höhe, Breite und Tiefe über die verschiedenen Energiedichtestufen hinweg offenbarte, dass insbesondere die Breite (x-Achse) und die Tiefe (y-Achse) signifikante Schwankungen von bis zu 0,7 mm bzw. 0,8 mm aufwiesen. Die Höhenmessungen unterlagen dagegen nur minimalen Schwankungen von bis zu 0,1 mm, was etwa einer Schichtdicke entspricht. Damit wurden die Auswirkungen des x/y-Offsets der Scanvektoren quantifiziert und sie zeigten eine nicht akzeptable Abweichung der Bauteilgeometrien. Die Genauigkeit der Aufbauhöhe scheint dagegen konsistent zu sein und war bei der verwendeten Fokusstufe F10 adäquat.

Ein Vergleich von Abbildung 6-27 mit Abbildung 6-29 unterstreicht die Korrelation zwischen dem Volumen der Würfel und ihrer Bauteildichte, die durch das archimedische Prinzip bestimmt wurde. Die Kurvenverläufe zeigen signifikante Ähnlichkeiten in ihrer Form und stimmen in den Wendepunkten der Steigung bei den spezifischen Energiedichtewerten nahezu exakt überein. Ein zunehmendes Volumen bzw. eine vergrößerte Oberfläche korreliert so mit einer ansteigenden Dichte und vice versa. Die größere Oberfläche, resultierend aus den deutlichen Auswölbungen der Übersinterung, begünstigt die Infiltration von Ethanol in den Würfel, was das Gewicht der Probe bei der Auftriebsmessung erhöht und somit gemäß Formel 5-3 zu einer erhöhten Dichte führt. Zusätzlich könnte das Eindringen des Ethanols durch die raue Oberflächenbeschaffenheit der Auswölbungen sowie deren poröse innere Struktur weiter gefördert worden sein. Aus diesem Grund wurde erneut eine Vergleichsmessung mit der manuellen Methode durchgeführt.

Die Auswertung der Dichtewürfel durch manuelle Messmethoden offenbarte ebenfalls eine ausgeprägte Korrelation zwischen der Dichte der Würfel und ihren ermittelten Volumina, wobei ein im Vergleich zur archimedischen Methode entgegengesetztes Verhalten beobachtet wurde (vgl. Abbildung 6-30). Dieser Unterschied wird insbesondere im direkten Vergleich der Ergebnisse deutlich.

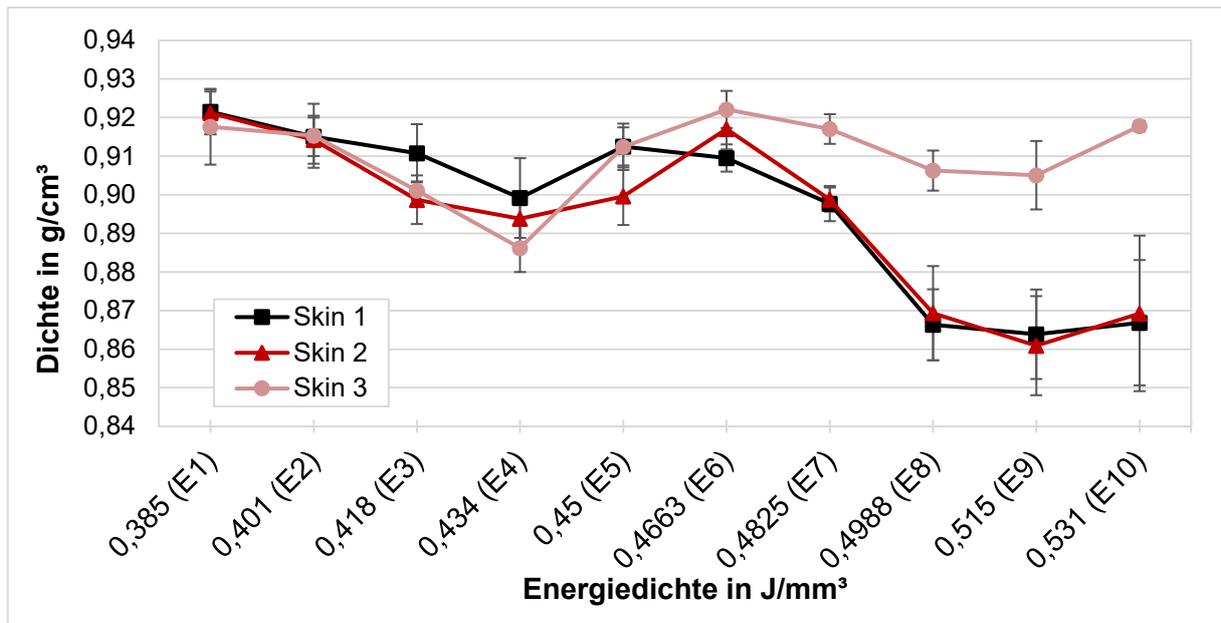


Abbildung 6-30: Vergleichsergebnisse der Bauteildichte betreffend den C3-Parameter mit manueller Messmethode

In dieser Darstellung werden die Dichteverteilungen in Bezug auf die angewendete Energiedichte für die drei verschiedenen Skins S1 bis S3 veranschaulicht. Im Gegensatz zu den nahezu identischen Kurvenverläufen der Volumenberechnung und der archimedischen Dichtebestimmung zeigt die durch manuelle Messmethoden ermittelte Grafik ein gegenläufiges Kurvenverhalten. Obwohl die charakteristischen Energiedichtepunkte bei E4, E6 und E8 klar identifizierbar sind, führt ein ansteigendes Volumen in diesem Kontext zu einer reduzierten Dichte und umgekehrt, was der Erwartung gemäß Formel 5-2 entspricht. Infolgedessen erscheint der S3-Parameter, der in früheren Bewertungen als weniger geeignet eingestuft wurde, aufgrund seiner erhöhten Dichtewerte als potenziell am besten geeigneter Parameter. Die Ursache für dieses Phänomen – ob dieses auf die präzisere geometrische Beschaffenheit und das damit verbundene geringere Volumen oder auf einen reduzierten Porenanteil im Inneren zurückzuführen ist – bleibt allerdings ungewiss. Des Weiteren wurde beobachtet, dass die Standardabweichung bei höheren Dichten, also bei niedrigeren Volumina bzw. ebenmäßigeren Oberflächen, geringer ausfällt, was auf eine präzisere messtechnische Erfassung hinweist.

Die bisherigen Untersuchungen verdeutlichen, dass der Einfluss des Volumens auf die Dichtebestimmung bei beiden angewendeten Messmethoden zu signifikant ist, um definitive Aussagen über die innere Beschaffenheit der Proben zu treffen. Drummer et al. [92] betonen in diesem Zusammenhang die hohe Sensitivität des Volumens bei Variationen der Parameter. Dies zeigt, dass beide Messverfahren eigene Limitationen aufweisen, die eine sorgfältige, kritische Bewertung der Ergebnisse erfordern.

Die nach dem archimedischen Prinzip durchgeführten Messungen der Proben sind verschiedenen externen Einflüssen unterworfen, die das Messergebnis verfälscht haben können. Dazu zählt die Infiltration des Prüfmediums in die Randbereiche der Proben, die durch Faktoren wie Fettrückstände von der Handhabung oder Verschmutzungen auf der Oberfläche,

etwa durch Strahlgut, variieren kann. Eine mögliche Maßnahme, die Proben gegen solche Einflüsse zu schützen, wie der Auftrag einer Sperrschicht mittels Sprühlack nach dem Glasperlenstrahlen, birgt jedoch das Risiko der Verfälschung der Messergebnisse, da das zusätzliche Gewicht der Schicht variiert und das Verhalten des Lackes in der Prüfflüssigkeit unbekannt ist. Weitere potenzielle Störvariablen umfassen die unbekanntes Sättigung der hydrophilen PA-12-Prüfkörper mit Feuchtigkeit aus der Umgebung, die Temperaturabhängigkeit der Ethanolichte und das mögliche Vorhandensein von Luftblasen auf der Prüfkörperoberfläche während der Messung in Ethanol. Darüber hinaus kann eine Verstellung des Waagennullpunktes während der Messung die Ergebnisse beeinflusst haben, ebenso wie die Empfindlichkeit der Waage gegenüber Luftbewegungen und Erschütterungen, die trotz Abschirmung nicht vollständig eliminiert werden können. Das Handling der Prüfkörper mit einer Pinzette birgt ebenfalls das Risiko der Beeinflussung der Messergebnisse, insbesondere, wenn Feuchtigkeit von der Pinzette auf die Proben übertragen wird.

Bei der manuellen Messmethode sind die Prüfkörper ebenfalls verschiedenen Störgrößen ausgesetzt, die die Genauigkeit der Ergebnisse beeinträchtigen können. Die Anzeige des digitalen Messschiebers kann, abhängig vom Anpressdruck und der Positionierung auf der oft rauen und unebenen Oberfläche der Würfel, variieren. Eine vorhandene Messtoleranz bei einem möglichen Verkippen der beweglichen Außenmessschenkeleinheit des Messschiebers ist ebenfalls zu berücksichtigen. Sie kann zu Ungenauigkeiten führen, insbesondere, wenn ein zu großes Spiel zwischen den Messschenkeln besteht. Zudem beeinflusst die zur Bestimmung des Würfelgewichtes eingesetzte Waage die Präzision der manuellen Methode. Obwohl optische oder taktile Messverfahren eine höhere Genauigkeit versprechen könnten, waren sie aufgrund ihres hohen zeitlichen Aufwands und der großen Anzahl an Prüfkörpern in dieser Untersuchung nicht umsetzbar.

Angesichts der Einflussfaktoren und teilweise widersprüchlichen Ergebnisse der bisher genutzten Messverfahren ergab sich die Notwendigkeit, ein zusätzliches Verfahren zur Validierung einzuführen. Um die Dichteverläufe aus Abbildung 6-27 und Abbildung 6-30 näher zu untersuchen, wurden Dünnschnitte der Würfel hergestellt und mittels Durchlichtverfahren mikroskopisch analysiert (siehe Abbildung 6-31). Die hierdurch erhaltenen Bilder ermöglichten einen detaillierten Einblick in die innere Struktur der Würfel, einschließlich des Porenanteils und dessen Verteilung sowie der Verbindung zwischen Hülle und Kern. Die mikroskopische Analyse der Dünnschnitte stellt somit ein hochpräzises Instrument dafür dar, die Mikrostruktur der Proben zu charakterisieren. Dieser Ansatz erlaubt nicht nur eine direkte Visualisierung der internen Beschaffenheit, sondern auch eine qualitative und quantitative Bewertung der Materialdichte, der Porosität und der Homogenität der Materialverbindung innerhalb der Würfel. Durch den Vergleich der mikroskopischen Befunde mit den Ergebnissen der Dichtemessungen konnte eine fundierte Entscheidung darüber getroffen werden, welches Messverfahren die realen Eigenschaften der Würfel am genauesten widerspiegelt.

Wie in Abbildung 6-31 dargestellt, wurden zur Validierung die charakteristischen Energiedichtestufen E1, E4, E6 und E8 betreffend die Skinparameter S1 bis S3 untersucht. Diese Auswahl basierte darauf, dass insbesondere E4 und E6 markante Punkte in den Kurvenverläufen der bisher analysierten Grafiken darstellen. In den Dünnschnitten aller untersuchten Proben wurde eine Porenbildung beobachtet, die ab Energiedichtestufe E2 eine deutlich runde Form annahm. Dies deutet auf einen möglicherweise zu hohen Energieeintrag hin. Die Uniformität in Menge, Verteilung und Größe der Poren über die verschiedenen Proben

hinweg und deren Fortsetzung bis in die Konturen hinein unterstreicht diese Annahme. Das Auftreten von Poren in der Hülle legt ebenfalls einen zu hohen Energieeintrag nahe, wobei insbesondere am linken Hüllenrand der Probe bei E1 eine signifikante Gasblasenbildung zu beobachten war. Dies lässt auf eine Belichtung in x-Richtung schließen, bei der die kurzen Vektorlinien am Würfelrand lokalisiert sind. Die Möglichkeit, dass die Hüllenbelichtung während einer Leistungsspitze des Lasers erfolgte und dadurch die Porenbildung verstärkt wurde, wird durch die starke Raumentwicklung und Überhitzung des Materials bei kurzen Vektorlinien im Prozess gestützt. Die für die Hülle angewendete Volumenenergieichte bei Fokusstufe F0 betrug $0,45 \text{ J/mm}^3$.

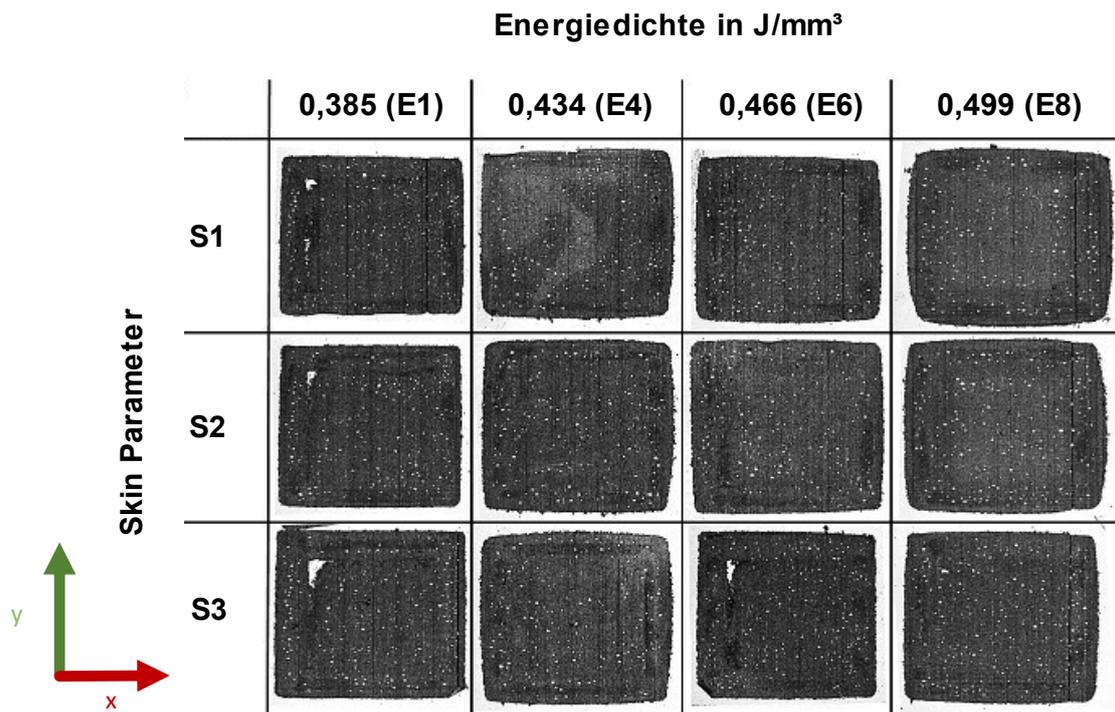


Abbildung 6-31: Dünnschnittuntersuchungen betreffend den C3-Parameter anhand ausgewählter Energiedichten

Die Dünnschnitte zeigten auch Defektstellen bei Energiestufe E1, die im Kurvenverlauf von Abbildung 6-30 erkennbar sind. E1S1 und E1S2 wiesen nur eine geringe Defektstelle auf und ähnelten sich sowohl optisch als auch in ihren Dichtewerten. Die größere Defektstelle bei E1S3 resultierte in einem niedrigeren Dichtewert, was die Sensitivität der archimedischen Dichtemessungen auf innenliegende Defekte unterstreicht. Für die Proben der Energiestufe E4 zeigten sich keine nennenswerten Defekte, was sich in nahe beieinanderliegenden hohen Dichtewerten widerspiegelte. Im Gegensatz dazu zeigte S3 bei E6 eine Defektstelle, die auch zuverlässig mit der archimedischen Messung detektiert werden konnte. Die Konsistenz in den Befunden hinsichtlich Energiestufe E8, sowohl optisch als auch messtechnisch, verdeutlicht, dass die archimedische Messmethode die tatsächlichen Dichten vorliegender Proben präzise erfassen kann.

Die Auswertungen zeigten, dass die archimedische Methode in allen untersuchten Fällen die Dichtewerte in einer Weise erfassen konnte, die die innere Struktur der Prüfkörper

berücksichtigt. Im Gegensatz dazu wiesen die durch manuelle Messmethoden ermittelten Dichtewerte keine Übereinstimmung mit den mikroskopischen Bildern auf. Dies deutet darauf hin, dass der Messfehler, der bei der manuellen Volumenbestimmung auftritt, zu signifikant ist, um verlässliche Ergebnisse zu liefern. Bei der archimedischen Messung, die unabhängig von der Gestalt des Prüfkörpers ist, scheint die ggf. vorhandene Ethanolinfiltration einen vergleichsweise geringen Einfluss auf das Messergebnis zu haben, was reproduzierbare sowie plausible Werte ermöglicht.

Obwohl die Dünnschnitte, die aus der Mitte des Würfels in der x/y-Ebene entnommen wurden, nur eine Dicke von 10 μm aufwiesen und somit lediglich einen kleinen Teil des Gesamtinneren abbildeten, stützt die Verwendung von Mehrfachschnitten die Annahme, dass diese Schicht als repräsentativ für die gesamte innere Struktur angesehen werden kann. Diese Erkenntnisse zeigen die Bedeutung einer sorgfältigen Auswahl des Messverfahrens dafür, die tatsächlichen physischen Eigenschaften der untersuchten Materialien korrekt erfassen zu können. Die archimedische Methode bietet einen zuverlässigen Ansatz, die Dichte und damit verbundene Eigenschaften präzise zu bestimmen.

Versuchsreihe IV – Optimierung der Bauteildichte für Skin-Core-Belichtungen

Versuchsreihe IV zielte darauf ab, durch systematische Variation der eingesetzten Laserleistung in acht definierten Schritten eine gezielte Untersuchung des Einflusses auf die Materialdichte zu ermöglichen. Die Dichtequader erhielten hierfür eine vergrößerte Fläche von 15 mm x 15 mm x 5 mm, um die Anzahl der Scanvektoren im Kern zu erhöhen. Die Spanne der Volumenenergiedichte erstreckte sich dabei von einem Minimalwert von 0,15 J/mm³ bis zu einem Maximalwert von 0,5 J/mm³, wobei die Inkrementierung jeweils 0,05 J/mm³ betrug. Diese Einstellungen galten über alle Fokusstufen von F0 bis F10. In einer nachfolgenden Versuchsreihe erfolgte eine Feinabstimmung, um den maximal erreichten Dichtewert zu ermitteln. Der Ausgangspunkt für das Screening wurde aufgrund der Ergebnisse aus Versuchsreihe III – insbesondere aufgrund jener betreffend F10 bei einem Energielevel von 0,401 J/mm³, wobei deutlich erkennbare runde Poren dominierten – bewusst niedrig angesetzt. Der Schwerpunkt lag darauf, eine optimierte Parametereinstellung hinsichtlich der Porenminimierung und Dichtemaximierung unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen unterschiedlicher Fokusstufen zu identifizieren. Größere Fokusstufen erfordern aufgrund der verlängerten Wechselwirkungszeit mit dem Material und der größeren Wechselwirkungsfläche niedrigere Energieeinträge. Dies folgt dem proportionalen Zusammenhang zwischen Fokusdurchmesser und Wechselwirkungszeit. Die Beobachtungen von Rauchentwicklung und Materialüberhitzung bei kurzen Scanvektoren bei F0 und einer Energiedichte von 0,45 J/mm³ legen nahe, dass eine weitere Steigerung über 0,5 J/mm³ für kleine Fokusstufen nicht zielführend wäre.

Weiterführend dienten die bereits erlangten Erkenntnisse zur internen Struktur der Würfel durch Mikrotomie und Mikroskopie als Grundlage für die Optimierung der Hülle und des Kerns der Prüfkörper. Dies beinhaltete auch die Anpassung der Hatchlinienkonformität und der Skin-Corebelichtungsstrategie. Die Anwendung Letzterer wurde ab Fokusstufe F3 als sinnvoll erachtet, da bis dahin die Füllung als detailliert und der Offset-Effekt als gering angesehen werden, um eine geometrietreue und defektfreie Darstellung des Querschnittes zu gewährleisten.

Experimentelle Anpassungen der Strahlkompensation im Kern wurden ab Fokusstufe F3 vorgenommen, um auf Basis der softwareseitigen Darstellung der Belichtung eine optimierte

Hatchlinienkonformität zu erzielen. Die in diesem Rahmen erstellten Dichtewürfel sind in Abbildung 6-32 dargestellt. Die Versuchsreihe veranschaulicht den Einfluss der Parameter anhand der Fokusstufen F0, F5 und F10 sowie der variierenden Energiedichtewerte von E1 (0,15 J/mm³) bis E8 (0,5 J/mm³) auf die Oberflächenbeschaffenheit der gefertigten Bauteile. Die Ergebnisse verdeutlichen, wie allein durch die Variation des Strahldurchmessers bei gleichbleibendem Energieeintrag signifikante Unterschiede in der Oberflächenqualität der Bauteile entstehen können. Insbesondere Fokusstufe F0 zeigte bei der niedrigsten Energiedichte E1 eine sandig-bröselige Oberfläche, was auf eine unzureichende Energiezufuhr zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu wiesen F5 und F10 beim selben Energieeintrag eine feinere Oberflächenstruktur ohne offenporige Bereiche auf, wobei die Oberfläche bei F10 glatter als bei F5 erschien, was auf ein homogeneres Schmelzbad und einen angemessenen Energieeintrag schließen lässt.

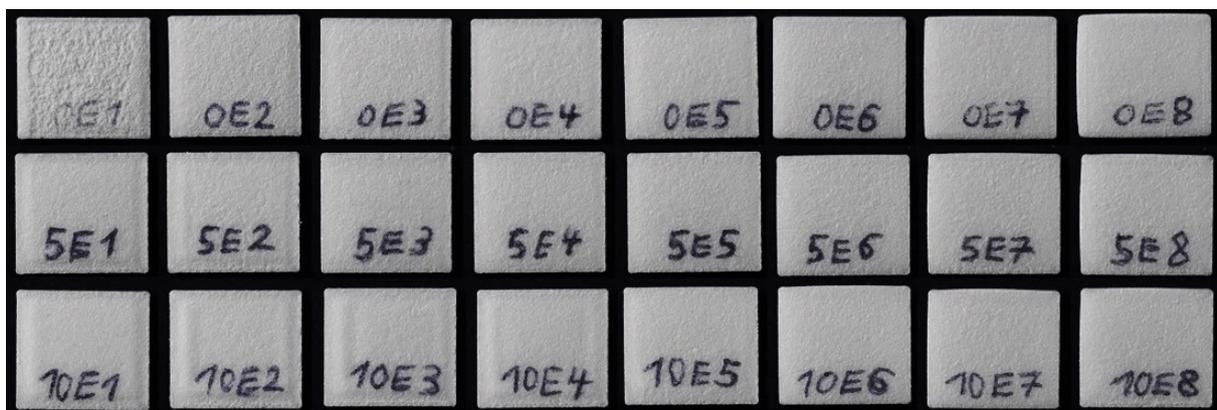


Abbildung 6-32: Darstellung der Probekörper von ausgewählten Fokusstufen

Mit zunehmender Energiedichte zeigte sich bei allen Würfeln ein leichtes Aufwachsen an den Seitenflächen, das jedoch im Vergleich zu vorherigen Versuchsreihen geringer ausfiel. Dies wird auf die iterative Anpassung der Strahlkompensation zurückgeführt, die darauf abzielte, die Oberflächenqualität und die innere Struktur der Bauteile zu optimieren.

Zur genaueren Untersuchung des inneren Aufbaus der Proben wurden erneut Dünnschnitte angefertigt und unter Durchlicht mikroskopisch analysiert. Die in Abbildung 6-33 präsentierten Ergebnisse bieten Einblicke in die Mikrostruktur der Bauteile einschließlich der Porenverteilung, der Dichte und der Bindungsqualität zwischen den Schichten. Die dargestellten Dünnschnittpräparate repräsentieren die Fokusstufen F0, F5 und F10 geordnet nach der Höhe der zugeführten Energie. Die Herstellung der Schnitte setzte bei den Energiestufen E2 bzw. E3 ein, da unterhalb dieser Schwellenwerte die Strukturintegrität für eine präzise Mikrotomschnittführung unzureichend war. Die Beobachtung von Deformationen wie Krümmungen und Stauchungen der Schnittpräparate, besonders ersichtlich bei F0E4, lässt sich auf die beim Schneidprozess einwirkenden Kräfte zurückführen. Diese verteilen sich bei Abnutzung der Schneide ungleichmäßig, wodurch Schnittdefekte, vor allem bei Vorliegen von Klingenausbrüchen, deutlich werden. Solche Defekte sind beispielsweise bei F10E5 sichtbar und sollten vermieden werden, da sie bei porösen Stellen die Stauchung verstärken und dadurch die Genauigkeit der Porenanteilmessung beeinträchtigen können. Die Darstellung von Probe F10E3 zeigt, dass die Außenschichten in der x/y-Ebene lediglich drei Schichten dick waren, um den Einfluss der Außenhülle auf die manuelle Messung zu

minimieren. Im Vergleich zu vorherigen Einstellungen wurde die Energiedichte der Haut (Skin) von $0,45 \text{ J/mm}^3$ auf $0,3 \text{ J/mm}^3$ reduziert (mit einer Laserleistung von $27,6 \text{ W}$, einem Abstand von $0,23 \text{ mm}$, einem Strahlversatz von $0,22 \text{ mm}$ und einer Geschwindigkeit von 4000 mm/s), um Konturverbrennungen und Rauchbildung an den Rändern zu verringern. Die Höhe der Proben wurde auf 5 mm reduziert – einerseits, um die Mikrotomklinge zu schonen, und andererseits, da höhere Quader keinen zusätzlichen Nutzen für die Analyse boten.

In Grün hervorgehoben sind die Dünnschnittpräparate mit maximaler Dichte, gemessen durch manuelle Methoden. Letztere erwiesen sich als anwendbar, da die Oberflächenbeschaffenheit der Prüfkörper eine hohe Ebenheit aufwies, was das Fehlerpotenzial reduzierte. Erst ab Energiestufe F10E6 war eine Verformung der Quaderunterseite aufgrund übermäßiger Laserpenetration zu beobachten. Die maximale Energiedichte bei F0 mit einem Wert von $0,4 \text{ J/mm}^3$ erscheint plausibel, da diese bei kommerziellen Systemen üblich ist. Für F5 wurde der optimierte Dichtewert bei reduzierter Energiezufuhr auf $0,35 \text{ J/mm}^3$ festgelegt, während für F10 der optimierte Wert erneut bei $0,4 \text{ J/mm}^3$ lag. Diese Beobachtung deutet auf eine mögliche Verzerrung der manuellen Dichtemessung durch interne Hohlräume hin, die mit dieser Methode allerdings nicht quantifiziert werden konnten.

In Rot sind die nach einer Schwellenwertanalyse ermittelten Dünnschnitte mit maximaler Dichte bzw. minimalem Porenanteil hervorgehoben. Die Untersuchung richtete sich mit der Region of Interest (ROI) ausschließlich auf die Füllung, um Messverzerrungen durch vorhandene Lücken, wie bei F10E3 beobachtet, zu umgehen. Die Schwellenwertanalyse basiert auf einem Kontrastvergleich und gibt den Weiß- und Schwarzanteil in Prozent an. Unter Berücksichtigung bestimmter Schwellenwerte und einer Detektionsgröße von $1000 \mu\text{m}^2$ lassen sich die Dichtewerte in Form von prozentualen Porenanteilen reproduzierbar bestimmen. Sie sind hochpräzise, jedoch nicht absolut und können in Abhängigkeit von der eingestellten Lichtintensität variieren, was durch die Konstanthaltung des Helligkeitswertes über ein Histogramm bei einem Wert von 200 ausgeglichen wurde. Dadurch wurde vermieden, dass Bereiche fälschlicherweise als porös klassifiziert werden, wenn das Licht lediglich durch dünnes Material scheint.

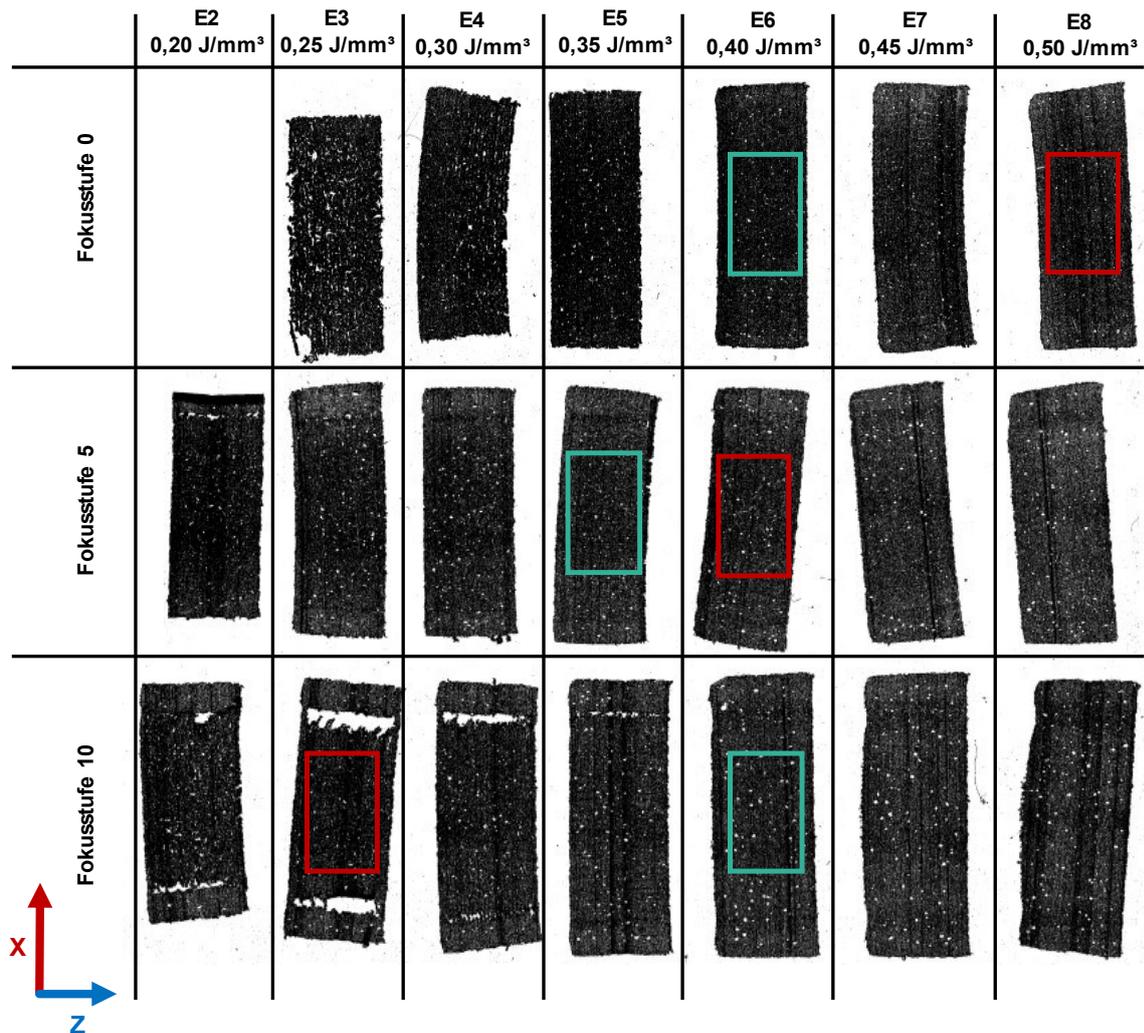


Abbildung 6-33: Ausgewählte Dünnschnitte mit dem Vergleich der Ergebnisse der manuellen Messung (türkis) und jener zur maximalen Bauteildichte nach einer Schwellenwertanalyse (rot)

Die Ergebnisse der Schwellenwertanalyse bekräftigen die anfängliche Hypothese, dass der notwendige Energieeintrag mit zunehmender Fokusstufe abnimmt. Durch die Kombination aus äußerlicher Betrachtung und mikroskopischer Untersuchung der Dünnschnitte konnten präzise Rückschlüsse auf die optimalen Parameter für die Herstellung von Bauteilen mit minimalen Defekten und maximaler Dichte gezogen werden. Die Erkenntnisse aus der vorliegenden Versuchsreihe waren somit entscheidend für die weitere Optimierung der Energieeinträge und der Fokusstufen zur Erzielung einer verbesserten Bauteilqualität.

Die vorgestellte Schwellenwertanalyse der Fokusstufen F0, F5 und F10 wurde für alle weiteren Prüfkörper durchgeführt. Zur Veranschaulichung wird ein Vergleich der Dichtetrends aus der manuellen Auswertung und aus der Schwellenwertanalyse in Abbildung 6-34 präsentiert. Die Gegenüberstellung beider Methodiken zeigt, dass es einen Bereich mit hoher Übereinstimmung und einen gegenläufigen Bereich gibt. Auf der y-Achse sind die Energiedichten der maximalen Dichtewerte für die Fokusstufen F0 bis F10 auf der x-Achse aufgetragen.

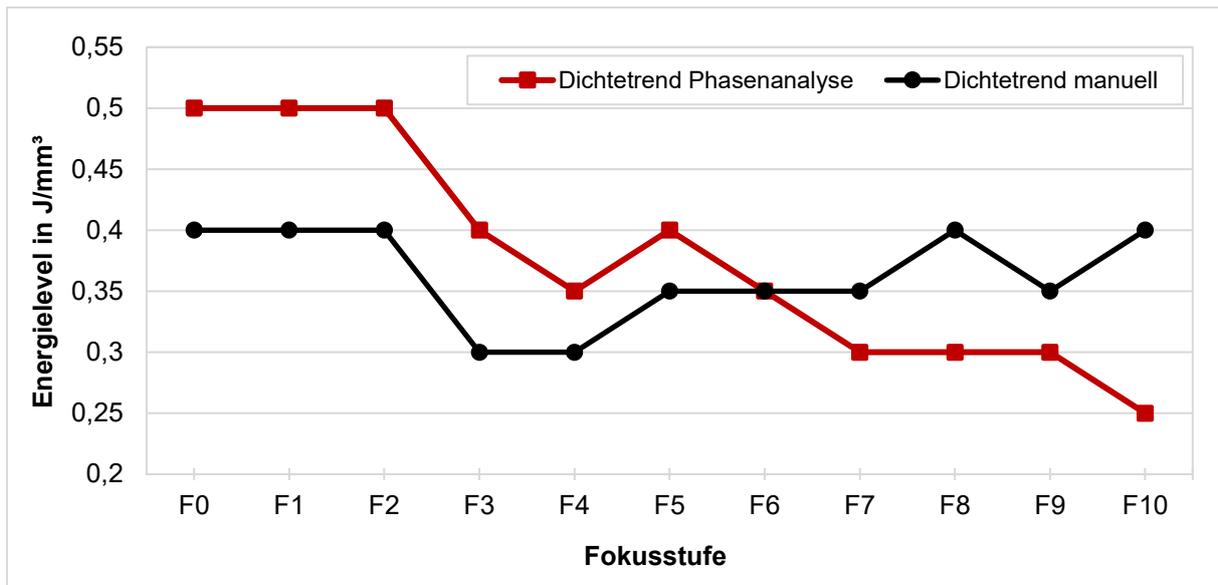


Abbildung 6-34: Trendlinien der maximal erreichten Bauteildichte nach Fokus und Energiedichte

Auffällig ist, dass der Verlauf der Dichtemaxima bis zu Fokusstufe 5 weitgehend parallel ist. Erst ab F6 wies die Dichtewertbestimmung nach Schwellenwertanalyse ihre Maxima bei einem weiteren Abfall der Energiedichte auf, während bei der manuellen Messung die Dichtewerte mit steigender Energiedichte wieder zunahm. Dies ist auf den erhöhten Einfluss der Hülle zurückzuführen, die eine verbesserte Anbindung an den Kern bei erhöhter Energiezufuhr erfährt und bei der Schwellenwertanalyse nicht innerhalb der ROI liegt. Aus den Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass mit zunehmender Strahlaufweitung die für die Erzeugung von Bauteilen mit optimiertem Porengehalt erforderliche Energie abnimmt. Demzufolge können Bauteile mit reduziertem Porengehalt durch die erweiterte Belichtungsfläche der aufgeweiteten Fokusstufen in kürzerer Zeit hergestellt werden. Die Effizienz dieses Vorgehens hängt jedoch maßgeblich von der Größe der zu belichtenden Bauteilfläche ab, wobei insbesondere die Füllbereiche von der Fokusaufweitung profitieren, während die Konturierung aufgrund des geringeren Fokusdurchmessers zeitaufwändiger bleibt.

Die in Abbildung 6-31 ersichtlichen Hohlräume hatten einen signifikanten Einfluss auf die Dichtebestimmung. Dies betrifft sowohl die manuelle als auch die archimedische Messung. Daher ist die Verlässlichkeit der Ergebnisse primär dann gegeben, wenn detaillierte Informationen über die interne Struktur der Bauteile vorliegen. In etablierten Fertigungsprozessen mit bewährten Parametern kann die manuelle Messung effizient für die Dichtebestimmung von Bauteilen mit einfacher Geometrie eingesetzt werden. Für komplexere Strukturen wird jedoch die Anwendung der archimedischen Messmethode erforderlich. Deren Genauigkeit wird potenziell durch die Infiltration des Prüfmediums in den Prüfkörper beeinflusst, was eine Änderung seines Auftriebsverhaltens zur Folge haben könnte. Um diesen Effekt visuell zu untersuchen, wurden die Prüfkörper von Fokusstufe F10 dieser Versuchsserie mit der Schnittfläche in gefärbtes Ethanol getaucht. Nach einer Expositionszeit von ca. 20 s, die näherungsweise der Verweildauer des Prüfkörpers im Prüfmedium während der archimedischen Gewichtsermittlung entspricht, wurden sie entnommen und mit einem Papiertuch abgetrocknet. Für die Fokusstufen F10E1, F10E2 und F10E3 (von links nach rechts) sind die Resultate dieser Prozedur in der folgenden Abbildung 6-35 festgehalten. Die

erste Energiestufe zeigte einen gemittelten Dichtewert (manuell) von $0,742 \text{ g/cm}^3$ bei einer Energiedichte von $0,15 \text{ J/mm}^3$, die zweite eine mittlere Dichte von $0,832 \text{ g/cm}^3$ bei $0,2 \text{ J/mm}^3$ und die dritte einen mittleren Dichtewert von $0,864 \text{ g/cm}^3$ bei $0,25 \text{ J/mm}^3$.

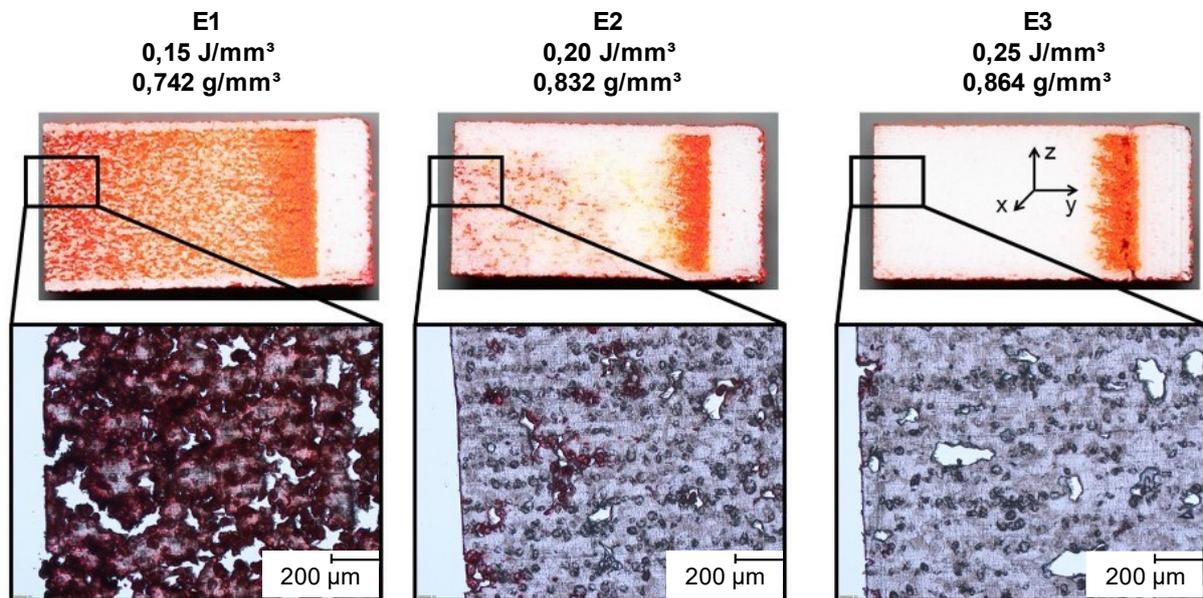


Abbildung 6-35: Infiltrationsverhalten der Probekörper in Abhängigkeit von der Bauteildichte

Es wurde eine Zunahme der Infiltrationsintensität im Corebereich bei abnehmender Energiedichte der Prüfkörper festgestellt, wobei die Infiltration bei der niedrigsten Energiestufe durch den gesamten Querschnitt verlief, was eine signifikante Verzerrung des Ergebnisses nach der archimedischen Methode impliziert. Die Mikroskopaufnahmen offenbarten eine nahezu komplette Sättigung des Materials mit Ethanol bedingt durch den hohen porösen Anteil bei der niedrigsten Energiedichte. Bei der zweiten Energiestufe zeigten sich eine deutlich verringerte Infiltrationstiefe und -intensität, was sich in den Mikroskopbildern durch einen signifikant reduzierten Anteil roter Bereiche widerspiegelt. Dies deutet auf eine höhere Schichtverbindung durch ausreichende Partikelverschmelzung hin, die das Eindringen von Ethanol vermindert. In der dritten Energiestufe mit einer Energiedichte von $0,25 \text{ J/mm}^3$ waren weder im Quer- noch im Dünnschnitt Infiltrationsbereiche im Inneren zu erkennen, was auf eine hohe Dichte hinweist, die das Eindringen von Ethanol gänzlich verhindert. Diese Beobachtung korreliert mit den durch die Schwellenwertanalyse bestimmten Porenverteilungen. Die Energiedichte von $0,25 \text{ J/mm}^3$ repräsentiert somit das globale Minimum der Porenverteilung, bei dem die Festkörperdichte am höchsten ist. Die archimedische Methode ist demnach bei optimierter Dichte weniger anfällig für Verzerrungen durch Ethanolinfiltration als zuvor angenommen. Eine detaillierte Untersuchung der Randbereiche mit 200-facher Vergrößerung ergab eine durchschnittliche Eindringtiefe des gefärbten Ethanols von $30 \mu\text{m}$, was eine minimale Beeinträchtigung des Messergebnisses nach sich zieht. Dies bestätigt die Eignung der Auftriebsmethode zur Dichtebestimmung bei Körpern mit ausreichender Dichte ab ca. $0,862 \text{ g/cm}^3$ nach manueller Methode.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die mikroskopische Analyse wesentlich zum Verständnis der inneren Bauteilbeschaffenheit bei verschiedenen Einstellungen der Laserleistung und der

Fokusstufen beiträgt und eine gezieltere Optimierung der Prozessparameter für zukünftige Versuchsreihen ermöglicht. Eine Generierung der Bauteile durch die Hülle-Kern-Strategie erlaubt zwar die Einhaltung der Sollgeometrie bei höheren Fokusstufen, kann die Lückenbildung aufgrund des Offsets des Füllmusters jedoch nicht vollständig vermeiden. Infiltrationsversuche zeigten, dass die Problematik lediglich in das Bauteilinnere verlagert wird. Zudem entstehen durch die alternierend kurzen Scanvektoren an den Seitenflächen Überhitzungen, die zur Schädigung des Materials führen und vermieden werden sollten. Unter Abwägung des zusätzlichen Platzierungsaufwands und der Prozessbeschleunigung wurde in den nachfolgenden Untersuchungen erneut auf die Kompensation des Versatzes durch zwei Konturlinien unterschiedlicher Fokusdurchmesser gesetzt. Diese Scanstrategie bot eine optimierte Kombination aus Kantenschärfe, Oberflächenbeschaffenheit und Produktivität.

Versuchsreihe V – Selektives Dichtescreening mit doppelter Kontur

Unter Einbeziehung der bisherigen Ergebnisse wurden die Dichtemaxima der Schwellenwertanalyse aus Abbildung 6-34 aufgegriffen und einer fokusabhängigen Energiedichtevariation unter Veränderung des Hatchabstandes und der Laserleistung unterzogen. Dabei orientierten sich die Parameter an den Energiedichten der Dichtemaxima der jeweiligen Fokusstufe, wobei diese um $0,1 \text{ J/mm}^3$ in positive und negative Richtung variiert wurden. Ergänzend wurde der Hatchabstand der Füllung simultan um $0,1 \text{ mm}$ vom ursprünglichen Abstand in beide Richtungen verändert. Aus Formel 2-5 ergab sich somit die verwendete minimale und maximale Laserleistung. Als Resultat dieser Vorgehensweise wurden die in der nachfolgenden Tabelle aufgelisteten Parameter für das Dichtescreening verwendet, die das individuelle Energielevel je Fokusstufe beschreiben.

Tabelle 6-1: Parameterzuweisung des fokusstufenabhängigen Dichtescreenings

E in J/mm^3	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
E-Level 1	0,2	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,2	0,2	0,15
E-Level 2	0,3	0,3	0,3	0,26	0,27	0,31	0,32	0,33	0,26	0,25	0,19
E-Level 3	0,4	0,4	0,4	0,35	0,35	0,35	0,35	0,34	0,3	0,3	0,25
E-Level 4	0,5	0,5	0,5	0,43	0,41	0,36	0,35	0,35	0,31	0,32	0,28
E-Level 5	0,76	0,62	0,59	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,4	0,4	0,35

Die Dichtewürfel mit einer Kantenlänge von 12 mm wurden für jeden Fokus und jede Energiedichte dreimal in verschiedenen Riegen gefertigt. Die insgesamt 165 Probekörper wurden aufgrund ihrer hohen Geometrietreue einer manuellen Dichtebestimmung unterzogen. Bei F0–F3 war ein Anstieg der Dichte bis zum Maximalwert zu erkennen, der bei einer weiteren Erhöhung der Energiedichte wieder abfiel. Während die Dichteverläufe der kleinen Fokusstufen wie erwartet waren, waren die Verläufe der Fokusstufen ab Stufe 4 konträr zu den Annahmen aus der schwellenwertanalytischen Porenbestimmung. Es zeigte sich, dass die Bauteildichten auch auf dem höchsten Energielevel keinen Abfall erfuhren. Die Ergebnisse der Bauteildichten über die eingebrachte Energiedichte sind in Abbildung 6-36 aufgeführt.

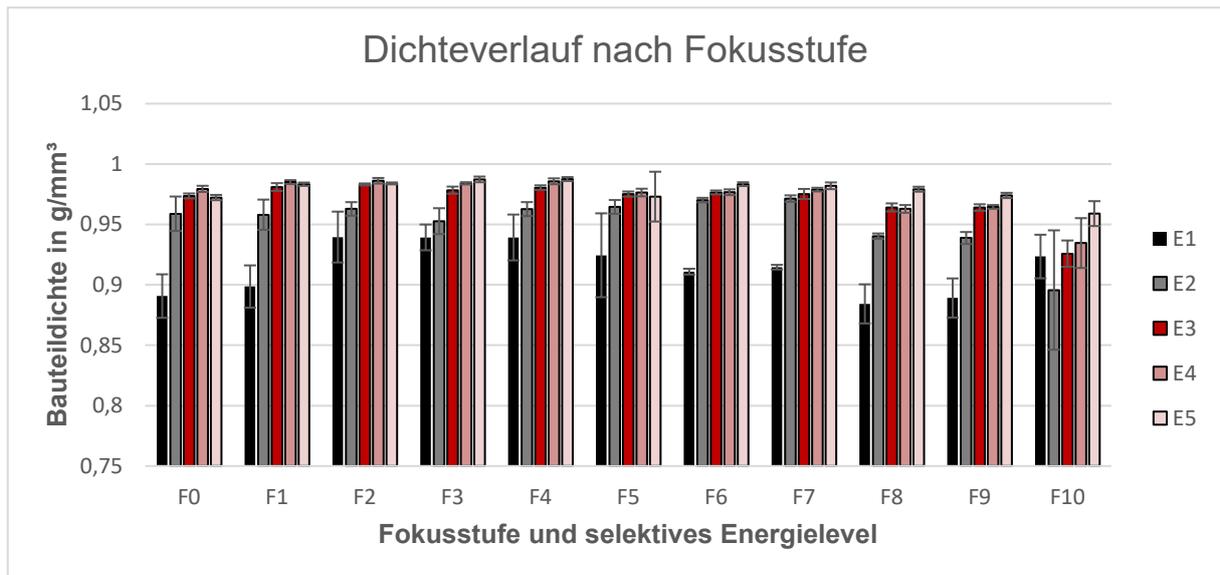


Abbildung 6-36: Dichteverlauf der Proben bei unterschiedlichen Energieleveln je Fokusstufe

Die erzeugten Probekörper mit der maximalen Fokusstufe waren hierbei von besonderem Interesse. Bei der Betrachtung der Dichtewürfel fiel trotz der hohen Geometrietreue der teilweise stark ausgeprägte unversinterte Bereich zwischen Kontur und Füllung des Bauteils auf (vgl. Abbildung 6-37). Diese Fehlstellen im Inneren führten zu Fehlern der Messung nach der archimedischen Methode. Der Dichteverlauf lässt sich hierbei so erklären, dass eine höhere Energiedichte die Lücke zwischen Füllung und Kontur durch eine breitere Schmelzbadausprägung zwar sukzessive verschließt, reziprok jedoch den Porenanteil erhöht, was einer weiteren Steigerung der Bauteildichte bei höheren Energiedichten entgegenwirkt.



Abbildung 6-37: Illustration der Darstellungsfehler bei hohen Laserspotdurchmessern

Es wurde ersichtlich, dass die Konturen in der Lage sind, die Bauteilgeometrie weitgehend einzuhalten, und dass die innenliegende Füllung in Bezug auf die Anbindung zur Kontur optimiert werden muss. Zudem war der ursprüngliche Versatz zwischen Bauteilkontur und Füllung nach wie vor vorhanden und bedurfte einer Kompensation.

Es kann weiter festgehalten werden, dass die ursprünglichen Energiedichten von Versuchsreihe IV als valide angesehen werden können. Zwar waren die gemessenen

Dichtewerte bei der höchsten Volumenenergiedichte höher, sie wurden jedoch auch von unerwünschtem Aufwachsen des Bauteils und runden Poren im Bauteilinneren begleitet (vgl. Abbildung 6-33). Als Folge dieser Beobachtung wurde das mittlere Energielevel E3 als die zu wählende Option zwischen Bauteildichte und Maßhaltigkeit angesehen und es wurde erneut auf die Anbindung der Kontur an das Füllmuster eingegangen.

Versuchsreihe VI – Variation der Strahlverschiebung für das Füllmuster

Als konsequente Fortführung der Optimierung der Bauteildichte wurde in dieser Versuchsreihe der Fokus auf die Schließung der Lücke zwischen Kontur und Füllmuster gelegt. Hierzu sollte die Füllung für vergrößerte Spotdurchmesser nach den Coreparametern bezüglich der Strahlkompensation angepasst werden. Bestandteil dieser Optimierung waren die mittleren Werte der Energiedichten für die jeweiligen Fokusstufen 5 bis 10 aus den Vorversuchen, da hierbei die Anbindung an den Konturen noch als unzureichend angesehen werden kann (vgl. Abbildung 6-38).



Abbildung 6-38: Ausprägung des Versatzes in Abhängigkeit zur Fokusstufe

Es wurde betreffend das niedrigste Energielevel der vorherigen Versuchsreihe die Lücke zwischen dem Füllmuster und der Kontur mit dem Messschieber quantifiziert. Der so ermittelte Wert wurde vom bisherigen Wert der Strahlverschiebung subtrahiert, sodass eine Verschiebung der Füllung in Richtung Kontur stattfand. Dieser neu festgelegte Wert wurde in zwei Stufen jeweils um 10 % erhöht sowie verringert. Eine positive Verschiebung steigerte dabei den Abstand der Scanlinien von der Sollkontur wieder und eine negative Verschiebung verringerte ihn zusätzlich zur Korrektur der manuellen Messung mit dem Messschieber. Die nachfolgende Tabelle 6-2 zeigt die verwendeten Parameter der Strahlverschiebung. Zusätzlich ist als Ergebnis dieser Untersuchung die Strahlkompensation mit dem höchsten Dichtewert kenntlich gemacht.

Tabelle 6-2: Korrigierte Strahlkompensation und Aufbau von Versuchsreihe VI

	Korrigierter Wert der Strahlkompensation in mm	-20 %	-10 %	10 %	20 %
F5	0,58	0,464	0,522	0,638	0,696
F6	0,56	0,448	0,504	0,616	0,672
F7	0,71	0,568	0,639	0,781	0,852
F8	0,82	0,656	0,738	0,902	0,984
F9	1,04	0,832	0,936	1,144	1,248
F10	0,94	0,752	0,846	1,034	1,128

Alle Bauteile konnten durch diese Optimierung der Strahlkompensation geometriegetreu und mit einer hohen Anbindung der Füllung an die Konturen generiert werden. Die Einflüsse der Strahlverschiebung auf die Bauteildichten werden in Abbildung 6-39 gezeigt. Bis einschließlich Fokusstufe 9 wurden hohe Dichtewerte von bis zu 0,93 g/mm³ (nach manueller Messung) erzielt. Die maximalen Dichtewerte lagen bei 0,941 g/mm³ und wurden bei F5–F7 erreicht.

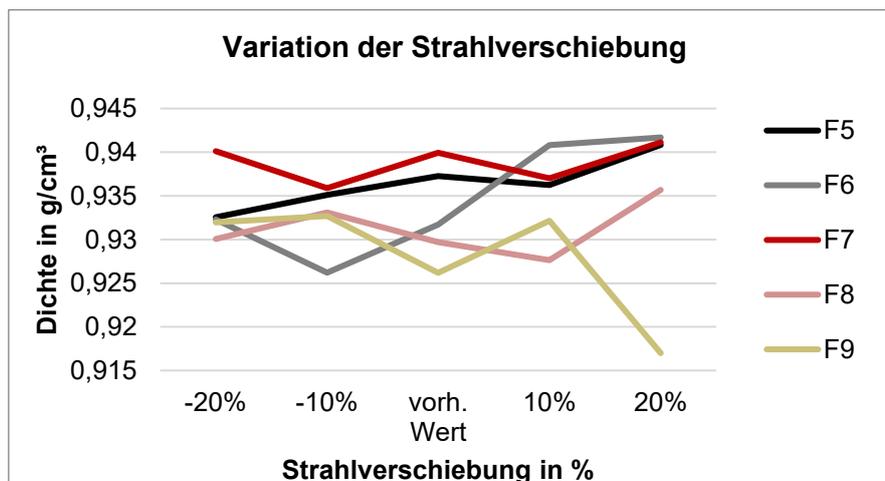


Abbildung 6-39: Einfluss der Strahlverschiebung auf die Bauteildichte

Alle Dichtewerte – mit Ausnahme jener hinsichtlich Fokusstufe 10 – erreichten die im Datenblatt hinterlegten Werte nach manueller Messmethode. Bei F10 wurde eine Bauteildichte von maximal 0,869 g/mm³ erzielt. Zu diskutieren ist der Umstand, dass ggf. nicht ausreichend Energie in das Pulverbett eingebracht wurde, obwohl vorherige Untersuchungen gezeigt haben, dass ein dichtes Bauteil auch mit Fokusstufe 10 erreicht werden kann. Eine mögliche Erklärung ist das sensible Verhalten des Intensitätsprofils. Durch die Verwendung der maximalen Einstellungen entsteht bei geringen Veränderungen der Optiken im Strahlengang bereits eine ausgereifte Strahldegradation. Diese kann im laufenden Forschungsbetrieb nicht

ausgeschlossen werden. So könnte es erklärt werden, dass die Bauteildichte in dieser Versuchsreihe für F10 abweichend zu den bisherigen Ergebnissen der Dichte ausfallen.

Als Ergebnis der bisherigen Versuchsreihen werden die ermittelten Parametersätze jeder Fokusstufe als Standardparameter für die Versuchsanlage in Tabelle 6-3 veranschaulicht. Je nach Fokusstufe wurden dabei der Spurbreitenabstand, die Laserleistung und die Strahlverschiebung variiert. Ab F3 wurde eine doppelte Kontur mit jeweils angepasstem Fokusbereich beginnend bei F2 bis F5 realisiert. Alle Parameter wurden mit aktiviertem Skywriting, einer alternierenden Belichtung in x/y-Richtung und einer Geschwindigkeit von 4000 mm/s belichtet (vgl. Kapitel 2.6.2). Die außen liegende Kontur 1 wurde unabhängig von der Fokusstufe der Füllung mit einer Laserleistung von 16 W, einer Geschwindigkeit von 1500 mm/s sowie F0 gefertigt.

Tabelle 6-3: Standardparameter für die zu verwendenden Fokusstufen

	Füllung					Kontur 2	
	Hatch	Laserleistung	Strahlkomp.	Fokus	E-Dichte	Laserleistung	Fokus
	H	PL	F _{KOMP}	F(X)	E _V	PL	F(X)
UDE_Standard_F0	0,23	36,8	0,22	0	0,40		
UDE_Standard_F1	0,29	45,6	0,33	1	0,39		
UDE_Standard_F2	0,31	48,8	0,37	2	0,39		
UDE_Standard_F3	0,29	48,5	0,53	3	0,42	16	2
UDE_Standard_F4	0,31	50,5	0,57	4	0,41	37	3
UDE_Standard_F5	0,56	78,4	0,70	5	0,35	37	4
UDE_Standard_F6	0,6	84	0,61	6	0,35	37	5
UDE_Standard_F7	0,8	108	0,71	7	0,34	37	5
UDE_Standard_F8	0,76	91,2	0,74	8	0,30	37	5
UDE_Standard_F9	0,81	102,6	0,83	9	0,32	37	5
UDE_Standard_F10	0,86	86	0,94	10	0,25	37	5

Die Deklaration der Standardparameter für die Fertigung dreidimensionaler Körper konnte in sieben aufeinander aufbauenden Versuchsreihen entwickelt werden. Basierend auf den Einzelspurbreiten und ersten Screeningversuchen konnten erste Ergebnisse für erweiterte Fokusstufen erzielt werden. Dabei stellte sich die Herstellung von geometrietreuen Körpern aufgrund anlageninhärenter Diskrepanzen als herausfordernd dar. Ein vielversprechender Ansatz zur Wahrung der Geometrietreue war die Verwendung von Hülle-Kern-Scanstrategien. Aufgrund der signifikant geringeren Prozessgeschwindigkeit hierbei wurde jedoch eine doppelte Konturbelichtung priorisiert und bis zu den aktuell geltenden Standardparametern optimiert.

Als Zwischenfazit lässt sich festhalten, dass dreidimensionale Bauteile mit einer ausreichenden Dichte und einer hohen Geometrietreue unter Berücksichtigung der Steigerung der Prozessgeschwindigkeit hergestellt werden können. Den Herausforderungen aufgrund des Versatzes zwischen Füllung und Kontur, der auf den Status einer Prototypenanlage zurückzuführen ist, konnte durch Parameteranpassung entgegengewirkt werden.

In Versuchsreihe I wurde die Variation der Strahlkompensation in der Kontur der Bauteile untersucht. Es fielen Schwankungen in der Laserleistung auf, die sich in der Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile zeigten. Eine Untersuchung bezüglich der Lage im Bauraum ergab messbare Unterschiede der Dichtequader, die jedoch nicht als signifikant angesehen wurden. Weiterführend wurden aufgrund der teilweise hohen Oberflächendeformationen die Bauteildichten sowohl manuell als auch nach dem Auftriebsprinzip ermittelt und verglichen. Der Vergleich ergab gegenläufige Bauteildichten, was die Vertrauenswürdigkeit der Messmethoden in Frage stellte.

Eine weitere Versuchsreihe II zeigte den Einfluss der Hatchlinienkonformität und quantifizierte diesen. Es wurde ersichtlich, dass bei fast allen Fokusstufen durch die Optimierung der Scanlinien eine höhere Bauteildichte erreicht werden konnte.

In der nächsten Versuchsreihe III wurde auf eine Skin-Core-Belichtungsstrategie gewechselt, um die Bauteildichte weiter zu optimieren. Durch die Variationen der Parameter konnte der Wirkzusammenhang zwischen einzustellenden Parametern und Anbindung zwischen äußerem und innerem Bereich identifiziert werden. Dies war jedoch nur möglich, indem die Bestimmung der Bauteildichte durch Dünnschnitte und eine Schwellenwertanalyse ergänzt wurde.

Die Erkenntnisse wurden in der darauf aufgebauten Versuchsreihe IV mit einem ausgewählten Coreparameter auf alle Fokusstufen übertragen. Es zeigte sich, dass das Problem mit der Anbindung der Füllung an die äußere Schicht weiterhin bestand, jedoch in das Innere des Bauteils verschoben wurde. Damit zusammenhängend, dass die Skin-Core-Belichtung einen inhomogenen Energieeintrag erzeugt und einen negativen Effekt auf die Prozessgeschwindigkeit hat, wurde die Belichtungsstrategie verworfen und wieder auf die zweifache Konturbelichtung gewechselt.

Nach einem Dichtescreening, das auf jede Fokusstufe selektiv angewendet wurde, führten die Erkenntnisse der Corebelichtung zu den abschließenden Versuchsreihen V und VI. Diese hatten das Ziel der Schließung der Lücke zwischen Füllung und Kontur durch Anpassung der Energiedichte und der Strahlkompensation für die Füllung.

Die Versuchsreihen zur Optimierung der Bauteildichte zeigten, dass je nach vorliegender Bauteilbeschaffenheit eine fundierte Entscheidung hinsichtlich der Messmethodik einen großen Einfluss auf die Ergebnisse und die darauf basierenden Rückschlüsse hat. Die Erarbeitung einer geeigneten Messmethodik und von Parametern, die den Versatz der Füllung zur Kontur kompensieren, war erfolgreich. Damit war die Optimierung der Bauteildichte für Betriebspunkt 2 und vergrößerte Laserspotdurchmesser von bis zu 2 mm abgeschlossen und die jeweiligen Parameter wurden als Standardparameter verwendet.

6.3 Verifizierung und Validierung der Parameter für variierende Spotgrößen

Die im vorherigen Kapitel erarbeiteten Parametersätze sollten in der Folge verifiziert und validiert werden. Zur Verifizierung wurden Zugproben mit den Standardparametersätzen aller Fokusstufen in fünffacher Ausfertigung gefertigt und geprüft. Weiterführend wurden die verwendeten Parameter unter Nutzung einer statistischen Versuchsplanung validiert und

optimiert. Hierzu wurde ein voll faktorieller 2²-Versuchsplan mit Zentralpunkt umgesetzt, der den Energieeintrag anhand der Laserleistung und des Spurbreitenabstandes variiert (vgl. Anhang 11-2).

6.3.1 Verifizierung der Standardparameter

Eine Übersicht über die verwendeten Standardparameter aus den vorangegangenen Versuchsreihen liefert Tabelle 6-3 (vgl. Kapitel 6.2.4). Über alle Versuche konstant gehalten wurden die Scannergeschwindigkeit von 4000 mm/s sowie die Schichtstärke von 0,1 mm. Gefertigt wurden je Orientierung und Parameter fünf Proben, um statistische Sicherheit zu erhalten und eventuell auftretende Ausreißer identifizieren zu können. Es wurden zwei Bauprozesse realisiert, die die Fokusstufen F0 bis F4 bzw. F5 bis F10 beinhalteten.

Die Ergebnisse lieferten die Kennwerte aus dem einachsigen Zugversuch betreffend E-Modul, Zugfestigkeit σ_M und Bruchdehnung e_B . Bei der Betrachtung der mechanischen Kennwerte der Verifizierung war ersichtlich, dass diese bis einschließlich F7 dem Stand der Technik entsprachen. Die Fokusstufen F8 und F9 wiesen hingegen eine verringerte Bruchdehnung auf. Es war weiterhin zu erkennen, dass F10 bei allen ausgewählten Kennwerten unterhalb der vom Hersteller angegebenen Richtwerte lag. Wie im Stand der Technik üblich waren die mechanischen Eigenschaften, besonders die Bruchdehnung, von der Orientierung der Bauteile abhängig. Dabei unterlagen die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung der Bauteile, die in z-Orientierung gefertigt wurden, den entsprechenden Werten der x/y-Orientierung (vgl. Abbildung 6-40).

Die Ergebnisse zeigen, dass alle Fokusstufen bis F9 erfolgreich verifiziert wurden. Die Anlage ist damit befähigt, mechanisch beanspruchte Teile mit einem Spotdurchmesser von bis zu 1,59 mm und einer Spurbreite von maximal 2 mm innerhalb der Herstellerspezifikationen zu fertigen. Auffälligkeiten wurden beispielsweise durch einen Abfall des E-Moduls in x/y-Orientierung mit erhöhter Standardabweichung bei Fokusstufe F3 beobachtet. Aus dem Stand der Technik geht jedoch hervor, dass bei reduziertem E-Modul eine erhöhte Bruchdehnung resultiert. Dies konnte ebenfalls bei F3 beobachtet werden, wobei sich in x/y-Richtung mit 25 % Bruchdehnung der höchste Wert dieser Versuchsreihe ergab.

Die Fokusstufen F8 und F9 wiesen erste Anzeichen einer unzureichenden Verarbeitung auf, was sich in einem verringerten E-Modul und einer erhöhten Standardabweichung der Proben in z-Richtung zeigte. Ein identisches Verhalten wurde betreffend die Zugfestigkeit in z-Orientierung beobachtet. Noch deutlicher waren die verringerten mechanischen Eigenschaften hinsichtlich der Bruchdehnung, wobei beide betrachteten Orientierungen der Zugproben signifikante Leistungseinbußen verzeichneten.

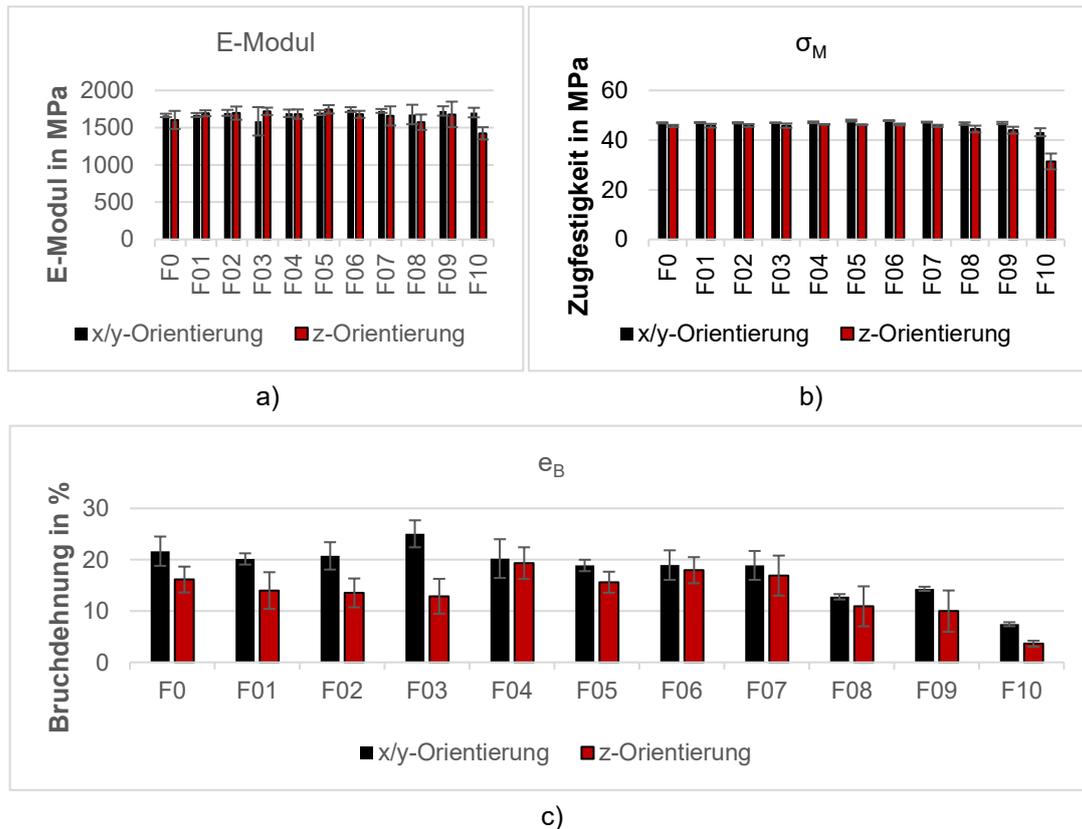


Abbildung 6-40: Resultierende mechanische Eigenschaften der Standardparameter betreffend a) E-Modul, b) Zugfestigkeit und c) Bruchdehnung

Die Fokusstufe F10 war in dieser Versuchsreihe der Parametersatz mit den geringsten mechanischen Eigenschaften. Mit Ausnahme des E-Moduls und der Zugfestigkeit der in x/y-Richtung erstellten Proben befanden sich alle Kennwerte dieser Fokusstufe außerhalb der Herstellerangaben. Dies deutet auf typische Versagensmechanismen hin, die auf einen unzureichenden Energieeintrag zurückzuführen sind. Dazu gehören eine geringe Bruchdehnung und ein Spannungs-Dehnungs-Verlauf, der eine niedrige Duktilität aufweist. Basierend auf den aktuellen Ergebnissen konnte eine Verifizierung dieses Parametersatzes somit nicht erreicht werden.

6.3.2 Validierung und Optimierung der Standardparameter

Aus diesem Grund wurden in der Folge die Parameter unter Zuhilfenahme einer statistischen Versuchsplanung validiert. Da der Einfluss der Orientierung als verfahrensinhärent anzusehen ist, wurden die Versuchsreihen je Orientierung einmal umgesetzt. Zentralpunkt war der ermittelte Standardparameter der jeweiligen Fokusstufe, während der Energieeintrag anhand der Faktoren Hatchabstand H und Laserleistung P_L beschrieben wurde. Bei der Umsetzung ergaben sich je Fokusstufe fünf differenzierende Parameter, anhand derer jeweils drei Probekörper gefertigt wurden. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass der F10-Parameter in zwei verschiedenen Variationen bezüglich der verwendeten Energiedichte umgesetzt wurde: einmal wie beschrieben mit dem Standardparameter und einmal mit der höheren Laserleistung

des F9-Parameters als Zentralpunkt. Dadurch sollte dem Umstand des zu geringen Energieeintrages in den vorangegangenen Versuchen entgegengewirkt werden. Somit ergab sich ein Probenumfang von 180 Stück je Orientierung im Baufeld.

Die Auswertung der statistisch angelegten Versuchsreihen erfolgte manuell, da sich für die vergrößerten Laserspotdurchmesser keine offensichtlichen neuartigen Wechselwirkungen zwischen Hatchabstand und Laserleistung ergaben (vgl. Anhang 11-3). Zielsetzung dabei war es, die resultierenden mechanischen Bauteileigenschaften unabhängig von ihrer Orientierung mit einem Parameter zu homogenisieren.

Nachfolgend werden der Standardparameter und die Ergebnisse der Optimierung nach Homogenisierung und Einhaltung der Bauteilkennwerte bezüglich des E-Moduls, der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung gegenübergestellt. Die detaillierten Resultate sind dem Anhang zu entnehmen. Die Standardparameter F4, F5 und F7 zeigten in dieser Versuchsreihe bereits optimierte Kennwerte in Bezug auf Homogenität der mechanischen Bauteileigenschaften und konnten folglich nicht weiter optimiert werden. Ein Parametersatz galt als validiert, wenn die mechanischen Kennwerte unabhängig von der Orientierung im Bauraum erreicht oder übertroffen wurden. Eine Optimierung des Parametersatzes wurde erzielt, wenn diese Kennwerte sowohl möglichst nahe beisammen als auch oberhalb der Herstellerangaben lagen. Die Ergebnisse sind nach den drei mechanischen Eigenschaften geordnet, beginnend mit dem E-Modul. Abbildung 6-41 a) und b) zeigt die jeweils erreichten E-Module für jede Fokusstufe von F0–F10 differenziert nach der Prüfkörperorientierung in x/y- bzw. z-Richtung.

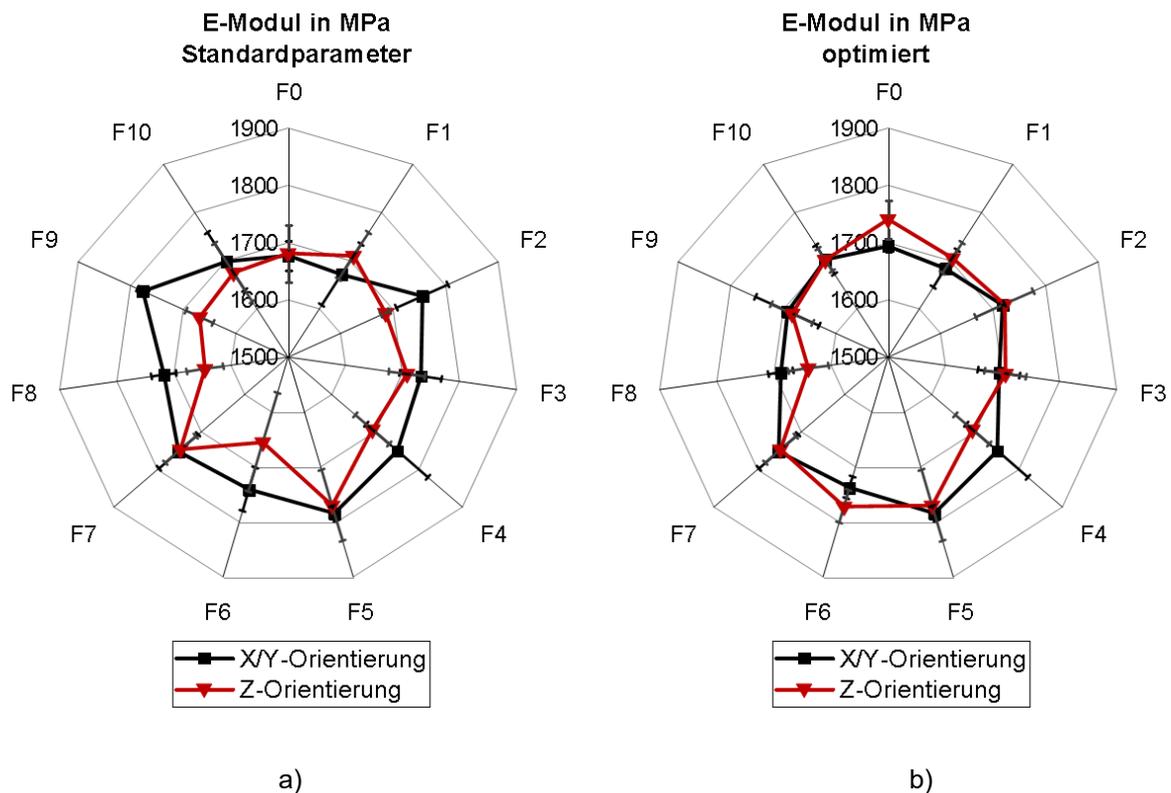


Abbildung 6-41: E-Modul – Vergleich der Standardparameter a) mit den optimierten Parametern b) für jede Fokusstufe

Es zeigte sich, dass der Standardparameter bezüglich des minimalen E-Moduls aus dem Datenblatt von 1550 MPa für alle Fokusstufen und Orientierungen validiert werden konnte. Der geringste erreichte Wert belief sich auf 1645,44 MPa bei F8, während der höchste gemessene Wert mit 1784,53 MPa bei F5 erreicht wurde. Ebenfalls war zu erkennen, dass die Standardparameter eine einfache Differenzierung zwischen den Orientierungen mit Ausnahme weniger Fokusstufen zulassen. Die prozentuale Abweichung des E-Moduls zwischen den Orientierungen lag bei F2, F6, F8 und F9 oberhalb von 4 %, was als Anisotropie gedeutet werden kann. Auffällig war, dass das E-Modul innerhalb von Fokusstufe 6 in z-Richtung abfiel, obwohl der optimierte Parameter mit einer annähernd identischen Energiedichte von 0,352 J/mm³ arbeitet. Begründet ist dies in der unterschiedlichen Anzahl n der Scanvektoren in x-Richtung im Validierungsversuch, die bei den Versuchen zum Standardparameter dreimal 3 und zweimal 4 betrug.

Die optimierten Parameter aus Abbildung 6-41 b) zeigten in der Gesamtheit ein isotropes Verhalten. Der minimale Wert von 1639,67 MPa wurde sowohl bei den Standardparametern als auch innerhalb der Optimierung bei Fokusstufe 8 erreicht. Der höchste Wert wurde von Standardparameter F5 erzielt. Die Spannweiten der prozentualen Abweichungen des E-Moduls beliefen sich auf 0,23 % bis 3,28 %. Die maximalen E-Module wurden in verschiedenen Fokusstufen wechselweise sowohl von liegenden als auch von stehenden Zugproben erreicht.

Ein weiterer Kennwert der mechanischen Eigenschaften ist die Zugfestigkeit σ_M . Diese beschreibt den maximalen Wert, mit der die Probe unter Zug belastet werden kann. Aus Abbildung 6-42 a) und b) ist aufgrund der stetigen Unterschreitung der z-Proben ersichtlich,

dass die Werte eine Anisotropie aufwiesen. Die Zugfestigkeiten der Standardparameter wurden dennoch mit Ausnahme von F10 vollständig validiert, da die restlichen Fokusstufen die gemäß Datenblatt geforderten 45 MPa \pm 3 MPa erreichten.

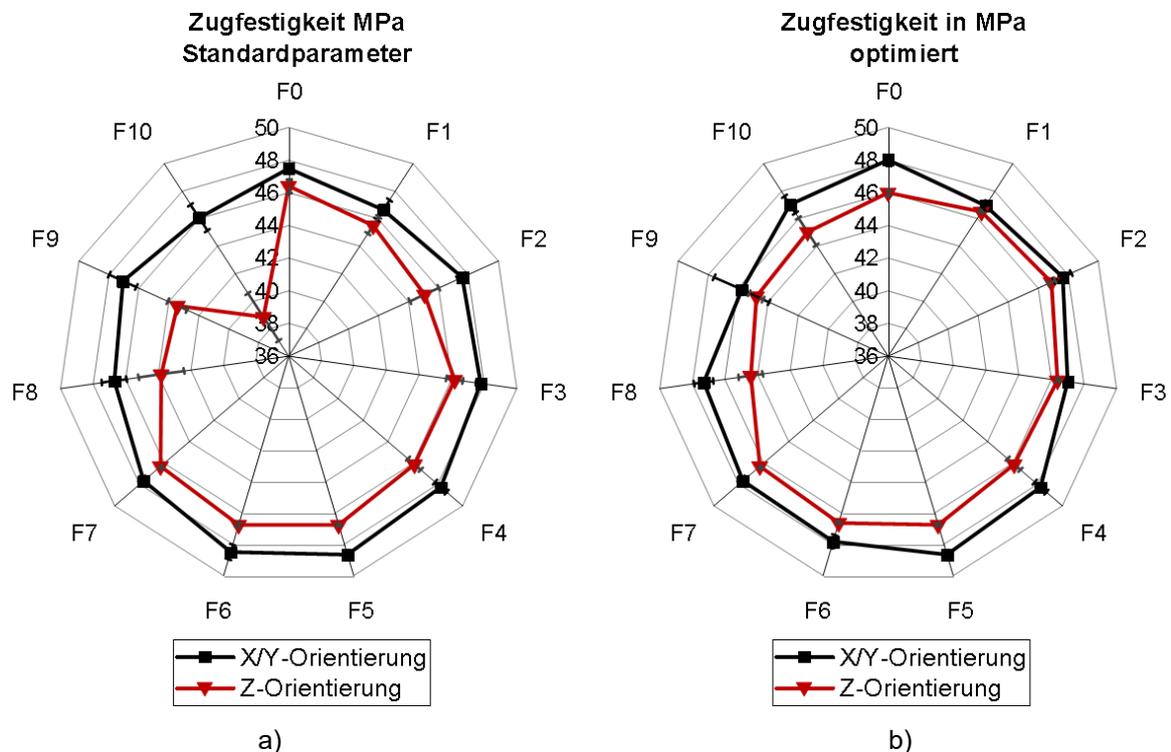


Abbildung 6-42: Zugfestigkeit – Vergleich der Standardparameter a) mit den optimierten Parametern b) für jede Fokusstufe

Es war eine orientierungsabhängige Anisotropie sowohl bei den Standard- als auch bei den optimierten Parametern zu erkennen. Die Optimierung ermöglichte jedoch hinsichtlich der Fokusstufen F1 bis F3 so nahe beieinanderliegende Werte, dass diese dennoch als isotrop angesehen werden können. Die Abweichungen betragen diesbezüglich maximal 1,54 % (relativ) bei F2 und minimal 0,97 % (relativ) bei F1. Weiterführend lagen mit Ausnahme der Fokusstufe 8 alle Abweichungen der optimierten Parameter unterhalb von 5 % und diesbezüglich kann somit gemäß [109] ein nahezu isotropes Verhalten angenommen werden, zumal die Kennwerte des Datenblattes (45 \pm 3 MPa) signifikant überschritten wurden.

Aus dem Stand der Technik ergibt sich, dass die Bruchdehnung lasergesinterter Bauteile als sensibelste mechanische Messgröße gegenüber der Orientierung angesehen werden kann. Durchschnittliche Abweichungen von 29 % als Resultat des Probenaufbaus wurden unter Nichtbeachtung des Anlagensystems und der vorherrschenden Materialbeschaffenheit des PA 12 bereits beschrieben [109]. Im Datenblatt des PA 2200 Balance 1.0 wird eine Bruchdehnung in x/y-Richtung von 18 % und in z-Richtung von 4 % angegeben [240]. Diese Angaben entsprechen einem relativen Unterschied von 72 %. Abbildung 6-43 a) und b) zeigt nach vorangegangener Systematik die Ergebnisse der Bruchdehnung jeder betrachteten Fokusstufe.

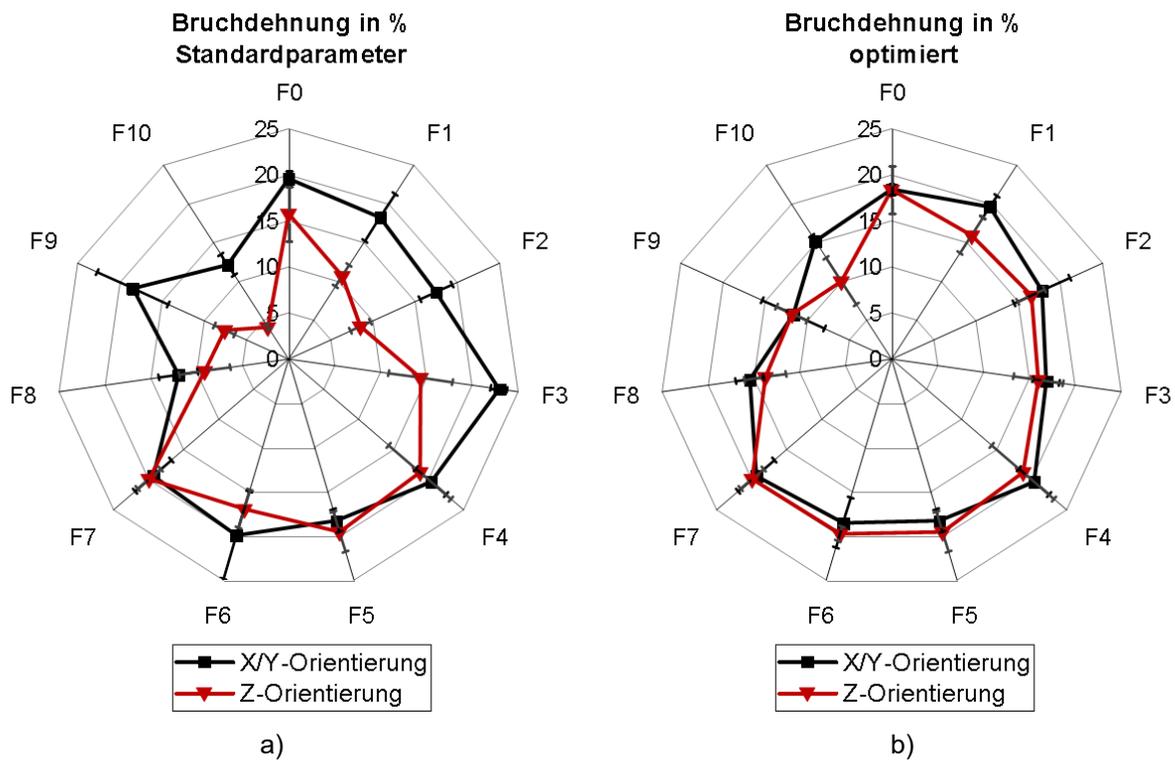


Abbildung 6-43: Bruchdehnung – Vergleich der Standardparameter a) mit den optimierten Parametern b) für jede Fokusstufe

Es war ersichtlich, dass die Bruchdehnungen der Standardparameter für die Fokusstufen 8 bis 10 einen deutlichen Einbruch der Duktilität erfuhren und demnach als nicht ausreichend betrachtet werden können. Weiterführend zeigte sich für viele der Fokusstufen ein stark ausgeprägtes anisotropes Verhalten, wie es gemäß dem Stand der Technik erwartet wird. Demgegenüber erzielten die optimierten Parameter bis einschließlich F7 nahezu isotrope Bruchdehnungen, die in ihren nominellen Werten signifikant über jene des Stands der Technik hinausgingen. Eine Ausnahme bildete hierbei Fokusstufe 1, die eine relative Abweichung der Bruchdehnung von 18,67 % aufwies.

Auch innerhalb der optimierten Parameter zeigte der signifikante Abfall der Duktilität ab Fokusstufe 8 in beiden betrachteten Orientierungen unabhängig von der Thematik der Hatchlinienkonformität, dass ein nicht ausreichender Energieeintrag vorlag. Der optimierte Parameter von F0 erzielte mit einer Bruchdehnung in x/y-Richtung von 18,43 % (+/- 0,58 %) und 18,37 % (+/- 2,57 %) eine relative Abweichung von lediglich 0,3 %. Eine ähnliche Größenordnung resultierte bei Fokusstufe 7. Die relative Abweichung betrug 2,75 % und wurde durch die Bruchdehnung in x/y-Richtung von 19,34 % und in z-Richtung von 19,89 % bestimmt. Vergleichbare relative Abweichungen konnten mit kommerziellen Anlagen bislang lediglich unter Verwendung einer Doppelbelichtung erreicht werden, jedoch mit geringeren Werten der Bruchdehnung um 17 % [109, 241].

Nachfolgend werden die für die Versuchsanlage ermittelten Parameter in Tabelle 6-4 aufgeführt. Konstante Parameter bei den Konturen waren 1500 mm/s Scangeschwindigkeit und eine nachgelagerte Konturerzeugung nach der Füllung des Querschnittes. Die Füllung wurde dagegen kontinuierlich mit 4000 mm/s Scangeschwindigkeit sowie einer x/y-alternierenden Scanstrategie mit aktivem Skywriting realisiert. Diese Parameter wurden

hinsichtlich der isotropen Bauteileigenschaften und der Prozessgeschwindigkeit optimiert und zeigen ein breites Spektrum an Fokusstufenvariationen auf.

Tabelle 6-4: Finale Parameter der Versuchsanlage für jede Fokusstufe

Parameter	Kontur 1	Kontur 2			Füllung				Energie-dichte
	PL	PL	K_{KOM} P	F(X)	Abstand	PL	F_{KOMP}	F(X)	J/mm ³
UDE_F0_Opt	16				0,22	38,60	0,22	0	0,44
UDE_F1_Opt	16				0,30	47,90	0,33	1	0,40
UDE_F2_Opt	16				0,29	51,30	0,37	2	0,44
UDE_F3_Opt	16	16	0,32	2	0,28	50,80	0,53	3	0,45
UDE_F4_Opt	20,7	37	0,32	3	0,31	50,50	0,57	4	0,41
UDE_F5_Opt	20,7	37	0,32	4	0,56	78,40	0,70	5	0,35
UDE_F6_Opt	20,7	37	0,32	5	0,63	88,80	0,61	6	0,35
UDE_F7_Opt	20,7	37	0,32	5	0,80	108,0	0,71	7	0,34
UDE_F8_Opt	20,7	37	0,32	5	0,72	97,30	0,74	8	0,34
UDE_F9_Opt	20,7	37	0,32	5	0,85	109,1	0,83	9	0,32
UDE_F10_Opt	20,7	37	0,32	5	0,82	109,9	0,94	10	0,34

Die Ergebnisse der Zugproben zeigten, dass eine Fertigung von mechanisch belastbaren Bauteilen unter Anwendung vergrößerter Laserspotdurchmesser erfolgen kann. Hierzu muss ab einer bestimmten Spotgröße die Anbindung der geometriebestimmenden Kontur durch deren erneute Belichtung mit vergrößertem Spotdurchmesser im inneren des Bauteils wiederholt werden, um die Verbindungsstelle zwischen Kontur und Füllung zu gewährleisten. Ebenfalls muss bei kleinen Bauteilquerschnitten eine Überprüfung der Scanvektoren erfolgen, um eine lückenlose Generierung des Bauteilquerschnittes sicherzustellen. Es zeigte sich die Tendenz, dass nahezu isotrope Eigenschaften der Bauteile sowohl bei geringen als auch bei vergrößerten Spotdurchmessern erreicht werden konnten. Mit kleinen Spotdurchmessern traten sie vorzugsweise bei erhöhten Energiedichten und mit größeren Durchmessern bei geringeren Energiedichten auf. Mit Ausnahme des größten Laserspots konnten alle verwendeten Fokusstufen den Spezifikationen des Materialherstellers entsprechen, wengleich die mechanischen Eigenschaften ab Fokusstufe 8 geringer waren. Die erfolgreiche Validierung bis F7 stellt eine signifikante Weiterentwicklung des Stands der Technik dar. So konnten insgesamt acht Fokusstufen mit einem theoretischen Fokusdurchmesser von 0,78 mm bis 1,6 mm erfolgreich für das PBF-LB/P qualifiziert werden.

6.4 Diskussion und Einordnung der Ergebnisse

Aufgrund der vielen Einflussfaktoren, die bei der Qualifizierung einer Versuchsanlage auftreten, bedarf es einer Diskussion der Ergebnisse, um deren Übertragbarkeit bewerten zu können. Aus der Literatur ist bekannt, dass Anlagensysteme inhärente Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile haben können [41]. Dabei gilt wohl die Bruchdehnung als sensibelste Kenngröße, wenn es um die Anisotropie lasergesinterter Bauteile geht [4]. Die Charakterisierung der Versuchsanlage erfolgte systematisch anhand der anlagenspezifischen Rahmenbedingungen und des innovativen Energieeintrages mittels

vergrößerten Spotdurchmessers. Innerhalb der Versuchsreihen wurde auftretenden Schwachstellen im laufenden Betrieb entgegengewirkt. Dies führte teilweise dazu, dass gewonnene Erkenntnisse zur optimierten Prozessführung nicht konsequent umgesetzt, sondern zugunsten eines robusten Prozesses gewählt wurden. Ein Beispiel hierfür bezieht sich auf die Packungsdichte. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen der im Prozess vorherrschenden Packungsdichte und der Oberflächenrauheit besteht. Bei der Betrachtung der diesbezüglichen Resultate zeigte sich, dass die Packungsdichte mit abgerundeter Rakel nicht die maximalen Werte im Prozess erreichte, jedoch für das verwendete Materialsystem ausreichend hohe Ergebnisse erzielte und zudem eine stabilere Prozessdurchführung erlaubte. Folglich wurde in den Versuchsreihen die abgerundete Rakel verwendet, um möglichen Einflüssen eines Abnutzens der gegenläufig rotierenden Walze entgegenzuwirken.

Ein wesentliches Merkmal der Versuchsanlage ist die Verwendung von zwei Betriebspunkten des Lasers, zwischen denen im Prozess nicht gewechselt werden kann: einem mit geringerer Laserleistung zur Realisierung minimaler Fokusspots und einem mit der für die Optikkomponenten maximal verträglichen Laserleistung. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass der höhere Leistungspunkt zu einem größeren Rohstrahldurchmesser führte und thermische Linseneffekte im AOM hervorrief. Letztere äußerten sich in einer Vergrößerung des minimalen Spotdurchmessers, einer fokusstufenabhängigen Nullpunktverschiebung des Spots oder einer Degradation des Laserstrahls. Diese Anomalien können für verschiedene Effekte im Prozess verantwortlich sein. Es zeigten sich zudem Leistungsschwankungen des Lasers, die den erzeugten Versatz zwischen kleinen und großen Fokusstufen weiter verstärkten und zu Rillenbildung an zwei der vier Seitenflächen eines Quaders führten. Diese Fehlbildungen traten jedoch erst bei den Versuchen zur dreidimensionalen Bauteilgenerierung hervor, da erst hierbei Bauteile über mehrere Schichten mit einer Spotaufweitung erzeugt wurden (vgl. Kapitel 6.2.4). Dabei war die Verwendung von kleinen Spotdurchmessern für die Einhaltung der Bauteilgeometrie und Kantenschärfe unerlässlich und erschwerte die Anbindung zur angestrebten Füllbelichtung mit großem Laserspot. Über diverse Ansätze der Strahlkompensation und Hülle-Kern-Scanstrategie konnten keine ausreichenden Bauteildichten über die gesamte Fokusstufenvariation bestimmt werden. Schlussendlich konnte eine Belichtungsstrategie mit doppelter Kontur und einer Strahlkompensation der Füllung erfolgreich ermittelt werden. Diese führte jedoch dazu, dass Bereiche im Querschnitt mehrfach belichtet wurden und andere die Schwelle zur homogenen Schmelze nur gering überschritten.

In diesem Zusammenhang sei noch einmal auf die signifikante Einflussnahme der Hatchlinienkonformität hingewiesen, deren Auswirkung sich bei kleinen Querschnitten und großen Spotdurchmessern verstärkt. Die Versuchsreihe in Kapitel 6.3.1 zur Verifikation der Standardparameter wurde ohne Überprüfung der Hatchlinienkonformität durchgeführt. Folglich kann ein fehlender oder ungünstig positionierter Scanvektor einen überproportional großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile haben. Dies gilt es besonders bei den stehenden z-Zugproben zu berücksichtigen.

Obwohl bei den Fokusstufen F4, F5 und F7 identische Parameter bei den Validierungs- und Optimierungsversuchen verwendet wurden, ergaben sich Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften bei der Optimierung. Dies resultierte daraus, dass ausschließlich innerhalb der Optimierung die Hatchlinienkonformität berücksichtigt wurde. Beispielhaft zeigt Abbildung 6-44 die Scanlinien stehender Zugproben im Sollbruchbereich von Fokusstufe 7 in x-Scanrichtung.

Es ist zu erkennen, dass beide Versuchsreihen eine unterschiedliche Anzahl von Hatchlinien aufwiesen.

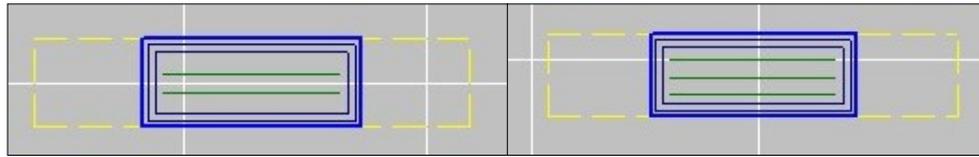


Abbildung 6-44: Fokusstufe 7 im Validierungsversuch (l.) und in der Optimierung (r.)

Der Querschnitt der stehenden Zugprobe hatte die Maße 4 mm x 10 mm und erlaubte bei Fokusstufe 7 maximal drei Hatchlinien in x-Scanrichtung. Zu erkennen ist jedoch, dass bei der Verwendung des Standardparameters innerhalb der Validierung die Prozesssoftware beim x-Scan lediglich zwei Hatchlinien eingefügt hat, während bei den Optimierungsversuchen eine dritte vorhanden war. Somit erfuhr jede zweite Schicht einen deutlich geringeren Energieeintrag, was das anisotrope Verhalten innerhalb der Validierung und das isotrope Verhalten bei der Optimierung ungeachtet identischer Parameter erklärt.

Bei einer genaueren Betrachtung zeigte sich, dass sowohl der kleinste Fokusspot F0 mit 0,78 mm als auch einer der größten Fokusspots F7 von 1,6 mm Durchmesser zu nahezu isotropen Bauteileigenschaften führten. Dieser Umstand schließt die aufgeweitete Fokusstufe als alleinige Ursache aus. Im verwendeten Betriebspunkt 2 betrug der Spotdurchmesser 0,78 mm bei F0. Ausgehend von einem Fokusdurchmesser von 0,4 mm gemäß dem Stand der Technik stellt somit bereits der minimale Fokus eine signifikante Vergrößerung des Laserspots dar. Dies kann in Kombination mit allen bislang bekannten positiven Einflüssen wie Prozessgeschwindigkeit, Abkühlbedingungen und Vermeidung von Kondensat auf dem Laser-Window dazu führen, dass nahezu isotrope Bauteileigenschaften resultieren. Förderlich kann hierbei auch die Tatsache sein, dass durch die höhere Wechselwirkungszeit eine größere Eindringtiefe der Fokusstufen erreicht wird und so derselbe Effekt wie bei einer Doppelbelichtung generiert wird.

Wie in Kapitel 4.3 angedeutet, erlaubt die Verwendung eines größeren Fokusspots ebenfalls eine schnellere Belichtung des Bauteilquerschnittes. Diese Beschleunigung hat direkten Einfluss auf die Prozesszeit und potenziert sich mit der Größe des belichteten Querschnittes. Die Bauprozesse der Zugproben wurden vollständig zeitlich dokumentiert. Dabei löste jeder wiederkehrende Verfahrensschritt einen Trigger aus, was es erlaubte, die einzelnen Verfahrensschritte differenziert zu betrachten. Der Prozess beinhaltete 1948 Schichten und wies somit eine Gesamthöhe von 194,8 mm auf.

Die Analyse der durchgeführten Prozesse zeigte, dass sich die Gesamtzeit gemäß Abbildung 6-45 aus Achsenbewegung, Pulverauftrag, Vorheizen, Belichtung und einer Totzeit zusammensetzt. Es ging hervor, dass unabhängig von der gewählten Spotgröße die Belichtungszeit einen nachweisbaren Einfluss auf die Prozesszeit nahm. Weitere signifikante Prozesszeiten wurden durch den Pulverauftrag und die Achsenbewegung erzeugt, die auch zusammen als Fahrzeit betrachtet werden können. Das Vorheizen ist die benötigte Zeit der Heizstrahler, um die frisch aufgetragene Pulverschicht nach jeder Achsenbewegung auf die Verarbeitungstemperatur kurz unterhalb des Schmelzpunktes zu heben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Auftrags- und die Vorheizzeit teilweise zeitgleich laufen, die

Überschneidungszeit jedoch ausschließlich dem Pulverauftrag zugerechnet wurde. Die Vorheizzeit ist demnach lediglich die Zeit, die den Prozess nach dem Pulverauftrag weiterhin verlangsamt. Während die zuvor genannten Zeiten als prozessinhärent betrachtet werden können, ist die Totzeit eine Besonderheit des Versuchsstands, die auf den Prototypenstatus zurückzuführen ist.

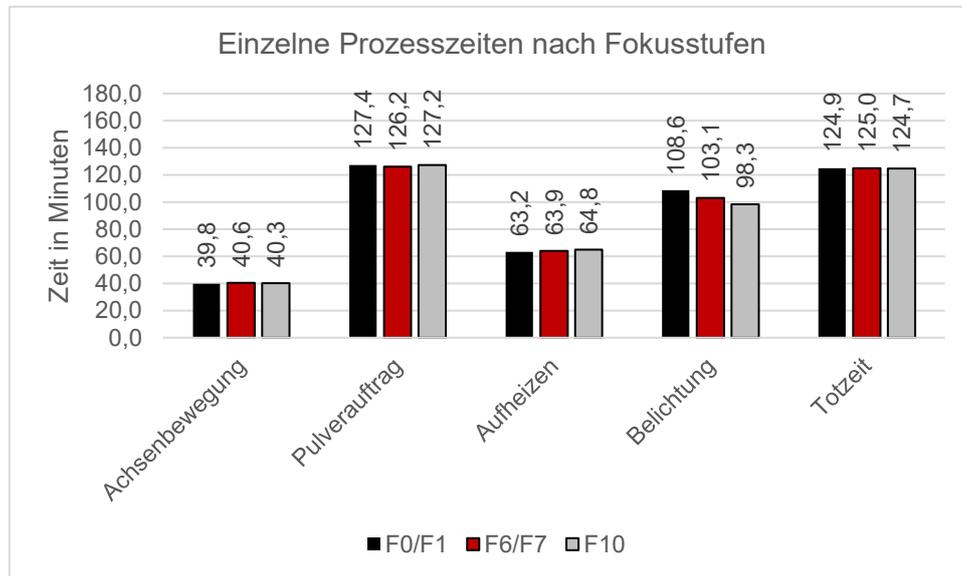


Abbildung 6-45: Dokumentierte Prozesszeiten repräsentativer Optimierungsprozesse

Alle Zeiten kumuliert ergaben eine Prozesszeit von 455 min (7 h 35 min) bei Fokusstufe F10, von 459 min (7 h 39 min) bei F6/F7 sowie von 463 min (7 h 43 min) bei F0/F1. Im Durchschnitt resultierte für die Prozesszeiten folgende prozentuale Verteilung: 8,75 % entfielen auf die Achsenbewegung, 27,63 % auf den Pulverauftrag, 13,93 % auf das Aufheizen, 22,5 % auf die Belichtung der Bauteilquerschnitte und 27,19 % auf Totzeit des Anlagensystems. Derselbe Baujob wurde in die EOS Formiga P100 geladen und ergab eine errechnete Zeit von 1024 min (17 h 4 min). Dies ergibt eine Zeitersparnis gegenüber der Vergleichsanlage um bis zu 55,6 %. Es kann festgehalten werden, dass die Belichtungszeit mit 22,5 % lediglich einen geringen Anteil an der kumulierten Prozesszeit besaß und der Unterschied zwischen großen und kleinen Fokusstufen nicht so hoch wie erwartet ausfiel. Dieses Resultat wird nachfolgend genauer erörtert.

In Abbildung 6-46 sind die Belichtungszeiten jeder Schicht bei F0/F1 sowie bei der höchsten validierten Fokusstufe F6/F7 gegenübergestellt. Die schwarze Linie kennzeichnet dabei den Prozess, in dem Zugproben mit F0 sowie F1 gefertigt wurden. Im selben Diagramm sind die Daten des Bauprozesses mit F6/F7 enthalten (rote Linie). Die Anordnung der Bauteile war in beiden Prozessen identisch und erlaubte die direkte Gegenüberstellung der Schichtzeiten. Der Verlauf zeigt die Schichtzeiten des Bauprozesses von insgesamt acht aufeinanderliegenden Riegen von x/y-Zugproben und darauffolgend ab Schichtnummer 400 die stehenden Zugproben. Eine Riege enthielt dabei vier in x/y-Richtung liegende Zugproben einer Fokusstufe. Es ist zu erkennen, dass die Belichtungszeit der Riegen bestehend aus liegenden Zugproben als ein Bereich schnell steigender Belichtungszeiten aufgeführt ist, dessen Schichtzeit signifikant von der verwendeten Fokusstufe abhängt.

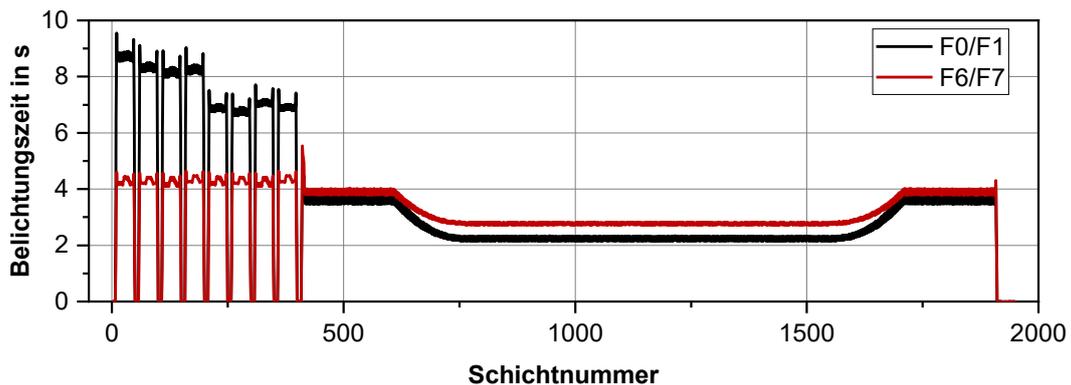


Abbildung 6-46: Aufgezeichnete Belichtungszeiten der Optimierungen bei F0/F1 und F6/F7

Die durchschnittliche Belichtungszeit der Fokusstufe F0 betrug bei den liegenden Zugproben 8,7 s. Bereits bei F1 wurde eine schnellere Belichtungszeit von 6,8 s verzeichnet, was einer Verringerung von 21,8 % entspricht. Die schnellste Belichtung der liegenden Zugproben wurde mit F7 erreicht, die durchschnittlich 4,2 s für eine Schichtgenerierung benötigte und im Ergebnis um 51,7 % schneller als die Referenz war. Die Fokusstufe F6 erzielte dieselben Belichtungszeiten wie F7, was eine Folge der ähnlichen Anzahl an Scanvektoren ist. Eine Auffälligkeit ist, dass dieser Geschwindigkeitsvorteil bei den stehenden Zugproben nicht vorlag. Begründet ist dies in den kleinen Bauteilquerschnitten und der bei großen Fokusstufen benötigten Doppelbelichtung der Kontur. Letztere wurde zur Wahrung der Bauteilqualität mit verringerter Spotgeschwindigkeit gefahren, was den Vorteil der geringeren Anzahl von Scanlinien aufhob. Zudem muss bei den z-Zugproben berücksichtigt werden, dass eine Differenzierung zwischen den beiden im Bauprozess vorhandenen Fokusstufen nicht möglich war. Dies resultiert daraus, dass im Bauraum ausreichend Platz war, um alle Proben beider Fokusstufen mit ausreichendem Abstand zueinander zu fertigen. Die durchschnittlichen Belichtungszeiten der z-Zugproben beliefen sich für den Baujob F0/F1 auf 3,68 s und für den Baujob F6/F7 auf 3,9 s.

Die Daten lassen eine Betrachtung der potenziellen Produktivität unter Berücksichtigung der Fokusstufenanpassung für die jeweiligen Querschnitte zu. Abbildung 6-47 verdeutlicht die Belichtungszeiten der liegenden Zugproben, die mit Fokusstufe 7 gefertigt wurden, und jene der stehenden Zugproben bei F0/F1.

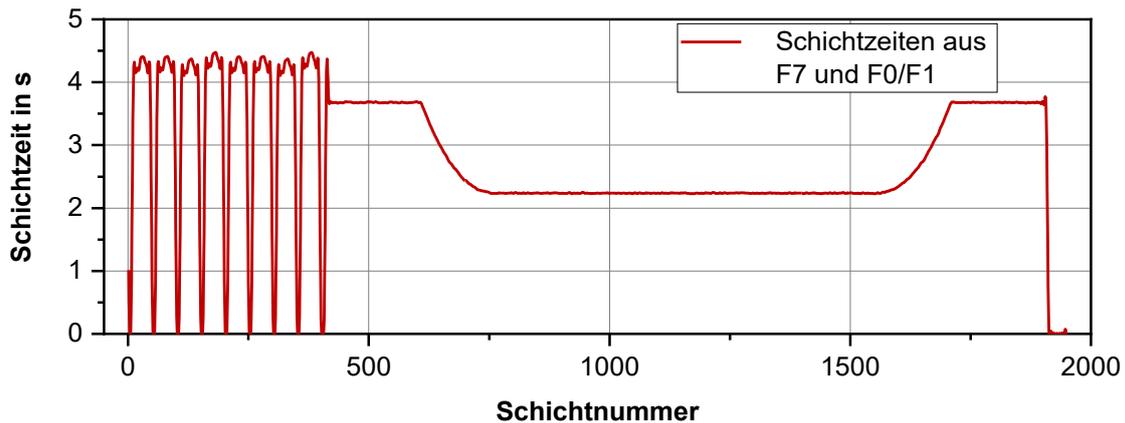


Abbildung 6-47: Theoretische Betrachtung der Bauzeit bei variabler Fokusanpassung am Beispiel von F6/F7 für x/y- und von F0/F1 für z-Zugproben

Es zeigt sich, dass die Belichtungszeit durch die Anpassung der Fokusstufe an den jeweiligen Querschnitt auf insgesamt 90,7 min verringert werden kann. Im Vergleich zu den 108,6 min mit Fokusstufe F0/F1 (vgl. Abbildung 6-45) kann die Belichtungszeit so um weitere 16,5 % verringert werden.

Die gemessenen Belichtungszeiten verdeutlichen, dass signifikante Verbesserungspotenziale durch die Optimierung der Scanstrategie ausgeschöpft werden können. Die differenzierte Betrachtung der potenziellen Prozessbeschleunigung zeigt die Notwendigkeit, die Auswahl der Fokusstufe nicht lediglich auf einzelne Bauteile, sondern auf den spezifischen Querschnitt der Komponenten in jeder Schicht zu beziehen.

Welche Prozesszeiten bei einer Weiterentwicklung der Versuchsanlage erreicht werden können, soll die nachfolgende Diskussion der Optimierungspotenziale aufzeigen. Am auffälligsten sind die hohen Totzeiten der Anlage, die durch verschiedene Aktionen in immer wiederkehrender Reihenfolge vorkamen. Jede Auslösung der Triggerpunkte verursachte ein Delay von annähernd 0,5 s. Zudem benötigte die notwendige Handshake-Logik zwischen der Scannersteuerung und der Versuchsanlage weitere 0,5 s. Eine zusätzliche Totzeit von 2,8 s wurde vor dem Einsetzen der Belichtung gemessen und hängt vermutlich mit dem nicht optimierten Transfer der Schichtdaten an die Scannerkarte zusammen. Diese Datenübertragung sollte im Regelfall nicht länger als 0,5 s dauern, wodurch jede Schicht um weitere 2,3 s schneller generiert werden kann. Weitere Ansätze lassen sich in der Kinematik der Anlage identifizieren. Die Achsenbewegung des Pulvervorrates und des Bauraumes wurde sequenziell realisiert und sollte zukünftig parallel stattfinden. Diese Optimierung würde pro Schicht bis zu 0,8 s einsparen. Der Pulverauftrag verlor im Versuchsbetrieb bei jeder Schicht durch ein sanftes Anfahren der Traverse jeweils 1 s. Schlussendlich sollte die Belichtung der Querschnitte durch eine geeignete Spotgröße beschleunigt werden. Der in dieser Arbeit erfolgreich angewendete Spotdurchmesser beträgt 1,6 mm bei F7. Bei einer theoretischen Anwendung der Fokusstufenanpassung auf den Vergleichsbaujob ergibt sich eine Prozessbeschleunigung um 0,7 s pro Schicht. Diese Berechnung berücksichtigt sowohl die Leerschichten als auch den hohen Anteil an kleinen Querschnitten der stehenden Zugproben.

Zusammenfassend kann durch konsequente Weiterentwicklung und Anwendung der Fokusstufenvariation die durchschnittliche Schichtzeit des Bauprozesses um 5,8 s (kumuliert

188 min) reduziert werden. Damit würde der Bauprozess auf der Versuchsanlage nicht mehr 464 min (7 h 44 min), sondern 276 min (4 h 36 min) dauern. Im Vergleich zur Formiga P100, die für den identischen Baujob eine errechnete Zeit von 1024 min (17 h 4 min) benötigt, würde somit eine Zeitersparnis von 73 % erzielt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden innovative Ansätze der Entwicklung einer PBF-LB/P-Anlage umgesetzt, um die resultierenden Bauteileigenschaften zu homogenisieren und die noch bestehenden Potenziale des Prozesses aufzuzeigen. Die schichtweise Herstellung von Bauteilen durch das vollautomatisierte Aneinanderfügen von Materialvolumina ermöglicht die Herstellung komplexer Bauteile aus bestehenden CAD-Datensätzen. Die Entwicklung der Anlagensysteme zeigt immer produktivere Verfahren auf, die zu deutlich höheren Investitionskosten sowie einer Abhängigkeit von proprietären Materialsystemen führen. Gleichzeitig verändern sich die Anwendungsfelder in Richtung Serienproduktion, was besondere Anforderungen an Prozessgeschwindigkeit, Homogenität und Reproduzierbarkeit der Bauteile mit definierten Eigenschaften stellt. Aktuell sind jedoch nicht reproduzierbare und anisotrope Bauteileigenschaften ein zwangsläufig akzeptierter Stand der Technik, weshalb die Anforderungen bislang nicht erfüllt werden können, was ein Hemmnis für den wirtschaftlich erfolgreichen Einsatz der Technologie darstellt.

Zur Überwindung der genannten Hemmnisse kann die Optimierung der Anlagentechnik einen wesentlichen Beitrag leisten. Die vorliegende Arbeit befasste sich demnach mit den anlagentechnischen Innovationen und Verbesserungen, um deren Auswirkungen auf die Bauteile zu analysieren. Basierend auf dem Stand der Technik kommerzieller Anlagen wurden bekannte Schwachstellen innoviert und bestehende Vorteile übernommen. Als Ergebnis wurde ein hochflexibles, auf Produktivitätssteigerung ausgelegtes Anlagensystem mit einem differenziert regulierbaren Temperaturmanagement und einem innovativen Energieeintrag anhand vergrößerter Laserspots entwickelt und in Betrieb genommen.

Aufeinander aufbauend und mit steigender Komplexität wurden die Versuchsreihen bis zur Realisierung von dreidimensionalen Baukörpern durchgeführt. Die anfänglichen Anlagenparameter mussten ohne vorhandene Datenbasis qualifiziert werden, bevor die Belichtung der Bauteilquerschnitte mit unterschiedlichen Fokusstufen erfolgen konnte. Das Ergebnis war eine schnell regelnde Temperaturführung, die einen maximalen Temperaturgradienten von 3,45 K auf der Bauraumoberfläche einhalten kann (vgl. Abbildung 4-6). Damit können Bauteile näher an den Wänden des Bauraumes positioniert werden, ohne einen erhöhten Verzug oder einen Prozessabbruch zu riskieren.

Diese Arbeit zeigte eine generische Vorgehensweise auf, wie Anlagenparameter bei neuen Optiksystemen qualifiziert werden können. Die Probekörper zur Betrachtung der Einzelspuren sowie der variierenden Scanlinienabstände erlaubten die Auswertung und Interpretation unbekannter Fokusdurchmesser zur Qualifizierung geeigneter Belichtungsparameter. Die Analyse der Einzelspuren ergab, dass eine höhere Eindringtiefe bei aufgeweiteten Fokusstufen erreicht werden kann, was als direkte Folge einer höheren Laserleistung und einer verlängerten Wechselwirkungszeit mit dem Laser verstanden wird. Zudem wurde durch aneinandergereihte Einzelspuren eine empirische Untersuchung zu den realisierbaren Scanlinienabständen und zur Ausbildung einer homogenen Schmelze mit jeder Fokusstufe durchgeführt. Es zeigte sich, dass bereits hierfür auf einen Betriebspunkt des Lasers mit höherer Leistung gewechselt werden muss, um den größeren Laserspotdurchmessern ausreichend Energie zum Aufschmelzen der Kunststoffpartikel zur Verfügung zu stellen. Dieser Betriebspunkt ist eine maximale Ausgangsleistung von 134 W und ermöglicht die Generierung von Probekörpern für elf verschiedene Spotgrößen mit einer Variation des Durchmessers von 0,78 mm bis zu 2,3 mm.

Die nächste Versuchsreihe war durch die erstmalige Generierung dreidimensionaler Bauteile in Form von Dichtequadern mit vergrößerten Laserspotdurchmessern charakterisiert. Dabei zeigten sich mehrere Besonderheiten der Versuchsanlage hinsichtlich des konstanten Energieeintrages und der Fokusstufenvariationen. Eine Herausforderung bestand darin, einen auf dem Baufeld entstehenden Versatz zwischen der Kontur und dem Füllmuster eines Probekörpers zu kompensieren. Dieser Effekt wird vermutlich durch unterschiedlich stark wirkende Linseneffekte der optischen Komponenten erzeugt und konnte nicht gänzlich vermieden werden. Durch aufeinanderfolgende Versuchsreihen konnte jedoch ein zufriedenstellender Kompromiss gefunden werden, der sowohl die Geometrietreue des Bauteils als auch das Fügen der Kontur mit der Füllung ermöglicht. Die Dichtequader zeigten eine hohe Dichte bis zu Fokusstufe 7 und suggerierten bereits, dass bei Spotdurchmessern größer als 1,6 mm eine zu geringe Energiemenge eingebracht wird. Auf Basis dieser Versuchsreihen wurde ein erster Standardparametersatz für jeden einstellbaren Spotdurchmesser erstellt, der in den folgenden Versuchsreihen validiert und optimiert wurde.

Die Validierung sowie die Optimierung der Parameter wurden anhand von Zugproben und der Bestimmung deren mechanischer Kennwerte realisiert. Dabei zeigte sich, dass die Eigenschaften der Bauteile über weite Teile der Fokusstufenvariation als nahezu isotrop angesehen werden können. Besonders im Hinblick auf die Bruchdehnung resultierten signifikante Verbesserungen zum bisherigen Stand der Technik. Dieser Kennwert ist bislang durch seine hohe Sensitivität gegenüber der Bauteilorientierung im Bauraum bekannt und unterliegt gemäß der Literatur einer mittleren prozentualen Abweichung von $> 29\%$. Die in dieser Arbeit erreichten Kennwerte von durchschnittlich $19,6\%$ Bruchdehnung und einer orientierungsbedingten prozentualen Abweichung von $2,73\%$ kennzeichnen damit einen neuen Stand der Wissenschaft und Technik.

Die Diskussion und Einordnung der Ergebnisse offenbarten, dass die isotropen Bauteileigenschaften nicht ausschließlich auf den Laserspotdurchmesser zurückgeführt werden können. Da sie sowohl beim kleinsten betriebspunktabhängigen Durchmesser von $0,7\text{ mm}$ als auch beim größten realisierbaren Durchmesser von $1,6\text{ mm}$ erreicht wurden, wird auf den stark beschleunigten Prozess (über $55,6\%$), die innovativen Ansätze zur Prozessstabilität und die detaillierte Temperaturregulierung verwiesen. Es wurde ersichtlich, dass die Prozessbeschleunigung der Belichtung zwischen den kleinen und den größten betrachteten Fokusstufen nicht so groß ausfiel wie vermutet. Begründet ist dies in der Notwendigkeit der doppelten Konturbelichtung der großen Laserspots, die besonders bei kleinen Querschnittsflächen der stehenden Zugproben eher einen Nachteil für die Prozessgeschwindigkeit darstellt. Da im Bauprozess sowohl stehende als auch liegende Zugproben gefertigt wurden, wurden die unterschiedlichen Belichtungszeiten der Querschnittsfläche in Summe annähernd aufgehoben.

Ein erster Ausblick auf die noch offensichtlich vorhandenen Schwachstellen der Versuchsanlage und deren Behebung zeigt weitere Ansätze zur Optimierung. Als Ergebnis wurde eine Zeitersparnis gegenüber dem Vergleichssystem (kommerzielle EOS Formiga P100) um 73% festgestellt, was die Potenziale der Versuchsanlage bezüglich der Prozessbeschleunigung hervorhebt. Dieser Vorteil könnte mit einer Weiterentwicklung der Software und der Optik auf kommerzielle Anlagensysteme übertragen werden. So kann bei ausreichenden Leistungsreserven des Lasers in einem bestehenden Strahlengang eine definierte Defokussierung des Laserspots zu einer Produktivitätssteigerung und Homogenisierung der Bauteileigenschaften unabhängig von deren Orientierung führen. Eine mögliche Realisierung sieht so aus, dass ab einer bestimmten Querschnittsgröße eine Linse

im Strahlengang positioniert wird, um den Laserspot auf der Pulverbettoberfläche zu vergrößern. So können Anlagensysteme länger verwendet und die Produktivität kann annähernd auf jene einer linienweisen Belichtung angehoben werden. Die Vorteile der geringeren Investitionskosten und einer materialoffenen Plattform bleiben bei dieser Art der Umrüstung weiterhin bestehen.

Zukünftige Untersuchungen können sich mit den Unterschieden der in dieser Arbeit verwendeten Anlagentechnik befassen. Die Einflüsse der homogenen Vorheizung, der definierten Abkühlung und der Prozessbeschleunigung sollten ausführlich und differenziert voneinander analysiert werden, um sie auf kommerzielle Anlagensysteme erfolgreich übertragen zu können. Diese Versuchsreihe würde jedoch auch bedeuten, dass verschiedene Konzepte der kommerziellen Anlagen nachgeahmt und in die bestehende Versuchsanlage integriert werden müssten. Zur Realisierung dieser Untersuchung wäre eine angelegte Versuchsreihe mit unterschiedlichen Heizparametern, Abkühlbedingungen und weiteren Variationen der Prozesszeiten notwendig. Eine statistisch abgesicherte Versuchsplanung könnte dabei helfen, die Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren und der Zielgröße der Bauteilhomogenität zu identifizieren und zu quantifizieren. Dies würde einen Fortschritt bei der Konzeptionierung und Auslegung zukünftiger Anlagensysteme mit sich bringen.

Ein noch großes Potenzial besteht in der Anpassung des Intensitätsprofils des Lasers. Die Energieeinbringung mit Top-Hat oder Linienprofilen könnte beispielsweise den Energieeintrag weiter homogenisieren und Konturbelichtungen obsolet machen. Eine Strahlmodulation hin zu einer linienweisen Belichtung mit variierender Linienbreite hätte Vorteile beim Erzeugen komplexer Bauteilquerschnitte, wie sie häufig beim PBF-LB/P vorzufinden sind. Somit könnten sowohl großflächige als auch detaillierte Querschnitte mit einer hohen Geschwindigkeit und einem homogenen Energieeintrag gefertigt werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] *Maihold, G.; Mühlhöfer, F.:* Instabile Lieferketten gefährden die Versorgungssicherheit, Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP), German Institute, Ausgabe 2021.
- [2] *Aksoy, C.-G.; et al.:* Lieferketten nach Corona: Welche Prioritäten setzen deutsche Unternehmen?, Ifo Institut - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V, 2020, S 1-4.
- [3] *Zimmermann, V.:* Zukunftstechnologien für Deutschland: in vielen Feldern gut aufgestellt, aber auch Bedarf zur Nachjustierung, KfW Research Fokus Volkswirtschaft, Band Nr. 321, März 2021, S. 1-6.
- [4] *Schmid, M.; Keller, P.; Rietzel, D.:* Lasersintern (LS) mit Kunststoffen – Technologie, Prozesse und Werkstoffe. Carl Hanser Verlag, Hanser eLibrary, Hanser, München, 2023.
- [5] *Wohlers, T.; Campbell, I.; Diegel, O. et al.:* Wohlers report 2020 – 3D printing and additive manufacturing state of the industry. Wohlers Associates, Fort Collins, Colo., 2020.
- [6] *Guggenberger, S.:* BMW setzt auf Additive Fertigung, In: Konstruktionspraxis.de, 2024, <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/bmw-setzt-auf-additive-fertigung-a-908293/> [Zugriff am: 01.06.2024].
- [7] *Rieffel, R.:* Wie ICE mit dem 3D-Drucker fit gemacht werden, In: Industry of Things - Mission Manufacturing, 2024, <https://www.industry-of-things.de/ice-1-modernisierung-3d-druck-instandhaltung-a-06fe241d4163732ea75886af7da72551/> [Zugriff am: 01.06.2024].
- [8] *Statista GmbH:* Globales Marktvolumen von 3D-Druck-Verfahren in ausgewählten Branchen im Jahr 2015 und eine Prognose für 2030 (in Milliarden Euro). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/802439/umfrage/globales-marktvolumen-von-3d-druck-verfahren-in-ausgewaehlten-branchen/> (zugegriffen am 06.05.19 13:38).
- [9] *Jabil Inc.:* 3D PRINTING TECHNOLOGY TRENDS – A Survey of Additive Manufacturing, März 2021, <https://www.jabil.com/dam/jcr:82f12c7a-7475-42a0-a64f-0f4a625587d8/jabil-2021-3d-printing-tech-trends-report.pdf/> [Zugriff am 15.05.2023].
- [10] *Bromberger J.; Kelly R:* Additive manufacturing: A long-term game changer for manufacturers, 2017, <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/additive-manufacturing-a-long-term-game-changer-for-manufacturers> [Zugriff am: 05.05.2024].
- [11] Blather, J. E.: Manufacture of Contour Relief Maps, Patent US0473901, 1892.
- [12] Baese C.: Photographic process for the reproduction of plastic objects, Patent US774549A, 1902.
- [13] Maiman, T. H.: Ruby Laser Systems, Patent US3353115, 1961.
- [14] Eckert J. P.; Mauchly J. W.: Electronic numerical integrator and computer, Patent US3120606, 1947.
- [15] Hull, C. W.: Method of and apparatus for production of three dimensional objects by stereolithography, Patent US5236637A, 1984.
- [16] Deckard C. R.: Method and apparatus for producing parts by selective sintering, Patent US4863538A, 1986.

- [17] Meiners, W., Wissenbach, K., Gasser, A.: Selektives Lasersintern bei Schmelztemperatur, Patent DE19649865A, 1996.
- [18] Crump, S. S.: Apparatus and method for creating three-dimensional objects, Patent US5121329A, 1989.
- [19] *Breuninger, J.*: Generative Fertigung mit Kunststoffen – Konzeption und Konstruktion durch selektives Lasersintern. Springer Vieweg, Berlin [u.a.], 2013.
- [20] *Gebhardt, A.*: Additive Fertigungsverfahren – Additive manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. Hanser, 2016.
- [21] *Schmid, M.*: Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen – Technologie Prozesse und Werkstoffe. Hanser, München, 2015.
- [22] *Deutsches Institut für Normung*: DIN EN ISO/ASTM 52900, Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie (ISO/ASTM 52900:2021) – = Additive manufacturing - general principles - fundamentals and vocabulary (ISO/ASTM 52900:2021). Deutsches Institut für Normung, Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2022.
- [23] *Pei, E.; Monzón, M.; Bernard, A. (Hrsg.)*: Additive Manufacturing – Developments in Training and Education. Springer International Publishing, Cham, 2019.
- [24] DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einleitung. DIN, Ausgabe September 2003.
- [25] VDI 3405 Blatt 4.1, Additive Fertigungsverfahren - Ergänzungen zu ISO/ASTM DIS 52903-1: Materialextrusion von Kunststoffbauteilen; Charakterisierung des Filaments, Ausgabe 2019.
- [26] *Deutsches Institut für Normung*: Entwurf DIN EN ISO/ASTM 52900, Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie (ISO/ASTM 52900:2018) – = Additive manufacturing - general principles - fundamentals and vocabulary (ISO/ASTM 52900:2017-06). Deutsches Institut für Normung, Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
- [27] *Kruth, J.-P.; Leu, M.C.; Nakagawa, T.*: Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. *In: CIRP Annals 47 (1998), Heft 2, S. 525-540.*
[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5).
- [28] *Gibson, I.; Rosen, D.W.; Stucker, B.*: Additive manufacturing technologies – Rapid prototyping to direct digital manufacturing. Springer, New York, 2010.
- [29] *Kai, C.C.; Jacob, G.G.K.; Mei, T.*: Interface between CAD and Rapid Prototyping systems. Part 2: LMI — An improved interface. *In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 13, Iss. 8, pp. 571-576.*
<https://doi.org/10.1007/BF01176301>.
- [30] *King, B.; Rennie, A.; Bennett, G.*: An efficient triangle mesh slicing algorithm for all topologies in additive manufacturing. *In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2020), pp. 1-11.* <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06396-2>.
- [31] *Zeyn, H. (Hrsg.)*: Industrialisierung der Additiven Fertigung – Digitalisierte Prozesskette - von der Entwicklung bis zum einsetzbaren Artikel. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag GmbH; VDE Verlag GmbH, Berlin, 2017.
- [32] *Deutsches Institut für Normung*: DIN EN ISO/ASTM 52915, Spezifikation für ein Dateiformat für Additive Fertigung (AMF) Version 1.2 (ISO/ASTM FDIS 52915:2019) – = Specification for additive manufacturing file format (AMF) version 1.2 (ISO/ASTM FDIS 52915:2019). Deutsches Institut für Normung, Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2020.

- [33] *Wu, T.; Cheung, E.H.M.*: Enhanced STL. *In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 29 (2006), 11-12, S. 1143-1150.
<https://doi.org/10.1007/s00170-005-0001-5>.
- [34] *Danjou, S.; Köhler, P.*: Vorbereitung von CAD-Konstruktionsdaten für den RP-Einsatz – eine Schnittstellenproblematik. *In: Proceedings Rapid.Tech 2008*.
- [35] *Martha, A.; Köhler, P.*: Definierte Erzeugung von Schichtdaten für besondere Anwendungen. *In: Proceedings Rapid.Tech 2013*.
- [36] *Danjou, S.; Köhler, P.*: Ansätze zur RP-gerechten Gestaltung funktionaler Prototypen in parametrischen CAD-Systemen. *In: Proceedings Rapid.Tech 2006*.
- [37] *Gebhardt, A.*: Generative Fertigungsverfahren – Rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing. Hanser, München, 2007.
- [38] *Chua, C.K.; Leong, K.F.; Lim, C.S.*: Rapid prototyping – Principles and applications. World Scientific, New Jersey, 2010.
- [39] *Nezhad, S.; Vatani, M.; Barazandeh, F. et al.*: Determining the optimal build directions in layered manufacturing. *In: WSEAS TRANSACTIONS on APPLIED* 2009, S. 185-194.
- [40] *Zerle, C.*: Magics - Optimierung von STL-Daten für RP und RM Prozesse. *In: Proceedings Rapid.Tech 2006*.
- [41] VDI 3405 Blatt 3.3, Additive Fertigungsverfahren - Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen, Ausgabe 2015.
- [42] *Feldmann, C.; Pumpe, A.*: 3D-Druck - Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit – Entscheidungsunterstützung für Unternehmen, Essentials, Gabler, Wiesbaden, 2016.
- [43] *Moeller, E. (Hrsg.)*: Handbuch Konstruktionswerkstoffe – Auswahl, Eigenschaften, Anwendung. Hanser, München, 2008.
- [44] *Gebhardt, A.*: Rapid Prototyping – Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung. Hanser, München [u.a.], 2000.
- [45] *Wohlers, T.T.; Campbell, I.; Diegel, O. et al.*: Wohlers report 2022 – 3D printing and additive manufacturing global state of the industry. Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado, 2022.
- [46] *Feldmann, C.; Schulz, C.; Fernströning, S.*: Digitale Geschäftsmodell-Innovationen mit 3D-Druck – Erfolgreich entwickeln und umsetzen. Springer Fachmedien Wiesbaden. Springer Gabler, Wiesbaden, 2019.
- [47] *Möhrle, M.*: Gestaltung von Fabrikstrukturen für die additive Fertigung, Technische Universität Hamburg-Harburg; Springer-Verlag GmbH; Technische Universität Hamburg, Dissertation.
- [48] *Richter S., W.S.*: Additive Fertigungsverfahren – Entwicklungsstand, Marktperspektiven für den industriellen Einsatz und IKT-spezifische Herausforderungen bei Forschung und Entwicklung – Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung des Technologieprogramms AUTONOMIK für Industrie 4.0 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 2016.
- [49] *Blackwell, E.; Dhawan, R.; Gambell, T. et al.*: The great re-make: Manufacturing for modern times, 2017, <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-great-remake-manufacturing-for-modern-times> [Zugriff am: 21.06.2020].

- [50] *Wohlers, T.T.*: Wohlers report 2006 – Rapid prototyping & manufacturing state of the industry, annual worldwide progress report. Wohlers Associates, Fort Collins, 2006.
- [51] *Wohlers, T.*: Wohlers report 2009 – State of the industry annual worldwide progress report. Wohlers Associates, Fort Collins, 2009.
- [52] *Wohlers, T.*: Wohlers Report 2015 - 3D printing and additive manufacturing state of the industry, Fort Collins, Col: Wohlers Associates 2015.
- [53] *Wohlers, T.; Campbell, R.I.; Diegel, O. et al.*: Wohlers report 2023 – 3D printing and additive manufacturing : global state of the industry. Wohlers Associates; ASTM International [Fort Collins, Colo.], 2023.
- [54] *Wohlers, T.*: Wohlers Report 2017 - 3D printing and additive manufacturing state of the industry, Fort Collins, Col: Wohlers Associates 2009.
- [55] *Langefeld, B.; Veenker, H.; et ali*: Additive Manufacturing – next generation AMnx – Study - Roland Berger GmbH, 2016.
- [56] *Heinrich, H.*: Systemisches Projektmanagement. CARL HANSER Verlag, München, 2014.
- [57] *McCann, R.; Obeidi, M.A.; Hughes, C. et al.*: In-situ sensing, process monitoring and machine control in Laser Powder Bed Fusion: A review. *In: Additive Manufacturing* 45 (2021), S. 102058. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102058>.
- [58] *Wroe, W.W.; Gladstone, J.; Phillips, T. et al.*: In-situ thermal image correlation with mechanical properties of nylon-12 in SLS. *In: Rapid Prototyping Journal* 22 (2016), Heft 5, S. 794-800. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2015-0158>.
- [59] Chung, M.; Allanic, A.-L.: Sintern unter Verwendung von Thermobild-Rückkopplung, Patent DE102004017769B4, 2004.
- [60] *EOS GmbH*: Systemdatenblatt EOS P 770, <https://www.eos.info/de-de/kunststoff-loesungen/kunststoff-3d-drucker/datenblatt/sds-eos-p-770> [Zugriff am: 27.09.2019].
- [61] *EOS GmbH*: Systemdatenblatt EOS P500, 2017, https://www.eos.info/eos_binaries0/eos/7c9a9587afcb501e/184778c1394f/EOS_System_Data_Sheet_EOS_P_500_DE_.pdf [Zugriff am: 01.02.2018].
- [62] *Lachmayer, R.; Lippert, R.B.; Kaiertle, S. (Hrsg.)*: Additive Serienfertigung – Erfolgsfaktoren und Handlungsfelder für die Anwendung. Springer-Verlag GmbH. Springer Vieweg, Berlin, 2018.
- [63] *Wibbe, C.*: Serienbauteile aus dem 3D-Drucker: BMW Group baut den Einsatz additiver Fertigungsverfahren weiter aus. BMW Group.
- [64] *Human, S.*: Druck an beiden Enden: Wie 3D-gedruckte Ersatzteile eine Druckerei revolutionieren Ausgabe Oktober 2023.
- [65] *Sheppard B.; et ali*: Factory of the Future – Operations Practise, McKinsey & Company, 2014.
- [66] *Gebhardt, A.*: Rapid Manufacturing - eine interdisziplinäre Strategie. *In: RTEjournal* (2006).
- [67] *Josupeit, S.; Lohn, J.; et al.*: Material Properties of Laser Sintered Polyamide 12 as Function of Build Cycles Using Low Refresh Rates. *In: Bourell, D. (Hrsg.): Proceedings of the 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2015)*. 2015. The University of Texas at Austin, 2015, S. 540-549.

- [68] *Drummer, D.; Kühnlein, F.; Rietzel, D. et al.*: Untersuchungen zum Alterungsverhalten von PA12-Kunststoffpulvern. In: Proceedings Rapid.Tech 2010.
- [69] *Menges, G.*: Werkstoffkunde der Kunststoffe, Studienbücher der technischen Wissenschaften, Hanser, München, Wien, 1979.
- [70] *EOS GmbH*: Materialdatenblatt PA2200-Pulver für EOSINT P Ausgabe 2001.
- [71] *Alscher, G.*: Das Verhalten teilkristalliner Thermoplaste beim Lasersintern. Dissertation, Berichte aus der Kunststofftechnik, Shaker, Aachen, 2000.
- [72] *Schmachtenberg, E.*: Die mechanischen Eigenschaften nichtlinear viskoelastischer Werkstoffe, Dissertation, Techn. Hochschule Aachen, 1985.
- [73] *Rietzel, D.*: Werkstoffverhalten und Prozessanalyse beim Laser-Sintern von Thermoplasten, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2011.
- [74] *Lindstrom, A.*: Selective Laser Sintering, Birth of an Industry. The University of Texas at Austin, 2012, <https://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry> [Zugriff am: 21.01.2020].
- [75] *EOS GmbH*: Erfolgsgeschichte einer innovativen Idee: Mit Additiver Fertigung vom Prototyping zur Serienfertigung, https://www.eos.info/ueber_eos/geschichte [Zugriff am: 02.02.2019].
- [76] *HP Inc.*: Technical white paper: HP Multi Jet Fusion technology, 2017, https://www.borgware.de/sites/default/files/News/hp_multi_jet_fusion_technical_white_paper.pdf [Zugriff am: 02.20022].
- [77] *Ederer, I.*: Gestaltungsfreiheit und Schnelligkeit: 3D-Druck von Sandformen und Kernen in der Gießerei – Einführung, Stand der Technik und Anwendungsbeispiele, 2021, https://www.dietermann-guss.de/wp-content/uploads/2022/02/voxeljet_3D-Druck-von-Sandformen-und-Kernen-in-der-Gieserei_print_2021.pdf [Zugriff am: 21.09.2023].
- [78] *Voxeljet AG*: Whitepaper: High Speed Sintern als 3D-Druckprozess, 2021, https://25116785.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/25116785/MARKETING%20-%20Whitepaper/Whitepaper-hss-de.pdf?utm_medium=email&_hsenc=p2ANqtz--sq73CD6qBaxZKdo_lzuknvCXYXaFYU86MpR9t-dOFcmuM9h2bJqkYUmHaojh2NkQHTzcXe-qJAGbWK1kC8PNvQPj7Rw&_hsmi=63358103&utm_content=63358103&utm_source=hs_automation&hsCtaTracking=2a6b109e-70fe-4d1e-a7ab-dddd366c108b%7Cf56ac090-25b5-45e4-a863-be339eaf7776 [Zugriff am: 04.05.2024].
- [79] *3D Systems*: Selektives-Lasersintern-Drucker Thermoplastische Produktionsteile gefertigt mit den ProX® und sPro™ SLS-Druckern, <https://de.3dsystems.com/sites/default/files/2019-06/3d-systems-sls-printers-tech-specs-a4-de-2019-06-25-web.pdf> [Zugriff am: 27.09.2019].
- [80] *Les Imprimantes 3D*: Bildquelle 3D Systems Vanguard, <https://www.lesimprimantes3d.fr/wp-content/uploads/2017/09/3d-systems-vanguard.jpg> [Zugriff am: 21.07.2024].
- [81] *einfach3ddruck.de*: Bildquelle EOS P 390, <https://einfach3ddruck.de/die-geschichte-des-3d-drucks-90er-jahre-aufbruch-ins-ungewisse/> [Zugriff am: 21.07.2024].

- [82] *Li, Y.*: Elements of Optical and Laser Beam Scanning: Modeling of Mirror and Prism Scanning Devices – Appendix C: Scanner-Lens Configurations: Objective, Post-Objective, Pre-Objective Scanning and the Flat Field Scanning Lens. *In: Li, Y. (ed.): Elements of optical and laser beam scanning – Modeling of mirror and prism scanning devices, PM / SPIE no. 331. SPIE Press, Bellingham, Washington, USA, 2021.*
- [83] *Scanlab GmbH*: SCANpedia - Lexikon der SCANLAB GmbH, <https://www.scanlab.de/de/service/glossar/a> [Zugriff am: 02.02.2019].
- [84] *Young, M.*: Optik, Laser, Wellenleiter. Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- [85] *Meschede, D.*: Optik, Licht und Laser, Lehrbuch Physik, Teubner, Wiesbaden, 2005.
- [86] *Demtröder, W.*: Experimentalphysik 3 - Atome, Moleküle und Festkörper, Springer-Lehrbuch Heft 3, Springer, Berlin, 2016.
- [87] *Bliedtner, M.*: Lasermaterialbearbeitung. CARL HANSER Verlag, 2013.
- [88] *Kneubühl, F.K.; Sigrist, M.W.*: Laser, Teubner Studienbücher. Physik, B.G. Teubner, Wiesbaden, 2006.
- [89] *Schmidt, H.; Bausch, W.; Pedrotti, F. et al.*: Optik für Ingenieure. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2005.
- [90] DIN EN ISO 11146-1:2021-11 Laser und Laseranlagen - Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen - Teil 1: Stigmatische und einfach astigmatische Strahlen.
- [91] *Thorlabs Inc.*: Product Raw Data – ZnSe Broadband Precision Window, Uncoated / G-Coating, https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3981 [Zugriff am: 03.02.2019].
- [92] *Bliedtner, J.; Gräfe, G.*: Optiktechnologie – Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele ; mit 104 Tabellen ; [mit Videos und Übungsaufgaben auf DVD]. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., München, 2010.
- [93] *Eichler, J.; Eichler, H.-J.*: Laser. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [94] *Scanlab GmbH*: Handbuch: Installation und Inbetriebnahme RTC®5 PC-Interfacekarte Ausgabe 2014.
- [95] *Keller, B.*: Rapid prototyping – Grundlagen zum selektiven Lasersintern von Polymerpulver, Zugl.: Universität Stuttgart., Dissertation, 1998.
- [96] *Drummer, D.; Drexler, M.; Wudy, K.*: Impact of Heating Rate During Exposure of Laser Molten Parts on the Processing Window of PA12 Powder. *In: Physics Procedia* 56 (2014), S. 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.162>.
- [97] *Greiner, S.*: Bedeutung der geometrieabhängigen Belichtungstemperaturen für das Lasersintern von Kunststoffen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2023.
- [98] *Greiner, S.; Drummer, D.*: Understanding aspect ratio effects in Laser Powder Bed Fusion of polyamide 12 by means of infrared thermal imaging. *In: Procedia CIRP* 111 (2022), S. 253-256. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.060>.
- [99] *EOS GmbH*: FORMIGA P 100 - Schulungshandbuch - Basistraining Ausgabe 2009.
- [100] *EOS GmbH*: Desktop-PSW 3.3 / FORMIGA P 100 - Laser-Sinter System für Kunststoffpulver Ausgabe 2008.

- [101] *Kaddar, W.:* Die generative Fertigung mittels Laser-Sintern - Scanstrategien, Einflüsse und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2010.
- [102] *Ruesenberg, S.; Schmid, H.-J.:* Advanced characterization method of nylon 12 materials for application in laser sinter processing. *In: AIP Conference Proceedings* 1593 (2014), Heft 1, S. 713-718. <https://doi.org/10.1063/1.4873877>.
- [103] *Rüsenberg, S.:* Prozessqualifizierung zur verlässlichen Herstellung von Produkten im Polymer Lasersinterverfahren, Dissertation, Universität Paderborn, 2015.
- [104] *Rüffler, C.; Gürs, K.:* Cutting and welding using a CO2 laser. *In: Optics and Laser Technology*, 1972, S. 265-269.
- [105] *Duley, W.:* CO2 Lasers Effects and Applications – Effects and Applications. Elsevier Science, Oxford, 1976.
- [106] *Duley, W.W.; Mueller, R.E.:* CO2 laser welding of polymers. *In: Polymer Engineering & Science* 32 (1992), Heft 9, S. 582-585. <https://doi.org/10.1002/pen.760320903>.
- [107] *Sun, M.:* Physical modeling of the selective laser sintering process, Dissertation, The University of Texas at Austin, 1991.
- [108] *Nelson, J.C.:* Selective Laser Sintering: A Definition of the Process and an Empirical Sintering Model, Dissertation, The University of Texas at Austin, 1993.
- [109] *Wegner, A.:* Theorie über die Fortführung von Aufschmelzvorgängen als Grundvoraussetzung für eine robuste Prozessführung beim Laser-Sintern von Thermoplasten, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2015.
- [110] *Rietzel, D.; Drexler, M.; Drummer, D.:* Grundlegende Betrachtungen zur Modellierung transienter thermischer Vorgänge beim selektiven Lasersintern von Thermoplasten. *In: Proceedings Rapid.Tech* 2011.
- [111] *Grießbach, S.:* Korrelation zwischen Materialzusammensetzung, Herstellungsbedingungen und Eigenschaftsprofil von lasergesinterten Polyamid-Werkstoffen, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2012.
- [112] *Chalancon, A.; Bourell, D.:* Measured Energy Densities for Polyamide 12 and Comparison of Values Calculated for Laser Sintering. *In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium* 2016, p. 2217–2223.
- [113] *Williams, J.D.; Deckard C.:* Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process. *In: Rapid Prototyping Journal* (1998), Vol. 4 Issue: 2, p. 90–100.
- [114] *Nöken, S.:* Technologie des Selektiven Lasersinterns von Thermoplasten, Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1997.
- [115] *LSS Laser-Sinter-Service GmbH:* Produktdatenblatt: ATC - Advance Temperature Control.
- [116] *Optris GmbH:* Produktdatenblatt Optris CT LT.
- [117] *LSS Laser-Sinter-Service GmbH:* Produktdatenblatt UniHeat V5 + C-Heat plus Ausgabe 2014.
- [118] *LSS Laser-Sinter-Service GmbH:* Produktdatenblatt: XStream BDS Digital.
- [119] *Pham, D.T.; Dimov, S.S.:* Rapid Manufacturing – The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling. Springer, London, 2001.

- [120] Niino, Toshiki and Sato, Kazuki: Effect of Powder Compaction in Plastic Laser Sintering Fabrication. *In: SFFS - Proceeding (2009)*, S. 193-205.
- [121] M. Drexler, D. Drummer, K. Wudy: Einfluss des Pulverauftragsprozesses auf den selektiven Strahlschmelzprozess thermoplastischer Kunststoffe. *In: Proceedings Rapid.Tech 2015*.
- [122] Lohn, J.; Schmid, H.-J.: Aufbau einer Lasersinter-Versuchsanlage und Verarbeitung neuer Materialien am Beispiel von Polyamid 6 und Polyamid 613. *In: Proceedings Rapid.Tech 2017*, S. 312-326.
- [123] Gibson, I.; Shi, D.: Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process. *In: Rapid Prototyping Journal 3 (1997)*, Heft 4, S. 129-136. <https://doi.org/10.1108/13552549710191836>.
- [124] Sauer, A.: Optimierung der Bauteileigenschaften beim Selektiven Lasersintern von Thermoplasten. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2005.
- [125] Tontowi, A.E.; Childs, T.: Density prediction of crystalline polymer sintered parts at various powder bed temperatures. *In: Rapid Prototyping Journal 7 (2001)*, Heft 3, S. 180-184. <https://doi.org/10.1108/13552540110395637>.
- [126] Hardro, P.J.; Wang, J.; Stucker, B.E.: A design of experiment approach to determine the optimal process parameters for rapid prototyping machines. *In: Proceedings of the Joint 5th Inter. Conf. on Automation Technology and Inter. Conf. of Production Research*. National Chiao Tung University Taipei, Taiwan, 1998.
- [127] Reinhardt, T.; Martha, A.; Witt, G. et al.: Preprocess-Optimization for Polypropylene Laser Sintered Parts. *In: Computer-Aided Design and Applications 11 (2013)*, Heft 1, S. 49-61. <https://doi.org/10.1080/16864360.2013.834138>.
- [128] Ho, C.H.: Properties and morphological development of laser sintered polycarbonate and its composites. Dissertation, University of Hong Kong, 2001.
- [129] Childs, T.H.C.; Berzins, M.; Ryder, G.R. et al.: Selective laser sintering of an amorphous polymer—simulations and experiments. *In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 213 (1999)*, Heft 4, S. 333-349. <https://doi.org/10.1243/0954405991516822>.
- [130] XiaoHui, S.; Wei, L.; PingHui, S. et al.: Selective laser sintering of aliphatic-polycarbonate/hydroxyapatite composite scaffolds for medical applications. *In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 81 (2015)*, 1-4, S. 15-25. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7135-x>.
- [131] Zeng, Z.; Deng, X.; Cui, J. et al.: Improvement on Selective Laser Sintering and Post-Processing of Polystyrene. *In: Polymers*, Vol. 11 (2019), Iss. 6. <https://doi.org/10.3390/polym11060956>.
- [132] Shi, Y.; Wang, Y.; Chen, J. et al.: Experimental investigation into the selective laser sintering of high-impact polystyrene. *In: Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 108 (2008), Iss. 1, pp. 535-540. <https://doi.org/10.1002/app.27686>.
- [133] Wang, C.Y.; Dong, Q.; Shen, X.X.: Research on Warpage of Polystyrene in Selective Laser Sintering. *In: Applied Mechanics and Materials 43 (2010)*, S. 578-582. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.43.578>.
- [134] Rechtenwald, T.: Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten – Eine Betrachtung werkstoff- und prozessspezifischer Aspekte am

- Beispiel PEEK. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2011.
- [135] *Hoskins, T.J.; Dearn, K.D.; Kukureka, S.N.*: Mechanical performance of PEEK produced by additive manufacturing. *In: Polymer Testing* 70 (2018), S. 511-519. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.08.008>.
- [136] *Wegner, A.; Witt, G.*: Adjustment of isotropic part properties in laser sintering based on adapted double laser exposure strategies. *In: Optics & Laser Technology* 109 (2019), p. 381–388. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.08.017>.
- [137] *Andreas Wegner; Gerd Witt*: Adjustment of isotropic part properties in laser sintering based on adapted double laser exposure strategies. *In: Optics & Laser Technology* 109 (2019), S. 381-388. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.08.017>.
- [138] VDI 3405 Blatt 3: Additive Fertigungsverfahren - Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen : design rules for part production using laser sintering and laser beam melting - Additive manufacturing processes, rapid manufacturing, Ausgabe 2015.
- [139] VDI 3405 Blatt 1, Additive Fertigungsverfahren - Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen - Güteüberwachung – Additive manufacturing processes - laser sintering of polymer parts - quality control, Ausgabe 2019.
- [140] *Jain, P.K.; Pandey, P.M.; Rao, P.V.M.*: Effect of delay time on part strength in selective laser sintering. *In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 43 (2009), 1-2, S. 117-126. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1682-3>.
- [141] *Monzón, M.; Hernández, P.M.; Benítez, A.N. et al.*: Predictability of Plastic Parts Behaviour Made from Rapid Manufacturing. *In: Tsinghua Science & Technology* 14 (2009), S. 100-107.
- [142] *Wegner, A.; Mielicki, C.; Grimm, T. et al.*: Determination of robust material qualities and processing conditions for laser sintering of polyamide 12. *In: Polymer Engineering & Science* 54 (2013), Heft 7, S. 1540-1554. <https://doi.org/10.1002/pen.23696>.
- [143] *Drummer, D.; Drexler, M.; Wudy, K.*: Density of Laser Molten Polymer Parts as Function of Powder Coating Process during Additive Manufacturing. *In: New Paradigm of Particle Science and Technology Proceedings of The 7th World Congress on Particle Technology* 102 (2015), S. 1908-1917. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.331>.
- [144] *Drexler, M.*: Zum Laserstrahlschweißen von Polyamid 12 - Analyse zeitabhängiger Einflüsse in der Prozessführung, Technisch-wissenschaftlicher Bericht / Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Universität Erlangen-Nürnberg Heft 73,, 2016.
- [145] *Wegner, A.; Witt, G.*: Betrachtung zur Pulvernutzungsdauer beim Laser-Sintern und Einfluss der Prozessführung auf die Entstehung von Ausschussbauteilen. *In: Verein der Ingenieure und Techniker in Thüringen e.V. - VITT (Hrsg.): Rapidtech 2012*, Erfurt, 2012.
- [146] *Kühnlein, F.; Drummer, D.; Wudy, K. et al.*: Alterungsmechanismen von Kunststoffpulvern bei der Verarbeitung und deren Einfluss auf prozessrelevante Materialeigenschaften. *In: Drummer, D. (Hrsg.): Industriekolloquium des Sonderforschungsbereichs 814 - Additive Fertigung*. Erlangen, 2012, S. 49-66.
- [147] *Kwon, D.; Park, E.; Ha, S. et al.*: Effect of humidity changes on dimensional stability of 3D printed parts by selective laser sintering. *In: International Journal of Precision*

- Engineering and Manufacturing 18 (2017), Heft 9, S. 1275-1280.
<https://doi.org/10.1007/s12541-017-0150-0>.
- [148] *Pham, D.T.; Dotchev, K.D.; Yusoff, W.A.Y.*: Deterioration of polyamide powder properties in the laser sintering process. *In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 222 (2008), Heft 11, S. 2163-2176. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES839>.
- [149] *Hejmady, P.; van Breemen, L.C.A.; Hermida-Merino, D. et al.*: Laser sintering of PA12 particles studied by in-situ optical, thermal and X-ray characterization. *In: Additive Manufacturing* 52 (2022), S. 102624. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102624>.
- [150] *Harmann, W.; Hausotte, T.; Drummer, D. et al.*: Anforderungen und Randbedingungen für den Einsatz optischer Messsysteme zur In-Line-Prüfung additiv gefertigter Bauteile. *In: Verein der Ingenieure und Techniker in Thüringen e.V. - VITT (Hrsg.): Rapidtech 2012, Erfurt, 2012*.
- [151] *Wegner, A.*: Thermographie zur Temperaturmessung beim Laser-Sintern – ein Beitrag zur Qualitätssicherung Ausgabe 2011.
- [152] *Goodridge, R.; Tuck, C.; Hague, R.*: Laser sintering of polyamides and other polymers Ausgabe 2011.
- [153] *Wegner, A.; Witt, G.*: Untersuchung optimaler Prozessparameterbereiche für die Verarbeitung kommerzieller und experimenteller Materialien beim Laser-Sintern – Rapid.Tech - Trade fair and user's conference for Rapid Technology: Tagungsband 2015. *In:*
- [154] *Kellner, I.N.*: Innovative Materialsysteme für den 3D-Druck. *In: münchener kolloquium (Hrsg.): Rapid Manufacturing - Seminarberichte – Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren, 2010*.
- [155] *n.n.*: Ergebnisbericht: Ressourceneffizientes und reproduzierbares Hochleistungs-Laser-Sintern zur Herstellung von Kunststoffbauteilen HiPer-LS Ausgabe September 2018.
- [156] *Schlicht, S.; Greiner, S.; Drummer, D.*: Low Temperature Powder Bed Fusion of Polymers by Means of Fractal Quasi-Simultaneous Exposure Strategies. *In: Polymers, Vol. 14 (2022), Iss. 7*. <https://doi.org/10.3390/polym14071428>.
- [157] *Niino, T.; Uehara, T.*: Low temperature selective laser melting of high temperature plastic powder. *In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium 2016, S. 866-877*.
- [158] *Niino, T.; Haraguchi, H.; Itagaki Y.*: Feasibility study on plastic laser sintering without powder bed preheating. *In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium 2016, S. 17-29*.
- [159] *Kusoglu, I.M.; Doñate-Buendía, C.; Barcikowski, S. et al.*: Laser Powder Bed Fusion of Polymers: Quantitative Research Direction Indices. *In: Materials (Basel, Switzerland), Vol. 14 (2021), Iss. 5*. <https://doi.org/10.3390/ma14051169>.
- [160] *Witt, G.; Ambrosy, J.; Neugebauer, F.*: Untersuchung von Bauteilverzug und Kristallisation beim Laser-Sintern von Polyamid 12. *In: Witt, G.; Wegner, A.; Sehr, J.T. (Hrsg.): Neue Entwicklungen in der Additiven Fertigung – Beiträge aus der wissenschaftlichen Tagung der Rapid.Tech 2015. Springer-Verlag GmbH; Rapid.Tech. Springer Vieweg, Berlin, 2015, S. 79-91*.

- [161] *Danjou, S.; Köhler, P.*: Ermittlung optimaler Bauteilorientierung zur Verbesserung der Prozessplanung in der CADRP-Kette. *In: Rapid Tech*, 2009.
- [162] *Blattmeier, M.*: Strukturanalyse von lasergesinterten Schichtverbunden mit werkstoffmechanischen Methoden, Research, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012.
- [163] *Majewski, C.E.; Hopkinson, N.*: Effect of section thickness and build orientation on tensile properties and material characteristics of Laser Sintered nylon-12 parts. *In: Bourell, D.L.; Crawford, R.H.; Seepersad, C.C. et al.* (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication – Proceedings, The University of Texas at Austin, 2010.
- [164] *El Magri, A.; Bencaid, S.E.; Vanaei, H.R. et al.*: Effects of Laser Power and Hatch Orientation on Final Properties of PA12 Parts Produced by Selective Laser Sintering. *In: Polymers*, Vol. 14 (2022), Iss. 17. <https://doi.org/10.3390/polym14173674>.
- [165] *Martha, A.M.*: Optimierung des Produktentwicklungsprozesses durch CAD-CAM-Integration im Kontext der additiven Fertigung. Duisburg, Universitätsbibliothek Duisburg-Essen, Duisburg, Essen, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2015, 2015.
- [166] *Schmid, M. (Hrsg.)*: Additive Fertigung mit Selektivem Lasersintern (SLS), Essentials, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015.
- [167] VDI 2222 - Blatt 1 Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, Ausgabe 1997.
- [168] VDI 2221 Blatt 1- Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte – Systematic approach to the development and design of technical systems and products, Ausgabe 2019.
- [169] VDI 2519 Blatt 1 Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten- und Pflichtenheften, Ausgabe 2001.
- [170] *Conrad, K.-J.*: Grundlagen der Konstruktionslehre – Methoden und Beispiele für den Maschinenbau ; mit 103 Tabellen, zahlreichen Kenntnisfragen und Aufgabenstellungen mit Lösungen. Hanser, München, 2008.
- [171] *item GmbH*: Technische Daten zu Verbindungstechnik.
- [172] *item GmbH*: Technische Daten zu Profile.
- [173] *Gebhardt, A.*: Grundlagen des Rapid Prototyping. *In: RTEjournal* (2004).
- [174] *Wago GmbH & Co. KG*: Handbuch: WAGO - I/O-System 750 Ausgabe 02.03.23.
- [175] *Köhler, P. (Hrsg.)*: Pro-ENGINEER-Praktikum – Einführende und fortgeschrittene Arbeitstechniken der parametrischen 3D-Konstruktion mit Wildfire 5.0 ; mit 17 Tabellen, Studium, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [176] *Naefe, P.*: Konstruktionsmethodik – Kurz und bündig, Essentials, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019.
- [177] *Fulcher, B.; Leigh D.K.*: Effects of Laser Window Degradation on Laser Power and Distribution in Laser Sintering. *In: Bourell, D.* (Hrsg.): Proceedings of the 24th International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2013). The University of Texas at Austin, 2013, S. 150-161.
- [178] *Oertel, H.; Böhle, M.; Reviol, T.*: Strömungsmechanik – Für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [179] *Schröder, T.*: Rheologie der Kunststoffe – Theorie und Praxis. Hanser, München, 2018.

- [180] *Durst, F.*: Grundlagen der Strömungsmechanik – Eine Einführung in die Theorie der Strömung von Fluiden. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [181] *SMC GmbH*: Produktdatenblatt SMC Durchflussmesser PFM-Serie.
- [182] *Josuweit, S.; Rüsenberg, S.; Schmid, H.-J.*: A Material-based Quality Concept for Polymer Laser Sintering, In: Bourell. In: *Bourell, D.* (Hrsg.): Proceedings of the 24th International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2013). The University of Texas at Austin, 2013, S. 44-54.
- [183] *Isocos GmbH & Co. KG*: Technisches Materialdatenblatt cosTherm G.500, https://www.moeschter-group.com/fileadmin/content/mediathek/technische-datenblaetter/isocos/ISOCOS_cosTherm_G_500-DE.pdf [Zugriff am: 20.01.2024].
- [184] *Isocos GmbH & Co. KG*: Technisches Materialdatenblatt cosTherm G.700, https://www.moeschter-group.com/fileadmin/content/mediathek/technische-datenblaetter/isocos/ISOCOS_cosTherm_G_700-DE.pdf [Zugriff am: 20.01.2024].
- [185] *Buß, H.*: Bedienungsanleitung LambdaCheck, Ausgabe Oktober 2018.
- [186] *Zhang, L.; Phillips, T.; Mok, A. et al.*: Automatic Laser Control System for Selective Laser Sintering. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics 15 (2019), Heft 4, S. 2177-2185. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2867007>.
- [187] *Rietzel, D.; Drexler, M.; Kühnlein, F. et al.*: Influence of Temperature Fields on the Processing of Polymer Powders by Means of Laser and Mask Sintering Technology. In: *Bourell, D.* (Hrsg.): Proceedings of the 22nd International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2011). The University of Texas at Austin, 2011, S. 252-262.
- [188] *Josuweit, S.*: On the influence of thermal histories within part cakes on the polymer laser sintering process, Dissertation, Universität Paderborn, 2019.
- [189] *Wegner, A.; Witt, G.*: Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen. In: RTejournal (2013).
- [190] *SR SYSTEMS GmbH*: Produktinformation: Schnelle Mittelwellige Infrarotstrahler, <https://www.srsystems.de/infrarotstrahler/schnelle-mittelwellige-infrarotstrahler> [Zugriff am: 31.05.2024].
- [191] *InfraTec GmbH*: Einführung in Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie, Ausgabe 2004.
- [192] DIN CEN ISO/TR 22100-1, Sicherheit von Maschinen - Beziehung zu ISO 12100. Teil 1, Wie ISO 12100 und Tyb-B- und Typ-C-Normen zusammenhängen (ISO/TR 22100-1:2021) – - Safety of machinery - relationship with ISO 12100. Part 1, How ISO 12100 relates to type-B and type-C standards (ISO/TR 22100-1:2021), Ausgabe 2021.
- [193] *FEHA GmbH*: Bedienungsanleitung für die CO₂-Laser der SM-Baureihe, Ausgabe 9/99.
- [194] *Novanta Inc.*: Produktdatenblatt: Synrad ti Series High Stability CO₂ Lasers, Ausgabe 2023.
- [195] *Cholewaa, S.; Jakschb, A.; Drummer, D.*: Analysis of Flow Additives in Laser-Based Powder Bed Fusion of Polymers: Implications for Flow Behavior, Processing, Temperature Profile, and Part Characteristics. In: Proceedings of the 34rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium 2023, S. 12-21.

- [196] *Dietmar Drummer, Maximilian Drexler, Katrin Wudy*: Density of laser molten polymer parts as a function of powder coating process during additive manufacturing. *In: ScienceDirect*, S. 1908-1917.
- [197] *Budding, A.; Vaneker, T.*: New Strategies for Powder Compaction in Powder-based Rapid Prototyping Techniques. *In: Procedia CIRP 6* (2013), S. 527-532. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.100>.
- [198] *Meyer, Lars, Wiedau, Livia C. Wegner, Andreas, Witt, Gerd*: Innovative Pulver-Auftragsstrategien im Laser-Sinter-Prozess – Einflussuntersuchung der Packungsdichte in Korrelation zur Oberflächenrauheit. *In: Proceedings Rapid.Tech 2018*, S. 283-298.
- [199] Materialdatenblatt Feinpolyamid PA 2200 für EOSINT P [2002] (EOS) Ausgabe 2002.
- [200] *Solvay Engineering Plastics*: Technisches Datenblatt SINTERLINE Powder PA6 3400 HT 110 Natural (XP 1501/F), September 2018.
- [201] *BASF 3D Printing Solutions GmbH*: Technisches Datenblatt Ultrasint PA6, November 2019.
- [202] *Rüther, M.; Klippstein, S.H.; Ponusamy, S. et al.*: Flowability of polymer powders at elevated temperatures for additive manufacturing. *In: Powder Technology 422* (2023), S. 118460. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118460>.
- [203] *Amado, A.; Schmid, M.; Wegener, K.*: FLOWABILITY OF SLS POWDERS AT ELEVATED TEMPERATURE. *In: Proceedings Rapid.Tech 2013*.
- [204] *Ziegelmeier, S.; Wöllecke, F.; Tuck, C. et al.*: Characterizing the Bulk & Flow Behaviour of LS Polymer Powders. *In: Bourell, D.* (Hrsg.): Proceedings of the 24th International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2013). The University of Texas at Austin, 2013, S. 354-367.
- [205] *Ophir Spiricon Europe GmbH*: Produktdatenblatt Medium Power BeamTrack-Power / Position / Size Sensors, Ausgabe 2024.
- [206] *Drexler, M.; Drummer, D.; Wudy, K. et al.*: Einfluss der Scangeschwindigkeit auf die Bauteileigenschaften pulver- und strahlbasierter Verfahren. *In: Proceedings Rapid.Tech 2013*.
- [207] *Reinhardt, T.; Witt, G.*: Optimierung der Oberflächengüte lasergesinterter Bauteile aus Polypropylen durch individuelle Flächenbelichtung in Abhängigkeit von deren Orientierung. *In: Proceedings Rapid.Tech 2013*.
- [208] *Baier, O.; Reinhardt, T.; Witt, G.*: Oberflächengüte additiv gefertigter Bauteile erhöhen. *In: Maschinenmarkt 2013* (2013), Heft 47, S. 50-53.
- [209] *Wiedau, L.C.; Meyer, L.; Wegner, A. et al.*: Chemisches Nachbehandeln von Laser-Sinter-Proben – Einflussuntersuchung von verschiedenen Säuren auf die Oberflächentopologie. *In: Proceedings Rapid.Tech 2018*, S. 267-282.
- [210] *Khan, H.M.; Sirin, T.B.; Tarakci G. et al.*: Improving the surface quality and mechanical properties of selective laser sintered PA2200 components by the vibratory surface finishing process. *In: SN Applied Sciences 3* (2021), Heft 3, S. 361. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04371-4>.
- [211] *Nsengimana, J.; Van der Walt Jacobus G, P.*: Improvement of Surface Finish for Additive Manufactured Parts - A Comparison Study of Six Post Processing Techniques. *In: International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, S. 721-735.

- [212] *Petzold, S.; Klett, J.; Schauer, A. et al.*: Surface roughness of polyamide 12 parts manufactured using selective laser sintering. *In: Polymer Testing* 80 (2019), Heft 1, S. 106094. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106094>.
- [213] *Schmid M., L.G.*: Finishing und Coating von SLS-Teilen für Additive Manufacturing (AM). *In: RTEjournal* (2010).
- [214] DIN EN ISO 4288 Geometrische Prüfspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit - Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit, Berlin Ausgabe April 1998.
- [215] DIN EN ISO 21920-2, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Profile. Teil 2, Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit (ISO 21920-2:2021, korrigierte Fassung 2022-06).
- [216] *Grießbach, S.; Lach, R.; Grellmann, W.*: Small series production of high-strength plastic parts, *In: Kunststoffe international* 5/2008, S. 11-14.
- [217] *Rüsenberg, S.; Schmid, H.-J.*: Mechanical Properties as a result of multitude of parameters. *In: Proceedings of AEPR* 2012.
- [218] *Mielicki, C.; Gronhoff, B.; Wortberg, J.*: Effects of laser sintering processing time and temperature on changes in polyamide 12 powder particle size, shape and distribution. *In: AIP Convergence Proceedings* (2014), S. 728-731.
- [219] *Mielicki, C.*: Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Lasersintern von Polyamid 12, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2014.
- [220] *L. Meyer, A. Wegner and G. Witt*: Influence of the Ratio between the Translation and Contra-Rotating Coating Mechanism on different Laser Sintering Materials and their Packing Density. *In: Bourell (Hg.)* 2017 – Proceedings of the 28th International, S. 1432-1447.
- [221] DIN EN ISO 1183-1, Kunststoffe - Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen. Teil 1, Eintauchverfahren, Verfahren mit Flüssigkeitspycnometer und Titrationsverfahren – -Plastics - methods for determining the density of non-cellular plastics. Part 1, Immersion method, liquid pycnometer method and titration method, Ausgabe 2019.
- [222] *KERN & SOHN GmbH*: Betriebsanleitung Dichtewaagen, Ausgabe 2013.
- [223] *Grießbach, V.; Grießbach, S.*: Method for determining properties of three-dimensional objects, Patent US8371183B2, 2008.
- [224] *Frick, A.; Stern, C.*: Einführung in die Kunststoffprüfung – Prüfmethode und Anwendungen. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2017.
- [225] *Kurr, F.*: Praxishandbuch der Qualitäts- und Schadensanalyse für Kunststoffe. Hanser, München, 2014.
- [226] *Michler, G.H.; Lebek, W.*: Ultramikrotomie in der Materialforschung. Hanser, München, 2004.
- [227] *Hellerich, W.; Harsch, G.; Baur, E.*: Werkstoff-Führer Kunststoffe – Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte. Hanser, München, 2010.
- [228] DIN EN ISO 3167:2014-11, Kunststoffe_ - Vielzweckprobekörper (ISO_3167:2014); Deutsche Fassung EN_ISO_3167:2014.
- [229] DIN EN ISO 20753:2022-07, Kunststoffe_ - Probekörper (ISO/DIS_20753:2022); Deutsche und Englische Fassung prEN_ISO_20753:2022.

- [230] *EOS GmbH*: FORMIGA P 100 - Laser-Sinter System für Kunststoffpulver - Zubehör und Optionen, Ausgabe 2010.
- [231] *Martin Heinla,*, Bogdan Galovskyia, Florian Bayera, Tobias Laumberb*: Influence of laser power fluctuations on the quality of additive manufactured workpieces. *In*: Lasers in Manufacturing Conference 2017.
- [232] *Reinhardt, T.*: Entwicklung einer ganzheitlichen Verfahrenssystematik bei der Qualifizierung neuer Werkstoffe für das Laser-Sintern am Beispiel Polypropylen, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2016.
- [233] *C. Mielicki et al*: Prediction of PA12 melt viscosity in Laser Sintering by a Time and Temperature dependent rheological model. *In*: RTEjournal (2012).
- [234] *Tumor, I.Y.; Thompson, D.C.; Wood, K.L. et al.*: Characterization of surface fault patterns with application to a layered manufacturing process. *In*: Journal of Manufacturing Systems 17 (1998), Heft 1, S. 23-36. [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(98\)80007-1](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(98)80007-1).
- [235] *CT CoreTechnologie Group*: Texturen revolutionieren das Design, 2024, <https://www.coretechnologie.de/produkte/4d-additive.html> [Zugriff am: 24.05.2024].
- [236] *Rietzel, D.; Kühnlein, F.; Drummer, D.*: Kunststoffe für die direkte Bauteilfertigung mittels strahlbasierter Verfahren – Potenzial modifizierter und neuer Werkstoffe zur Erweiterung der Applikationsbreite. *In*: Fraunhofer IPA (Institut Produktionstechnik und Automatisierung) (Hrsg.): 15. Anwenderforum RPD, 2010.
- [237] *Yamauchi, Y.; Kigure, T.; Niino, T.*: Determination of Input Laser Energy for Melting Powder Layers of Various Thickness in High-Speed PBF-LB/P Using Near-Infrared Laser and Absorbent. *In*: Proceedings of the 34rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium 2023, S. 46-57.
- [238] *Domininghaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P. et al.*: Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen, VDI-Buch, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [239] *Eyerer, P. (Hrsg.)*: Polymer Engineering – Technologien und Praxis ; mit 155 Tabellen, VDI, Springer, Berlin, 2008.
- [240] *EOS GmbH*: Materialdatenblatt PA 2200 Balance 1.0 Ausgabe 2010.
- [241] *Wegner, A.; Witt, G.*: Laser Sintered Parts with Isotropic Mechanical Properties. *In*: In: Technical Paper - Society of Manufacturing Engineers TP12PUB43, 2012, S. 1-16.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Methodik der vorliegenden Arbeit.....	3
Abbildung 2-1: Verdeutlichung der Konvertierung in das STL-Format in Abhängigkeit von der Krümmung am Beispiel einer modellierten Parabel	6
Abbildung 2-2: Veranschaulichung des Treppenstufeneffekts in Abhängigkeit von der Krümmung und der Position	7
Abbildung 2-3: Die Optimierung des magischen Dreiecks durch neue Anlagengenerationen in der Additiven Fertigung in Anlehnung an [55]	9
Abbildung 2-4: Verfahrensprinzip des Laser-Sinterns	11
Abbildung 2-5: Entwicklung der Anlagentechnik seit 1992 bis zu aktuellen Produktionsanlagen Bildquellen [60, 61, 76, 78–81]	13
Abbildung 2-6: Schematischer Aufbau eines Optiksystems nach [80]	15
Abbildung 2-7: Anregung der Gasmoleküle beim CO ₂ -Laser in Anlehnung an [83]	15
Abbildung 2-8: Fokussierung eines Laserstrahls gemäß [82, 86, 89].....	17
Abbildung 2-9: Nomenklatur und visuelle Zuweisung der Prozessparameter	20
Abbildung 2-10: Veranschaulichung der Skywriting-Scanbewegung	22
Abbildung 2-11: Veranschaulichung des schichtweise alternierenden Kreuz-Scans.....	22
Abbildung 2-12: Schematische Darstellung einer DDK mit Markierung relevanter Temperaturen und Materialkennwerten für den PBF-LB/P-Prozess.....	24
Abbildung 2-13: Temperaturverteilung im Baufeld nach Upgrade [115]	28
Abbildung 4-1: Baugruppe der Versuchsanlage als CAD-Modell.....	36
Abbildung 4-2: Darstellung der methodischen Entwicklung von Lösungsprinzipien und technischen Systemen der Versuchsanlage in Anlehnung an [165-167].....	38
Abbildung 4-3: Laser-Window – Veranschaulichung der Simulationsergebnisse mit FlowXpress	42
Abbildung 4-4: Gegenüberstellung der Bauplattform aus dem CAD-Modell (Schnittansicht) und jener aus der realisierten Baugruppe	43
Abbildung 4-5: Gegenüberstellung der Walze aus dem CAD-Modell und jener der realisierten Baugruppe	44
Abbildung 4-6: Thermogramm des Bauraumes zur Ermittlung der Temperaturverteilung während eines Bauprozesses	45
Abbildung 4-7: Laserspotvergrößerung durch definierte Fehlstellung der dynamischen Fokussiereinheit	46
Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Scanvektoren mit a) fixem Laserspot und b) variablem Laserspot	48
Abbildung 4-9: Theoretische Belichtungszeit als Funktion des Hatchabstandes	49
Abbildung 4-10: Optiksistem der Versuchsanlage	50
Abbildung 4-11: Versuchsanlage im betriebsbereiten Zustand.....	51
Abbildung 5-1: Schaubild zur Parameterfindung an der Versuchsanlage	53

Abbildung 5-2: Probekörper und Messstellen	56
Abbildung 5-3: Vergleich der flachen und abgerundeten Rakel	56
Abbildung 5-4: Ermittlung des Oberflächenrauheitswertes R_z	57
Abbildung 5-5: Probekörper zur Untersuchung von Einzelspuren	58
Abbildung 5-6: Verwendeter Vielzweckprüfkörper Typ 1A nach der DIN EN ISO 20753	63
Abbildung 5-7: Zugprüfung und Querschnittsermittlung der Proben	63
Abbildung 5-8: Beispielhafte Generierung der Scanvektoren in der Prozesssoftware für die Fokusstufen F0, F5 und F10 (v. o. n. u.).....	64
Abbildung 6-1: Qualitätsbewertung Pulverauftrag mit Walze bei 127 mm/s	66
Abbildung 6-2: Seitenlichtaufnahmen des PBT zur Auswertung anhand der Schwellenwertanalyse..	66
Abbildung 6-3: Qualitätsbewertung Pulverauftrag Rakel	67
Abbildung 6-4: Laserleistungskennlinie bei Betriebspunkt 1.....	68
Abbildung 6-5: Leistungskennlinie bei Betriebspunkt 2	69
Abbildung 6-6: Extrapolierter Spotdurchmesser auf der Baufeldebene nach Fokusstufe	69
Abbildung 6-7: Erreichte Packungsdichten nach Auftragsmechanismus und differenzierten Drehzahlen	71
Abbildung 6-8: Vergleich der Oberflächenrauheit unterschiedlicher Rakelgeometrien	73
Abbildung 6-9: Oberflächenrauheit nach Packungsdichte beim Auftrag mittels gegenläufiger Walze	74
Abbildung 6-10: Reproduzierbarkeit der Auftragsmechanismen anhand der Oberflächenrauheit.....	75
Abbildung 6-11: Ergebnisse zur Spurbreite S_b in Abhängigkeit von der Fokusstufe	77
Abbildung 6-12: Einteilung der Zonen am Probekörper	78
Abbildung 6-13: Errechneter Hatchabstand H in Abhängigkeit von der Fokusstufe	79
Abbildung 6-14: Querschnitte der Einzelspuren ausgewählter Fokusstufen	80
Abbildung 6-15: Erreichbare Schichtstärken nach resultierender Energiedichte	81
Abbildung 6-16: Verschiebung des Füllmusters zur Kontur am Beispiel von Fokusstufe 10.....	83
Abbildung 6-17: Ablauf der Versuchsreihen zur Bauteildichte.....	84
Abbildung 6-18: Auswirkungen der Füllmusterschiebung nach Fokusstufe	85
Abbildung 6-19: Getriggerte Laserleistungen im Bauprozess.....	85
Abbildung 6-20: Vergleich der manuellen und der archimedischen Dichtemessung	86
Abbildung 6-21: Darstellung der Einflüsse auf die Bauteildichte nach Position im Bauraum	87
Abbildung 6-22: Auswirkung der konformen Ausrichtung auf die Bauteildichte nach Fokusstufe.....	89
Abbildung 6-23: Gegenüberstellung der variierenden Skin-Core-Belichtungen mit resultierenden Scanlinien	90
Abbildung 6-24: Gegenüberstellung der variierenden Skin-Core-Belichtungen im Bauprozess.....	91
Abbildung 6-25: Bauteildichte in Abhängigkeit von der Bauhöhe a) Riege 1 b) Riege 2	92

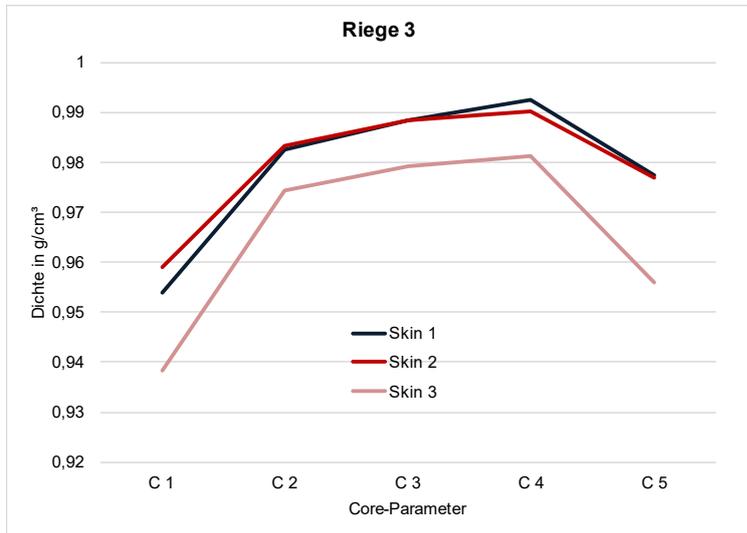
Abbildung 6-26: Betrachtung der entstandenen Probekörper mit den Sollmaßen 10 mm x 10 mm x 10 mm	93
Abbildung 6-27: Dichtescreening des C3-Parameters unter Variation der Energiedichte	93
Abbildung 6-28: Bauteile mit C3-S1-Parametern und variierender Energiedichte	94
Abbildung 6-29: Volumetrische Analyse betreffend den C3-Parameter der Skins S1 bis S3.....	95
Abbildung 6-30: Vergleichsergebnisse der Bauteildichte betreffend den C3-Parameter mit manueller Messmethode.....	97
Abbildung 6-31: Dünnschnittuntersuchungen betreffend den C3-Parameter anhand ausgewählter Energiedichten	99
Abbildung 6-32: Darstellung der Probekörper von ausgewählten Fokusstufen.....	101
Abbildung 6-33: Ausgewählte Dünnschnitte mit dem Vergleich der Ergebnisse der manuellen Messung (türkis) und jener zur maximalen Bauteildichte nach einer Schwellenwertanalyse (rot) ...	103
Abbildung 6-34: Trendlinien der maximal erreichten Bauteildichte nach Fokus und Energiedichte .	104
Abbildung 6-35: Infiltrationsverhalten der Probekörper in Abhängigkeit von der Bauteildichte	105
Abbildung 6-36: Dichteverlauf der Proben bei unterschiedlichen Energieleveln je Fokusstufe	107
Abbildung 6-37: Illustration der Darstellungsfehler bei hohen Laserspotdurchmessern.....	107
Abbildung 6-38: Ausprägung des Versatzes in Abhängigkeit zur Fokusstufe	108
Abbildung 6-39: Einfluss der Strahlverschiebung auf die Bauteildichte	109
Abbildung 6-40: Resultierende mechanische Eigenschaften der Standardparameter betreffend a) E-Modul, b) Zugfestigkeit und c) Bruchdehnung.....	113
Abbildung 6-41: E-Modul – Vergleich der Standardparameter a) mit den optimierten Parametern b) für jede Fokusstufe.....	115
Abbildung 6-42: Zugfestigkeit – Vergleich der Standardparameter a) mit den optimierten Parametern b) für jede Fokusstufe.....	116
Abbildung 6-43: Bruchdehnung – Vergleich der Standardparameter a) mit den optimierten Parametern b) für jede Fokusstufe	117
Abbildung 6-44: Fokusstufe 7 im Validierungsversuch (l.) und in der Optimierung (r.).....	120
Abbildung 6-45: Dokumentierte Prozesszeiten repräsentativer Optimierungsprozesse	121
Abbildung 6-46: Aufgezeichnete Belichtungszeiten der Optimierungen bei F0/F1 und F6/F7.....	122
Abbildung 6-47: Theoretische Betrachtung der Bauzeit bei variabler Fokusanpassung am Beispiel von F6/F7 für x/y- und von F0/F1 für z-Zugproben.....	123

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Nomenklatur zur Scanstrategie.....	20
Tabelle 4-1: Spezifikationen der Versuchsanlage	51
Tabelle 5-1: Laserleistung nach Fokusstufe	59
Tabelle 6-1: Parameterzuweisung des fokusstufenabhängigen Dichtescreenings.....	106
Tabelle 6-2: Korrigierte Strahlkompensation und Aufbau von Versuchsreihe VI	109
Tabelle 6-3: Standardparameter für die zu verwendenden Fokusstufen	110
Tabelle 6-4: Finale Parameter der Versuchsanlage für jede Fokusstufe	118

11 Anhang

Anhang 11-1:



Anhang 11-2: Versuchspläne mit den jeweiligen Faktoren für jede Fokusstufe

F0					F1				
Select	Std	Run	Factor 1 A: Laserleist... W	Factor 2 B: Distance mm	Select	Std	Run	Factor 1 A: Laserleist... W	Factor 2 B: Distance mm
	2	1	38.64	0.22		4	1	47.92	0.30
	5	2	36.79	0.23		1	2	43.28	0.28
	3	3	34.94	0.24		3	3	43.28	0.30
	4	4	38.64	0.24		2	4	47.92	0.28
	1	5	34.94	0.22		5	5	45.60	0.29
F2					F3				

Select	Std	Run	Factor 1 A:Laserleist... W	Factor 2 B:Distance mm
5		1	48.80	0.31
	1	2	46.32	0.29
	3	3	46.32	0.33
	4	4	51.28	0.33
	2	5	51.28	0.29

F4

Select	Std	Run	Factor 1 A:Laserleist... W	Factor 2 B:Distance mm
3		1	48.02	0.33
	5	2	50.50	0.31
	1	3	48.02	0.29
	2	4	52.98	0.29
	4	5	52.98	0.33

Select	Std	Run	Factor 1 A:Laserleist... W	Factor 2 B:Distance mm
5		1	48.50	0.29
	3	2	46.18	0.30
	4	3	50.82	0.30
	2	4	50.82	0.28
	1	5	46.18	0.28

F5

Select	Std	Run	Factor 1 A:Laserleist... W	Factor 2 B:Distance mm
2		1	82.88	0.53
	3	2	73.92	0.59
	5	3	78.40	0.56
	4	4	82.88	0.59
	1	5	73.92	0.53

F6

Select	Std	Run	Factor 1 A:Laserleist... W	Factor 2 B:Distance mm
2		1	88.80	0.57
	5	2	84.00	0.60
	3	3	79.20	0.63
	4	4	88.80	0.63
	1	5	79.20	0.57

F7

Select	Std	Run	Factor 1 A:Laserleist... W	Factor 2 B:Distance mm
4		1	114.40	0.84
	2	2	114.40	0.76
	5	3	108.00	0.80
	3	4	101.60	0.84
	1	5	101.60	0.76

F8

Select	Std	Run	Factor 1 A:Laserleist... W	Factor 2 B:Distance mm
3		1	85.12	0.80
	5	2	91.20	0.76
	4	3	97.28	0.80
	2	4	97.28	0.72
	1	5	85.12	0.72

F9

Select	Std	Run	Factor 1 A:Laserleist... W	Factor 2 B:Distance mm
5		1	102.60	0.81
	3	2	96.12	0.85
	4	3	109.08	0.85
	1	4	96.12	0.77
	2	5	109.08	0.77

F10

Select	Std	Run	Factor 1 A:Laserleist... W	Factor 2 B:Distance mm
4		1	109.88	0.90
	5	2	103.00	0.86
	2	3	109.88	0.82
	1	4	96.12	0.82
	3	5	96.12	0.90

Anhang 11-3: Ergebnisse der Versuchsreihe zur statistischen Versuchsplanung

Fokus 0 xy	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	E-Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	4	1	38,64	0,2185	17,70204926	1707,09778	47,89038488
	5	2	38,64	0,2185	19,13095093	1689,518122	47,66626716
	6	3	38,64	0,2185	18,46445084	1684,39806	48,48518534
	13	4	36,79	0,23	19,57999992	1677,686136	47,49557788
	7	5	34,94	0,2415	16,26650047	1697,616225	47,89280279
	8	6	34,94	0,2415	19,72850037	1718,651163	47,1180184
	9	7	34,94	0,2415	19,51070023	1717,077933	47,86941142
	10	8	38,64	0,2415	20,74575043	1782,05749	48,35042149
	11	9	38,64	0,2415	19,19285011	1715,115273	47,70150359
	12	10	38,64	0,2415	18,3701992	1786,330565	48,23029331
	1	11	34,94	0,2185	22,72854996	1737,791085	47,91393227
	2	12	34,94	0,2185	21,55540085	1768,512482	47,85338954
	3	13	34,94	0,2185	21,57130051	1723,125163	47,83954756

Fokus 0 z	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	4	1	38,64	0,2185	14,7755003	1764,639988	45,94891013
	5	2	38,64	0,2185	19,76510048	1693,653865	45,83894895
	6	3	38,64	0,2185	20,59305	1763,38393	46,21624119
	13	4	36,79	0,23	15,76446692	1681,223883	46,4226067
	7	5	34,94	0,2415	11,69974995	1676,527367	45,59445389
	8	6	34,94	0,2415	11,40919971	1669,743935	46,04257013
	9	7	34,94	0,2415	15,52270031	1475,74437	46,58228161
	10	8	38,64	0,2415	18,70960045	1666,995212	44,68680617
	11	9	38,64	0,2415	23,97100067	1747,504816	46,63052575
	12	10	38,64	0,2415	20,46105003	1670,791145	46,31959278
	1	11	34,94	0,2185	18,71699905	1724,619913	46,59094444
	2	12	34,94	0,2185	18,37484932	1447,153741	46,60509417
	3	13	34,94	0,2185	15,01840019	1774,331786	47,09628553

Fokus 1 xy	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	E-Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	10	1	47,92	0,3045	12,77624989	1841,486093	47,04531829
	11	2	47,92	0,3045	20,06575012	1704,989144	47,77469175
	12	3	47,92	0,3045	12,01679993	1644,448497	47,11909808
	1	4	43,28	0,2755	19,29339981	1718,289719	47,32148342
	2	5	43,28	0,2755	16,63215065	1605,301675	46,65580224
	3	6	43,28	0,2755	23,01065063	1665,29622	47,26118378
	7	7	43,28	0,3045	21,21479988	1705,742892	47,80180258
	8	8	43,28	0,3045	19,06934929	1751,016315	48,10274827
	9	9	43,28	0,3045	15,48974991	1786,529455	47,78264921
	4	10	47,92	0,2755	21,28434944	1641,497294	46,92811181
	5	11	47,92	0,2755	17,83069992	1734,309651	47,26712788
	6	12	47,92	0,2755	19,75790024	1675,467596	46,65574595
	13	13	45,6	0,29	18,26140022	1671,220847	46,64806335

Fokus 1 z	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	10	1	47,92	0,3045	13,36664963	1820,445319	46,04222946
	11	2	47,92	0,3045	10,74730015	1831,126103	45,59195487
	12	3	47,92	0,3045	19,51325035	1689,910237	46,63059451
	1	4	43,28	0,2755	15,20180035	1752,838552	47,25217201
	2	5	43,28	0,2755	10,90215015	1749,28212	45,90400514
	3	6	43,28	0,2755	13,50794983	1855,039137	46,74476012
	7	7	43,28	0,3045	15,26834965	1670,717763	47,16463183
	8	8	43,28	0,3045	9,156299591	1839,00879	45,51593779
	9	9	43,28	0,3045	14,7442503	1622,098764	46,69299449
	4	10	47,92	0,2755	15,67895031	1677,847625	46,6009176
	5	11	47,92	0,2755	13,28944969	1749,717585	46,41880083
	6	12	47,92	0,2755	18,91279984	1689,805428	46,45892403
	13	13	45,6	0,29	10,7346199	1709,890054	45,50848171

Fortsetzung Anhang 11-3: Ergebnisse der Versuchsreihe zur statistischen Versuchsplanung

Fokus 2 xy	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	E-Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	13	1	48,8	0,31	17,50756677	1755,764639	47,61182288
	1	2	46,32	0,2945	20,62829971	1713,165343	47,05515636
	2	3	46,32	0,2945	13,29160023	1737,577012	47,10556831
	3	4	46,32	0,2945	22,95535088	1722,963126	47,7900068
	7	5	46,32	0,3255	16,78879929	1737,524075	47,24105287
	8	6	46,32	0,3255	17,82920074	1750,105184	47,94297297
	9	7	46,32	0,3255	14,1850996	1680,09406	47,33225408
	10	8	51,28	0,3255	14,8736496	1718,189995	47,73172402
	11	9	51,28	0,3255	26,83880043	1679,198481	47,09153508
	12	10	51,28	0,3255	12,2670002	1789,104381	46,82307412
	4	11	51,28	0,2945	15,54284954	1720,686954	47,90664219
	5	12	51,28	0,2945	15,46959972	1711,68323	46,84162125
	6	13	51,28	0,2945	22,53764915	1721,885617	48,17524457

Fokus 2 z	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	13	1	48,8	0,31	17,50756677	1755,764639	47,61182288
	1	2	46,32	0,2945	20,62829971	1713,165343	47,05515636
	2	3	46,32	0,2945	13,29160023	1737,577012	47,10556831
	3	4	46,32	0,2945	22,95535088	1722,963126	47,7900068
	7	5	46,32	0,3255	16,78879929	1737,524075	47,24105287
	8	6	46,32	0,3255	17,82920074	1750,105184	47,94297297
	9	7	46,32	0,3255	14,1850996	1680,09406	47,33225408
	10	8	51,28	0,3255	14,8736496	1718,189995	47,73172402
	11	9	51,28	0,3255	26,83880043	1679,198481	47,09153508
	12	10	51,28	0,3255	12,2670002	1789,104381	46,82307412
	4	11	51,28	0,2945	15,54284954	1720,686954	47,90664219
	5	12	51,28	0,2945	15,46959972	1711,68323	46,84162125
	6	13	51,28	0,2945	22,53764915	1721,885617	48,17524457

Fokus 3 xy	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	13	1	48,5	0,29	22,93376668	1732,416894	47,78954405
	7	2	46,18	0,3045	17,85619926	1756,217908	48,34917225
	8	3	46,18	0,3045	12,36225033	1796,204927	47,73032447
	9	4	46,18	0,3045	20,65679932	1708,935913	47,44048124
	10	5	50,82	0,3045	23,6759491	1655,235438	44,14983057
	11	6	50,82	0,3045	25,82139969	1673,608101	47,33912391
	12	7	50,82	0,3045	13,4514	1717,914992	46,89826901
	4	8	50,82	0,2755	18,46184921	1674,058853	46,9143868
	5	9	50,82	0,2755	17,12590027	1745,706927	47,22702365
	6	10	50,82	0,2755	14,9756497	1663,22024	46,90649134
	1	11	46,18	0,2755	13,5385	1706,014601	47,08573011
	2	12	46,18	0,2755	23,12669945	1655,435853	46,91085463
	3	13	46,18	0,2755	23,20540047	1763,640405	47,76765641

Fokus 3 z	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	13	1	48,5	0,29	14,39371649	1708,478847	46,20035181
	7	2	46,18	0,3045	13,44209957	1775,030169	47,191127
	8	3	46,18	0,3045	14,13669968	1748,658488	46,65003777
	9	4	46,18	0,3045	11,12654972	1718,209794	46,66685436
	10	5	50,82	0,3045	16,3071003	1751,58438	46,99019869
	11	6	50,82	0,3045	12,60074997	1822,885524	45,93504718
	12	7	50,82	0,3045	18,87254906	1739,862662	47,32391401
	4	8	50,82	0,2755	17,17144966	1736,859211	46,41387572
	5	9	50,82	0,2755	18,54210091	1725,650934	46,44024972
	6	10	50,82	0,2755	12,27324963	1654,666108	46,31517486
	1	11	46,18	0,2755	11,23270035	1694,603548	45,28998199
	2	12	46,18	0,2755	15,10359955	1721,469682	46,33682193
	3	13	46,18	0,2755	11,19204998	1734,138063	45,7071548

Fortsetzung Anhang 11-3: Ergebnisse der Versuchsreihe zur statistischen Versuchsplanung

Fokus 4 xy	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	7	1	48,02	0,3255	21,40254974	1814,412129	48,97136458
	8	2	48,02	0,3255	20,51479912	1788,64737	49,31066599
	9	3	48,02	0,3255	21,69795036	1793,159865	48,59213435
	13	4	50,5	0,31	20,34579976	1750,448509	48,2522464
	1	5	48,02	0,2945	15,47994995	1743,927806	48,46592128
	2	6	48,02	0,2945	18,95574951	1701,141278	48,70926782
	3	7	48,02	0,2945	17,07485008	1762,480911	49,30200624
	4	8	52,98	0,2945	15,40874958	1853,247651	49,11060126
	5	9	52,98	0,2945	15,32734966	1818,811363	48,57088822
	6	10	52,98	0,2945	14,2986002	1770,796492	48,07098129
	10	11	52,98	0,3255	15,26679993	1823,02977	48,59183479
	11	12	52,98	0,3255	17,76799965	1833,59076	48,48403612
	12	13	52,98	0,3255	19,45745087	1851,625545	48,90109816

Fokus 4 z	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	7	1	48,02	0,3255	19,89055061	1692,58928	47,52477756
	8	2	48,02	0,3255	24,71755028	1632,938677	46,49580095
	9	3	48,02	0,3255	23,22245026	1661,817471	46,44649441
	13	4	50,5	0,31	18,7704169	1693,112658	46,12484492
	1	5	48,02	0,2945	22,96800041	1590,486979	46,80707718
	2	6	48,02	0,2945	26,65645027	1655,357597	46,86230855
	3	7	48,02	0,2945	22,9572506	1789,246223	46,79310267
	4	8	52,98	0,2945	21,67539978	1652,11552	46,0959473
	5	9	52,98	0,2945	21,03565025	1683,760306	46,61442611
	6	10	52,98	0,2945	20,5583992	1678,090491	46,27439894
	10	11	52,98	0,3255	21,22744942	1411,066206	46,69091956
	11	12	52,98	0,3255	23,26524925	1678,719229	46,86386201
	12	13	52,98	0,3255	22,19689941	1713,061012	46,36738702

Fokus 5 xy	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	4	1	82,88	0,532	18,75665092	1750,9238	48,60958186
	5	2	82,88	0,532	14,57785034	1720,722379	48,62924804
	6	3	82,88	0,532	12,95184994	1733,37387	48,32795204
	7	4	73,92	0,588	13,50984955	1698,440029	48,43738821
	8	5	73,92	0,588	15,48190022	1754,231016	48,38423295
	9	6	73,92	0,588	14,29259968	1751,036257	49,14812859
	13	7	78,4	0,56	18,27814992	1784,526699	48,66254725
	10	8	82,88	0,588	22,31550026	1780,705658	48,63901042
	11	9	82,88	0,588	15,03744984	1766,807587	48,98649512
	12	10	82,88	0,588	13,36085033	1722,516202	48,5948317
	1	11	73,92	0,532	15,68715	1788,954511	48,52681428
	2	12	73,92	0,532	14,81830025	1731,295381	48,53704204
	3	13	73,92	0,532	17,88005066	1747,831704	48,39343965

Fokus 5 z	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	4	1	82,88	0,532	21,11064911	1687,891364	46,51400148
	5	2	82,88	0,532	19,13640022	1659,313403	46,81952706
	6	3	82,88	0,532	21,40509987	1764,862555	46,98182446
	7	4	73,92	0,588	16,65155029	1712,952952	46,04553121
	8	5	73,92	0,588	18,80970001	1774,549442	46,59874296
	9	6	73,92	0,588	20,84869957	1708,769731	46,87830536
	13	7	78,4	0,56	19,54721642	1770,095578	46,7592521
	10	8	82,88	0,588	22,90925026	1678,62968	45,92315665
	11	9	82,88	0,588	22,82839966	1687,41932	46,33101244
	12	10	82,88	0,588	18,34235001	1702,981379	46,16762702
	1	11	73,92	0,532	14,25424957	1703,337587	46,62037973
	2	12	73,92	0,532	18,13904953	1681,669559	46,47192646
	3	13	73,92	0,532	15,99324989	1691,635019	46,85596744

Fortsetzung Anhang 11-3: Ergebnisse der Versuchsreihe zur statistischen Versuchsplanung

Fokus 6 xy	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	4	1	88,8	0,57	22,65189934	1713,511186	48,78224827
	5	2	88,8	0,57	20,53834915	1832,787297	48,89010825
	6	3	88,8	0,57	21,97044945	1837,634809	48,73104941
	13	4	84	0,6	19,94360034	1740,609729	48,49862829
	7	5	79,2	0,63	18,94020081	1758,133658	48,31521051
	8	6	79,2	0,63	11,44779968	1831,841864	47,10233739
	9	7	79,2	0,63	16,00264931	1779,624907	48,44842741
	10	8	88,8	0,63	15,00984955	1709,816534	47,34995233
	11	9	88,8	0,63	21,92329979	1753,837585	47,77764339
	12	10	88,8	0,63	18,63839912	1748,980917	48,33263574
	1	11	79,2	0,57	17,76639938	1809,680672	48,45350026
	2	12	79,2	0,57	20,20709991	1709,098406	48,4524656
	3	13	79,2	0,57	18,39744949	1781,873858	47,81656214

Fokus 6 z	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	4	1	88,8	0,57	20,30410004	1646,504619	45,69987683
	5	2	88,8	0,57	16,53104973	1683,971625	46,54436797
	6	3	88,8	0,57	18,18799973	1673,177399	46,24824284
	13	4	84	0,6	16,95288308	1654,864433	46,77048221
	7	5	79,2	0,63	17,63335037	1703,196112	46,26867548
	8	6	79,2	0,63	18,15749931	1792,071578	46,27399111
	9	7	79,2	0,63	19,95154953	1697,88741	46,98780935
	10	8	88,8	0,63	18,89570045	1781,57995	46,57284621
	11	9	88,8	0,63	19,56394958	1731,888688	46,60196677
	12	10	88,8	0,63	20,81599998	1801,963004	46,74389123
	1	11	79,2	0,57	17,87985039	1714,993725	47,12236869
	2	12	79,2	0,57	21,29025078	1687,462366	45,82612442
	3	13	79,2	0,57	19,90999985	1716,65684	46,70159083

Fokus 7 xy	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	10	1	114,4	0,84	17,96419907	1741,434893	47,66631008
	11	2	114,4	0,84	21,50315094	1709,403473	47,9810731
	12	3	114,4	0,84	23,39444923	1796,608721	48,3702107
	4	4	114,4	0,76	25,51104927	1678,849979	47,91116314
	5	5	114,4	0,76	22,0679493	1825,982678	49,73257502
	6	6	114,4	0,76	24,12770081	1710,065128	47,61182098
	13	7	108	0,8	19,34063339	1751,602623	47,65899955
	7	8	101,6	0,84	17,55410004	1680,012985	48,35860261
	8	9	101,6	0,84	18,24830055	1790,512014	47,18587328
	9	10	101,6	0,84	17,82564926	1690,743984	48,05833141
	1	11	101,6	0,76	20,21380043	1697,390198	47,38473692
	2	12	101,6	0,76	22,05694962	1756,414762	47,87328393
	3	13	101,6	0,76	24,91160011	1724,224747	47,77516555

Fokus 7 z	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	10	1	114,4	0,84	21,64979935	1705,118207	45,68573388
	11	2	114,4	0,84	21,32629967	1739,650899	46,02213206
	12	3	114,4	0,84	16,40435028	1698,732256	45,5163447
	4	4	114,4	0,76	14,15874958	1662,763404	45,87204061
	5	5	114,4	0,76	22,39719963	1744,922815	46,13754745
	6	6	114,4	0,76	10,78569984	1903,635603	46,05915266
	13	7	108	0,8	19,88676643	1746,537721	46,29623936
	7	8	101,6	0,84	18,89684923	1752,987136	45,88013891
	8	9	101,6	0,84	21,14715004	1732,038234	46,89846713
	9	10	101,6	0,84	19,50650024	1752,627773	46,84488629
	1	11	101,6	0,76	14,34039974	1615,533729	45,9711352
	2	12	101,6	0,76	16,58435059	1677,898319	45,98716837
	3	13	101,6	0,76	21,27549934	1695,978366	46,39100176

Fortsetzung Anhang 11-3: Ergebnisse der Versuchsreihe zur statistischen Versuchsplanung

Fokus 8 xy	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	7	1	85,12	0,798	11,06669998	1658,437605	45,20990974
	8	2	85,12	0,798	8,591950417	1717,493674	45,20138695
	9	3	85,12	0,798	8,642499924	1707,052074	44,81462419
	13	4	91,2	0,76	12,00226657	1717,630205	46,70467577
	10	5	97,28	0,798	12,7098999	1715,378984	46,44874793
	11	6	97,28	0,798	9,484199524	1666,491303	45,74478911
	12	7	97,28	0,798	13,96469975	1712,334292	47,19778584
	4	8	97,28	0,722	13,28600025	1668,518829	46,45806447
	5	9	97,28	0,722	16,45470047	1676,569181	47,7621305
	6	10	97,28	0,722	16,57044983	1718,039922	47,66579835
	1	11	85,12	0,722	12,36229992	1747,716086	47,65423592
	2	12	85,12	0,722	13,6420002	1681,578392	45,96332869
	3	13	85,12	0,722	13,09045029	1704,167525	46,88338297

Fokus 8 z	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	Zugfestigkeit
	7	1	85,12	0,798	5,137000084	1617,610699	40,41701213
	8	2	85,12	0,798	4,114999771	1704,81066	37,7842561
	9	3	85,12	0,798	5,787549973	1681,795821	41,41876358
	13	4	91,2	0,76	9,141433239	1645,440737	43,81037168
	10	5	97,28	0,798	8,297050476	1685,425815	44,54945858
	11	6	97,28	0,798	14,67790031	1709,962765	45,72705729
	12	7	97,28	0,798	8,656100273	1582,307748	43,38537099
	4	8	97,28	0,722	10,7329998	1590,083051	43,57576034
	5	9	97,28	0,722	14,38825035	1668,239045	45,36543964
	6	10	97,28	0,722	16,18935013	1660,68175	44,33423346
	1	11	85,12	0,722	10,01935005	1687,838507	44,77105236
	2	12	85,12	0,722	6,946949959	1670,40747	42,49327788
	3	13	85,12	0,722	11,75529957	1716,955285	44,93571627

Fokus 9 xy	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	zugfestigkeit
	13	1	102,6	0,81	18,46643321	1776,90714	47,07373354
	7	2	96,12	0,8505	9,52175045	1686,54558	45,95695306
	8	3	96,12	0,8505	8,566049576	1620,43807	43,43792641
	9	4	96,12	0,8505	10,8760004	1708,9349	46,01801988
	10	5	109,08	0,8505	16,83699989	1768,343693	47,91329356
	11	6	109,08	0,8505	22,37750053	1684,978371	46,91475221
	12	7	109,08	0,8505	12,1857996	1677,133486	46,15971866
	1	8	96,12	0,7695	14,00384998	1739,946972	46,74318147
	2	9	96,12	0,7695	18,52275085	1734,682984	47,44943438
	3	10	96,12	0,7695	17,66390038	1698,097715	47,3511921
	4	11	109,08	0,7695	19,20890045	1708,626613	47,82175674
	5	12	109,08	0,7695	19,77759933	1710,113998	47,30484428
	6	13	109,08	0,7695	24,14245033	1637,903711	47,16504061

Fokus 9 z	Std	Run	Factor 1 A:	Factor 2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	zugfestigkeit
	13	1	102,6	0,81	7,583183289	1668,710078	43,42561369
	7	2	96,12	0,8505	6,283599854	1564,777975	39,91566353
	8	3	96,12	0,8505	9,893300056	1668,262773	44,64066509
	9	4	96,12	0,8505	5,884349823	1728,190532	41,18739842
	10	5	109,08	0,8505	14,1267004	1664,440555	45,17269531
	11	6	109,08	0,8505	9,660650253	1646,524488	44,13814866
	12	7	109,08	0,8505	11,65429974	1737,343675	45,05942214
	1	8	96,12	0,7695	6,028450012	1774,223135	43,94350507
	2	9	96,12	0,7695	8,497349739	1676,600498	44,89299182
	3	10	96,12	0,7695	8,286999702	1756,712575	45,82429739
	4	11	109,08	0,7695	15,82625008	1783,32844	46,39153531
	5	12	109,08	0,7695	5,982250214	1925,567432	42,04289881
	6	13	109,08	0,7695	6,118800163	1622,6007	43,11522337

Fortsetzung Anhang 11-3: Ergebnisse der Versuchsreihe zur statistischen Versuchsplanung

Fokus 10	Std	Run	Factor 1 A:	Factor2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	zugfestigkeit
xy	10	1	109,88	0,903	17,97685051	1822,991693	47,31138276
	11	2	109,88	0,903	12,84875011	1678,138519	46,65653164
	12	3	109,88	0,903	11,96605015	1645,125449	45,04402462
	13	4	103	0,86	12,15146669	1698,360493	46,06125283
	4	5	109,88	0,817	15,58920002	1712,024206	47,62517883
	5	6	109,88	0,817	14,24540043	1661,276467	46,18141143
	6	7	109,88	0,817	15,79039955	1733,026712	47,23739138
	1	8	96,12	0,817	11,45724964	1733,006788	46,51003506
	2	9	96,12	0,817	12,55879974	1708,196555	46,59187431
	3	10	96,12	0,817	13,35820007	1785,401625	46,40798118
	7	11	96,12	0,903	9,981300354	1795,910433	45,21142325
	8	12	96,12	0,903	11,63780022	1717,981936	45,20125409
	9	13	96,12	0,903	8,910349846	1658,426384	45,44285795

Fokus 10	Std	Run	Factor 1 A:	Factor2 B:	Response 1	Response 2 E-	Response 3
			LaserleistungW	Distance mm	Bruchdehnung%	Modul N/mm ²	zugfestigkeit
z	10	1	109,88	0,903	5,523650169	1684,969888	42,48163464
	11	2	109,88	0,903	6,435450077	1757,249471	43,48125408
	12	3	109,88	0,903	6,427999973	1744,912789	41,87585483
	13	4	103	0,86	4,140216668	1675,061569	38,83850454
	4	5	109,88	0,817	12,57069969	1676,065861	45,81500811
	5	6	109,88	0,817	11,69174957	1696,863161	45,68092476
	6	7	109,88	0,817	5,825049877	1732,432514	43,65990587
	1	8	96,12	0,817	4,168799877	1612,162005	39,60577157
	2	9	96,12	0,817	4,984799862	1703,970002	41,24288843
	3	10	96,12	0,817	4,93324995	1700,149268	41,55648232
	7	11	96,12	0,903	4,547450066	1623,185673	38,68364511
	8	12	96,12	0,903	3,72059989	1466,372612	33,49965252
	9	13	96,12	0,903	3,567899942	1404,106783	31,03387305

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub

universitäts
bibliothek

Diese Dissertation wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

DOI: 10.17185/duepublico/82744

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20241218-113220-3

Alle Rechte vorbehalten.