



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Hendrik Gerling

DOE-Parameterstudie mit Aluminium- Feedstock in der Fused Granulat Fabrication Prozessroute

Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion

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

Hendrik Gerling

**DOE-Parameterstudie mit Aluminium-
Feedstock in der Fused Granulat
Fabrication Prozessroute**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

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

Erstprüfer: Prof. Dr. Jens Telkamp
Zweitprüfer : M.Sc. Fatih Gözükük

Abgabedatum: 21.05.2025

Zusammenfassung

Hendrik Gerling

Thema der Bachelorthesis

DOE-Parameterstudie mit Aluminium-Feedstock in der Fused Granulat Fabrication Prozessroute

Stichworte

Fused Granulate Fabrication (FGF), Metall-Feedstock, Design of Experiments (DoE), additive Fertigung, Aluminium-Feedstock, Parameterstudie

Kurzzusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wird der FGF-Prozess mit einem funktionierenden Ti-6Al-4V-Feedstock untersucht, wobei der Feedstock auf Aluminium (AlMg14) umgestellt wird. Ausgehend von meiner vorherigen Studienarbeit werden relevante Prozessparameter mittels Design-of-Experiments (DoE) analysiert, um deren Einfluss auf die Bauteileigenschaften im Grünteil zu bewerten. Die Arbeit umfasst darüber hinaus eine Literaturrecherche, Entbinderungsversuche, Härteprüfungen nach ISO 2039-1:2001 sowie eine kritische Reflexion der Prozessstabilität. Ziel ist die Identifikation von Fehlerquellen und die Ableitung von Handlungsempfehlungen für zukünftige Optimierungen.

Summary

Hendrik Gerling

Title of the bachelor thesis

DOE parameter study with aluminium feedstock in the fused granulate fabrication process route

Keywords

Fused Granulate Fabrication (FGF), Metal-Feedstock, Design of Experiments (DoE), additive Manufacturing, Aluminium-Feedstock, Parameter Study

Abstract

This bachelor's thesis investigates the FGF process using a functional Ti-6Al-4V feedstock, with the sintering material switched to aluminium (AlMg14). Building on my previous study, relevant process parameters are analysed using Design-of-Experiments (DoE) to evaluate their influence on the component properties in the green state. The thesis also includes a literature review, debinding experiments, hardness tests according to ISO 2039-1:2001, and a critical reflection on process stability. The objective is to identify sources of error and derive recommendations for future optimizations.



Aufgabenstellung für Bachelorarbeit

Studierender: Hendrik Gerling

Matrikel-Nr. [REDACTED]

Prüfer: Prof. Dr. Jens Telkamp

Zweitprüfer: M.Sc. Fatih Gözükük

Thema: DOE-Parameterstudie mit Aluminium-Feedstock in der Fused Granulat Fabrication Prozessroute

Bei einem FGF-Drucker können sowohl Kunststoffe als auch Metalle im 3D-Druckverfahren verarbeitet werden, wobei Metalle in einem indirekten, sinterbasierten Prozess gedruckt werden. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird mit einem funktionierenden Feedstock aus Ti-6Al-4V gearbeitet. Aufbauend auf einer vorhergehenden Studienarbeit zu Startparametern wird Aluminium im FGF-Prozess verarbeitet. Zur Bewertung der relevanten Prozesseinflussgrößen und ihres gewichteten Einflusses auf die Bauteileigenschaften kommt die Design-of-Experiments-Methode zum Einsatz.

Im Rahmen der Bachelorarbeit sind daher folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

- Literaturrecherche zu Materialeigenschaften und Parametereinflüssen auf Aluminium und Ti-6Al-4V Feedstocks
- Durchführung eines DoEs für das Screening der Prozessparameter und Validierung der DoE im Grünteil und Sinterzustand
- Untersuchung des Entbinderungsverhaltens der DoE Proben
- Mechanische Charakterisierung mittels Härteprüfung im Grünteil und Sinterzustand
- Kritische Reflexion des Prozesses im Bezug zur Wiederholbarkeit
- Identifikation möglicher Fehlerquellen und Formulierung von Ursachenhypthesen
- Untersuchung von Bedtemperatur, Lüftergeschwindigkeit der Kühlung sowie der Retraction-Einstellungen des Slicers
- Auswertung der Ergebnisse und Ableitung von Handlungsempfehlungen für weitere Untersuchungen

Aufgrund nicht erhaltener Sinterproben muss auf die Betrachtung im Sinterzustand verzichtet werden. Diese Bachelorarbeit wird im Institut für Produktionstechnik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Granulat Herstellung Titan Feedstock	3
2.2 FGF	5
2.3 DOE.....	6
3 Grundlagen.....	9
3.1 Entbinderung	9
3.2 Oberflächenrauheit	10
3.3 Regression.....	10
3.4 Methoden und Maschinen zur Härteprüfung	11
4 Experimentelles Design (DOE) und Messmethodik.....	13
4.1 Maßhaltigkeit	16
4.2 Oberflächenrauheit	16
4.3 Dichtemessung	18
4.4 Entbinderung	19
5 Umsetzung	20
5.1 Grünteilzustand.....	21
5.1.1 Ergebnis Druckzeit	21
5.1.2 Messung Maßabweichung.....	23
5.1.3 Dichtemessung	24
5.1.4 Messung Linienrauheiten	25
5.2 Regressionsergebnisse.....	27
5.2.1 Druckzeit	27
5.2.2 Maßabweichung	28
5.2.3 Oberflächenrauheit.....	29
5.2.4 Dichte.....	30
5.3 Zielgrößenoptimierung	32
5.3.1 Messergebnisse für optimierte Parameter	34
5.3.2 Härteprüfung	35
5.4 Gewichtsmessung zur Bestimmung des Entbinderungsgrads	36

5.5	Untersuchung weiterer Druckparameter: Lüftergeschwindigkeit, Retraction	38
5.5.1	Lüftergeschwindigkeit	38
5.5.2	Retraction	40
6	Auswertung der Ergebnisse und Ableitung von Handlungsempfehlungen für weitere Untersuchungen	44
6.1	Interpretation der Ergebnisse	45
6.2	Ableitung von Handlungsempfehlungen	45
7	Zusammenfassung und Fazit	48
	Literaturverzeichnis	49
	Anhang	52

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α	-	Konstante
β_i	-	Regressionskoeffizienten
d	mm	Durchmesser des kugelförmigen Eindringkörpers
F_0	N	Vorlast für Härteprüfung
F_m	N	Reduzierte Prüfkraft
h	mm	Eindringtiefe nach Korrektur
h_1	mm	Eindringtiefe unter Belastung des Eindringkörpers mit der Prüfkraft
h_2	mm	Aufbiegung des Gestells unter Wirkung der Prüfkraft
h_r	mm	Reduzierte Eindringtiefe
ln	mm	Messstrecke
lr	mm	Einzelmeßstrecke
m_A	g	Masse der verdrängten Flüssigkeit
m_K	g	Masse des Prüfkörpers
n	-	Anzahl der Beobachtungen
p	-	Anzahl der Kovariablen
R_a	µm	Mittenrauwert
R_{max}	µm	Maximalwert der Rauheit
RSm	mm	Mittlere Rillenbreite
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
ρ_{Fl}	$\frac{g}{cm^3}$	Dichte der Flüssigkeit (z.B. destilliertes Wasser)
ρ_K	$\frac{g}{cm^3}$	Dichte des Prüfkörpers
V_K	cm^3	Volumen des Prüfkörpers
x_i	-	Kovariablen
y	-	Zielgröße
\hat{y}_i	-	Vom Modell vorhergesagte Werte der abhängigen Variablen

\bar{y}	-	Mittelwert der tatsächlichen Werte der abhängigen Variablen
y_i	-	Tatsächlicher Beobachtungswert der abhängigen Variablen
ϵ	-	Stochastische Komponente, Störgröße bzw. Fehlerterm

Abkürzungsverzeichnis

HB	Brinell-Härte
FGF	Fused Granulate Fabrication
DOE	Design of Experiments
FFF	Fused Filament Fabrication
PA6 GF30	Polyamid 6, 30% Glasfaseranteil
PLA	Polylactide
SA	Stearinsäure
IQR	Interquartilsabstand
Ti-6Al-4V	Titanlegierung mit 6% Aluminium und 4% Vanadium
LDPE	Low-Density Polyethylene - Polyethylen mit niedriger Dichte
HDPE	High-Density Polyethylene - Polyethylen mit hoher Dichte
MIM	Metal Injection Molding - Metallpulverspritzguss

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Gleichlauf Doppelextruder [2, S. 8]	4
Abbildung 2 Querschnitt eines gegenläufig rotierenden Extruders [2, S. 8].....	4
Abbildung 3 Ti6Al4V Pel4-01A Pellets der Firma element22 GmbH [7].....	5
Abbildung 4 FGF Prozess und FFF Prozess [8, S. 6]	6
Abbildung 5 Prozessroute zum fertigen Bauteil, in Anlehnung an materials figure 2 [8, S. 10]6	
Abbildung 6 Sieben Werkzeuge der Versuchsplanung [9, S. 64] in Anlehnung an [10]	8
Abbildung 7 Darstellung der Linienrauheiten Ra Der Kalibrierkörper [18, S. 20]	13
Abbildung 8 Darstellung des Messkoordinatensystems	16
Abbildung 9 Digitale Bügelmessschraube der Firma Mitutoyo [20]	16
Abbildung 10 Messaufbau mit Mitutoyo Surftest 301	17
Abbildung 11 Kalibermessung mit Mitutoyo Surftest 301	17
Abbildung 12 Messaufbau zur Tauchwägung.....	18
Abbildung 13 Aufbau zur Entbinderung in Aceton	19
Abbildung 14 DOE-Probekörper	20
Abbildung 15 Haupteffekt Screening zur Druckzeit.....	23
Abbildung 16 Haupteffekt Screening zum Mittelwert der totalen Maßabweichung	23
Abbildung 17 Haupteffekt Screening zur Grünteildichte	24
Abbildung 18 Vergrößerte Darstellung der Layerstruktur von DOE-Probe 01 im OrcaSlicer mit 0,2mm und 0,05mm	25
Abbildung 19 Haupteffekt Screening zur Linienrauheit	26
Abbildung 20 Pareto Diagramm der standardisierten Effekte für Druckzeit.....	28
Abbildung 21 Pareto Diagramm der standardisierten Effekte für Maßabweichungen.....	29
Abbildung 22 Pareto Diagramm der standardisierten Effekte für Oberflächenrauheit.....	30
Abbildung 23 Pareto Diagramm der standardisierten Effekte für Dichte.....	31
Abbildung 24 Darstellung der Regressionen und Ermittlung optimierter Parameter	33
Abbildung 25 Messschrieb der Härteprüfung von Probe C3	35
Abbildung 26 Boxplot zur Entbinderungszeit der DOE-Proben und optimierte Proben mit Sättigungsfunktionen.....	37
Abbildung 27 Druckprobe mit 0% Lüftung.....	38
Abbildung 28 Druckprobe mit 25% Lüftung.....	38
Abbildung 29 Druckprobe mit 50% Lüftung.....	39
Abbildung 30 Druckprobe mit 100% Lüftung.....	39
Abbildung 31 OrcaSlicer Retraction Probekörper	40
Abbildung 32 Retraction Probe mit 0,1mm - 0,3mm	41
Abbildung 33 Retraction Probe mit 0,1mm - 0,3mm Mikroskop mit Vergrößerung 8,5	41
Abbildung 34 Retraction Probe mit 0,38mm bis 0,41mm	42
Abbildung 35 Retraction Probe mit 0,38mm bis 0,41mm Mikroskop mit Vergrößerung 8,5	42
Abbildung 36 Retraction Probe mit 0,3mm bis 0,6mm	43
Abbildung 37 Darstellung der Korrelationen der Kovariablen und Zielvariablen	45
Abbildung 38 Boxplot zur Entbinderungszeit der DOE-Proben mit Sättigungsfunktion.....	60
Abbildung 39 Boxplot zur Entbinderungszeit mit optimierten Parametern	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Binder Zusammensetzung [11, S. 170].....	9
Tabelle 2 Einzelmessstrecken für die Messung von R-Kenngrößen für periodische Profile und von RSm für alle Profile [15, S. 7].....	10
Tabelle 3 Startparameter für DOE-Versuchsplan	14
Tabelle 4 DOE-Versuchsplan mit Materialvolumen und Druckzeit aus Gcode.....	15
Tabelle 5 Darstellung der Druckzeiten der DOE-Proben	22
Tabelle 6 Darstellung der Oberflächenrauheiten der DOE-Proben.....	26
Tabelle 7 Regressionsgleichung für Druckzeit	27
Tabelle 8 Koeffizienten der Regressionsgleichung für Druckzeit.....	27
Tabelle 9 Zusammenfassung der Regressionsgleichung für Druckzeit	27
Tabelle 10 Regressionsgleichung für Maßabweichung	28
Tabelle 11 Koeffizienten der Regressionsgleichung für Maßabweichungen	28
Tabelle 12 Zusammenfassung der Regressionsgleichung für Maßabweichung	29
Tabelle 13 Regressionsgleichung für Oberflächenrauheit	29
Tabelle 14 Koeffizienten der Regressionsgleichung für Oberflächenrauheit.....	29
Tabelle 15 Zusammenfassung der Regressionsgleichung für Oberflächenrauheit	30
Tabelle 16 Regressionsgleichung für Dichte	30
Tabelle 17 Koeffizienten der Regressionsgleichung für Dichte.....	31
Tabelle 18 Zusammenfassung der Regressionsgleichung für Dichte	31
Tabelle 19 Parametergewichtung und Bedeutung zur Optimierung.....	32
Tabelle 20 optimierter Parametersatz nach Gewichtung aus Tabelle 19	32
Tabelle 21 Prognostizierte Systemantworten	33
Tabelle 22 Optimierte Parameter mit Materialvolumen und Druckzeit aus Gcode	34
Tabelle 23 Darstellung der Oberflächenrauheiten der Proben mit optimierten Parametern	34
Tabelle 24 Darstellung der Messergebnisse zur Härteprüfung.....	36
Tabelle 25 Bindermittelzusammensetzung für Ti-6Al-4V ausgehend von links [26], [27], [28], [29].....	52
Tabelle 26 Kugleindruckhärte HB nach Eindringtiefe h und Prüfkraft F_m	53
Tabelle 27 Darstellung der Maßabweichungen der DOE-Proben mit Mittelwert der totalen Maßabweichung	54
Tabelle 28 Darstellung der Gewichtsmessung mit errechneter Grünteildichte.....	55
Tabelle 29 Darstellung der Maßabweichungen mit Mittelwert der totalen Maßabweichung	56
Tabelle 30 Darstellung der Maßabweichungen mit Mittelwert der totalen Maßabweichung der Proben mit optimierten Parametern	57
Tabelle 31 Darstellung der Gewichtsmessung mit errechneter Grünteildichte mit optimierten Parametern	58
Tabelle 32 Darstellung der Gewichtsverluste der DOE-Proben.....	59

1 Einleitung und Motivation

Die additive Fertigung hat sich als zukunftsweisender Produktionsansatz etabliert, insbesondere durch Verfahren, die sowohl polymerbasierte als auch metallische Materialien verarbeiten können. Insbesondere bei der Herstellung komplexer, endkonturnaher Bauteile bietet sie signifikante Vorteile, wie die Reduktion von Materialeinsatz und -abfall sowie die Flexibilität in der Bauteilgeometrie. Im Zuge ihrer Weiterentwicklung eröffnen sich zudem neue Anwendungsbereiche, in denen dieses Verfahren seine Stärken gezielt ausspielen kann – beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik oder im Automobilbau. Als Urformverfahren ermöglicht die additive Fertigung nicht nur die direkte Herstellung funktionsfähiger Prototypen, sondern auch die Produktion von Kleinserien und individuell angepassten Komponenten, wobei eine Vielzahl an Prozessrouten und Verarbeitungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen [1, S. 5].

Durch das Aufschmelzen von Pulver, Draht oder – wie im vorliegenden Fall – Granulat lassen sich dreidimensionale Strukturen mit hoher Komplexität erzeugen. Unterschiedliche Energiequellen, wie Laser, Elektronenstrahl, Plasma-Lichtbogen [1, S. 5] oder klassische Hotends, erlauben eine flexible Anpassung des Prozesses an spezifische Materialanforderungen und tragen zur Vielseitigkeit der additiven Fertigung bei. Diese breite Palette an Verfahren eröffnet die Möglichkeit, den Herstellungsprozess optimal an das jeweilige Material und die gewünschte Bauteilfunktion anzupassen.

Die Fused Granulat Fabrication (FGF) stellt dabei eine besonders vielversprechende Prozessroute dar, da sie die Verarbeitung sowohl polymerer als auch metallischer Feedstocks erlaubt. Während Kunststoffe direkt verarbeitet werden können, erfolgt die Herstellung metallischer Bauteile über einen indirekten, sinterbasierten Prozess, bei dem zunächst ein sogenanntes Grünteil erzeugt und anschließend gesintert wird. Diese Methode bietet nicht nur ökonomische Vorteile durch den Einsatz kostengünstiger Granulate, sondern ermöglicht auch eine bessere Kontrolle über die Materialeigenschaften im Endprodukt.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, die Verarbeitung eines neuen Aluminium-Feedstocks mittels des EXAM-255 3D-Druckers der Firma AIM3D eingehend zu untersuchen. Aufbauend auf den in einer vorangegangenen Studienarbeit ermittelten Ausgangsparametern soll eine systematische Design-of-Experiments (DoE) Studie durchgeführt werden, um die relevanten Prozessparameter weiter zu optimieren. Durch den gezielten Einsatz des DoE-Verfahrens können Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern identifiziert und deren Einfluss auf die Bauteilqualität quantifiziert werden.

Im Rahmen der Untersuchung werden DOE-Proben erstellt und hinsichtlich ihrer Dichte, Maßabweichungen, Oberflächenrauheit sowie Druckzeit analysiert. Auf Basis dieser Werte wird ein Regressionsmodell entwickelt, das zur Vorhersage und Optimierung der Prozessparameter dient. Dadurch sollen Druckparameter ermittelt werden, die – abhängig von den jeweiligen Zielkriterien – eine bestmögliche Bauteilqualität gewährleisten. Zudem fließen mechanische Eigenschaften, wie etwa Härteprüfungen im Grünteilzustand, in die Analyse ein, um die Funktionalität der Bauteile umfassend zu evaluieren.

Eine kritische Analyse der Prozesswiederholbarkeit sowie die Identifikation potenzieller Fehlerquellen ermöglichen weiterführende Einblicke in die Prozessstabilität und

Optimierungspotenziale. Diese Erkenntnisse sind nicht nur für die Verbesserung des untersuchten Verfahrens von Bedeutung, sondern liefern auch wertvolle Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung additiver Fertigungsprozesse im industriellen Maßstab. Die systematische Untersuchung der Prozessparameter und die anschließende Ableitung eines Regressionsmodells tragen somit maßgeblich dazu bei, die Effizienz und Zuverlässigkeit der FGF-Prozessroute zu steigern und zukünftige Anwendungen in verschiedenen Industriezweigen zu ermöglichen.

2 Stand der Technik

Um ein umfassendes Verständnis des FGF-Prozesses (Fused Granular Fabrication) zu erlangen, wird dieser von der Feedstock-Herstellung bis zum erfolgreichen Druck analysiert. Diese ganzheitliche Betrachtung ermöglicht es, ein vollständiges Bild des Prozesses zu gewinnen.

Im Folgenden wird die Herstellung eines Titan-Feedstocks detailliert beschrieben. Dieses Verfahren ist analog zur Aluminium-Feedstock-Herstellung und bietet somit einen repräsentativen Einblick in den Prozess. Die Untersuchung dieses spezifischen Materials dient als Beispiel, um die grundlegenden Prinzipien und Herausforderungen der Feedstock-Herstellung für den FGF-Prozess zu verdeutlichen. Da die Rezeptur für den AlMg14 Feedstock vom Hersteller nicht weiter bis auf 4,9% Backbone und 11,6% löslichen Kunststoff spezifiziert wurde, werden nur die grundlegenden Herstellungsverfahren erklärt. Der AlMg14 Feedstock wird als Blackbox betrachtet und kann auch nicht ohne Weiteres angepasst werden.

2.1 Granulat Herstellung Titan Feedstock

Die additive Fertigung von metallischen Bauteilen stützt sich häufig auf Verfahren wie Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), Elektronenstrahlschmelzen (EBM) und Techniken der direkten Energieeinbringung (DED). Obwohl diese Methoden etabliert sind, weisen sie signifikante Limitationen auf, die ihre breite Anwendung, insbesondere in der Massenproduktion, einschränken. Ein wesentlicher Nachteil ist die hohe Investition, die für die Anschaffung und den Betrieb der Anlagen erforderlich ist. Diese Kosten wirken sich direkt auf die Herstellungskosten aus und können die Verfahren für bestimmte Anwendungen unwirtschaftlich machen [2, S. 2]. Darüber hinaus stellen die verwendeten feinen Metallpulver eine Herausforderung im Hinblick auf die Arbeitssicherheit dar. Die Handhabung dieser Pulver erfordert spezielle Schutzmaßnahmen, um das Risiko von gesundheitsschädlichen Expositionen zu minimieren. Besonders gefährlich sind hierbei lungengängige Partikelgrößen um 5µm [3, S. 8], andere Quellen betrachten Partikel um 2,5µm als lungengängig, Partikel kleiner 1µm sind sogar in der Lage in den Blutkreislauf einzudringen [4, S. 1]. Die Technologien leiden auch unter dem Problem der Kontamination, da sich ungeschmolzenes und teilgeschmolzenes Metallpulver vermischen. Die anschließende Trennung und Wiederverwendung des Pulvers gestaltet sich daher komplex und aufwendig [5, S. 13].

Diese Einschränkungen haben dazu geführt, dass alternative AM-Verfahren, die kostengünstiger, sicherer und umweltverträglicher sind, zunehmend in den Fokus der Forschung gerückt sind. Hierbei ist die FGF-Prozessroute zu nennen, welche das Problem mit den lungengängigen Metallpulvern umgeht. Um die FGF-Prozessroute nutzen zu können, wird Granulat benötigt, welches aus mehreren Bindermaterialien besteht, in die das Metallpulver eingebunden wird [2, S. 2]. Dieses muss mittels mehrschrittigem Prozess erzeugt werden.

Zu Beginn wird ein Rezept aus Metallpulver, Bindermaterial und einem thermoplastischen Elastomer zusammengestellt. Wichtig ist eine optimale Fließfähigkeit während des Druckprozesses zu gewährleisten und gleichzeitig die mechanischen Eigenschaften des Endprodukts zu maximieren [6, S. 1]. Da wenige Hersteller diese Mixturen verraten, gibt es nur unvollständige Rezepturen. In Anlehnung an Table 1 aus [2, S. 4–6] sind in Tabelle 25 Rezepturen für Ti-6Al-4V (Titanlegierung mit 6% Aluminium und 4% Vanadium) zusammengefasst. Zu den für den Aluminium-Feedstock verwendeten Bindermitteln, Backbone, Tensiden, Mischer sowie des Filamentextruders liegen leider keine Angaben des

Herstellers vor. Es ist nur bekannt, dass der Feedstock aus 4,9% Backbone und 11,6% löslichen Kunststoff besteht. Das Rezept für Ti-6Al-4V (55-59 vol. %) weist aber bei der chemischen Entbinderung Ähnlichkeiten zu der hier verwendeten Entbinderungsprozedur auf. Die DOE-Proben werden auch in Aceton entbunden, um anschließend thermisch entbunden zu werden. Dieser Prozess wird in 3.1 Entbinderung weiter beschrieben und in 4.4 Entbinderung wird die Durchführung behandelt.

Die benötigten Bestandteile werden mit einem gleichläufigen Doppelextruder wie in Abbildung 1 oder einem gegenläufig rotierenden Extruder wie in Abbildung 2 vermischt. Um ein möglichst homogenes Granulat zu erzeugen, wird das Material wiederholt durch die Extruder extrudiert und granuliert, um danach wieder über einen Trichter in die Schnecken eingefüllt zu werden [2, S. 7].

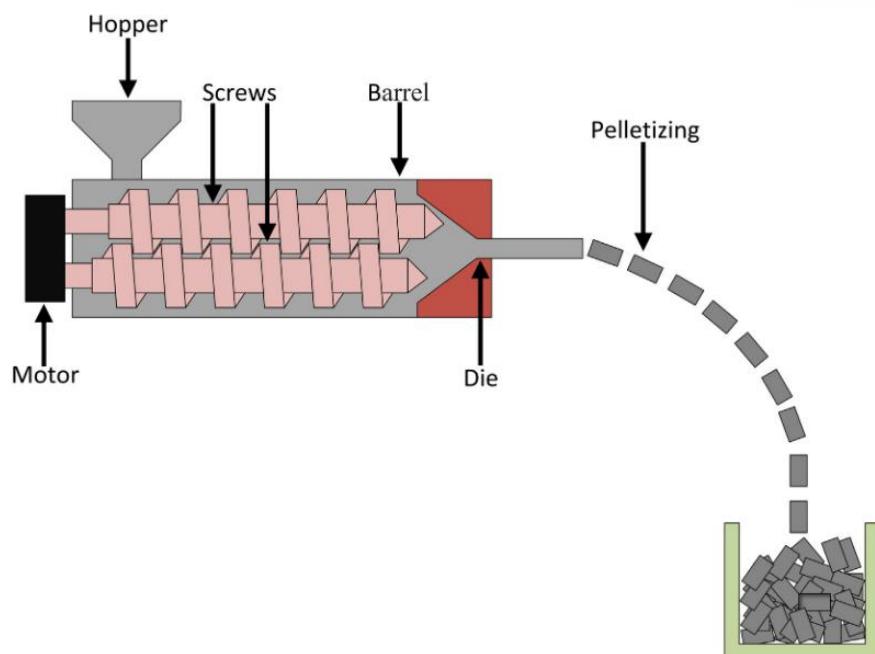


Abbildung 1 Gleichlauf Doppelextruder [2, S. 8]

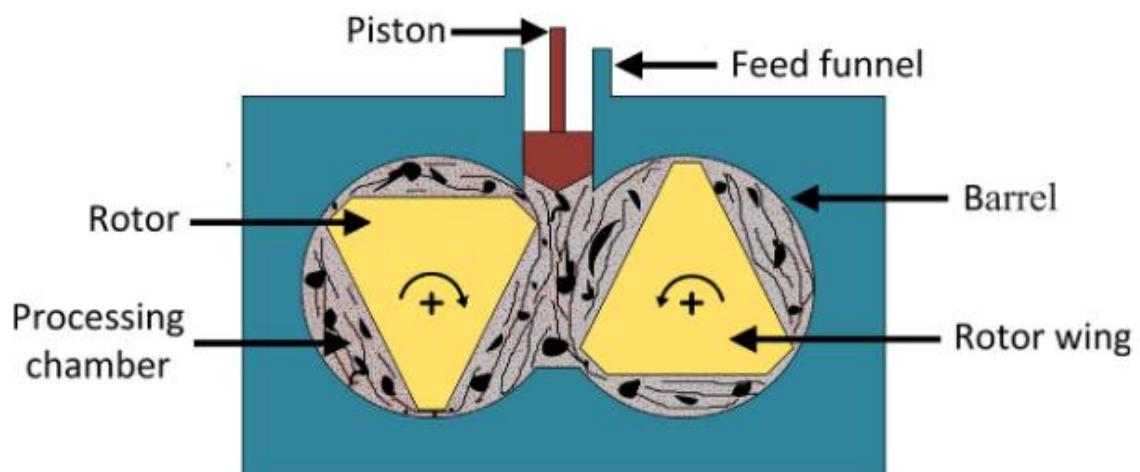


Abbildung 2 Querschnitt eines gegenläufig rotierenden Extruders [2, S. 8]

Nach ausreichender Vermischung wird das Material endgültig granuliert, um dann für den FGF-Prozess verwendet werden zu können. Abbildung 3 zeigt das finale Ti6Al4V-Granulat der Firma element22 GmbH. Jedes Pellet weist hierbei raue Bruchflächen auf, da es - wie in Abbildung 1 zu sehen - aus einem Strang abgetrennt wird. Auch zeigt sich ein homogenes Bild mit gleichförmigen Pellets. Dies ist für eine kontrollierte Extrusion im FGF-Extruder von entscheidender Bedeutung.



Abbildung 3 Ti6Al4V Pel4-01A Pellets der Firma element22 GmbH [7]

2.2 FGF

Die FGF Prozessroute zeichnet sich durch seine Aufschmelzung von Granulat aus. Es wird kein Filament wie bei der FFF (Fused filament fabrication) Prozessroute benötigt. Dies ermöglicht es bei FGF Materialien zu verdrucken, die zu spröde für eine Filamentförderung sind. Auch lassen sich sowohl diverse Kunststoffe als auch Metallfeedstocks verdrucken. Der Schneckenextruder, wie in Abbildung 4 dargestellt, ist in mehrere Zonen aufgeteilt. In der oberen Zone wird das Granulat nur gefördert. Danach folgt eine Zone, in der das Granulat unter Hitzeinfluss und Reibung erwärmt wird. Im Spitzbereich des Extruders wird das geschmolzene Material unter hohem Druck aus der Düse befördert [8, S. 8]. Die verlässliche gleichmäßige Dosierung des Materials ist bei diesem Verfahren eine Schwierigkeit. Hierfür muss das Granulat gleichkörnig sein [8, S. 9], darf nicht mit Fremdstoffen verunreinigt sein und darf nicht zu viel Wasser gebunden haben.

Um das finale metallische Bauteil zu erhalten, durchläuft das Bauteil die in Abbildung 5 aufgeführten Prozessschritte. Das mit FGF gedruckte Bauteil (Grünling) wird sowohl chemisch als auch thermisch entbindert. Danach wird das Bauteil auch als Bräunling bezeichnet. Anschließend wird im Sinterprozess durch atomare Diffusion das endgültige Metallgefüge hergestellt [8, S. 10].

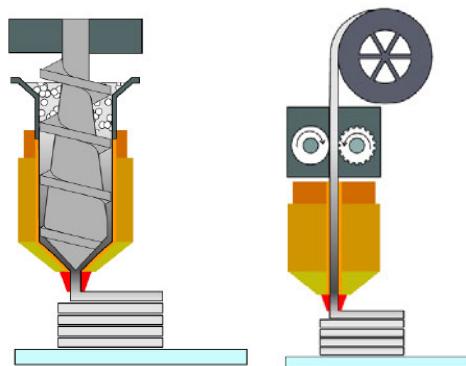


Abbildung 4 FGF Prozess und FFF Prozess [8, S. 6]

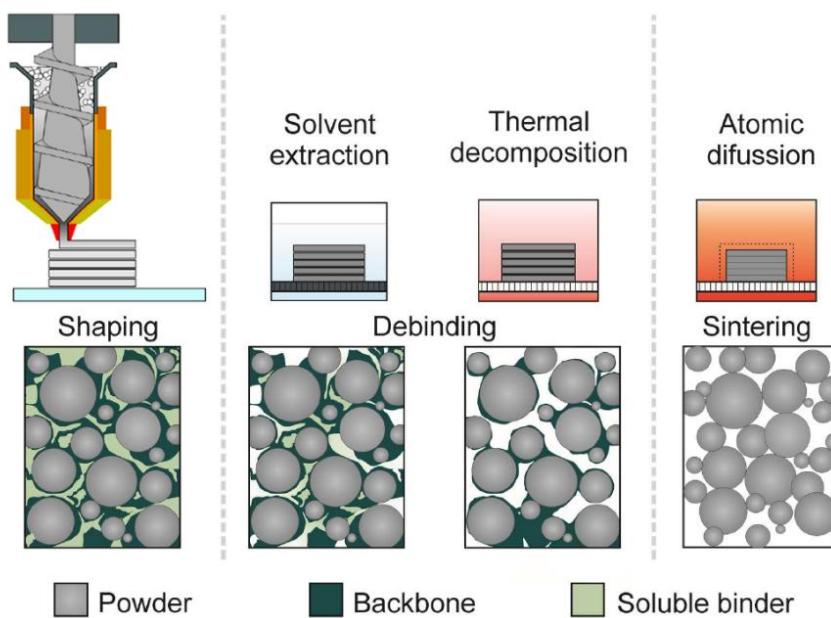


Abbildung 5 Prozessroute zum fertigen Bauteil, in Anlehnung an materials figure 2 [8, S. 10]

2.3 DOE

Design of Experiments (DOE) ist eine systematische Methode zur Planung und Durchführung von Versuchen, um die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern (Kovariablen) und Zielgrößen zu analysieren und zu optimieren. Ziel dieser Methodik ist es, Prozesse effizienter zu gestalten, die Produktqualität zu verbessern und Kosten zu senken. DOE spielt eine zentrale Rolle in der modernen Produktentwicklung und Fertigungsoptimierung, da es eine datenbasierte Entscheidungsfindung ermöglicht und Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge aufzeigt [9, S. 1].

Die DOE-Methodik basiert darauf, die wichtigsten Einflussfaktoren eines Prozesses zu identifizieren und gezielt zu variieren. Durch geplante Versuche können Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und den Zielgrößen nachgewiesen werden. Dabei ist wichtig, dass nur die Faktoren berücksichtigt werden, die im Versuchsplan enthalten sind [9, S. 8].

Ein empirisches Modell wird aus den Versuchsdaten abgeleitet, um die Beziehungen zwischen den Faktoren und Zielgrößen quantitativ zu beschreiben. Dieses Modell ist jedoch nur innerhalb des untersuchten Bereichs gültig; eine Extrapolation außerhalb der untersuchten Parameterbereiche ist nicht zulässig [9, S. 6].

Die Methodik von D. Shainin bietet einen praxisorientierten Ansatz zur Identifikation kritischer Störgrößen durch systematische Beobachtung und einfache Versuche [9, S. 21]. Dabei werden Toleranzen für wichtige Einflussfaktoren eingeengt, während weniger relevante Faktoren aufgeweitet werden [9, S. 8].

Für Versuchspläne mit vielen Faktoren (mehr als 5–6) empfiehlt sich die Untersuchung von nur zwei Stufen pro Faktor. Dies reduziert den Aufwand und ermöglicht dennoch die Bestimmung linearer Effekte sowie die Identifikation günstiger Stufen für Zielkonflikte [9, S. 26].

Als einheitlicher und vielfach benutzter Ansatz zur Beurteilung und Verbesserung hat sich die Six-Sigma-Strategie mit den fünf Phasen nach DMAIC erwiesen:

Define: Identifikation der Kundenanforderungen und Festlegung des Verbesserungsziels.

Measure: Festlegung von Messgrößen zur Beurteilung des Prozessergebnisses sowie Bestimmung der Prozessfähigkeit.

Analyze: Systematische Datensammlung und Analyse von Zusammenhängen zwischen Prozessparametern (Inputs) und Zielgrößen (Outputs).

Improve: Durchführung von Versuchsplanung und -auswertung zur Optimierung der Prozessparameter.

Control: Implementierung einer dauerhaften Regelung zur Sicherstellung der erreichten Verbesserung [9, S. 8–9].

Um häufige Fehler bei der Versuchsplanung zu vermeiden, sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Die Stufenwerte eines Faktors sollten weder zu nah beieinander liegen (Effekt verdeckt durch Zufallsstreuung) noch zu weit auseinanderliegen (schlechter Zusammenhang) [9, S. 28].
- Die Ausgangssituation sollte klar dokumentiert werden, um eine Kosten-Nutzen-Analyse zu ermöglichen [9, S. 42].

Eine umfassende Dokumentation ist entscheidend für den Erfolg eines DOE-Projekts. Dazu gehören:

- Darstellung der Ausgangslage
- Beschreibung der durchgeföhrten Versuche
- Ergebnisse und abgeleitete Maßnahmen
- Darstellung des erreichten Zustands sowie Kosten des Versuchs und erzielte Einsparungen [9, S. 42].

Durch eine sorgfältige Dokumentation wird sichergestellt, dass die gewonnenen Erkenntnisse als Grundlage für weitere Verbesserungen dienen können. Auf den Bereich der Kosten wird nachfolgend nicht eingegangen. Es wäre aber wichtig, hierfür Material, Maschinen, Wartung, Personal, Rüstkosten sowie Kosten für die Entbinderung und Sinterung (Fremdkosten) der Bauteile zu betrachten. Hierbei spielen auch die Größe und Komplexität der Bauteile eine Rolle. Auch die geforderten Toleranzen, Oberflächen und mechanische Anforderungen sind ausschlaggebend für die Prozesskosten. Auch sind Kosten für die Parameterstudienarbeit und Erprobung samt Misserfolgen einzurechnen. Die Bachelorarbeit beschäftigt sich aber eingehender mit der Machbarkeit und Optimierung als eine strenge Kostensicht einzunehmen.

Als weiterer Einstieg in die DOE-Methodik bietet sich die Methodik von D. Shainin an, die im Wesentlichen darauf beruht, die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Prozess zu erkennen. Deren Toleranzen werden so weit wie nötig eingeengt, wohingegen die Toleranz von unwichtigen Einflussfaktoren aufgeweitet wird [9, S. 64].

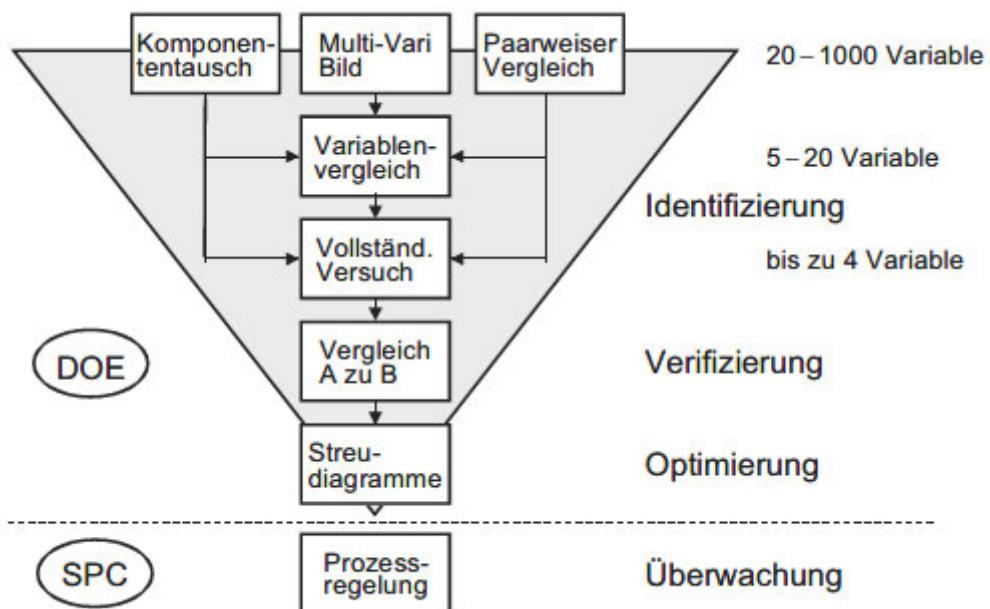


Abbildung 6 Sieben Werkzeuge der Versuchsplanung [9, S. 64] in Anlehnung an [10]

In Abbildung 6 sind die sieben Werkzeuge der Versuchsplanung nach D. Shainin nach Bhote 2 [10] dargestellt. In der Bachelorarbeit wurde ein vollständig faktorieller Versuchsplan erzeugt. Die Auswertung umfasst sowohl die Verifizierung als auch die Optimierung der DOE. Die Verifizierung wird mit Hilfe eines optimierten Parametersatzes durchgeführt. Um ein Streudiagramm für die optimierten Parameter zu erzeugen, ist die Stichprobe zu klein und nicht aussagekräftig genug. Es wird aber trotzdem auf die erhaltenen Messwerte und Ergebnisse eingegangen. Eine Prozessregelung und Überwachung sollte darauf aufbauend implementiert werden, um einen stabilen und wiederholbaren Prozess zu garantieren. Hierbei wäre darauf zu achten, die wichtigsten Kovariablen zu überwachen und ihre Schwankungen möglichst gering zu halten oder durch eine Regelung ihre Einflüsse auf den Prozess zu korrigieren. Für die Temperaturregelung des Hotends ist ein PID-Regler vorhanden, eine Flussratenregelung könnte noch zusätzlich implementiert werden. Bislang gibt es hier kein Feedback über die tatsächlich extrudierte Menge.

3 Grundlagen

3.1 Entbinderung

Bei der Entbinderung der Bauteile wird das Bindersystem entfernt, das typischerweise aus drei Hauptbestandteilen besteht. Der erste Bestandteil ist das sogenannte Backbone, das dafür sorgt, dass das Bauteil während des Entbinderungsprozesses seine Form behält. Der zweite Bestandteil ist eine Mischung aus Polymeren wie LDPE (Low-Density Polyethylene), HDPE (High-Density Polyethylene) und Wachs, die die Fließfähigkeit des Materials verbessern. Als dritter Bestandteil kommen Stabilisatoren, Verträglichkeitsvermittler und Dispersionsstoffe in geringen Mengen hinzu. Stearinsäure (SA) beispielsweise dient als Dispersionsmittel, das eine Homogenisierung zwischen Pulver und Binder fördert und Agglomeration sowie Phasentrennung verhindert [11, S. 169].

Die genaue Zusammensetzung von Bindersystemen wird in der Literatur selten detailliert beschrieben, da funktionierende Rezepturen oft das Ergebnis umfangreicher Tests sind und einen hohen kommerziellen Wert besitzen. Tabelle 1 zeigt jedoch eine beispielhafte Zusammensetzung eines Bindersystems mit den prozentualen Anteilen der einzelnen Komponenten [11, S. 170].

Table 1 – Binder composition.

Binder component	wt.%
PLA	55
EPDM	20
EVA	5
PW	15
SA	5

Tabelle 1 Binder Zusammensetzung [11, S. 170]

Ein Beispiel für ein häufig verwendetes Backbone-Material ist PLA (Polylactide), ein biobasierter Kunststoff aus Zuckerrohr, Maisstärke oder Maniok, zugehörig zur Familie der Polyester [12]. Aufgrund seiner niedrigen Schmelzviskosität und seiner Fähigkeit, hohe Füllstoffmengen aufzunehmen [13], eignet sich PLA hervorragend als Backbone-Material. Durch Kombination verschiedener Materialien, wie eingangs erwähnt LDPE, HDPE und Wachs, können die Fließeigenschaften des Feedstocks gezielt angepasst werden [6, S. 21].

In der Arbeit von Nötzel und Hannemann über die Entwicklung eines neuen Feedstocks für die FFF Prozessroute mit gesinterten Aluminiumteilen [14] wurde ein Bindersystem bestehend aus LDPE und Wachs im Verhältnis 1:1 verwendet, ergänzt durch Stearinsäure (SA) als Tensid. Das Tensid ersetzt teilweise das Wachs aufgrund ähnlicher Fließeigenschaften und verbessert dadurch die Verarbeitungseigenschaften der Mischung erheblich. Die rheologische Charakterisierung dieser Mischungen zeigt zudem, dass durch gezielte Anpassung des Mischungsverhältnisses die Fließfähigkeit optimiert werden kann – ein entscheidender Faktor für die Herstellung komplexer Bauteile mit hoher geometrischer Genauigkeit [6, S. 1].

3.2 Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheitsmessung wird in Anlehnung an die DIN EN ISO 4288 durchgeführt, welche Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit spezifiziert [15, S. 1]. Die Oberflächenmessung muss rechtwinklig zur Rillenrichtung der zu messenden Oberfläche erfolgen. Die Messung muss daher in Z-Richtung, wie in Abbildung 8 dargestellt, erfolgen. Des Weiteren spezifiziert die Norm die zu verwendende Einzelmeßstrecke l_r und Messstrecke l_n . Diese lassen sich anhand der Schichthöhen ermitteln. Nach der Tabelle 2 ergeben sich somit für die Schichthöhen von 0,05-0,1mm die Einzelmeßstrecke l_r von 0,25mm. Die Schichthöhen 0,15-0,2mm werden anhand einer Einzelmeßstrecke von 0,8mm vermessen. Aus einer 5-fachen Wiederholung der Einzelmeßstrecke l_r ergibt sich die Meßstrecke l_n von 1,25mm für eine Schichthöhe von 0,05-0,1mm und eine Meßstrecke l_n von 4mm für eine Schichthöhe von 0,15-0,2mm.

RS_m [mm]	Einzelmeßstrecke	Meßstrecke
	l_r [mm]	l_n [mm]
$0,013 < RS_m \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < RS_m \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < RS_m \leq 0,4$	0,8	4
$0,4 < RS_m \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < RS_m \leq 4$	8	40

Tabelle 2 Einzelmessstrecken für die Messung von R-Kenngrößen für periodische Profile und von RS_m für alle Profile [15, S. 7]

3.3 Regression

Für die Erarbeitung und Bewertung der Regressionsmodelle werden einige Zusammenhänge und Berechnungsgrundlagen erläutert. Die linearen Regressionsmodelle sollen als Beispiel dienen.

Die Klasse der linearen Regressionsmodelle werden nach der Form von Formel (3.1) aufgebaut [16, S. 19]. Mit Hilfe des Regressionsmodells werden die Eigenschaften der Zielvariablen y in Abhängigkeit der Kovariablen erklärt. Die Größe ϵ wird auch als stochastische Störgröße oder Fehlerterm bezeichnet. Sie dient dazu, zufällige, nicht von den Kovariablen erklärte Abweichungen vom Erwartungswert zu erklären. Es gibt überdies unterschiedliche Modelle, je nach Art der betrachteten Zielvariablen. Zielvariablen und Kovariablen können hierbei stetig, binär oder kategorial sein. In komplexeren Modellen werden zusätzlich Zeitskalen und Variablen zur Beschreibung der räumlichen Anordnung von Daten oder Gruppierungsvariablen als Kovariablen betrachtet [16, S. 33].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (3.1)$$

Formel (3.1) lässt sich nahezu beliebig erweitern und um komplexere Terme ergänzen. Quadratische sowie Kubische Zusammenhänge von Kovariablen lassen sich mit Hilfe geeigneter Software errechnen und in das Regressionsmodell einfügen. Eine wichtige Kenngröße für die Qualitätsbeurteilung des Regressionsmodells ist das Bestimmtheitsmaß R^2 , welche durch die Formel (3.2) berechnet wird. Wenn das Bestimmtheitsmaß Eins/1 erreicht

ist, ist das Modell perfekt an die Daten angepasst. Je geringer das Bestimmtheitsmaß, desto weniger Daten werden von dem Regressionsmodell erklärt [16, S. 99].

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.2)$$

Das Bestimmtheitsmaß wird an die Anzahl der Kovariablen und die Größe der Stichprobengröße angepasst, indem die Formel (3.2) erweitert wird. Es ergibt sich der Zusammenhang nach (3.3), das korrigierte Bestimmtheitsmaß.

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2) \quad (3.3)$$

Zur Vergleichbarkeit verschiedener Modelle eignet sich das korrigierte Bestimmtheitsmaß besser, da eine Korrektur für die Anzahl an Kovariablen vorgenommen wird und das Gütemaß nicht notwendigerweise ansteigt, wenn eine neue Kovariable hinzukommt. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß ist sehr populär in Statistikprogrammen, es wird aber von der Verwendung abgeraten. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß steigt bereits an, wenn eine Kovariable mit einem p-Wert von 0,3 in das Modell aufgenommen wird. Eine „Bestrafung“ für die Aufnahme der Kovariable ist zu gering [16, S. 161].

3.4 Methoden und Maschinen zur Härteprüfung

Zur Härteprüfung wurde der Kugelindruckversuch nach ISO 2039-1:2001 verwendet. Die „ISO 2039 legt ein Verfahren zur Bestimmung der Härte von Kunststoffen und Hartgummi mit Hilfe eines belasteten kugelförmigen Eindringkörpers fest“ [17, S. 4]. Die Norm schreibt hierfür eine Konditionierung der Prüfung in Nomalklima vor. Außerdem wird in der Norm der Hinweis gegeben, eine Mindestprobengröße von 20mm x 20mm nicht zu unterschreiten, um mögliche Randeinflüsse bei der Prüfung zu verringern. Diese Maßgabe wird durch die Probekörper im Folgenden nicht erfüllt. Der Probekörper wird mit einer Vorlast F_0 von $(9,8 \pm 0,1)$ N belastet und die Anzeige des Messgerätes für die Eindringtiefe genutzt. Danach wird für 2s bis 3s die Prüfkraft F_m stoßfrei aufgeracht. Die Kugelindruckhärte HB (Brinell Härte) wird nach der Gleichung (3.4) berechnet [17, S. 4–8]. Die HB wird in Newton pro Quadratmillimeter angegeben.

$$HB = \frac{F_r}{\pi d h_r} \quad (3.4)$$

F_r stellt die reduzierte Prüfkraft dar, welche nach (3.5) errechnet. d entspricht dem Durchmesser des kugelförmigen Eindringkörpers.

$$F_r = F_m \times \frac{\alpha}{(h - h_r) + \alpha} = F_m \times \frac{0,21}{h - 0,25 + 0,21} \quad (3.5)$$

F_m stellt die Prüfkraft dar, α ist eine Konstante, die zusammen mit h_r , welche die reduzierte Eindringtiefe in Millimeter darstellt, aus einer Veröffentlichung von H. H. Racké und Th. Fett, Materialprüfung, 10 (1968) Nr. 7, S. 226 entnommen wurde. h , die Eindringtiefe nach der Korrektur hinsichtlich der Aufbiegung des Gestells, setzt sich aus h_1 und h_2 zusammen und errechnet sich nach (3.6).

$$h = h_1 - h_2 \quad (3.6)$$

Nach Messung der Eindringtiefe und unter Kenntnis der Prüfkraft F_m lässt sich aus Tabelle 26 die Kugeleindruckhärte ermitteln.

4 Experimentelles Design (DOE) und Messmethodik

Um die Parameter (Flussrate, Drucktemperatur sowie Schichthöhe) aus der Studienarbeit weiter zu untersuchen, wurde ein Startpunkt anhand dieser Parameter festgelegt.

Aus der Abbildung 7, welche im Rahmen der Studienarbeit entstanden ist, lässt sich der Startpunkt für eine gute Oberfläche auf 150% Flussrate und eine Drucktemperatur von 150°C festlegen, da hier besonders gute Oberflächenrauheiten gemessen werden konnten. Es wurde nur die Oberfläche als Qualitätsmerkmal für eine qualitativ hochwertige Probe verwendet. Maßhaltigkeit sowie Dichte der Proben wurde bis dahin noch nicht untersucht. Trotzdem lassen die Oberflächen der Proben und Ihre Beschaffenheit einen Rückschluss auf einen stabilen und qualitativ ausreichenden Prozess zu. Proben mit hoher Oberflächenrauheit deuten abseits von größerer Schichthöhe auf ungleicheichmäßige Strangablage hin. Über die Infillqualität (hohe Dichte, gute Layerhaftung und gleichmäßige Struktur) lässt sie daher auch Rückschlüsse zu.

Grundlage dieser Grafik sind mehrere Probekörper, bei denen Parameter, Temperatur und Extrusion jeweils von 120-160°C und 160-120% Flussrate über die Schichthöhe geändert wurden. Aus den Mittelwerten der Linienrauheiten wurde Abbildung 7 generiert, welche die Oberflächenrauheit in Abhängigkeit der Körperhöhe darstellt. Da jeder Bereich mit 5mm Breite einem bestimmten Parametersatz zugeordnet werden kann, ergibt sich eine übersichtliche Darstellung der Parameterauswirkungen auf die Oberflächenrauheit.

Die Oberflächenrauheit wird als Maßstab für eine homogene Extrusion und einen gleichmäßigen Prozess angesehen. Die Schichthöhe wurde hierbei nicht untersucht und bei 0,1mm belassen. In der DOE-Studie wird der Einfluss auf die Oberflächenrauheit weiter untersucht.

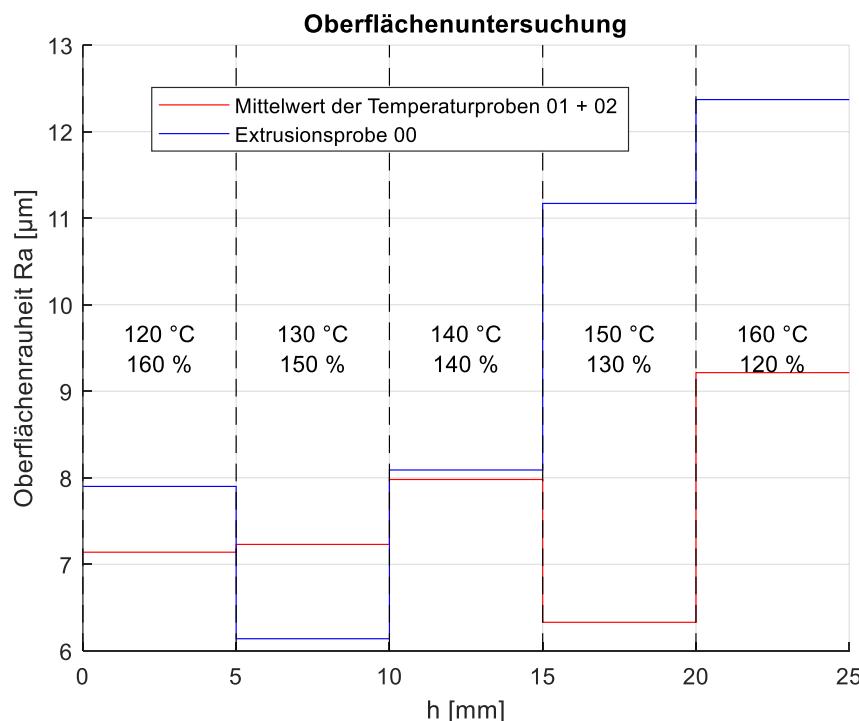


Abbildung 7 Darstellung der Linienrauheiten Ra Der Kalibrierkörper [18, S. 20]

Somit ergeben sich für die Erstellung des DOE-Versuchsplans die Startparameter aus Tabelle 3. Aus diesen Startwerten wurde ein Versuchsplan, dargestellt in Tabelle 4, mit 3 Faktoren erstellt, wobei jeder Faktor 3 bzw. 4 Stufen umfasst. Daraus ergeben sich insgesamt 48 Versuchsproben.

Flussrate [%]	Drucktemperatur [°C]	Schichthöhe [mm]
150	150	0,1

Tabelle 3 Startparameter für DOE-Versuchsplan

Die Flussrate wird mit vier Stufen im Abstand von jeweils 10% von 130% bis 160% variiert. Die Drucktemperatur wird mit drei Stufen im Abstand von jeweils 15°C von 120°C bis 150°C variiert. Die Schichthöhe wird mit vier Stufen im Abstand von jeweils 0,05mm von 0,05mm bis 0,2mm variiert. Der Parameterbereich wurde möglichst groß gewählt, um Randartefakte zu minimieren und ein robustes Modell zu erhalten. Zur Analyse der Auswirkungen der Druckparameter auf das fertige Bauteil und den Druckprozess werden die Dichte, die Oberflächenrauheit sowie die totale Maßabweichung als Zielparameter definiert. Die Maßabweichung wird mit der Mitutoyo Bügelmessschraube aus Abbildung 9 ermittelt. Diese Maßabweichung lässt dann Schlüsse auf Über- oder Unterextrusion der Proben zu. Im Anschluss wird die Oberflächenrauheit der Proben mit Hilfe der Mitutoyo Surftest 301 vermessen, um die Gleichmäßigkeit der Extrusion und des Prozesses beurteilen zu können. Abschließend wird die Dichte der Grünlinge ermittelt, um Rückschlüsse auf die Extrusion und Füllung des Bauteils zu erhalten. Da alle Proben mit 100% Infill gedruckt werden, sollte die Dichte möglichst hoch sein.

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Flow rate	Print temperature	Layer height	materialVolume [mm ³]	Print time [min.]
38	1	1	1	160	120	0,1	3734,4	47
6	2	1	1	130	135	0,1	3020,2	46
19	3	1	1	140	135	0,15	3268,9	32
35	4	1	1	150	150	0,15	3506,3	32
9	5	1	1	130	150	0,05	3021	97
1	6	1	1	130	120	0,05	3021,7	96
41	7	1	1	160	135	0,05	3724,1	96
28	8	1	1	150	120	0,2	3481,8	24
15	9	1	1	140	120	0,15	3267,4	32
27	10	1	1	150	120	0,15	3509,2	32
17	11	1	1	140	135	0,05	3274,9	95
21	12	1	1	140	150	0,05	3262,2	96
42	13	1	1	160	135	0,1	3726,1	48
47	14	1	1	160	150	0,15	3747	32
43	15	1	1	160	135	0,15	3739,9	32
12	16	1	1	130	150	0,2	3025,6	23
36	17	1	1	150	150	0,2	3497,6	23
48	18	1	1	160	150	0,2	3720,6	23
29	19	1	1	150	135	0,05	3495,2	96
40	20	1	1	160	120	0,2	3712,8	24
16	21	1	1	140	120	0,2	3250,3	23
3	22	1	1	130	120	0,15	3032,9	32
8	23	1	1	130	135	0,2	3018,5	24
32	24	1	1	150	135	0,2	3484,6	24
22	25	1	1	140	150	0,1	3250,5	48
30	26	1	1	150	135	0,1	3483,2	48
10	27	1	1	130	150	0,1	3024,3	48
20	28	1	1	140	135	0,2	3246,5	24
13	29	1	1	140	120	0,05	3252,6	97
44	30	1	1	160	135	0,2	3717,5	24
2	31	1	1	130	120	0,1	3031,7	48
37	32	1	1	160	120	0,05	3718,4	97
39	33	1	1	160	120	0,15	3736,8	32
18	34	1	1	140	135	0,1	3257,2	48
45	35	1	1	160	150	0,05	3719,5	97
33	36	1	1	150	150	0,05	3486,6	97
23	37	1	1	140	150	0,15	3272,2	32
5	38	1	1	130	135	0,05	3021,7	97
7	39	1	1	130	135	0,15	3034,3	32
25	40	1	1	150	120	0,05	3488,4	96
4	41	1	1	130	120	0,2	3018,4	23
14	42	1	1	140	120	0,1	3254	48
34	43	1	1	150	150	0,1	3490,3	48
11	44	1	1	130	150	0,15	3036,8	32
46	45	1	1	160	150	0,1	3719	48
26	46	1	1	150	120	0,1	3486,8	48
24	47	1	1	140	150	0,2	3258	24
31	48	1	1	150	135	0,15	3499,6	32

Tabelle 4 DOE-Versuchsplan mit Materialvolumen und Druckzeit aus Gcode

4.1 Maßhaltigkeit

Zur Prüfung der Maßhaltigkeit wurde jede Probe dreifach mit einer Bügelmessschraube der Firma Mitutoyo wie in Abbildung 9 vermessen. Die Messergebnisse wurden in Tabelle 27 zusammengetragen. Hierbei wurden die Proben nach dem Koordinatensystem aus Abbildung 8 mit jeweils drei Wiederholungen in jeder Koordinatenrichtung vermessen.

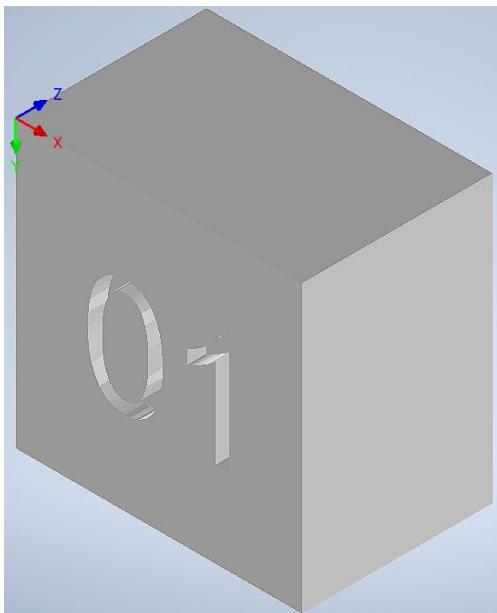


Abbildung 8 Darstellung des Messkoordinatensystems



Abbildung 9 Digitale Bügelmessschraube der Firma Mitutoyo [20]

Die Bügelmessschraube weist einen Messbereich von 0-25mm auf und weist einen maximal zulässigen Fehler bei Kontakt mit der gesamten Messfläche bei 20°C von $\pm 2\mu\text{m}$ auf [19].

4.2 Oberflächenrauheit

Um die Linienrauheiten der Proben zu messen, kommt das Mitutoyo Surftest 301 Messgerät zum Einsatz. Die DOE-Proben werden in den Schraubstock aus Abbildung 10 eingespannt und entlang der Z-Richtung abgefahrene.



Abbildung 10 Messaufbau mit Mitutoyo Surftest 301

Das Mitutoyo Surftest 301 Messgerät wurde vor Beginn der Messungen mit Hilfe einer Kalibriermessung geprüft. In Abbildung 11 ist der Kalibrierkörper mit aufgezeichnetem Messschrieb dargestellt. Der Ra-Wert weicht um 8,26% vom Referenzwert ab, was auf den Verschleiß der Messspitze des Mitutoyo Surftest-Messgeräts zurückzuführen ist. Ebenso zeigt der Rmax-Wert eine Abweichung von 9,1% zum Sollwert. Trotz dieser Differenzen kann die Messung mit dem Mitutoyo Surftest als ausreichend präzise betrachtet werden. Mit Wiederholungsmessungen und einem Korrekturfaktor könnte dieser Fehler korrigiert werden, sofern es sich um einen systematischen Fehler handelt. Ist die Messspitze des Tasters jedoch stark oder ungleichmäßig abgenutzt, würde ein zufälliger Fehler auftreten, der nicht mehr korrigierbar wäre.

Im Folgenden wurde kein Korrekturfaktor angewendet. Da jedoch alle Proben gleichermaßen von dem systematischen Fehler betroffen sind, bleibt ein Vergleich der Proben untereinander möglich.



Abbildung 11 Kalibriermessung mit Mitutoyo Surftest 301

Die Oberflächenmessungen werden zur Beurteilung des Prozesses in Bezug auf Stabilität und Gleichförmigkeit verwendet.

4.3 Dichtemessung

Mit Hilfe der Auftriebstechnik-Messung wird die Bauteildichte der Proben gemessen. Analog zum beschriebenen Messaufbau aus [21, S. 4] wurde eine Tauchwägung durchgeführt. In Abbildung 12 ist der verwendete Messaufbau zu sehen. Die DOE-Proben werden zunächst im trockenen Zustand 3-mal verwogen und anschließend an einem dünnen Draht in destilliertes Wasser gehängt. Die Temperatur des destillierten Wassers wird durch eine Messung der Umgebungstemperatur ermittelt. Da sich das destillierte Wasser ausreichend lange im Raum befunden hat, wird die Raumtemperatur zu Beginn des Experiments und am Ende gemessen und ein Mittelwert generiert. Mit Hilfe einer Temperatur-Dichtetabelle für Wasser wird die genaue Dichte des destillierten Wassers errechnet. Die Messung sollte zudem schnell durchgeführt werden, um den Einfluss der Verdunstung auf die Messergebnisse klein zu halten. [21, S. 4]



Abbildung 12 Messaufbau zur Tauchwägung

Für die Berechnung der Dichte der untersuchten Probe benötigt man nun noch die Masse im trockenen Zustand m_K und die Masse der vom Körper verdrängten Flüssigkeit ρ_{Fl} . Durch Einsetzen der Formel (4.1) in (4.2) fällt die Ermittlung des Volumens des Körpers V_K weg und alle Größen sind bekannt.

$$m_A = \rho_{Fl} \times V_K \quad (4.1)$$

Nach Formel (4.2) lässt sich somit aus ermittelten Messwerten die Dichte eines Bauteils ermitteln.

$$\rho_K = \frac{m_K}{V_K} = \frac{m_K}{m_A} \times \rho_{Fl} \quad (4.2)$$

4.4 Entbinderung

Die chemische Entbinderung wird untersucht, um den Zusammenhang zwischen der erzielten Grünteildichte und der Entbinderungsgeschwindigkeit zu bestimmen. Dafür erfolgt der Prozess in drei Schritten. Nach drei Stunden wird die Entbinderung unterbrochen und die Proben werden getrocknet, um eine Gewichtszunahme durch Aceton-Sättigung zu vermeiden. Anschließend werden alle DOE-Proben erneut gewogen. Dieser Ablauf wird nach weiteren sechs Stunden sowie nach weiteren neun Stunden wiederholt, sodass der gesamte Entbinderungsvorgang insgesamt 18 Stunden dauert. Eine Entbinderung von 10-11% wird angestrebt. Bei zu geringer Gewichtsabnahme muss der Entbinderungsvorgang weiter fortgesetzt werden. Abbildung 13 zeigt den Versuchsaufbau der Entbinderung. Die Proben wurden auf Gitterstrukturen aus PA6 GF30 (Polyamid 6, 30% Glasfaseranteil) platziert und in einem Becherglas mit Aceton übergossen. Das Becherglas wird mithilfe einer Heizplatte auf 55 °C erwärmt, während ein Magnetrührer mit 600 Umdrehungen pro Minute für eine gleichmäßige Durchmischung sorgt. Um sicherzustellen, dass der Flüssigkeitspegel des Acetons stets oberhalb der Proben bleibt, wird bei Bedarf Aceton nachgefüllt. Nach jeder Nachfüllung schwankt die Temperatur kurzfristig um $\pm 2^\circ\text{C}$.

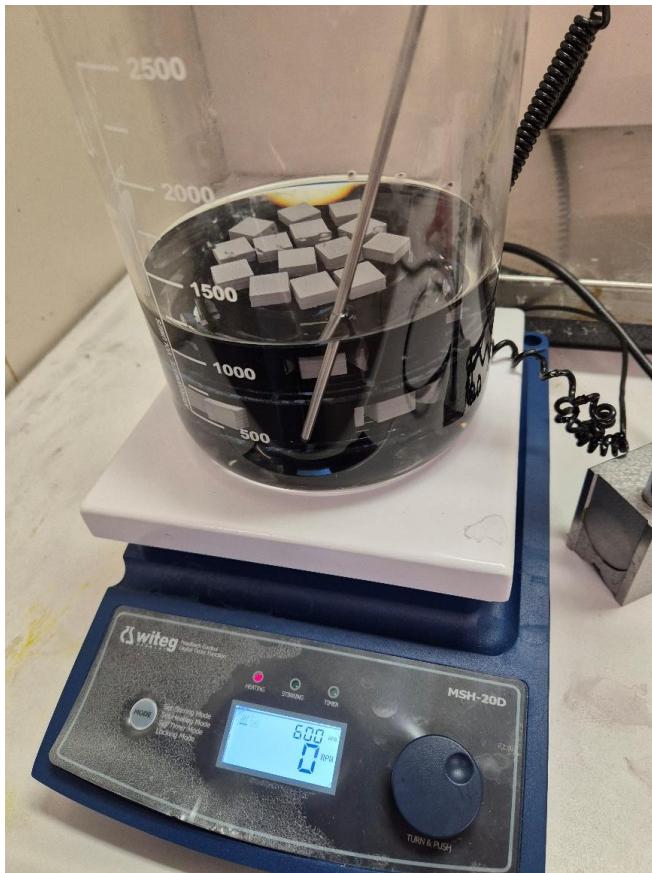


Abbildung 13 Aufbau zur Entbinderung in Aceton

5 Umsetzung

Nach zahlreichen Fehldrucken und technischen Herausforderungen mit dem AIM3D-Drucker konnten schließlich 48 DOE-Proben erfolgreich gefertigt werden. Abbildung 14 zeigt die verschiedenen Probekörper, deren Unterschiede deutlich erkennbar sind. Alle Proben sind mit der Unterseite nach oben ausgerichtet, sodass die erste gedruckte Schicht sichtbar ist. Einige Proben weisen unvollständig gefüllte erste Schichten auf. Zudem war es bei bestimmten Proben erforderlich, die Beschriftung manuell nachzubearbeiten, um eine eindeutige Unterscheidbarkeit sicherzustellen.

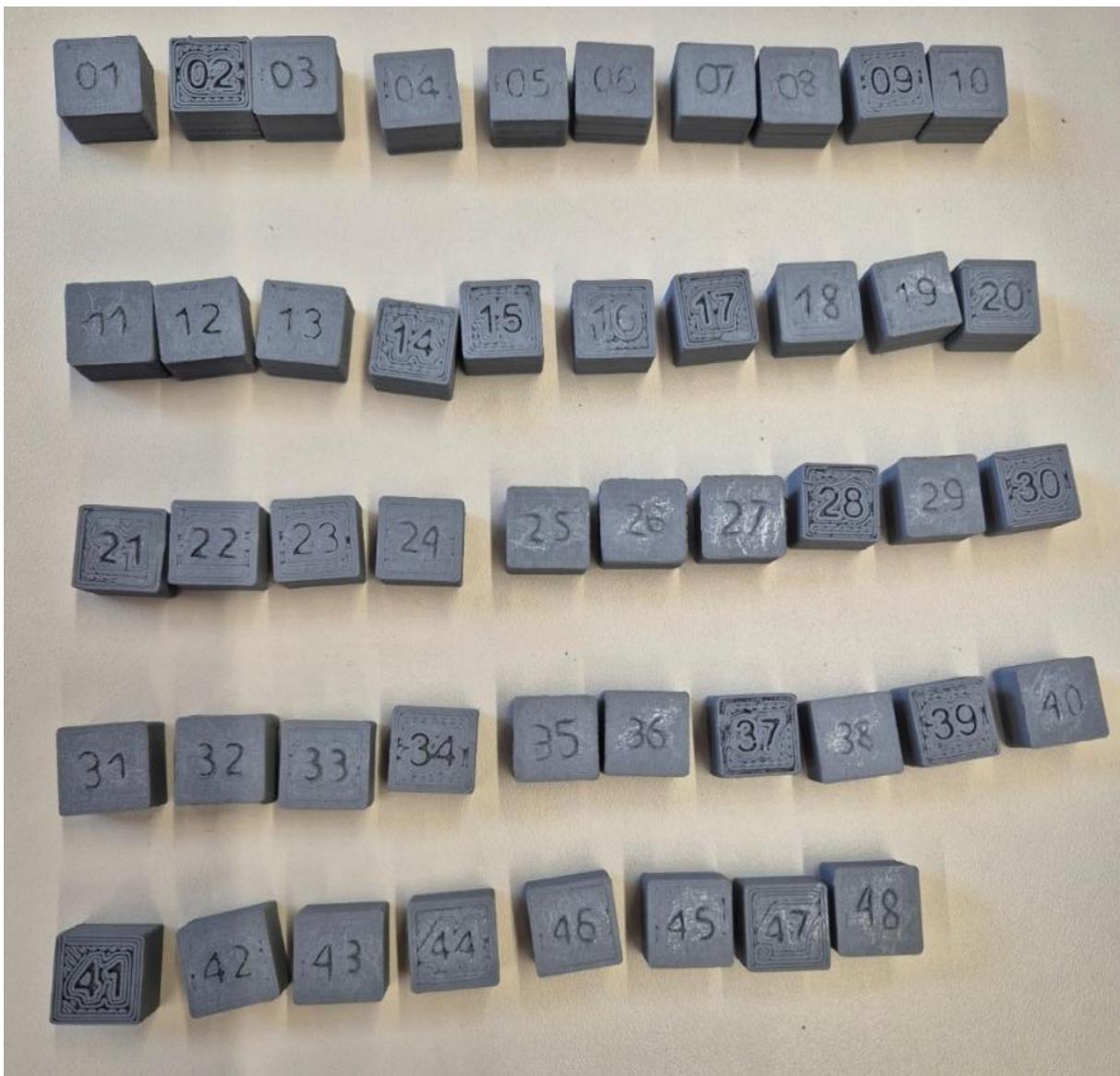


Abbildung 14 DOE-Probekörper

5.1 Grünteilzustand

5.1.1 Ergebnis Druckzeit

Die Ergebnisse für die Druckzeit der DOE-Proben basiert auf der Zeitausgabe aus dem Simplify3D generierten G-Code. Die erhaltenen Druckzeiten wurden in der Tabelle 5 zusammengefasst. Anschließend wurde ein Haupteffekt-Screening durchgeführt. Die Ergebnisse daraus sind in Abbildung 15 dargestellt und zeigen, dass nur die Schichthöhe einen signifikanten Einfluss auf die Druckzeit hat. Aufgrund der Arbeitsweise eines 3D-Druckers kann ein Einfluss der Flussrate auf die Druckzeit nur bestehen, wenn der Drucker nicht genügend Material in der vorgegebenen Zeit extrudieren kann. Dann würde eine entsprechend programmierte Slicer-Software den Druck verlangsamen, um die Extrusion zu ermöglichen. Da jedoch kein Feedbacksystem vorhanden ist, berechnet die Software die erforderliche Extrusionsmenge ausschließlich auf Basis mechanischer Parameter sowie Filamentparameter wie Durchmesser, Schrittweite des Extrudermotors und Übersetzungsverhältnis von Motor zu Schnecke.

RunOrder	Flow rate	Print temperature	Layer height	Print time [min.]
1	160	120	0,1	47
2	130	135	0,1	46
3	140	135	0,15	32
4	150	150	0,15	32
5	130	150	0,05	97
6	130	120	0,05	96
7	160	135	0,05	96
8	150	120	0,2	24
9	140	120	0,15	32
10	150	120	0,15	32
11	140	135	0,05	95
12	140	150	0,05	96
13	160	135	0,1	48
14	160	150	0,15	32
15	160	135	0,15	32
16	130	150	0,2	23
17	150	150	0,2	23
18	160	150	0,2	23
19	150	135	0,05	96
20	160	120	0,2	24
21	140	120	0,2	23
22	130	120	0,15	32
23	130	135	0,2	24
24	150	135	0,2	24
25	140	150	0,1	48
26	150	135	0,1	48
27	130	150	0,1	48
28	140	135	0,2	24
29	140	120	0,05	97
30	160	135	0,2	24
31	130	120	0,1	48
32	160	120	0,05	97
33	160	120	0,15	32
34	140	135	0,1	48
35	160	150	0,05	97
36	150	150	0,05	97
37	140	150	0,15	32
38	130	135	0,05	97
39	130	135	0,15	32
40	150	120	0,05	96
41	130	120	0,2	23
42	140	120	0,1	48
43	150	150	0,1	48
44	130	150	0,15	32
45	160	150	0,1	48
46	150	120	0,1	48
47	140	150	0,2	24
48	150	135	0,15	32

Tabelle 5 Darstellung der Druckzeiten der DOE-Proben

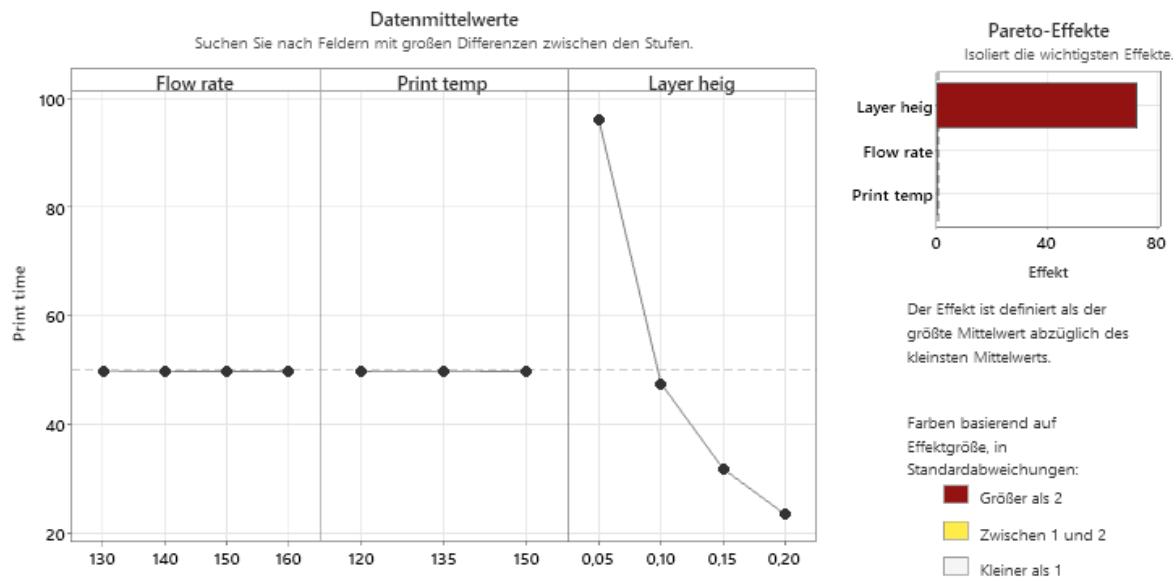


Abbildung 15 Haupteffekt Screening zur Druckzeit

5.1.2 Messung Maßabweichung

Die Messwerte für die Maßabweichungen wurden in Tabelle 27 gesammelt. Mit Hilfe der Software Minitab wurde ein Haupteffekt-Screening, wie in Abbildung 16 dargestellt, für die Mittelwerte der totalen Maßabweichung durchgeführt, um die Haupteffekte der Einflussgrößen Flussrate, Drucktemperatur und Schichthöhe zu bestimmen.

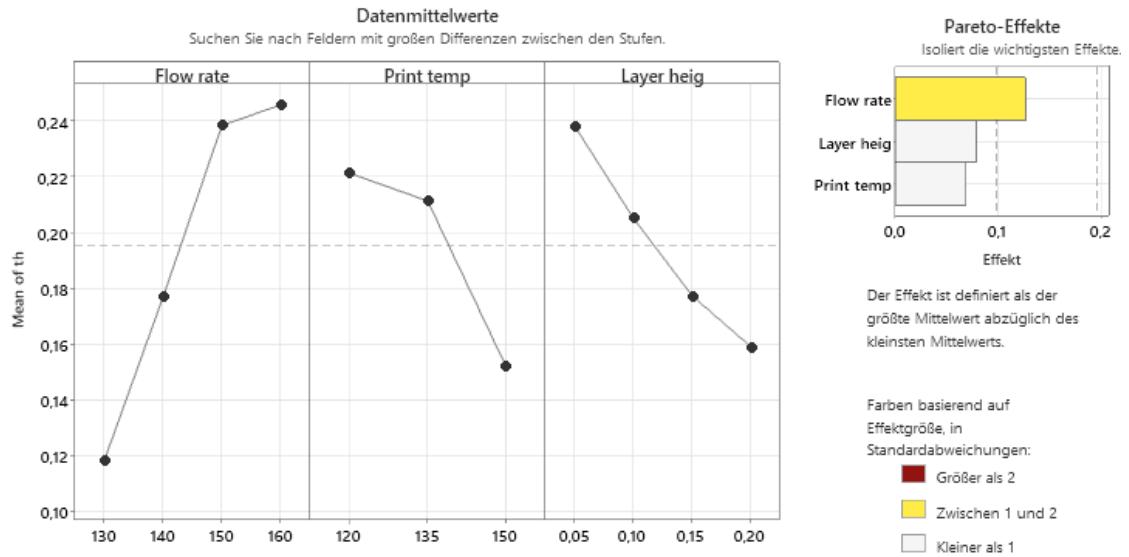


Abbildung 16 Haupteffekt Screening zum Mittelwert der totalen Maßabweichung

Es zeigt sich, dass sowohl die Drucktemperatur als auch die Schichthöhe nur einen geringen Einfluss auf die totale Maßabweichung hat. Der Flussrate lässt sich aber ein mittlerer Einfluss zuordnen. Dieses Verhalten lässt sich durch die Überextrusion erklären, welche einen direkten Effekt auf die Maßhaltigkeit des fertigen Grünlings hat. Die Schichthöhe beeinflusst nur, durch wie viele Layer die Z-Richtung des Bauteils aufgebaut wird. Eine Abweichung der Bauteilmaße lässt sich hierauf nicht zurückführen. Die Drucktemperatur hat auch nur einen indirekten Einfluss auf die Maßhaltigkeit. Bei einer zu geringen oder zu hohen Fließfähigkeit kommt es

zur Unterextrusion bzw. Überextrusion, welche sich wiederum in der Maßhaltigkeit widerspiegelt. Somit liegt das Hauptaugenmerk für die Maßabweichung und deren Minimierung in der Optimierung der Flussrate.

5.1.3 Dichtemessung

Wie in 4.3 Dichtemessung bereits erläutert, wurden die Grünteile mittels Tauchwägung gewogen, um mit Formel (4.2) die Dichte der Proben zu ermitteln. In Tabelle 28 wurden die Messergebnisse gesammelt dargestellt. Mit Hilfe der Tabelle 4 lassen sich die farblich hervorgehobenen DOE-Proben mit der höchsten Dichte (rote Einfärbung) und die Proben mit der geringsten Dichte (grüne Einfärbung) den Druckparametern zuordnen.

Auf Basis dieser Messergebnisse wurde erneut ein Haupteffekt-Screening durchgeführt. Das Haupteffekt-Screening, dargestellt in Abbildung 17, zeigt einen großen Einfluss auf die Dichte für die Schichthöhe. Nennenswert ist auch noch der kleine Einfluss der Flussrate; die Drucktemperatur hat hingegen einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Grünteildichte.

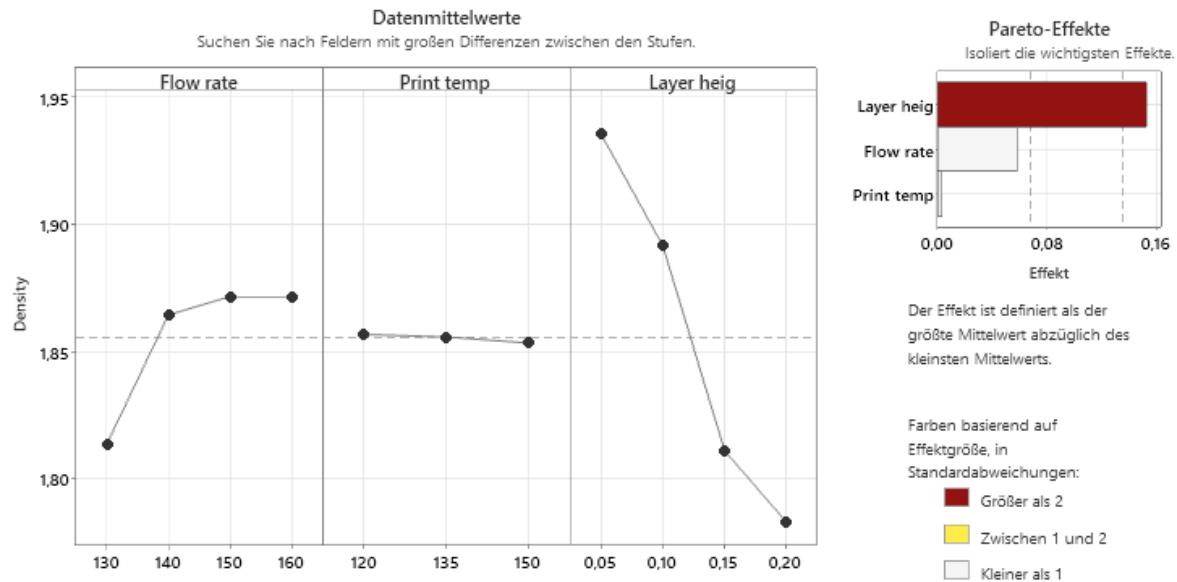


Abbildung 17 Haupteffekt Screening zur Grünteildichte

Eine geringere Schichthöhe erhöht somit die Dichte der Proben. Eine feinere Zerlegung des Bauteils in Z-Richtung und damit ein häufigerer Auftrag von Material in kleineren Mengen sorgt für die Steigerung der Dichte. Durch den Schichtaufbau gibt es Fehlstellen und Lücken, die für eine geringere Dichte sorgen. In Abbildung 18 sieht man den großen Unterschied zwischen einer Schichthöhe von 0,2mm zu 0,05mm. Über das gesamte Bauteil summieren sich diese Fehlstellen auf.

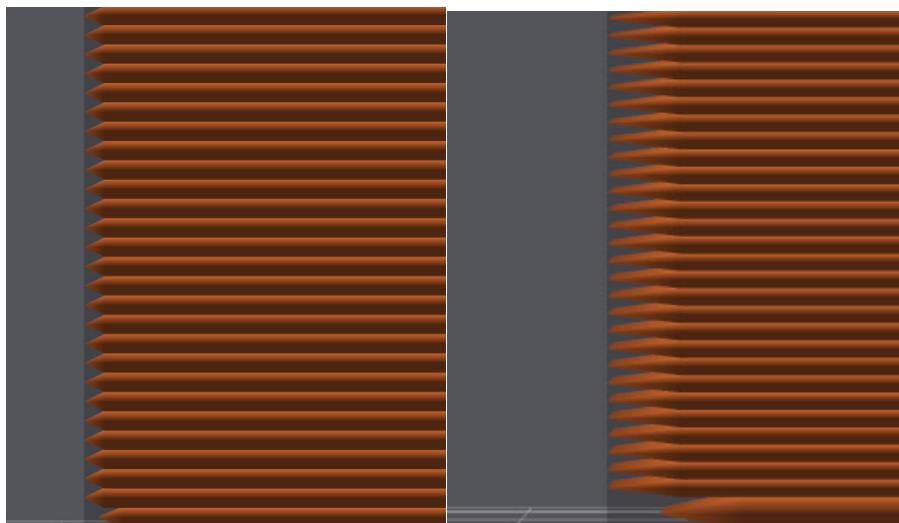


Abbildung 18 Vergrößerte Darstellung der Layerstruktur von DOE-Probe 01 im OrcaSlicer mit 0,2mm und 0,05mm

5.1.4 Messung Linienrauheiten

Nach 4.2 Oberflächenrauheit wurden die DOE-Proben vermessen. Die Messergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt. Ein Haupteffekt-Screening, dargestellt in Abbildung 19, zeigt einen großen Effekt der Schichthöhe auf die Linienrauheit des Grünteils. Die Flussrate hat einen mittleren Einfluss auf die Linienrauheit. Die Drucktemperatur hat hingegen nur einen kleinen Einfluss.

RunOrder	PtType	Blocks	Flow rate	Print temperature	Layer height	Surface Roughness Ra [µm]
1	1	1	160	120	0,1	7,600
2	1	1	130	135	0,1	9,990
3	1	1	140	135	0,15	18,970
4	1	1	150	150	0,15	20,620
5	1	1	130	150	0,05	12,540
6	1	1	130	120	0,05	8,370
7	1	1	160	135	0,05	8,880
8	1	1	150	120	0,2	22,150
9	1	1	140	120	0,15	13,510
10	1	1	150	120	0,15	19,330
11	1	1	140	135	0,05	7,300
12	1	1	140	150	0,05	6,930
13	1	1	160	135	0,1	9,620
14	1	1	160	150	0,15	16,260
15	1	1	160	135	0,15	15,570
16	1	1	130	150	0,2	19,360
17	1	1	150	150	0,2	19,320
18	1	1	160	150	0,2	23,220
19	1	1	150	135	0,05	6,780
20	1	1	160	120	0,2	28,290
21	1	1	140	120	0,2	16,590
22	1	1	130	120	0,15	16,290
23	1	1	130	135	0,2	19,210
24	1	1	150	135	0,2	30,280
25	1	1	140	150	0,1	9,520
26	1	1	150	135	0,1	7,940
27	1	1	130	150	0,1	8,200
28	1	1	140	135	0,2	21,340
29	1	1	140	120	0,05	6,310
30	1	1	160	135	0,2	21,560
31	1	1	130	120	0,1	8,810
32	1	1	160	120	0,05	12,850
33	1	1	160	120	0,15	22,130
34	1	1	140	135	0,1	9,670
35	1	1	160	150	0,05	8,150
36	1	1	150	150	0,05	8,200
37	1	1	140	150	0,15	18,690
38	1	1	130	135	0,05	7,120
39	1	1	130	135	0,15	15,250
40	1	1	150	120	0,05	15,890
41	1	1	130	120	0,2	7,720
42	1	1	140	120	0,1	18,580
43	1	1	150	150	0,1	7,710
44	1	1	130	150	0,15	7,360
45	1	1	160	150	0,1	15,250
46	1	1	150	120	0,1	8,080
47	1	1	140	150	0,2	17,870
48	1	1	150	135	0,15	16,510

Tabelle 6 Darstellung der Oberflächenrauheiten der DOE-Proben

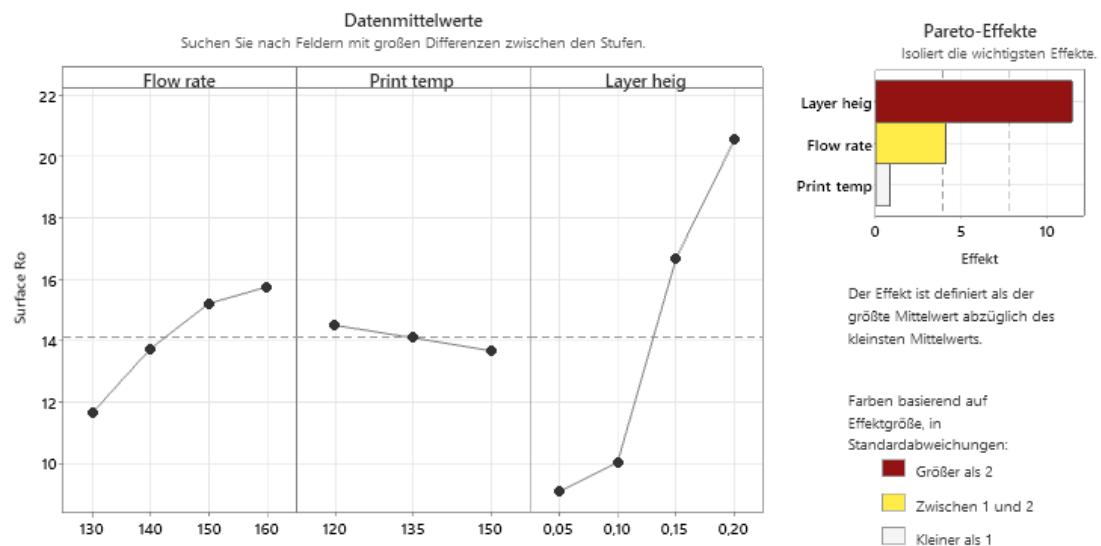


Abbildung 19 Haupteffekt Screening zur Linienrauheit

5.2 Regressionsergebnisse

Um optimierte Parameter für den Grünteilzustand der Proben zu erhalten, wurde eine Regressionsanalyse in Minitab mit den aufgenommenen Messwerten für Maßabweichung, Linienrauheit sowie Dichte durchgeführt. Es ergeben sich somit vier Regressionsgleichungen für die zu optimierenden Zielgrößen.

5.2.1 Druckzeit

Wie schon in 5.1.1 dargestellt und gezeigt wurde, hängt die Druckzeit ausschließlich von der gewählten Schichthöhe ab. Somit ergibt sich für die Regression ein entsprechender Ansatz, wie in Tabelle 7 erfasst wurde.

$$\begin{aligned} \text{Print time} = & 145 - 1 \text{ Flow rate} + 0,002 \text{ Print temperature} - 468,5 \text{ Layer height} \\ & + 0,01 \text{ Flow rate} * \text{Flow rate} \\ & - 0,00001 \text{ Flow rate} * \text{Flow rate} * \text{Flow rate} \end{aligned}$$

Tabelle 7 Regressionsgleichung für Druckzeit

Die entsprechenden Koeffizienten in Tabelle 8 zeigen deutlich, dass nur die Schichthöhe mit einem p-Wert von kleiner als 0,001 statistisch signifikant einen stark negativen Effekt auf die Druckzeit hat. Auch das Pareto Diagramm der standardisierten Effekte für Druckzeit in Abbildung 20 zeigt die Signifikanz dieses Parameters.

Term	Koef	SE Koef	95%-KI	t-Wert	p-Wert
Konstante	144,948	7280,41	(-14547,5; 14837,4)	0,02	0,984
Flow rate	-0,807	151,53	(-306,6; 305,0)	-0,01	0,996
Print temperature	0,002	0,13	(-0,3; 0,3)	0,02	0,987
Layer height	-468,500	28,91	(-526,8; -410,2)	-16,21	0,000
Flow rate*Flow rate	0,006	1,05	(-2,1; 2,1)	0,01	0,996
Flow rate*Flow rate*Flow rate	-0,000	0,00	(-0,0; 0,0)	-0,01	0,995

Term	VIF
Konstante	
Flow rate	1099006,94
Print temperature	1,00
Layer height	1,00
Flow rate*Flow rate	4425763,50
Flow rate*Flow rate*Flow rate	1116527,78

Tabelle 8 Koeffizienten der Regressionsgleichung für Druckzeit

Aus der Zusammenfassung in Tabelle 9 lässt sich eine hohe Erklärungskraft mit $R^2 > 85\%$ erkennen, die gemessenen Werte werden somit zu 86,21% erklärt. Auch mit dem korrigierten R^2 Wert werden noch 84,57% der Werte erklärt. Dies deutet auf eine ausreichend große Anzahl an Beobachtungen hin. Auch neue Daten werden zu 82% von dem Modell erklärt [22].

S	R-Qd	R-Qd(kor)	PRESS	R-Qd(prog)	AICc	BIC
11,1960	86,21%	84,57%	6872,34	82,00%	378,50	388,80

Tabelle 9 Zusammenfassung der Regressionsgleichung für Druckzeit

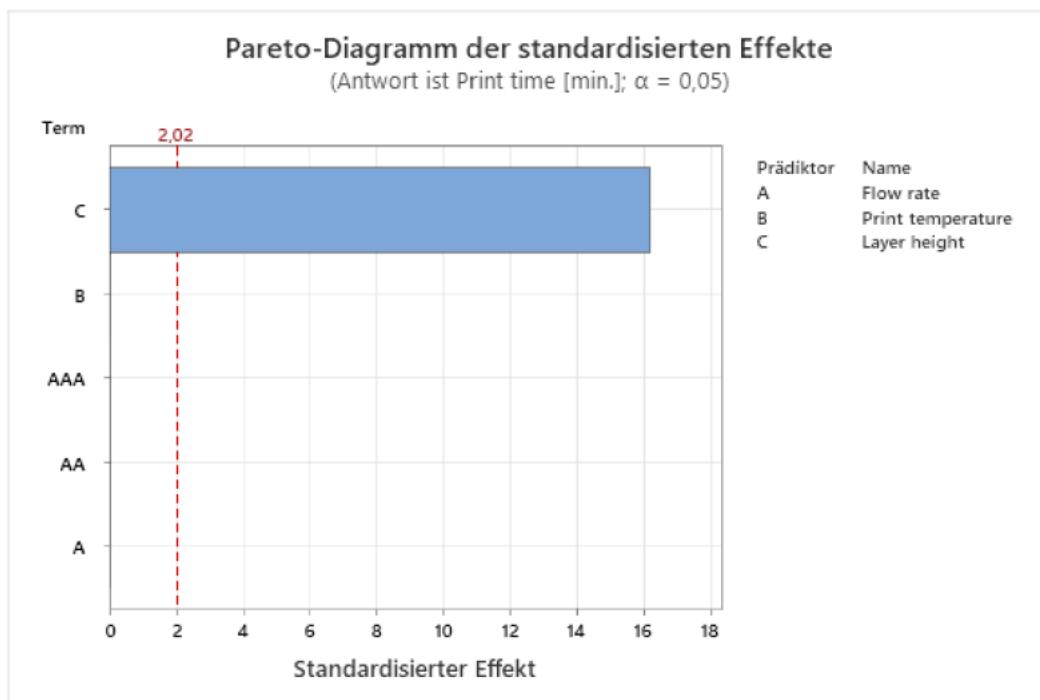


Abbildung 20 Pareto Diagramm der standardisierten Effekte für Druckzeit

5.2.2 Maßabweichung

Aus den Messwerten der Tabelle 29 ergibt sich die Regressionsgleichung in Tabelle 10.

$$\begin{aligned}
 \text{Mean of the total} &= -0,069 + 0,00443 \text{ Flow rate} \\
 \text{dimensional} &\quad - 0,00231 \text{ Print temperature} \\
 &\quad - 0,529 \text{ Layer height}
 \end{aligned}$$

Tabelle 10 Regressionsgleichung für Maßabweichung

Die zugehörigen Koeffizienten in Tabelle 11 verdeutlichen, dass im Regressionsmodell die Flussrate einen signifikant positiven Einfluss auf die Maßabweichung ausübt. Die Drucktemperatur zeigt einen schwach signifikanten negativen Effekt, während die Schichthöhe einen moderat signifikanten negativen Einfluss auf die Maßabweichung hat. In Abbildung 21 Pareto Diagramm der standardisierten Effekte für Maßabweichungen zeigen sich die beschriebenen Effekte auf die Zielgröße der Maßabweichung.

Term	Koef	SE Koef	95%-KI	t-Wert	p-Wert	VIF
Konstante	-0,069	0,235	(-0,542; 0,404)	-0,30	0,769	
Flow rate	0,00443	0,00122	(0,00197; 0,00689)	3,63	0,001	1,00
Print temperature	-0,00231	0,00111	(-0,00455; -0,00006)	-2,07	0,044	1,00
Layer height	-0,529	0,244	(-1,021; -0,037)	-2,17	0,036	1,00

Tabelle 11 Koeffizienten der Regressionsgleichung für Maßabweichungen

Die Analyse der Modellgüte Tabelle 12 zeigt eine moderate Erklärungskraft. Mit einem R^2 von 33,51% erklärt das Modell etwa ein Drittel der Varianz der abhängigen Variable. Der korrigierte R^2 -Wert von 28,98% berücksichtigt die Anzahl der Beobachtungen und bestätigt, dass das Modell nicht übermäßig komplex ist. Das prognostizierte R^2 von 21,44% deutet darauf hin, dass die Vorhersagekraft für neue Daten begrenzt ist [22].

S	R-Qd	R-Qd(kor)	PRESS	R-Qd(prog)	AICc	BIC
0,0945180	33,51%	28,98%	0,464415	21,44%	-82,99	-75,06

Tabelle 12 Zusammenfassung der Regressionsgleichung für Maßabweichung

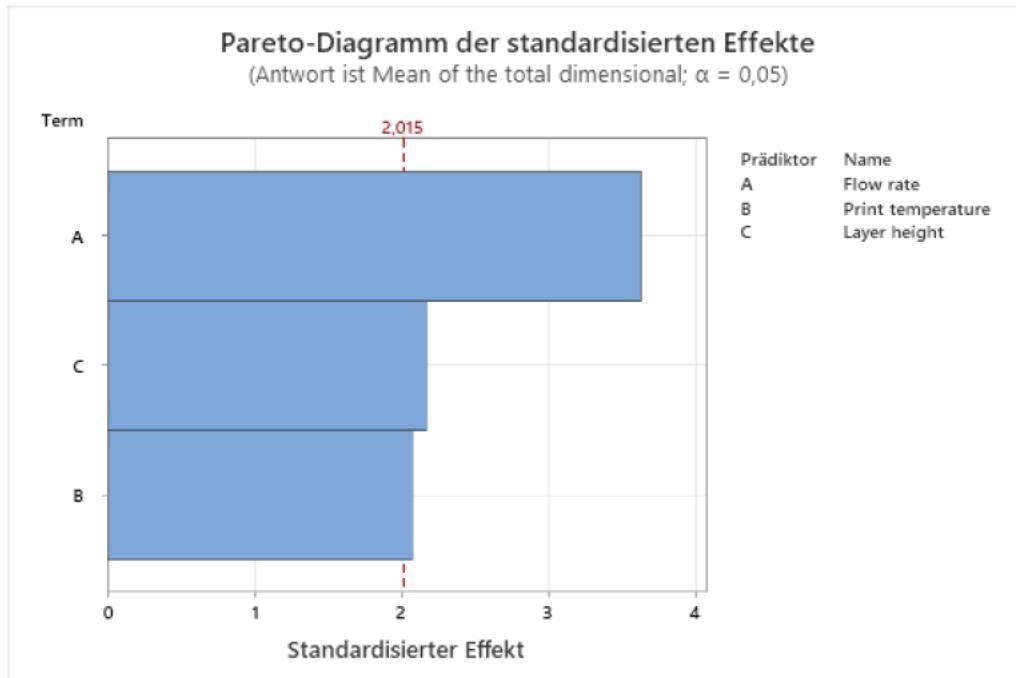


Abbildung 21 Pareto Diagramm der standardisierten Effekte für Maßabweichungen

5.2.3 Oberflächenrauheit

Die Regressionsgleichung für die Oberflächenrauheit ergibt sich in Tabelle 13.

$$\begin{aligned}
 \text{Surface Roughness} &= -12,34 + 0,1375 \text{ Flow rate} \\
 \text{Ra} &= -0,0277 \text{ Print temperature} \\
 &+ 82,0 \text{ Layer height}
 \end{aligned}$$

Tabelle 13 Regressionsgleichung für Oberflächenrauheit

Die Koeffizienten in Tabelle 14 zeigen, dass die Schichthöhe den stärksten signifikanten Einfluss auf die Oberflächenrauheiten ausübt. Die Flussrate weist ebenfalls einen statistisch gesicherten positiven Zusammenhang auf, während der Effekt der Drucktemperatur nicht signifikant von Null verschieden ist ($p = 0,557$). Diese Befunde werden durch Abbildung 22 Pareto Diagramm der standardisierten Effekte für Oberflächenrauheit unterstützt, welches die dominante Rolle der Schichthöhe als Haupteinflussfaktor verdeutlicht.

Term	Koef	SE Koef	95%-KI	t-Wert	p-Wert	VIF
Konstante	-12,34	9,85	(-32,19; 7,52)	-1,25	0,217	
Flow rate	0,1375	0,0512	(0,0342; 0,2408)	2,68	0,010	1,00
Print temperature	-0,0277	0,0468	(-0,1220; 0,0666)	-0,59	0,557	1,00
Layer height	82,0	10,2	(61,4; 102,7)	8,01	0,000	1,00

Tabelle 14 Koeffizienten der Regressionsgleichung für Oberflächenrauheit

Tabelle 15 zeigt eine moderate Erklärungskraft des Regressionsmodells. Mit einem R^2 -Wert von 61,95% erklärt das Modell etwa 62% der Varianz der abhängigen Variable. Der korrigierte R^2 -Wert von 59,35% berücksichtigt die Anzahl der Beobachtungen. Das prognostizierte R^2 von 54,04% deutet darauf hin, dass die Vorhersagekraft des Modells für neue Daten begrenzt ist. Die Differenz zwischen R^2 und R^2 -prognostiziert (ca. 7,91 Prozentpunkte) könnte auf eine leichte Überanpassung des Modells hinweisen. Zusätzlich weist der Standardfehler $S = 3,97$ auf eine durchschnittliche Abweichung von $\pm 3,97$ Einheiten zwischen den vorhergesagten und tatsächlichen Werten hin. Die Ergebnisse legen nahe, dass das Modell eine solide Grundlage für die Analyse darstellt, jedoch durch zusätzliche Eingangsgrößen oder eine Verfeinerung der bestehenden Variablen weiter verbessert werden könnte [22].

S	R-Qd	R-Qd(kor)	PRESS	R-Qd(prog)	AICc	BIC
3,96966	61,95%	59,35%	837,392	54,04%	275,82	283,75

Tabelle 15 Zusammenfassung der Regressionsgleichung für Oberflächenrauheit

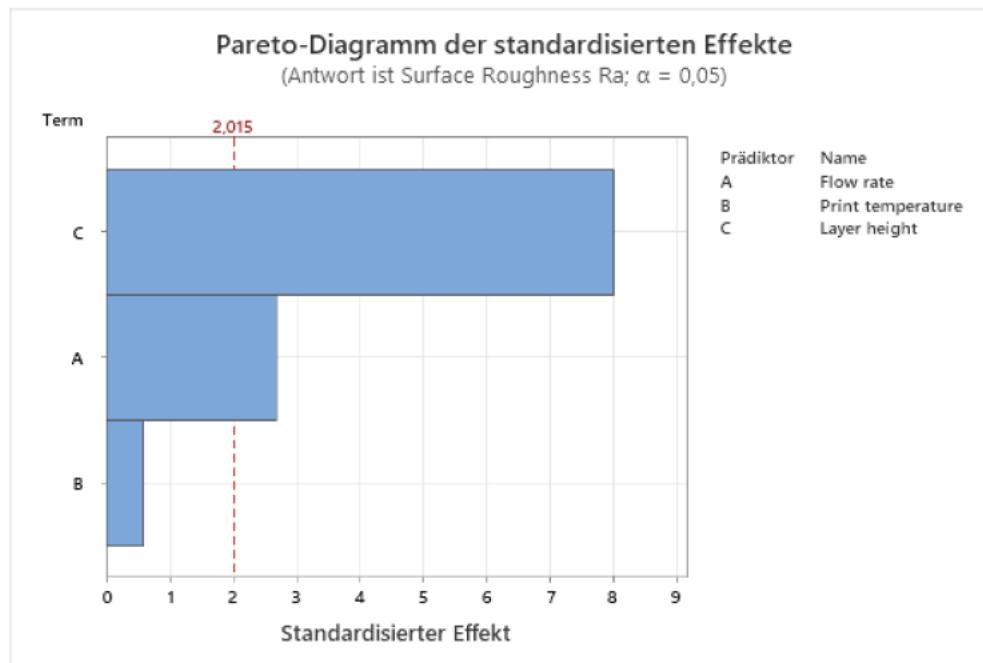


Abbildung 22 Pareto Diagramm der standardisierten Effekte für Oberflächenrauheit

5.2.4 Dichte

Als Regressionsgleichung für die Dichte ergibt sich die Gleichung in Tabelle 16.

$$\text{Density} = 1,744 + 0,001807 \text{ Flow rate} - 0,000114 \text{ Print temperature} \\ - 1,077 \text{ Layer height}$$

Tabelle 16 Regressionsgleichung für Dichte

Die Koeffizienten in Tabelle 17 verdeutlichen, dass die Schichthöhe den prägendsten Einflussfaktor auf die Oberflächenrauheiten darstellt. Die Flussrate ist ebenfalls ein signifikanter Einflussfaktor, wohingegen die Drucktemperatur keinen statistisch signifikanten Effekt zeigt ($p = 0,887$). Diese Ergebnisse korrespondieren mit dem standardisierten Effektstärkenvergleich in Abbildung 23, der die starke Bedeutung der Schichthöhe gegenüber anderen Parametern quantitativ bestätigt.

Term	Koef	SE Koef	95%-KI	t-Wert	p-Wert	VIF
Konstante	1,744	0,167	(1,406; 2,081)	10,42	0,000	
Flow rate	0,001807	0,000870	(0,000053; 0,003560)	2,08	0,044	1,00
Print temperature	-0,000114	0,000794	(-0,001714; 0,001487)	-0,14	0,887	1,00
Layer height	-1,077	0,174	(-1,427; -0,726)	-6,19	0,000	1,00

Tabelle 17 Koeffizienten der Regressionsgleichung für Dichte

Tabelle 18 zeigt eine moderate Erklärungskraft des Regressionsmodells. Mit einem R^2 -Wert von 49,20% erklärt das Modell rund 49% der Varianz der Dichte. Der korrigierte R^2 -Wert von 45,73% berücksichtigt die Anzahl der Beobachtungen und bestätigt die Aussage des unbereinigten R^2 -Werts. Das prognostizierte R^2 von 40,48% deutet darauf hin, dass die Vorhersagekraft des Modells für neue Daten eingeschränkt ist. Die Differenz zwischen R^2 und prognostiziertem R^2 (ca. 8,72 Prozentpunkte) könnte auf eine leichte Überanpassung des Modells hinweisen. Zusätzlich weist der Standardfehler $S = 0,0674$ auf eine durchschnittliche Abweichung von $\pm 0,0674$ Einheiten zwischen den vorhergesagten und tatsächlichen Werten hin. Die Ergebnisse legen nahe, dass das Modell eine solide Grundlage für die Analyse darstellt, jedoch durch zusätzliche Eingangsgrößen oder eine Verfeinerung der bestehenden Variablen weiter optimiert werden könnte. [22]

S	R-Qd	R-Qd(kor)	PRESS	R-Qd(prog)	AICc	BIC
0,0673956	49,20%	45,73%	0,234130	40,48%	-115,46	-107,53

Tabelle 18 Zusammenfassung der Regressionsgleichung für Dichte

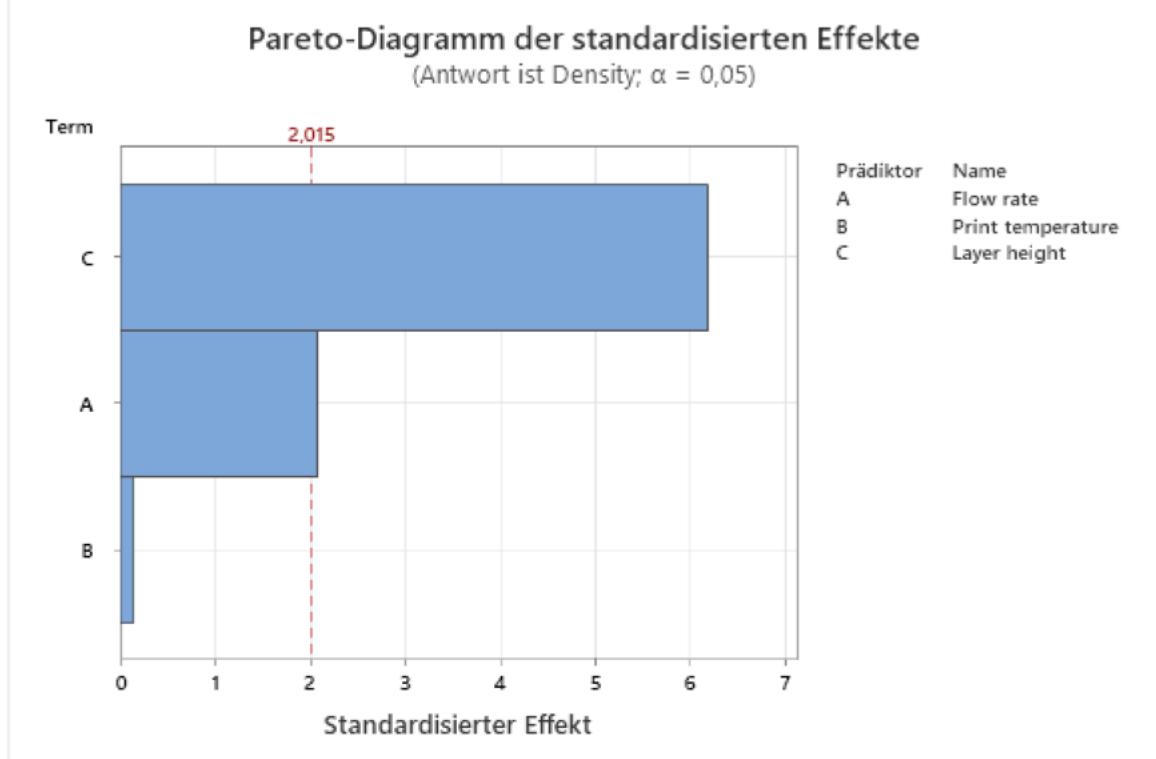


Abbildung 23 Pareto Diagramm der standardisierten Effekte für Dichte

5.3 Zielgrößenoptimierung

Anhand der gesammelten Regressionsgleichungen aus 5.2.1 Druckzeit bis 5.2.4 Dichte ergibt sich ein Gesamtmodell zur Optimierung.

Entsprechend Tabelle 19 wurden die Antworten des Systems gewichtet. Die Dichteantwort soll als Ziel maximiert werden und erhält eine erhöhte Gewichtung von 3, da diese stellvertretend für die maximale Belastbarkeit und Funktionalität des gesinterten Teils maximal sein soll. Die Oberflächenrauheit sowie die Druckzeit erhalten ebenfalls eine erhöhte Gewichtung von 2. Die Maßabweichung erhält eine geringere Gewichtung von 1. Alle Faktoren, ausgenommen der Dichte, sollen minimiert werden. Es ergibt sich also ein Idealteil mit maximaler Dichte, minimaler Druckzeit, minimaler Oberflächenrauheit und minimalen Maßabweichungen. Die Gewichtung wurde so angepasst, dass das fertige Bauteil durch Nacharbeit zur Korrektur der Maßhaltigkeit und trotz erhöhter Oberflächenrauheit eingesetzt werden kann. Die Druckzeit sollte minimiert werden, um eine höhere Produktivität zu generieren und den negativen Einfluss einer langen Produktionszeit zu kompensieren. Um mit der FGF-Prozessroute konkurrenzfähig zu werden, muss die Produktionszeit gesenkt werden. Der Entbinderungsprozess sowie Sinterungsprozess sollte auch auf weitere Zeiteinsparungsmöglichkeiten und Optimierungen untersucht werden.

Antwort	Ziel	Untergrenze	Soll	Obergrenze	Gewichtung	Bedeutung
Density	Maximum	1,60469	1,9904		3	1
Surface Roughness Ra	Minimum		6,3100	30,2800	2	1
Mean of the total dimensional	Minimum		0,0398	0,27400	1	1
Print time [min.]	Minimum		23,0000	97,0000	2	1

Tabelle 19 Parametergewichtung und Bedeutung zur Optimierung

In Tabelle 20 ist eine Lösung für das Optimierungsproblem dargestellt. Aus diesen sind mit kleinen Anpassungen die Druckparameter in Tabelle 22 generiert worden. Da die Flussrate und die Schichthöhe aus Tabelle 20 nicht so genau in Simplyfy-3D übernommen werden können, wurde die Schichthöhe auf 0,1mm und die Flussrate auf 141% angepasst.

Lösung	Flow rate	temperature	Layer height	Surface Mean of the Roughness			
				Print	Density	Ra	total dimensional [min.]
1	140,909	150	0,118182	1,87232	12,9613	0,0701420	53,1511

Zusammengesetzte Erwünschtheit	
1	0,496094

Tabelle 20 optimierter Parametersatz nach Gewichtung aus Tabelle 19

Für die leicht angepassten Werte wurde eine Prognose für die Ergebnisparameter durchgeführt. Es ergeben sich geringe Abweichungen, dargestellt in Tabelle 21. Diese Prognosen werden im weiteren Verlauf mit den gemessenen Ergebnissen verglichen, um das Modell und seine Aussagefähigkeit abschließend bewerten zu können.

Ergebnisparameter	Prognose ursprünglich	Prognose neu	Abweichung
Dichte	1,87232g/cm ³	1,89207g/cm ³	1,05%
Oberflächenrauheit Ra	12,9613µm	11,4855µm	-11,39%
Totale Maßabweichung	70,142µm	88,0341µm	25,51%
Druckzeit	53,1511min	61,6701min	16,03%

Tabelle 21 Prognostizierte Systemantworten

Diese erneute Prognose zeigt deutlich, wie sensibel das Modell auf nur kleine Anpassungen reagiert. Eine Erhöhung der Flussrate von 0,081% und eine Erniedrigung der Schichthöhe um 0,018182mm sorgen für prognostizierte Abweichungen von -11,39% bis 25,51%.

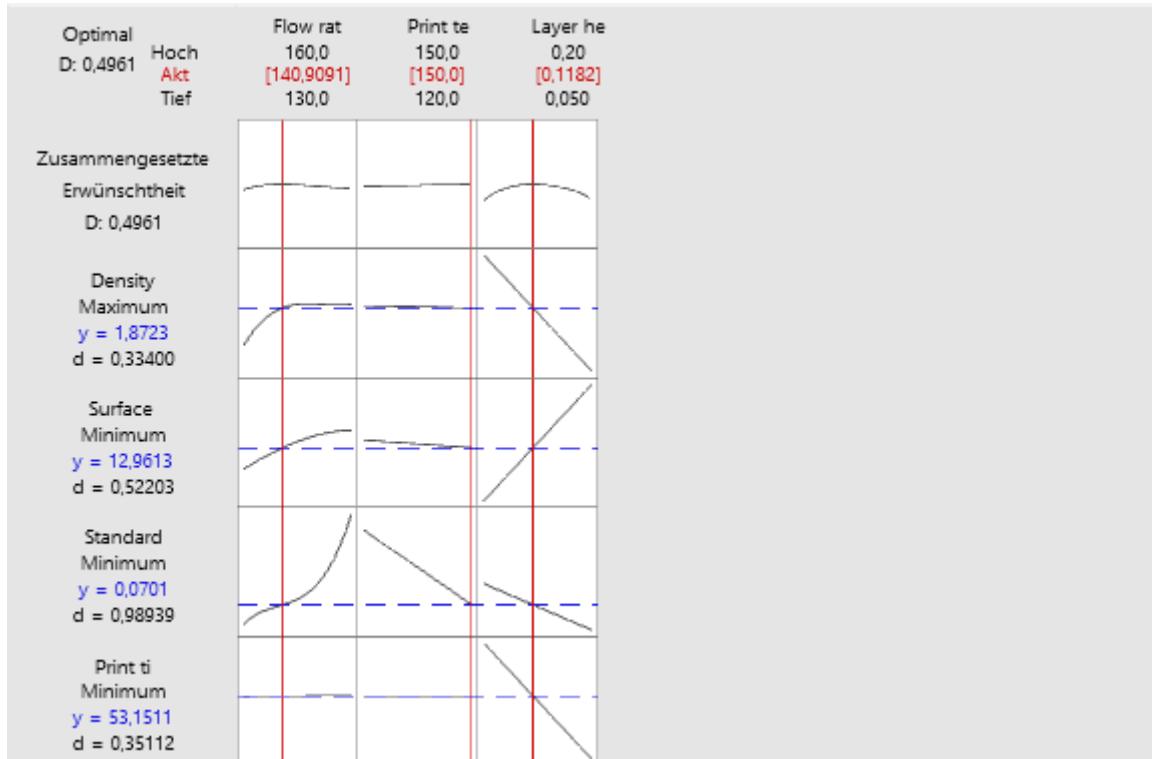


Abbildung 24 Darstellung der Regressionen und Ermittlung optimierter Parameter

Die Abbildung 24 zeigt grafisch aufbereitet den Verlauf der Regressionskurven und die ermittelten Parameter. Hierbei wird die Parametergewichtung der Tabelle 19 benutzt. Es ergeben sich nach den eingangs erwähnten Anpassungen die Druckparameter in Tabelle 22. Für eine statistische Auswertung werden insgesamt zehn gleiche Proben gedruckt. Für alle 10 Proben werden erneut Maßabweichungen, Oberflächenrauheit, Druckzeit und Dichte ermittelt. Fünf dieser Proben werden für die Härteprüfung eingesetzt. Die übrigen fünf Proben sollen mit den ursprünglichen DOE-Proben den Entbinderungsprozess und den Sinterprozess durchlaufen. Die Messergebnisse dienen dann zur weiteren Auswertung und als Basis für weitere Hypothesen.

RunOrder	Flow rate	Print temperature	Layer height	materialVolume [mm ³]	buildTime	Print time [min.]
C0	141	150	0,1	3276.7	0 hours 48 minutes	48
C1	141	150	0,1	3278.3	0 hours 48 minutes	48
C2	141	150	0,1	3275.9	0 hours 48 minutes	48
C3	141	150	0,1	3277.2	0 hours 48 minutes	48
C4	141	150	0,1	3273.3	0 hours 48 minutes	48
C5	141	150	0,1	3275.9	0 hours 48 minutes	48
C6	141	150	0,1	3274.2	0 hours 48 minutes	48
C7	141	150	0,1	3280.3	0 hours 48 minutes	48
C8	141	150	0,1	3274.0	0 hours 48 minutes	48
C9	141	150	0,1	3275.4	0 hours 48 minutes	48

Tabelle 22 Optimierte Parameter mit Materialvolumen und Druckzeit aus Gcode

Als Ergebnis für die Druckzeit ergibt sich 48min. Die ursprüngliche Prognose weicht somit um 5,1511min mit 10,73% und die aktualisierte Prognose um 13,6701min mit 28,48% ab.

5.3.1 Messergebnisse für optimierte Parameter

Für die Maßabweichungen ergeben sich die Maßabweichungen aus Tabelle 30.

Es ergibt sich ein Mittelwert aus der Tabelle 30 von 144,13µm mit einer Standardabweichung von 88,35µm. Die ursprüngliche Prognose weicht somit um 73,98µm mit -51,33% und die aktualisierte Prognose um 56,1µm mit -38,92% ab.

Für die Grünteldichte der Proben mit optimierten Parametern aus Tabelle 31 ergibt sich ein Mittelwert 1,892g/cm³ mit einer Standardabweichung von 0,049g/cm³. Die ursprüngliche Prognose weicht somit um 0,02g/cm³ mit -1,05% und die aktualisierte Prognose um 0,00021g/cm³ mit -0,01% ab.

RunOrder	Flow rate	Print temperature	Layer height	Surface Roughness Ra [µm]
C0	141	150	0,1	8,830
C1	141	150	0,1	7,790
C2	141	150	0,1	8,170
C3	141	150	0,1	8,330
C4	141	150	0,1	8,080
C5	141	150	0,1	9,240
C6	141	150	0,1	10,100
C7	141	150	0,1	12,240
C8	141	150	0,1	10,870
C9	141	150	0,1	12,270

Tabelle 23 Darstellung der Oberflächenrauheiten der Proben mit optimierten Parametern

Anhand der in Tabelle 23 gesammelten Messwerte ergibt sich ein Mittelwert von 9,592µm mit einer Standardabweichung von 1,697µm. Die ursprüngliche Prognose weicht somit um 3,3693µm mit 35,13% und die aktualisierte Prognose um 1,894µm mit 19,74% ab.

5.3.2 Härteprüfung

Die Prüfungen wurden im Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik mit Hilfe des Härteprüfgeräts KB 250 BVRZ der Firma KB Prüftechnik GmbH durchgeführt.

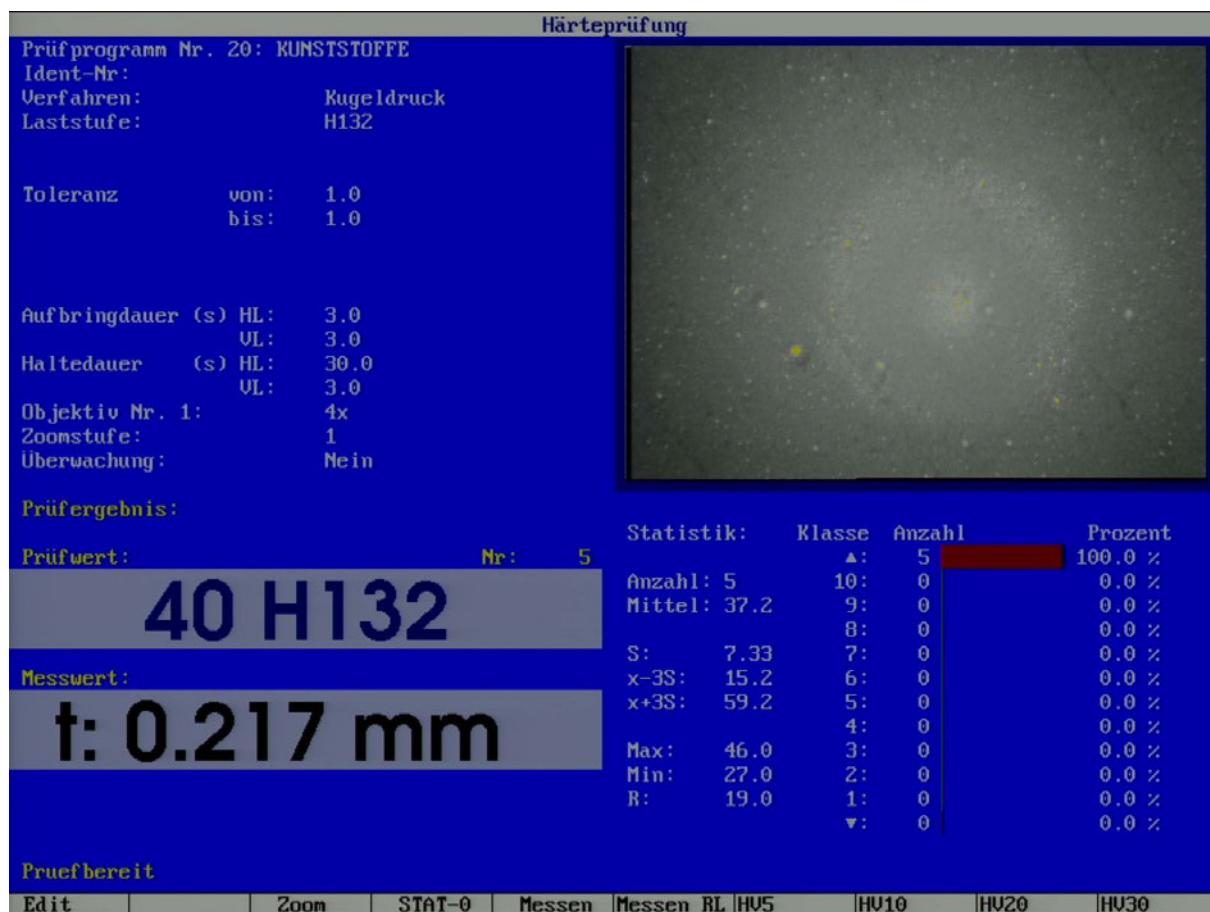


Abbildung 25 Messchrieb der Härteprüfung von Probe C3

Um die Härte der Grünlinge messen zu können, wird trotz des Metallpulvergehalts das Messverfahren für Kunststoffe verwendet. In Abbildung 25 ist der exemplarische Messschrieb der Probe C3 dargestellt. Es ergibt sich mit einer Prüfkraft von 132N und einer Eindringtiefe von 0,217mm eine Härte von 40HB. Aus den Ergebnissen in Tabelle 24 ergibt sich ein Mittelwert für die ermittelte Härte von 37,4HB. Die Ergebnisse der ermittelten Härte mit dem Kugeldruckversuch ist nicht mit der Brinell Härteprüfung von Metallen vergleichbar. Es sollte daher im gesinterten Zustand nochmals geprüft werden, um eine Vergleichbarkeit innerhalb der Proben C0-C9 zu gewährleisten. Da keine adäquaten Sinterparameter zur Verfügung stehen, sieht sich der Projektpartner nicht in der Lage die Proben zu sintern. Daher muss auf diese Betrachtung verzichtet werden. Im Zuge dieser Betrachtung sollte auch nochmals ein konventionell hergestelltes Aluminiumblech beprobt werden, um einen Vergleich zu ermöglichen.

RunOrder	Flow rate	Print temperature	Layer height	Härte HB
C0	141	150	0,1	27
C1	141	150	0,1	33
C2	141	150	0,1	46
C3	141	150	0,1	40
C4	141	150	0,1	41

Tabelle 24 Darstellung der Messergebnisse zur Härteprüfung

5.4 Gewichtsmessung zur Bestimmung des Entbinderungsgrads

Bevor die Entbinderung durchgeführt werden konnte, wurden alle DOE-Proben umfangreich vermessen. Anschließend wurden mit Hilfe der Software Minitab und Matlab die Messergebnisse und die Einflussgrößen analysiert. Hieraus wurden die optimierten Parameter aus Tabelle 22 herausgearbeitet, um neue Proben zu drucken, die mit in den Entbinderungsprozess eingeschleust werden sollten. Die gesammelten Proben wurden dann aus dem Grünteilzustand in den Brauteilzustand überführt. Abschließend sollten die gesamten Proben gesintert und danach wieder vermessen und analysiert werden.

Wie in 4.4 beschrieben, wurde die Entbinderung in drei Stufen durchgeführt. Da der Materialhersteller einen Anteil von löslichem Kunststoff von 11,6% angegeben hat, sollte ein Gewichtsverlust von um die 10% erreicht werden. Hierfür wurden die zu ca. 8,8% entbinderten Proben an die Element22 GmbH versendet. Dort wurden die Proben in die autonome Entbinderungsanlage der Firma gegeben. Diese konnte nach weiteren 40 Stunden über 10% Gewichtsverlust erreichen, siehe Tabelle 32 Tabelle 22. Um sicherzustellen, dass die chemische Entbinderung vollständig abgeschlossen wurde, wurde noch weitere 19 Stunden entbindet. Es zeigte sich aber, dass kein weiterer Kunststoff aus den Proben entfernt werden konnte. Da die Proben nicht durchtrocknen konnten, erhöhte sich sogar das Gewicht, was auf nicht verdampftes Aceton im Bauteil schließen lässt. Anhand der Gewichtsverluste konnte die Abbildung 38 Boxplot zur Entbinderungszeit der DOE-Proben mit Sättigungsfunktion sowie die Abbildung 39 Boxplot zur Entbinderungszeit mit optimierten Parametern erstellt werden. Diese zeigen deutlich, dass der Verlauf der Entbinderung durch eine Sättigungskurve angenähert werden kann. Zu Beginn der Entbinderung löst sich schnell viel Kunststoff aus den Proben, wohingegen zum Ende der Entbinderung fast keine Gewichtsveränderung mehr beobachtet werden kann. Auch zeigt sich, dass die DOE-Proben unterschiedliche Entbinderungsraten aufweisen. Der direkte Vergleich von Abbildung 38 und Abbildung 39, dargestellt in Abbildung 26, zeigt, dass trotz gleicher Druckparameter der Proben in Abbildung 39 diese unterschiedlich schnell entbinden. Dieser Einfluss muss auf die Position im Becherglas und die Abweichungen der Proben untereinander zurückzuführen sein. Trotz gleicher Parametereinstellungen produziert der FGF-Prozess unterschiedliche Grünteile. Die Prozessstabilität sowie Wiederholgenauigkeit sollte dahingehend weiter untersucht werden.

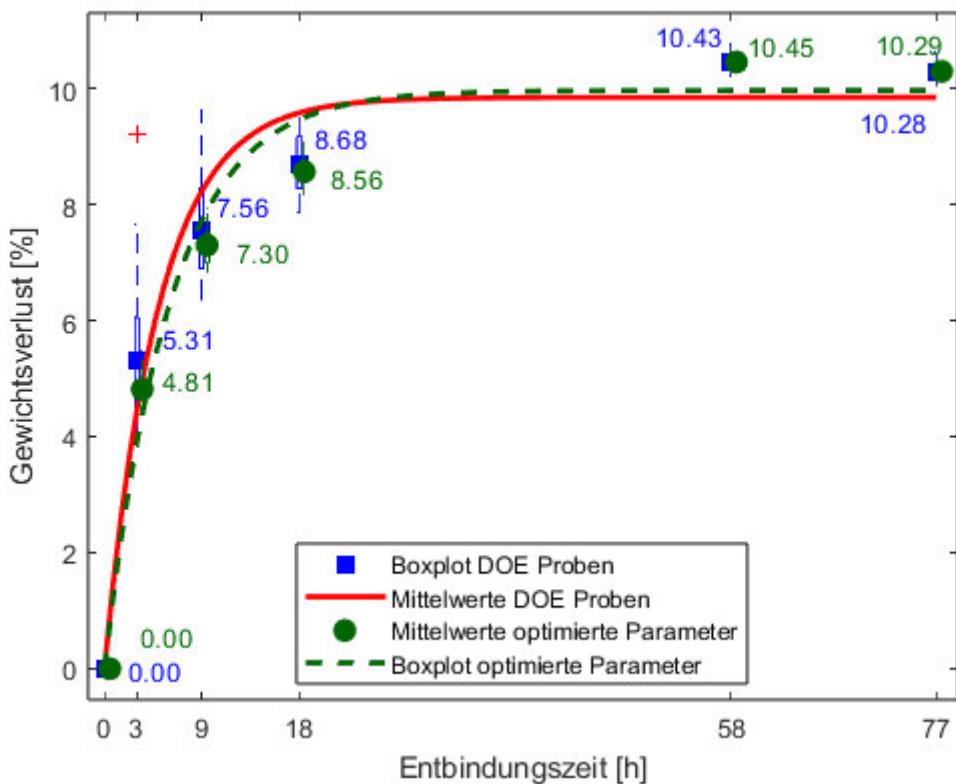


Abbildung 26 Boxplot zur Entbinderungszeit der DOE-Proben und optimierte Proben mit Sättigungsfunktionen

Die Proben C5 bis C9, die mit denselben Druckparametern gedruckt wurden, wurden erneut hinsichtlich ihres Entbinderungsverhaltens untersucht. In Abbildung 39 wurde hierzu ein Boxplot erstellt, um einen visuellen Vergleich zu ermöglichen. Es zeigen sich keine nennenswerten qualitativen Unterschiede. Der Interquartilsabstand (IQR) ist jedoch im Vergleich zu Abbildung 38 kleiner, was auf eine gleichmäßigere Entbinderung hinweist. Bei gleichen Druckparametern verhalten sich die Proben hinsichtlich ihrer Entbinderungsgeschwindigkeit einheitlicher als bei den variablen Parametern, welche im DOE-Parametersatz verwendet wurden. Im Vergleich in Abbildung 26 zeigt sich eine ähnliche Entbinderungsgeschwindigkeit, wobei die optimierten Proben und ihre Ausgleichskurve eine geringere Entbinderungsgeschwindigkeit im Bereich von 0-4 Stunden aufweisen als die DOE-Proben.

5.5 Untersuchung weiterer Druckparameter: Lüftergeschwindigkeit, Retraction

Da die Proben nicht mehr in den Sinterzustand überführt werden konnten, wurden zusätzlich zu den DOE-Proben sowie deren Optimierung, nachträglich die Parameter Lüftergeschwindigkeit sowie Retraction untersucht. Dieses Screening soll einen groben Überblick über das Druckverhalten in Bezug auf diese Parameter geben. Hierzu wurde jeweils eine Probegeometrie generiert und mit mehreren Abstufungen der Parameter gedruckt. Abschließend wurden die Proben qualitativ untersucht und bewertet. Eine quantitative Bewertung der Proben wird nicht vorgenommen. Der Fokus dieser Untersuchung liegt auf der Identifikation von Tendenzen und groben Effekten.

5.5.1 Lüftergeschwindigkeit

Die Probengeometrie weist einen Überhang von 10mm auf, welcher überbrückt werden soll. Hierbei wird die pneumatische Bauteilkühlung über dem M-Code M106 Sxxx im Bereich von 0-100% variiert [23, S. 47]. Abbildung 27 zeigt, dass sich bei einer Lüftungsleistung von 0 % Materialagglomerationen im freien Brückenzugbereich der Probe ausbilden. Diese sind wiederum auch auf eine zu geringe Retraction und einen Materialnachlauf aus der Düse hindeutet. Diese Agglomeration stützt wiederum den Brückenzugbereich, der ansonsten in der Luft gedruckt werden würde.

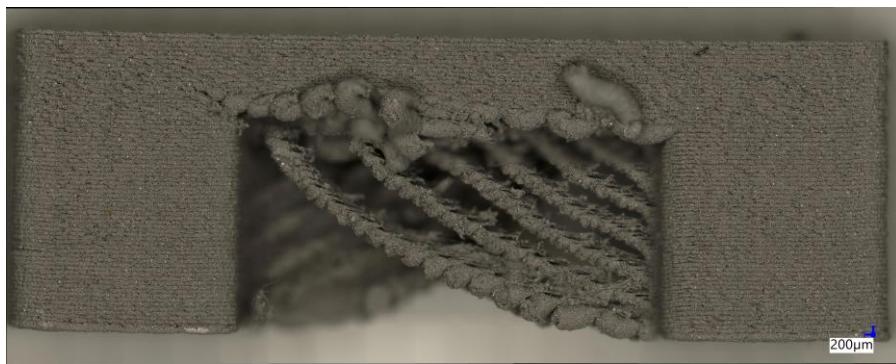


Abbildung 27 Druckprobe mit 0% Lüftung

Mit einer Lüftungsleistung von 25% wie in Abbildung 28 führte zu keiner signifikanten Verbesserung. Das Druckbild ähnelte weitgehend dem bei 0 % Kühlung; freihängende, nicht durchhängende Strangablagen konnten weiterhin nicht zuverlässig realisiert werden.



Abbildung 28 Druckprobe mit 25% Lüftung

Abbildung 29 mit einer Lüftungsleistung von 50% weist eine deutlich geringere Materialagglomerationen im freien Bereich auf. Die zusätzliche Kühlleistung reicht aus, um eine Strangablage über den freien Bereich von 10mm zu ermöglichen. Trotzdem gibt es Deformationen und einzelne Stränge die durchhängen und außerhalb der Sollgeometrie liegen. Durch etwaige Nacharbeiten könnten diese noch weiter entfernt werden.



Abbildung 29 Druckprobe mit 50% Lüftung

Es zeigt sich in Abbildung 30 eine Verschlechterung der Bauteilqualität. Eine zusätzliche Kühlleistung sorgt für zusätzliche Materialagglomeration im freien Bereich und überdies über eine Abnahme der allgemeinen Druckqualität.

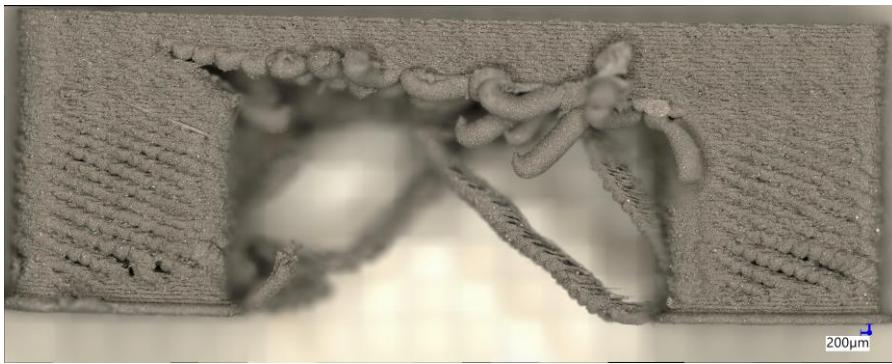


Abbildung 30 Druckprobe mit 100% Lüftung

Insgesamt zeigte sich, dass eine moderate Kühlung von ca. 50 % zu einer Verbesserung der Überhangqualität führen kann. Eine zu starke Kühlung hingegen wirkt sich negativ auf die Strangablage und die Gesamtdruckqualität aus.

Für eine präzisere Charakterisierung sollten zukünftige Untersuchungen Wiederholungsdrucke sowie eine feinere Abstufung der Lüfterparameter umfassen.

Die verschiedenen Druckversuche sollten durch Wiederholung verifiziert und durch eine feinere Untergliederung weiter untersucht werden. Für eine grobe Abschätzung des Parametereinflusses reicht das Screening allerdings aus.

5.5.2 Retraction

Die Retraction Einstellungen der Slicing Software Simplify 3D wurde nach Empfehlungen des Hersteller AIM3D begonnen. Als Richtwert wurde die Retraction Länge für einen MIM feedstock (Metal Injection Molding - Metallpulverspritzguss) verwendet [24]. Eine allgemeine Retraction Weite wird von 2-6mm angeben und für MIM Feedstock auf 3mm eingeschränkt. Als Startwert wurde vom Standardwert des Slicers von 0mm gestartet. Als Beispielkörper wurde der Retraction Test von OrcaSlicer verwendet, welcher in Abbildung 31 zu sehen ist [25]. Da der FGF Prozess nicht so stark eher träge auf Parameteränderungen reagiert, wurde der Beispielkörper in 5mm Teile für die Retractionparameter unterteilt. In Abbildung 32 zu sehen wurden die Retractionweiten von 0,1mm 0,2mm und 0,3mm untersucht. Dabei wurde die Grundfläche auch mit 0,1mm gedruckt. Die Retractionweiten ändern sich in der Z-Richtung des Bauteils.

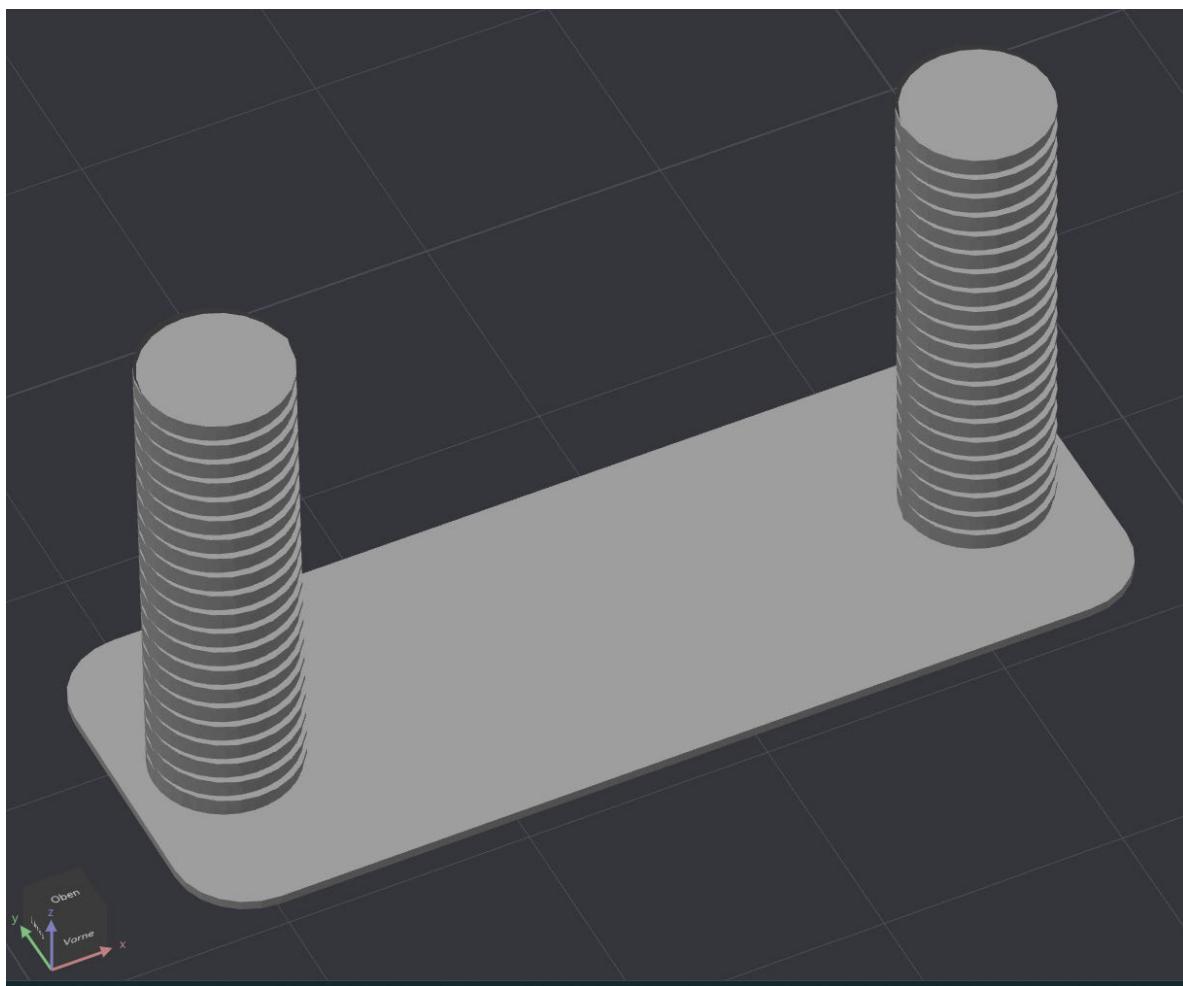


Abbildung 31 OrcaSlicer Retraction Probekörper

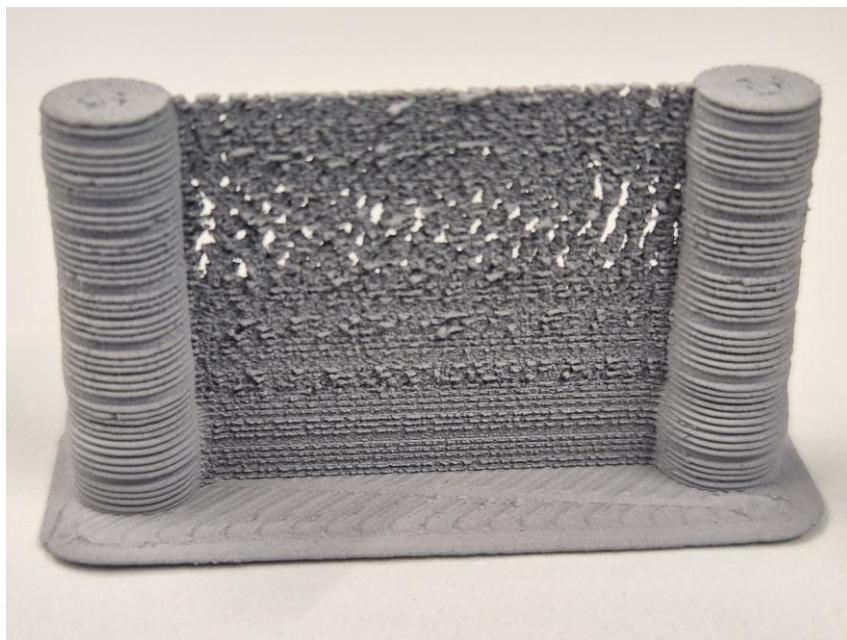


Abbildung 32 Retraction Probe mit 0,1mm - 0,3mm

Um sich ein noch genaueres Bild über die Oberflächenqualität und die Materialagglomeration im nicht zu druckenden Bereich, welche von der Sollgeometrie in Abbildung 31 abweichen, wurden die Proben mit dem Mikroskop (KEYENCE VHX-7000) weiter untersucht. Über den gesamten Bereich von 0,1-0,2mm Retractionweite gibt es fast keine optischen Unterschiede erkennbar. Die Retractionweite reicht nicht aus, um das Oozing des Materials in den freibleibenden Bereich zwischen den Säulen zu verhindern. Im Bereich von 0,3mm Retractionweite gibt es erste erwünschte Lücken im nicht zu bedruckbaren Bereich.

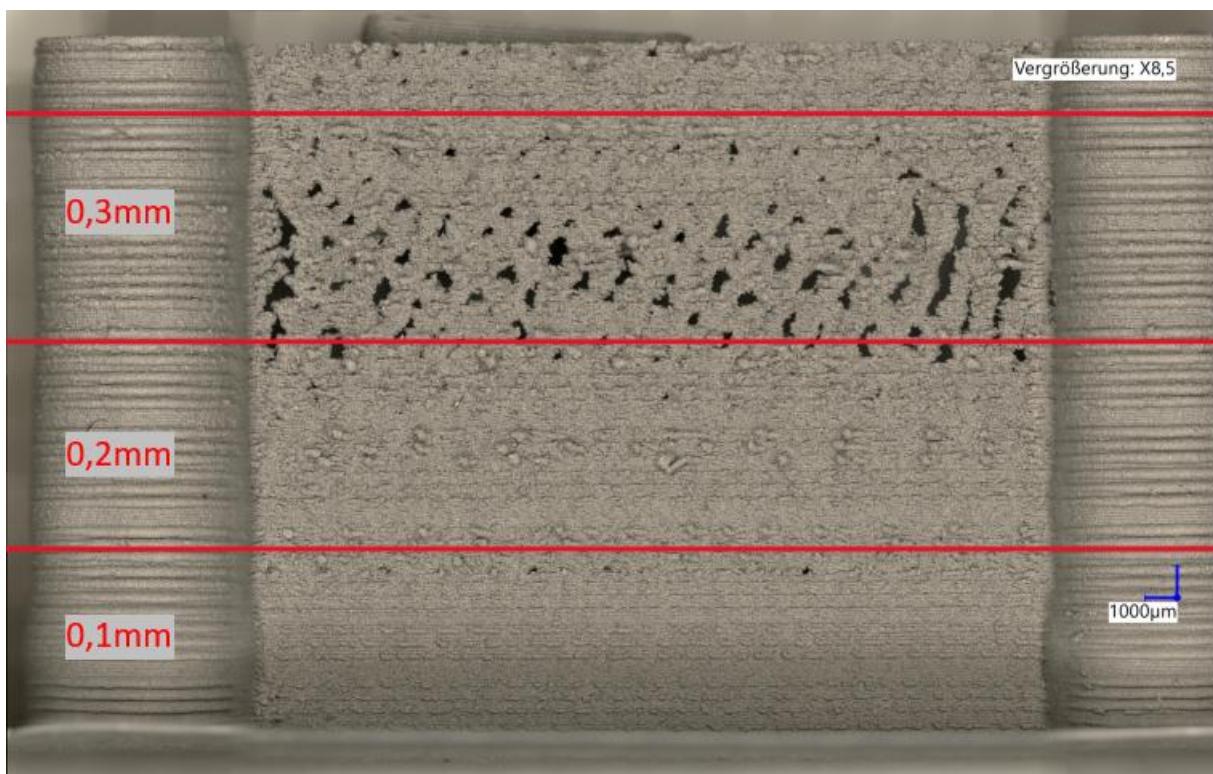


Abbildung 33 Retraction Probe mit 0,1mm - 0,3mm Mikroskop mit Vergrößerung 8,5

Aufgrund der Zunahme der erwünschten Lücken wird die Retractionweite schrittweise weiter erhöht. Es wurden diverse weitere Proben im Bereich von 0,1-0,6 in verschiedenen Abstufungen gedruckt. Beispielhaft wird Retraction Probe mit dem Bereich von 0,38-0,41mm dargestellt in Abbildung 34 behandelt. In dem Retractionweitenbereich ich Bereich von ~0,3-0,4 zeigt sich ein deutlich reduziertes Oozing. Bei Proben mit höheren Retractionweiten beginnen die Säulen an Qualität zu verlieren. Dies deutet auf eine zu hohe Retractionweite hin, welche eine gleichmäßige Extrusion und Strangablage verschlechtert.

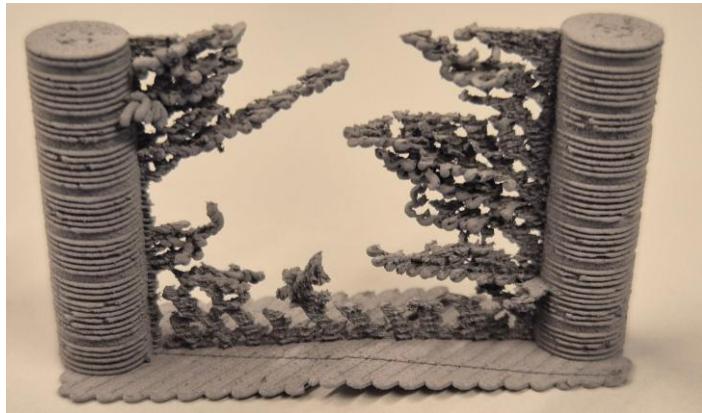


Abbildung 34 Retraction Probe mit 0,38mm bis 0,41mm

In der Untersuchung unter dem Mikroskop mit 8,5-facher Vergrößerung wie in Abbildung 35 dargestellt zeigt, dass sich ein diffuses Bild zu den Retraction Einstellungen. Über den gesamten Druckbereich von 0,38mm bis 0,41mm gibt es Agglomerationen von zu viel extrudiertem Material an den Säulen. Es gibt aber auch einen großen Bereich, der nicht unerlaubterweise bedruckt wurde. Im Bereich von 0,4mm gibt es den größten nicht bedruckten Bereich.

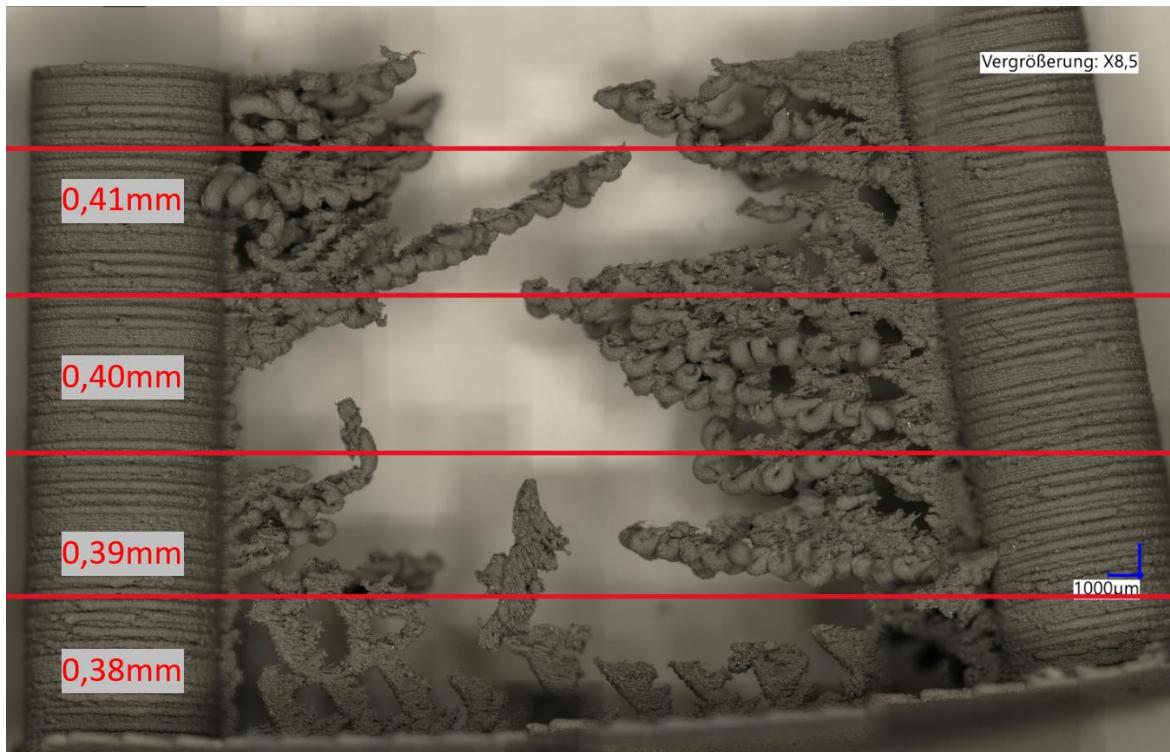


Abbildung 35 Retraction Probe mit 0,38mm bis 0,41mm Mikroskop mit Vergrößerung 8,5

Weitere Druckproben mit noch größeren Retractionweiten wie in Abbildung 36 zeigen keine nennenswerten Qualitätsverbesserungen, sondern eher eine Verschlechterung. Daher sollte der Bereich ~0,3-0,4mm Retractionweite mit noch anderen Parametern weiter untersucht werden. Für alle Proben wurden einheitlich die optimierten Parameter aus Tabelle 22 verwendet und nur die Retraction Werte angepasst.

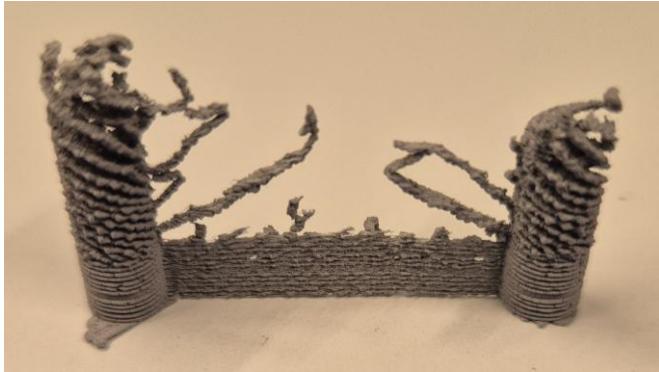


Abbildung 36 Retraction Probe mit 0,3mm bis 0,6mm

Bei der umfangreichen Beprobung der Anlage hat die Materialzuführung wiederholt für Probleme gesorgt. Diese könnten auch einen großen Einfluss auf die Retraction Proben gehabt haben, weshalb man die ausreichende Materialzuführung überwachen und kontrollieren müsste, um einen Einfluss auf die Retraction Proben auszuschließen. Fehlender Materialnachfluss hat auf den FGF Druckprozess eine ähnliche Auswirkung wie eine zu hohe Retractionweite. Sollte nicht genug Material vorhanden sein, kann es zu unzureichender Extrusion sowie Lücken im Bauteil, siehe auch Abbildung 36 kommen. Unter diesem Hintergrund müssen die Ergebnisse mit Vorbehalt betrachtet werden und noch umfangreicher untersucht werden.

6 Auswertung der Ergebnisse und Ableitung von Handlungsempfehlungen für weitere Untersuchungen

Die durchgeführte DoE-Parameterstudie mit Aluminium Feedstock in der FGF Prozessroute hat wichtige Erkenntnisse über den Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Qualität der produzierten Teile geliefert. Die Hauptergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Grünteilzustand

Für den Grünteilzustand konnten umfangreiche Korrelationen und Wechselwirkungen zwischen den Kovariablen und Zielvariablen nachgewiesen werden. Abbildung 37 bietet eine übersichtliche Darstellung der ermittelten Zusammenhänge.

Ein Beispiel für eine starke Korrelation ist der Zusammenhang zwischen der Schichthöhe (Layer Height) und der Druckzeit (Print Time). Hier zeigt sich eine stark negative Korrelation: Eine Vergrößerung der Schichtdicke führt zu einer Verkürzung der Druckzeit, während eine Verringerung der Schichtdicke die Druckzeit verlängert. Dieser Zusammenhang wird in Abschnitt 5.1.1 näher erläutert. Bemerkenswert ist, dass keine andere Kovariable eine signifikante Korrelation mit der Druckzeit aufweist.

Ein weiterer wichtiger Zusammenhang betrifft die positive Korrelation zwischen Schichthöhe (Layer Height) und Oberflächenrauheit (Surface Roughness). Eine Erhöhung der Schichthöhe führt zu einer Zunahme der Oberflächenrauheit, während eine Verringerung der Schichthöhe die Rauheit reduziert. Zusätzlich zeigt sich, dass die Flussrate (Flow Rate) ebenfalls positiv mit der Oberflächenrauheit korreliert, jedoch etwa um den Faktor 3 weniger stark ausgeprägt als die Schichthöhe.

Die Druckzeit weist ebenfalls eine negative Korrelation auf, steht jedoch nur indirekt über die Kovariable der Schichthöhe in Beziehung zur Zielvariablen Oberflächenrauheit. Dies verdeutlicht, dass die Schichthöhe eine zentrale Rolle sowohl bei der Beeinflussung der Druckzeit als auch der Oberflächenrauheit spielt.

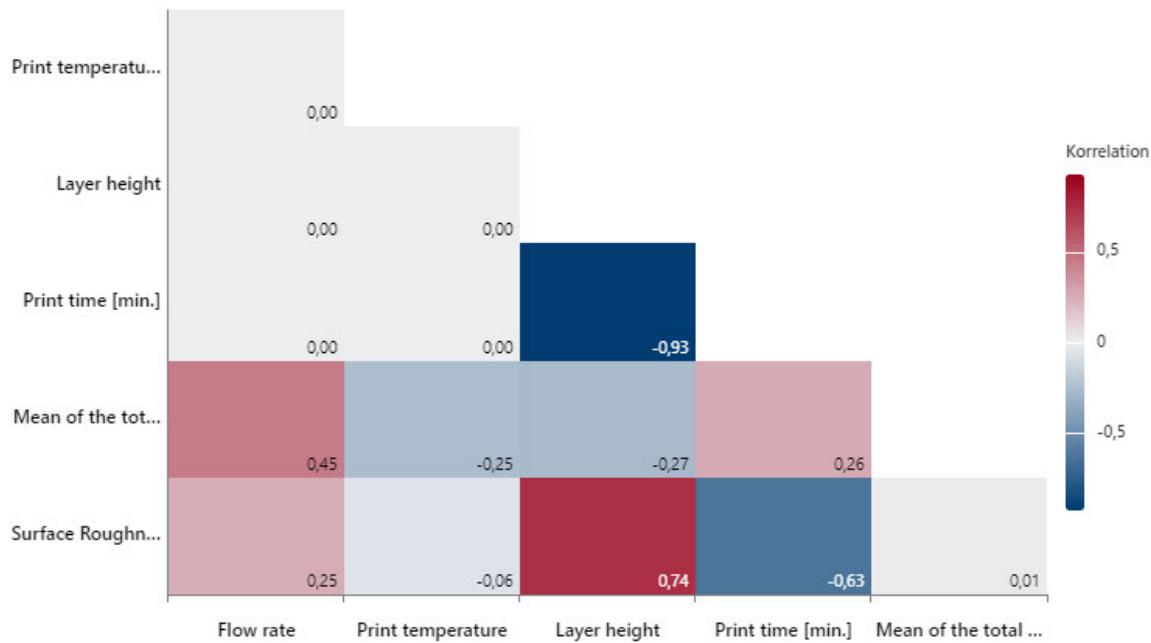


Abbildung 37 Darstellung der Korrelationen der Kovariablen und Zielvariablen

Braunteilzustand

Abbildung 26 gibt einen guten Überblick über die gesammelten Erkenntnisse. Die ermittelten Sättigungskurven lassen sich in eine Entbinderungsgeschwindigkeit sowie eine Entbinderungsmenge (beziehungsweise einen prozentualen Gewichtsverlust bei gegebener Entbinderungszeit) umrechnen. Die Entbinderung über einen Zeitraum von 58 Stunden hinweg ist außerdem unnötig, da nicht mehr nennenswert Material entbindet wird.

6.1 Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen deutlich die Komplexität des FGF Prozesses mit Aluminium-Feedstock. Die Interaktionen zwischen den verschiedenen Prozessparametern in den unterschiedlichen Verarbeitungsstufen sind signifikant und müssen sorgfältig abgewogen werden, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Die Analyse der Parametereinflüsse mittels statistischer Methoden wie Regressionsanalysen und Pareto-Diagrammen, dargestellt in Abbildung 37, hat geholfen, die wichtigsten Einflussfaktoren zu identifizieren und ihre relativen Beiträge zur Gesamtqualität zu quantifizieren. Zusätzlich liefert das Screening der Bauteillüftung sowie der Retractioneinstellungen eine erste Abschätzung der qualitätsgünstigen Parameter. Allgemein ist die hohe Fehleranfälligkeit der Materialförderung ein zu beachtendes Problem. Außerdem deutet das reduzierte Übereinstimmungsmaß auf noch nicht erfasste Kovariablen oder einen nicht fähigen Prozess hin.

6.2 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Basierend auf den im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Ergebnissen lassen sich gezielte Maßnahmen zur Optimierung des FGF Prozesses mit Aluminium Feedstock ableiten. Die Druckparameter müssen weiter verfeinert werden, um die Prozessstabilität und die Qualität

der erzeugten Grünteile zu erhöhen. Die Versuche haben gezeigt, dass sowohl eine Überextrusion als auch ein unzureichender Materialauftrag die Bauteilqualität negativ beeinflussen.

Die Einführung eines prozessbegleitenden Überwachungssystems zur Echtzeitkontrolle von Schlüsselfaktoren wie Materialflussrate und Düsendruck erscheint zwingend erforderlich. Störungen und Schwankungen, die sich auf den Prozess auswirken, sollten hiermit frühzeitig erkannt und kompensiert werden. Ergänzend ist die Implementierung eines Qualitätskontrollsystems notwendig, das zerstörungsfreie Prüfverfahren einsetzt, um die Qualität der Grünteile bereits während der Herstellung zu bewerten. Zusätzlich könnten zerstörungsbehaftete Prüfverfahren wie die Härteprüfung an dafür vorgesehenen, extra erstellten Körpern durchgeführt werden. Aufgrund der im Versuchsverlauf beobachteten Instabilitäten muss insbesondere das Nachfüllsystem des Feedstocks analysiert und optimiert werden, da Unterbrechungen in der Materialzufuhr ähnliche Effekte wie eine fehlerhafte Retraction hervorrufen und somit die Grünteilqualität erheblich beeinträchtigen.

Die Eigenschaften des verwendeten Aluminium Feedstocks bieten weiteres Optimierungspotential. Eine enge Zusammenarbeit mit den Materialherstellern ist anzustreben, um die Rheologie und die Sinterfähigkeit des Materials gezielt zu verbessern. Dabei sollte insbesondere der Einfluss möglicher Additive untersucht werden, die eine Erhöhung der Grünteilfestigkeit und eine optimierte Versinterung ermöglichen.

Zur weiteren Steigerung der Prozesssicherheit und Reduzierung manueller Eingriffe wird die Entwicklung eines integrierten und automatisierten Prozessablaufs empfohlen, der die Schritte von der Extrusion über die Entbinderung bis hin zum Sintern umfasst. Der Einsatz eines automatischen Materialzufuhrsystems sowie eines Entnahmesystems (z.B. per Roboter), welches direkt in das Entbinderungssystem angebunden ist, könnte die Fehleranfälligkeit reduzieren und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nachhaltig verbessern.

Für zukünftige Forschungsarbeiten ergeben sich mehrere Schwerpunkte. Die Erweiterung der Parameterstudien auf komplexere Bauteilgeometrien sowie größere Bauteile erscheint essenziell, um den Einfluss der Prozessparameter unter realistischeren Produktionsbedingungen bewerten zu können. Ferner sollte die Materialzufuhr technologisch überarbeitet werden, idealerweise unter Einsatz eines geschlossenen Feedback-Systems zur Echtzeitüberwachung. Der Einfluss von Legierungszusätzen auf die Verarbeitungseigenschaften und die resultierenden Bauteilkennwerte bietet des Weiteren ein interessantes Forschungspotential. Ein Vergleich des FGF Prozesses mit dem FFF Prozess könnte darüber hinaus wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich Wiederholbarkeit und Anwendungsgrenzen liefern. Zusätzlich wären Langzeituntersuchungen zur Stabilität des optimierten Prozesses erforderlich, um die industrielle Relevanz beurteilen zu können.

Abschließend ist eine umfassende Analyse der gesamten Prozesskette notwendig, um verbleibende Schwachstellen systematisch zu erfassen. Die genaue Identifikation potenzieller Fehlerquellen sowie die Ableitung fundierter Ursachenhypthesen stellt dabei die Grundlage für die gezielte Weiterentwicklung des Verfahrens dar. Hierzu sollte die Granulaterstellung sowie Kennwerte wie Fließfähigkeit des Feedstocks näher untersucht werden. Zur objektiven Beurteilung der Prozessstabilität sollte ergänzend eine Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchung erfolgen, um die Maschinen- und Prozessfähigkeit zu bestätigen. Durch eine konsequente Umsetzung dieser Analysen und Optimierungen kann das

volle Potenzial des FGF Prozesses für eine wirtschaftliche und reproduzierbare additive
Fertigung von Aluminiumbauteilen erschlossen werden.

7 Zusammenfassung und Fazit

In dieser Bachelorarbeit wurde eine DOE-Parameterstudie zur Optimierung des FGF Prozesses mit Aluminium Feedstock durchgeführt. Ziel war es, den Einfluss zentraler Prozessparameter auf die Bauteilqualität systematisch zu untersuchen und konkrete Optimierungsansätze abzuleiten. Grundlage der Arbeit bildete eine umfassende Literaturrecherche, die den aktuellen Stand der Forschung zum FGF Verfahren und zur Verarbeitung von Aluminium Feedstock in der additiven Fertigung aufarbeitete. Darauf aufbauend wurde ein vollständig faktorieller Versuchsplan entwickelt, bei dem insbesondere die Effekte der Extrusionstemperatur, der Flussrate und der Schichthöhe auf die Qualität der hergestellten Bauteile analysiert wurden. Zur Bewertung der Bauteilqualität wurden Härteprüfungen, Dichtemessungen sowie Oberflächenanalysen durchgeführt und die Ergebnisse anschließend mittels statistischer Methoden ausgewertet, um die signifikantesten Einflussgrößen zu identifizieren.

Die Untersuchungen zeigen, dass insbesondere die Extrusionstemperatur und die Flussrate maßgeblichen Einfluss auf die Bauteilqualität haben. Die Flussrate beeinflusst sowohl die Maßhaltigkeit als auch die Dichte der gedruckten Strukturen erheblich. Die Schichthöhe zeigt sich ebenfalls als kritischer Parameter, da sie das Zusammenspiel zwischen Auftragsrate und Schichthaftung bestimmt und damit die Oberflächenqualität sowie die Homogenität der Grünteile beeinflusst. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Prozessparametern eine ganzheitliche Betrachtung der Prozessführung erforderlich machen, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Das Verhalten des eingesetzten Aluminium Feedstocks im FGF Prozess stellt besondere Anforderungen an die Prozessparameter, insbesondere im Hinblick auf die Temperaturlösung für die Sinterung, welche keine Ergebnisse für die Bachelorarbeit beitragen konnten. Eine kontrollierte Entbinderung mit entsprechender Dauer erwies sich als essenziell, um Defekte und Qualitätsverluste während der anschließenden Sinterung zu vermeiden (Restkunststoff im Braunteil). Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen liefern wertvolle Hinweise auf geeignete Prozessfenster und ermöglichen die Ableitung gezielter Optimierungsmaßnahmen zur Verbesserung der Bauteilqualität.

Zusammenfassend konnte die Arbeit ein vertieftes Verständnis des FGF Prozesses für Aluminium Feedstock erarbeiten und konkrete Optimierungspotenziale aufzeigen. Die präzise Einstellung der Extrusionstemperatur, der Flussrate und der Schichthöhe erwies sich dabei als zentral für die Herstellung qualitativ hochwertiger Grünteile. Die Lüftereinstellungen und Retraction Einstellungen wurden aber in der in der quantitativen Analyse nicht untersucht. Für diese liegen nur qualitative Erkenntnisse vor. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen bietet sich für zukünftige Forschungsarbeiten die Möglichkeit, die Prozessstabilität durch weitergehende Integration von Sensorik zur Echtzeitüberwachung der Extrusionsbedingungen zu erhöhen und die Materialzuführung durch angepasste Nachfüllsysteme zu optimieren. Ebenso erscheint eine Erweiterung des untersuchten Parameterraums auf komplexere Bauteilgeometrien sinnvoll, um die Anwendbarkeit des Verfahrens auf industrielle Fertigungsprozesse zu prüfen. Die hier gewonnenen Ergebnisse leisten einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung der FGF-Technologie und zeigen auf, wie sich das Verfahren zukünftig als leistungsfähige Option in der additiven Fertigung von Aluminiumbauteilen etablieren könnte.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Greitemeier, *Untersuchung der Einflussparameter auf die mechanischen Eigenschaften von additiv gefertigtem TiAl6V4*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. doi: 10.1007/978-3-658-15735-7.
- [2] N. K. Bankapalli, V. Gupta, P. Saxena, A. Bajpai, C. Lahoda, und J. Polte, „Filament fabrication and subsequent additive manufacturing, debinding, and sintering for extrusion-based metal additive manufacturing and their applications: A review“, *Composites Part B: Engineering*, Bd. 264, S. 110915, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.compositesb.2023.110915.
- [3] „Gib dem Staub keine Chance!“ Mai 2018. Zugegriffen: 21. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dguv.de/medien/staub-info/gold/download/regeln_staub.pdf
- [4] „ISO 16890 - TROX an der Entwicklung der neuen Filternorm beteiligt“, Apr. 2017, Zugegriffen: 21. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://cdn.trox.de/ff56dabc2329fbde/07384d6416be/PI_Neue-Norm.pdf
- [5] C. Wei, Z. Zhang, D. Cheng, Z. Sun, M. Zhu, und L. Li, „An overview of laser-based multiple metallic material additive manufacturing: from macro- to micro-scales“, *Int. J. Extrem. Manuf.*, Bd. 3, Nr. 1, S. 012003, Jan. 2021, doi: 10.1088/2631-7990/abce04.
- [6] R. Eickhoff, S. Antusch, S. Baumgärtner, D. Nötzel, und T. Hanemann, „Feedstock Development for Material Extrusion-Based Printing of Ti6Al4V Parts“, *Materials*, Bd. 15, Nr. 18, Art. Nr. 18, Sep. 2022, doi: 10.3390/ma15186442.
- [7] „Pellets Granulat“. Zugegriffen: 21. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.element22.de/products/3dp-materials/pellets/>
- [8] J. Gonzalez-Gutierrez, S. Cano, S. Schuschnigg, C. Kukla, J. Sapkota, und C. Holzer, „Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives“, *Materials*, Bd. 11, Nr. 5, S. 840, Mai 2018, doi: 10.3390/ma11050840.
- [9] W. Kleppmann, *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. in Praxisreihe Qualität. München: Hanser, 2020. doi: 10.3139/9783446463974.
- [10] K. R. Bhote, K. R. Bhote, und K. R. Bhote, *Qualität - der Weg zur Weltspitze: die 7 praxisbezogenen Werkzeuge für moderne Versuchsmethodik, einfacher und kostenwirksamer als SPC*, 1. Aufl. Großbottwar: IQM, Inst. für Qualitätsmanagement, 1990.
- [11] M. Bragaglia, M. Mariani, C. Sergi, F. Sarasini, J. Tirillò, und F. Nanni, „Polylactic acid as biobased binder for the production of 3D printing filaments for Ti6Al4V alloy manufacturing via bound metal deposition“, *Journal of Materials Research and Technology*, Bd. 27, S. 168–181, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.09.227.
- [12] N.-A. A. B. Taib *u. a.*, „A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer“, *Polym. Bull.*, Bd. 80, Nr. 2, S. 1179–1213, Feb. 2023, doi: 10.1007/s00289-022-04160-y.
- [13] A. K. Trivedi, M. K. Gupta, und H. Singh, „PLA based biocomposites for sustainable products: A review“, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Bd. 6, Nr. 4, S. 382–395, Okt. 2023, doi: 10.1016/j.aiepr.2023.02.002.

- [14] D. Nötzel und T. Hanemann, „New Feedstock System for Fused Filament Fabrication of Sintered Alumina Parts“, *Materials*, Bd. 13, Nr. 19, S. 4461, Okt. 2020, doi: 10.3390/ma13194461.
- [15] DIN EN ISO 4288:1998-04, *Geometrische Produktspezifikation (GPS)-Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren_- Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit (ISO_4288:1996); Deutsche Fassung EN ISO_4288:1997*. doi: 10.31030/7434013.
- [16] L. Fahrmeir, T. Kneib, und S. Lang, *Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen*. in Statistik und ihre Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-33933-5.
- [17] DIN EN ISO 2039-1:2003-06, *Kunststoffe_- Bestimmung der Härte_- Teil_1: Kugeleindruckversuch (ISO_2039-1:2001); Deutsche Fassung EN ISO_2039-1:2003*. doi: 10.31030/9481121.
- [18] H. Gerling, „Übertragung eines Parametersatzes von Ti6Al4V-Feedstock auf Aluminium-Feedstock in der Fused Granulat Fabrication Prozessroute“. 19. Februar 2025.
- [19] „Bedienungsanleitung Digimatic Bügelmessschraube MDC-SX“. Zugegriffen: 3. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://shop.mitutoyo.de/media/mitutoyoData/DO/base/99MAB039D.pdf>
- [20] „Mitutoyo Bügelmessschraube MDC-25SX“. Zugegriffen: 1. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://shop.mitutoyo.de/web/mitutoyo/de_DE/mitutoyo/1305876921890/Digimatic%20Micrometer/PR/293-821-30/index.xhtml
- [21] „Density of Solids and Liquids (Pycnometer, Law of Archimedes)“. Zugegriffen: 31. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://home.uni-leipzig.de/prakphys/pdf/VersuchelPSP/Mechanics/M-05E-AUF.pdf>
- [22] „Interpretieren der wichtigsten Ergebnisse für Faktoriellen Versuchsplan analysieren - Minitab“. Zugegriffen: 9. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://support.minitab.com/de-de/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/factorial/analyze-factorial-design/interpret-the-results/key-results/>
- [23] AIM3D GmbH, „Betriebsanleitung ExAM 255“. 20. April 2022.
- [24] AIM3D GmbH, „Retraction Settings - Simplify3D (compatible with other slicer softwares)“, AIM3D GmbH, Rostock, Deutschland.
- [25] M. Elgendi, „Retraction test in OrcaSlicer: A Comprehensive Guide“, Retraction test in OrcaSlicer: A Comprehensive Guide. Zugegriffen: 9. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.obico.io/blog/retraction-test-in-orcaslicer-a-comprehensive-guide/>
- [26] P. Singh, V. K. Balla, A. Gokce, S. V. Atre, und K. H. Kate, „Additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy by metal fused filament fabrication (MF3): producing parts comparable to that of metal injection molding“, *Prog Addit Manuf*, Bd. 6, Nr. 4, S. 593–606, Dez. 2021, doi: 10.1007/s40964-021-00167-5.

- [27] P. Singh, V. K. Balla, A. Tofangchi, S. V. Atre, und K. H. Kate, „Printability studies of Ti-6Al-4V by metal fused filament fabrication (MF3)“, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Bd. 91, S. 105249, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105249.
- [28] M. Coffigniez *u. a.*, „Modeling of interstitials diffusion during debinding/sintering of 3D printed metallic filaments: Application to titanium alloy and its embrittlement“, *Acta Materialia*, Bd. 219, S. 117224, Okt. 2021, doi: 10.1016/j.actamat.2021.117224.
- [29] Y. Zhang, S. Bai, M. Riede, E. Garratt, und A. Roch, „A comprehensive study on fused filament fabrication of Ti-6Al-4V structures“, *Additive Manufacturing*, Bd. 34, S. 101256, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101256.

Anhang

Legierungen	Ti-6Al-4V (69% vol.)	Ti-6Al-4V (59% vol.)	Ti-6Al-4V (50% vol.)	Ti-6Al-4V (55-59 vol. %)
Hauptbindermittel	TPE	mehrkomponentig	Pluronic F127/Gel (Poly(ethyleneoxide)-Poly(propyleneoxide)- Poly(ethyleneoxide)-Triblock-Copolymer)	Polyolefin thermoplastisches Bindemittelsystem
Backbone	nicht veröffentlicht	Polymerbindemittel		
Tensid	Weichmacher	-		
Mischer	Drehmoment-Rheometer (IntelliTorque Plasti-Corder, C.W. Brabender Instruments, Inc. NJ, USA)	Brabender CMB, Intelli Torque Plasti-Corder	Speed-Mixer DAC150.1 FVZ-K (Zentrifugalmischer)	Doppelschnecken-Mini-Extruder (Xplore MC15)
Filamentextrusion	-	Gottfert Rheograph 20	NA	Einschneckenextruder (Filabot)
3D-Drucker	Pulse 3D-Drucker, MatterHackers, Lake Forest, CA, USA	Pulse von MatterHackers, ausgestattet mit einem Bondtech-Extruder	Robocaster (3D Inks, LLC, Stillwater, OK, USA)	Simplify3D für slicing
Chemische Entbindung	n-Heptan-Lösung bei 94 °C für 4 h	-	thermische Entbindung bei 500 °C und 350 °C/m Vacuum	Acetona at 60 °C for 24 h
thermische Entbindung	Thermische Entbindung bei 550 °C in einer N2-Atmosphäre	-		Thermische Entbindung bei 500 °C

Tabelle 25 Bindermittelzusammensetzung für Ti-6Al-4V ausgehend von links [26], [27], [28], [29]

Eindringtiefe, <i>h</i> mm	Kugelindruckhärte HB in N/mm ² bei einer Prüfkraft <i>F_m</i> von			
	49 N	132 N	358 N	961 N
0,150	23,82	64,17	174,04	467,19
0,155	22,79	61,38	166,47	446,87
0,160	21,84	58,82	159,54	428,25
0,165	20,96	56,47	153,16	411,12
0,170	20,16	54,30	147,26	395,31
0,175	19,41	52,29	141,81	380,67
0,180	18,72	50,42	136,75	367,07
0,185	18,07	48,68	132,03	354,42
0,190	17,47	47,06	127,63	342,60
0,195	16,91	45,54	123,51	331,55
0,200	16,38	44,12	119,65	321,19
0,205	15,88	42,78	116,03	311,46
0,210	15,41	41,52	112,61	302,30
0,215	14,97	40,34	109,40	293,66
0,220	14,56	39,22	106,36	285,50
0,225	14,16	38,16	103,48	277,79
0,230	13,79	37,15	100,76	270,48
0,235	13,44	36,20	98,18	263,54
0,240	13,10	35,29	95,72	256,95
0,245	12,78	34,43	93,39	250,69
0,250	12,48	33,61	91,16	244,72
0,255	12,19	32,83	89,04	239,03
0,260	11,91	32,09	87,02	233,59
0,265	11,65	31,37	85,09	228,40
0,270	11,39	30,69	83,24	223,44
0,275	11,15	30,04	81,47	218,68
0,280	10,92	29,41	79,77	214,13
0,285	10,70	28,81	78,14	209,76
0,290	10,48	28,24	76,58	205,56
0,295	10,28	27,68	75,08	201,53
0,300	10,08	27,15	73,63	197,66
0,305	9,89	26,64	72,24	193,93
0,310	9,70	26,14	70,91	190,34
0,315	9,53	25,67	69,62	186,87
0,320	9,36	25,21	68,37	183,54
0,325	9,19	24,77	67,17	180,32
0,330	9,04	24,34	66,02	177,21
0,335	8,88	23,93	64,90	174,21
0,340	8,73	23,53	63,81	171,30
0,345	8,59	23,14	62,77	168,49
0,350	8,45	22,77	61,76	165,78

Tabelle 26 Kugelindruckhärte HB nach Eindringtiefe *h* und Prüfkraft *F_m*

RunOrder	x _i	Accuracy												Mean of the total dimensional deviation		
		x [mm]			y [mm]			z [mm]								
	x ₂	x ₃	x _{mid}	x _{dev}	y ₁	y ₂	y _{mid}	y _{dev}	z ₁	z ₂	z _{mid}	z _{dev}				
1	15.439	15.504	15.479	15.474	0.033	15.420	15.375	15.416	15.404	0.040	0.025	9.948	9.940	9.943	-0.057 0.004	
2	15.229	15.112	15.214	15.185	0.185	0.064	15.059	15.054	15.545	15.541	0.032	10.266	10.273	10.272	0.272 0.005	
3	15.593	15.588	15.586	15.589	0.004	15.545	15.540	15.542	0.542	0.003	10.060	10.073	10.065	0.066 0.007		
4	15.179	15.178	15.177	15.178	0.001	15.115	15.125	15.111	15.117	0.117	0.007	9.973	9.972	9.970	0.028 0.002	
5	15.196	15.152	15.147	15.165	0.165	0.027	15.129	15.107	15.112	15.116	0.012	9.956	9.953	9.956	-0.044 0.003	
6	15.296	15.261	15.273	15.277	0.018	15.238	15.203	15.216	0.216	0.019	9.929	9.921	9.919	-0.017 0.012		
7	15.449	15.386	15.446	15.446	0.029	15.354	15.330	15.374	15.353	0.353	0.022	9.888	9.887	9.893	-0.107 0.006	
8	15.806	15.813	15.778	15.799	0.799	0.019	15.797	15.709	15.779	15.762	0.762	0.046	9.915	9.924	9.947	0.017 0.017
9	15.113	15.143	15.136	15.131	0.131	0.016	15.073	15.071	15.067	15.070	0.070	0.003	10.051	10.041	10.047	0.046 0.005
10	15.373	15.219	15.203	15.245	0.265	0.094	15.154	15.161	15.231	15.179	0.179	0.045	10.017	10.023	10.019	0.020 0.003
11	15.468	15.451	15.462	15.460	0.460	0.009	15.389	15.378	15.395	15.387	0.387	0.009	9.912	9.911	9.881	-0.099 0.018
12	15.278	15.280	15.275	15.278	0.278	0.003	15.203	15.197	15.204	15.201	0.201	0.004	9.948	9.945	9.937	0.043 0.006
13	15.414	15.419	15.437	15.423	0.423	0.012	15.360	15.365	15.387	15.371	0.371	0.014	9.953	9.967	9.954	0.058 0.008
14	15.220	15.220	15.228	15.228	0.228	0.010	15.196	15.188	15.183	15.189	0.189	0.007	9.946	9.933	9.956	0.045 0.012
15	15.435	15.446	15.463	15.448	0.448	0.014	15.420	14.418	15.449	15.096	0.986	0.587	9.963	9.968	9.962	-0.038 0.006
16	15.258	15.178	15.182	15.206	0.206	0.045	15.325	15.190	15.178	15.231	0.231	0.082	9.873	9.886	9.879	-0.124 0.007
17	15.188	15.192	15.197	15.192	0.192	0.006	15.140	15.132	15.168	15.147	0.147	0.019	9.918	9.934	9.928	-0.072 0.009
18	15.341	15.277	15.281	15.300	0.300	0.036	15.196	15.194	15.214	15.201	0.201	0.011	9.949	10.000	10.005	0.985 -0.015 0.031
19	15.325	15.412	15.331	15.366	0.366	0.049	15.253	15.269	15.347	15.286	0.286	0.053	9.989	9.979	9.981	0.017 0.005
20	15.583	15.587	15.566	15.579	0.579	0.011	15.546	15.523	15.572	15.547	0.547	0.025	10.012	10.011	10.005	0.009 0.004
21	15.175	15.178	15.182	15.182	0.182	0.004	15.108	15.104	15.106	15.106	0.106	0.002	9.928	9.963	9.981	0.057 0.007
22	15.238	15.238	15.238	15.238	0.238	0.003	15.172	15.172	15.172	15.172	0.172	0.002	10.021	10.028	10.025	0.025 0.004
23	15.210	15.221	15.221	15.217	0.217	0.012	15.137	15.141	15.134	15.137	0.137	0.004	9.757	9.769	9.768	0.235 0.007
24	15.376	15.378	15.370	15.380	0.380	0.007	15.317	15.319	15.330	15.322	0.322	0.007	9.738	9.756	9.763	0.752 0.013
25	15.345	15.335	15.335	15.339	0.339	0.006	15.297	15.292	15.288	15.282	0.282	0.005	9.873	9.889	9.861	0.874 -0.126 0.014
26	15.599	15.778	15.745	15.707	0.707	0.096	15.533	15.671	15.526	15.577	0.577	0.082	9.980	9.945	9.945	-0.043 0.027
27	15.226	15.169	15.184	15.193	0.193	0.030	15.133	15.102	15.101	15.112	0.112	0.018	9.940	9.944	9.943	0.942 -0.058 0.002
28	15.314	15.316	15.219	15.283	0.283	0.055	15.160	15.149	15.238	15.182	0.182	0.049	10.008	10.007	10.024	0.013 0.010
29	15.258	15.254	15.264	15.259	0.259	0.006	15.171	15.170	15.169	15.170	0.170	0.001	9.949	9.947	9.950	-0.050 0.004
30	15.130	15.139	15.134	15.134	0.134	0.005	15.089	15.083	15.086	15.074	0.074	0.003	10.051	10.063	10.052	0.055 0.007
31	15.248	15.244	15.245	15.245	0.245	0.003	15.172	15.172	15.168	15.171	0.171	0.002	9.924	9.924	9.923	-0.077 0.002
32	15.763	15.758	15.821	15.781	0.781	0.035	15.655	15.656	15.654	15.654	0.003	0.003	10.001	9.984	10.007	10.001 0.007
33	15.567	15.566	15.588	15.574	0.574	0.012	15.516	15.491	15.490	15.499	0.499	0.015	9.975	9.990	9.987	0.016 0.008
34	15.419	15.437	15.420	15.425	0.425	0.010	15.361	15.359	15.374	15.365	0.365	0.008	9.969	9.977	9.973	-0.027 0.004
35	15.422	15.596	15.444	15.487	0.487	0.095	15.437	15.326	15.512	15.425	0.425	0.094	9.977	9.961	9.982	0.973 -0.027 0.011
36	15.604	15.626	15.584	15.608	0.608	0.016	15.540	15.533	15.811	15.628	0.628	0.159	9.963	9.969	9.974	0.969 -0.031 0.006
37	15.305	15.309	15.306	15.306	0.306	0.003	15.261	15.256	15.258	15.258	0.258	0.003	9.971	9.972	9.986	0.976 -0.024 0.008
38	15.441	15.438	15.437	15.439	0.439	0.002	15.429	15.425	15.425	15.425	0.425	0.004	9.880	9.906	9.889	-0.111 0.015
39	15.277	15.276	15.267	15.273	0.273	0.006	15.236	15.233	15.233	15.233	0.233	0.006	9.902	9.912	9.903	-0.027 0.008
40	15.446	15.480	15.417	15.448	0.448	0.032	15.352	15.371	15.419	15.381	0.381	0.035	9.982	9.983	9.987	-0.013 0.005
41	15.170	15.162	15.171	15.168	0.168	0.005	15.090	15.107	15.099	15.098	0.098	0.009	9.953	9.974	9.950	0.962 0.001
42	15.384	15.352	15.379	15.372	0.372	0.017	15.299	15.297	15.288	15.296	0.296	0.006	9.938	9.942	9.937	0.939 -0.061 0.003
43	15.363	15.348	15.362	15.362	0.362	0.010	15.298	15.285	15.293	15.292	0.292	0.007	9.933	9.942	9.939	-0.061 0.006
44	15.120	15.215	15.109	15.148	0.148	0.058	15.063	15.102	15.158	15.108	0.108	0.048	9.985	10.000	9.995	0.997 -0.003 0.003
45	15.306	15.308	15.306	15.306	0.306	0.002	15.249	15.245	15.249	15.249	0.249	0.004	9.911	9.934	9.932	0.926 -0.074 0.013
46	15.330	15.327	15.316	15.324	0.324	0.007	15.246	15.246	15.246	15.246	0.246	0.001	9.967	9.962	9.964	0.964 -0.043 0.003
47	15.172	15.170	15.189	15.177	0.177	0.010	15.121	15.117	15.120	15.119	0.119	0.002	9.981	9.944	9.945	0.957 -0.043 0.021
48	15.361	15.362	15.367	15.360	0.360	0.008	15.302	15.299	15.308	15.303	0.303	0.005	10.006	9.977	9.994	0.992 -0.008 0.015

Tabelle 27 Darstellung der Maßabweichungen der DOE-Proben mit Mittelwert der totalen Maßabweichung

RunOrder	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Mittelwert Masse Mittelwert
	Differenz zwischen Massee trocken und Massee nass in g		Dichte g/cm ³	Differenz zwischen Massee trocken und Massee nass in g		Dichte g/cm ³	Differenz zwischen Massee trocken und Massee nass in g		Dichte g/cm ³	
	Masse trocken in g	Masse nass in g	Masse trocken in g	Masse nass in g	Masse trocken in g	Masse nass in g	Masse trocken in g	Masse nass in g	Masse trocken in g	
1	4,409	2,275	1,934	4,407	2,276	1,932	4,411	2,276	1,934	4,409
2	3,897	2,238	1,738	3,895	2,242	1,734	3,900	2,237	1,740	3,897
3	4,529	2,336	1,935	4,520	2,332	1,934	4,529	2,335	1,935	4,526
4	3,962	2,208	1,791	3,951	2,191	1,799	3,960	2,208	1,790	3,958
5	4,011	2,213	1,809	4,006	2,183	1,831	4,014	2,221	1,803	4,010
6	4,157	2,228	1,862	4,171	2,228	1,868	4,164	2,226	1,867	4,164
7	4,394	2,258	1,942	4,407	2,258	1,948	4,405	2,254	1,950	4,402
8	4,437	2,264	1,956	4,451	2,346	1,893	4,461	2,351	1,883	4,450
9	3,894	2,210	1,758	3,909	2,432	1,604	3,923	2,202	1,778	3,909
10	3,571	2,179	1,635	3,556	2,288	1,551	3,576	2,192	1,628	3,568
11	4,437	2,252	1,966	4,442	2,259	1,962	4,441	2,259	1,962	4,440
12	4,361	2,248	1,936	4,356	2,242	1,939	4,358	2,249	1,934	4,358
13	4,249	2,255	1,880	4,241	2,253	1,878	4,244	2,253	1,880	4,245
14	4,116	2,241	1,833	4,109	2,200	1,864	4,113	2,204	1,862	4,113
15	4,288	2,264	1,890	4,282	2,268	1,884	4,289	2,267	1,888	4,286
16	4,048	2,201	1,835	4,044	2,301	1,754	4,050	2,206	1,832	4,047
17	4,032	2,199	1,830	4,031	2,202	1,827	4,034	2,195	1,834	4,032
18	3,826	2,202	1,734	3,832	2,265	1,688	3,831	2,191	1,745	3,830
19	4,405	2,258	1,947	4,401	2,351	1,868	4,406	2,258	1,947	4,404
20	4,283	2,267	1,885	4,282	2,345	1,822	4,288	2,269	1,886	4,284
21	3,933	2,193	1,790	3,934	2,192	1,791	3,938	2,191	1,794	3,935
22	4,047	2,224	1,816	4,040	2,225	1,812	4,045	2,229	1,811	4,044
23	3,800	2,160	1,755	3,796	2,157	1,756	3,802	2,157	1,759	3,799
24	3,913	2,181	1,790	3,904	2,132	1,785	3,913	2,182	1,789	3,910
25	4,299	2,288	1,917	4,308	2,223	1,932	4,298	2,234	1,920	4,300
26	4,644	2,347	1,974	4,649	2,308	2,010	4,646	2,345	1,977	4,646
27	4,123	2,219	1,854	4,123	2,214	1,858	4,115	2,220	1,850	4,120
28	3,902	2,192	1,776	3,902	2,191	1,777	3,907	2,188	1,782	3,904
29	4,322	2,243	1,923	4,325	2,246	1,922	4,330	2,253	1,918	4,326
30	3,591	2,170	1,651	3,582	2,178	1,641	3,587	2,183	1,640	3,587
31	4,129	2,226	1,851	4,130	2,223	1,854	4,126	2,214	1,860	4,128
32	4,617	2,349	1,961	4,619	2,343	1,967	4,615	2,346	1,963	4,617
33	4,404	2,283	1,925	4,406	2,285	1,924	4,404	2,294	1,916	4,405
34	4,329	2,262	1,910	4,332	2,264	1,909	4,332	2,262	1,911	4,331
35	4,529	2,304	1,961	4,531	2,284	1,980	4,534	2,291	1,975	4,531
36	4,642	2,322	1,995	4,644	2,330	1,989	4,643	2,331	1,988	4,643
37	4,040	2,202	1,831	4,041	2,213	1,822	4,042	2,222	1,815	4,041
38	4,467	2,255	1,977	4,470	2,277	1,959	4,473	2,274	1,963	4,470
39	3,867	2,191	1,761	3,857	2,192	1,756	3,861	2,197	1,754	3,862
40	4,539	2,301	1,968	4,532	2,283	1,981	4,542	2,305	1,966	4,538
41	3,812	2,179	1,746	3,821	2,181	1,748	3,818	2,173	1,753	3,817
42	4,352	2,248	1,932	4,361	2,252	1,932	4,361	2,262	1,924	4,358
43	4,362	2,263	1,923	4,372	2,255	1,935	4,372	2,304	1,894	4,369
44	4,009	2,215	1,806	4,027	2,223	1,808	4,019	2,264	1,771	4,018
45	4,264	2,226	1,911	4,267	2,231	1,909	4,267	2,256	1,807	4,266
46	4,289	2,248	1,904	4,292	2,252	1,902	4,294	2,246	1,908	4,292
47	3,902	2,197	1,772	3,910	2,192	1,780	3,911	2,279	1,712	3,908
48	4,198	2,258	1,855	4,208	2,257	1,850	4,211	2,320	1,811	4,207

Tabelle 28 Darstellung der Gewichtsmessung mit errechneter Grünteldichte

x_1	x [mm]			y [mm]						z [mm]								
	x_2	x_3	x_{mid}	x_{bew}	x_{dev}	y_1	y_2	y_3	y_{mid}	y_{bew}	y_{dev}	z_1	z_2	z_3	z_{mid}	z_{bew}	z_{dev}	Mean of the total dimensional deviation
15.439	15.504	15.479	15.474	0.474	0.033	15.420	15.375	15.416	15.404	0.404	0.025	9.948	9.940	9.941	9.943	-0.057	0.004	0.274
15.229	15.112	15.214	15.185	0.185	0.064	15.059	15.054	15.107	15.073	0.073	0.029	10.266	10.273	10.276	10.272	-0.272	0.005	0.177
15.593	15.589	15.586	15.589	0.004	15.545	15.541	15.540	15.542	0.542	0.003	10.060	10.073	10.065	10.066	0.066	0.007	0.399	
15.179	15.178	15.177	15.178	0.178	0.001	15.115	15.125	15.111	15.117	0.117	0.007	9.973	9.972	9.970	9.972	-0.028	0.002	0.089
15.196	15.152	15.147	15.165	0.027	15.129	15.107	15.116	15.116	0.012	0.012	9.956	9.953	9.958	9.956	-0.044	0.003	0.079	
15.296	15.261	15.273	15.277	0.277	0.018	15.238	15.208	15.203	15.216	0.216	0.019	9.926	9.921	9.906	9.919	-0.107	0.006	0.137
15.449	15.403	15.396	15.416	0.416	0.029	15.354	15.330	15.374	15.363	0.363	0.022	8.898	8.887	8.893	8.893	-0.107	0.006	0.220
15.806	15.813	15.778	15.799	0.799	0.019	15.797	15.709	15.779	15.762	0.762	0.046	9.915	9.924	9.947	9.929	-0.071	0.017	0.496
15.113	15.143	15.136	15.131	0.131	0.016	15.073	15.071	15.067	15.070	0.070	0.003	10.051	10.041	10.047	10.046	0.046	0.005	0.082
15.373	15.219	15.203	15.265	0.265	0.094	15.154	15.151	15.231	15.179	0.179	0.045	10.017	10.023	10.019	10.020	0.020	0.003	0.154
15.468	15.451	15.462	15.460	0.460	0.009	15.389	15.378	15.395	15.387	0.387	0.009	9.912	9.911	9.881	9.901	-0.099	0.018	0.250
15.278	15.280	15.278	15.278	0.003	15.203	15.204	15.204	15.201	0.201	0.004	9.948	9.945	9.937	9.943	-0.057	0.006	0.141	
15.414	15.419	15.437	15.423	0.423	0.012	15.360	15.365	15.371	15.371	0.371	0.014	9.953	9.967	9.954	9.953	-0.042	0.008	0.251
15.220	15.225	15.240	15.228	0.228	0.010	15.196	15.188	15.183	15.189	0.189	0.007	9.946	9.933	9.956	9.945	-0.055	0.012	0.121
15.435	15.446	15.463	15.448	0.448	0.014	15.420	14.418	15.449	15.096	0.096	0.587	9.963	9.968	9.956	9.962	-0.038	0.006	0.169
15.258	15.178	15.182	15.206	0.206	0.045	15.325	15.190	15.178	15.231	0.231	0.082	9.873	9.886	9.878	9.879	-0.121	0.007	0.105
15.188	15.192	15.197	15.192	0.192	0.005	15.140	15.132	15.168	15.147	0.147	0.019	9.918	9.934	9.932	9.928	-0.072	0.009	0.089
15.341	15.277	15.281	15.300	0.300	0.036	15.196	15.194	15.214	15.201	0.201	0.011	9.949	10.000	9.905	9.985	-0.15	0.031	0.162
15.325	15.412	15.331	15.356	0.356	0.049	15.253	15.259	15.347	15.286	0.286	0.053	9.989	9.979	9.983	9.983	-0.016	0.004	0.208
15.583	15.587	15.586	15.579	0.579	0.011	15.523	15.523	15.572	15.547	0.547	0.025	10.012	10.011	10.009	10.009	0.027	0.004	0.378
15.175	15.174	15.182	15.177	0.177	0.004	15.108	15.104	15.106	15.106	0.106	0.002	9.928	9.963	9.981	9.957	-0.043	0.027	0.080
15.238	15.235	15.241	15.238	0.003	15.177	15.168	15.172	15.172	0.172	0.005	10.021	10.028	10.027	10.025	0.025	0.004	0.145	
15.210	15.211	15.231	15.217	0.217	0.012	15.137	15.137	15.137	15.137	0.137	0.004	9.757	9.769	9.768	9.765	-0.235	0.007	0.040
15.376	15.388	15.375	15.380	0.380	0.007	15.317	15.319	15.330	15.322	0.322	0.007	9.738	9.756	9.763	9.752	-0.248	0.013	0.151
15.345	15.338	15.335	15.339	0.339	0.005	15.297	15.292	15.288	15.292	0.292	0.005	9.873	9.889	9.861	9.874	-0.126	0.014	0.169
15.599	15.778	15.745	15.707	0.707	0.095	15.533	15.671	15.526	15.577	0.577	0.082	9.950	9.945	9.945	9.945	-0.055	0.005	0.410
15.226	15.169	15.184	15.193	0.193	0.030	15.133	15.102	15.101	15.112	0.112	0.018	9.940	9.944	9.943	9.942	-0.058	0.002	0.082
15.314	15.316	15.219	15.283	0.283	0.055	15.160	15.149	15.238	15.182	0.182	0.049	10.008	10.007	10.024	10.013	0.013	0.010	0.159
15.258	15.254	15.264	15.259	0.259	0.005	15.171	15.170	15.169	15.170	0.170	0.001	9.949	9.954	9.947	9.950	-0.050	0.004	0.126
15.130	15.132	15.139	15.134	0.134	0.005	15.086	15.086	15.074	15.083	0.083	0.008	10.051	10.063	10.052	10.055	0.055	0.007	0.091
15.248	15.244	15.243	15.245	0.245	0.003	15.172	15.172	15.168	15.171	0.171	0.002	9.924	9.924	9.920	9.923	-0.077	0.002	0.113
15.763	15.758	15.821	15.781	0.781	0.035	15.655	15.656	15.656	15.654	0.654	0.003	10.001	9.994	9.943	9.942	-0.058	0.002	0.478
15.567	15.566	15.588	15.574	0.574	0.012	15.516	15.491	15.490	15.499	0.499	0.015	9.775	9.990	9.987	9.984	-0.111	0.015	0.352
15.419	15.437	15.420	15.425	0.425	0.010	15.361	15.359	15.374	15.365	0.365	0.008	9.969	9.977	9.973	9.973	-0.027	0.004	0.254
15.422	15.596	15.444	15.487	0.487	0.095	15.437	15.326	15.512	15.425	0.425	0.094	9.977	9.961	9.982	9.973	-0.027	0.011	0.295
15.604	15.626	15.594	15.608	0.608	0.016	15.540	15.533	15.811	15.628	0.628	0.159	9.963	9.969	9.974	9.969	-0.031	0.006	0.402
15.305	15.309	15.303	15.306	0.306	0.003	15.261	15.256	15.258	15.258	0.258	0.003	9.971	9.972	9.986	9.976	-0.024	0.008	0.180
15.441	15.439	15.437	15.439	0.439	0.002	15.429	15.425	15.421	15.425	0.425	0.004	9.880	9.906	9.889	9.889	-0.111	0.015	0.251
15.277	15.276	15.273	15.273	0.273	0.006	15.238	15.233	15.233	15.233	0.233	0.005	9.896	9.902	9.903	9.903	-0.097	0.008	0.194
15.446	15.480	15.417	15.448	0.448	0.032	15.352	15.371	15.419	15.381	0.381	0.035	9.992	9.983	9.986	9.987	-0.013	0.005	0.084
15.170	15.162	15.171	15.168	0.168	0.005	15.090	15.107	15.099	15.099	0.099	0.009	9.953	9.974	9.950	9.959	-0.041	0.013	0.075
15.384	15.352	15.379	15.372	0.372	0.017	15.299	15.297	15.288	15.285	0.285	0.006	9.938	9.942	9.937	9.939	-0.061	0.003	0.202
15.363	15.344	15.348	15.352	0.352	0.010	15.273	15.271	15.273	15.273	0.273	0.007	9.933	9.942	9.943	9.943	-0.061	0.006	0.194
15.120	15.215	15.109	15.148	0.148	0.058	15.063	15.102	15.158	15.108	0.108	0.048	9.986	10.000	9.995	9.997	-0.003	0.003	0.072
15.306	15.308	15.306	15.306	0.306	0.002	15.249	15.249	15.249	15.249	0.249	0.004	9.917	9.934	9.932	9.926	-0.074	0.013	0.160
15.172	15.170	15.189	15.177	0.177	0.010	15.121	15.117	15.120	15.119	0.119	0.002	9.981	9.944	9.945	9.957	-0.043	0.021	0.084
15.351	15.362	15.367	15.360	0.360	0.008	15.302	15.308	15.299	15.303	0.303	0.005	10.006	9.977	9.984	9.992	-0.008	0.015	0.218

Tabelle 29 Darstellung der Maßabweichungen mit Mittelwert der totalen Maßabweichung

	Accuracy																					
	x [mm]				y [mm]				z [mm]													
RunOrder	x ₁	x ₂	x ₃	x _{mid}	x _{dev}	x _{abw}	y ₁	y ₂	y ₃	y _{mid}	y _{dev}	y _{abw}	z ₁	z ₂	z ₃	z _{mid}	z _{dev}	z _{abw}	Mean of the total dimensional deviation			
C0	15,126	15,125	15,110	15,120	0,120	0,009	15,078	15,068	15,066	15,071	0,071	0,006	9,941	9,941	9,936	9,939	-0,061	0,003	0,043	0,043		
C1	15,239	15,234	15,161	15,211	0,211	0,044	15,152	15,147	15,188	15,162	0,162	0,022	9,948	9,97	9,948	9,955	-0,045	0,013	0,110	0,110		
C2	15,432	15,43	15,429	15,430	0,430	0,002	15,393	15,391	15,389	15,391	0,391	0,002	9,759	9,77	9,759	9,763	-0,237	0,006	0,195	0,195		
C3	15,41	15,409	15,407	15,409	0,409	0,002	15,364	15,362	15,357	15,361	0,361	0,004	9,787	9,783	9,79	9,787	-0,213	0,004	0,185	0,185		
C4	15,517	15,516	15,517	15,517	0,517	0,001	15,463	15,456	15,443	15,454	0,454	0,010	9,821	9,813	9,818	9,817	-0,183	0,004	0,263	0,263		
C5	15,565	15,556	15,558	15,558	0,558	0,008	15,552	15,55	15,542	15,548	0,548	0,005	9,786	9,785	9,775	9,782	-0,218	0,006	0,296	0,296		
C6	15,198	15,194	15,197	15,196	0,196	0,002	15,167	15,152	15,162	15,160	0,160	0,008	9,805	9,801	9,805	9,804	-0,196	0,002	0,053	0,053		
C7	15,211	15,211	15,212	15,211	0,211	0,001	15,218	15,202	15,198	15,206	0,206	0,011	9,809	9,81	9,808	9,809	-0,191	0,001	0,075	0,075		
C8	15,21	15,209	15,218	15,212	0,212	0,005	15,183	15,178	15,178	15,180	0,180	0,003	9,828	9,846	9,84	9,838	-0,162	0,009	0,077	0,077		
C9	15,306	15,344	15,303	15,318	0,318	0,023	15,277	15,274	15,274	15,275	0,275	0,002	9,843	9,844	9,83	9,839	-0,161	0,008	0,144	0,144		

Tabelle 30 Darstellung der Maßabweichungen mit Mittelwert der totalen Maßabweichung der Proben mit optimierten Parametern

RunOrder	Masse trocken in g	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Density measurement		
		zwischen Masse trocken und Masse	Dichte g/cm ³	Masse trocken in g	zwischen Masse trocken und Masse nass	Dichte g/cm ³	Masse trocken in g	zwischen Masse trocken und Masse	Dichte g/cm ³	Mittelwert	Grünteildichte	Standardabweichung	Masse
C0	4.083	2.204	1.849	4.096	2.208	1.851	4.101	2.218	1.845	1.848		0.003	4.093
C1	4.254	2.231	1.903	4.254	2.226	1.907	4.25	2.226	1.905	1.905		0.002	4.253
C2	4.304	2.234	1.923	4.298	2.228	1.925	4.305	2.23	1.927	1.925		0.002	4.302
C3	4.327	2.247	1.922	4.328	2.239	1.929	4.328	2.242	1.927	1.926		0.004	4.328
C4	4.328	2.24	1.928	4.326	2.231	1.935	4.326	2.238	1.929	1.931		0.004	4.327
C5	4.32	2.201	1.959	4.322	2.206	1.955	4.323	2.197	1.964	1.959		0.004	4.322
C6	4.129	2.209	1.865	4.129	2.206	1.868	4.129	2.203	1.870	1.868		0.003	4.129
C7	4.177	2.205	1.890	4.176	2.205	1.890	4.175	2.208	1.887	1.889		0.002	4.176
C8	3.913	2.18	1.791	3.913	2.183	1.789	3.916	2.183	1.790	1.790		0.001	3.914
C9	4.167	2.216	1.877	4.167	2.208	1.883	4.17	2.209	1.884	1.881		0.004	4.168

Tabelle 31 Darstellung der Gewichtsmessung mit errechneter Grünteildichte mit optimierten Parametern

RundOrder	Bräunling Gewicht nach 3 Stunden [g]	Bräunling Gewicht nach 9 Stunden [g]	Gewichtsverlust nach 3 Stunden [%]	Gewichtsverlust nach 9 Stunden [%]	Gewichtsverlust nach 18 Stunden [%]	Gewichtsverlust nach 58 Stunden [%]	Gewichtsverlust nach 77 Stunden [%]
1	4,195	4,094	4,854	4,028	7,144	8,641	10,535
2	3,612	3,556	3,527	7,321	8,912	9,502	10,467
3	4,326	4,228	4,164	4,419	6,584	7,998	10,415
4	3,717	3,632	3,594	6,081	8,229	9,189	10,389
5	3,775	3,684	3,648	5,868	8,137	9,035	10,284
6	3,968	3,864	3,807	4,707	7,205	8,573	10,334
7	4,213	4,105	4,045	4,294	6,747	8,110	10,207
8	4,261	4,158	4,089	4,240	6,555	8,105	10,344
9	3,663	3,581	3,546	6,285	8,383	9,279	10,325
10	3,342	3,257	3,232	6,325	8,708	9,409	10,544
11	4,242	4,142	4,073	4,459	6,712	8,266	10,381
12	4,157	4,056	3,993	4,620	6,960	8,382	10,314
13	4,024	3,934	3,877	5,199	7,319	8,662	10,405
14	3,902	3,795	3,746	5,122	7,724	8,916	10,367
15	4,082	3,998	3,928	4,767	6,913	8,360	10,226
16	3,851	3,759	3,699	4,851	7,124	8,606	10,247
17	3,785	3,698	3,657	6,134	8,291	9,308	10,546
18	3,577	3,495	3,467	6,598	8,739	9,470	10,525
19	4,205	4,101	4,033	4,519	6,880	8,424	10,431
20	4,092	3,983	3,919	4,489	7,033	8,527	10,598
21	3,687	3,588	3,556	6,302	8,818	9,632	10,633
22	3,803	3,707	3,668	5,959	8,333	9,298	10,593
23	3,531	3,454	3,439	7,063	9,089	9,484	10,434
24	3,706	3,604	3,568	5,217	7,826	9,003	10,402
25	4,112	4,009	3,948	4,372	6,767	8,186	10,351
26	4,448	4,346	4,278	4,269	6,464	7,927	10,519
27	3,918	3,821	3,767	4,911	7,265	8,575	10,529
28	3,605	3,546	3,528	7,651	9,162	9,623	10,543
29	4,116	4,014	3,951	4,847	7,205	8,662	10,479
30	3,256	3,241	3,24	9,219	9,638	9,665	10,560
31	3,929	3,821	3,766	4,828	7,444	8,777	10,610
32	4,396	4,283	4,215	4,722	7,234	8,707	10,758
33	4,203	4,096	4,036	4,578	7,008	8,370	10,409
34	4,138	4,042	3,977	4,456	6,673	8,174	10,259
35	4,341	4,243	4,173	4,200	6,363	7,908	10,210
36	4,447	4,342	4,274	4,221	6,483	7,947	10,388
37	3,807	3,713	3,672	5,791	8,117	9,131	10,416
38	4,289	4,183	4,118	4,049	6,421	7,875	10,197
39	3,629	3,545	3,506	6,025	8,200	9,210	10,484
40	4,327	4,209	4,143	4,643	7,243	8,698	10,489
41	3,55	3,468	3,449	6,995	9,143	9,641	10,545
42	4,153	4,05	3,986	4,704	7,067	8,536	10,390
43	4,182	4,081	4,014	4,273	6,585	8,118	10,250
44	3,786	3,685	3,653	5,782	8,295	9,092	10,356
45	4,069	3,962	3,898	4,618	7,126	8,626	10,506
46	4,087	3,982	3,918	4,769	7,216	8,707	10,522
47	3,651	3,576	3,541	6,568	8,488	9,383	10,553
48	4,006	3,907	3,851	4,676	7,102	8,433	10,278
C5	4,127	4,026	3,965	4,504	6,841	8,253	10,315
C6	3,93	3,824	3,769	4,820	7,387	8,719	10,535
C7	3,989	3,882	3,821	4,478	7,040	8,501	10,505
C8	3,699	3,603	3,559	5,493	7,946	10,424	10,424
C9	3,969	3,865	3,814	4,774	7,270	8,493	10,477

Tabelle 32 Darstellung der Gewichtsverluste der DOE-Proben

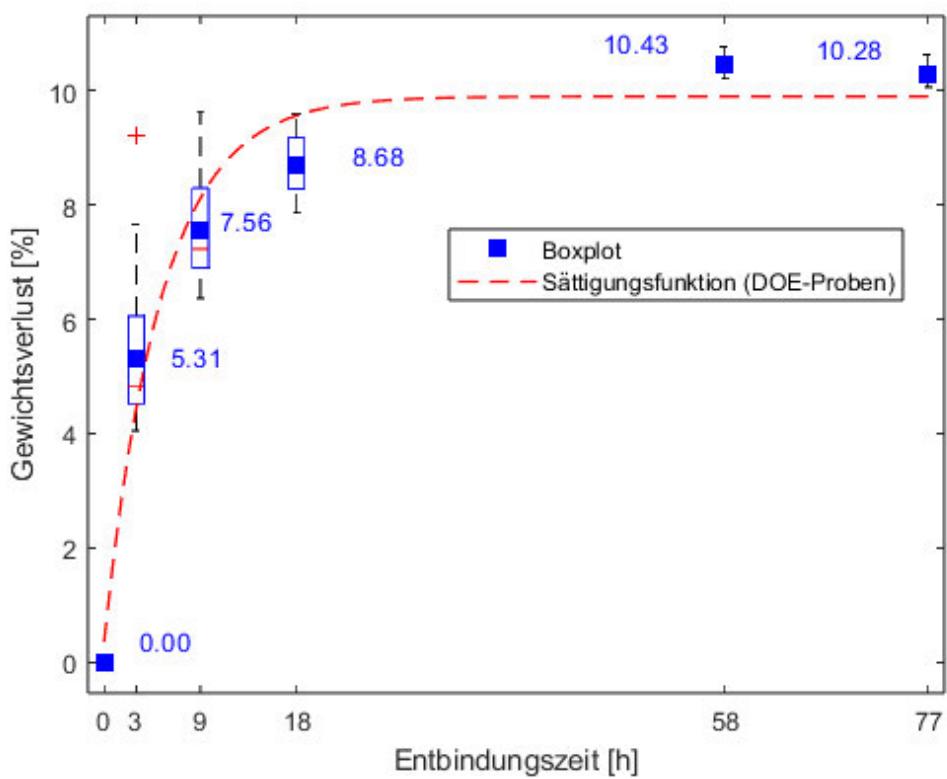


Abbildung 38 Boxplot zur Entbindungszeit der DOE-Proben mit Sättigungsfunktion

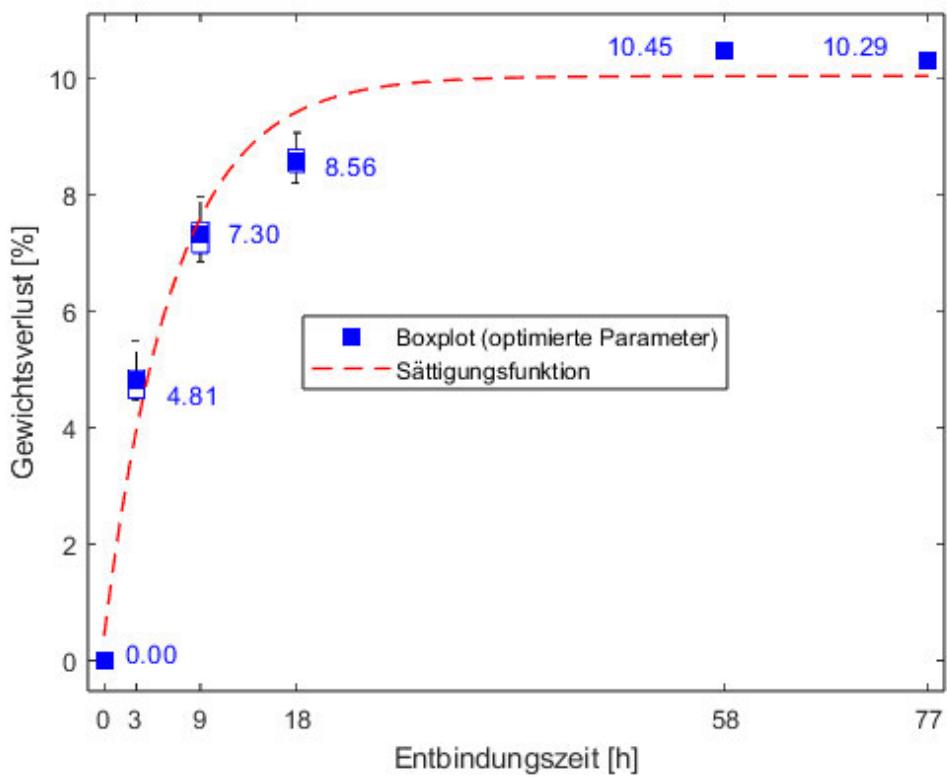


Abbildung 39 Boxplot zur Entbindungszeit mit optimierten Parametern



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

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

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

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

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

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Gerling

Vorname: Hendrik

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

DOE-Parameterstudie mit Aluminium-Feedstock in der Fused Granulat Fabrication Prozessroute

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

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

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

Hamburg

09.05.2025

Ort

Datum

Unterschrift im Original