



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

# **Bachelorarbeit**

Julian Katz

## **Ermittlung geeigneter Stützstrukturen hinsichtlich vertikaler Haltekraft und Oberflächenqualität für die Additive Fertigung dentaler Implantate mittels selektiven Laser-Strahlschmelzens**

Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion

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

Julian Katz

**Ermittlung geeigneter Stützstrukturen hinsichtlich  
vertikaler Haltekraft und Oberflächenqualität für die  
Additive Fertigung dentaler Implantate mittels  
selektiven Laser-Strahlschmelzens**

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

in Zusammenarbeit mit:

Fraunhofer-Institut für Additive Produktionstechnologien IAPT



Erstprüfer: Prof. Dr. Ing. Jens Telgkamp

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Dirk Herzog

Abgabedatum: 21.02.2024

# Zusammenfassung

**Autor:** Julian Katz

## **Thema der Bachelorthesis**

Ermittlung geeigneter Stützstrukturen hinsichtlich vertikaler Haltekraft und Oberflächenqualität für die Additive Fertigung dentaler Implantate mittels selektiven Laser-Strahlschmelzens

## **Stichworte**

Additive Fertigung, 3D-Druck, Laser-Strahlschmelzen, LPBF, Medizintechnik, Implantate, Stützstrukturen, Ti-6Al-4V, Oberflächenqualität, mechanische Eigenschaften

## **Kurzzusammenfassung**

Additive Fertigung transformiert die Produktion von komplexen Bauteilen, besonders in der dentalen Medizintechnik, durch Individualisierung von Implantaten und den Einsatz der Titanlegierung Ti-6Al-4V Grade 23 mit seinen biokompatiblen Eigenschaften. Die zentralen Herausforderungen liegen unter anderem in der Sicherstellung einer kontrollierbaren Oberflächenqualität und der strukturellen Integrität des Bauteils. Stützstrukturen spielen eine entscheidende Rolle für die Oberflächenqualität, Wärmeableitung und Minimierung des Verzugs. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass die mechanischen Eigenschaften und die Oberflächenqualität signifikant von der Ausrichtung und Gestaltung der Stützstrukturen abhängen. Vertikal gebaute Proben und die Minimierung der Anbindungsflächen der Stützstrukturen sind wesentliche Erkenntnisse. Die Optimierung dieser Strukturen verbessert zudem die Qualität und Effizienz, mit Minimierung der Nachbearbeitungszeit, demonstriert durch die additive Fertigung einer Modellgussprothese und trägt zur Weiterentwicklung und Wirtschaftlichkeit in der medizinischen Anwendung bei.

**Author:** Julian Katz

## **Title of the paper**

Determination of suitable support structures with regard to vertical retention force and surface quality for the additive manufacturing of dental implants using selective laser beam melting

## **Keywords**

Additive manufacturing, 3D printing, laser beam melting, LPBF, medical technology, implants, support structures, Ti-6Al-4V, surface quality, mechanical properties

## **Abstract**

Additive manufacturing is transforming the production of complex components, especially in dental medical technology, through the individualization of implants and the use of the titanium alloy Ti-6Al-4V Grade 23 with its biocompatible properties. The main challenges include ensuring a controllable surface quality and the structural integrity of the component. Support structures play a decisive role in surface quality, heat dissipation and minimizing distortion. The investigations carried out showed that the mechanical properties and surface quality depend significantly on the orientation and design of the support structures. Vertically built samples and the minimization of the connection surfaces of the support structures are essential findings. The optimization of these structures also improves quality and efficiency, with minimization of post-processing time, demonstrated by the additive manufacturing of a model casting prosthesis and contributes to further development and cost-effectiveness in medical applications.

## **Aufgabenstellung**

Durch den Fortschritt in der additiven Fertigung werden zunehmend dentale Implantate mittels selektivem Laser-Strahlschmelzen hergestellt, dessen Qualität signifikant von einer optimalen Auswahl der Stützstrukturen liegt. Für den Werkstoff Ti-6Al-4V Grade 23 sollten geeignete Stützstrukturen identifiziert und deren Einfluss auf das AM-Produkt qualitativ als auch quantitativ bewertet werden. Hierbei sollte der Fokus auf eine möglichst hohe Oberflächenqualität mit gleichzeitiger Berücksichtigung der vertikalen Kraftaufnahme der Stützstrukturen liegen, um den vertikalen Verzug des dentalen Implantats zu minimieren. Aus den Erkenntnissen und Ergebnissen sollten Handlungsanweisungen abgeleitet werden, die eine systemunabhängige Fertigung mit gleichbleibenden Qualitäten des Endprodukts garantieren. Für die Untersuchungen sollte die Vorbereitungssoftware Magics von der Fa. Materialise verwendet und exemplarisch das System TruPrint 1000 von der Fa. Trumpf und eine SLM 500 Quad Laser der Fa. SLM Solutions für die Bestimmung der Kenngrößen im In-Prozess verwendet werden.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>IX</b>
<b>1 Motivation und Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>2</b>
2.1 Additive Fertigungstechnologien.....	2
2.1.1 Laser-Strahlschmelzen.....	5
2.1.2 Trumpf TruPrint 1000 .....	7
2.1.3 SLM 500 .....	8
2.2 Eigenschaften und Anwendungen von Ti-6Al-4V Grade 23.....	8
2.2.1 Bedeutung von Ti-6Al-4V in der Medizintechnik.....	10
2.3 Prozessschritte und Kenngrößen bei L-PBF .....	12
2.3.1 Pre-Prozess Kenngrößen und ihre Bedeutung.....	12
2.3.2 Stützstrukturen .....	13
2.3.3 Kontaktlose Stützstrukturen zur Verbesserung der Oberflächenqualität .....	15
2.3.4 In-Prozess Kenngrößen .....	17
2.3.5 Post-Prozess Kenngrößen und ihre Auswirkungen auf das Endprodukt.....	19
2.4 Klinische Anforderungen und regulatorische Aspekte im Dentalbereich .....	21
2.5 Statistische Versuchsplanung.....	22
2.5.1 Grundlegendes Konzept .....	22
2.5.2 Statistische Auswertung.....	23
2.6 Herausforderungen und offene Forschungsfragen.....	25
<b>3 Methodik</b>	<b>26</b>
3.1 Untersuchungsmethodik und Versuchsbeschreibung.....	26
3.1.1 Analyse der mechanischen Eigenschaften.....	26
3.1.2 Analyse der Stützstrukturstärke.....	29
3.1.3 Analyse der Oberflächenrauigkeit ausgewählter Stützstrukturen .....	33
3.1.4 Auswahl geeigneter Stützstrukturen und Validierung der Haltekraft.....	36
<b>4 Ergebnisse</b>	<b>37</b>
4.1 Mechanische Eigenschaften der Zugproben .....	37
4.2 Mechanische Eigenschaften der Stützstrukturen.....	50
4.3 Oberflächenqualität der Stützstrukturen.....	54
<b>5 Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>69</b>
5.1 Zugproben.....	69
5.2 Stützstrukturstärke.....	74
5.3 Oberflächenqualität der Stützstrukturen.....	77
<b>6 Auswahl geeigneter Stützstrukturen</b>	<b>82</b>
6.1 Aspekt der Oberflächenrauheit .....	82
6.2 Effiziente Wärmeableitung.....	82

6.3	Minimierung des vertikalen Verzugs .....	82
<b>7</b>	<b>Validierung der Ergebnisse anhand einer Modellgussprothese</b>	<b>83</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>87</b>
8.1	Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse.....	87
8.2	Ausblick auf weiterführende Forschungsansätze.....	88
<b>9</b>	<b>Literatur</b>	<b>X</b>
<b>Anhang</b>		<b>XIII</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren, in Anlehnung an DIN 8580.....	2
Abbildung 2.2: Das weltweit erste 3D gedruckte Triebwerk.....	4
Abbildung 2.3: Prinzipdarstellung des L-PBF-Prozesses .....	6
Abbildung 2.4: Trumpf TruPrint 1000 .....	7
Abbildung 2.5: SLM 500 .....	8
Abbildung 2.6: Ti-6Al-4V-Phasendiagramm .....	9
Abbildung 2.7: L-PBF-Prozesskette .....	12
Abbildung 2.8: Einfluss auf die Oberflächenqualität von Überhängen.....	13
Abbildung 2.9: Stützstrukturen zur Ermöglichung komplexer additiv hergestellter Bauteile im L-PBF-Verfahren .....	14
Abbildung 2.10: Versuchsaufbau für die Untersuchung kontaktfreier Stützen.....	16
Abbildung 2.11: Ishikawa Diagramm mit Einflussgrößen auf den AM-Prozess.....	18
Abbildung 3.1: Zugproben Trumpf Baujob mit Dichtewürfeln.....	27
Abbildung 3.2: Zugproben SLM 500 Baujob mit Dichtewürfeln.....	27
Abbildung 3.3: Aufbau des Zugversuchs.....	28
Abbildung 3.4: Geteilte Zugprobe mit Supportverbindungen (Block, Kontur, Kegel, Baum).....	30
Abbildung 3.5: Neue Zugproben in a) und gefertigter Adapter in b).....	31
Abbildung 3.6: Versuchsaufbau für Zugproben mit Adapter.....	32
Abbildung 3.7: Aufbau eines Plättchens mit Kegel- und Blocksupportkontur.....	34
Abbildung 3.8: Platzierung der Plättchen.....	34
Abbildung 3.9: Messung der Oberflächenrauigkeit $S_a$ mittels Profilometer.....	35
Abbildung 4.1: Darstellung des Zugversuchs.....	37
Abbildung 4.2: Spannungs-Dehnungs Diagramm TruPrint 1000 für $0^\circ$ .....	38
Abbildung 4.3: Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM 500 mitte für $0^\circ$ .....	39
Abbildung 4.4: Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM 500 unten für $0^\circ$ .....	40
Abbildung 4.5: Mittlere maximale Zugspannung für $0^\circ$ .....	40
Abbildung 4.6: Spannungs-Dehnungs Diagramm TruPrint 1000 für $45^\circ$ .....	41
Abbildung 4.7: Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM 500 Mitte für $45^\circ$ .....	42
Abbildung 4.8: Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM 500 unten für $45^\circ$ .....	43
Abbildung 4.9: Mittlere maximale Zugspannung für $45^\circ$ .....	43
Abbildung 4.10: Spannungs-Dehnungs Diagramm TruPrint 1000 für $90^\circ$ .....	44
Abbildung 4.11: Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM 500 Mitte für $90^\circ$ .....	45
Abbildung 4.12: Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM 500 unten für $90^\circ$ .....	46
Abbildung 4.13: Mittlere maximale Zugspannung für $90^\circ$ .....	46
Abbildung 4.14: Mittlere maximale Zugspannung je Maschine und Orientierung.....	48
Abbildung 4.15: Mittlere Bruchdehnung je Maschine und Orientierung.....	48
Abbildung 4.16: starke Anlauffarben nach dem Fertigungsprozess.....	50
Abbildung 4.17: Treppenstufenartiger Verlauf aufgrund ungleichmäßiger Brüche der Supportstruktur (exemplarisch für Kontursupport).....	51
Abbildung 4.18: Gleichmäßigerer Verlauf mit Adaptereinspannung.....	52
Abbildung 4.19: Durchschnittliche maximale Zugspannung mit Adaptereinspannung.....	53
Abbildung 4.20: Heatmap der Korrelationsmatrix.....	54
Abbildung 4.21: Oberflächenrauigkeit $S_a$ über Hatch/Abstand für die verschiedenen Supporttypen.....	56

Abbildung 4.22: Oberflächenrauigkeit $S_a$ über Top Zahnlänge/Radius für die verschiedenen Supporttypen.....	57
Abbildung 4.23: Vergleich der Oberflächenrauigkeit $S_a$ zwischen „as built“-Zustand und gestrahlt für Kegelsupport. ....	58
Abbildung 4.24: 3D-Modellplot von Blocksupport.....	60
Abbildung 4.25: Wechselwirkungen zwischen Hatch und Zähne Toplänge auf die Oberflächenrauigkeit $S_a$ .....	61
Abbildung 4.26: 3D-Modellplot von Kontursupport .....	62
Abbildung 4.27: Wechselwirkungen zwischen Hatch und Zähne Toplänge auf die Oberflächenrauigkeit $S_a$ (Kontursupport).....	63
Abbildung 4.28: 3D-Modellplot von Kegelsupport.....	64
Abbildung 4.29: Wechselwirkungen zwischen Hatch und Zähne Toplänge auf die Oberflächenrauigkeit $S_a$ (Kegelsupport).....	65
Abbildung 4.30: 3D-Modellplot von Baumsupport.....	66
Abbildung 4.31: Wechselwirkungen zwischen Hatch und Zähne Toplänge auf die Oberflächenrauigkeit $S_a$ (Baumsupport).....	67
Abbildung 5.1: Oberflächen bei 0°, 45° und 90°.....	72
Abbildung 5.2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von 0°- und 90°-Proben .....	73
Abbildung 5.3: Vergrößerung der Anbindungsfläche durch zusätzlich aufgeschmolzenes Pulver im Downskin,.....	75
Abbildung 5.4: Tatsächlicher Abstand der Kontaktflächen.....	77
Abbildung 5.5: Krater nach Ablösen der Supports von den Plättchen (3D Scan).....	79
Abbildung 5.6: Minimale Veränderung der Oberflächenrauigkeit bei kleiner Top Zahnlänge und variierendem Hatch.....	81
Abbildung 7.1: Darstellung der Verzugssimulation in Z-Richtung.....	83
Abbildung 7.2: Modellgussprothese mit optimierten Supports im „as-built“ Zustand. ....	84
Abbildung 7.3: Modellgussprothese mit automatischen Magics Supports (vertikal und horizontal „as-built“). ....	84
Abbildung 7.4: Nachbearbeitungszeit zum Entfernen der Supportstrukturen. ....	85
Abbildung 7.5: Modellgussprothese nach Ablösen der optimierten Supports und Strahlen. ....	85
Abbildung 7.6: Deutlich erkennbare Verbesserung der Oberflächenqualität.....	86
Abbildung 9.1: Zugproben TruPrint 1000 in a) und Zugproben SLM 500 in b).....	XV
Abbildung 9.2: Gefertigte Zugproben.....	XVI
Abbildung 9.3: gefertigte Zugproben mit Supports ohne Adaptoreinspannung.....	XVII
Abbildung 9.4: gefertigte Zugproben mit Supports und Splintloch .....	XVIII



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Anwendung additiver Fertigungsverfahren bei Verarbeitung von Werkstoffen.....	5
Tabelle 2.2: Chemische Zusammensetzung der Ti-6Al-4V-Legierungen.....	10
Tabelle 2.3: Mechanische Eigenschaften .....	21
Tabelle 2.4: Einteilung des Zahnersatzes .....	22
Tabelle 2.5: Beispiel einer ANOVA.....	24
Tabelle 3.1: Chemische Zusammensetzung des Ti-6Al-4V-Pulvers, in Anlehnung an: [33].....	26
Tabelle 3.2: Anlagen und Prozessparameter. ....	28
Tabelle 3.3: Wesentliche Parameter der zu prüfenden Stützstrukturen.....	30
Tabelle 3.4: Neue Parameter der zu prüfenden Stützstrukturen.....	31
Tabelle 4.1: Vergleich der mittleren maximalen Zugspannung $R_m$ nach Maschine und Orientierung.....	47
Tabelle 4.2: Supportgeometrien.....	52
Tabelle 4.3: Modellergebnisse für Blocksupport .....	59
Tabelle 4.4: Modellergebnisse für Kontursupport. ....	61
Tabelle 4.5: Modellergebnisse für Kegelsupport. ....	63
Tabelle 4.6: Modellergebnisse für Baumsupport. ....	65
Tabelle 4.7: Koeffizientenvergleich der verschiedenen Modelle .....	68
Tabelle 9.1: Supportvariationen von Block- und Kontursupport. ....	XIII
Tabelle 9.2: Supportvariationen von Kegel- und Baumsupport.....	XIV

**Abkürzungsverzeichnis**

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Deutsche Übersetzung</b>
3D	dreidimensional	dreidimensional
3DP	3D Printing	3D-Drucken
AM	Additive Manufacturing	Additive Fertigung
ANOVA	Analysis of Variance	Varianzanalyse
CAD	Computer-Aided Design	Rechnergestütztes Konstruieren
CI	Confidence Interval	Konfidenzintervall
DLP	Digital Light Processing	Digitale Lichtverarbeitung
DoE	Design of Experiments	Experimentelles Design
EBM	Electron Beam Melting	Elektronenstrahlschmelzen
FLM	Fused Layer Modeling	Schicht-Laminiertes Fertigen
LBM	Laser Beam Melting	Laser-Strahlschmelzen
LOF	Lack of Fit	Mangel an Anpassung
L-PBF	Laser Powder Bed Fusion	Laser-Strahlschmelzen
MJM	Multi-Jet Modeling	Multi-Jet Modellierung
OLS	Ordinary Least Squares	Methode der kleinsten Quadrate
PJM	Poly-Jet Modeling	Poly-Jet Modellierung
SLM	Selective Laser Melting	Selektives Laserschmelzen
SLS	Selective Laser Sintering	Selektives Lasersintern
STL	Standard Triangulation Language	Standard-Triangulationssprache
TTS	Thermotransfer Sintering	Thermotransfer-Sintern

## Nomenklatur

Symbol	Bedeutung	Einheit
$A_{Support}$	Supportfläche	mm <sup>2</sup>
$A$	Bruchdehnung	%
$D_S$	Schichtstärke	µm
$E$	E-Modul	MPa
$E_V$	Volumenenergiedichte	J/mm <sup>3</sup>
$F$	Teststatistik	
$F_{max}$	Maximalkraft	N
$F_Z$	axiale Zugkraft	N
$P_L$	Laserleistung	W
$R_a$	Arithmetischer Mittelwert der Rauheit	µm
$R_m$	Maximale Zugspannung	MPa
$R_{p0.2}$	Dehngrenze der nichtproportionalen Dehnung	MPa
$R^2$	Güte der Anpassung	
$S_a$	mittlere arithmetische Rauheit über Fläche	µm
$b_{Zahn}$	Zahnbreite	mm
$h_S$	Spurabstand	µm
$l_{Zahn}$	Zahnlänge	mm
$n_{Anbindungsflächen}$	Anbindungsflächen	
$p$	Signifikanz der Teststatistik	
$q$	Regressionskoeffizient	
$r$	Radius	mm
$r$	Korrelationskoeffizient	
$v_S$	Belichtungsgeschwindigkeit	mm/s
$\sigma_{Support,max}$	Maximale Stützstrukturspannung	MPa
$\lambda_t$	Transformations-Exponent	
$\vartheta$	Temperatur	°C

## 1 Motivation und Einleitung

Die moderne additive Fertigung (engl.: Additive Manufacturing, AM) hat sich als revolutionäre Methode in der Herstellung komplexer Bauteile etabliert. Besonders im Bereich der Dentaltechnik ist die Präzision und Qualität der Endprodukte von entscheidender Bedeutung. Ti-6Al-4V Grade 23, eine Titanlegierung, ist aufgrund seiner biokompatiblen und mechanischen Eigenschaften ein bevorzugter Werkstoff in der dentalen Implantologie. Die Herausforderung bei der Verwendung dieses Materials im AM-Prozess liegt unter anderem in der Gewährleistung einer hohen und kontrollierbaren Oberflächenqualität und der strukturellen Integrität der gefertigten Implantate.

Die Wichtigkeit von Stützstrukturen in diesem Prozess ist immens, da sie nicht nur zur Stabilisierung und Wärmeableitung während des Fertigungsprozesses beitragen, sondern auch einen entscheidenden Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit und mechanischen Eigenschaften des Endprodukts haben. Die Minimierung des vertikalen Verzugs ist zudem ein kritischer Aspekt, der die Leistung und Zuverlässigkeit dentaler Implantate direkt beeinflusst.

In dieser Bachelorarbeit wird der Fokus auf die Identifizierung geeigneter Stützstrukturen für Ti-6Al-4V Grade 23 gelegt, um deren Einfluss auf das AM-Produkt quantitativ zu bewerten. Ziel ist es, ein optimales Gleichgewicht zwischen hoher Oberflächenqualität und effektiver vertikaler Kraftaufnahme der Stützstrukturen zu erreichen. Dies soll den vertikalen Verzug des dentalen Implantats minimieren und somit die Funktionalität und Langlebigkeit des Endprodukts verbessern.

Um fundierte und praxisnahe Erkenntnisse zu gewinnen, werden die Untersuchungen unter Verwendung der Vorbereitungssoftware Magics von Materialise durchgeführt. Exemplarisch werden das System TruPrint 1000 von Trumpf und eine SLM 500 Quad Laser von SLM-Solutions für die Bestimmung der Kenngrößen im In-Prozess genutzt. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen nicht nur spezifische Handlungsanweisungen für die Fertigung von dentalen Implantaten aus Ti-6Al-4V Grade 23 bieten, sondern auch allgemeine Richtlinien für die additive Fertigung mit diesem Werkstoff aufstellen, die eine systemunabhängige Produktion mit gleichbleibenden Qualitäten des Endprodukts ermöglichen.

Durch diese Arbeit wird ein Beitrag zur Verbesserung der Qualität und Effizienz in der Herstellung von dentalen Implantaten geleistet, was letztendlich auch zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit beitragen kann. Beispielsweise reduziert sich bei der Auswahl der optimalen Stützstrukturen die Menge an Stützstrukturen und der Aufwand in der Nacharbeit kann reduziert werden.

## 2 Stand der Technik

Um das Fertigungsverfahren der Additiven Fertigung und die Einflüsse auf den Prozess zu verstehen, wird zunächst die Additive Fertigungstechnologie beschrieben. Hierbei soll vor allem das Laser-Strahlschmelzen (engl. Laser Beam Melting, LBM), im Folgendem LBM genannt, betrachtet werden. Darüber hinaus wird die mit der zu arbeitenden Maschine, das Material, die Prozessschritte und Kenngrößen sowie die Qualitätsbewertung der Technologie behandelt.

### 2.1 Additive Fertigungstechnologien

Additive Fertigung, umgangssprachlich „3D-Druck“, ist eine innovative Fertigungsmethode, um komplexe Bauteile und Geometrien aus 3D-Daten zu fertigen. Bereits in den 1980er Jahren führte der japanische Wissenschaftler Hideo Kodama 3D-Druckversuche mit einem lichtempfindlichen Harz durch, das Schicht für Schicht polymerisiert wurde. Anders als bei konventionellen-subtraktiven (z.B. Fräsen / Drehen) oder formativen Verfahren (z.B. Gießen / Schmieden) wird hierbei kein Material abgetragen oder Volumen verformt, sondern das Bauteil aus einem Material Schicht für Schicht aufgebaut. Dabei werden Volumenelemente, sogenannte Voxel, auf- und aneinandergefügt. Dieser Prozess läuft maßstäblich, automatisiert und computergesteuert anhand der 3D-Daten des Bauteils ab. Wesentliche Charakteristik Additiver Fertigungsverfahren ist, dass neben der Geometrie auch simultan die Stoffeigenschaften während des Herstellungsprozesses entstehen. [1]

Nach DIN 8580 zählt AM zu den urformenden Verfahren, da die Herstellung der Bauteile aus formlosen (Flüssigkeiten, Pulver) oder formneutralen (Filamenten) Ausgangsmaterialien erfolgt. Die Materialien reichen hierbei von unterschiedlichsten Polymeren, Sand und Metallen bis hin zu Keramiken. In Abbildung 2.1 ist die Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 dargestellt. [2]

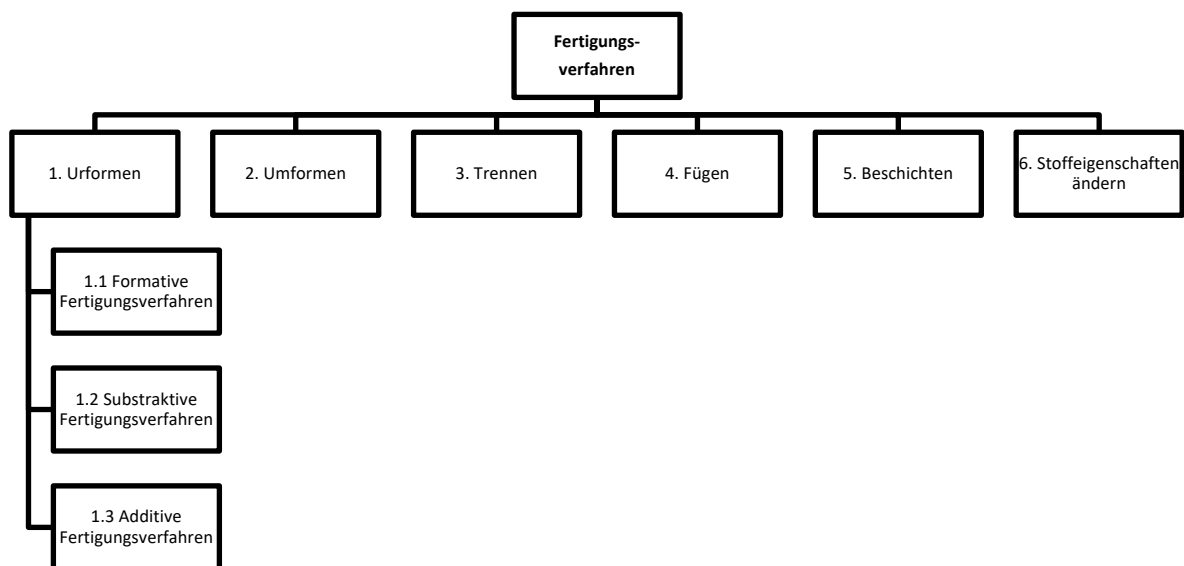


Abbildung 2.1: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren, in Anlehnung an DIN 8580.

Neben dem Begriff der Additiven Fertigung auf Technologie-Ebene, fällt auch oft der Begriff der generativen Fertigung auf Anwendungs-Ebene. Diese gliedert sich je nach Anwendung in *Rapid Prototyping* zur Herstellung von Prototypen und Modellen, sowie in *Rapid Manufacturing* zur Fertigung von (End) Produkten. Eine weitere Unterteilung ist für den Werkzeugbau das sogenannte *Rapid Tooling*, wobei es technologisch gesehen keine eigene Gruppe bildet und je nach Anwendungsfall zwischen dem Rapid Prototyping und dem Rapid Manufacturing anzuordnen ist. [1] [3]

In dieser Hinsicht ist es notwendig, die Bezeichnung "rapid" (von dem deutschen Wort "schnell" oder "rasch") in einem relativen Kontext zu betrachten. Insbesondere bei der additiven Herstellung von großen Bauteilen kann der Prozess aufgrund der geringen Schichtdicken mehrere Tage in Anspruch nehmen, was dazu führt, dass der Fertigungsprozess an sich unter Umständen länger dauern kann als bei konventionellen Fertigungsverfahren.

Weshalb die Bezeichnung einer „Rapid Technology“ trotzdem berechtigt ist, soll im Folgendem nahegelegt werden: Durch die computergestützte, maßstabsgetreue Konstruktion von Bauteilen, im englischen Computer Aided Design genannt (CAD), ist eine nahezu unmittelbare Transformation dieser 3D-CAD-Daten in ein tatsächliches physisches Bauteil zu realisieren. Durch sehr geringe Rüstzeiten der Maschinen und den Verzicht auf die Herstellung und Verwendung von speziellen Werkzeugen während des Fertigungsprozesses, werden die Nebenzeiten maßgeblich minimiert. Konkret lässt sich sagen, dass nicht der reine Fertigungsprozess an sich kürzer ist, sondern vielmehr die gesamte Produktentwicklung vom Bauteildesign bis hin zu ersten Prototypen. Denn durch die schnelle und unkomplizierte Bereitstellung von ersten Prototypen, kann die gesamte Produktentwicklung beschleunigt werden, was wiederum Zeit und damit Kosten einspart. Zudem haben die Begriffe Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing den Vorteil, dass sie international verstanden und akzeptiert werden, sowie als Synonym für eine computergesteuerte und automatisierte Fertigung von Prototypen und Produkten gelten. [1] [3]

Neben diesem Aspekt der vereinfachten Herstellungskette ergeben sich weitere Vorteile der Additiven Fertigung, die sich von konventionellen Verfahren signifikant unterscheiden:

So ermöglicht sie es, Bauteile und Produkte in allen denkbaren Geometrien, aus sehr vielseitigen Materialien und in einer individuellen Stückzahl zu produzieren. Die Produktion ist nicht unbedingt ortsgebunden und kann unter einigen Voraussetzungen nahezu an jedem Ort stattfinden, sogar mobil. Auch eine simultane Produktion an verschiedenen Orten ist möglich. Eine kundenindividuelle Massenproduktion war so bei konventionellen Verfahren bislang nicht bedingungslos möglich, weswegen man diesen Fortschritt auch als Epoche der kundenindividuellen Massenproduktion (customized mass production) bezeichnet. [1]

Grundlegendes Potential ist zudem die Funktionsintegration. So kann ein Bauteil, welches vorher konventionell gefertigt wurde und aus vielen Einzelteilen bestand, die in einer aufwändigen Montage zusammengefügt werden mussten, nun in einem Schritt als komplettes Bauteil erzeugt werden (siehe Abbildung 2.2). Ein Beispiel dafür wären Leichtbaukomponenten in der Luft & Raumfahrt, wie z.B. ein Turbinenrad in einem Flugzeugtriebwerk. So kann in diesem Turbinenrad durch eine innere Gitterstruktur eine Gewichtsreduzierung, durch integrierte Kühlkanäle eine höhere Effizienz oder durch eine Sensorintegration eine externe Überwachung des Bauteils zur erhöhten Sicherheit erzielt werden. [1]

Komplexe Geometrien, die sich aufgrund von Hinterschnitten oder Hohlräumen mit klassischen Fertigungsmethoden sehr schwer herstellen lassen, stellen für die Additive Fertigung kein Problem dar. Dank des schichtweisen Aufbaus und der Hilfe von sogenannten „Supports“ kann nahezu jede erdenkliche dreidimensionale Geometrie erzeugt werden. Supportstützen werden dann

eingesetzt, wenn ein gewisser Grad an Überhang vorhanden ist, der mit manchen additiven Fertigungstechnologien so nicht überbrückt werden kann. Im Bereich der additiven Fertigung von Metallbauteilen werden diese außerdem zur Wärmeableitung und Spannungsreduktion eingesetzt. Es gibt jedoch auch Technologien wie z.B. das Selektive Laser Sintern (SLS) von Polymeren, das ganz ohne Supportstützen auskommt. [1]



**Abbildung 2.2:** Das weltweit erste 3D gedruckte Triebwerk mit verschiedenen Funktionsintegrationen 2023, entnommen aus: [4].

Ein weiterer bedeutsamer Punkt ist die schon erwähnte Produktindividualisierung. Durch die generative Fertigung und die leichte Umsetzung von 3D-Modell in ein physisches Bauteil, können schnell individuelle Anpassungen erfolgen. Diese Eigenschaft findet vor allem in der Medizintechnik großen Zuspruch, da somit komplexe Bauteile oder Implantate individuell und personalisiert auf den Patienten angepasst werden können und somit eine optimale Integration zwischen Implantat und Patient ermöglicht. Weiterhin können somit Anforderungen unterschiedlichster Kundengruppen abgedeckt werden und demnach ein größerer Markt angesprochen werden. [1]

Weiterhin ergibt sich durch diesen digitalen Fertigungsprozess eine gleichzeitige Herstellung unterschiedlicher Produkte in einem Vorgang, die auf kein produktspezifisches Werkzeug angewiesen sind. Individuelle Kleinserienproduktionen oder sogar Einzelteilerfertigungen an unterschiedlichsten Orten stellen somit kein Problem dar und bilden die Stärke additiver Fertigungstechnologien.

Heutzutage existiert eine Vielzahl unterschiedlichster Fertigungsverfahren im Bereich der additiven Fertigung. Größter Unterschied zwischen diesen Technologien ist vor allem die Form und der Werkstoff des Ausgangsmaterials, sowie das physikalische Prinzip zur Verbindung der aufeinanderliegenden Bauteilschichten. Zudem ist zu erwähnen, dass das Verfahren individuell für den Anwendungsfall ausgewählt werden muss und sich nicht mit jedem Verfahren jedes Bauteil qualitativ gleich fertigen lässt. [1]

In Tabelle 2.1 ist die Vielzahl der heute bereits eingesetzten additiven Fertigungstechnologien aufgelistet.

**Tabelle 2.1:** Anwendung additiver Fertigungsverfahren bei Verarbeitung von Werkstoffen, in Anlehnung an VDI 3505 [5].

Abkürzung	Verfahren Bezeichnung	Werkstoff / Material				
		Kunststoff	Papier	Form-sand	Metall	Keramik
SLS	Stereolithografie	x				x
LS	Lasersintern	x		x	x	x
LBM [6]	Laserstrahlschmelzen				x	x
EBM	Elektronenstrahlschmelzen				x	
FLM	Fused Layer Modelling	x				
MJM	Multi-Jet Modelling	x				
PJM	Poly-Jet Modelling	x				
3DP	3D-Drucken	x		x	x	x
LLM	Layer-Laminated-Manufacturing	x	x		x	x
DLP	Digital Light Processing	x			x	x
TTS	Thermotransfer-Sintern	x				

### 2.1.1 Laser-Strahlschmelzen

Das Laser-Strahlschmelzen (engl. Laser Beam Melting (LBM) oder Laser Power Bed Fusion (L-PBF)) ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem ein fokussierter Laserstrahl in einer Schutzgasatmosphäre auf ein Bett aus einer dünnen Schicht Metallpulver gerichtet wird. Durch diesen lokalen Energieeintrag schmilzt das Pulver an den gewünschten Stellen und bildet so eine dünne Schicht des Materials. Die Pulver haben dabei eine Partikelgröße von 10 bis 75 µm und besitzen gute Fließeigenschaften. Bauteile, die mittels des Laserstrahlschmelzverfahrens hergestellt werden, zeigen vergleichbare mechanische Eigenschaften wie Gussteile oder in einigen Fällen sogar höhere Festigkeitswerte auf. Diese Leistungsverbesserung kann in erster Linie auf die feine Mikrostruktur zurückgeführt werden, die sich aufgrund der äußerst kurzen Zeitspanne zwischen Schmelz- und Erstarrungsvorgängen innerhalb des Verfahrens, im Vergleich zum Gießen ausbildet. Dabei entstehen Bauteile mit sehr hoher Dichte (>99 %). Einige typische Materialien wären beispielsweise Aluminium, Titan, Edelstahl und Nickellegierungen. [1]

Wie bereits beschrieben findet der Prozess unter einer Schutzgasatmosphäre statt, um eine Reaktion mit Sauerstoff und die damit verbundene Oxidation zu vermeiden. Als inerte Gase kommen hier häufig Argon oder Stickstoff zum Einsatz, wodurch der Sauerstoffgehalt in der Baukammer auf unter 1 % reduziert wird. Dieses Schutzgas unterliegt einer weitestgehend laminaren Strömung und zirkuliert während des gesamten Fertigungsprozesses. Dadurch werden Schmauch und Schmelzspritzer, die beim Schweißprozess entstehen, abtransportiert. Zudem können Ablagerungen an der Laserlinse die Leistung des Lasers in der Bearbeitungsebene beeinträchtigen und durch Einkopplung von Energie in das Eintrittsfenster, dieses sogar zerstören. Daher wird das Lasereintrittsfenster häufig mit einem extra Schutzgasstrom abgeschirmt. Als Laserquellen werden hierbei meistens Faserlaser verwendet. Viele Maschinen bieten zudem heutzutage eine integrierte Bauplattenheizung, die auf bis zu 500 °C vorgeheizt werden kann. Es gibt jedoch auch weitere Versuche, in denen der Bauraum auf über 1000 °C vorgeheizt wurde, wie in der Arbeit von

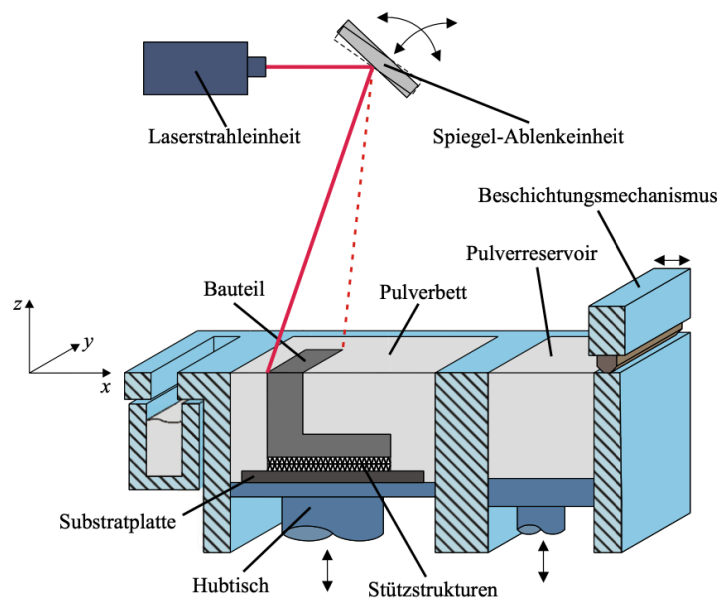


Yves Hagedorn, um Keramiken zu drucken [6]. Dies bietet den Vorteil, dass Temperaturgradienten, die Risse oder Spannungen hervorrufen können, minimiert werden. [1]

Der Prozessablauf gliedert sich in drei automatisierte Zyklusschritte:

1. Auf die Bauplattform bzw. auf das Bauteil, wird mit einem Beschichter homogenes Metallpulver aufgetragen.
2. Der zweite Schritt beinhaltet das Aufschmelzen der Bauteilkonturen und -Flächen durch den Laser im Pulverbett. Die gesamte Energie des Lasers wird gezielt auf das Pulverbett gerichtet, um die Partikel in eine flüssige Schmelze zu überführen. Durch den hohen Energieeintrag wird auch die darunterliegende Schicht nochmal teilweise aufgeschmolzen, sodass beim anschließenden Erstarren eine effektive Verbindung zwischen diesen Schichten entsteht.
3. Im letzten Schritt senkt sich die Bauplatte um eine definierte Schichthöhe, die üblicherweise zwischen 20 und 100  $\mu\text{m}$  variiert. [1]

Diese Schritte werden solange wiederholt bis das gewünschte Bauteil gefertigt wurde. Anschließend wird dieses vom umliegenden Pulver befreit, von der Bauplattform gelöst und im sogenannten Post-Prozess anwendungsspezifisch nachbearbeitet.



**Abbildung 2.3:** Prinzipdarstellung des L-PBF-Prozesses, entnommen aus: [7].

Wesentliche Vorteile des Laserstrahlschmelzen sind:

- Fertigung komplexer Geometrien und Strukturen mit der Möglichkeit von Funktionsintegrationen.
- Sehr gute mechanische Eigenschaften durch eine nahezu poren- und rissfreie Struktur. Annähernd 100 % Dichte.
- Hohe Effizienz, da nur das Pulver aufgeschmolzen wird, das tatsächlich für die Fertigung des Bauteils benötigt wird. Wiederverwendung des nicht aufgeschmolzenen Pulvers, nach einem entsprechenden Aufbereitungsvorgang. [1]

Wesentliche Nachteile des Laserstrahlschmelzen sind:

- Hoher Grad an mechanischer Nachbearbeitung erforderlich. Gerade bei sicherheitskritischen Bauteilen nimmt dieser Schritt viel Zeit und Kosten in Anspruch.
- Die Anschaffung und der Betrieb einer L-PBF-Anlage erfordert erhebliche Investitionskosten durch die Maschine an sich, sowie durch die erforderliche Ausstattung für die Materialhandhabung, Pulverversorgung und Sicherheitseinrichtungen.
- Hohe Kompetenz zur Bedienung der Maschine erforderlich. Betrieb aktuell meist noch durch Ingenieure. [1]

### 2.1.2 Trumpf TruPrint 1000

Die TruPrint 1000 der Firma Trumpf ist eine Maschine, die nach dem L-PBF-Prinzip arbeitet. Sie ist mit einem runden Bauraum von 100 mm Durchmesser und 100 mm Höhe die kleinste Maschine der TruPrint Serie und findet vor allem in der Medizintechnik Anwendung. Durch ihre vergleichsweise simple Bedienung, Robustheit und hohe Qualität der Fertigung macht sie sich somit auch sehr beliebt im Bereich der Forschung & Entwicklung oder in kleineren Serienbaureihen. Die maximale Leistung des hauseigenen Trumpf Faserlaser beträgt 200 W. Der Strahldurchmesser lässt sich durch eine motorische Optik zwischen 55 oder 80  $\mu\text{m}$  variieren. [8]



Abbildung 2.4: Trumpf TruPrint 1000, entnommen aus: [8].

### 2.1.3 SLM 500

Eine weitere nach dem laserstrahlschmelzenden Prozess arbeitende Maschine ist die SLM 500 Quad Laser der Firma SLM Solutions. Sie ist das leistungsstärkste System seiner Klasse, besitzt einen Bauraum von 500 x 280 x 365 mm und ist in ihrer Quad-Konfiguration mit vier mal 400 W Faserlasern unabhängig oder parallel im Einsatz. Der Strahldurchmesser lässt sich durch eine motorische Optik zwischen 80 bis 115  $\mu\text{m}$  variieren. Die Maschine zeichnet sich durch ihre hohe Produktivität aus und findet vorallem in der Serienfertigung komplexer Teile Anwendung. [9]



Abbildung 2.5: SLM 500, entnommen aus: [9].

## 2.2 Eigenschaften und Anwendungen von Ti-6Al-4V Grade 23

Titan ist ein chemisches Element und stellt mit einem Anteil von 0,6 % nach Eisen, Aluminium und Magnesium das viertgängigste metallische Element in der Erdkruste dar. Mit einer Dichte von  $4,51 \text{ g/cm}^3$  zählt es zu den Leichtmetallen und gleichzeitig zu den schwersten unter ihnen. Trotz seiner doppelt so hohen Dichte im Vergleich zu Aluminium, weist Titan nur die Hälfte des spezifischen Gewichts von Eisen auf. Diese besonderen physikalischen Eigenschaften machen Titan und seine Legierungen äußerst attraktiv für eine Vielzahl von Anwendungen in verschiedenen Industriezweigen. [7] Insbesondere zeichnen sich Titan und seine Legierungen durch ihre hohe spezifische Festigkeit, gute Biokompatibilität<sup>1</sup>, geringe thermische Ausdehnung und ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit aus. [1] Aufgrund dieser Attribute sind sie sehr prädestiniert und beliebt für den Einsatz in der Luft- und Raumfahrt, der chemischen Industrie, der Medizintechnik, sowie der Sport- und Freizeitindustrie. [7]

---

<sup>1</sup> Unter Biokompatibilität wird die Verträglichkeit zwischen einem technischen und einem biologischen System verstanden [10].

Ti-6Al-4V ist eine spezielle Titanlegierung bestehend aus Titan, 6 % Aluminium und 4 % Vanadium und stellt mit einem Anteil über 50 % die am weitesten verbreitete Titanlegierung dar. Dieses ist zum einen auf die guten mechanischen Eigenschaften und zum anderen auf die umfangreiche wissenschaftliche Erforschung zurückzuführen, wodurch ein fundiertes Fachwissen über diese Legierung vorhanden ist. [7] Reines Titan zeigt im Vergleich zu Titanlegierungen eine reduzierte Festigkeit, jedoch eine ausgeprägte Zähigkeit. Die gezielte Legierung von Titan mit Aluminium und Vanadium, gefolgt von einer nachträglichen Wärmebehandlung, führt zur Bildung einer Zweiphasenlegierung mit homogener Verteilung der Mischkristallphasen, wie in Abbildung 2.6 zu sehen ist. Diese speziellen Legierungen zeichnen sich durch erheblich gesteigerte Festigkeitswerte, sowie verbesserte Ermüdungseigenschaften aus. [10] In der Luft- und Raumfahrt wird Ti-6Al-4V bevorzugt für Strukturbauteile eingesetzt, während es in der Medizintechnik vor allem für Implantate Verwendung findet. [7]

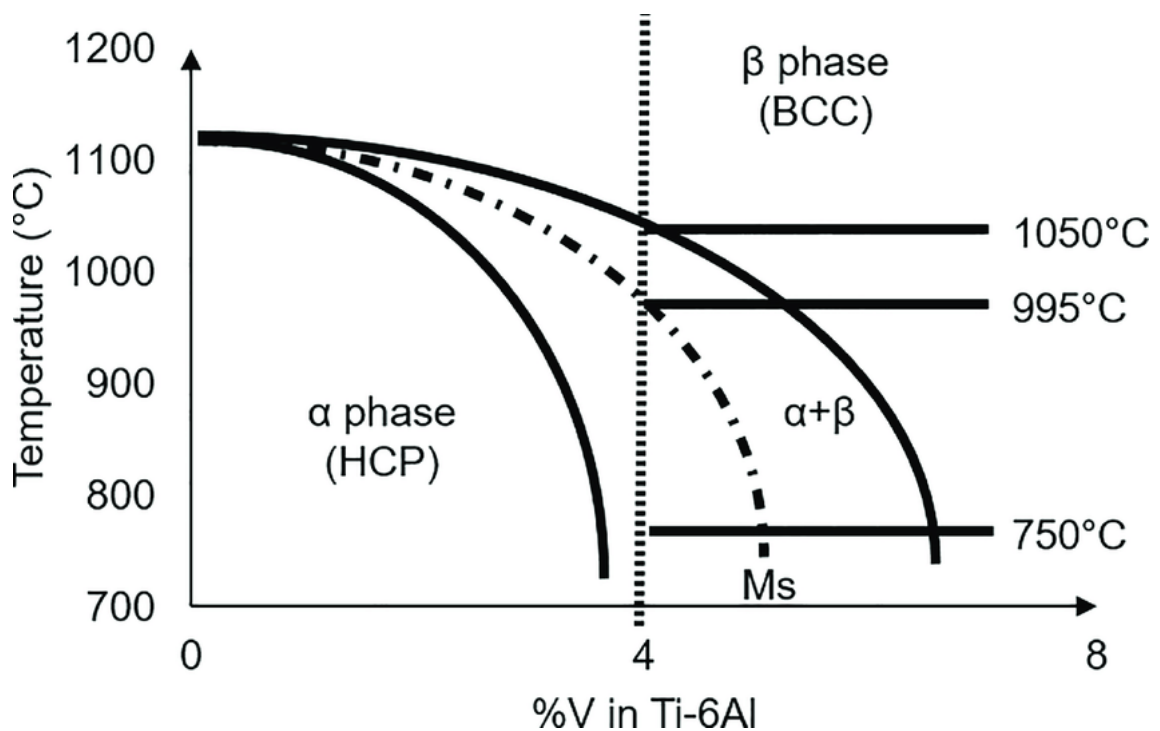


Abbildung 2.6: Ti-6Al-4V-Phasendiagramm, entnommen aus: [11].

Ti-6Al-4V-ELI oder auch Grade 23 genannt [12], beschreibt die Güteklasse der Titanlegierung. Abgekürzt steht „ELI“ für "Extra Low Interstitials" und weist verringerte Konzentrationen von Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenstoff und Eisen auf (siehe Tabelle 2.2). Diese reduzierten Elemente tragen signifikant zur Verbesserung der Duktilität und Bruchzähigkeit der Ti-6Al-4V-Legierung bei. Aufgrund dieser Qualitätsmerkmale höchster Reinheit wird Ti-6Al-4V-ELI oft in medizinischen Anwendungen präferiert und eingesetzt. [13]

**Tabelle 2.2:** Chemische Zusammensetzung der Ti-6Al-4V-Legierungen mit verringerter Sauerstoff-, Stickstoff-, Kohlenstoff- und Eisenkonzentration bei Grade 23, in Anlehnung an: [10].

Element	Zusammensetzung (Gew. %)	
	Ti-6Al-4V Grade 23	Ti-6Al-4V (Standard Grade)
N <sub>2</sub>	<0.05	<0.05
C	<0.08	<0.10
H <sub>2</sub>	<0.0125	<0.015
Fe	<0.25	0.30
O <sub>2</sub>	<0.13	0.20
Al	5.50-6.50	5.50-6.75
V	3.50-4.50	3.50-4.50
Ti	Rest	Rest

### 2.2.1 Bedeutung von Ti-6Al-4V in der Medizintechnik

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften eines Implantatwerkstoffes sollten in der Medizintechnik so beschaffen sein, dass sie eine optimale Verträglichkeit und Funktionsergänzung im Zusammenspiel mit dem umliegenden Gewebe gewährleisten. Bedeutend ist hierbei neben den mechanischen Eigenschaften vor allem die Biokompatibilität. Diese lässt sich in drei wesentliche Bereiche unterteilen:

#### Statische Strukturkompatibilität

Das übergeordnete Ziel besteht darin, die morphologische Beschaffenheit von Implantaten gezielt an die spezifischen mechanischen Charakteristika des sie umgebenden Gewebes anzupassen. Dies schließt sowohl die äußere geometrische Ausgestaltung als auch die innere Mikrostruktur ein, wobei insbesondere die Ausrichtung von Fasern in anisotropen Materialien betrachtet wird, die in unterschiedlichen Raumrichtungen variierte Materialeigenschaften aufweisen. Diese Herangehensweise verfolgt das Prinzip des Struktur-Mimikry, welches darauf abzielt, die Implantatstruktur so zu konzipieren, dass sie eine bestmögliche Analogie zum natürlichen Gewebe aufweist. [10]

#### Statische Oberflächenkompatibilität

Ziel ist es hierbei die chemischen, physikalischen, biologischen und morphologischen Oberflächenmerkmale so zu adaptieren, dass eine gewünschte klinische Interaktion mit dem Empfänger-gewebe erreicht wird. [10]

#### Dynamische Biokompatibilität

Diese Analyse integriert die temporale Dimension der angestrebten Interaktion zwischen dem Implantat und dem umliegenden Gewebe. Sie behandelt sowohl die evolutiven Veränderungen in der Struktur als auch die anhaltende Eignung der Oberfläche im Verlauf der Zeit. [10]

Entscheidend für eine gute Biokompatibilität ist in Bezug auf Ti-6Al-4V Grade 23 das Entstehen einer stabilen und reinen Titandioxid-Schicht (TiO<sub>2</sub>). Durch die Auger-Elektronen-Spektroskopie (AES) wurde bei der Ti-6Al-4V-Legierung eine Oxidschichtdicke von  $d = 83 \pm 12 \text{ \AA}$  gemessen. Dabei spielt die Dicke der Oxidschicht auf die Zelladhäsion und -morphologie keine Rolle, wie man in *in vitro*-Test in Osteoblastenkulturen herausfand. [10] Vielmehr ist die Oberflächenstruktur des Materials von Bedeutung. So wurde in *in vivo*-Tests eine messbare Bindung zwischen Knochen und Ti-6Al-4V-Implantat bei einer Rauheit der Oberfläche  $R_a > 22 \text{ \mu m}$  festgestellt. Demnach ist ein Verkleben der Implantate mit Knochen oder Gewebe, wie es ursprünglich praktiziert wurde, nicht mehr unbedingt nötig. Nach der zementfreien Implantation konnte nämlich an porösen Ti-6Al-4V-Oberflächen ein Anwachsen von Knochenmaterial festgestellt werden [14].

Gegen Ende der 1970er Jahre entstand eine Debatte über die potenziell toxische Wirkung des Vanadium-Legierungselements in der Ti-6Al-4V-Legierung. In einer wissenschaftlichen Studie [15] wurde festgestellt, dass Vanadiumdioxid bei ca. 67 °C einer Strukturumwandlung unterliegt, somit thermodynamisch instabil sein kann und sich auflöst [10]. Interessanterweise wurden trotz jahrzehntelanger klinischer Erfahrungen keine schwerwiegenden toxischen Effekte beobachtet, da das VO<sub>2</sub> innerhalb von nur 24 Stunden aus dem Körper eliminiert wird. [10]

Weitere Eigenschaften, die Ti-6Al-4V zu einem gängigen Material für Implantate und für die Medizintechnik machen sind deren mechanische Eigenschaften. Seine geringe Steifigkeit mit nur etwa halb so großem Elastizitätsmodul wie bei rostfreien Stählen und CoCr-Legierungen sorgen für eine gute Adaption des Implantats an die elastischen Eigenschaften von Knochen. Zudem kann aufgrund des geringeren „stress shielding“-Effekts im Vergleich zu rostfreiem Stahl eine Minderung der Knochendichte durch Implantation reduziert und ein Aufbau des Knochens begünstigt werden [16]. Die Dauerfestigkeit von Ti-6Al-4V übersteigt um etwa das Doppelte wie die von rostfreien Stählen und gegossenen CoCr-Legierungen. Gegenüber reinem Titan (cp Titan) zeigt die Ti-6Al-4V-Legierung eine signifikant höhere Zugfestigkeit auf. [10]

Entscheidend für die klinische Verwendbarkeit eines Materials ist zudem die Korrosionsbeständigkeit. Dabei ist das Entstehen einer dichten, geordneten Rutilstruktur, die ein Herauslösen von Metallionen verhindert, förderlich. Dieses wird durch die thermische Behandlung der Titanoberflächen erreicht. Durch *in vitro*-Korrosionsuntersuchungen wurde festgestellt, dass die Stabilität der Titanoxidschicht in physiologischer Umgebung vorhanden bleibt und dadurch in klinischen Anwendungen über mehrere Jahre bei Ti-6Al-4V-Legierungen keine Spalt- und Lochfrasskorrosion aufgetreten sind. Wichtig ist hierbei ein reines Vorhandensein der Ti-6Al-4V-Legierung ohne Verunreinigungen von beispielsweise Eisenpartikel, die in die Oxidschicht eintreten könnten und somit zur Korrosion führen. Bei Ti-6Al-4V Grade 23 ist diese Reinheit jedoch größtenteils schon gegeben, was wiederum auch immer vom jeweiligen Fertigungsprozess abhängig ist. [10]

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Ti-6Al-4V Grade 23 aufgrund seiner biokompatiblen Eigenschaften, seiner mechanischen Stärke und seiner Korrosionsbeständigkeit in der Medizintechnik eine wichtige Rolle spielt und ideal für medizinische Implantate geeignet ist.

### 2.3 Prozessschritte und Kenngrößen bei L-PBF

Die richtige Wahl der Prozessparameter ist neben einem hochwertigen Ausgangsmaterial entscheidend für eine hohe Qualität des Bauteils und um den Anforderungen der Industrie gerecht zu werden.

In Abbildung 2.7 ist die Prozesskette für das Laserstrahlschmelzen nach VDI3405 dargestellt. Diese verläuft horizontal von links nach rechts mit ihren jeweiligen vertikalen Arbeitsschritten. Hauptprozesse sind hierbei der sogenannte Pre-, In- und Postprozess. Kurzgesagt findet im Pre-Prozess die gesamte Datenvorbereitung, im In-Prozess der eigentliche Fertigungsschritt und im Post-Prozess die Nacharbeitung des Bauteils statt. Nachfolgend werden diese Schritte nun genauer erläutert. [1]

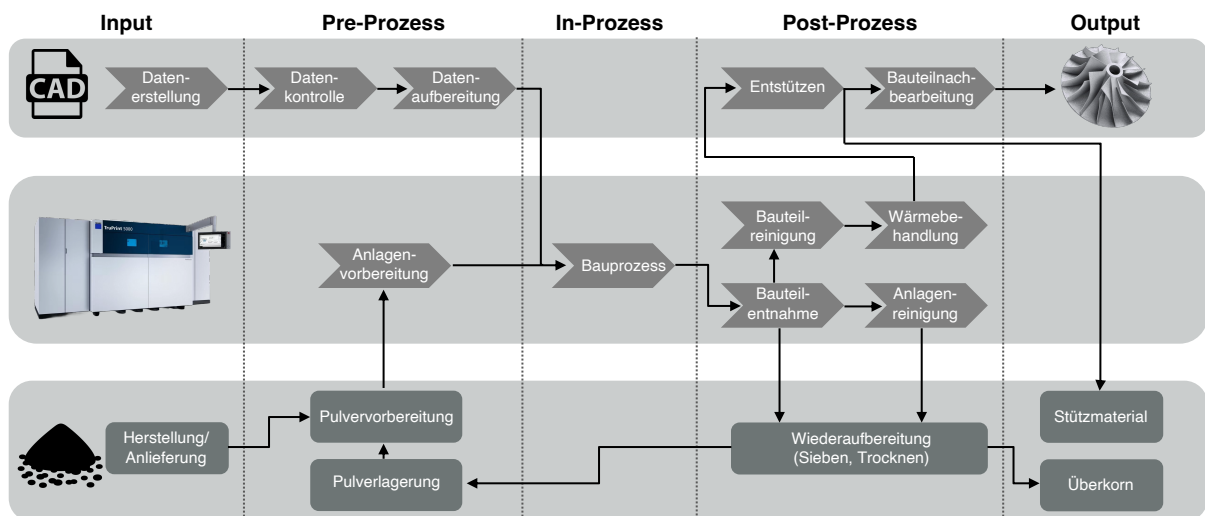


Abbildung 2.7: L-PBF-Prozesskette, in Anlehnung an VDI3405 [1].

#### 2.3.1 Pre-Prozess Kenngrößen und ihre Bedeutung

Im Pre-Prozess, also der Prozess vor der eigentlichen Fertigung, wird das zu fertigende Bauteil konstruiert, eine Datenkontrolle durchgeführt und die 3D-Daten des Körpers für die Fertigung erstellt. Als Input dient das CAD-Modell, das mittels CAD-Konstruktionsprogramm erstellt werden kann oder auch mittels Reverse-Engineering durch Laserscanner als digitales Modell. Gerade bei Teilen, wo keine technischen Zeichnungen oder Maße existieren ist dies ein nützliches Werkzeug. Wichtig beim Erstellen des CAD-Modells ist eine additiv gerechte Konstruktion, um alle Vorteile der Additiven Fertigung zu nutzen und die Fertigung zudem wirtschaftlich zu betreiben. Ist dieser Schritt abgeschlossen wird das Modell in das etablierte STL-Format (Standard Triangulation Language) konvertiert. Im STL-Format wird das Volumen des Bauteils mit großer Annäherung (Auflösung anpassbar) durch Tessellierung<sup>2</sup> in Dreiecke und die dazugehörigen Flächennormalen definiert. Wichtig hierbei ist eine korrekte und fehlerfreie Umwandlung um einen störungsfreien Prozess und eine hohe Bauteilqualität zu garantieren.

Nach diesem Schritt wird das STL-Modell in ein Datenaufbereitungsprogramm geladen. Hierbei wird das Modell digital auf der Bauplattform positioniert und ausgerichtet, gegebenenfalls mit Supportstützen versehen und der Fertigung die passenden Prozessparameter zugewiesen. Anschließend wird der Datensatz in Schichten nach gewünschter Schichthöhe geschnitten und

<sup>2</sup> D.h. das Zerlegen eines Körpers in kleine Teile.

unter anderem mit Vektoren für die Laserscanner versehen. Weiterhin gehören zum Pre-Prozess die Anlagenvorbereitung und Rüstung mit frischem, gesiebttem Pulver. [1]

### 2.3.2 Stützstrukturen

Im Prozess des Laser Power Bed Fusion – Verfahrens sind die Verwendung von Stützstrukturen oder auch Supports genannt, unumgänglich. Ein mangelhaftes Design bzw. Anbringen der Stützstrukturen führt zu etwa 80 % der auftretenden Bauprobleme während der Fertigung [17]. Dabei verfolgen Stützstrukturen mehrere Ziele, wie zum einen das Stützen des Bauteils bei Überhängen, die Ableitung der eingebrachten thermischen Energie vom Bauteil und damit die Reduzierung von Eigenspannungen und Verzug. Anders als beispielsweise beim Lasersintern kann das Pulver nicht die nötige Stützfunktion bieten und loses Pulver bietet eine schlechtere Wärmeableitung als zusammengeschmolzenes, festes Material.

Die Supports haben großen Einfluss auf die Endqualität des Bauteils und müssen daher sorgfältig und strategisch gut positioniert und ausgewählt werden. Betrachtet man die auf die Stützstruktur anliegende Oberfläche so ist festzustellen, dass diese stark von der Auswahl der Supportart und deren Parametern abhängig ist. Weiterhin ist die Qualität der Oberfläche von vielen weiteren Faktoren abhängig, wie in Abbildung 2.8 ersichtlich [18]. Die Supportstrukturen können zwischen Bauteil und Plattform mit Sollbruchstellen, wie z.B. Zähnen versehen werden, die in ihrer Höhe, Breite oder Abstand individuell angepasst werden können. Es ist unter anderem ein Kompromiss zwischen einer anforderungsnahen Oberflächenstruktur, aber auch einer einfachen Entfernung des Supportmaterials, trotz guter Anbindung, von dieser Oberfläche zu schaffen. Zum anderen steigt mit der Verwendung von Supports auch die Bauzeit und der Materialverbrauch, wobei das Supportmaterial anders als beim überbleibenden Pulver nicht wiederverwendet werden kann und damit die Kosten steigen. Man versucht daher die Verwendung von Supports im Sinne der Wirtschaftlichkeit zu minimieren und nur so viel Supportmaterial wie nötig einzubringen. [1]

Im Folgenden werden daher nun verschiedene Supportstrukturen und deren Verwendung vorgestellt, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf ihre vertikale Haltekraft und ihren Einfluss auf die Oberflächenqualität untersucht werden.

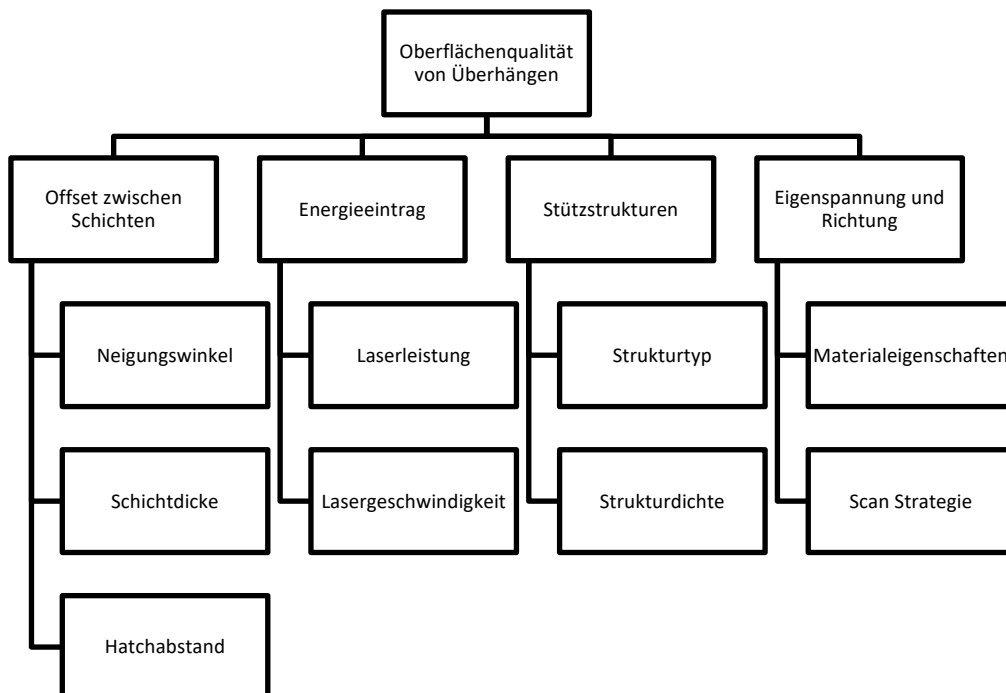


Abbildung 2.8: Einfluss auf die Oberflächenqualität von Überhängen, in Anlehnung an: [18].





**Abbildung 2.9:** Stützstrukturen zur Ermöglichung komplexer additiv hergestellter Bauteile im L-PBF-Verfahren, entnommen aus: [19].

### **Punktsupports**

Punktsupports werden bei sehr kleinen Anbindungsflächen verwendet, wo andere Supportarten aufgrund der geringen Dreiecksfläche keine Vektoren erzeugen können. Sie bieten für kleine punktuelle Flächen eine gute Unterstützung und lassen sich leicht entfernen. [1]

### **Kegelsupports**

Diese Supports bieten eine massive Anbindung zur Bauplattform und Bauteil. Wie bei den Punktsupports können diese auch für kleine Flächen verwendet werden. Sie sind kegelförmig aufgebaut und besitzen eine hohe Festigkeit mit geringem Material. Das Entfernen dieser Supports gestaltet sich relativ einfach. [1]

### **Blocksupports**

Blocksupports finden vor allem an größeren Flächen im Downskin Verwendung. Sie bestehen aus Liniensupports mit einer oder mehrerer Konturen und besitzen ihre Anbindung an das Bauteil meistens mit sogenannten Zähnen. Die Konturen sind dafür da, um vor allem an den Kanten des Bauteils, ein hochlösen zu verhindern. Die Qualität der Oberfläche ist bei diese Supportart im Vergleich zu anderen am höchsten, da die Liniensupports eine Vielzahl von Kontaktpunkten zwischen Support und Bauteil bieten. Bei der richtigen Wahl der Parameter sind diese zusätzlich relativ leicht zu entfernen. [1]

### **Kontursupports**

Diese Supports werden meist in Verbindung mit anderen Supports verwendet und bieten wie schon beschrieben, eine Stabilisation der Kanten einer Fläche, die oftmals starken Verzug aufweisen. Es können jedoch auch reine Kontursupports verwendet werden, die die Kontur der Oberfläche abbilden und in einer Vielzahl von kleineren Skalierungen angebracht werden. [1]

### **Volumensupports**

Volumensupports sind Stützen, die aus Vollmaterial bestehen und eingesetzt werden, wenn große Spannungen an massiven Bauteilen zu erwarten sind. Die starke Anbindung am Bauteil sorgt für ein aufwändiges Lösen dieser Supports mit anschließender maschineller Oberflächennachbehandlung. [1]

### **Baumsupports**

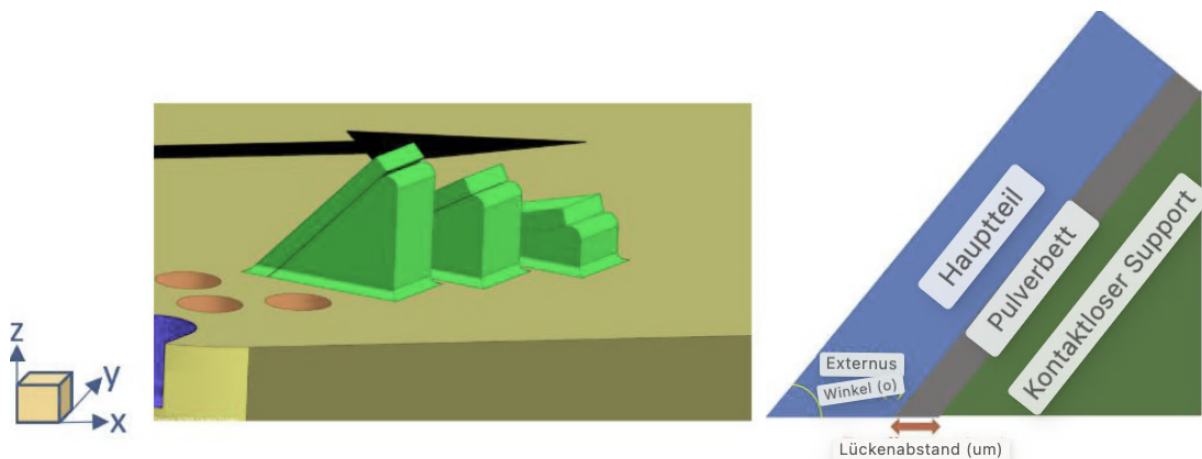
Baumsupports oder auch Treesupports genannt bestehen aus einem Stamm und davon abzweigenden Ästen, die das Bauteil großflächig stützen. Der Materialverbrauch und die Belichtungszeit ist hierbei relativ gering und sorgen für die vielen Kontaktpunkte für eine hohe Oberflächenqualität. Das Lösen der Supports beträgt je nach Parametern und Größe der Fläche ein mittleres Maß. [1]

### **Hybride Supports**

Hybride Supports sind von der Firma Materialise patentierte Kombinationen verschiedener Supports. Kontaktfläche mit der Oberfläche ist eine Blockstruktur, die von einer Volumenstruktur gestützt wird und diese wiederum von einer Baum- oder Kegelstruktur. Dies bietet den Vorteil, dass der Materialverbrauch und die Belichtungszeit im Vergleich einer reinen, einzelnen Struktur deutlich geringer sind. Sie tragen dazu bei die Effizienz und Wirtschaftlichkeit im Prozess zu steigern und bieten einen Kompromiss der verschiedenen Supportarten. [1]

#### **2.3.3 Kontaktlose Stützstrukturen zur Verbesserung der Oberflächenqualität**

Wie schon beschrieben, stellt sich das Entfernen der Stützen als mühsamer Prozess dar, der zusätzliche Zeit und Kosten mit sich bringt. In einer Studie der General Electric Aviation, der Istanbul Technical University und der Eskisehir Osmangazi University wurde daher der Einfluss von kontaktfreien Stützstrukturen für Überhangflächen für eine verbesserte Oberflächenqualität im L-PBF-Prozess untersucht. Dabei wurden aus CoCrMo-Legierungen Überhänge von 15°, 25°, 30° und 45° gebaut, die mit massiven Stützstrukturen unterbaut wurde. Der Abstand zwischen Support und Überhang wurde jeweils mit 100 µm, 125 µm, 150 µm, 250 µm und 300 µm variiert, was einem Vielfachen der Schichtdicke von 50 µm darstellt. Zwischen Support und Überhang besteht demnach in der Theorie keine feste Verbindung, sondern es liegt eine dünne Pulverschicht vor. In Abbildung 2.10 ist der Versuchsaufbau dargestellt.



**Abbildung 2.10:** Versuchsaufbau für die Untersuchung kontaktfreier Stützen, entnommen aus: [20].

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass bei der Herstellung von Proben durch das L-PBF-Verfahren die kontaktlosen Stützstrukturen nicht immer effektiv waren. Es wurde beobachtet, dass einige der berührungslosen Stützen mit den Überhangflächen verschmolzen waren und nicht manuell entfernt werden konnten. Proben, bei denen die Teile nicht von den Stützstrukturen getrennt werden konnten oder die nach der Trennung eine schlechte Oberflächenqualität aufwiesen, wurden von den Charakterisierungsstudien ausgeschlossen.

Die Untersuchungen zeigten, dass bei einem schrägen Winkel von  $45^\circ$  kontaktlose Stützstrukturen bei Spaltabständen von  $100\ \mu\text{m}$  und  $125\ \mu\text{m}$  erfolgreich waren. Bei einem Winkel von  $30^\circ$  konnten jedoch selbst bei einem Spaltabstand von  $150\ \mu\text{m}$  keine kontaktlosen Strukturen die Verschmelzungsprobleme verhindern. Die Ursache für die Verschmelzung liegt hauptsächlich darin, dass das Schmelzbad eine Tiefe erreicht, die mehr als das Zweifache bis Dreifache der Schichtdicke beträgt. Dies deutet darauf hin, dass das Eindringen des Schmelzbades und die Wärmeableitung bei niedrigeren Spaltabständen dominierende Faktoren sind.

Die Oberflächenrauheit ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ ) der Überhangflächen variierte je nach schrägem Winkel und Spaltabstand. Im Allgemeinen nahmen die Rauheitswerte mit abnehmendem Winkel zu. Die kontaktlosen Stützstrukturen wirkten sich positiv auf die Oberflächenqualität aus, indem sie die Verschlechterungsraten der Rauheit reduzierten. Die Veränderung des Spaltabstands beeinflusste ebenfalls die Rauheitswerte, wobei größere Abstände zu einer Verringerung der Rauheit führten. Die Werte für die Oberflächenrauheit ( $R_a$ ,  $R_q$  und  $R_z$ ) bei den Proben CS- $25^\circ$ - $250\ \mu\text{m}$ , CS- $25^\circ$ - $300\ \mu\text{m}$ , CS- $30^\circ$ - $250\ \mu\text{m}$  und CS- $30^\circ$ - $300\ \mu\text{m}$  zeigen im Vergleich zu den entsprechenden nicht unterstützten Gegenständen eine deutliche Abnahme. Dies bedeutet, dass die Reduzierung der Oberflächenrauheit bei größeren Abständen zwischen den Strukturen auffälliger ist. Insbesondere bei CS- $25^\circ$ - $300\ \mu\text{m}$  sinken  $R_a$ ,  $R_q$  und  $R_z$  um das Doppelte im Vergleich zu den Werten bei nicht unterstützten Proben. [20]

Insgesamt zeigte sich, dass die Effektivität der kontaktlosen Stützstrukturen von verschiedenen Faktoren abhängt, darunter der schräge Winkel, der Spaltabstand und die Wärmeableitung. Es wurde festgestellt, dass bei bestimmten Bedingungen kontaktlose Strukturen die Oberflächenqualität verbessern können, aber in einigen Fällen waren sie nicht ausreichend, um das Verschmelzen zu verhindern.

In einer weiteren Studie wurden berührungsfreie Stützstrukturen für Ti-6Al-4V Grade 23-Pulver im L-PBF-Verfahren untersucht, wobei  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  und  $45^\circ$  Überhangwinkel angestrebt

wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass die Verwendung von berührungsfreien Stützen den Verzug aufgrund verbesserter Wärmeableitung deutlich reduzierte, die durchschnittliche Rauheit sich jedoch nicht verbesserte. [21]

### 2.3.4 In-Prozess Kenngrößen

Im In-Prozess des selektiven Laser-Strahlschmelzens findet der eigentliche Fertigungsprozess statt, bei dem eine Vielzahl von Parametern präzise eingestellt werden kann, um die Qualität und die spezifischen Eigenschaften der gefertigten Metallteile zu steuern. Dem Anwender sind hierbei jedoch nur einige Stellgrößen gegeben, wovon die wichtigsten im Folgenden beschrieben werden.

Führende Parameter sind hierbei die Schichtstärke  $D_S$ , die Laserleistung  $P_L$ , der Spurbabstand  $h_S$ , und die Belichtungsgeschwindigkeit  $v_S$ . Das Zusammenspiel dieser Parameter bestimmt die Volumenenergiedichte  $E_V$  um das Pulver aufzuschmelzen, jedoch nur mit Näherung zum tatsächlichen Spurbabstand  $h_S$ , der mit Formel 2.2 angenähert werden kann:

$$E_V = \frac{P_L}{D_S * h_S * v_S}. \quad (2.1)$$

Die Schichtstärke  $D_S$  gibt hierbei die Auflösung des Bauteils in Z-Richtung an. Je größer die Schichtdicke gewählt wird, desto mehr nimmt die Detailauflösung des Bauteils ab und in schrägen Bereichen kommt der sogenannte Treppenstufeneffekt zum Vorschein. Je kleiner die Schichtdicke, desto länger ist jedoch auch die Prozessdauer. Größere Schichtdicken benötigen zudem bei gleichbleibender Bauteilqualität eine erhöhte Energiezufuhr. Hierbei muss demnach immer ein Kompromiss zwischen Auflösung, Prozessdauer und Korngrößen des Pulvers getroffen werden. [1] [7]

Die Laserleistung  $P_L$  und der dazugehörige Fokusbereich sind wesentliche Stellgrößen zum Aufschmelzen des Pulvers. Hierbei muss wieder die Mitte zwischen einer zu niedrigeren Intensität, die nur einen Sintervorgang des Pulvers hervorrufen würde und zwischen zu hohen Intensitäten, die zu einer Verdampfung des Pulvers mit unruhigem Schmelzbad und Schweißspritzern führen, gefunden werden. Ein feiner Fokusbereich (10  $\mu\text{m}$  bis 100  $\mu\text{m}$ ) mit geringeren Laserleistung (bis 400 W) sorgt für eine qualitativ genauere Fertigung, als mit großen Fokusbereichen (300  $\mu\text{m}$  bis 500  $\mu\text{m}$ ) mit großen Laserleistungen (bis 1000 W). Ein kleinerer Fokusbereich erhöht hierbei jedoch wieder die Produktionsdauer. [1]

Der Spurbabstand  $h_S$  gibt den Abstand zwischen zwei Vektoren, die der Laser abfährt, an. Hierbei ist es wichtig, dass eine ausreichende Überlappung zwischen den Schmelzspuren vorhanden ist, um eine hohe Verbindung der Spuren und eine hohe Dichte zu erzielen. Mit zunehmendem Spurbabstand steigt die Baurate, es können sich jedoch sogenannte Lack of Fusion Poren bilden, in denen das Pulver zwischen den Spuren nicht aufgeschmolzen wurde. Bei zu geringem Spurbabstand sinkt die Baurate und es wird gegebenenfalls zu viel Energie in das Material aufgrund von zu großen Überlappungen eingebracht. Zuviel Energie kann außerdem den Einfluss darauf haben, dass Legierungsbestandteile mit einem niedrigeren Schmelzpunkt verdampfen und somit die Ausgangslegierung verändert wird.

Folgende empirische Relation lässt sich zwischen Spurbabstand  $h_S$  und Laserstrahldurchmesser  $d_S$  angeben, die jedoch nur als Orientierungshilfe dient, da hier die tatsächliche Breite des Schmelzbades nicht berücksichtigt wird:

$$h_S \sim 0,7 * d_S. \quad (2.2)$$



### 2.3.5 Post-Prozess Kenngrößen und ihre Auswirkungen auf das Endprodukt

Der Post-Prozess bzw. das Nachbearbeiten ist wichtiger Bestandteil des ganzen Fertigungsprozesses, da es großen Einfluss auf das Endprodukt hat. Das Vorgehen und die Nachbearbeitungsschritte sollten von Anfang an im Pre-Prozess bei der Datenvorbereitung und beispielsweise Setzen von Supports berücksichtigt werden, um ein fertigungstechnisch einwandfreies Produkt zu erhalten, das allen Anforderungen entspricht. Zudem werden dadurch Zusatzkosten und zusätzlicher Aufwand minimiert.

Der erste Schritt im Post-Prozess ist zunächst einmal das das Reinigen und Entfernen des überschüssigen Pulvers vom Bauteil. Vor allem in Hohlräumen und in den Zwischenräumen der Supports sammelt sich viel Pulver an. Hier ist wie schon erwähnt bei der Datenvorbereitung drauf zu achten, Hohlräume und Supports so auszulegen, dass das Pulver leicht entfernt und wiederverwendet werden kann. Dies kann beispielsweise durch Perforationen in den Supports erfolgen. Grund des Entfernen von überschüssigem Pulver ist zum einen die möglichst große Wiederverwendbarkeit des Pulvers aus wirtschaftlichen und natürlich auch umwelttechnischen Aspekten. Bevor das Pulver wiederverwendet werden kann, wird es in einer Siebstation unter einer inerten Schutzgasatmosphäre gesiebt, damit eine Oxidation und Entzündungen des Materials vermieden werden. Hierbei werden gröbere Verunreinigungen des Pulvers durch Spritzer und Schmauch beim Aufschmelzen eliminiert. Ein weiterer Grund der Pulverentfernung ist die arbeitstechnische Sicherheit, da der Kontakt mit dem Pulver oder im schlimmsten Fall das Einatmen gesundheitstechnische Folgen haben kann. Wichtig ist außerdem, dass bei nicht ordnungsgemäßer Pulverentfernung und anschließender Wärmebehandlung das Pulver an den Oberflächen haften bleibt und eine anschließende Entfernung erschwert. Im schlimmsten Fall sintert das Pulver und bildet einen festen Pulverkuchen der aus z.B. Kanälen oder Zwischenräumen nicht entfernt werden kann. Zur Pulverreinigung gehört zudem auch das Entfernen des überschüssigen Pulvers aus der Maschine, welches sich in der Prozesskammer in vielen kleinen Zwischenräumen ansammelt. Nur durch eine ordnungsgemäße Reinigung der Maschine kann für den kommenden Baujob ein Fertigungsprozess ohne Verunreinigungen garantiert werden. [1]

Im zweiten Schritt folgt das Trennen des Bauteils inklusive Supports von der Bauplattform. Dies geschieht beispielsweise mit einer Bandsäge oder durch Drahterodieren. Danach werden vorsichtig die Supports mechanisch durch Handwerkzeuge gelöst. Wichtig ist hierbei das Bauteil selbst nicht durch die Werkzeuge zu beschädigen und Oberflächen zu beeinträchtigen. Die abgelöste Bauplattform wird nun gefräst und sandgestrahlt, um eine matte Oberfläche zu erzielen, die eine gute Haftung der zukünftigen ersten Schicht garantiert. Jetzt kann die Bauplattform wieder in der Maschine montiert werden und ist bereit für den nächsten Einsatz. [1]

#### **Nachbearbeitung des Bauteils:**

Hierbei wird das Bauteil auf seine definierten Anforderungen und Toleranzen, wie z.B. Oberflächengüten und Abmaße gebracht. Hierbei kommen meistens konventionelle subtraktive Verfahren zur Anwendung. Dies kann Schritte wie Sandstrahlen, elektrochemisches Ätzen oder Polieren beinhalten. Mehr zu den einzelnen Methoden im Folgenden. Allgemein lässt sich festhalten, dass Funktionsoberflächen meist immer maschinell nachbearbeitet werden müssen, um die Oberflächenrauigkeiten für definierte Funktionsanwendungen zu erzielen. [1]

Im Folgenden werden nun in Hinblick auf die medizinische Verwendung relevante Nachbearbeitungsmethoden vorgestellt:

### **Wärmebehandlung:**

Eine Wärmebehandlung für Ti-6Al-4V und vor allem für dessen medizinische Anwendungen ist unumgänglich, da während des Prozesses hohe Eigenspannungen auftreten. Grund dafür ist die hohe eingebrachte thermische Energie des Lasers. Dadurch wird eine Ausdehnung des Materials hervorgerufen, die beim Abkühlen zu einer erhöhten relativen Kontraktion führt. Plastische Verformungen, die ungewollte Zugspannungen hervorrufen sind die Folge. Zum anderen hindert beim Aufbringen und Abkühlen einer neuen Schicht die darunterliegende Schicht eine freie Kontraktion des Materials, wodurch es zu Zugspannungen in horizontaler zweidimensionaler Ebene kommt. Auf Grund dessen ist eine Wärmebehandlung zwingend vor dem Trennen des Bauteils und Supports mit der Bauplattform nötig, da sich sonst das Bauteil verformen kann. Mit einer Wärmebehandlung wird also die Reduzierung von Eigenspannungen und Spannungsspitzen angestrebt, sowie einer Homogenisierung des Bauteils und Schaffen eines entsprechenden Gefügestandes und Mikrostruktur, sowie ein Spannungsabbau in den Zwischengitteratomen. Dadurch werden simultan die mechanischen Eigenschaften des Bauteils verbessert und die Anisotropie durch eine Wärmebehandlung stark reduziert. Die Höhe der Wärmebehandlungstemperatur und der Dauer ist je nach Anforderungen individuell auszulegen. Bereits ab Temperaturen von 400°C kann nach dem Glühen die Kristallstruktur, die aus  $\alpha$ -Phase und  $\alpha'$ -Martensit besteht, in ein sehr feinelaminales  $\alpha+\beta$ -Gefüge umgewandelt werden. In der Regel wird eine Wärmebehandlung unterhalb der  $\beta$ -Transustemperatur durchgeführt, um die Bildung von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Phasen zu fördern und die mechanischen Eigenschaften zu optimieren. [1][7]

### **Strahlen:**

Ein weiteres Verfahren, welches meistens zur Anwendung kommt ist das Strahlen der Oberflächen nach Lösen der Bauplattform und Supports. Hierbei werden Anlauffarben gelöst und anhaftendes teilweise aufgeschmolzenes Pulver von den Oberflächen entfernt. Des Weiteres können je nach Art und Material des Strahlmittels gewisse Oberflächenrauigkeiten erzielt werden [1]. Strahlmittel die beim L-PBF-Prozess angewendet werden sind oftmals eisenfreie Strahlmittel, wie Edelkorund für einen gröberen, aggressiven Abtrag und Glasperlen für einen feineren, schonenden Abtrag der Oberfläche [24]. Strahlabstand, Auftreffwinkel, Auftreffgeschwindigkeit und Einwirkungsdauer beeinflussen die Oberflächen und sorgen durch ein nicht automatisiertes unregelmäßiges Abtragen für gegebenenfalls unterschiedliche Rauigkeiten der Oberflächen. [1]

### **Chemisches Ätzen:**

Das chemische Ätzen ist eine Methode um einen annähernd gleichmäßigen Abtrag der Oberfläche zu erzielen. Vorteilhaft ist hierbei der Angriff des Ätzprozess auf die gesamte Geometrie. So können hierbei auch kleinste Zwischenräume behandelt werden, die sonst nur schwer erreichbar sind. Hierbei wird die Metalloxidschicht aufgelöst und das Grundmaterial stark angegriffen, um gewünschte Oberflächenrauigkeiten zu erzielen. Gerade für medizinische Anwendungen ist dieses ein gebräuchlicher Schritt, um die Mikrostruktur der Oberfläche anzupassen und das Bauteil vom gegebenenfalls vorangegangenen Strahlprozess zu reinigen. Die Oberflächengüte wird hierbei von der verwendeten Ätzlösung, Temperatur und Ätzdauer festgelegt. [25]

### Elektrochemisches Ätzen:

Beim elektrochemischen Ätzen wird mit Hilfe elektrischen Stroms die Oberfläche des Bauteils abgetragen. Hier dient das Bauteil als Anode und die Elektrolytlösung als Kathode, in die das Bauteil hineingetaucht wird. Wird nun ein Stromkreis anlegt, lösen sich die Metallionen aus der Anode und wandern zur Kathode. Hierbei setzt sich sogenanntes Metallhydroxid an, welches anschließend aus der Elektrolytlösung entfernt werden muss. Oberflächenrauigkeiten von 3-10 µm sind hierbei möglich. Die Bearbeitungszeit ist hierbei von der anliegenden Stromstärke abhängig. [26]

### 2.4 Klinische Anforderungen und regulatorische Aspekte im Dentalbereich

Für die Verwendung metallischer Legierungen und gelten nach der DIN EN ISO 22674 für einen festsitzenden und herausnehmbaren Zahnersatz und deren Applikationen bestimmte Anforderungen, an denen sich diese Arbeit orientiert. Darunter wären:

1. Gefährliche Elemente: Nickel, Cadmium, Beryllium und Blei werden nach der Norm als gefährliche Elemente bezeichnet. Cadmium, Beryllium und Blei dürfen nicht mehr als 0,2 % Massenanteil in der Legierung vorhanden sein. Ist Nickel mit einem Massenanteil von mehr als 0,1 % enthalten, muss dieser Wert auf der Packungsbeilage angegeben werden.
2. Hohe Bioverträglichkeit
3. Mechanische Eigenschaften: Die Anforderungen an den Werkstoff müssen nach dem Verarbeitungsverfahren erfüllt werden. Wird eine Wärmebehandlung durchgeführt, müssen die Anforderungen im wärmebehandelten Zustand erfüllt werden. Das Bauteil wird je nach Anwendung in einen Typ unterteilt und besitzt laut Norm unterschiedlich zu erfüllende mechanische Eigenschaften (siehe Tabelle 2.3: Mechanische Eigenschaften. Dazu gehören die Bruchdehnung, das Elastizitätsmodul, die Dichte, Korrosionsbeständigkeit in Bezug auf die Unversehrtheit des Werkstoffes, Anlaufbeständigkeit, Solidus- und Liquidustemperatur oder Schmelzpunkt und der Wärmeausdehnungskoeffizient. Die Dichte des zu verwendenden metallischen Dentalwerkstoffes darf hierbei um nicht mehr als 5 % von dem in der Begleitliteratur in der Verpackung angegebenen Wert abweichen. [27]

**Tabelle 2.3:** Mechanische Eigenschaften, in Anlehnung an: [27].

Typ	0,2 %-Dehngrenze der nicht-proportionalen Dehnung $R_{p0,2}$	Bruchdehnung	Elastizitätsmodul
	[MPa]	%	[GPa]
0	-	-	-
1	80	18	-
2	180	10	-
3	270	5	-
4	360	2	-
5	500	2	150



Die Einteilung des Typ erfolgt gemäß der Norm DIN EN ISO 22674:

**Tabelle 2.4:** Einteilung des Zahnersatzes, in Anlehnung an: [27].

---

Typ 0	Für festsitzenden Einzelzahnersatz mit geringer Belastung, z. B. kleine verblendete einflächige Inlays, verblendete Kronen.
Typ 1	Für festsitzenden Einzelzahnersatz mit geringer Belastung, z. B. verblendete oder nicht verblendete einflächige Inlays, verblendete Kronen.
Typ 2	Für festsitzenden Einzelzahnersatz, z. B. Kronen oder Inlays, bei denen die Anzahl der Flächen nicht eingeschränkt wird.
Typ 3	Für festsitzenden mehrgliedrigen Zahnersatz.
Typ 4	Für Applikationen mit dünnen Querschnitten, die sehr hohen Kräften ausgesetzt sind, z. B. herausnehmbare Teilprothesen, Klammern, dünne verblendete Einzelkronen, festsitzende Vollbogenprothesen oder Brücken mit kleinen Querschnitten, Stege, Befestigungen, implantatgestützte Suprakonstruktionen.
Typ 5	Für Applikationen, bei denen Teile der Vorrichtung eine Kombination aus hoher Steifigkeit und Dehngrenze erfordern, z. B. dünne herausnehmbare Teilprothesen, Teile mit dünnen Querschnitten, Klammern.

---

## 2.5 Statistische Versuchsplanung

Prozesse, die von vielen Parametern beeinflusst werden, sind oft schwer zu erforschen, insbesondere wenn Wechselwirkungen verschiedener Parameter existieren (z. B. die Kombination von verschiedenen Legierungselementen in der Metallurgie, die synergistische Effekte hervorruft) oder wenn es darum geht, verschiedene Ausgangsvariablen des Prozesses zu optimieren, die sich gegenseitig beeinflussen (z. B. die Einstellung von Schweißparametern zur Maximierung der Schweißnahtfestigkeit bei gleichzeitiger Minimierung der Verformung). Die statistische Versuchsplanung (engl.: Design of Experiments, DoE) ist ein gängiger Ansatz, um diese Herausforderungen zu überwinden und wird sowohl in der Industrie als auch in der grundlegenden Forschung häufig angewendet. [28] Das Konzept beruht auf der systematischen Variation von Prozessbedingungen (d. h. Faktoren), um eine statistische Auswertung der gewünschten Ausgangswerte (d. h. Reaktionen) zu ermöglichen. Das Ziel besteht darin, empirische Modelle für jede Reaktion im untersuchten Designraum<sup>3</sup> zu entwickeln, um gewünschte Prozessergebnisse vorherzusagen und die Wechselwirkungen zwischen den Eingangsparametern zu quantifizieren. [29]

### 2.5.1 Grundlegendes Konzept

Das grundlegendste sogenannte vollfaktorielle Versuchsdesign besteht darin, die niedrigsten und höchsten Werte der gewählten Faktoren zu kombinieren - auch als  $2^k$ -Versuchsdesign bezeichnet, wobei  $k$  die Anzahl der Faktoren ist. Die Antwortwerte werden mithilfe von Regressionsfunktionen modelliert, die Informationen über die Ursache-Wirkungs-Beziehung enthalten. Ein zusätzlicher Mittelpunkt (der die Kombination der Mittelwerte jedes Faktors darstellt) wird wiederholt

---

<sup>3</sup> d.h. ein mathematisches Koordinatensystem, dessen Dimensionen die untersuchten Faktoren sind.

durchgeführt, um die erwartete Streuung der Antwort und die Bedeutung einer Krümmung<sup>4</sup> in der Modellfunktion zu bestimmen. [30]

Im Gegensatz zu intuitiven Ansätzen zur Untersuchung eines Prozesses, wie z. B. der schrittweisen Änderung eines Faktors (engl.: One-Factor-At-a-Time, OFAT), ermöglicht DoE die systematische Erfassung eines gewünschten Optimums. Streuungen der Antwortwerte oder ein unzureichendes Verständnis der Parametereffekte und ihrer Wechselwirkung können zu falschen Schlussfolgerungen führen, wenn OFAT angewendet wird. Zum Beispiel lässt sich durch die separate Änderung von Faktoren nicht feststellen, ob Wechselwirkungen mit anderen Faktoren auftreten. Daher wird der zweite Faktor basierend auf einem gefundenen lokalen Optimum für den ersten Faktor variiert, was nicht zwangsläufig zum Auffinden des absoluten Optimums im Designraum führt. Darüber hinaus würde der Analyst in diesem Beispiel höchstwahrscheinlich den Schluss ziehen, dass eine Erhöhung von Faktor 1 die Reaktion allmählich verringert, obwohl diese Beobachtung in Wirklichkeit nur eine lokale Wirkung wäre. Im Gegensatz dazu kann die DoE-Methode die mehrdimensionale Ursache-Wirkungs-Beziehung quantitativ bestimmen, was es ermöglicht, das absolute Optimum effizient zu finden und ein besseres Verständnis des untersuchten Prozesses zu erlangen. Ein weiterer Vorteil vom DoE besteht darin, dass insgesamt und im Vergleich zu OFAT weniger Experimente durchgeführt werden, was Zeit und Materialkosten spart. Dieser Effekt skaliert insbesondere mit zunehmender Anzahl der untersuchten Faktoren. [29]

### 2.5.2 Statistische Auswertung

Nachdem die Daten erhoben wurden, erfolgt die Anpassung der Antwortwerte  $y_j$  an eine k-dimensionale polynomiale Regressionsfunktion  $y'_n$  n-ter Ordnung unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate gemäß Gleichung 2.3. [30] Diese Regressionsfunktion setzt sich als Summe von Polynomtermen zusammen, die sich aus bestimmten Polynomkonstanten  $a$  mal den untersuchten Faktoren  $x$  in Potenz verschiedener Grade zusammensetzen. Der maximal erfassbare Grad hängt von der Auflösung des Designs ab, das heißt von der Anzahl der Datenpunkte pro Dimension. Jeder Polynomterm repräsentiert den Effekt eines bestimmten Faktors oder einer Interaktion von Faktoren. Zum Beispiel beschreibt ein Term wie  $a_i x_1^2$  den Effekt zweiten Grades des Faktors  $x_1$ , während ein Term wie  $a_i x_1 x_2$  die lineare Interaktion zwischen  $x_1$  und  $x_2$  beschreibt.

$$\sum_j (y_j - y'_j)^2 \rightarrow \text{Minimum}, \quad (2.3)$$

mit:

$$y'_n(x_1, \dots, x_k) = \sum_{i_1=0}^n \dots \sum_{i_k}^n a_{i_1 \dots i_k} x_1^{i_1} \dots x_k^{i_k}. \quad (2.4)$$

Das Modell enthält in seiner Grundform alle möglichen Kombinationen von Parameterwirkungen. Unbegründete physikalische Effekte führen oft zu einer besseren Anpassung an die vorhandenen Datenpunkte. Allerdings stellen sie keine realen Ursache-Wirkungs-Beziehungen dar und können sogar irreführende Informationen liefern, indem sie sich an die gemessenen Streuungen

---

<sup>4</sup> Wenn die Krümmung insignifikant ist, können die Antwortwerte mit linearen Funktionen beschrieben werden. Ist die Signifikanz der Krümmung hoch, muss das Modell Polynome höheren Grades enthalten, um die Antwort ausreichend zu beschreiben.

anpassen. Um eine Überanpassung zu vermeiden, wird die Polynomfunktion durch Varianzanalyse (engl.: Analysis of Variance, ANOVA) bewertet. Diese Analyse liefert Schätzungen zur statistischen Signifikanz der einzelnen Terme des Polynoms. Ein Beispiel für eine ANOVA bei einem einfachen Modell zweiten Grades mit den Faktoren  $x_1$  und  $x_2$  ist in Tabelle 2.5 aufgeführt. Der F-Test vergleicht das Signal-Rausch-Verhältnis zwischen der Varianz aufgrund der Faktorenänderung  $s_E^2$  und der Varianz aufgrund der erwarteten Streuung  $s_F^2$ , die durch den wiederholten Mittelpunkt bestimmt wird:

$$F = s_E^2 / s_F^2. \tag{2.5}$$

Ein  $F$ -Wert von 1 bedeutet, dass der Effekt eines Terms nicht von der Streuung der Antwort unterschieden werden kann und der Term als nicht signifikant betrachtet wird. In der Regel wird ein  $F$ -Wert  $> 4$  als Schwellenwert verwendet. Darüber hinaus gibt der Test die Wahrscheinlichkeit  $p$  an, einen Effekt mit der Größe des beobachteten  $F$  aufgrund von Streuung zu beobachten. Der Schwellenwert für statistische Signifikanz liegt normalerweise zwischen 0,05 und 0,1. Im vorliegenden Beispiel wird der Term  $a_5 x_2^2$  als nicht signifikant betrachtet und daher aus dem Modell entfernt. Die Regression wird dann mit dem aktualisierten Modell wiederholt und erneut mittels ANOVA ausgewertet. Dieser Prozess wird wiederholt, bis das Modell eine ausreichende statistische Signifikanz aufweist. Der LOF-Parameter (Lack of Fit) wird verwendet, um festzustellen, ob die normalisierten Rückstände als Funktion der variierenden Faktoren zufällig verteilt sind. Ein signifikanter LOF deutet darauf hin, dass ein Modellterm fehlt, um die beobachteten Effekte ausreichend zu beschreiben. [30] [31]

**Tabelle 2.5:** Beispiel einer ANOVA.

<i>Term</i>	<i>F</i>	<i>p-Wert</i>	<i>Koeffizient</i>
Intercept	11.98	< 0.0001	$a_0$
$x_1$	10.54	0.0185	$a_1$
$x_2$	1.58	0.1934	$a_2$
$x_1 x_2$	7.28	0.0143	$a_3$
$x_1^2$	11.45	0.0054	$a_4$
$x_2^2$	3.45	0.4738	$a_5$
LOF	4.43	0.2176	

↖ signifikant

↖ insignifikant

Ein gängiger Ansatz zur Verbesserung der Modellgenauigkeit besteht darin, die erhaltenen Antworten durch eine Transformation für die Modellregression zu modifizieren. Dies ermöglicht beispielsweise die Stabilisierung der Varianz bei vorhandener Heteroskedastizität<sup>5</sup>, die andernfalls die Zuverlässigkeit der Anpassung beeinträchtigen könnte. Die Anwendung einer Box-Cox-

<sup>5</sup> bezieht sich auf den Umstand, dass die Streuung einer Variablen über den Bereich ihres Mittelwerts ungleich ist.

Transformation gemäß (2.6) kann dabei helfen, den optimalen Transformations-Exponenten  $\lambda_t$  zu ermitteln. Des Weiteren ist die reziproke Transformation, also die Bildung des Kehrwerts eine gängige Methode. [32]

$$y' = \begin{cases} y^{\lambda_t} & , \lambda_t \neq 0 \\ \log(y) & , \lambda_t = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Zusätzlich kann eine Transformation aufgrund von technischen Beschränkungen sinnvoll sein. Wenn beispielsweise die gemessene „Antwort“ physikalisch auf einen bestimmten Wertebereich begrenzt ist, kann eine Logit-Transformation verwendet werden, um untere und obere Grenzen der erhaltenen Werte zu definieren. [31] Nach erfolgreicher Identifikation eines geeigneten Regressionsmodells kann dieses zur Beschreibung des Systems oder zur Vorhersage der erforderlichen Eingangsfaktoren für ein gewünschtes Ergebnis genutzt werden. Wenn die Regression im [-1/+1]-normalisierten Designraum durchgeführt wurde, resultieren kodierte Werte für die Koeffizienten. Diese dienen als objektive Maße zur Bewertung der Intensität der beobachteten Effekte. Die tatsächlichen Koeffizientenwerte können dann für Vorhersagen unter Verwendung absoluter Faktorwerte als Eingabe berechnet werden.

## 2.6 Herausforderungen und offene Forschungsfragen

Eine der primären Herausforderungen liegt in der Entwicklung von Stützstrukturen, die eine ausreichende vertikale Haltekraft bieten, um Deformationen während des Fertigungsprozesses zu vermeiden, ohne dabei die Oberflächenqualität des fertigen Implantats maßgeblich zu beeinträchtigen. Dies erfordert ein tiefgreifendes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen der Fertigung und der Eigenschaften des verwendeten Metallpulvers.

Ein weiteres Forschungsfeld betrifft die Optimierung der Stützstrukturen hinsichtlich ihrer Entfernbarkeit nach dem Fertigungsprozess. Die Stützstrukturen müssen so gestaltet sein, dass sie sich ohne Beschädigung der Oberflächenqualität des Implantats entfernen lassen, was insbesondere bei den komplexen Geometrien dentaler Implantate eine Herausforderung darstellt. Die Entwicklung innovativer Lösungen, die eine einfache Entfernung der Stützstrukturen ermöglichen, ohne die Integrität oder die Passgenauigkeit des Implantats zu beeinträchtigen, bleibt ein aktives Forschungsfeld.

Darüber hinaus besteht ein weiterer Forschungsbedarf in der Anpassung und Optimierung der Prozessparameter für das selektive Laser-Strahlschmelzen, um eine kontrollierbare Oberflächenqualität zu erzielen. Dies umfasst die Untersuchung des Einflusses von Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Schichtdicke und anderen Parametern auf die Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften des fertigen Implantats. Des Weiteren ist hierbei auch die Bauteilausrichtung und Positionierung im Bauraum Bestandteil dessen.

Auch der Aspekt der Materialforschung, insbesondere die Entwicklung und Charakterisierung von Metallpulvern, die speziell für die additive Fertigung dentaler Implantate optimiert sind, sind wichtige Einflussgrößen. Die Auswahl des richtigen Materials ist entscheidend für die Erfüllung klinischer Anforderungen, einschließlich Biokompatibilität, mechanischer Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit.

### 3 Methodik

#### 3.1 Untersuchungsmethodik und Versuchsbeschreibung

Um den Einfluss ausgewählter Stützstrukturen in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften und auf die Oberflächenqualität zu untersuchen, werden insgesamt drei verschiedene Versuche durchgeführt.

##### 3.1.1 Analyse der mechanischen Eigenschaften

Der erste Versuch behandelt die mechanischen Eigenschaften additiv hergestellter Ti-6Al-4V-Zugproben mittels selektiven Laserstrahlschmelzen, um die mechanischen Eigenschaften während des Bauprozesses ohne anschließender Wärmebehandlung zu bestimmen.

Für den Versuch wurde plasma-atomisiertes sphärisches Ti-6Al-4V-Pulver Grade 23 (TEK-MATM Ti64-53/20-A, Mâcon, Frankreich) mit einer durchschnittlichen Partikelgröße von 20-53  $\mu\text{m}$  als Rohstoff verwendet. Das Pulver entspricht der Norm nach ASTM- und ISO 17025 Standards. Die chemische Zusammensetzung des verwendeten Pulvers ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

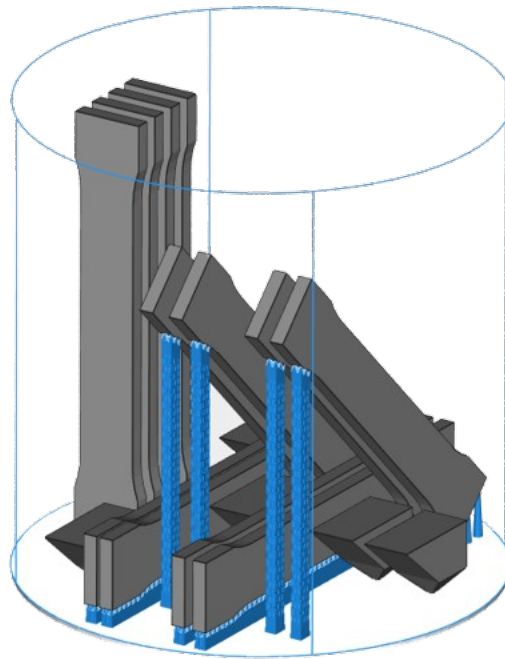
**Tabelle 3.1:** Chemische Zusammensetzung des Ti-6Al-4V-Pulvers, in Anlehnung an: [33].

Element	Wt. %
Titan	balance
Aluminium	6.47
Vanadium	4.33
Eisen	0.17
Yttrium	<0.001
Kohlenstoff	0.010
Sauerstoff	0.070
Stickstoff	0.012
Wasserstoff	0.002

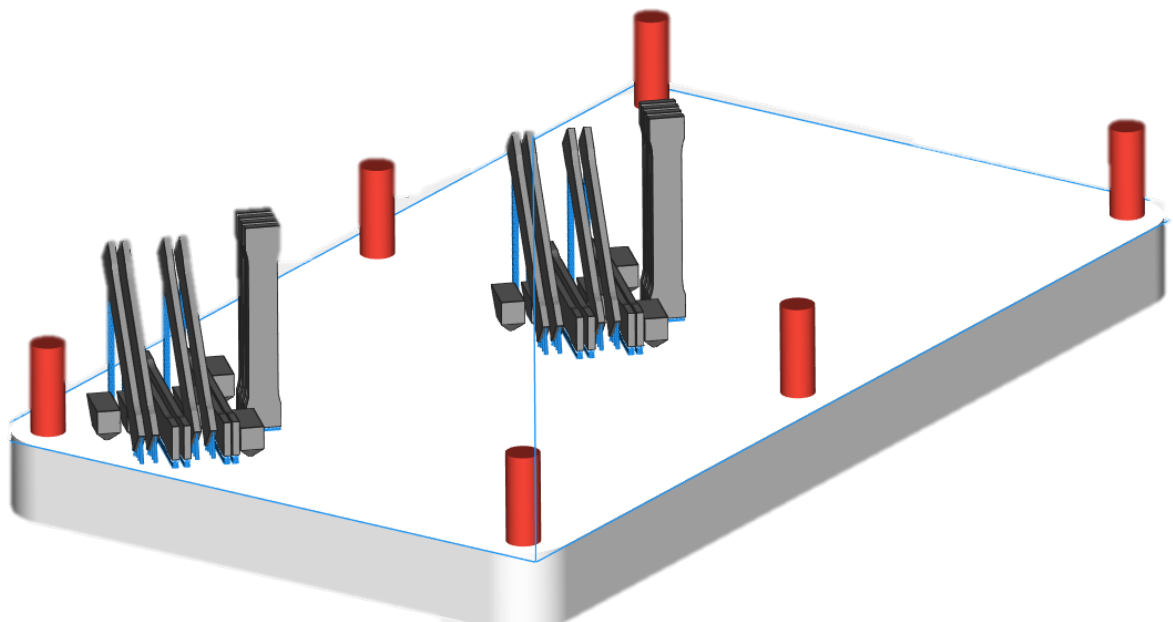
Aufgrund ihrer bereits in Kapitel 2.2 beschriebenen spezifischen Eigenschaften und ihres breiten Anwendungsbereichs sind Ti-6Al-4V-Legierungen die am weit verbreitetsten Legierungen im L-PBF und in der medizinischen Anwendung. Daher wird dieses Material für diesen Versuch ausgewählt, um die mechanischen Eigenschaften dieser Legierung nach dem L-PBF-Prozess im „as-built Zustand“ zu beurteilen.

Es wurden gemäß DIN EN ISO 6892-1 Flachzugproben in Solidworks 2017 konstruiert, um die mechanischen Eigenschaften der Titanlegierung in unterschiedlichen Orientierungen zu bestimmen. Der Versuch wurde auf der TruPrint 1000 und auf der SLM 500 Quad Laser durchgeführt, um einen möglichen Vergleich des Einflusses unterschiedlicher Maschinen und Bauraumgrößen zu berücksichtigen. Hierfür wurden jeweils 4 Stück dieser Flachzugproben zur Reproduzierbarkeit und in drei unterschiedlichen Orientierungen in der Software Materialise Magics 22.03 positioniert. Einmal horizontal ( $0^\circ$ ), einmal diagonal ( $45^\circ$ ) und einmal stehend ( $90^\circ$ ). Diese Orientierung wurden ausgewählt um einen Vergleich des möglichen Einflusses der Anisotropie im Bauteil durchzuführen, da es sich wie bereits in 2.1 beschrieben um einen schichtweisen Aufbau handelt.

Die Flachzugproben wurden zusätzlich mit Block- und Kegel- Stützstrukturen versehen, um ein Ablösen von der Bauplattform zu verhindern. Bei den horizontalen Flachzugproben traten besonders große Eigenspannungen auf, weswegen diese besonders stark mit der Bauplattform an den Enden befestigt werden mussten. Des Weiteren wurden bei der SLM 500 die Flachzugproben einmal in der Mitte der Bauplattform und einmal am Rand der Bauplattform positioniert, um einen Einfluss der mechanischen Eigenschaften auf die Position im Bauraum zu identifizieren. Die Anordnung der Bauteile zueinander erfolgte passend der Bauraumgröße für die TruPrint 1000 und wurde für die SLM 500 übernommen. Des Weiteren wurden fünf Dichtewürfel pro Maschine und Orientierung mitgebaut, um die Porosität zu messen und einen Vergleich herbeizuziehen. Ein Aufbau der Baujobs ist Abbildung 3.1 für die TruPrint 1000 und in Abbildung 3.2 für die SLM 500 zu sehen. Die Maschinenparameter der Versuchsbauejobs sind in Tabelle 3.2 dargestellt.



**Abbildung 3.1:** Zugproben Trumpf Baujob mit Dichtewürfeln.

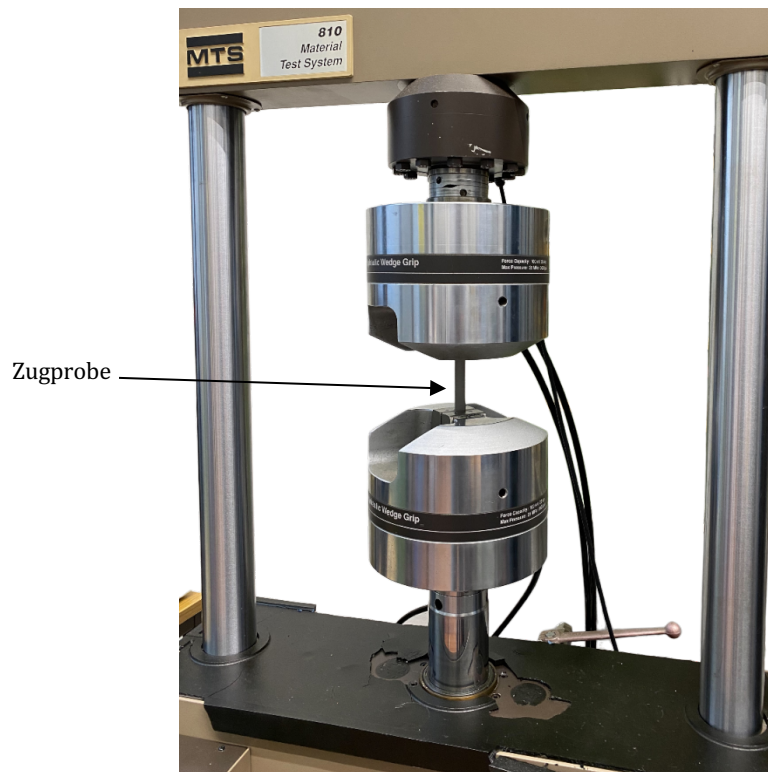


**Abbildung 3.2:** Zugproben SLM 500 Baujob mit Dichtewürfeln.

**Tabelle 3.2:** Anlagen und Prozessparameter.

Maschine	TruPrint 1000	SLM 500
Laserleistung [W]	90	240
Laserstrahldurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	55	80
Geschwindigkeit [mm/s]	980	1200
Hatch [mm]	0.11	0.1
Schichthöhe [ $\mu\text{m}$ ]	60	60
Vorheizung [ $^{\circ}\text{C}$ ]	/	200

Nach Fertigstellung des Bauprozesses wurden die Flachzugproben vom Pulver befreit, händisch von der Bauplattform gelöst und die Supports mittels Handwerkzeug gelöst. Anschließend wurden Zugversuche mit einer zweiachsigen servohydraulischen Prüfmaschine (MTS 810) durchgeführt und damit die Größe der maximalen axialen Zugkraft  $F_z$  gemessen. Die Prüfgeschwindigkeit lag bei 0,3 mm/s. Anschließend wurde die Zugspannung anhand der gemessenen Zugkraft geteilt durch die Querschnittsfläche der Zugproben berechnet. Ein Aufbau des Zugversuchs ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Die Dichtewürfel wurden bis auf 1  $\mu\text{m}$  Körnung geschliffen und mittels einem digitalen Lichtmikroskop (Keyence VHX-7000) die Porosität gemessen.



**Abbildung 3.3:** Aufbau des Zugversuchs.

### 3.1.2 Analyse der Stützstrukturstärke

Um Stützstrukturen effizient gegenüber der Materialökonomie und Bauzeit zu gestalten, ist es entscheidend, genaue Werte über die maximale Spannung zu erfahren, die sie aushalten können, bevor es zum Bruch kommt. In diesem Versuch soll daher der Einfluss von Supports auf die Anbindung mit dem Bauteil und Zugfestigkeit im In-Prozess untersucht werden. Hierbei soll ein Vergleich der mechanischen Eigenschaften der in Versuch eins ermittelten mechanischen Eigenschaften mit den mechanischen Eigenschaften der Stützstrukturen in Bezug auf die Bauteilanbindung herangezogen werden. Der Versuch soll zeigen, in wie weit sich diese mechanischen Eigenschaften decken und welchen Wert die tatsächliche maximale Zugfestigkeit beträgt.

Die Zugfestigkeit der Stützstrukturen ist abgesehen vom Typ der Stützstruktur (z. B. Block-, Kontur-, Kegel-, Baumsupport) wesentlich von folgenden Parametern abhängig:

**1. Zahn-/Anbindungsgeometrie:**

Hierbei geht es um die Form der einzelnen Volumenelemente (Zähne) an der oberen und unteren Schnittstelle der Stützstruktur.

**2. Hatch:**

Beschreibt die Dichte des Struktur, in dem die Zähne/Anbindungen angeordnet sind.

**3. Zahnsynchronisation:**

Gibt die Überlappungen zwischen den Zähnen an.

**4. Z-Offset:**

Beschreibt wie tief die Zähne/Anbindungen in das zu stützende Bauteil hineinreichen.

Als Grundmaterial wurde Ti-6Al-4V Grade 23-Pulver verwendet. Um die mechanische Anbindung zu untersuchen wurden in Solidworks modifizierte Zugproben konstruiert, die in der Mitte einen quadratischen Querschnitt aufweisen, der sich mit der Stützstrukturfläche von 11 mm x 11 mm aus Versuch drei deckt. Es wurde ein quadratischer Querschnitt gewählt, damit die Verteilung der Stützstrukturen homogen erfolgt. Bei runden Querschnitten erfolgt oft eine unregelmäßig verteilte Stützstruktur, die keine gleichmäßige Verteilung der Spannungen abbilden würde. Die Zugprobe wurde anschließend in Solidworks in der Mitte der Länge geteilt, sodass sich zwischen den beiden Hälften ein Abstand von 5 mm ergibt (siehe Abbildung 3.4). Die Proben wurden anschließend in die Software Materialise Magics importiert und zwischen den beiden Hälften eine Stützstruktur versehen, um die Hälften wieder miteinander zu verbinden bzw. die obere Hälfte zu stützen. Als Stützstrukturen wurden Block-, Kontur-, Kegel- und Baumsupports ausgewählt. Die Parameter der verwendeten Stützstrukturen sind in Tabelle 3.3 dargestellt und wurden so ausgewählt, dass die Fläche der Stützstruktur anbindung kleiner als die des geringsten Querschnitts der Zugprobe, jedoch so groß wie möglich ausfällt. Hiermit soll garantiert werden, dass die Zugprobe an der Anbindung zwischen Stützstruktur und oberer Hälfte der Zugprobe bricht, jedoch ein Ablösen der oberen Zugprobenhälfte während des Bauprozesses durch Eigenspannungen im Bauteil vermieden wird. In Abbildung 3.4 ist der Aufbau solch einer modifizierten Zugprobe dargestellt. Für jede Stützstrukturart werden zur Reproduzierbarkeit jeweils drei Proben senkrecht mit der SLM 500 gefertigt, um die Aufbaurichtung des Supports und die Zugspannung während des Zugversuchs senkrecht nach oben zu berücksichtigen. Die Maschinenparameter decken sich mit denen aus Versuch eins für die SLM 500, bzw. lag die Laser-geschwindigkeit für den Support bei 425 mm/s.



**Tabelle 3.3:** Wesentliche Parameter der zu prüfenden Stützstrukturen.

Nr.	Stützstruktur	Hatch (x/y)	Zähne Toplänge / Radius	z-Offset	Anbindungsflächen <i>n</i> Anbindungsflächen
		[mm]	[mm]	[mm]	
1.1-1.3	Block	0,5	1	0	308
2.1-2.3	Kontur	0,5	1	0	128
3.1-3.3	Kegel	2	0,6	0	9
4.1-4.3	Baum	1,5	0,5 → Ast	0	36 → Ast
			0,7 → Stamm		9 → Stamm

**Abbildung 3.4:** Geteilte Zugprobe mit Supportverbindungen (Block, Kontur, Kegel, Baum).

Um auszuschließen, dass die filigranen Proben nicht schon beim Einspannen in die Zugmaschine, aufgrund der hohen Spannkraften brechen, wurde ein weiterer modifizierter Probensatz mit Splintloch erstellt (siehe Abbildung 3.5a). Hierbei soll die Zugprobe in seinen Freiheitsgeraden entlastet werden, damit beim Einspannen kein Biegen oder Torsion der Probe stattfindet, welches die Probe schon vorzeitig belasten würde. Mit Hilfe eines konstruierten und mittels L-PBF gefertigten Adapter aus Ti-6Al-4V (siehe Abbildung 3.5b) werden die Freiheitsgerade auf der z- und y-Achse erhöht. Dadurch verteilt sich die Last gleichmäßiger und soll repräsentivere Ergebnisse liefern. Die modifizierte Zugprobe wurde durch einen Splint mit dem Adapter verbunden. Zusätzlich wurden die Parameter der Top Zahnlänge und der Radien etwas angepasst, wie in Tabelle 3.4 ersichtlich.

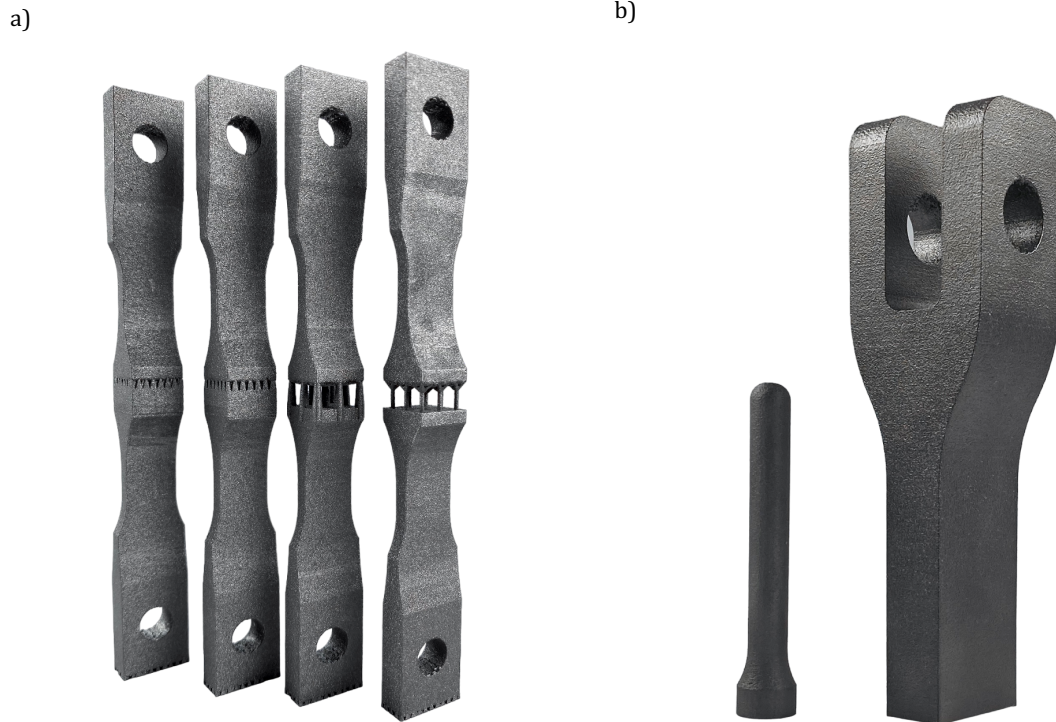


Abbildung 3.5: Neue Zugproben in a) und gefertigter Adapter in b).

Tabelle 3.4: Neue Parameter der zu prüfenden Stützstrukturen.

Nr.	Stützstruktur	Hatch (x/y)	Zähne Toplänge / Radius	z-Offset unten	Anbindungsflächen <i>n</i> Anbindungsflächen
		[mm]	[mm]	[mm]	
Block 3.1-3.4	Block	0,5	0,5	-2,5	308
Kontur 3.1-3.4	Kontur	0,5	1	-2,5	128
Kegel 3.1-3.4	Kegel	2	0,6	-2,5	9
Baum 4.1-4.4	Baum	1,5	0,4 → Ast 0,4 → Stamm	-2,5	36 → Ast 9 → Stamm

Nach dem Fertigungsprozess wurden die Zugproben von der Bauplattform erodiert und das überschüssige Pulver zwischen den Stützstrukturen beseitigt. Anschließend wurden die Zugproben in die Zugmaschine eingespannt und mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit auseinandergezogen, bis es zum Bruch kam. Während dieser Prüfung zeichnet die Zugmaschine die Längenänderung in Verbindung mit der aufbrachten Zugkraft auf. Die Proben werden ohne vorherige Wärmebehandlung geprüft, um die Prozessbedingungen der wirkenden Kräfte zu simulieren, die während des Fertigungsprozesses eintreten. Die Prüfmaschine wird mit einer Zuggeschwindigkeit von 0.003 mm/s konfiguriert. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 3.6 zu sehen.



**Abbildung 3.6:** Versuchsaufbau für Zugproben mit Adapter.

Die Berechnung der maximalen Spannung erfolgt durch:

$$\sigma_{Support, max} = \frac{F_{max}}{A_{Support}}, \quad (3.1)$$

mit:

$$A_{Support} = l_{Zahn} * b_{Zahn} * n_{Anbindungsflächen}, \quad (3.2)$$

bzw. bei runden Anbindungsflächen aus den einzelnen Flächen:

$$A_{Support} = \pi r^2 * n_{Anbindungsflächen}. \quad (3.3)$$

---

$F_{max}$	:	Maximale Zugkraft	[N]
$A_{Support}$	:	Querschnittsfläche der Stützstruktur	[mm <sup>2</sup> ]
$l_{Zahn}$	:	Länge Zahn	[mm]
$b_{Zahn}$	:	Breite Zahn	[mm]
$n_{Anbindungsflächen}$	:	Anzahl Anbindungsflächen	

---

Wichtig hierbei zu beachten ist die tatsächliche Größe von  $A_{Support}$  zu verwenden. Pulver, welches während des Schmelzprozesses nicht vollständig aufgeschmolzen wird, haftet an den Rändern und könnte zu einer Veränderung der tatsächlichen Anbindungsfläche führen und somit zu ungenauen Ergebnissen für die Spannung  $\sigma_{Support, max}$ . Aus diesem Grund wurde nach dem Zugversuch die Bruchfläche an den Stützstrukturen mittels digitalem Mikroskop nachgemessen, um die tatsächlichen Abmaße zu ermitteln.

### 3.1.3 Analyse der Oberflächenrauigkeit ausgewählter Stützstrukturen

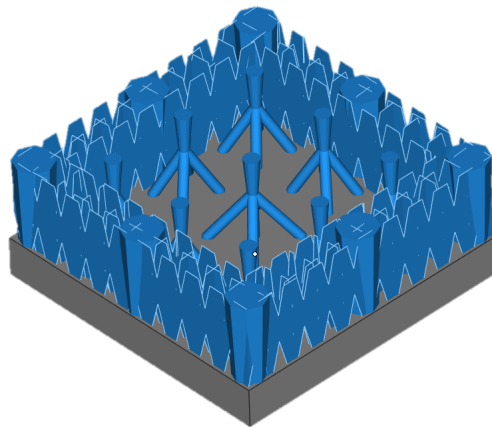
Der dritte Versuch beinhaltet den Einfluss von verschiedenen Stützstrukturen auf die Oberflächenrauigkeit horizontaler Downskin-Flächen. Ziel ist es einen Zusammenhang der Parameter verschiedener Stützstrukturen auf die Oberflächenqualität zu ermitteln und anhand dessen geeignete Stützstrukturen für eine minimale Oberflächenrauigkeit Ra auszuwählen.

Wie bereits in Versuch eins wurde hierfür gasbetäubtes sphärisches Ti-6Al-4V-Pulver Grade 23 (TEKMATM Ti64-53/20-A, Mâcon, Frankreich) mit einer durchschnittlichen Partikelgröße von 20  $\mu\text{m}$  - 53  $\mu\text{m}$  als Rohstoff verwendet. Der 0° Grad Überhang soll durch ein 15 mm x 15 mm x 2,5 mm großes Plättchen simuliert werden, dass bei Z = 5 mm über der Bauplattform horizontal in Materialise Magics platziert wird. Die Plättchen wurden in Solidworks 2017 konstruiert. Auf der darunterliegenden Fläche von 11 mm x 11 mm wurden die zu untersuchenden Supports angebracht. Für diesen Versuch wurden Block-, Kontur-, Kegel- und Baumsupports ausgewählt. Die Entscheidung, verschiedene Supportarten wie Block, Kontur, Kegel und Baum einzubeziehen, erweitert die Untersuchung auf unterschiedliche Strukturtypen, die jeweils spezifische Auswirkungen auf die Oberflächenqualität haben können. Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 beschrieben wurde, zeichnen sich Block- und Kontursupports durch sogenannte Zähne aus, die als Verbindungselemente zum Bauteil dienen. Diese Zähne können in einer Vielzahl von Parametern verändert werden. Dabei wurden die Parameter "Hatch" und "Zähne Toplänge" ausgewählt, da diese die Geometrie und Dichte der Stützstrukturen maßgeblich beeinflussen. Hatch beschreibt den Abstand der einzelnen Liniensupports innerhalb des Blocksupports und wird in diesem Versuch zwischen 0,5 mm und 6 mm variiert, um unterschiedliche Dichten zu erzeugen. Der zweite zu verändernde Parameter ist die Toplänge des Zahnes, die die Länge der Anbindung eines einzelnen Zahnes mit dem Bauteil beschreibt. Diese wird von 0,2 mm bis 1 mm variiert. Die Kombination von Hatch und Zähne Toplänge bei Block- und Kontursupports ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der Supportgeometrie und ihrer Verbindungselemente. Die beiden Parameter beschreiben somit quantitativ die Anzahl der Berührungsflächen und deren Größe der Anbindungsfläche. Die Berührungspunkte sind homogen anhand des Algorithmus von Magics auf der Plättchenoberfläche verteilt. Bei weiteren Proben (37-48 und 49-57) wurden jeweils die Hatchabstände nochmals vergrößert, um die möglichen Grenzfälle zu betrachten. Die Variationen der Parameter sind in Tabelle 9.1 im Anhang dargestellt.

Bei den Kegel- und Baumsupports wurden jeweils die Parameter der einzelnen Kegel und Bäumabstände zueinander und deren Radius der Anbindung von Support mit Bauteil variiert. Die Anzahl der Äste pro Baum wurden fest auf 4 Stück gesetzt. Der Abstand der Kegel wurde von 0,8 mm bis 6 mm variiert und der Abstand der Baumsupports von 0,8 mm bis 8 mm. Der Radius der Kegel variiert von 0,2 mm bis 0,6 mm und die der Äste von 0,3 mm bis 0,5 mm. Diese Werte beschreiben wieder die Anzahl der Berührungsflächen und die Fläche der einzelnen Verbindungen. Der Abstand wurde teilweise etwas angepasst, um immer die gleiche Variation der Berührungsflächen für jeden Radius zu erzeugen. Bei weiteren Proben (58-66 und 67-75) wurden jeweils die Abstände der Kegel und Äste nochmals vergrößert, um die möglichen Grenzfälle zu

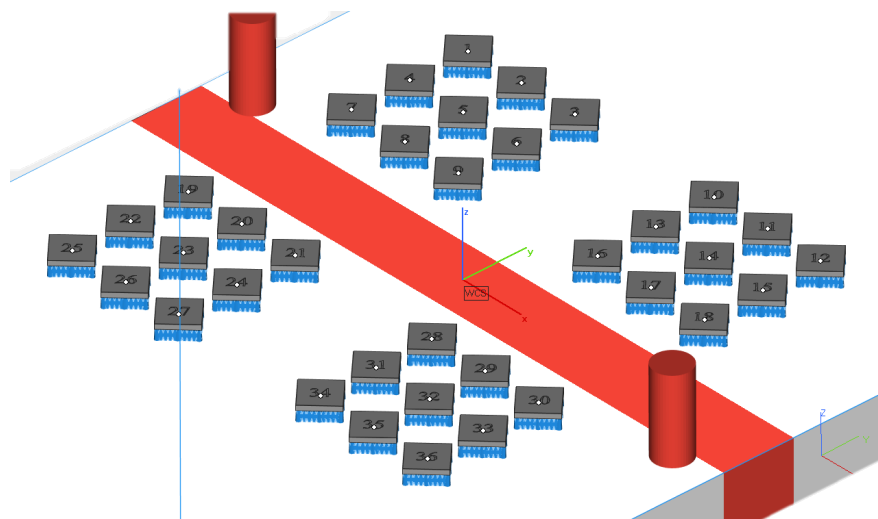
betrachten. Die Variationen der Parameter ist in Tabelle 9.2 im Anhang dargestellt. Somit ergaben sich 75 Plättchen mit verschiedenen Supportvariationen, die auf der Bauplattform in der Software Magics platziert wurden.

Um ein Hochlösen der Plättchen an den Rändern durch Eigenspannungen zu vermeiden und damit die Durchführung des Versuchs nicht zu gefährden, wurden an den Ecken und Kanten der Plättchen 8 Kegelsupports mit einem oberen Durchmesser von 0,8 mm angebracht. Zusätzlich wurde am Rand ein Blocksupport von 2 mm Breite versehen, um zwischen den Kegelsupports eine gestützte Fläche zu generieren. Dieser Ansatz stellt sicher, dass die Ergebnisse der Untersuchung zur Oberflächenqualität durch die gewählten Supportstrukturen und nicht durch unerwünschte Nebeneffekte beeinflusst werden (siehe Abbildung 3.7).



**Abbildung 3.7:** Aufbau eines Plättchens mit Kegel- und Blocksupportkontur. Hier mit Baumsupport in der Mitte (untere Ansicht).

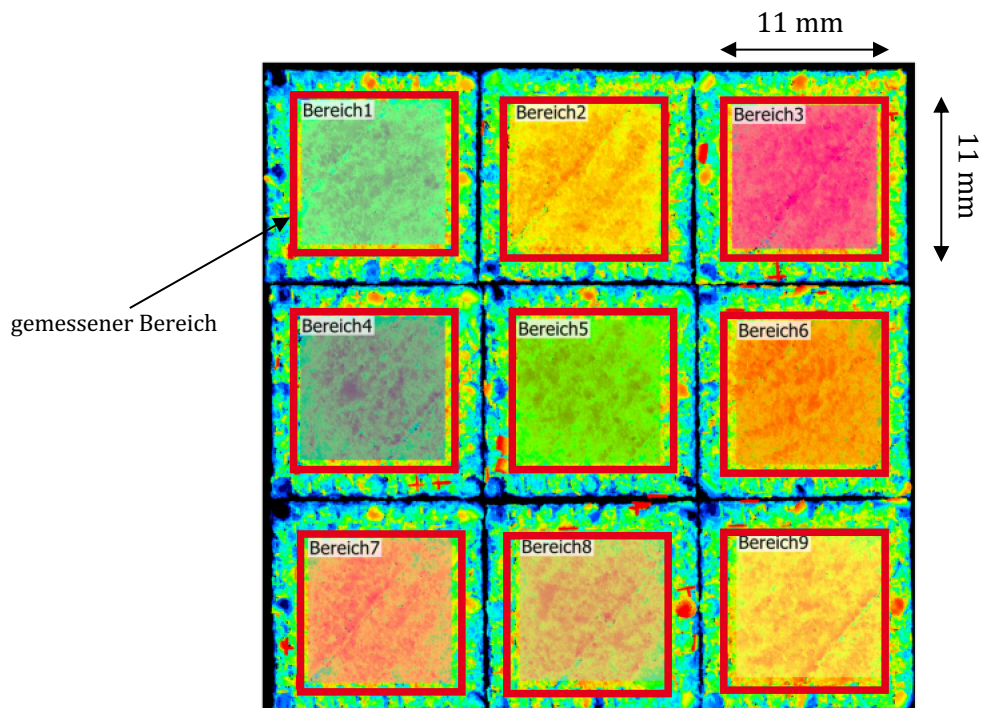
Die 75 Plättchen werden in Magics auf der Bauplattform der SLM 500 in zwei Baujobs platziert (siehe Abbildung 3.8) und mit den selben Parametern wie aus den vorherigen Versuchen gefertigt. Der Versuch wurde auf der SLM 500 durchgeführt, da diese Maschine einen größeren Bauraum und damit mehr Platz für unterschiedliche Variationen der Stützstrukturen bietet.



**Abbildung 3.8:** Platzierung der Plättchen.

Nach Beendigung des Fertigungsprozesses wurden die Teile von der Bauplatzform manuell mit Hilfe eines Meißels gelöst. Anschließend wurden Kegel-, Block- und die jeweils zu untersuchende Supportart von den Plättchen mechanisch mittels Zange gelöst. Es wurde auf ein vorsichtiges Vorgehen beim Lösen der Stützstrukturen geachtet, um die zu untersuchende Oberfläche nicht zu beschädigen und aussagekräftige Analysen der Oberflächenqualität durchführen zu können. Die Plättchen wurden anschließend auf einer dafür konstruierten und mittels FDM-Druck hergestellten Vorrichtung platziert und die Oberflächenrauigkeiten  $S_a$  mit einem Keyence VR-5000 mittels 3D-Profilometer gemessen. Hierbei wurde auf der gestützten Fläche ein Bereich von 10 mm x 10 mm für die Messung der Oberflächenrauigkeit  $S_a$  ausgewählt. In Abbildung 3.9 ist beispielhaft die gemessene Fläche dargestellt. Die Oberflächenrauigkeit  $S_a$  berechnet sich nach Formel 3.4. Dieser Wert stellt eine Erweiterung des Linienrauheitsparameters  $R_a$  (arithmetischer Mittelwert der Rauheit) in die zweidimensionale Fläche dar. Er misst den Höhenunterschied jedes Punktes im Vergleich zum arithmetischen Mittelwert der Gesamtoberfläche. Generell dient dieser Parameter zur Beurteilung der Oberflächenrauheit [34].

$$S_a = \frac{1}{A} \iint |Z(x, y)| dx dy . \quad (3.4)$$



**Abbildung 3.9:** Messung der Oberflächenrauigkeit  $S_a$  mittels Profilometer.

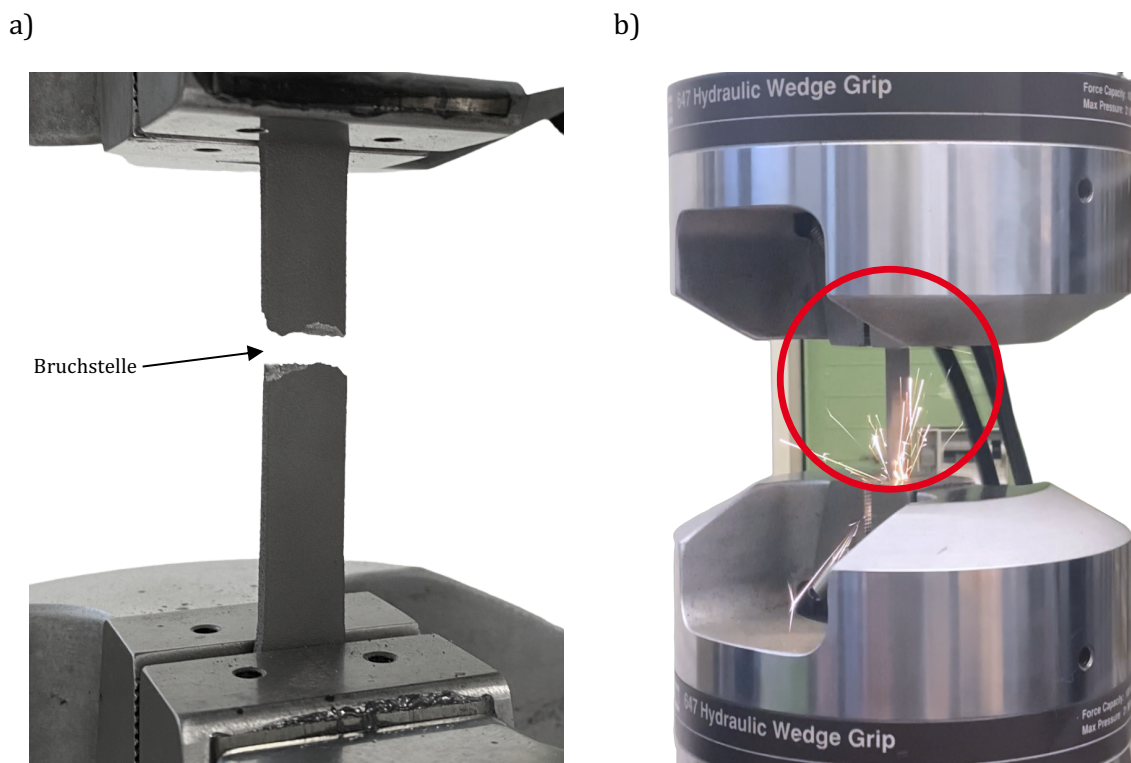
### **3.1.4 Auswahl geeigneter Stützstrukturen und Validierung der Haltekraft**

Aufgrund der in Versuch eins bis drei ermittelten Ergebnisse sollen in Versuch vier geeignete Stützstrukturen ausgewählt werden. Dabei soll der Fokus der Auswahl auf eine möglichst hohe Oberflächenqualität des zu stützenden Bereichs mit gleichzeitiger anwendungsspezifischer Anforderung auf die Kraftaufnahme der Stützstrukturen liegen. Hierfür wird als Anwendungsbeispiel eine Modellgussprothese verwendet, die mit den ausgewählten Stützstrukturen versehen wird. Anschließend wird eine Simulation des Bauteilverzugs während des Bauprozesses mittels Autodesk Fusion 360 durchgeführt, um sich qualitativ einen Überblick über den auftretenden Verzug in verschiedenen Positionen zu schaffen. Dieser Versuch stellt lediglich eine qualitative Validierung der erworbenen Erkenntnisse dar.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Mechanische Eigenschaften der Zugproben

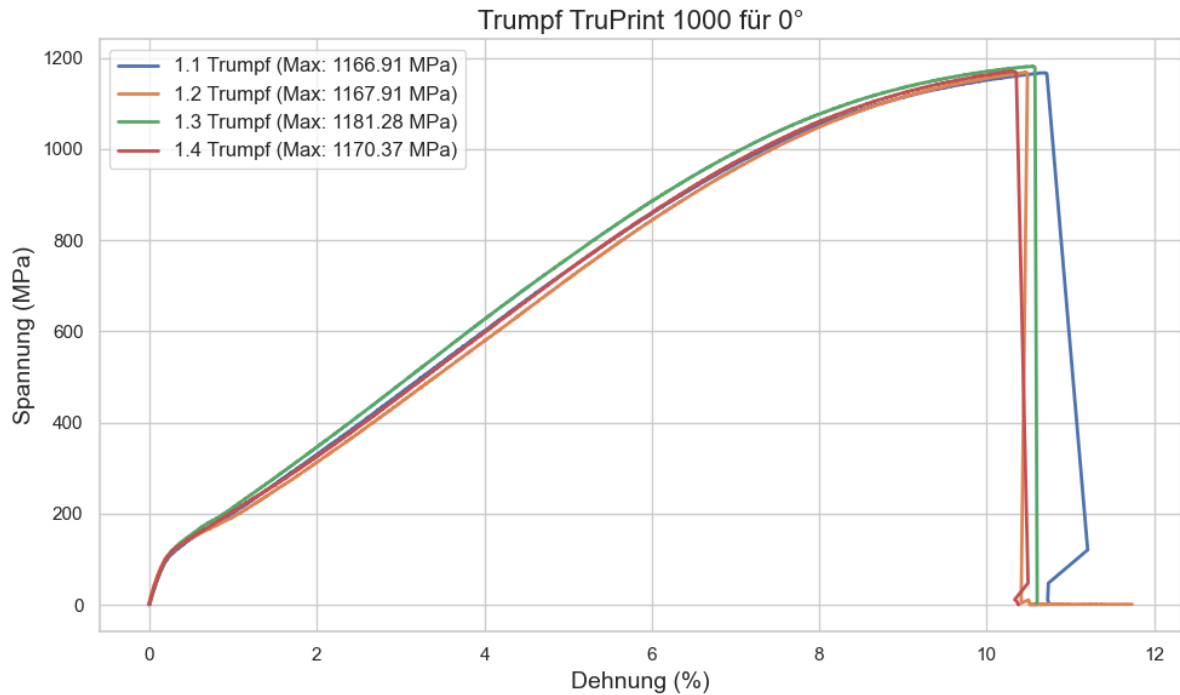
Im ersten Versuch wurden verschiedene Zugproben in  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  auf der TruPrint 1000 und der SLM 500 Quad gefertigt. Auf der SLM 500 Quad wurde zudem ein Satz in der Mitte der Bauplattfrom und ein Satz am Rand (unten) positioniert. Anschließend wurden diese mittels Zugmaschine gezogen. Die Zugproben brachen mit Ausnahme einiger weniger Proben alle im zulässigen Bereich zwischen den Einspannungen, aufgrund des kleinsten Querschnitts und der daraus resultierenden größten Zugspannungen (siehe Abbildung 4.1a). Proben die im unzulässigen Bereich brachen wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Bemerkenswert war zudem die große Freisetzung thermischer Energie, die während des Bruchs bei allen Proben auftrat (Abbildung 4.1b).



**Abbildung 4.1:** Darstellung des Zugversuchs. In a) ist der Bruch der Zugprobe und in b) ein explosionsartiges Verhalten beim Bruch gezeigt.

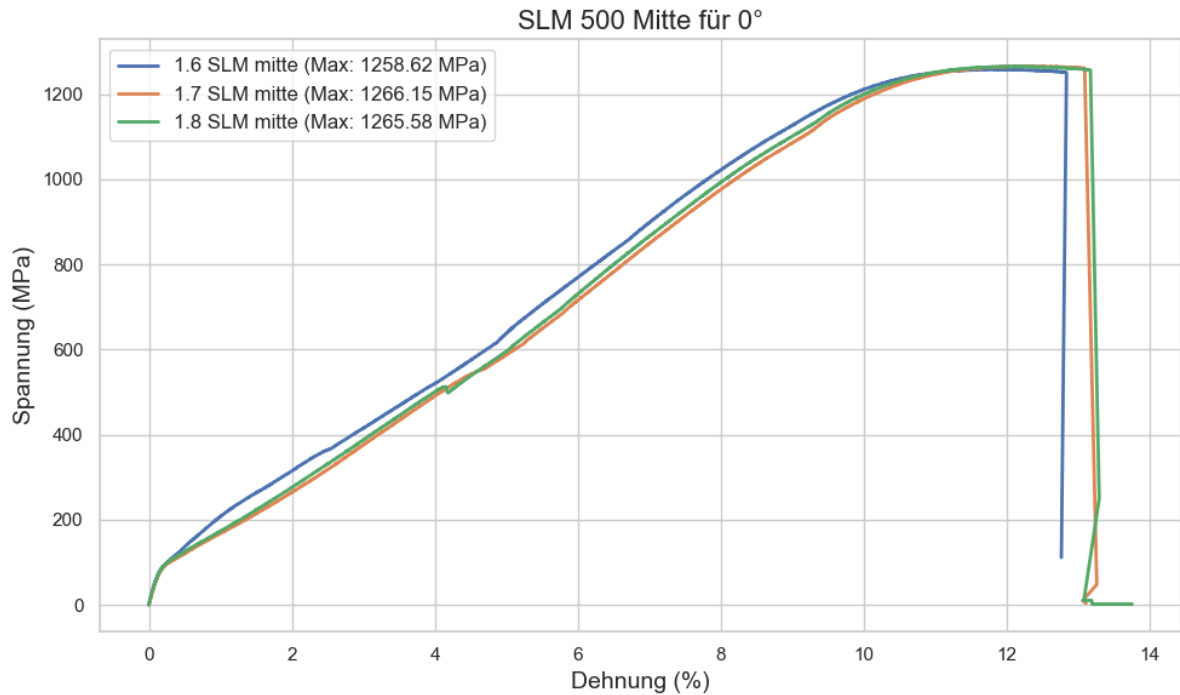
In Abbildung 4.2 ist das Spannungs-Dehnungs Diagramm für die Zugproben der TruPrint 1000 in horizontaler Ausrichtung ( $0^\circ$ ) dargestellt. Alle vier Proben zeigen ein ähnliches Verhalten im Verlauf des Graphen, was auf eine sehr gute Reproduzierbarkeit hindeutet. Die Graphen steigen zunächst sehr steil linear an mit sehr geringer Längenänderung im Vergleich zur gesamten Längenänderung. Ab etwa 100 MPa fällt die Steigung und die Spannung nimmt mit einem annähernd linearen Verhalten weiter zu. Anschließend fällt die Steigung bis es zum Bruch kommt. Die mittlere maximale Zugspannung  $R_m$  lag bei 1172 MPa.





**Abbildung 4.2:** Spannungs-Dehnungs Diagramm TruPrint 1000 für 0°

Die horizontalen Proben der SLM 500 mit mittlerer Bauraumausrichtung brachen mit Ausnahme von Probe 1.5 (mitte) alle im zulässigen Bereich. In Abbildung 4.3 ist ein annähernd gleicher Verlauf der drei Proben, wie bei der TruPrint 1000 (0°) zu sehen. Die Dehnung beträgt hier etwa 2 % mehr, jedoch kann die Dehnung in der Versuchsreihe nur relativ betrachtet werden, da diese aufgrund nicht vorhandenem Extensometer nur über den axialen Verfahrensweg gemessen werden konnte und auch ein Rutschen aus den Einspannungen mit gemessen wird. Die maximale Zugspannung  $R_m$  ist mit etwa 1263 MPa um fast 100 MPa höher als bei der TruPrint 1000 mit 0° Ausrichtung.



**Abbildung 4.3:** Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM 500 mitte für 0°

Die horizontalen Proben der SLM 500 mit unterer Bauraumausrichtung brachen mit Ausnahme von Probe 1.5 (SLM unten) alle im zulässigen Bereich. In Abbildung 4.4 ist ein annähernd gleicher Verlauf der drei Proben, wie bei der SLM 500 mitte zu sehen. Jedoch ist hier bei allen Proben bei etwa 1100 MPa ein kurzzeitiges Absinken der Zugspannung zu erkennen. Des Weiteren ist der Verlauf zwischen 3 % und 5 % Dehnung bzw. zwischen 550 MPa und 800 MPa unregelmäßig. Die maximale Zugspannung  $R_m$  ist mit etwa 1286 MPa am höchsten aus der 0° Versuchsreihe, wie in Abbildung 4.5 ersichtlich. Durchschnittlich beträgt die Zugfestigkeit  $R_m$  der SLM 500 unten bzw. am Rand trotz des unregelmäßigen Verlaufs etwa 1,7 % mehr gegenüber der SLM 500 in der Mitte und etwa 9,7 % mehr gegenüber der TruPrint 1000.

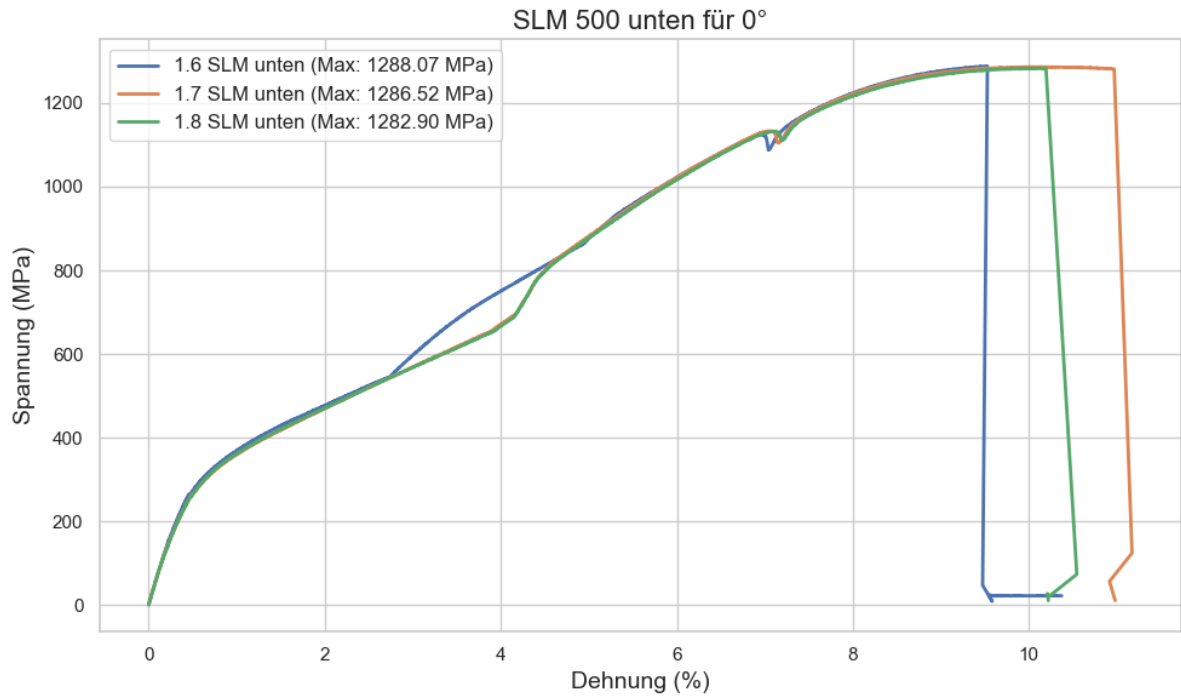


Abbildung 4.4: Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM 500 unten für 0°

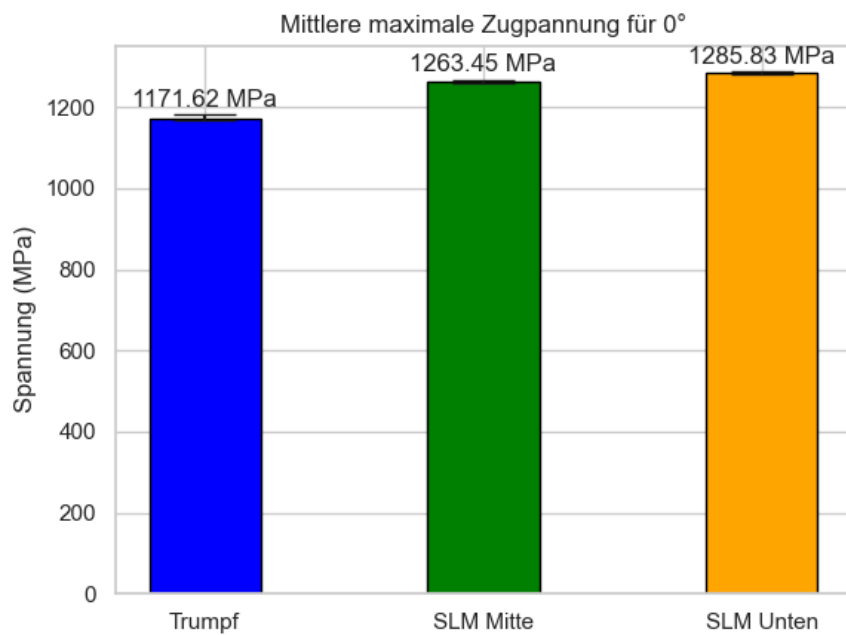
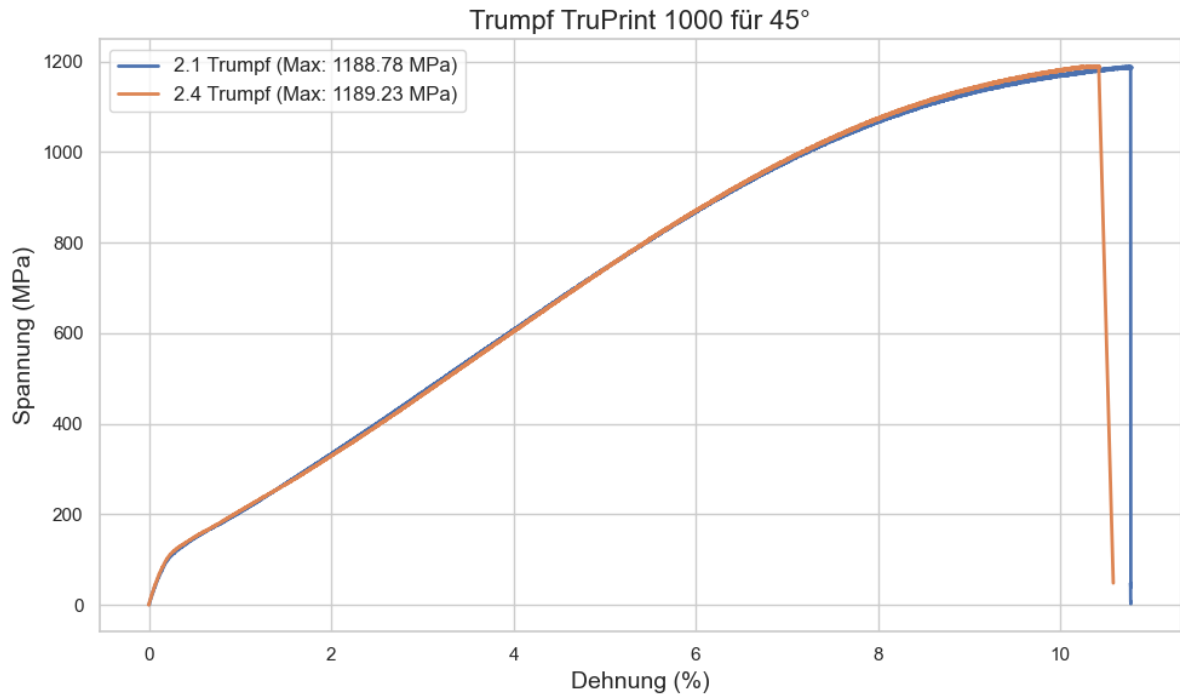


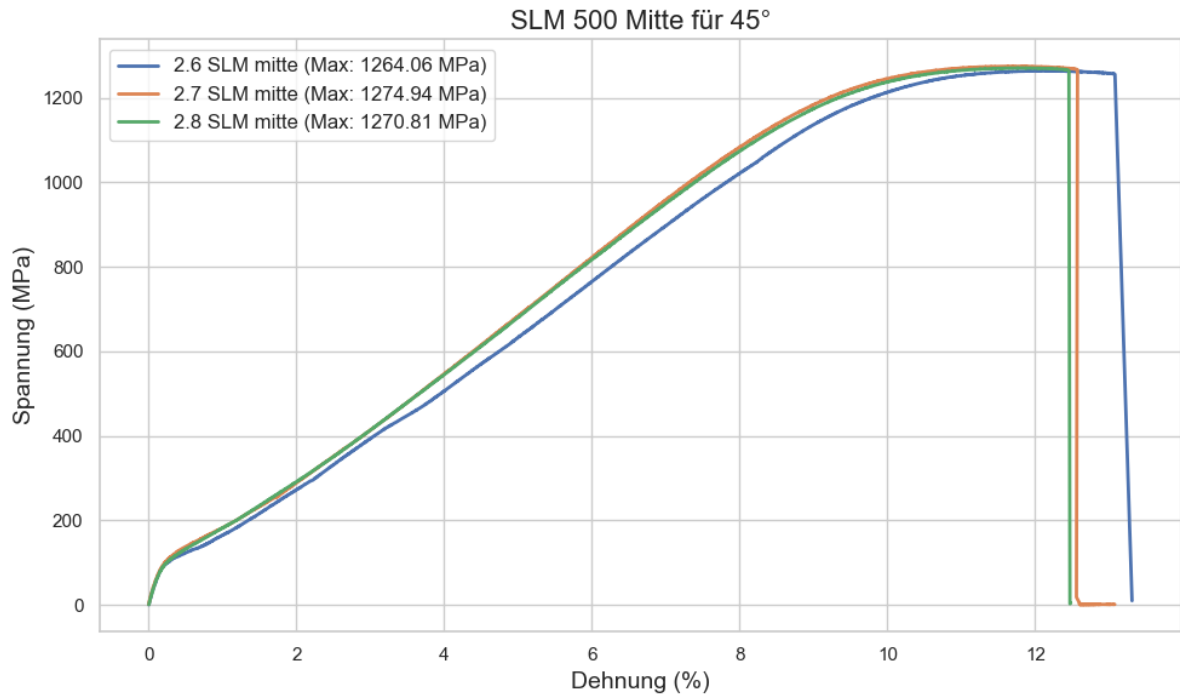
Abbildung 4.5: Mittlere maximale Zugspannung für 0°.

Die 45° Zugproben der TruPrint 1000 brachen bis auf Probe 2.2 und mProbe 2.3 im zulässigen Bereich. Beide Graphen weisen einen sehr ähnlichen Verlauf auf und erreichen einen annähernd gleichen maximalen Zugspannungswert  $R_m$ . Die durchschnittliche Bruchdehnung der beiden Proben lag bei etwa 10,6 %, was etwa 19,8 % weniger gegenüber der SLM 500 mitte und etwa 6,3 % mehr gegenüber der SLM 500 unten in gleicher Orientierung ist. Die durchschnittliche maximale Zugspannung beträgt 1189,01 MPa, was etwa 6,8 % weniger gegenüber der SLM 500 mitte und etwa 6,6 % weniger gegenüber der SLM 500 unten in gleicher Orientierung ist.



**Abbildung 4.6:** Spannungs-Dehnungs Diagramm TruPrint 1000 für 45°.

Die 45° Zugproben der SLM 500 in mittlerer Bauplattenposition brachen mit Ausnahme von Probe 2.5 (SLM mitte) alle im zulässigen Bereich. Alle Kurven weisen annähernd den gleichen Spannungs-Dehnungs-Verlauf auf, mit Ausnahme der Dehnung bei Probe 2.6, was wieder auf ein Rutschen der Probe hindeuten kann. Ansonsten beträgt die Bruchdehnung annähernd den selben Wert wie bei den 0° Proben der SLM 500 in gleicher Bauplattenposition mit etwa 12,5 %. Die durchschnittliche maximale Zugspannung  $R_m$  der Proben beträgt etwa 1270 MPa, was etwa 0,5 % mehr als bei den 0° Proben in gleicher Bauplattenposition beträgt. Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf ist in Abbildung 4.7 dargestellt.



**Abbildung 4.7:** Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM 500 Mitte für 45°.

Die 45° Zugproben der SLM 500 in unterer Bauplattenposition brachen alle im zulässigen Bereich. Alle Kurven weisen annähernd den gleichen Spannungs-Dehnungs-Verlauf auf, mit etwas veringertem Bruchdehnung bei Probe 2.8 (SLM unten). Die Bruchdehnung beträgt annähernd den selben Wert wie bei den 0° Proben der SLM 500 in gleicher Bauplattenposition mit durchschnittlich etwa 10 %. Genau wie bei den 0° Proben in gleicher Bauplattenposition treten hier zwischen 1100 MPa und 1200 MPa kurzzeitige Spannungsreduzierungen im annähernd selben Dehnungs-bereich zwischen 6 % und 8 % vor. Ein weiterer Effekt, der ebenfalls bei den 0° Proben auftrat, ist ein kurzzeitiger sprunghafter Anstieg der Spannung bei einer Dehnung von etwa 4,5 % bzw. zwischen 600 MPa und 800 MPa. Danach verläuft der Graph wieder mit annähernd gleicher Steigung wie zuvor, bis die kurzzeitigen Spannungsreduzierungen stattfinden. Die durchschnittliche maximale Zugspannung  $R_m$  der Proben beträgt etwa 1268 MPa, was etwa 1,4 % weniger als bei den 0° Proben in gleicher Bauplattenposition beträgt. Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

Die 45° Proben in mittlerer Bauplattenposition wiesen insgesamt anders als bei den 0° Proben die größte maximale Zugfestigkeit  $R_m$ . Jedoch weicht diese mit 0,1 % nur unsignifikant von den SLM Proben am unteren Rand ab. Die Steigerung der maximalen Zugspannung  $R_m$  in der 45° Versuchsreihe beträgt im Vergleich zur TruPrint 1000 für 45° um 6,8 % mehr, wie in Abbildung 4.9 ersichtlich.

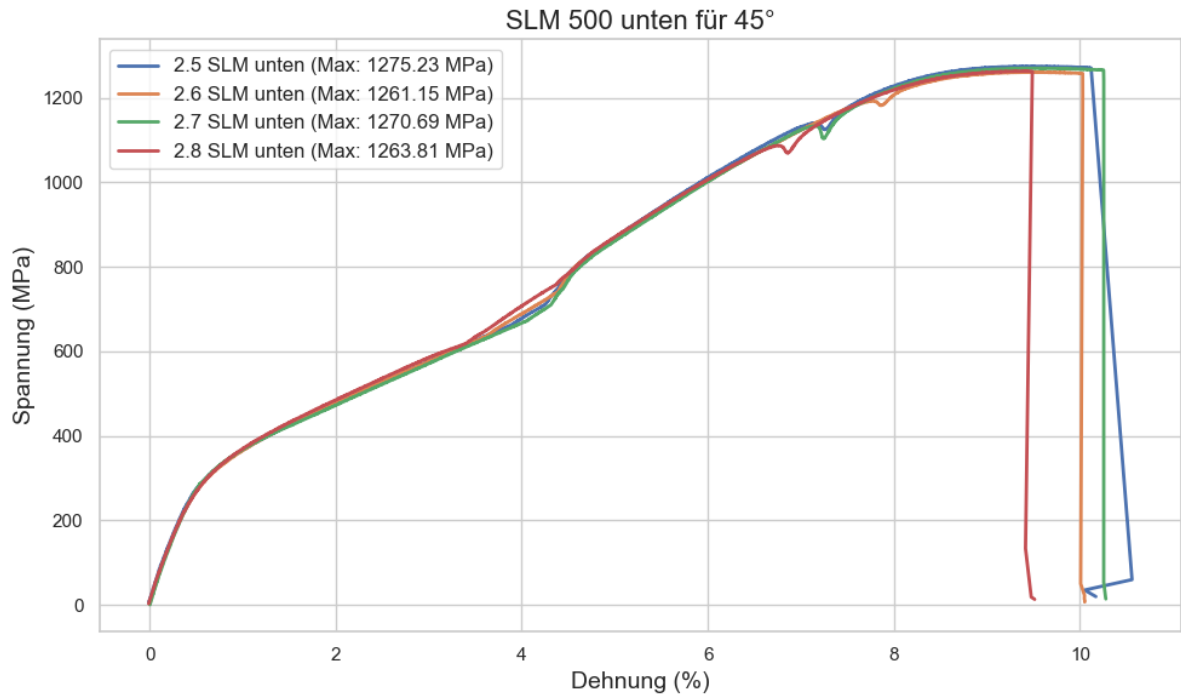


Abbildung 4.8: Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM 500 unten für 45°.

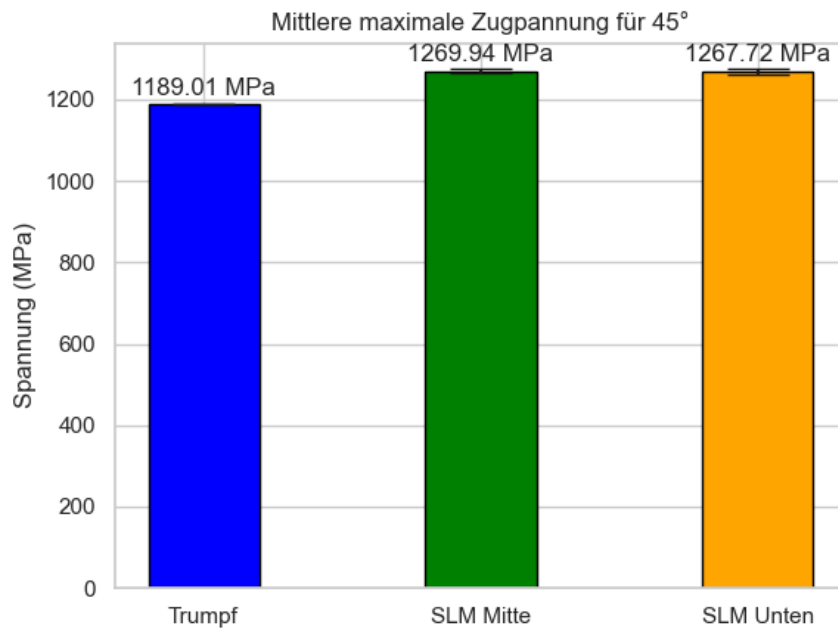
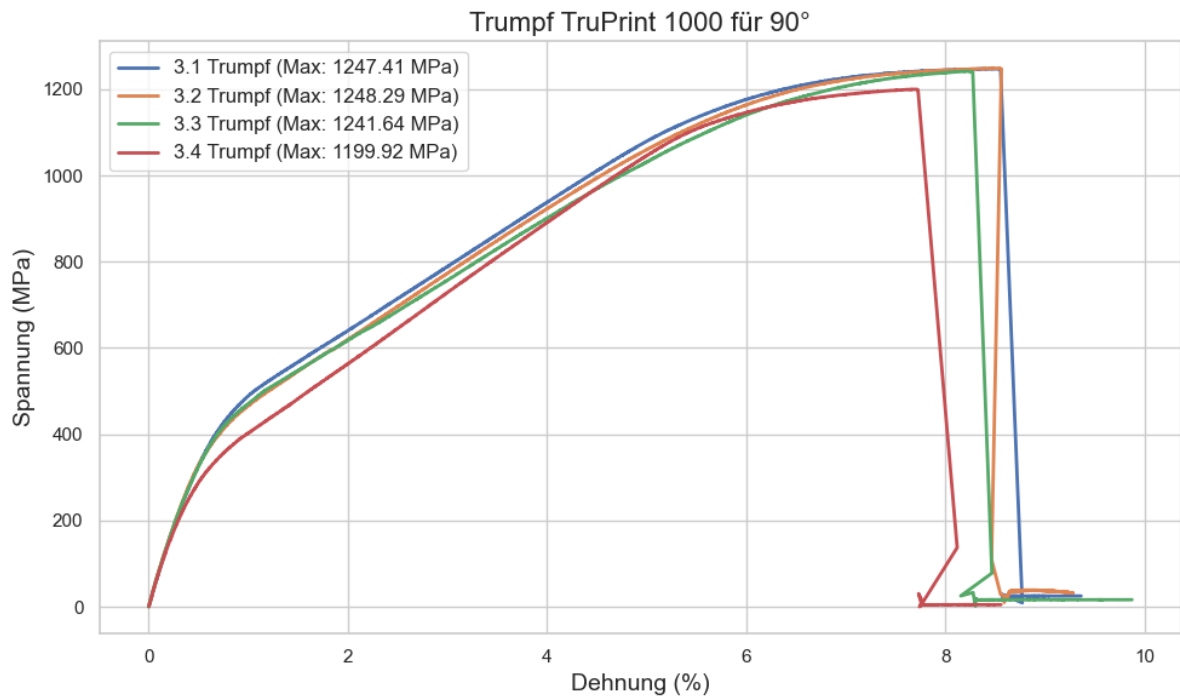


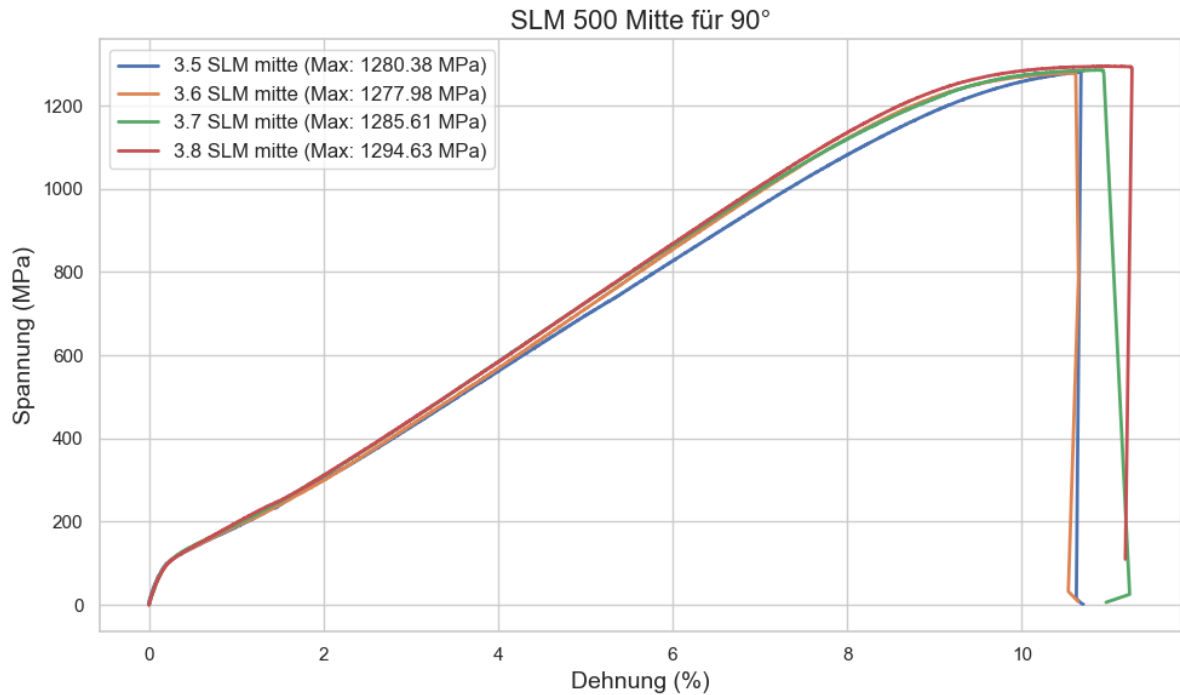
Abbildung 4.9: Mittlere maximale Zugspannung für 45°.

Die 90° Zugproben der TruPrint 1000 brachen alle im zulässigen Bereich. Alle Kurven weisen annähernd den gleichen Spannungs-Dehnungs-Verlauf auf, mit Ausnahme eines negativen Spannungsversatzes von etwa 3,5 % bei Probe 3.4. Die durchschnittliche maximale Zugspannung  $R_m$  der Proben beträgt etwa 1234 MPa, was etwa 5 % mehr als bei den Trumpf 0° Proben und etwa 3,8 % mehr bei den 45° Proben in gleicher Bauplattenposition beträgt. Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf ist in Abbildung 4.10 dargestellt.



**Abbildung 4.10:** Spannungs-Dehnungs Diagramm TruPrint 1000 für 90°.

Bei den 90° Zugproben der SLM 500 in mittlerer Bauplattenposition brachen alle Proben im zulässigen Bereich. Alle Kurven weisen annähernd den gleichen Spannungs-Dehnungs-Verlauf auf ohne Unregelmäßigkeiten. Die durchschnittliche maximale Zugspannung  $R_m$  der SLM Mitte Proben beträgt etwa 1285 MPa, was etwa 1,7 % mehr als bei den 0° Proben und etwa 1,2 % mehr als bei den 45° Proben in gleicher Bauplattenposition beträgt. Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf ist in Abbildung 4.11 dargestellt.



**Abbildung 4.11:** Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM 500 Mitte für 90°.

Die 90° Zugproben der SLM 500 in unterer Bauplattenposition brachen mit Ausnahme von Probe 3.7 und Probe 3.8 (SLM Rand) im zulässigen Bereich. Die Kurven weisen annähernd den gleichen Spannungs-Dehnungs-Verlauf auf, mit etwas veringertem Bruchdehnung bei Probe 3.5 (SLM Rand). Genau wie bei den 0° und 45° Proben in gleicher Bauplattenposition treten hier zwischen 1100 MPa und 1200 MPa kurzzeitige Spannungsreduzierungen im annähernd selben Dehnungsbereich zwischen 6 % und 8 % auf. Des Weiteren ist ein kurzzeitiger sprunghafter Anstieg der Spannung bei einer Dehnung von etwa 4 % bzw. zwischen 700 MPa und 900 MPa. Danach verläuft der Graph wieder mit annähernd gleicher Steigung wie zuvor, bis die kurzzeitigen Spannungsreduzierungen stattfinden. Die durchschnittliche maximale Zugspannung  $R_m$  der SLM Rand Proben beträgt etwa 1316 MPa, was etwa 2,4 % mehr als bei den 0° Proben und etwa 3,8 % mehr als bei den 45° Proben in gleicher Bauplattenposition beträgt. Des Weiteren war dies die maximal erreichte Zugspannung in der gesamten Versuchsreihe. Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf ist in Abbildung 4.12 dargestellt.



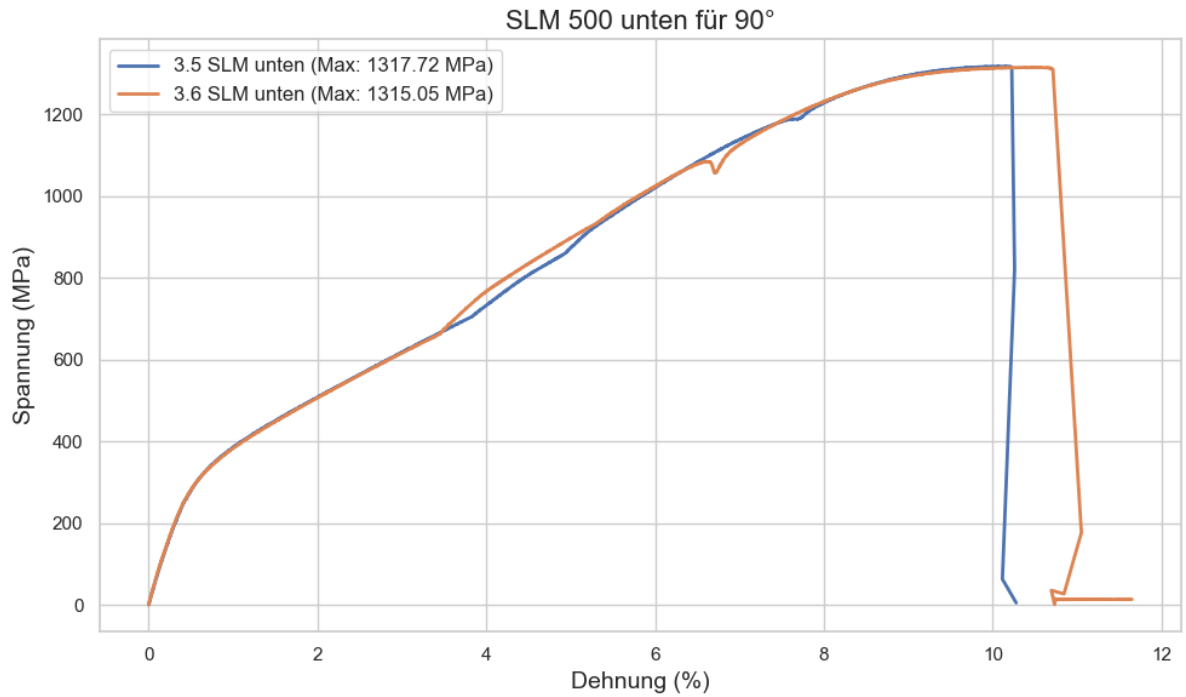


Abbildung 4.12: Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM 500 unten für 90°.

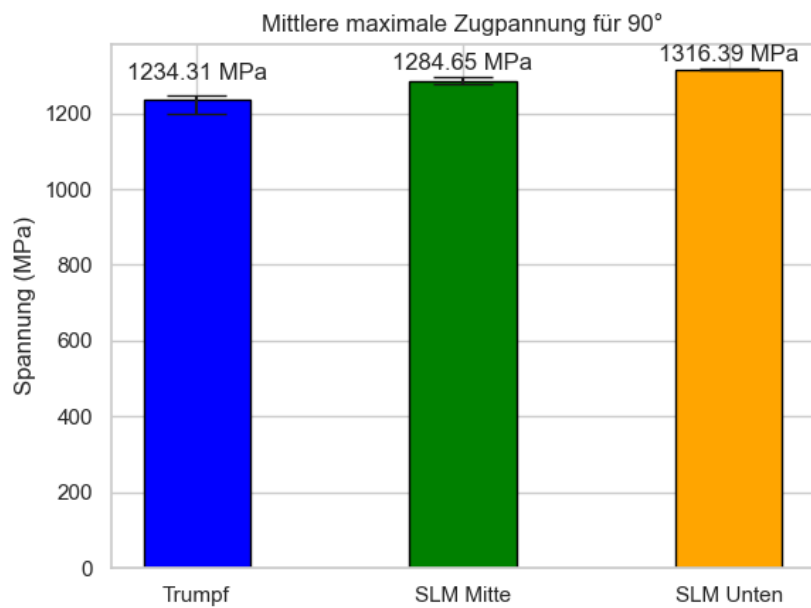


Abbildung 4.13: Mittlere maximale Zugspannung für 90°.

In Tabelle 4.1 wurde die durchschnittliche Abweichung je Orientierung berechnet. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine Änderung der Orientierung ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) bei allen Maschinen einen signifikanten Einfluss auf die maximale Zugfestigkeit  $R_m$  aufweist. Die größte Abweichung trat bei der TruPrint 1000 auf mit maximalen Zugspannungsabweichungen von bis zu  $\pm 5,3\%$ . Bei der SLM 500 in unterer Bauplattenposition traten je nach Orientierung Abweichungen von bis zu  $\pm 3,8\%$  auf. Die geringsten Abweichungen wurden bei der SLM 500 in mittlerer Bauplattenposition ermittelt, die einem Wert von etwa  $\pm 1,7\%$  entsprachen. Das Verhältnis vom kleinst gemessenem Wert (TruPrint 1000 für  $0^\circ$ ) zum größten gemessenem Wert (SLM 500 unten für  $90^\circ$ ) beträgt ganze  $12,4\%$ . Insgesamt ist festzuhalten, dass die maximalen Zugspannungswerte  $R_m$  bei allen Maschinen in einer vertikalen  $90^\circ$  Orientierung erreicht wurden. Jedoch traten bei allen Proben, die auf der SLM 500 in unterer Position gebaut wurden Ungleichmäßigkeiten im Spannungs-Dehnungsverlauf auf, die insgesamt im Vergleich zur mittleren Bauplattenorientierung eine verminderte Bruchdehnung von etwa  $19\%$  aufwiesen (bezieht sich auf den Vergleich der Bruchdehnung von SLM mitte zu SLM unten).

**Tabelle 4.1:** Vergleich der mittleren maximalen Zugspannung  $R_m$  nach Maschine und Orientierung.

Maschine	$R_m 0^\circ$ [MPa]	$R_m 45^\circ$ [MPa]	$R_m 90^\circ$ [MPa]
	<b>1171.62</b>	+1.4 %	+5.3 %
TruPrint 1000		<b>1189.01</b>	+3.8 %
			<b>1234.31</b>
	<b>1263.62</b>	+0.5 %	+1.7 %
SLM 500 Mitte		<b>1269.94</b>	+1.2 %
			<b>1284.65</b>
	<b>1285.45</b>	-1.4 %	+2.4 %
SLM 500 unten		<b>1267.72</b>	+3.8 %
			<b>1316.39</b>

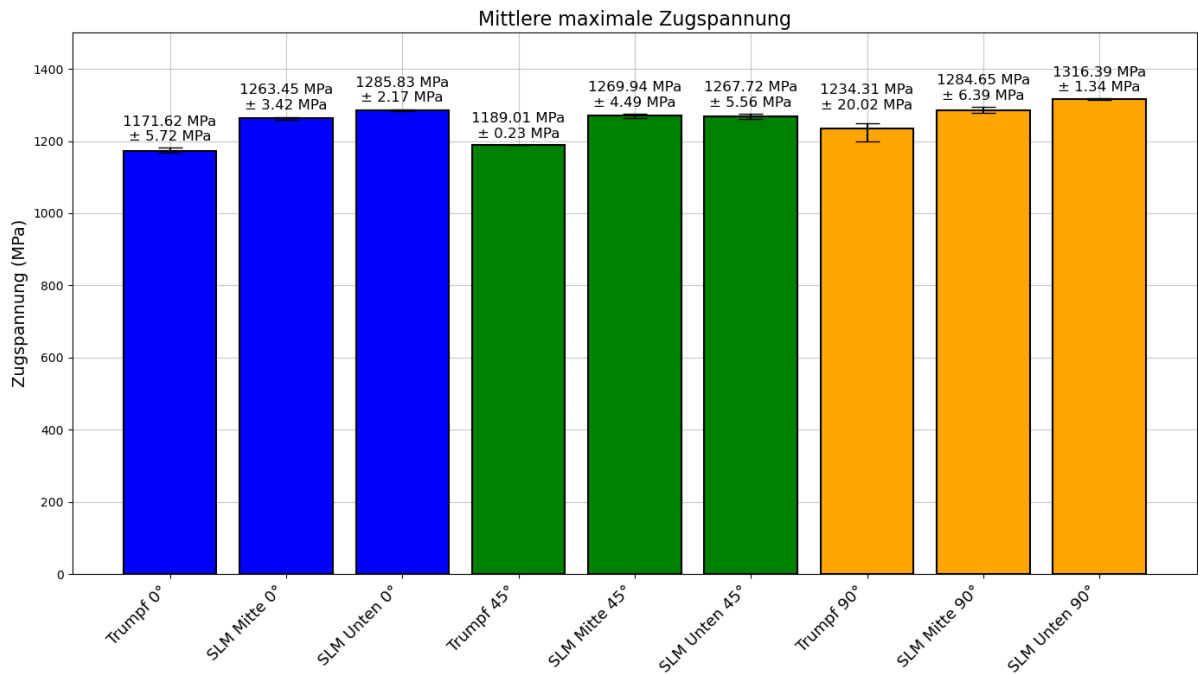


Abbildung 4.14: Mittlere maximale Zugspannung je Maschine und Orientierung.

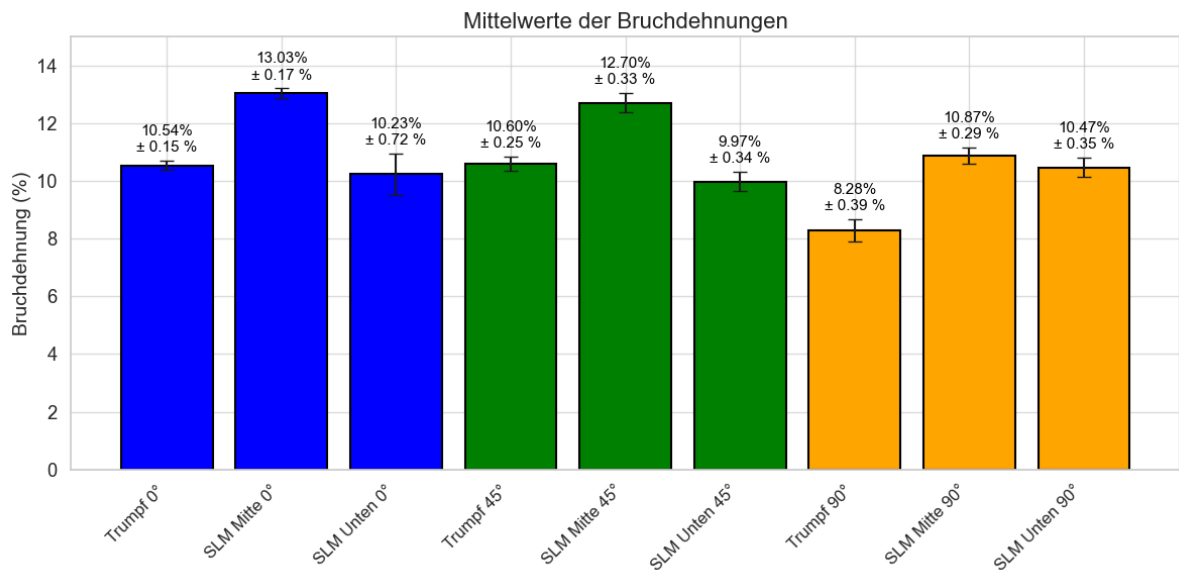


Abbildung 4.15: Mittlere Bruchdehnung je Maschine und Orientierung.

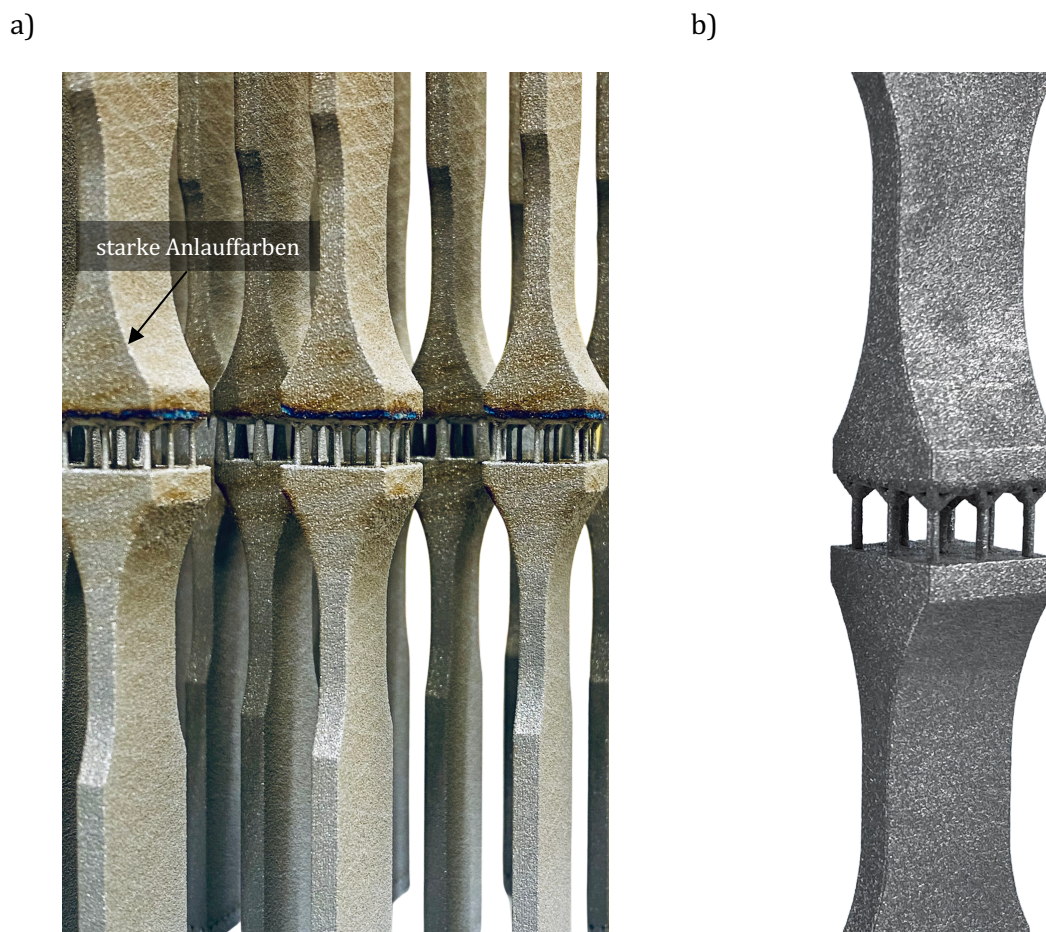
Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften hat gezeigt, dass die Proben mehrheitlich im erwarteten Bereich brachen und eine signifikante Freisetzung thermischer Energie beim Bruch aufwiesen. Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme verdeutlichen eine sehr gute Reproduzierbarkeit und einen steilen, dann annähernd linearen Spannungsanstieg bis zum Bruch. Die Ergebnisse unterstreichen den deutlichen Einfluss der Probenorientierung auf die maximale Zugspannung  $R_m$ , mit den höchsten Werten bei einer 90° Orientierung. Besonders bei der TruPrint 1000 zeigten sich größere Abweichungen in der Zugspannung, während Proben von der SLM 500 in unterer Position Ungleichmäßigkeiten im Spannungs-Dehnungsverlauf aufwiesen.

In der Untersuchung zur Porosität von hergestellten Ti-6Al-4V Grade 23 Dichtewürfeln wurden drei unterschiedliche Proben analysiert, um die vorherigen Ergebnisse der Zugproben besser einordnen zu können. Die ersten Proben, die am Rand der SLM 500 gefertigt wurden, zeigten eine durchschnittliche Porosität von 0,089 %. Diese Porenflächen wurden mit  $0,034 \text{ mm}^2$  gemessen, während die Gesamtaufnahmefläche der Proben  $37,830 \text{ mm}^2$  betrug. Die zweiten Proben, gefertigt in der Mitte der SLM 500 Bauplattform, wiesen eine signifikant geringere Porosität von durchschnittlich 0,013 % auf, mit Poren, die eine Fläche von  $0,0049 \text{ mm}^2$  einnahmen. Dies deutet darauf hin, dass die zentrale Positionierung innerhalb des Bauraums zu einer verringerten Porosität führen kann. Im Gegensatz dazu zeigten die dritten Proben, hergestellt auf einer TruPrint 1000, eine deutlich höhere Porosität von durchschnittlich 0,26 %. Die Flächen der Poren betragen hier  $0,26 \text{ mm}^2$  bei einer Gesamtfläche von  $105,251 \text{ mm}^2$ .

## 4.2 Mechanische Eigenschaften der Stützstrukturen

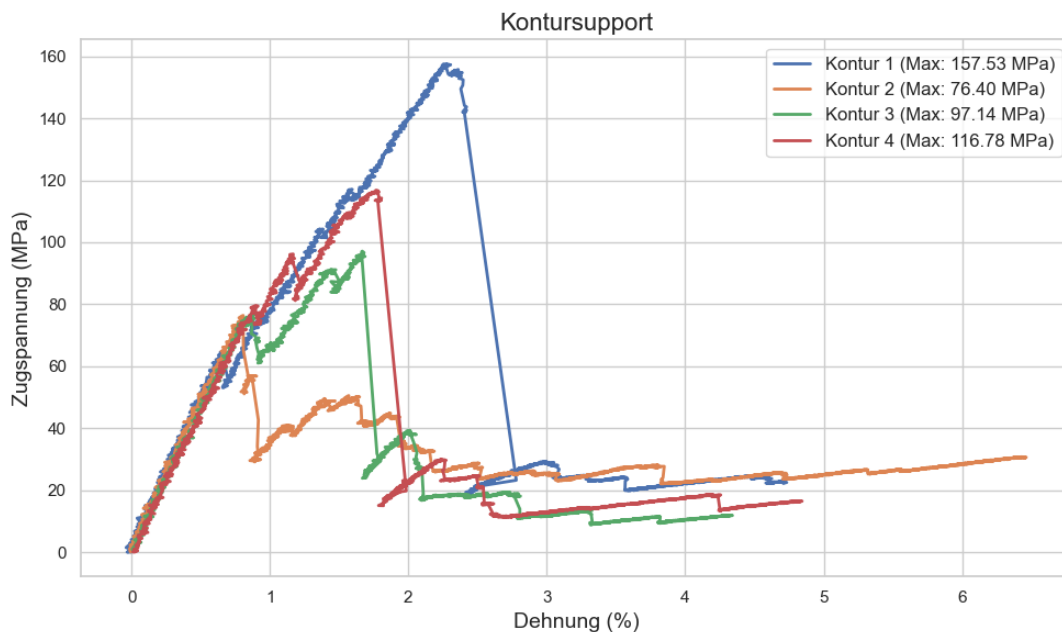
Nach Abschluss des Bauprozesses und der Entfernung des Pulvers zeigten sich bei den ersten Zugproben mit Supports deutliche Auswirkungen der Stützstrukturen auf den oberen Teil der Zugprobe. Insbesondere fällt eine deutliche Verfärbung der Titanoberfläche auf, die besonders an den äußeren Kanten zwischen Stützstruktur und dem oberen Teil der Zugprobe mit blauen Farbtönen zu beobachten ist. Der restliche obere Teil weist hingegen gelbliche Verfärbungen auf. Bemerkenswert ist, dass das Ausmaß der dunkelblauen Oxidschichten bei der Baumstützstruktur am größten ist. An den übrigen Verbindungsflächen der Stützstrukturen waren keine sichtbaren Anzeichen von Verfärbungen zu erkennen. Eine weitere nennenswerte Beobachtung, waren die hohen Eigenspannungen des oberen Teils der Zugprobe. Alle Stützstrukturen hielten diesen Eigenspannungen stand, jedoch machten sich diese vor allem bei den Baumsupports während des Abkühlens durch ein Spannungsknacken bemerkbar. Sichtbare Brüche waren jedoch nicht zu erkennen.

Bei der zweiten Serie von Proben mit Adaptereinspannung und veränderten Slicing-Parametern, traten keine sichtbaren Verfärbungen an den Kanten des Downskins auf (siehe Abbildung 4.16b).



**Abbildung 4.16:** starke Anlauffarben nach dem Fertigungsprozess in a), keine sichtbaren Anlauffarben bei Proben mit veränderten Slicing-Parametern in b).

Die Zugprüfungen des ersten Satzes der Proben ohne die Adaptereinspannung lieferten keine aussagekräftigen Versuchsergebnisse. Wie vermutet, traten beim Einspannen der Proben schon so starke Kräfte auf, dass die Stützstrukturen dieser Belastung nicht standhielten. Dadurch brachen sie schon teilweise beim Einspannen und konnten somit keine repräsentativen Ergebnisse liefern. Des Weiteren bestand das Problem, dass die Stützstrukturen nicht alle gleichzeitig brachen, sondern sich im Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Messungen treppenstufenartige, ungleichmäßige Verläufe ergaben. In Abbildung 4.17 ist exemplarisch das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Kontursupports dargestellt. Es sind eindeutig die ungleichmäßigen Brüche zu erkennen, die für einen weiteren Verlauf der Untersuchung als ungeeignet eingestuft wurden. Aus diesem Grund werden nachfolgend die Ergebnisse der Support-Zugproben mit Adaptereinspannung behandelt, die deutlich repräsentativere Ergebnisse lieferten (siehe Abbildung 4.18).



**Abbildung 4.17:** Treppenstufenartiger Verlauf aufgrund ungleichmäßiger Brüche der Supportstruktur (exemplarisch für Kontursupport).

Während der Zugprüfung des zweiten Satzes mit Adaptereinspannung trat der Bruch aufgrund des Supportdesigns an der oberen Verbindung zwischen Stützstruktur und Zugprobe auf. Proben, die an anderen Stellen brachen wurden der Auswertung entfernt. Nach Erreichen eines spezifischen Zugkraftwerts zeigte sich in allen Versuchen eine nahezu lineare Beziehung zwischen Kraft und Verschiebung bis zum Versagen. Die Spannungs-Dehnungsverläufe verlaufen wesentlich gleichmäßiger als bei dem ersten Probensatz. Bei mikroskopischen Untersuchungen der Bruchflächen wurde festgestellt, dass die Geometrien der Stützstrukturen signifikant von den Sollwerten abwichen. Für die Länge und Breite von jeweils 5 Zähnen/Anbindungsflächen wurden Mittelwerte berechnet und in Tabelle 4.2 aufgeführt. Es zeigte sich, dass die Zahnängen und Radien von ihren Sollwerten abwichen. Dies ist wichtig für die tatsächliche Berechnung der Zugspannung.

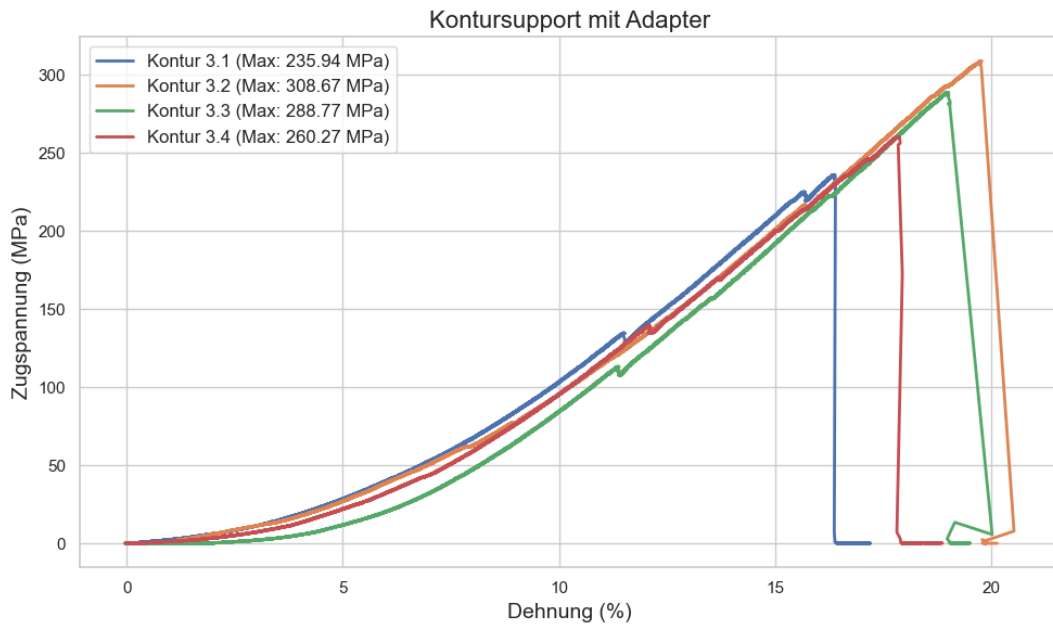
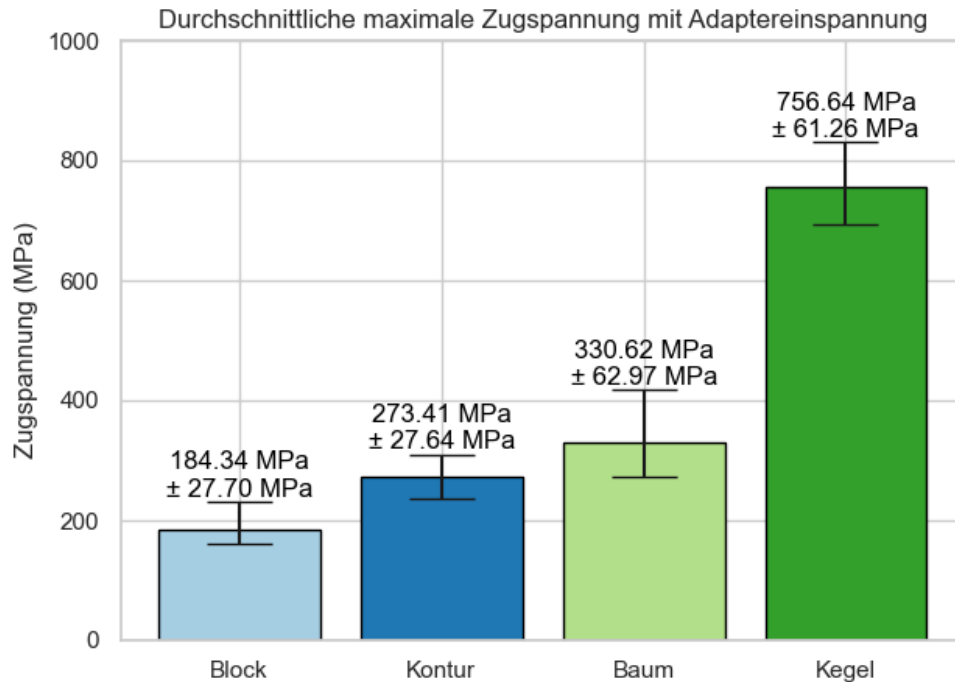


Abbildung 4.18: Gleichmäßiger Verlauf mit Adaptereinspannung (exemplarisch für Kontursupport).

Tabelle 4.2: Supportgeometrien.

Typ	Sollwert	Istwert	Sollwert	Istwert
	Toplänge Zähne/Radius	Toplänge Zähne/Radius	Zähne Breite	Zähne Breite
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Blocksupport	0.5	0.596	0.080	0.096
Kontursupport	1	1.094	0.080	0.097
Kegelsupport	0,6	0.641	/	/
Baumsupport	0,4	0.41	/	/

Abschließend wurde die maximale Zugfestigkeit der Stützstruktur anhand der Ergebnisse berechnet (siehe Abbildung 4.19). Hierbei wurde die Dehnung nicht weiter beachtet, da die gemessene Dehnung den gesamten Bereich der Zugprobe entspricht und nicht nur dem Teil der Stützstrukturen. Des Weiteren bestanden beim Einspannen der Proben aufgrund des Adapters Freiheitsgerade in positive und negative Z-Richtung, weswegen die Längenänderung nicht repräsentativ ist. Es sei zusätzlich darauf hingewiesen, dass der Bruch aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten der Maschine und unebenen Bruchflächen nicht gleichzeitig an allen Kontaktflächen auftritt, wodurch die ermittelte Zugfestigkeit wahrscheinlich nicht mit der Tatsächlichen übereinstimmt, jedoch als eine gute Näherung betrachtet werden kann.



**Abbildung 4.19:** Durchschnittliche maximale Zugspannung mit Adaptereinspannung.

Es ist deutlich zu erkennen, dass Block-, Kontur- und Baumsupport eine deutlich verminderte Festigkeit im Vergleich zu den Kegelsupports aufweisen. Durchschnittlich ergab sich für den Blocksupport eine maximale Zugspannung von 184,34 MPa ( $\pm 27,70$  MPa), für den Kontursupport 273,41 MPa ( $\pm 27,64$  MPa) und für den Baumsupport 330,62 MPa ( $\pm 62,97$  MPa). Der Kegelsupport wies eine deutlich höhere Zugspannung von 756,64 MPa ( $\pm 61,26$  MPa) auf, welches mehr als dem Vierfachen der Zugspannung des Blocksupports entspricht. Die durchschnittliche Festigkeit der Versuchsreihe für Block-, Kontur- und Baumsupport beträgt 262,33 MPa, etwa ein fünftel des in Versuch 1 ermittelten Werts für Vollmaterial (90° Proben Mitte). Für den Kegelsupport entspricht dieser Wert nahezu der Hälfte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die erste Serie von Zugproben mit Supports deutliche Verfärbungen auf der Titanoberfläche aufwies, besonders ausgeprägt bei der Baumsstützstruktur. Trotz der hohen Eigenspannungen in den Proben blieben die Stützstrukturen intakt, wobei bei den Baumsupports ein Spannungsknacken während des Abkühlens beobachtet wurde. Im Gegensatz dazu wiesen die Proben der zweiten Serie, die mit Adaptereinspannung und veränderten Slicing-Parametern hergestellt wurden, keine sichtbaren Verfärbungen auf. Die Zugprüfungen des ersten Probensatzes ergaben ungleichmäßige Brüche und waren für aussagekräftige Ergebnisse nicht geeignet. Der zweite Satz hingegen lieferte gleichmäßigere Spannungs-Dehnungsverläufe und zeigte repräsentativere Ergebnisse. Bei der mikroskopischen Untersuchung der Bruchflächen dieser Serie wurden signifikante Abweichungen von den Sollwerten der Stützstrukturen festgestellt. Die abschließende Berechnung der maximalen Zugfestigkeit der Stützstruktur ergab, dass Block-, Kontur- und Baumsupport ähnlich niedrige Zugspannungen aufwiesen, während der Kegelsupport eine deutlich höhere Zugspannung aufnehmen konnte, jedoch einen Bruchteil im Vergleich zu den Ergebnissen aus Versuch 1 für Vollmaterial.



### 4.3 Oberflächenqualität der Stützstrukturen

Nach dem Vermessen der Oberflächenrauigkeiten  $S_a$  wurde zunächst eine Korrelationsmatrix von den Parametern des gesamten Versuchs erstellt, um sich einen groben Überblick über mögliche Korrelationen der Parameter zu verschaffen (Abbildung 4.20). Dies soll dazu dienen die Analyse strukturiert auf einzelne Parameter zu fokussieren. Die Korrelationsmatrix ist eine quadratische Matrix, bei der jede Zelle den Korrelationskoeffizienten zwischen zwei Variablen darstellt. Positive Werte deuten auf positive Korrelationen hin, negative Werte auf negative Korrelationen. Werte nahe bei 0 zeigen an, dass keine signifikante Korrelation vorliegt. Die Korrelationskoeffizienten  $r$  wurden mittels Formel 4.1 nach Pearson berechnet. [35]

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{(n \sum x^2 - (\sum x)^2)(n \sum y^2 - (\sum y)^2)}} \quad (4.1)$$

Die Parameter *Körper* (d.h. die Anzahl der Kontaktflächen zwischen Support und Downskin) und *Anbindungsfläche* (d.h. der Flächeninhalt der Kontakte zwischen Support und Downskin), die sich aus *Hatch/Abstand* und *Zähne Toplänge/Radius* ergeben, wurden der Korrelationsmatrix hinzugefügt. Dies soll dazu dienen zu verstehen, wie die Größenverhältnisse und die Gesamtfläche der Supportstrukturen die Qualität der Downskin-Oberfläche beeinflussen. Durch Hinzufügen dieser spezifischen Parameter ist es möglich, direkte Rückschlüsse auf das Zusammenspiel von Supportdichte und -fläche mit der Endbeschaffenheit der Oberfläche zu ziehen.

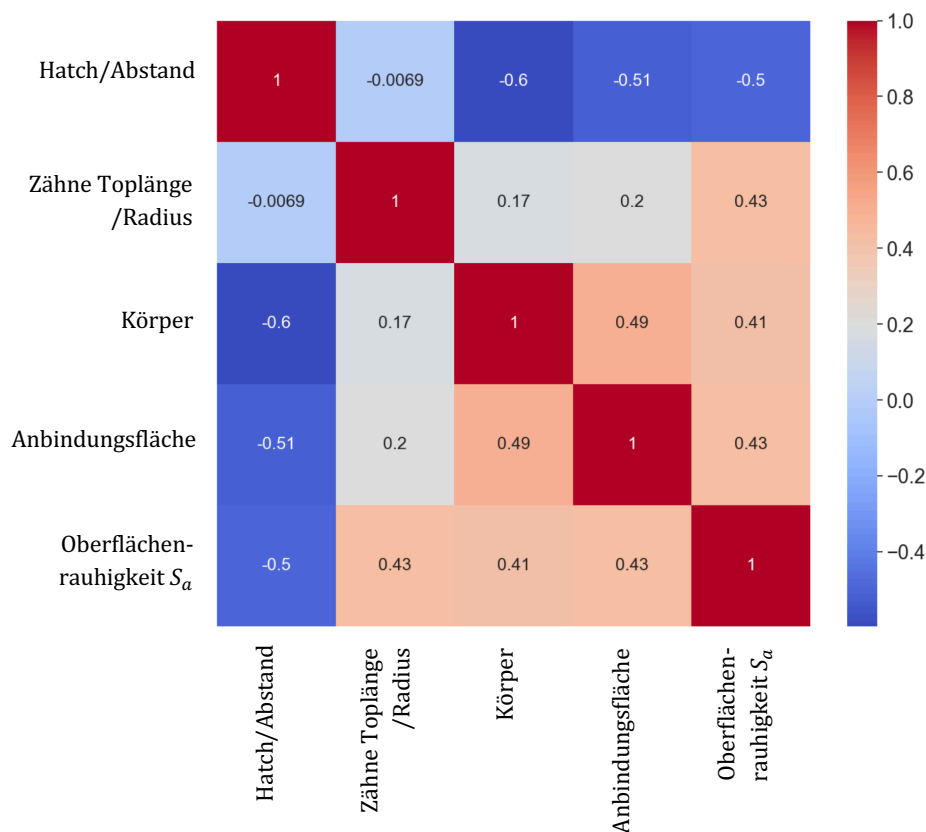


Abbildung 4.20: Heatmap der Korrelationsmatrix.

Der Parameter *Hatch/Abstand* weist eine stark negative Korrelation von -0,6 mit der Anzahl an *Körpern* und von -0,51 mit der *Anbindungsfläche* auf und lässt sich dadurch erklären, dass sich diese Parameter direkt durch *Hatch/Abstand* ergeben. Keine, bzw. eine gegen Null laufende Korrelation von -0,0069 besteht im Zusammenhang mit *Zähne Toplänge/Radius*. Dieses lässt sich dadurch erklären, dass die Parameter unabhängig voneinander eingestellt werden können. Interessant hierbei ist eine stark negative Korrelation von -0,5 mit der gemessenen *Oberflächenrauigkeit*  $S_a$ . Der negative Koeffizientenfaktor  $r$  gibt an, dass je größer der *Hatch/Abstand* der Supportstrukturen wird, die Oberflächenrauigkeit im untersuchten Parameterbereich sinkt, also sich die Oberflächenflächenqualität verbessert. Ein ähnliches Phänomen ist zwischen *Zähne Toplänge/Radius* und der Oberflächenrauigkeit zu beobachten. Jedoch diesmal mit positivem Koeffizientenfaktor. Das bedeutet je größer die Toplänge der Zähne, bzw. der Radius wird, desto größer wird auch die Oberflächenrauigkeit  $S_a$  (was eine Verschlechterung der Oberflächenqualität bedeutet). Weiterhin ist eine positive Korrelation zwischen *Körper* und *Anbindungsfläche* mit der *Oberflächenrauigkeit*  $S_a$  zu sehen, dessen Ursache der bereits erläuterte Zusammenhang zwischen *Körper* und *Anbindungsfläche* mit *Hatch/Abstand* und *Zähne Toplänge/Radius* ist.

Nach Analyse der Korrelationsmatrix ist zunächst festzuhalten, dass im untersuchten Parameterraum eine Vergrößerung des *Hatch/Abstands* eine Verbesserung der Oberflächenqualität hervorruft. Eine Vergrößerung der *Zähne Toplänge/* des *Radius* bewirkt hingegen eine Verschlechterung der Oberflächenqualität. Da die Berechnung jedoch zunächst auf alle Stützstrukturtypen gleichzeitig angewandt wurde, lässt sich zunächst nichts über die Signifikanz der Korrelation der einzelnen Strukturtypen auf die Oberflächenrauigkeit sagen. Denn möglicherweise Verhalten sich einige Supporttypen anders als Andere. Aus diesem Grund wurde die Korrelationsanalyse für jeden Supporttyp einzeln durchgeführt, um aussagekräftigere Ergebnisse zu liefern und eine Regression zu bestimmen. Da nur die Parameter *Hatch/Abstand* und *Zähne Toplänge/Radius* für die Supportstrukturen direkt eingestellt werden können, wurde sich im weiteren Verlauf der Analyse auf diese beiden Parameter fokussiert und die Signifikanz der Korrelation weiter untersucht.

In Abbildung 4.21 und Abbildung 4.22 wird der soeben beschriebene Zusammenhang zwischen *Hatch/Abstand* und *Zähne Toplänge/Radius* mit der Oberflächenrauigkeit deutlich. Je nach Supporttyp lassen sich signifikante Unterschiede erkennen. In Abbildung 4.21 ist deutlich zu erkennen, dass die Oberflächenrauigkeit  $S_a$  mit zunehmendem *Hatch/Abstand* bei allen Supports sinkt. Am ausgeprägtesten ist diese Änderung bei den Kegelsupports zu beobachten, da die lineare Regression dort die größte negative Steigung aufweist. Die niedrigste Steigung ist bei den Baumsupports zu erkennen, was bedeutet, dass eine Änderung des Abstands der Baumstämme in diesem Parameterraum tendenziell weniger Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit nimmt. Jedoch ist die Oberflächenrauheit  $S_a$  der Baumsupports bei variierenden Parametern annähernd gleich niedrig. Ähnliche Beobachtungen sind in Bezug auf Top Zahnlänge und Radius mit der Oberflächenrauigkeit zu erkennen (Abbildung 4.22). Der größte Effekt ist hier wieder bei den Kegelsupports zu erkennen und der niedrigste bei den Baumsupports. Die Steigung der linearen Regressionen von Block- und Kontursupports sind bei den gleichen Parametern annähernd gleich und ordnen sich zwischen denen der Kegel- und Baumsupports ein. Die niedrigste Oberflächenrauheit  $S_a$  in der gesamten Versuchsreihe wurde beim Kegelsupport mit  $51,016 \mu\text{m}$  gemessen (6 mm Abstand, 0,2 mm Radius). Die Höchste beim Blocksupport mit  $92,129 \mu\text{m}$  (0,5 mm Hatch, 1 mm Toplänge Zahn).

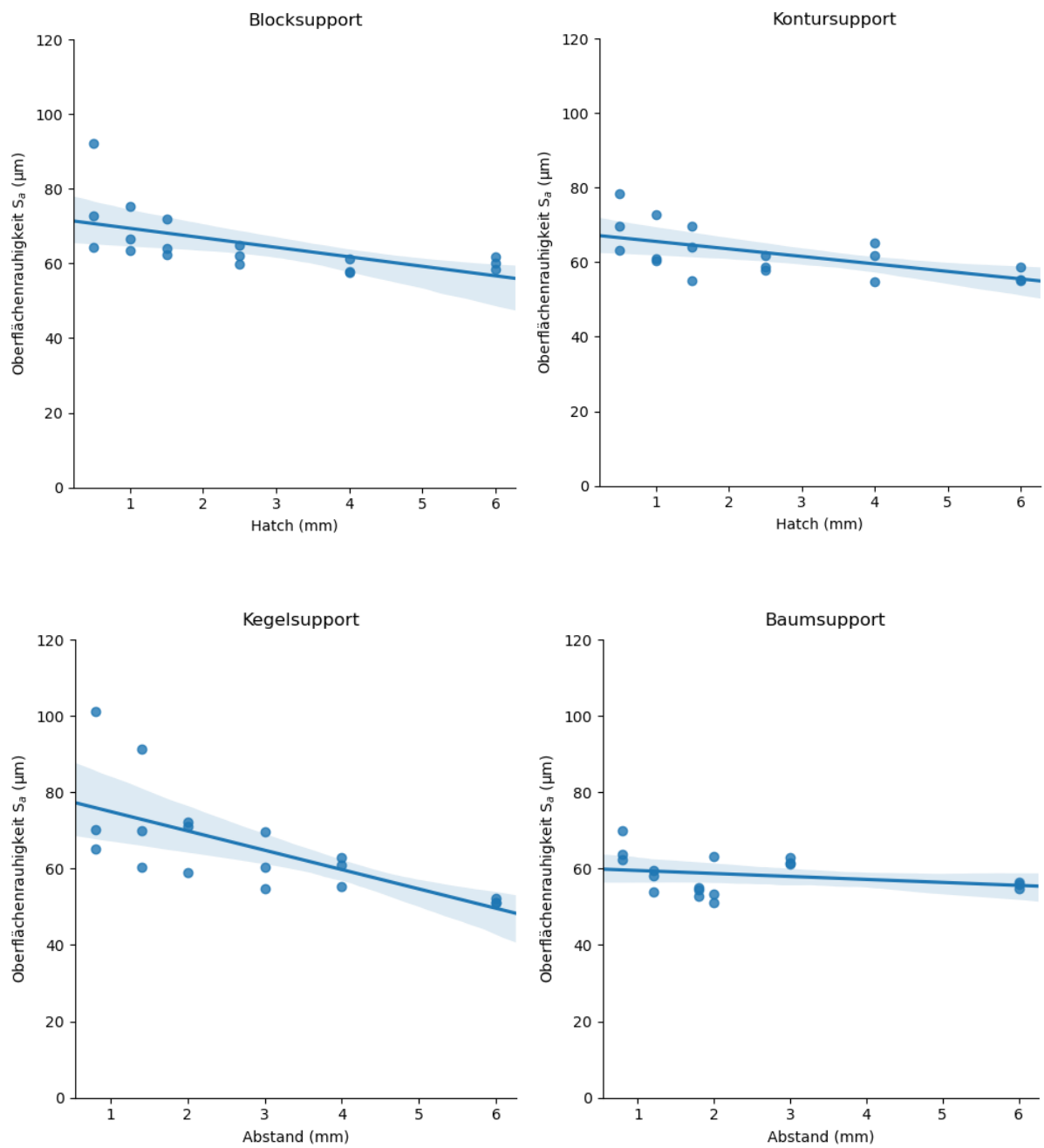
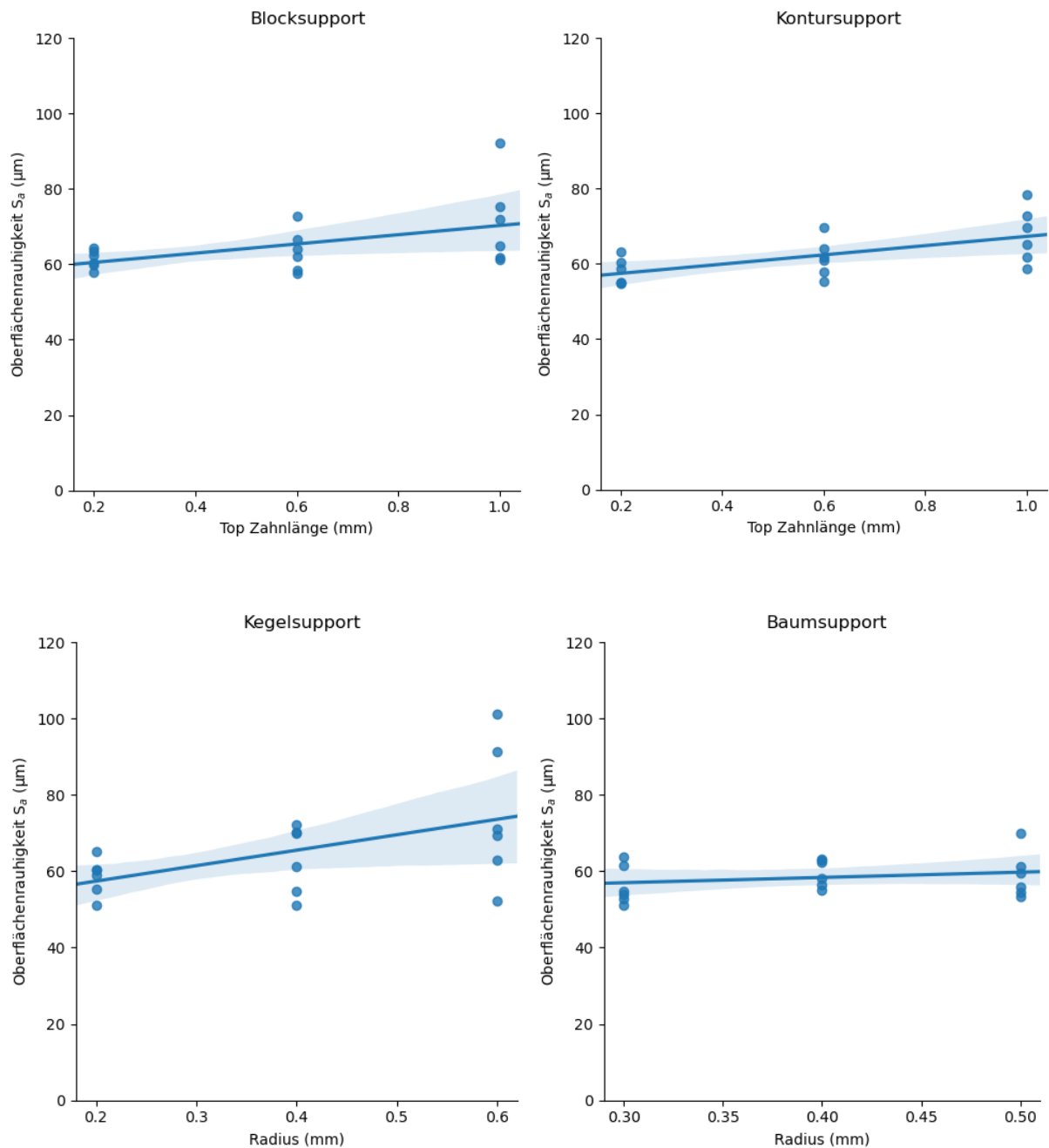


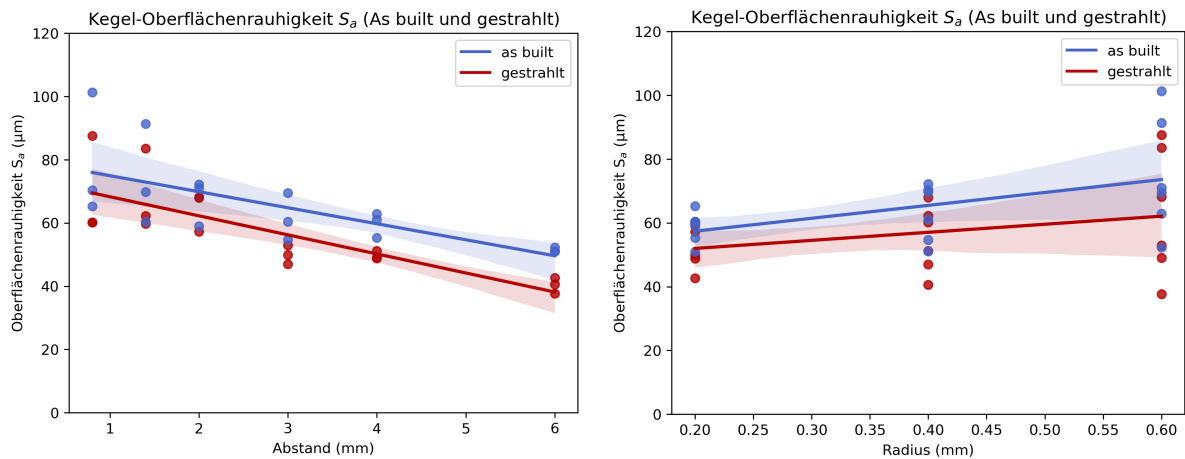
Abbildung 4.21: Oberflächenrauigkeit  $S_a$  über Hatch/Abstand für die verschiedenen Supporttypen.



**Abbildung 4.22:** Oberflächenrauigkeit  $S_a$  über Top Zahnlänge/Radius für die verschiedenen Supporttypen.

Um auszuschließen, dass anhaftendes Pulver an der Downskinoberfläche die Messungen verfälschen und gegebenenfalls unter dem anhaftendem Pulver eine andere Oberflächenrauigkeit  $S_a$  vorhanden ist, die sich nicht im Verlauf der Parametervariation mit den gemessenen Oberflächenrauigkeiten deckt, wurden exemplarisch die Plättchen vom Kegelsupport gestrahlt. Jedes Plättchen wurde fünf Sekunden mit einer Korngröße von 53-90  $\mu\text{m}$  gestrahlt und anschließend mit der selben Messmethode die Oberflächenrauigkeiten  $S_a$  gemessen. In Abbildung 4.23 ist ersichtlich, dass der Verlauf der Regressionslinie annähernd gleich ist. Die Regressionslinie der gestrahlten Plättchen (rot) ist im Mittel um etwa 10  $\mu\text{m}$  gesenkt, was auf das Strahlen und dem Entfernen von anhaftendem Pulver zurückzuführen ist, wodurch sich die

Oberflächenrauigkeit  $S_a$  leicht verbessert. Da die Steigung der Regressionslinien annähernd gleich sind, kann angenommen werden, dass anhaftendes Pulver die Messergebnisse im Parameterverlauf nicht verfälscht haben. Außerdem deutet der selbe Verlauf der Regressionsgerade auf eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse hin.



**Abbildung 4.23:** Vergleich der Oberflächenrauigkeit  $S_a$  zwischen „as built“-Zustand und gestrahlt für Kegelsupport.

Im weiteren Verlauf der Datenanalyse wurde eine ANOVA mittels OLS-Modell<sup>6</sup> in Python durchgeführt. Dabei wurden die unabhängigen Eingabeparameter zunächst in der Datenpräprozessierung standardisiert. Dies dient dazu die Variablen auf die gleiche Skala zu bringen, unabhängig von ihren ursprünglichen Einheiten und Parameterräumen. Des Weiteren kann eine ungleiche Skalierung der Variablen, insbesondere bei linearen Modellen, zu Instabilität führen. Die Standardisierung hilft dabei die Parameter *Hatch*, *Abstand*, *Top Zahnlänge*, *Radius* und die Koeffizienten des linearen Modells besser zu interpretieren und untereinander zu vergleichen. Danach wurden die Ausgabeparameter einer reziproken Transformation unterzogen, um nicht lineare Beziehungen zwischen Variablen besser zu modellieren und wie bereits in Kapitel 2.5.2 beschrieben das Problem der Heteroskedastizität<sup>7</sup> zu mildern. Anschließend wurde ein lineares Modell berechnet, dessen Ergebnisse in Tabelle 4.3 bis Tabelle 4.6 dargestellt sind. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse für den Blocksupport deuten darauf hin, dass das Modell eine gute Anpassung an die Messdaten hat, wie durch ein  $R^2$  von 0,770 und ein adjustiertes  $R^2$  von 0,721 angezeigt wird (siehe Tabelle 4.3). Ein  $R^2$  von 0,770 bedeutet, dass 77% der Variabilität in der abhängigen Variable durch das Modell erklärt wird, während das adjustierte  $R^2$  für die Anzahl der Prädiktoren im Modell korrigiert und somit eine konservativere Schätzung darstellt. Die hohe Übereinstimmung zwischen den Modellprognosen und den Messergebnissen ist in Abbildung 4.24 zu sehen.

<sup>6</sup> Ein Regressionsmodell, das verwendet wird, um die Beziehung zwischen einer oder mehreren unabhängigen Variablen (Prädiktoren) und einer abhängigen Variablen zu untersuchen.

<sup>7</sup> Heteroskedastizität bezeichnet in der Statistik in Regressionsanalysen, dass die Varianz der Fehlerterme über die Beobachtungen nicht konstant ist.

Das Modell mit folgender Formel erzielte den höchsten  $R^2$ -Wert und berücksichtigt zusätzlich mögliche Wechselwirkungen zwischen den unabhängigen Variablen:

$$\text{Oberflächenrauigkeit } S_a = q_0 + q_1 * x_1 + q_2 * x_2 + q_3 * (x_1 * x_2), \quad (4.2)$$

mit:

$x_1 = \text{Hatch/Abstand},$

$x_2 = \text{Zahn Toplänge/Radius},$

$q_0 = \text{Intercept},$

$q_1 = \text{Regressionskoeffizient für Hatch/Abstand},$

$q_2 = \text{Regressionskoeffizient für Zahn Toplänge/Radius},$

$q_3 = \text{Regressionskoeffizient für Wechselwirkung zwischen Hatch / Abstand und Zahn Toplänge / Radius.}$

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse für den Blocksupport deuten darauf hin, dass das Modell eine gute Anpassung an die Messdaten hat, wie durch ein  $R^2$  von 0,770 und ein adjustiertes  $R^2$  von 0,721 angezeigt wird (siehe Tabelle 4.3). Ein  $R^2$  von 0,770 bedeutet, dass 77 % der Variabilität in der abhängigen Variable durch das Modell erklärt wird, während das adjustierte  $R^2$  für die Anzahl der Prädiktoren im Modell korrigiert und somit eine konservativere Schätzung darstellt. Die hohe Übereinstimmung zwischen den Modellprognosen und den Messergebnissen ist in Abbildung 4.24 zu sehen.

**Tabelle 4.3:** Modellergebnisse für Blocksupport.

$R^2$ :	0,770			
Adj. $R^2$ :	0,721			
Term	p-Wert	Standardisierter Koeffizient	95 % CI unten	95 % CI oben
Intercept	< 0,0001	0,0158	0,015	0,016
Hatch	0,0009	0,0009	< 0,000	0,001
Zähne Toplänge	0,0016	-0,0007	-0,001	< -0,001
Hatch:Zähne Toplänge	0,0376	0,0004	2,44 <sup>-5</sup>	0,001

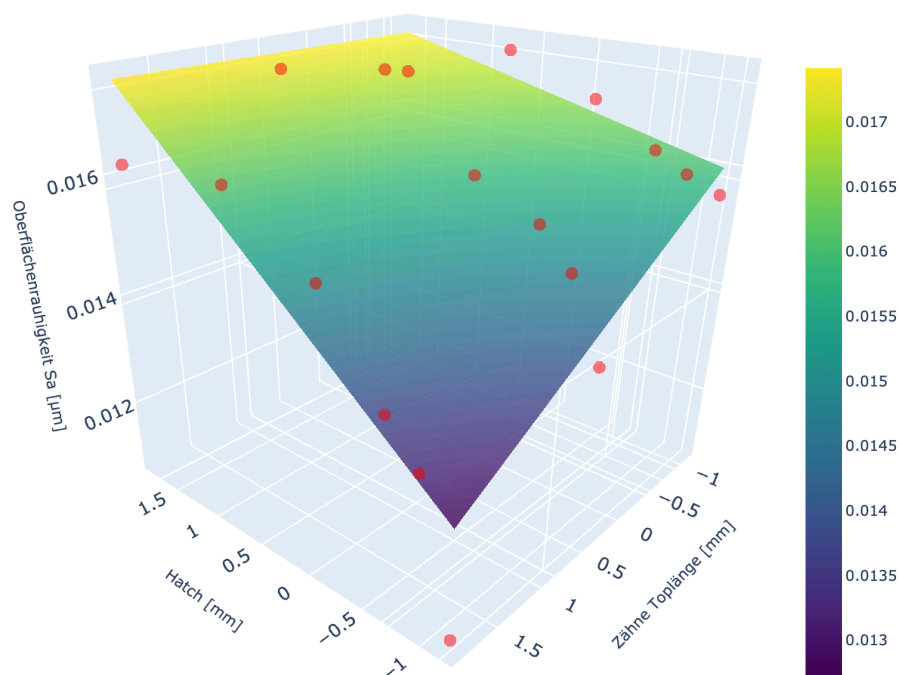
Jeder Term im Modell (Intercept, Hatch, Zähne Toplänge, und Hatch:Zähne Toplänge) ist statistisch signifikant, wie durch die p-Werte angezeigt wird, die alle unter der üblichen Signifikanzschwelle von 0,05 liegen. Spezifisch die p-Werte für Hatch und Zähne Toplänge sind besonders niedrig (0,0009 und 0,0016), was auf eine starke Evidenz für die Beziehung dieser Variablen mit der abhängigen Variable hindeutet.

Die standardisierten Koeffizienten zeigen die Richtung und Stärke der Beziehung zwischen jeder unabhängigen Variable und der abhängigen Variable. Da die abhängige Variable jedoch zuvor reziprok transformiert wurde, ist die eigentliche Richtung der Beziehung entgegengesetzt zu

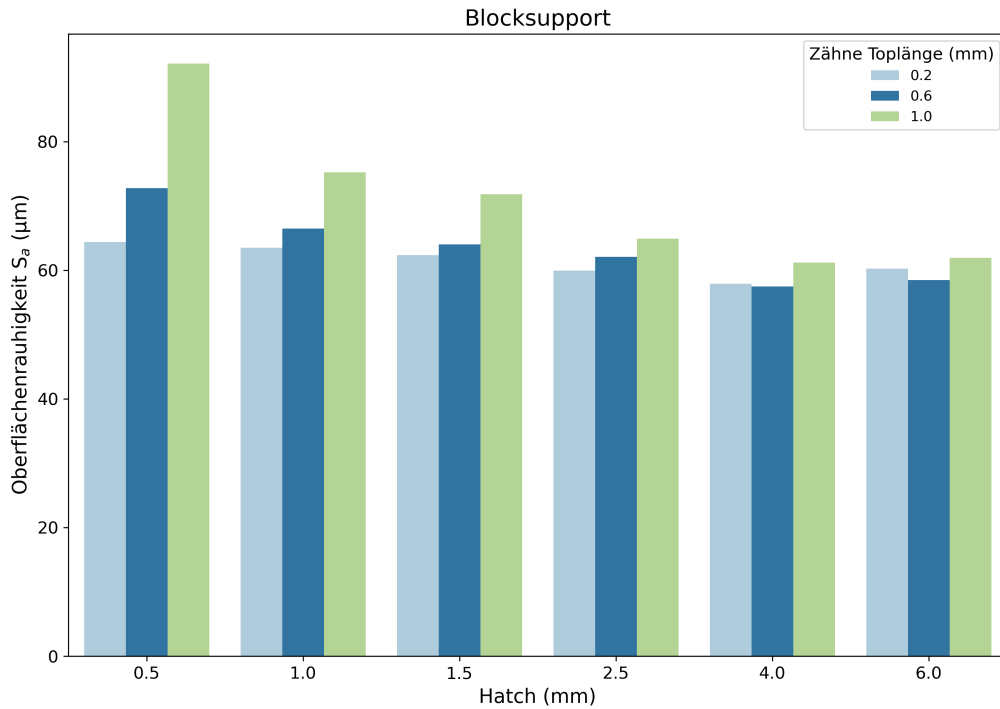
interpretieren. Der Koeffizient für Hatch ist positiv (0,0009), was darauf hinweist, dass ein Anstieg in Hatch tendenziell mit einem Abstieg in der abhängigen Variable verbunden ist (positiver Wert zeigt Abstieg an/ negativer Wert zeigt Anstieg, da Oberflächenrauigkeit  $S_a$  normalisiert wurde (reziproke Transformation)). Im Gegensatz dazu ist der Koeffizient für Zähne Toplänge negativ (-0,0007), was darauf hindeutet, dass ein Anstieg in Zähne Toplänge tendenziell mit einem Anstieg in der abhängigen Variable verbunden ist. Der Betrag der Stärke des Parametereinflusses vom Hatch ist mit 0,0009 leicht höher als die der Toplänge der Zähne.

Der Interaktionsterm Hatch:Zähne Toplänge hat ebenfalls einen signifikanten p-Wert (0,0376) und einen kleinen positiven Koeffizienten (0,0004), was darauf hinweist, dass die Beziehung zwischen Hatch und der abhängigen Variable Oberflächenrauigkeit  $S_a$  abhängig von der Toplänge der Zähne ist. In Abbildung 4.25 ist zu erkennen, dass je größer der Hatchabstand wird, die Variation des Parameters *Zähne Toplänge* weniger Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit  $S_a$  übt. Ab einem Hatchabstand von etwa 4 mm ändert die Variation der Toplänge der Zähne nahezu nichts mehr an der Oberflächenrauigkeit  $S_a$ . Die Variation des Hatchabstandes hat bei einer Toplänge der Zähne von 1 mm die größte Auswirkung auf die Oberflächenrauigkeit  $S_a$ . Bei einer Toplänge der Zähne von 0,6 mm ist der Einfluss des Hatchabstandes schon deutlich geringer und bei einer Toplänge von 0,2 mm am niedrigsten. Die 95 % Konfidenzintervalle für die Koeffizienten liegen nah an den standardisierten Koeffizienten, was auf eine präzise Schätzung der Koeffizienten hinweist. Für den Intercept liegen diese zwischen 0,015 und 0,016, für Hatch sind sie knapp unter 0,000 bis knapp über 0,001, für Zähne Toplänge von knapp -0,001 bis knapp unter -0,001, und für Hatch:Zähne Toplänge von  $2,44 \cdot 10^{-5}$  bis 0,001.

Insgesamt legen die Ergebnisse nahe, dass das Modell eine signifikante und sinnvolle Beziehung zwischen den unabhängigen Variablen und der abhängigen Variable aufzeigt und verdeutlicht die signifikante Korrelation zwischen den Parametern Hatch und Top Zahnlänge mit der Oberflächenrauigkeit  $S_a$ .



**Abbildung 4.24:** 3D-Modellplot von Blocksupport (normalisiert und standardisiert, Gelb = niedrige Oberflächenrauigkeit und Violett = hohe Oberflächenrauigkeit).



**Abbildung 4.25:** Wechselwirkungen zwischen Hatch und Zähne Toplänge auf die Oberflächenrauigkeit  $S_a$  (Blocksupport).

**Tabelle 4.4:** Modellergebnisse für Kontursupport.

$R^2$ :	0,8			
Adj. $R^2$ :	0,757			
Term	p-Wert	Standardisierter Koeffizient	95 % CI unten	95 % CI oben
Intercept	< 0,0001	0,0165	0,016	0,017
Hatch	0,0005	0,0008	< 0,001	0,001
Zähne Toplänge	0,0001	-0,0008	-0,001	< -0,001
Hatch:Zähne Toplänge	0,2	0,0002	< -0,001	0,001

Die Regressionsanalyse für den Kontursupport (Tabelle 4.4) liefert ebenfalls eine gute Modellanpassung, wie durch das  $R^2$  von 0,8 und ein adjustiertes  $R^2$  von 0,757 verdeutlicht wird. Die hohe Übereinstimmung zwischen den Modellprognosen und den Messergebnissen ist in Abbildung 4.26 zu sehen.

Jeder Term im Modell, außer *Hatch:Zähne Toplänge*, zeigt statistische Signifikanz, wie durch die p-Werte angezeigt wird. Der *Intercept*, *Hatch* und *Zähne Toplänge* haben alle sehr niedrige p-Werte (< 0,0001; 0,0005 und 0,0001), was auf eine starke Evidenz für ihre Beziehung mit der abhängigen Variable hindeutet.

Der standardisierte Koeffizient für Hatch ist positiv (0,0008), was darauf hinweist, dass ein Anstieg in Hatch tendenziell mit einem Abstieg in der abhängigen Variable verbunden ist. Im

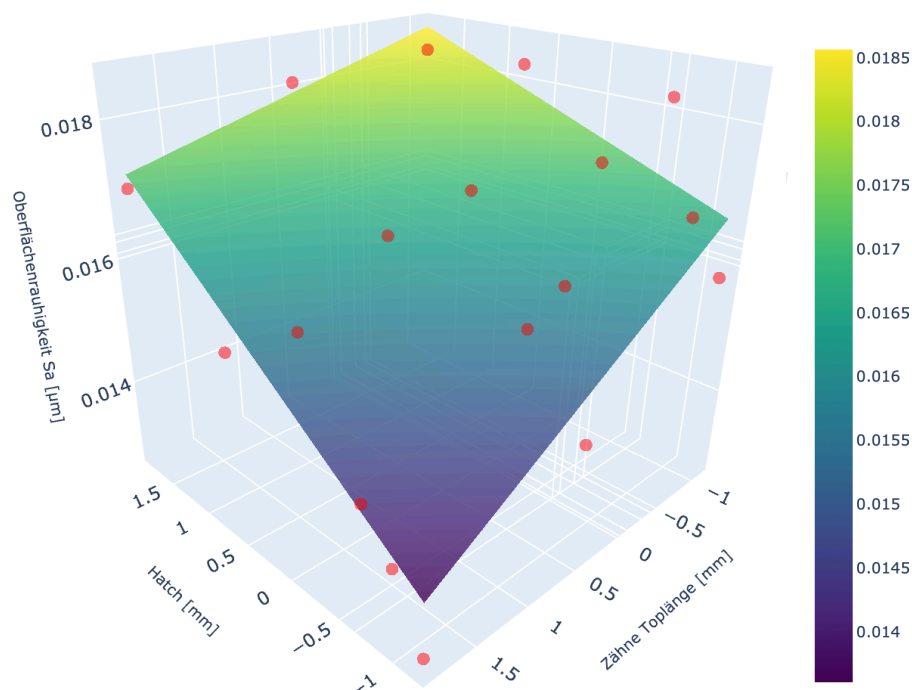


Gegensatz dazu ist der standardisierte Koeffizient für Zähne Toplänge negativ (-0,0008), was darauf hinweist, dass ein Anstieg in Zähne Toplänge tendenziell mit einem Anstieg in der abhängigen Variable verbunden ist. Bemerkenswert ist, dass die Stärke des Einflusses der Parameter *Hatch* und *Zähne Toplänge* in etwa so hoch ist wie beim Blocksupport.

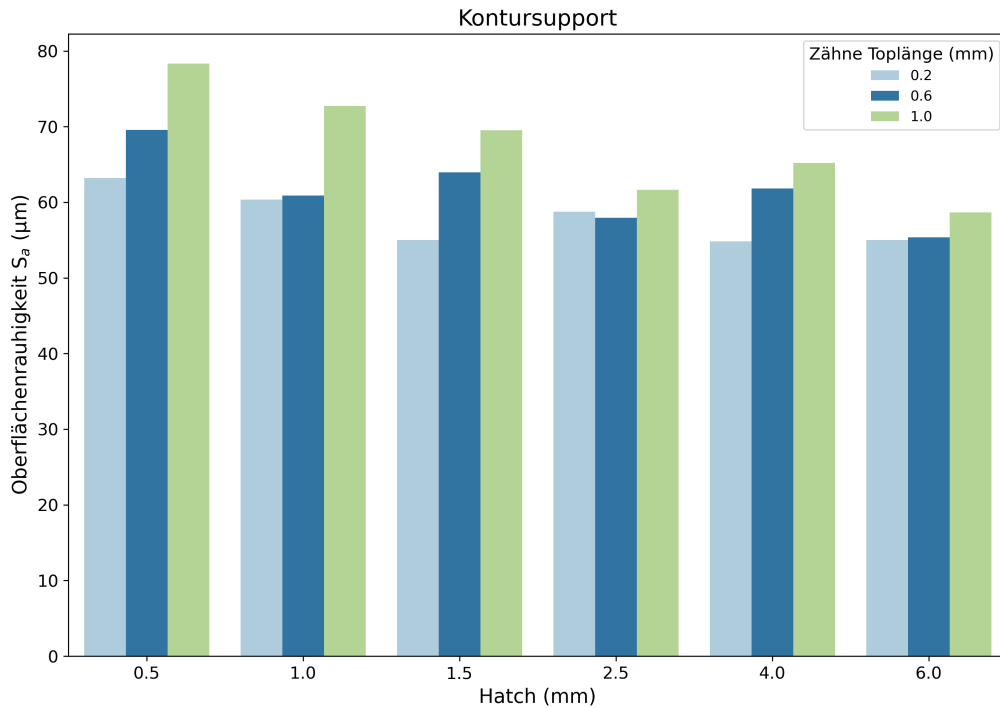
Der Interaktionsterm Hatch:Zähne Toplänge weist mit einem p-Wert von 0,2 keine statistische Signifikanz für den Parameterraum und der Messung der Oberflächenrauigkeit  $S_a$  auf. Das bedeutet, dass es keine ausreichende Evidenz gibt, um zu schlussfolgern, dass die Interaktion zwischen Hatch und Zähne Toplänge einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable hat. Sein standardisierter Koeffizient ist 0,0002, aber ohne statistische Signifikanz sind Schlussfolgerungen über die Wirkung dieses Interaktionsterms mit Vorsicht zu interpretieren. Anders als in Abbildung 4.25 für den Blocksupport ist in Abbildung 4.27 für den Kontursupport keine signifikante Wechselwirkung zwischen den unabhängigen Parametern zu erkennen.

Die 95 % Konfidenzintervalle für die Koeffizienten sind eng und nahe an den standardisierten Koeffizienten, was auf präzise Schätzungen der Koeffizienten hinweist. Für den Intercept liegen diese zwischen 0,016 und 0,017, für Hatch knapp unter 0,001 bis über 0,001 und für Zähne Toplänge von knapp unter -0,001 bis unter -0,001.

Zusammenfassend lassen die Ergebnisse ebenfalls auf eine signifikante und informative Beziehung zwischen den meisten unabhängigen Variablen und der abhängigen Variable schließen. Das Modell zeigt eine gute Vorhersage für die Variabilität der abhängigen Variable, mit der Ausnahme der Interaktion zwischen Hatch und Zähne Toplänge, deren Einfluss nicht signifikant ist.



**Abbildung 4.26:** 3D-Modellplot von Kontursupport (normalisiert und standardisiert, Gelb = niedrige Oberflächenrauigkeit und Violett = hohe Oberflächenrauigkeit).



**Abbildung 4.27:** Wechselwirkungen zwischen Hatch und Zähne Toplänge auf die Oberflächenrauigkeit  $S_a$  (Kontursupport).

**Tabelle 4.5:** Modellergebnisse für Kegelsupport.

$R^2$ :	0,902			
Adj. $R^2$ :	0,881			
Term	p-Wert	Standardisierter Koeffizient	95 % CI unten	95 % CI oben
Intercept	< 0,0001	0,0147	0,014	0,015
Abstand	<0,0001	0,0026	0,002	0,003
Radius	<0,0001	-0,0023	-0,003	-0,001
Abstand:Radius	0,0077	0,0012	<0,000	0,002

Die in Tabelle 4.5 dargestellten Modellergebnisse für den Kegelsupport zeigen eine sehr gute Anpassung des Modells an die Daten, wie durch ein  $R^2$  von 0,902 und ein adjustiertes  $R^2$  von 0,881 belegt wird. Die hohe Übereinstimmung zwischen den Modellprognosen und den Messergebnissen ist in Abbildung 4.28 zu sehen.

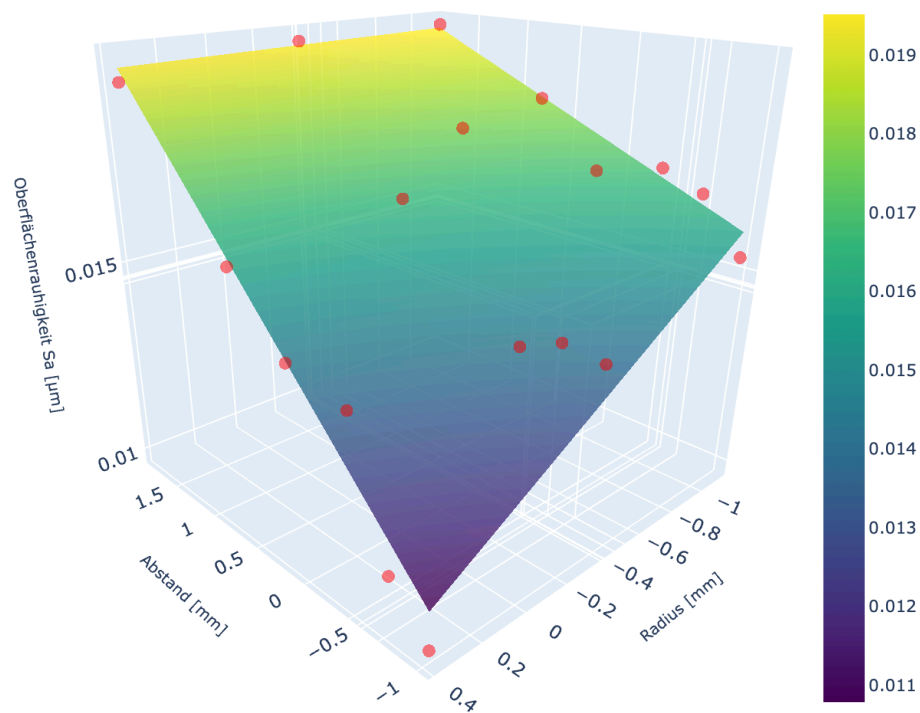
Jeder Term im Modell ist statistisch signifikant, was durch die sehr niedrigen p-Werte belegt wird. Der Intercept und die Variablen *Abstand* und *Radius* zeigen extrem niedrige p-Werte (<0,0001), was auf eine sehr starke Evidenz für ihre Beziehung mit der abhängigen Variable hindeutet.

Der standardisierte Koeffizient für *Abstand* ist positiv (0,0026), was darauf hindeutet, dass ein Anstieg des Abstands tendenziell mit einem Abstieg in der abhängigen Variable verbunden ist. Der standardisierte Koeffizient für *Radius* ist negativ (-0,0023), was darauf hindeutet, dass ein Anstieg des Radius tendenziell mit einem Anstieg in der abhängigen Variable verbunden ist.

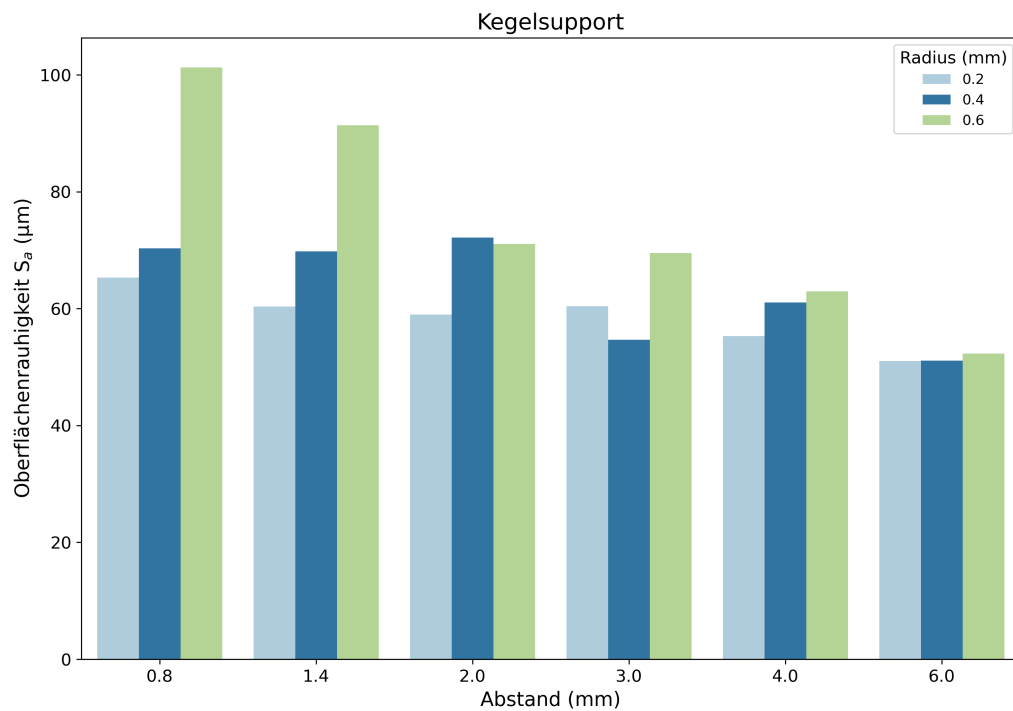
Der Interaktionsterm Abstand:Radius zeigt ebenfalls eine signifikante Beziehung mit einem p-Wert von 0,0077. Der positive standardisierte Koeffizient (0,0012) deutet darauf hin, dass die Kombination von Abstand und Radius zusammen einen spezifischen, zusätzlichen Einfluss auf die abhängige Variable hat. Die signifikante Wechselwirkung bedeutet, dass der Effekt einer Variablen auf die abhängige Variable abhängig ist vom Wert der anderen Variablen. Wie in Abbildung 4.29 zu sehen nimmt die Differenz der Oberflächenrauigkeiten  $S_a$  mit zunehmendem Abstand ab.

Die 95 % Konfidenzintervalle für die Koeffizienten sind relativ nah an den standardisierten Koeffizienten, was auf eine präzise Schätzung der Koeffizienten hinweist. Dies betont die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der geschätzten Effekte.

Insgesamt liefern die Modellergebnisse starke Belege für signifikante und spezifische Beziehungen zwischen den unabhängigen Variablen (Abstand und Radius sowie ihre Interaktion) und der abhängigen Variable. Die hohe erklärte Varianz (gemessen durch das  $R^2$ ) und die signifikanten p-Werte für alle Terme im Modell zeigen, dass das Modell eine hohe Anpassungsgüte besitzt und wertvolles Nutzen für die Interpretation und das Verständnis der zugrundeliegenden Beziehungen bietet.



**Abbildung 4.28:** 3D-Modellplot von Kegelsupport (normalisiert und standardisiert, Gelb = niedrige Oberflächenrauigkeit und Violett = hohe Oberflächenrauigkeit).



**Abbildung 4.29:** Wechselwirkungen zwischen Hatch und Zähne Toplänge auf die Oberflächenrauigkeit  $S_a$  (Kegelsupport).

**Tabelle 4.6:** Modellergebnisse für Baumsupport.

$R^2$ :	0,135			
Adj. $R^2$ :	-0,050			
Term	p-Wert	Standardisierter Koeffizient	95% CI unten	95% CI oben
Intercept	< 0,0001	0,0169	0,016	0,018
Abstand	0,3264	0,0006	-0,001	0,002
Radius	0,3793	-0,0010	-0,003	0,001
Abstand:Radius	0,6381	0,0006	-0,003	0,003

Die Modellergebnisse für den Baumsupport zeigen eine deutlich geringere Anpassungsgüte im Vergleich zu vorherigen Modellen. Dies wird durch das  $R^2$  von 0,135 und ein adjustiertes  $R^2$  von -0,050 angezeigt. Das  $R^2$  von 0,135 bedeutet, dass nur 13,5 % der Variabilität in der abhängigen Variable durch das Modell erklärt werden, was auf eine unzureichende Erklärungskraft hinweist. Das negative adjustierte  $R^2$  (-0,050) impliziert, dass das Modell schlechter abschneidet als ein einfaches Mittelwertmodell. Die niedrige Übereinstimmung zwischen den Modellprognosen und den Messergebnissen ist in Abbildung 4.30 zu sehen.

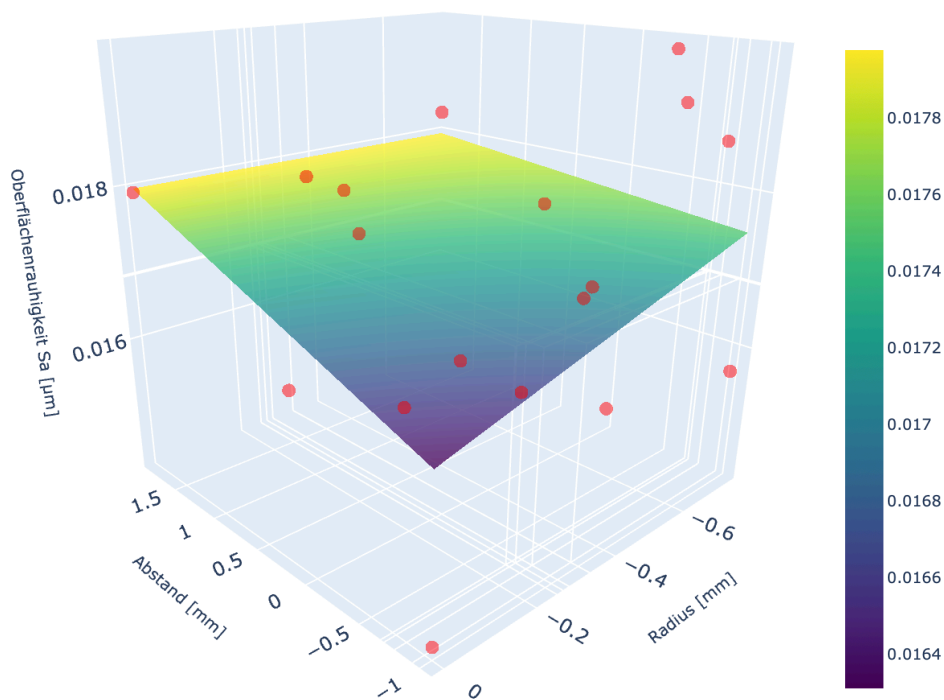
Keiner der Terme im Modell, abgesehen vom Intercept, zeigt statistische Signifikanz, wie durch die hohen p-Werte (Abstand: 0,3264, Radius: 0,3793, Abstand:Radius: 0,6381) angezeigt wird. Diese p-Werte liegen deutlich über der üblichen Signifikanzschwelle von 0,05, was bedeutet, dass es keine ausreichenden Belege gibt, um zu behaupten, dass Abstand, Radius oder ihre Interaktion

einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable der Oberflächenrauigkeit in diesem Parameterraum haben.

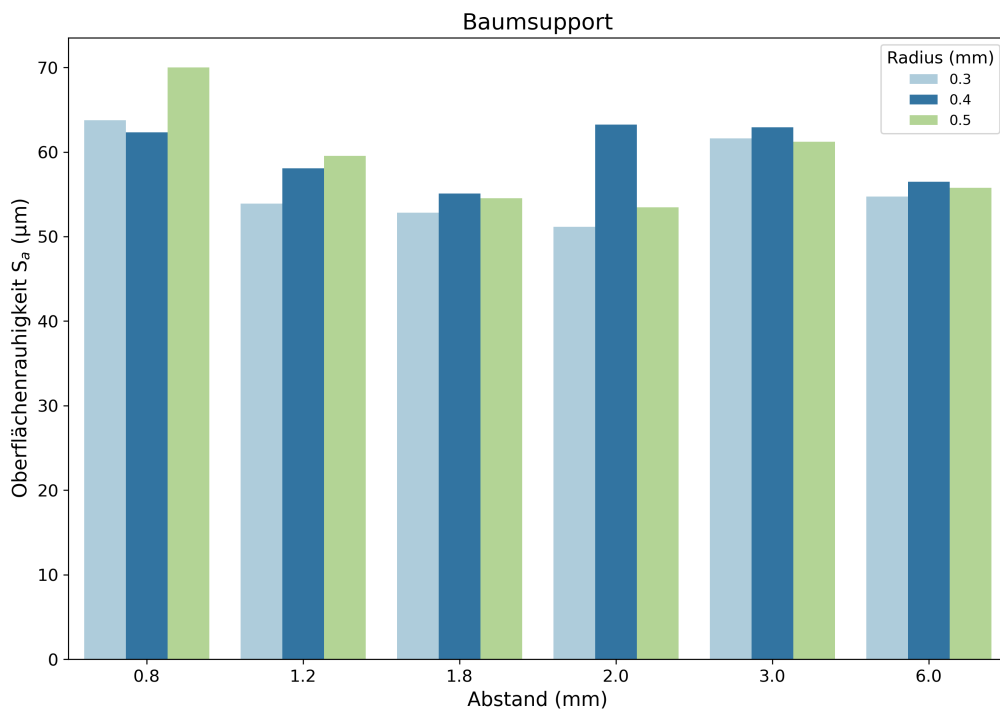
Der Intercept ist statistisch signifikant ( $p < 0,0001$ ), jedoch repräsentiert dieser Wert nur den Wert der abhängigen Variable, wenn alle anderen Prädiktoren gleich null sind. Die standardisierten Koeffizienten für Abstand und Radius, sowie für den Interaktionsterm, sind nahe null und ihre Konfidenzintervalle schließen null ein, was darauf hinweist, dass ihre Einflüsse auf die abhängige Variable statistisch nicht von null unterschieden werden können.

Die 95 % Konfidenzintervalle für die Koeffizienten sind relativ breit und schließen den Wert Null ein, was auf eine hohe Unsicherheit in diesen Schätzungen hindeutet. Für den Intercept liegen diese zwischen 0,016 und 0,018, jedoch für den Abstand, den Radius und den Interaktionsterm umspannen die Intervalle sowohl positive als auch negative Werte, was ihre Nichtsignifikanz bestätigt.

Insgesamt legen die Ergebnisse nahe, dass das Modell für den Baumsupport keine zuverlässige oder aussagekräftige Vorhersagekraft besitzt. Die Variablen Abstand, Radius und der Interaktionsterm scheinen keinen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable im Parameterraum zu haben. Zusätzlich ist anzumerken, dass das Lösen der Baumsupports sich als sehr mühselig darstellte, da die Supports oftmals zwischen Stamm und Ast brachen und somit Astteile am Downskin hängenblieben.



**Abbildung 4.30:** 3D-Modellplot von Baumsupport (normalisiert und standardisiert, Gelb = niedrige Oberflächenrauigkeit und Violett = hohe Oberflächenrauigkeit).



**Abbildung 4.31:** Wechselwirkungen zwischen Hatch und Zähne Toplänge auf die Oberflächenrauigkeit  $S_a$  (Baumsupport).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Koeffizienten der signifikanten Parameter aussagekräftige Unterschiede und Gemeinsamkeiten aufweisen, die auf spezifische Charakteristiken und Sensitivitäten für die jeweiligen Supporttypen hinweisen. Da die unabhängigen Variablen zuvor standardisiert wurden, ist ein direkter Vergleich der Koeffizienten untereinander möglich (siehe Tabelle 4.7)

Beim Kegelsupport-Modell zeigen die Parameter "*Abstand*" und "*Radius*" jeweils signifikant größere Koeffizienten (0,0026 bzw. -0,0023) im Vergleich zu den anderen Modellen. Dies deutet auf eine ausgeprägte Sensibilität der abhängigen Variable gegenüber diesen Faktoren hin. Zusätzlich weist der Interaktionsterm "*Abstand:Radius*" mit einem Koeffizienten von 0.0012 eine signifikante Interaktion auf, was die Notwendigkeit betont, die kombinierten Effekte dieser Variablen in der Anwendung zu berücksichtigen.

Im Gegensatz dazu sind im Blocksupport-Modell die Koeffizienten für "*Hatch*" und "*Zähne Toplänge*" mit Werten von 0,0009 und -0,0007 weniger ausgeprägt, aber dennoch signifikant. Der Interaktionsterm "*Hatch:Zähne Toplänge*" ist ebenfalls signifikant, allerdings mit einem geringeren Koeffizienten von 0,0004. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung dieser Variablen, obwohl ihre Einflüsse im Vergleich zum Kegelsupport-Modell weniger ausgeprägt sind.

Für das Kontursupport-Modell sind die Koeffizienten für "*Hatch*" und "*Zähne Toplänge*" (0,0008 und -0,0008) ähnlich zu denen im Blocksupport-Modell, was auf vergleichbare Einflussgrößen in diesen beiden Kontexten hinweist. Allerdings ist der Interaktionsterm "*Hatch:Zähne Toplänge*" hier mit einem Koeffizienten von 0,0002 nicht signifikant, was auf eine geringere Rolle der Interaktion zwischen diesen Variablen im Kontursupport-Modell hinweist.

Das Baumsupport-Modell zeigt im Gegensatz zu den anderen Modellen keine signifikanten Einflüsse der untersuchten Parameter. Die Koeffizienten für "Abstand" und "Radius", sowie für den Interaktionsterm, sind zwar vorhanden, aber nicht statistisch signifikant. Dies deutet darauf hin, dass die Skala, bzw. Spanne des Parameterraums erhöht werden müssen oder dass zusätzliche Parameter berücksichtigt werden müssen, um den Parameterraum zu erweitern und damit eine aussagekräftige Analyse zu ermöglichen.

Zusammenfassend spiegeln die Unterschiede in den Koeffizienten der verschiedenen Modelle die unterschiedlichen Beziehungen zwischen den unabhängigen Variablen und der abhängigen Variable wider. Während einige Modelle signifikante und starke Einflüsse der Parameter aufzeigen, verdeutlicht das Baumsupport-Modell die Herausforderungen bei der Modellierung in bestimmten Kontexten und die Notwendigkeit, die Modellannahmen und -variablen sorgfältig auszuwählen und gegebenenfalls anzupassen.

**Tabelle 4.7:** Koeffizientenvergleich der verschiedenen Modelle (n.s. = nicht signifikant).

Modell	Abstand/Hatch Koeffizient	Radius/Zähne Toplänge Koeffizient	Interaktionsterm Koeffizient
Blocksupport	0.0009	-0.0007	0.0004
Kontursupport	0.0008	-0.0008	0.0002 (n.s.)
Kegelsupport	0.0026	-0.0023	0.0012
Baumsupport	0.0006 (n.s.)	-0.0010 (n.s.)	0.0006 (n.s.)

## 5 Diskussion der Ergebnisse

### 5.1 Zugproben

Die beobachtete Freisetzung hoher thermischer Energie während des Bruchs ist auf die hohe Reaktivität der Ti-6Al-4V Grade 23-Legierung zurückzuführen. Beim Zugversuch unter hohen Belastungen, entstehen Bruchstellen, die Titanatome freisetzen und mit dem Sauerstoff in der Umgebung reagieren. Diese pyrophore Eigenschaft kann bis zum explosionsartigen Verhalten führen und unterstreicht die notwendigen inertierten Prozessbedingungen während des Fertigungsprozesses [36].

Bei den Zugproben der SLM 500 am Rand wurden leichte Unregelmäßigkeiten im Spannungs-Dehnungsverlauf gemessen. Diese Unregelmäßigkeiten traten alle zwischen 1000 MPa und 1200 MPa auf. Da alle Maschinenparameter während des Baujobs (Mitte und Rand) konstant waren, könnten mögliche Ursachen wie die Wärmeableitung und eine veränderte Mikrostruktur hierbei die Beobachtungen erklären:

Da die Zugproben der SLM 500 am Rand der Bauplattform positioniert wurden, könnte es Unterschiede in der Wärmeableitung der eingebrachten thermischen Energie während des Bauprozesses im Vergleich zu einer mittleren Bauplattenpositionierung geben. Die Wärmeableitung ist im L-PBF-Prozess ein kritischer Faktor, der die Mikrostruktur und somit die mechanischen Eigenschaften der Ti-6Al-4V Grade 23-Legierung beeinflussen kann. Im Zentrum der Bauplattform kann es zu einer Art Wärmestau kommen, da mehr umliegendes Bauplattenmaterial vorhanden ist und somit die thermische Energie von mehreren Seiten eingeschlossen wird. Dadurch kühlt dieser Bereich langsamer ab, als am Rand der Bauplattform. Am Rand der Bauplattform ist weniger umliegendes Material vorhanden, das die thermische Energie speichert, wodurch die Wärme schneller abgeleitet wird und das Bauteil schneller abkühlt. Durch die schnellere Abkühlung am Rand der Plattform im Vergleich zur Mitte, könnten vergleichsweise höhere Eigenspannungen im Material auftreten, die zu einer heterogenen Mikrostruktur führen könnten. Des Weiteren kann auch die Wärmeverteilung (und die Verteilung der Wärme der Plattformheizung) nicht homogen über die gesamte Plattform und im Pulverbett verteilt sein. Da am Rand weniger Material vorhanden ist, das Wärme speichern kann, wird die Wärme schneller abgegeben. Studien, wie die von Kruth et al. (2004) haben gezeigt, dass die Wärmeableitung im L-PBF-Prozess einen signifikanten Einfluss auf die Mikrostruktur und damit auf die mechanischen Eigenschaften hat. Eine schnellere Abkühlung führt oft zu kleineren Korngrößen in der Mikrostruktur, während eine langsamere Abkühlung größere Korngrößen begünstigt. Kleinere Körner können zu einer höheren Festigkeit führen, da sie weniger Defekte und Verunreinigungen aufweisen. Die Geschwindigkeit der Abkühlung und die Wärmeableitung beeinflussen auch die Bildung von neuen Phasen und intermetallischen Verbindungen in der Mikrostruktur. Bei einer langsameren Abkühlung wirkt sich dies wie eine Art Wärmebehandlung aus, was die Bildung von neuen Phasen begünstigen kann. Dies kann die mechanischen Eigenschaften und die Härte der Teile beeinflussen. [37]. Des Weiteren können bei hohen Spannungen, die auf einen erhöhten Temperaturgradienten zwischen Bauplattform und Bauteil zurückzuführen sind, Mikrorisse im Material entstehen, die den Spannungs-Dehnungsverlauf beeinflussen. Aufgrund von Spannungskonzentrationen, insbesondere in Bereichen mit Defekten oder hohen Eigenspannungen, können sich diese Risse ab einer bestimmten Belastung (hier zwischen 1000 MPa und 1200 MPa) öffnen und zu den beobachteten Unregelmäßigkeiten führen. Auch aus den Ergebnissen der Studie von Wenbin et al. (2023) über die Zugfestigkeit von durch



L-PBF hergestellten Proben lässt sich schließen, dass die Substratplattentemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat. Eine höhere Substrattemperatur und langsamere Abkühlung verringert das Risiko der Rissbildung, was auf eine Reduzierung der thermischen Spannungen im Material zurückzuführen ist. Dies könnte erklären, warum Unregelmäßigkeiten im Spannungs-Dehnungsverlauf bei bestimmten Spannungsniveaus auftreten, da Risse oder mikrostrukturelle Defekte, die durch thermische Spannungen verursacht werden, das mechanische Verhalten des Materials beeinflussen können. [38] Um diese Hypothesen zu untermauern, wäre es sinnvoll, detaillierte mikrostrukturelle Analysen der Proben durchzuführen, um mögliche Defekte oder Phasenumwandlungen zu identifizieren. Des Weiteren wäre eine Simulation oder Messung der Temperaturverteilung auf der Bauplattform interessant, um Einblicke in die gegebenenfalls nicht vorhandene Homogenität der Bauplattformtemperatur zu erlangen. In Bezug auf die praktische Implikation und die Reduzierung der höheren Eigenspannungen am Rand der Plattform, wäre eine anschließende Wärmebehandlung der Bauteile sinnvoll. Diese Erkenntnis unterstreicht zudem die Notwendigkeit der Wärmebehandlung bei additiv hergestellten Bauteilen aus Ti-6Al-4V, wie in Kapitel 2.3.5 beschrieben wurde. Dadurch werden Restspannungen abgebaut und die Bildung einer homogenen Mikrostruktur begünstigt, die die Unregelmäßigkeiten im Spannungsverlauf reduzieren könnten.

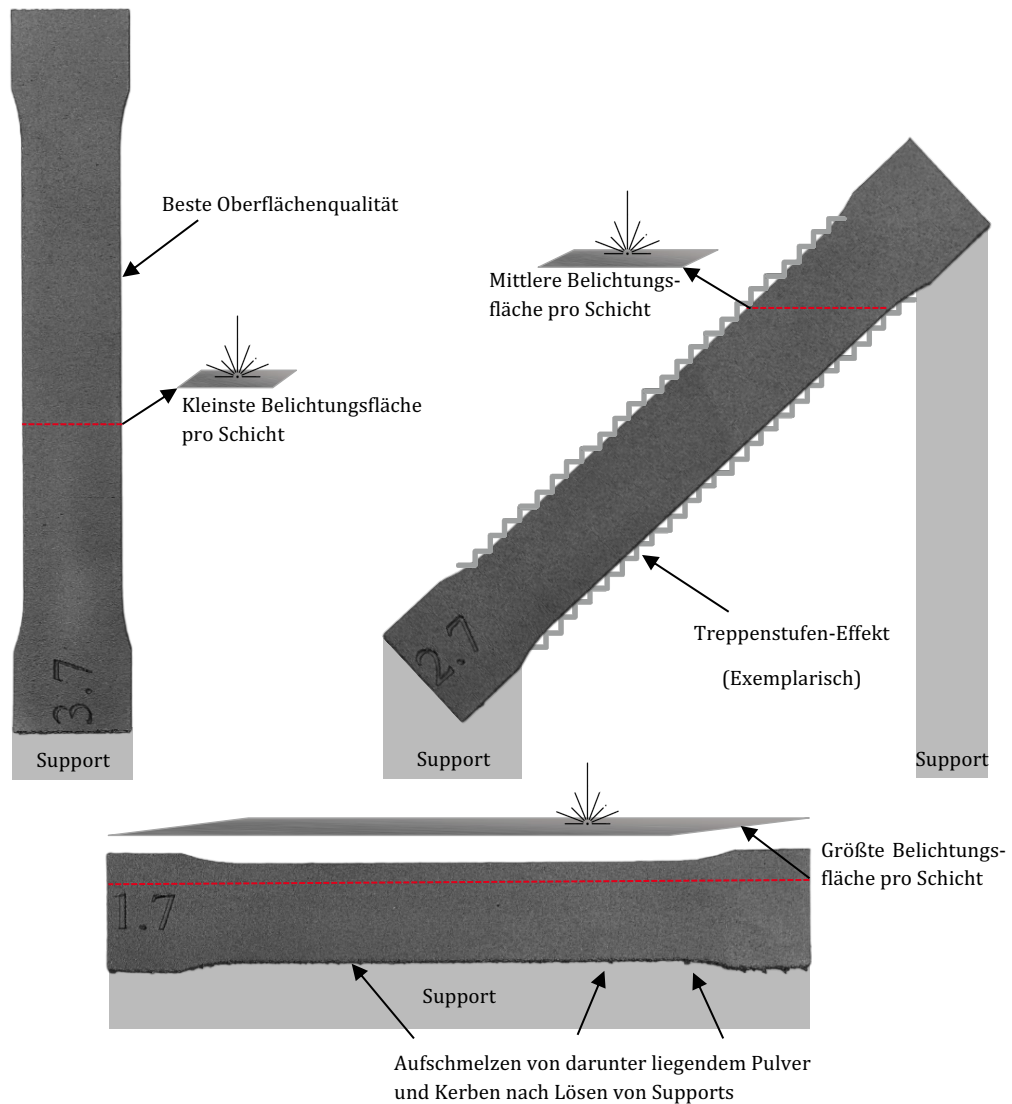
Die vorherigen Überlegungen lassen auch die erhöhten Zugfestigkeitswerte und verminderten Bruchdehnungen am Rand der Bauplattform der SLM 500 erklären. Da die Abkühlrate am Rand der Bauplattform wohlmöglich höher als in der Mitte der Bauplattform ist, kommt es zur Bildung kleinerer Korngrößen in der Mikrostruktur, die im Vergleich zu einer niedrigeren Abkühlrate mit großen Korngrößen, eine erhöhte Zugfestigkeit mit verminderter Bruchdehnung aufweisen. Um die Erklärung der erhöhten Zugfestigkeitswerte weiter zu untermauern, sind weitere Versuche notwendig, die gezielt den Einfluss der Bauplattenposition auf die Festigkeitswerte untersuchen und dabei mikrostrukturelle Analysen mit einbeziehen.

Die Messung der Porosität der Dichtewürfel ergab signifikante Unterschiede je nach Orientierung und Maschine. Die Dichtewürfel der TruPrint 1000 ergaben die höchste Porosität mit 0,26 %. Dies könnte die verminderten Festigkeitswerte im Vergleich zur SLM 500 erklären. Eine höhere Porosität in den mit der TruPrint 1000 hergestellten Proben deutet auf eine weniger dichte Materialstruktur hin, was zu einer reduzierten Lasttragfähigkeit des Materials führt. Die erhöhte Porosität kann auf verschiedene maschinenspezifische Faktoren zurückgeführt werden, wie Unterschiede in der Laserleistung, der Energieeindringtiefe und der Strategie der Energieanwendung, die alle die Schmelz- und Erstarrungsdynamik während des SLM-Prozesses beeinflussen.

Die Dichtewürfel, die am Rand der SLM-Bauplattform gefertigt wurden, zeigten mit 0,089 % eine höhere Porosität, verglichen mit denen, die in der Mitte der Bauplattform hergestellt wurden, wo eine Porosität von lediglich 0,013 % gemessen wurde. Die erhöhte Porosität der am Rand gefertigten Dichtewürfel könnte durch bereits beschriebene beschleunigte Abkühlung erklärt werden, die aus der reduzierten Menge umgebenden Materials resultiert und somit weniger als thermischer Puffer wirkt. Diese Bedingungen führen zu einer erhöhten Wärmeableitung, was eine heterogene Mikrostruktur und höhere Eigenspannungen im Material zur Folge haben kann. Die erhöhte Porosität und die damit verbundenen Defekte im Material, wie Mikrorisse, die durch die schnelle Abkühlung und die daraus resultierenden thermischen Spannungen begünstigt werden, können die Ursache für die beobachteten Unregelmäßigkeiten im Spannungs-Dehnungsverlauf sein. Diese Risse und Defekte wirken als Schwachstellen im Material, die unter bestimmten Belastungen aktiviert werden und die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen können.

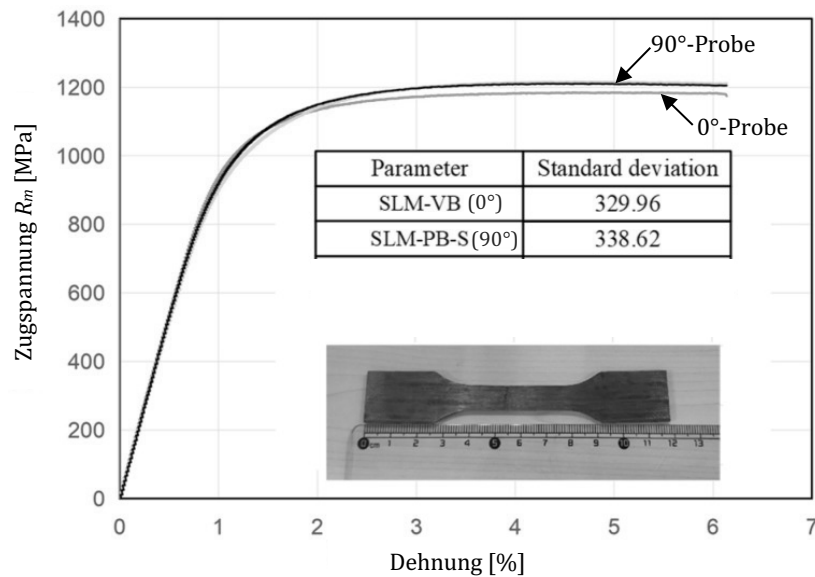
Alle 90° Zugproben der TruPrint 1000 und der SLM 500 wiesen im Vergleich zu den 0° und 45° Proben die höchsten Zugfestigkeitswerte mit einer leicht verminderten Bruchdehnung auf. Die 90° Proben weisen im Vergleich zu den anderen Orientierung eine deutlich kürze Belichtungszeit aufgrund der kleineren Belichtungsfläche pro Schicht auf (siehe Abbildung 5.1). Dadurch wird auf die Gesamtfläche weniger thermische Energie eingebracht. Durch die niedrigeren Belichtungszeiten, hat die Wärme mehr Zeit abzufließen und das Bauteil kühlt demnach etwas schneller ab, als die 0° Proben mit der größten Fläche und die 45° Proben. Wie bereits beschrieben, führt eine schnellere Abkühlung zu feineren Korngrößen, geringerer Porosität und besserer metallurgischer Zwischenschichtbindung, die zu einer erhöhten Zugfestigkeit führen.

Eine weitere mögliche Ursache ist die unterschiedliche Oberflächenqualität der Proben in ihren verschiedenen Orientierungen (siehe Abbildung 5.1). Qualitativ lässt sich sagen, dass die 90° Proben die höchste Oberflächenqualität aufweisen. Bei den 45° Proben setzt aufgrund des schichtweisen Aufbaus der Treppenstufen-Effekt ein, der eine deutliche Verschlechterung der Oberflächenrauigkeit im Downskin und Upskin mit sich bringt. Die 0° Proben müssen zwingend an der gesamten Downskinfläche gestützt werden. Da hierbei Block- und Kegelsupports zur Anwendung kamen, bilden sich zwischen den feinen Supportstrukturen immer noch Flächen, die nicht gestützt werden und somit darunterliegendes Pulver teils mit aufgeschmolzen wird. Dies hat den signifikanten Einfluss einer Erhöhung der Oberflächenrauheit. Auch beim Entfernen der Supports wird teilweise Material der Probe mit herausgerissen, wodurch sich kleine Unebenheiten in der Downskinfläche der 0° Proben ergeben. Diese Unebenheiten führen bei Belastung zu Spannungskonzentrationen und Kerbwirkungen entlang der Probe, die ein vorzeitiges Versagen begünstigen. Um diesen Effekt zu minimieren, wäre es sinnvoll die Oberflächen der Bauteile mechanisch durch z. B. Strahlen nachzubearbeiten, um eine niedrigere Oberflächenrauigkeit zu erzielen oder die Probenkörper mit Aufmaß zu bauen und anschließend auf Maß zu Fertigen.



**Abbildung 5.1:** Oberflächen bei 0°, 45° und 90°.

Die Erkenntnisse des Versuchs decken sich mit einer Studie von Wentong et. al (2021), indem die Mikrostruktur und die mechanischen- und Oberflächeneigenschaften in Bezug auf die Bauteilorientierung von Ti-6Al-4V untersucht wurde. Nach Wentong et. al (2021) erzielte die 90° Probe eine dichtere Mikrostruktur mit kleinerer Korngröße und stärkerer Textur, was zu verbesserten mechanischen Eigenschaften beitrug. Des Weiteren wiesen die Proben eine höhere Dichte und niedrigere Porosität auf mit besserer Oberflächenqualität, die ebenfalls die mechanischen Eigenschaften begünstigen (siehe Abbildung 5.2). Daraus lässt sich schließen, die Bauteilorientierung so auszuwählen, dass die kürzeste Seite in Kontakt mit der Bauplattform ist, um die größte maximale Zugfestigkeit zu erhalten. [39] Ebenfalls könnte die Schichtdauer erhöht werden, damit die thermische Energie besser abfließen kann und Eigenspannungen reduziert werden.



**Abbildung 5.2:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm von 0°- und 90°-Proben, entnommen aus: [39].

Die verminderten Zugeigenschaften der TruPrint 1000 gegenüber der SLM 500 könnten sich über die Maschinenparameter erklären lassen. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass ein Parametervergleich zwischen unterschiedlichen Maschinen nicht unbedingt repräsentativ ist, da andere Faktoren, wie die Baumraumgröße/ Schutzgasströmung/ Vorheizung ebenfalls das Endergebnis maßgeblich beeinflussen. Die Volumenenergiedichte  $E_V$  nach Gleichung 2.1 der beiden Maschinen ist bei der TruPrint 1000 mit  $1,39 \times 10^{10} \text{ J/m}^3$  mehr als halb so groß im Vergleich zur SLM 500 mit  $3,33 \times 10^{10} \text{ J/m}^3$ . Die höhere Volumenenergiedichte  $E_V$  bei der SLM 500 kann zu einer besseren Energieübertragung auf das Pulvermaterial führen, was eine vollständigere Schmelze und damit eine bessere Verschmelzung zwischen den Pulverpartikeln zur Folge haben kann. Dies wiederum führt zu einer dichteren Mikrostruktur und potenziell höheren mechanischen Eigenschaften, insbesondere im Hinblick auf die Zugfestigkeit der Proben.

Anzumerken ist zudem, dass die gemessene Bruchdehnung nicht quantitativ repräsentativ ist, da diese nur über den Verfahrenweg der Zugmaschine, aufgrund nicht vorhandenem Extensometer, aufgezeichnet wurde. Demnach kann hierbei eine quantitative Validierung der mechanischen Eigenschaften nach Tabelle 2.3 nicht genau erfolgen.

## 5.2 Stützstrukturstärke

In Versuch zwei wurde die Stützstrukturstärke von Block-, Kontur-, Kegel- und Baumsupports untersucht. Die Ergebnisse verdeutlichen eine signifikante Reduzierung der maximalen Zugspannung der Stützstrukturen im Vergleich zu denen aus Vollmaterial.

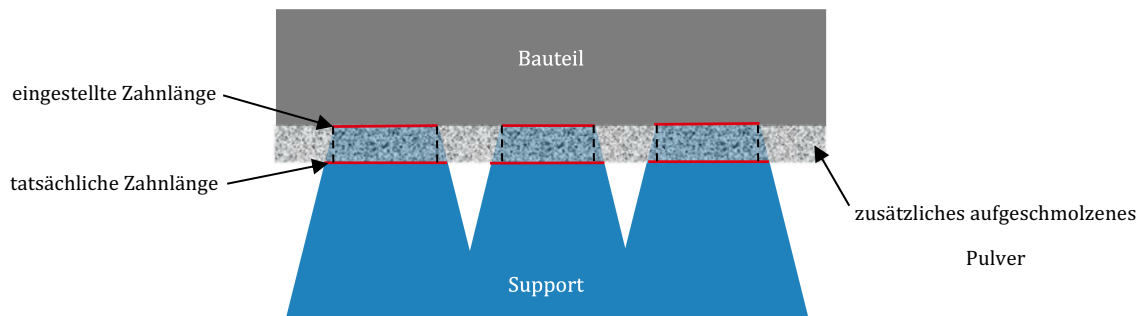
Im ersten Probensatz wurden starke Anlauffarben am oberen Teil der Zugprobe beobachtet. Diese Farbveränderungen lassen sich auf den Restsauerstoffgehalt während des Prozesses zurückführen. Bei hoher thermischer Energieeinwirkung entsteht aufgrund der resultierenden hohen lokalen Temperatur eine Oxidschicht, deren Farbe je nach Dicke der Oxidschicht variiert. Im Zusammenhang mit dem L-PBF-Prozess resultiert dieses Phänomen aus einer unzureichenden Wärmeabführung während des Bauprozesses. Die Wärme kann aufgrund der darunterliegenden zu feinen Stützstrukturen und des umliegenden Pulvers nicht effektiv abfließen, was zu einem Wärmestau führt und die Bildung der Oxidschicht begünstigt. Bemerkenswert ist, dass das Ausmaß der dunkelblauen Oxidschichten bei der Baumstützstruktur am größten ist. Dies ist auf die vergleichsweise schlechte Wärmeabführung der Baumstrukturen zurückzuführen, da ihre Oberfläche im Vergleich zu den anderen Stützstrukturen am geringsten ist.

Des Weiteren war beim ersten Probensatz ein Spannungsknacken während des Abkühlens zu hören. Dieses Geräusch tritt auf, wenn interne Spannungen im Material aufgrund von Verformung oder Temperaturschwankungen freigesetzt werden.

Während der Zugprüfung des zweiten Satzes mit Adaptereinspannung trat der Bruch aufgrund des Supportdesigns an der oberen Verbindung zwischen Stützstruktur und Zugprobe auf, da sich dort der geringste Querschnitt befindet und folglich dort eine Spannungskonzentration aufweist. Beim Baumsupport entstand dieser Bruch zwischen Stamm und den Ästen, da die Kräfte, die auf einen Ast wirken, sich vierfach im Stamm bündeln und folglich dort die höchste Spannung aufweist. Nach Erreichen eines spezifischen Zugkraftwerts zeigte sich bei allen Proben eine nahezu lineare Beziehung zwischen Kraft und Verschiebung bis zum Versagen. Diese Tendenz deutet auf ein sprödes Verformungsverhalten auf makroskopischer oder struktureller Ebene hin [40]. Dieses spröde Verformungsverhalten ist auf die große thermische Energieeinwirkung der Supports zurückzuführen. Dadurch, dass ein Großteil der thermischen Energie vom oberen Teil der Zugprobe durch die Supports abgeleitet wird, stellen sich im Supportbereich hohe Temperaturen ein. Diese hohen Temperaturen führen zu einer Veränderung der Mikrostruktur und einer Phasenumwandlung führen. Ti-6Al-4V durchläuft bei hohen Temperaturen eine Phasenumwandlung von der alpha-Phase (hexagonal dichteste Packung) zur beta-Phase (kubisch raumzentriert). Beim Abkühlen kann sich diese beta-Phase in eine sprödere alpha-Phase umwandeln, insbesondere wenn die Abkühlung schnell erfolgt. Dies führt zu einer Mikrostruktur, die weniger duktil und somit spröder ist. [41]

Bei der Messung der tatsächlichen Anbindungsfläche zwischen Support und Downskin wurden signifikante Abweichungen beobachtet. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass beim Auftragen und Schmelzen der ersten Schichten über den Stützstrukturen geschmolzenes Material in vorherige Schichten fließt und dort Teile der Zähne/ Anbindungsflächen umschließt. Dieses zusätzliche aufgeschmolzene Pulver führt zu einer erhöhten Bauteildicke in negative Z-Richtung und einer vergrößerten Oberlänge der Zähne/Anbindungsflächen aufgrund ihrer Geometrie, begünstigt durch die geringere Wärmeleitfähigkeit an dieser Grenzfläche. Anzumerken ist, dass die Vergrößerung der Supportflächen vermutlich von der Toplänge der Zähne, bzw. vom Radius

und von der Dichte der Stützstruktur abhängig ist. In Abbildung 5.3 ist dieser Effekt der Vergrößerung der Supportgeometrie dargestellt.



**Abbildung 5.3:** Vergrößerung der Anbindungsfläche durch zusätzlich aufgeschmolzenes Pulver im Downskin, in Anlehnung an: [42].

Im Allgemeinen wiesen die Zugproben der Supports einen signifikanten niedrigeren Zugspannungskennwert im Vergleich zu denen aus Vollmaterial aus Versuch eins auf. Dieser unerwartet niedrige Kennwert kann durch die Kerbwirkung erklärt werden, da jeder Zahn des Tragwerks eine Schnittstelle ist, an der eine Querschnittsänderung auftritt und Spannungsspitzen selbst bei geringeren Normalspannungen zu Brüchen führen können [43]. Aus diesem Grund betragen die maximalen Zugspannungen bei den Kegelsupport auch deutlich mehr im Vergleich zu Block-, Konutur- und Baumsupports. Kegelsupports weisen eine deutlich stärkere Struktur als die anderen Stützstrukturen auf und besitzen in dem Versuch eine deutlich geringere Querschnittsveränderung zum Downskin und damit eine niedrigere Kerbwirkung. Auch die Baumsupports konnten eine leicht höhere Zugspannung als die Block- und Kontursupports aufnehmen. Durch die anliegenden Äste an jedem Stamm kann sich die Kraft besser verteilen und die Kerbwirkung ist durch den größeren Stamm etwas geringer, als bei bei einer deutlich kleineren Zahnanbindung.

In einer Studie über die Optimierung von Supportstrukturen im L-PBF-Verfahren mit Ti-6Al-4V Grade 23 wurde die Stärke von Blocksupports mittels Zugversuch ermittelt. Die Ergebnisse der Studie decken sich sehr eng mit den eigenen Ergebnissen aus Versuch zwei. Hierbei wurde eine durchschnittliche maximale Zugspannung von 269 MPa ermittelt (vgl. eigene Ergebnisse: 262 MPa) [42]. Diese enge Deckung der Ergebnisse unterstreicht die Aussagekraft und Reproduzierbarkeit des Versuchs.

Für die praktische Implikation empfiehlt es sich aufgrund der ermittelten Ergebnisse vor allem Kegelsupports für Bauteile zu verwenden, die aufgrund von starken Eigenspannungen eine starke Verankerung mit der Bauplatte benötigen. Hierbei ist die Kerbwirkung für den untersuchten Parameterraum am geringsten vorhanden und es lässt sich die größte Zugfestigkeit erreichen. Block-, Kontur- und Baumsupports weisen aufgrund der erhöhten Kerbwirkung eine deutlich niedrigere Zugfestigkeit auf, eignen sich jedoch gegebenenfalls je nach Anwendungsfall z. B. für höhere Oberflächenqualitäten besser.

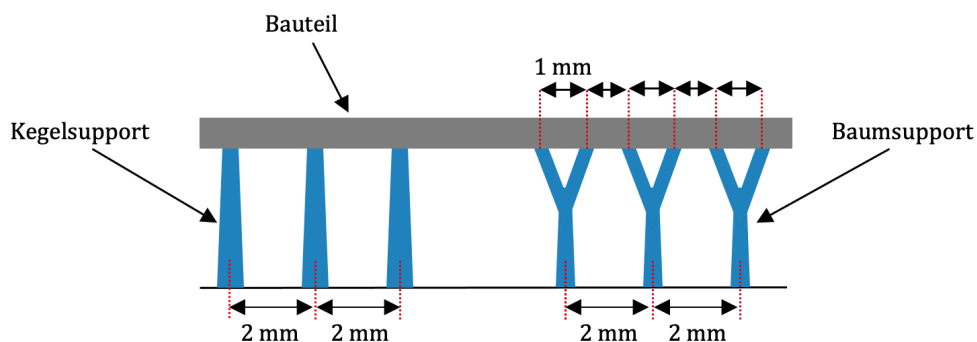
Zur weiterführenden Analyse der Stützstrukturstärke könnte die Verwendung von CT-Probenkörpern (Compact Tension) gegenüber herkömmlichen Flachzugproben Vorteile bieten. Der Hauptgrund liegt in der spezifischen Eignung der CT-Probenkörper für die Untersuchung von

Rissausbreitungsverhalten und Bruchmechanik. Durch das Fokussieren auf das Risswachstum unter Lastbedingungen könnten CT-Probenkörper tiefere Einblicke in die strukturelle Integrität und das Verhalten von Stützstrukturen unter realistischen Belastungsbedingungen liefern. Dies ist besonders relevant, da Stützstrukturen in additiven Fertigungsverfahren oft komplexen Spannungszuständen ausgesetzt sind und deren Versagen kritische Auswirkungen auf die Gesamtstabilität der gefertigten Bauteile haben kann. Die Anwendung von CT-Probenkörper könnte somit zur genaueren Bestimmung der Bruchzähigkeit und zur Identifikation kritischer Schwachstellen in den Stützstrukturen beitragen, was wiederum für die Optimierung des Designs und des Fertigungsprozesses von entscheidender Bedeutung sein könnte. [44]

### 5.3 Oberflächenqualität der Stützstrukturen

Es wurden verschiedene Supportstrukturen und deren Einfluss auf die Oberflächenqualität im 0° Downskin untersucht. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede in der Auswirkung verschiedener Parameter wie Hatch/Abstand und Zahn Toplänge/Radius auf die Oberflächenrauigkeit  $S_a$ . Im Folgenden wird diskutiert, wie diese Ergebnisse interpretiert werden können und welche Implikationen diese Ergebnisse für die Anwendung haben.

Auffallend ist, dass alle Modelle – mit Ausnahme des Baumsupports – signifikante Ergebnisse lieferten. Es wurde deutlich, dass eine Vergrößerung des Hatch/Abstands generell zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität führt, während eine Vergrößerung der Top Zahnlänge/des Radius eher eine Verschlechterung begünstigt. Die abweichenden Ergebnisse des Baumsupportmodells lassen sich auf Grund der Ergebnisse auf eine nicht repräsentative Auslegung des Parameter-raums dieser spezifischen Supportstruktur zurückführen. Die Struktur des Baumsupports ist im Vergleich zu anderen Typen wie dem Kegelsupport komplexer. Zum Beispiel entspricht ein eingestellter Abstand von 2 mm beim Kegelsupport dem tatsächlichen Abstand der Kontaktflächen in x- und y-Richtung. Beim Baumsupport hingegen repräsentiert dieser Wert nur den Abstand von Stamm zu Stamm, während die Äste, die diagonal abgehen, zu einem geringeren Abstand zwischen den Kontaktflächen führen, wie in Abbildung 5.4 veranschaulicht.



**Abbildung 5.4:** Tatsächlicher Abstand der Kontaktflächen.

Dies führt dazu, dass die eingestellten Parameter beim Baumsupport nicht den tatsächlichen Abständen entsprechen und der Parameterraum somit in einem deutlich kleinerem Zahlenbereich vorliegt. Infolgedessen stimmen die Abstände, die bei anderen Supporttypen beobachtet werden, nicht mit denen des Baumsupports überein. Dies könnte erklären, warum eine Variation des Abstands in diesem Parameterraum keinen signifikanten Effekt zeigt und erst bei größeren Abständen deutlichere Auswirkungen zu verzeichnen sind.

Da der Radius hierbei ebenfalls keinen signifikanten Einfluss hervorrief, könnte als Ursache dafür die Wechselwirkung zwischen Abstand und Radius angenommen werden, bei der der Abstand zu klein ist, um Auswirkungen der Variation des Radius zu identifizieren. Ein weiterer Grund könnte sein, dass hierbei auch die Parameter des Radius zu gering sind, um Effekte zu beobachten. Aus Abbildung 4.20 und Abbildung 4.21 aus Kapitel 4.2 ist dennoch ersichtlich, dass eine Vergrößerung des Abstandes eine leichte Verbesserung der Oberflächenqualität ( $\sim -5 \mu\text{m}$ ) und eine Vergrößerung des Radius eher eine leichte Verschlechterung ( $\sim +5 \mu\text{m}$ ) in diesem Parameterraum



hervorrufen. Des Weiteren brachen die Baumsupports oftmals aufgrund einer Spannungskonzentration zwischen Stamm und Ast, welches eine mühselige Nachbearbeitung zum Entfernen der Supports erfordert.

Um ein aussagekräftigeres Modell für den Baumsupport zu erstellen und den Einfluss der Parameter genauer zu identifizieren, wäre es ratsam, den Parameterraum zu erweitern. Dies würde insbesondere bedeuten, den Abstand und den Radius zu vergrößern, um die Effekte in einem breiteren Bereich zu untersuchen.

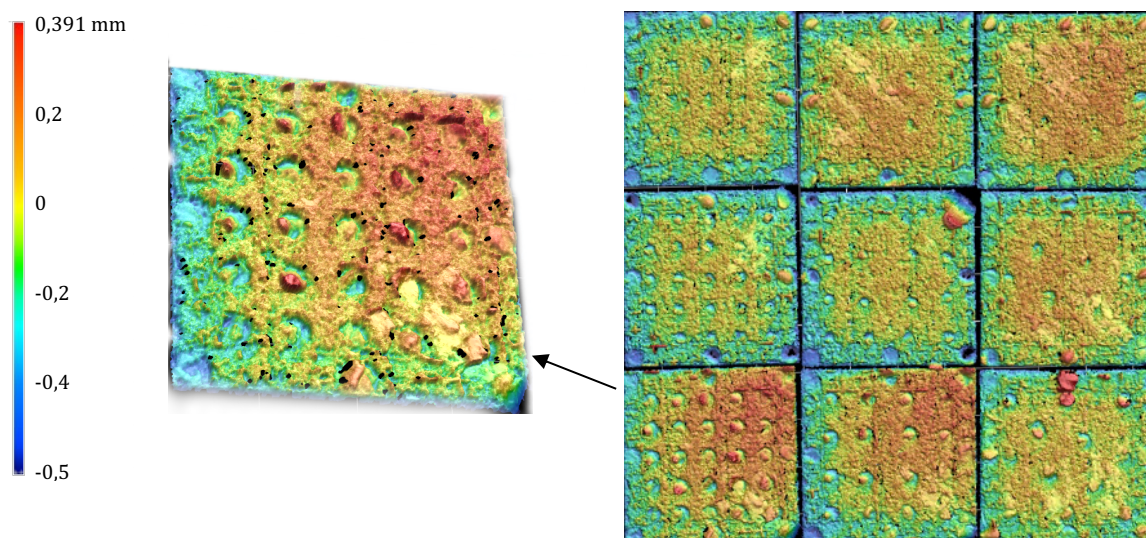
Die Modellergebnisse der Koeffizienten, die die Stärke des Parametereinflusses der Stützstrukturen verdeutlichen, zeigen, dass Block- und Kontursupport in etwa den gleich starken Einfluss beider Parameter aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Block- und Kontursupport in etwa gleich aufgebaut sind und die Kontaktfläche die selbe Geometrie (Zahn) aufweist. Dadurch verhalten sich diese Supports sehr ähnlich und betonen zudem die realitätsnahe Abbildung der erstellten Modelle, da sehr ähnliche Ergebnisse zustande kamen. Beim Kontursupport wurde jedoch anders als beim Blocksupport keine signifikante Wechselwirkung zwischen Hatch und Zähne Topplänge identifiziert. Gründe dafür können Ungenauigkeiten in den Messungen der Oberflächenrauigkeiten  $S_a$  sein, die eventuell eine starke Streuung aufweisen. Um auch hier eine Wechselwirkungen zu messen, ist es für einen zukünftigen Ansatz sinnvoll, die Reproduzierbarkeit des Versuchs sicherzustellen, indem mehrere Messdurchgänge an mehreren gleichen Plättchen durchgeführt werden, was jedoch den zeitlichen Aufwand deutlich erhöhen würde. Ein weiterer Grund könnte auch hier, ähnlich wie bei den Baumsupports, der Parameterraum sein.

Die Hatch Parameter variieren bei Block- und Kontursupport gleich, jedoch stellt sich beim Blocksupport eine nahezu doppelt so hohe Dichte der Struktur, mit doppelt so hohen Kontaktflächen (aufgrund des Supportdesigns) ein. Das bedeutet, die Hatchparameter des Kontursupports bewirken eine deutlich geringere Anzahl an Kontaktflächen im Vergleich zu den gleichen Parametern des Blocksupports. Infolgedessen ist eine Interaktion der Parameter in diesem Bereich des Kontursupports weniger ausgeprägt und kommt erst ab einer Verkleinerung des Hatches zum Vorschein. Aus Abbildung 4.25 lässt sich nämlich erkennen, dass die größte Interaktion bei kleineren Abständen auftritt. Ein Hatch von 1.5 mm beim Blocksupport entspricht demnach beispielweise einem Hatch von 1 mm beim Kontursupport, bei dem die Interaktion deutlich geringer ausfällt. Daher wäre es auch hier ratsam den Parameterraum zu erweitern und vor allem den Hatch beim Kontursupport zu verringern.

Die Wechselwirkung könnte aufgrund der spezifischen Geometrie und Dichte der Supportstruktur verursacht worden sein. Die Variationen von "Hatch" (Abstand der einzelnen Liniensupports) und "Zähne Topplänge" (Länge der Anbindung der Zähne an das Bauteil) beeinflussen die Geometrie und die Dichte der Supportstrukturen erheblich. Unterschiedliche Kombinationen dieser Parameter können dazu führen, dass die Supports auf unterschiedliche Weisen mit dem Bauteil interagieren und die Wärmeableitung und -verteilung während des Druckvorgangs beeinflussen. Dies kann sich wiederum auf die Oberflächenrauigkeit auswirken. Die größte Interaktion der Parameter ist bei kleineren Abständen zu beobachten. Vergrößert sich nun beim konstanten, niedrigeren Hatch die Länge der Topzähne, stellt sich eine deutlich größere Kontaktfläche zwischen Downskin und Support ein, im Vergleich zu einer Vergrößerung der Topplänge der Zähne bei größerem Hatch. Prozentual gesehen ist diese Vergrößerung der Kontaktflächen gleich hoch, jedoch wirkt sich diese prozentuale Vergrößerung auf eine bereits vorhandene größere Kontaktfläche deutlich stärker aus. Bei einer kleineren Supportdichte, also

einem großen Abstand, bewirkt eine Vergrößerung der Toplänge nur unwesentlich eine Vergrößerung der Kontaktfläche, da die Anzahl der gesamten Berührungsflächen deutlich minimierter im Vergleich zu einer höheren Supportdichte ist. Mehr Berührungsflächen tragen tendenziell zu einer erhöhten Oberflächenrauigkeit bei, wie aus der Korrelationsmatrix in Kapitel 4 ersichtlich (positive signifikante Korrelation von Körper und Anbindungsflächen mit Oberflächenrauigkeit).

Die Hauptaussage der Ergebnisse aus Kapitel 4.3 ist, dass eine Vergrößerung des Hatch/Abstands generell zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität führt, während eine Vergrößerung der Top Zahnlänge/des Radius eher eine Verschlechterung begünstigt. Das würde bedeuten, dass je weniger Stützstrukturen verwendet werden, die Oberflächenqualität steigt. Dieses Ergebnis steht auf dem ersten Blick im Widerspruch mit einer der eigentlichen Intentionen von Stützstrukturen, die Oberflächenqualität zu verbessern. Jedoch muss dieses Ergebnis im Kontext der Versuchsbedingungen und des Parameterraums betrachtet werden. Aus Abbildung 5.5 ist deutlich ersichtlich, dass beim Ablösen der Stützstrukturen, dass Material nicht direkt an der Oberfläche bricht, sondern mit einem Versatz in das Plättchen hinein. Dadurch entstehen vergleichsweise tiefe Ausbrüche, im Folgenden als Krater bezeichnet, die für eine deutlich unebenere Oberfläche sorgen und damit zu einer hohen Oberflächenrauheit führt. Ursache dafür ist das zum Teil aufgeschmolzene anhaftende Pulver, dass die Geometrie der Plättchen in negative z-Richtung minimal vergrößert. Beim Ablösen der Stützstrukturen, bricht die Verbindung an der Kontaktfläche zwischen Support und Downskin. Dadurch entsteht ein Versatz, der diese Krater hervorruft. Aufgrund der zähen Eigenschaften der Ti-6Al-4V Grade 23-Legierung ist die Bruchstelle nicht exakt an der Oberfläche, sondern reißt zudem etwas Material vom Support oder des Plättchen mit sich, was sich zusätzlich auf eine Verschlechterung der Oberflächenqualität ausübt. Aus diesem Grund, entstehen bei einer Vergrößerung des Hatches/Abstands, also bei weniger Kontaktpunkten, weniger Krater. Umgekehrt gilt es für die Top Zahnlänge/ den Radius, indem eine Vergrößerung dieses Parameters, die Größe der einzelnen Kontaktflächen erhöht und somit die Größe der Krater erhöht. Dies erklärt zudem nocheinmal die Wechselwirkung der Parameter, die im vorherigen Abschnitt erläutert wurden.



**Abbildung 5.5:** Krater nach Ablösen der Supports von den Plättchen (3D Scan).

Es ist jedoch zu beachten, dass für größere gestützte Flächen, eine Minimierung der Supportdichte nicht eine Verbesserung der Oberqualität bedeuten würde. Der gewonnene Erkenntnisstand bezieht sich lediglich auf eine relativ kleine unterstützte Fläche von 10 mm x 10 mm, die in diesem speziellen Versuchsaufbau auch ohne den Einsatz von Stützstrukturen zu fertigen wäre. Des Weiteren wurden die Plättchen mit einem festen Supportrand gefertigt, der ebenfalls einen Einfluss auf die gesamte Oberflächenrauigkeit üben könnte. Bei größeren Flächen ist eine Unterstützung unerlässlich, jedoch sollten die Strukturen so ausgewählt werden, dass keine Überdimensionierung des Supports stattfindet, wodurch sich die Oberflächenqualität aufgrund der soeben erläuterten Bildung von Kratern verschlechtert. Um Erkenntnisse über den maximalen supportfreien  $0^\circ$  Downskin zu erlangen, müssten weitere Versuche in Betracht gezogen werden, die die Plättchengröße maximieren und gegebenenfalls auch eine Parameterstudie der Maschineneinstellungen mit sich bringen. Es ist anzunehmen, dass eine Vergrößerung der supportfreien Downskinfläche tendenziell auch eine Verschlechterung der Oberflächenqualität mit sich bringt, bzw. größere Flächen aufgrund von zu weiten Überbrückungen, ein qualitätsentsprechendes Fertigen nicht mehr zulassen. Ob die Oberflächenrauheit  $S_a$  aufgrund der bei jedem Plättchen vorhandenen Randsupportstruktur repräsentativ ist, müsste in weiteren praxisnäheren Versuchen untersucht werden. Des Weiteren gelten die Erkenntnisse für den  $0^\circ$  Downskin. Es kann aufgrund von Erfahrungswerten jedoch angenommen werden, dass sich bei Winkeln  $> 0^\circ$  die Oberflächenqualität im Downskin zunehmend verbessert. Diese Untersuchungen stellen daher einen aussagekräftigen Trend bei Veränderung der Supportparameter dar und helfen beim Verständnis zur Auswahl sinnvoller Parameter.

Bei der Betrachtung von Abbildung 5.6 exemplarisch für den Blocksupport, ist ersichtlich, dass bei kleinerer Toplänge der Zähne, der Hatch eine deutlich geringere Wirkung auf die Oberflächenqualität ausübt. Daher empfiehlt es sich für die praktische Implikation, kleinere Verbindungsflächen zwischen dem Bauteil und der Stützstruktur zu bevorzugen, indem die Top-Zahnlänge bzw. der Radius minimiert wird. Weiterhin sollte die Auswahl des Hatch/Abstands auf Grundlage von Faktoren wie der vertikalen Haltekraft gegenüber Eigenspannungen oder der Wärmeleitfähigkeit getroffen werden. Dies gilt auch für den Baumsupport. Obwohl die Regressionsanalyse keinen signifikanten Einfluss der Parameter ergab, war dennoch die Oberflächenrauheit  $S_a$  gesamt betrachtet immer relativ niedrig ( $S_{a,min} = 70 \mu\text{m}$ , vgl.  $S_{a,max} = 92 \mu\text{m}$ ). Daher empfiehlt es sich auch bei diesem Supporttyp kleinere Radien der Äste zu bevorzugen und die Auswahl der Stammabstände nach Kriterien wie der vertikalen Haltekraft und Wärmeableitung zu treffen. Der Baumsupport weist im Vergleich zu anderen Supporttypen, wie dem Blocksupport, eine tendenziell niedrigere Oberflächenqualität auf und bietet den Vorteil, höhere Zugspannungen aufnehmen zu können, wie in Kapitel 4.2 ermittelt. Dies macht ihn besonders geeignet für Anwendungen, bei denen eine höhere mechanische Belastbarkeit erforderlich ist, ohne dabei maßgeblich die Integrität der Oberflächenstruktur zu beeinträchtigen.

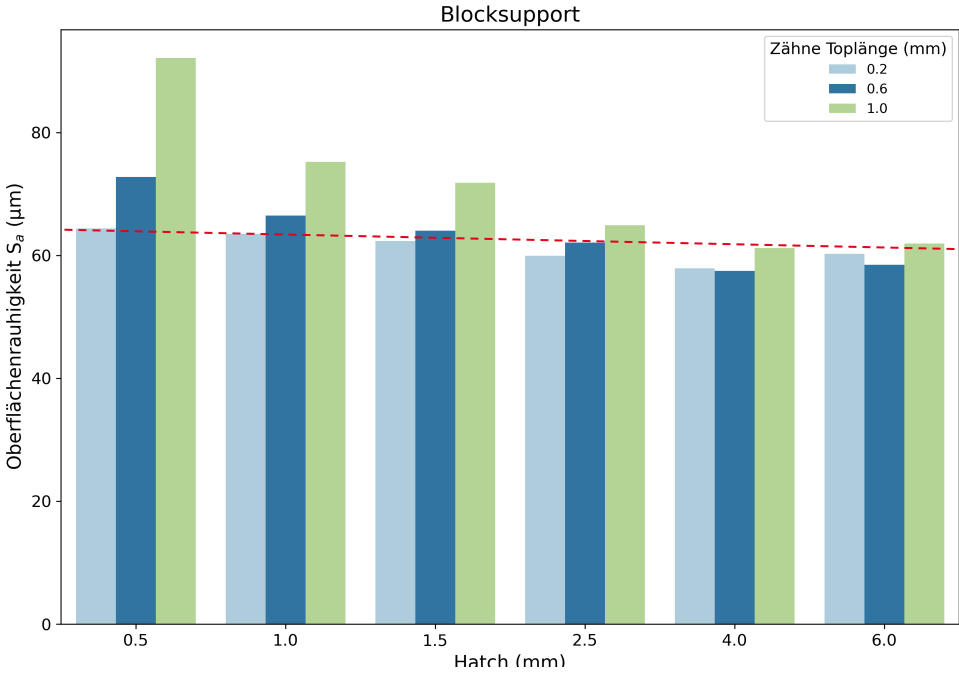


Abbildung 5.6: Minimale Veränderung der Oberflächenrauigkeit bei kleiner Top Zahnlänge und variierendem Hatch.

## 6 Auswahl geeigneter Stützstrukturen

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden in diesem Kapitel gezielte Handlungsempfehlungen für die Auswahl geeigneter Stützstrukturen bei der additiven Fertigung von dentalen Implantaten mittels selektivem Laserstrahlschmelzens vorgestellt. Die Auswahlkriterien fokussieren sich auf die Aspekte der Oberflächenqualität, einer effizienten Wärmeableitung und Minimierung des vertikalen Verzugs.

### 6.1 Aspekt der Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit ist wie bereits beschrieben ein wichtiger Faktor für die additive Fertigung dentaler Implantate, da sie die Osseointegration<sup>8</sup>, die Nachbearbeitungszeit und in gewissem Maße auch die mechanischen Eigenschaften beeinflussen kann. Die Ergebnisse aus Kapitel 5.3 zeigen, dass eine geringere Dichte der Stützstrukturen, erzielt durch größere Abstände (Hatch/Abstand), zu einer verbesserten Oberflächenqualität bei kleinen Flächen (10 mm x 10 mm) führt. Im Gegensatz dazu verschlechtert sich die Oberflächenqualität mit zunehmender Top-Zahnlänge bzw. Radius der Stützstrukturen, da dies zu größeren Kratern nach dem Entfernen der Stützstrukturen führt. Daher ist es ratsam, Stützstrukturen mit geringer Top-Zahnlänge (etwa 0,2 mm) und anwendungsspezifischen Abstand zu wählen (bis 6 mm), um die Oberflächenrauheit zu minimieren, jedoch gleichzeitig eine ausreichende Stabilität während des Druckprozesses sicherzustellen. Die Baumsupports lieferten im Durchschnitt eine relativ geringe Oberflächenrauheit  $S_a$  und eignen sich aufgrund ihrer effizienten Bauweise ebenfalls gut, um den Materialverbrauch und die Bauzeit zu minimieren. Jedoch ist hierbei auf eine eventuell höhere Nachbearbeitungszeit zu achten, da die Baumsupports oftmals aufgrund einer Spannungskonzentration zwischen Ast und Stamm brechen und somit einige Äste anschließend mühselig manuell entfernt werden müssen.

### 6.2 Effiziente Wärmeableitung

Eine adäquate Wärmeableitung ist entscheidend, um thermische Verzüge und Spannungen im Bauteil zu reduzieren. Die Ergebnisse aus Kapitel 5.2 legen nahe, dass Stützstrukturen, die eine effektive Wärmeableitung unterstützen, bevorzugt werden sollten. Jedoch ist dies vom Anwendungsfall und Position der Stützstrukturen abhängig. Hierbei bieten sich vor allem massivere Kegelsupports an, die eine stärkere Struktur aufweisen und eine größere Anbindungsfläche pro Anbindung besitzen. Diese Eigenschaften ermöglichen eine effizientere Wärmeabfuhr während des Bauprozesses und tragen zur Vermeidung von thermischen Spannungen und Verzug im Bauteil bei.

### 6.3 Minimierung des vertikalen Verzugs

Der vertikale Verzug während des Fertigungsprozesses beeinflusst die Passgenauigkeit und Funktionalität von dentalen Implantaten. Es hat sich gezeigt, dass Stützstrukturen aufgrund der auftretenden Kerbwirkung eine deutliche niedrigere Festigkeit aufweisen. Vor allem bei Block-, Kontur- und Baumsupports betrug die maximale Zugspannung nur etwa 1/5 im Vergleich zu Vollmaterial. Daher kann eine Kombination aus geringer Kerbwirkung (größere Anbindungsflächen) und angemessener Stützstrukturdichte dazu beitragen, den Verzug zu minimieren. Insbesondere sollten die Stützstrukturen so konzipiert werden, dass sie den während des Druckprozesses

---

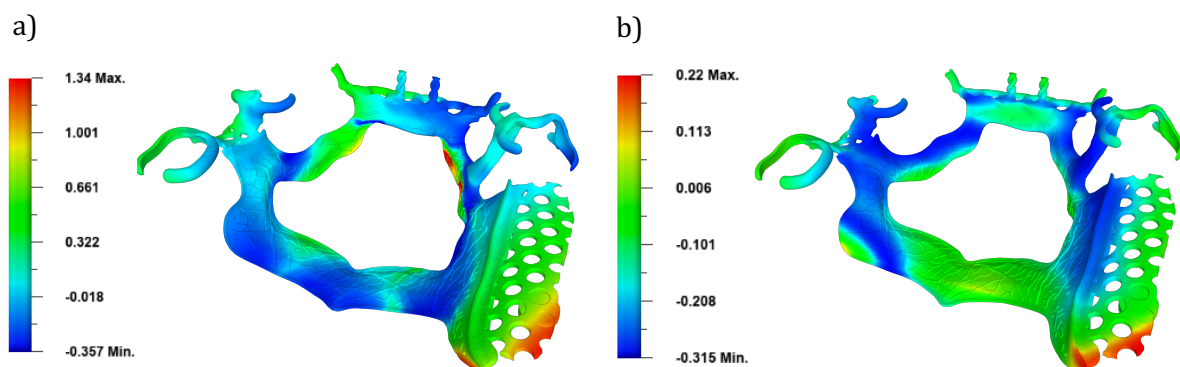
<sup>8</sup> Die Anbindung oder Verschmelzung des Implantats mit dem umgebenden Knochen.

auftretenden Kräften entgegenwirken können, ohne dabei die Oberflächenqualität negativ zu beeinflussen. Eine Methode um die auftretenden Kräfte vorab quantitativ zu identifizieren, wäre eine Verzugssimulation. Dadurch kann der Bauprozesses vorab simuliert werden und eine Prüfung der Stützstrukturen hinsichtlich Über- oder Unterdimensionierung erfolgen. Dies führt bei realitätsnahen Simulationen zu einer signifikanten Kosteneinsparung, indem es eine optimierte Auswahl und Positionierung von Stützstrukturen ermöglicht, anstatt sich auf eine Methode des „try and error“ zu verlassen.

## 7 Validierung der Ergebnisse anhand einer Modellgussprothese

Im Folgenden sollen die Ergebnisse anhand eines praxisnahen Anwendungsfall qualitativ validiert werden. Dazu wird eine sogenannte Modellgussprothese für den Oberkiefer verwendet und geeignete Stützstrukturen für dessen additive Fertigung mittels L-PBF ausgewählt. Diese Modellgussprothese weist sehr filigrane Eigenschaften auf und erfordert daher eine optimal verteilte Stützstruktur, um sowohl die Integrität der Oberfläche als auch die dimensional korrekten Maße der Prothese zu gewährleisten.

Die vertikale Positionierung im Bauraum bringt verschiedene Vorteile mit sich. Zum einen sind in dieser Orientierung die am wenigsten zu stützenden Flächen vorhanden, wodurch sich die Anzahl der Stützstrukturen minimiert. Des Weiteren zeigte eine Fertigungssimulation unter Verwendung von Autodesk Fusion 360, den geringsten Verzug in vertikaler Ausrichtung bei automatisch erstellten Stützstrukturen. Zusätzlich erhöht eine vertikale Ausrichtung die Packungsdichte auf der Bauplattform, wodurch in einem Bauprozess deutlich mehr Prothesen simultan gefertigt werden können, als in einer horizontalen Ausrichtung. Aus den in Kapitel 4.1 ermittelten Ergebnissen kann eine vertikale Ausrichtung zudem die Festigkeit des Bauteils positiv beeinflussen.



**Abbildung 7.1:** Darstellung der Verzugssimulation in Z-Richtung. Liegend in a) und vertikal in b).

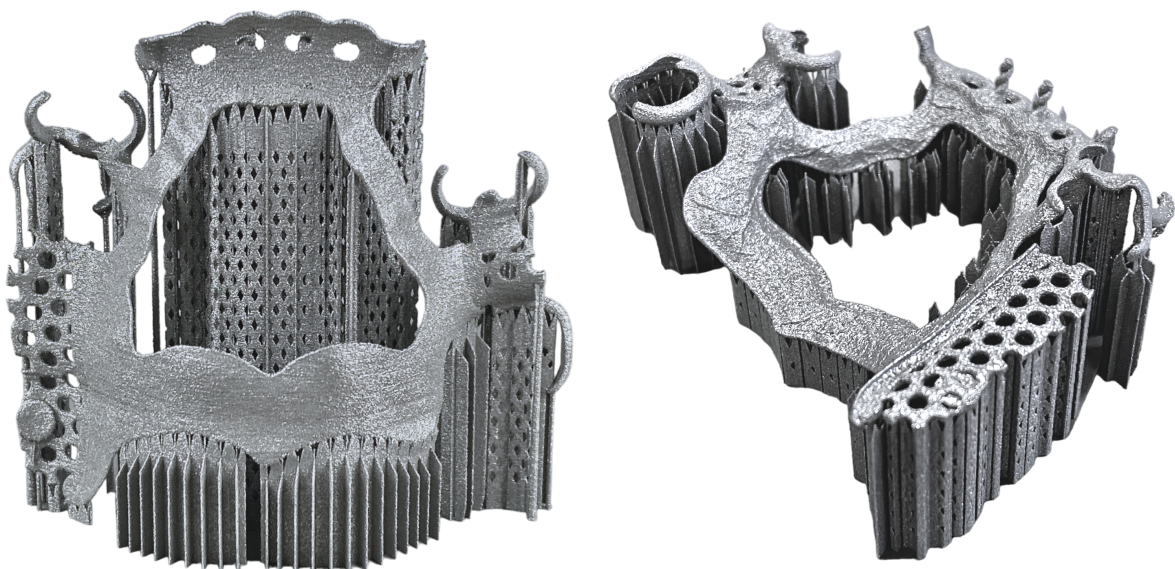
Bei der manuellen Erstellung der Stützstrukturen mittels Materialise Magics wurden zunächst Flächen mit einem Winkel  $< 40^\circ$  identifiziert. Anschließend wurden diese Flächen je nach Größe und Relevanz bezüglich Wärmeableitung und vertikalem Verzug mit entsprechenden Stützstrukturen versehen. Im unteren Downskin der Prothese wurde dabei auf eine gute Grundanbindung mit der Bauplattform geachtet, um ein Hochlösen zu vermeiden und eine gute Wärmeableitung zu gewährleisten. Dabei kamen aufgrund der sehr kleinen Flächen Linien- und Kegelsupports zum Einsatz. Bei vergleichsweise größeren Downskinflächen wurden Blocksupports verwendet, jedoch darauf geachtet, diese nicht zu überdimensionieren, indem die Top Zahnlänge aufgrund der

ermittelten Ergebnisse auf 0,2 mm und der Hatch auf 1 mm gesetzt wurde. Im oberen Teil der Prothese wurden aufgrund der effizienten Struktur Baumsupports eingesetzt, die eine Minimierung des Stützmaterials und der Bauzeit bei gleichzeitiger anwendungsausreichender Haltekraft und Oberflächenqualität liefern.

In Abbildung 7.2 ist die mit optimierten Supports gefertigte Modellgussprothese im „as-built“ Zustand dargestellt. Es ist qualitativ zu erkennen, dass die Stützstrukturen ausreichend dimensioniert wurden. Verzug oder ein Ablösen von der Bauplattform war visuell nicht zu erkennen. Ebenso Verfärbungen durch Wärmestau waren nicht ersichtlich. Die Resultate verdeutlichen die praxisfähige Anwendung der Ergebnisse und tragen zu einer effizienteren Fertigung bei. Ein Vergleich mit Abbildung 7.3 der Modellgussprothesen mit automatisch erstellten Supports durch Materialise Magics, zeigt, dass diese deutlich ausgeprägter im Materialvolumen und in der Dichte sind. Gerade bei der horizontalen Version ist eine fast vollständige Unterstützung der Downskinflächen nötig, was den Materialverbrauch deutlich erhöht. Bei der vertikalen Ausführung ist zudem visuell eine Deformation im unteren Bereich zu erkennen. Im genauere Details über den Verzug und die Oberflächenqualität zu erlangen sind weitere Untersuchungen nötig.

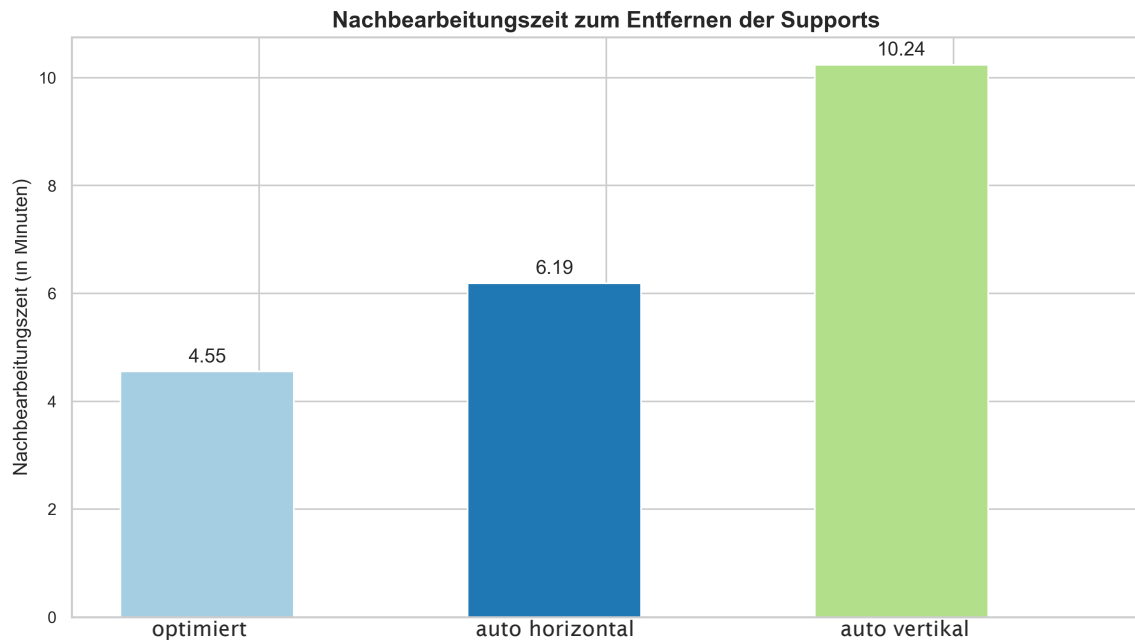


**Abbildung 7.2:** Modellgussprothese mit optimierten Supports im „as-built“ Zustand.

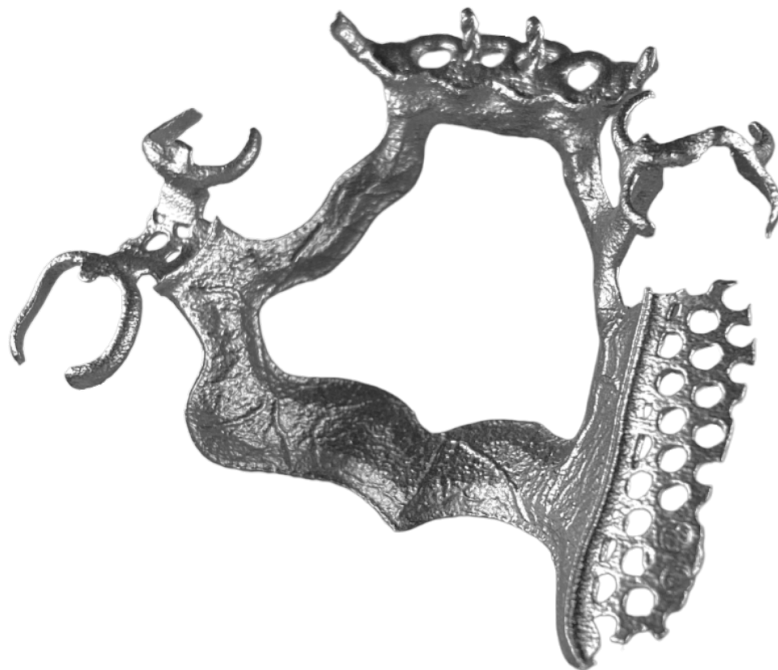


**Abbildung 7.3:** Modellgussprothese mit automatischen Magics Supports (vertikal und horizontal „as-built“).

Die unterschiedlichen Stützstrukturen machten sich auch im Post-Processing während des Ablösens der Supports bemerkbar. Gegenüber den mit automatisch erstellten Supports in horizontaler und vertikaler Ausrichtung, konnte die Modellgussprothese mit optimierten Supports deutlich weniger Nachbearbeitungsaufwand und -zeit erzielen. So konnte die Prothese mit den optimierten Supports etwa 55 % schneller gegenüber der horizontalen und etwa 26 % schneller gegenüber der vertikalen mit automatischen Supports entfernt werden. Qualitativ betrachtet waren zudem die Oberflächen an denen die automatischen Supports Anbindung hatten, von deutlich schlechterer Qualität. Auch nach kurzem Strahlen (ca. 2 min) war vor allem bei der horizontalen Ausrichtung mit automatisch erstellten Stützstrukturen die Oberflächenqualität deutlich schlechter im Vergleich zu den optimierten Stützstrukturen (siehe Abbildung 7.6).

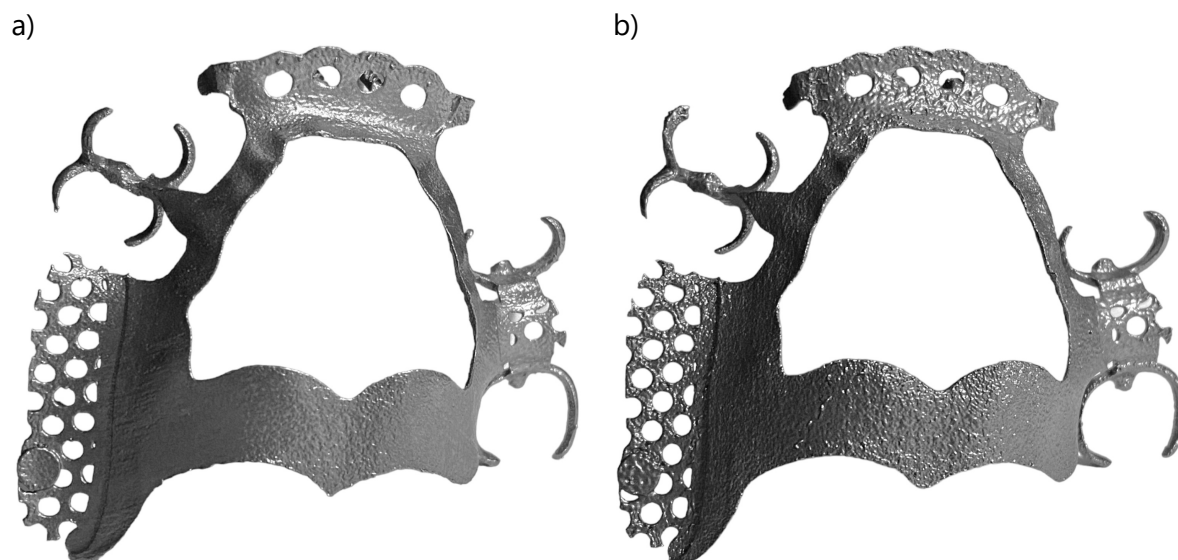


**Abbildung 7.4:** Nachbearbeitungszeit zum Entfernen der Supportstrukturen.



**Abbildung 7.5:** Modellgussprothese nach Ablösen der optimierten Supports und Strahlen.





**Abbildung 7.6:** Deutlich erkennbare Verbesserung der Oberflächenqualität mit Hilfe der optimierten Stützstrukturen in vertikaler Ausrichtung in a) im Vergleich zur horizontalen Ausrichtung mit automatischen Stützstrukturen in b). Nach dem Strahlen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse

In der vorliegenden Arbeit wurden quantitative Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Stützstrukturen auf die mechanischen Eigenschaften und die Oberflächenqualität von additiv gefertigten Ti-6Al-4V Grade 23-Proben mittels selektivem Laserstrahlschmelzen durchgeführt. Die Versuche umfassten die Analyse der mechanischen Eigenschaften von Zugproben, der Stützstrukturstärke und der Oberflächenrauheit  $S_a$  verschiedener Stützstrukturen, sowie eine abschließende Betrachtung zur Auswahl geeigneter Stützstrukturen für die Fertigung einer Modellgussprothese.

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigten, dass die mechanischen Eigenschaften der Proben in Abhängigkeit von der Bauteilorientierung und der Position im Bauraum variierten. Insbesondere wiesen Proben in vertikaler Orientierung ( $90^\circ$ ) im Vergleich zu horizontalen ( $0^\circ$ ) und diagonalen ( $45^\circ$ ) Orientierungen höhere Zugfestigkeiten auf, was auf unterschiedliche Abkühlraten und resultierende Mikrostrukturen zurückgeführt wurde. Die Untersuchung der Stützstrukturstärke ergab signifikante Unterschiede in der maximalen Zugspannung zwischen den verschiedenen Stützstrukturtypen und insgesamt eine deutlich geringere Zugfestigkeit im Vergleich zu den vorherigen Zugproben aus Vollmaterial. Kegelsupports zeigten eine deutlich höhere Zugspannung als Block-, Kontur- und Baumsupports, was auf eine geringere Kerbwirkung und eine effektivere Lastverteilung zurückzuführen ist.

Bei der Analyse der Oberflächenqualität wurde festgestellt, dass eine Vergrößerung des Hatch/Abstands generell zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität führte, während eine Vergrößerung der Top-Zahnlänge bzw. des Radius eine Verschlechterung bewirkte. Des Weiteren ergab die Untersuchung, dass kleinere Zahn Toplängen bzw. Radien der Stützstrukturen bevorzugt werden sollten und die Dichte der Strukturen nach Wärmeableitung und mechanischen Eigenschaften eingestellt werden sollte. Dies basiert auf der Beobachtung, dass die Wechselwirkung zwischen den Parametern zur Folge hat, dass die Oberflächenrauheit bei geringeren Zahn Toplängen bzw. Radien bei Variation des Hatch/Abstands relativ konstant bleibt. Die Studie unterstrich die Notwendigkeit, Stützstrukturen hinsichtlich ihrer Dichte und Geometrie sorgfältig auszuwählen, um sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch die Oberflächenqualität optimieren zu können.

Als Abschluss wurde die Wirksamkeit und Praxistauglichkeit der ermittelten Ergebnisse für die additive Fertigung von Modellgussprothesen mittels L-PBF validiert. Die Fokussierung lag dabei auf der Optimierung der Stützstrukturen für eine Modellgussprothese des Oberkiefers, um deren Oberflächenintegrität und maßliche Genauigkeit sicherzustellen. Die Ergebnisse zeigen, dass die vertikale Positionierung der Prothesen im Bauraum signifikante Vorteile bietet, insbesondere hinsichtlich der Minimierung des Stützmaterialbedarfs, der Reduzierung des Verzugs, Erhöhung der Zugfestigkeit und der Steigerung der Produktionskapazität durch eine erhöhte Packungsdichte.

Durch den Einsatz von Software zur Simulation und manueller Optimierung mittels Materialise Magics konnte eine effiziente Gestaltung der Stützstrukturen realisiert werden. Insbesondere die Anpassung der Stützstrukturen an die spezifischen Anforderungen der verschiedenen Bereiche der Prothese – wie der Einsatz von Linien- und Kegelsupports für kleinere Downskinflächen und von Baumsupports für den oberen Teil der Prothese – führte zu einer visuell und qualitativ betrachteten Verbesserung der Fertigungsqualität. Dies wurde durch den erfolgreichen Druck einer

Modellgussprothese demonstriert, bei dem kein sichtbarer Verzug oder Ablösen von der Bauplattform festgestellt wurde, was die Effektivität der optimierten Stützstrukturen bestätigt.

Die Gegenüberstellung von automatisch generierten Stützstrukturen mit den manuell optimierten Strukturen unterstreicht die Bedeutung der gezielten Anpassung. Während automatisch erstellte Supports tendenziell ein höheres Materialvolumen und eine größere Dichte aufwiesen, was insbesondere bei horizontaler Ausrichtung zu einem unnötig hohen Materialverbrauch mit hoher Nachbearbeitung der Downskinflächen führte, bewiesen die manuell optimierten Stützstrukturen ihre Überlegenheit in Bezug auf Materialökonomie, Oberflächenqualität und strukturelle Effizienz.

Insgesamt liefern die Ergebnisse dieser Untersuchungen wichtige Einblicke in die komplexen Wechselwirkungen zwischen Stützstrukturen, Bauteilorientierung, Position im Bauraum und deren Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften und die Oberflächenqualität von additiv gefertigten Ti-6Al-4V-Prothesen. Sie zeigen, dass durch eine gezielte Auswahl und Optimierung der Stützstrukturen sowohl die Festigkeit als auch die Oberflächenbeschaffenheit von L-PBF-gefertigten Bauteilen signifikant beeinflusst werden können. Insbesondere die Verwendung von Kegelsupports für Bereiche mit hohen mechanischen Anforderungen und die Optimierung des Hatch/Abstands zur Verbesserung der Oberflächenqualität erscheinen für die praktische Anwendung als brauchbaren Aspekt. Die Erkenntnisse tragen dazu bei, den additiven Fertigungsprozess weiter zu optimieren und die Anwendungsmöglichkeiten von L-PBF-gefertigten Ti-6Al-4V-Bauteilen, insbesondere im medizinischen Bereich, zu erweitern und wirtschaftlicher zu gestalten.

Für eine effektive Anwendung von Stützstrukturen im L-PBF-Prozess ist eine sorgfältige Abwägung zwischen den Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften, der Oberflächenqualität und der Fertigungseffizienz erforderlich. Zukünftige Forschungen sollten sich auf die weitere Optimierung von Stützstrukturen, die Untersuchung der Prozessparameter und der weiteren Entwicklung von Richtlinien für die praktische Anwendung konzentrieren, um die Potenziale der additiven Fertigung voll ausschöpfen zu können.

### **8.2 Ausblick auf weiterführende Forschungsansätze**

Im Verlauf dieser Arbeit wurde die Komplexität der L-PBF-Technologie und die Notwendigkeit eines tiefgreifenden, interdisziplinären technischen Verständnisses für eine erfolgreiche Anwendung verdeutlicht. Vor diesem Hintergrund ergeben sich weiterführende Forschungsansätze für die Weiterentwicklung und Optimierung dieser Technologie, insbesondere im Hinblick auf Stützstrukturen.

Durch erweiterte und integrierte Simulationstechniken in die Datenvorbereitungsprogramme kann vorab das Verhalten von Stützstrukturen und die Positionierung dieser präziser vorhergesagt werden. Dies könnte die Simulation von Wärmeverteilung, Schmelzverhalten und Abkühlungsprozessen, die direkt die Qualität der gefertigten Bauteile beeinflussen, enthalten. Solche Simulationen ermöglichen es, den Fertigungsprozess im Vorfeld zu optimieren, was zu einer Reduktion der Materialverschwendung, einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Bauteile und einer Verringerung der notwendigen Nachbearbeitung führt. Anhand dieser Simulationsergebnisse steht die Automatisierung der Stützstrukturerstellung im Fokus. Da bislang weitestgehend die automatische Erzeugung anhand der Größe und Neigung der Downskinflächen erstellt wurde, bietet die Integration der erweiterten Simulationsergebnisse, wie der Wärmeverteilung und der auftretenden Eigenspannungen, eine deutlich präzisere und effizientere Gestaltung der Stützstrukturen. Ein weiterer Aspekt ist die Nutzung von

maschinellern Lernen, bei der die Bauteilorientierung und Stützstrukturerstellung durch künstliche Intelligenz optimal für den Anwendungsfall erstellt wird. Auch im Post-Processing sollten weitere Ansätze zur (automatisierten) chemischen und mechanischen Entfernung der Stützstrukturen erarbeitet werden. Gerade bei filigranen Bauteilen ist dies von entscheidender Bedeutung, um die Oberfläche durch Rausreißen von Material und der Bildung von Kratern nicht zu beeinträchtigen, wie die Ergebnisse aus Kapitel 4.3 verdeutlichen. Schließlich ist auch die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit der additiven Fertigungsverfahren ein entscheidender Aspekt für die zukünftige Implementierung und Akzeptanz in der Industrie. Die Bewertung und Optimierung der Energieeffizienz des L-PBF-Prozesses und die Minimierung des Materialabfalls der gefertigten Bauteile bieten relevante Forschungsansätze. Durch die Entwicklung nachhaltigerer Fertigungsverfahren und die Verbesserung der Kosteneffizienz kann die additive Fertigung einen bedeutenden Beitrag zur industriellen Produktion leisten und gleichzeitig den Nachhaltigkeitsaspekt optimieren.

Insgesamt eröffnen die erläuterten Ansätze vielversprechende Perspektiven für die Weiterentwicklung dieser Technologie mit Fokus auf die Stützstrukturauswahl. Indem sie den Weg für innovative Ansätze in der Simulation, Automatisierung und Nachhaltigkeit bereitet, trägt sie maßgeblich dazu bei, die Grenzen des Laser-Strahlschmelzens zu erweitern und ihre Potenziale für die Industrie der Zukunft voll auszuschöpfen.

## 9 Literatur

- [1] A. Gebhardt, Produktgestaltung für die Additive Fertigung, München: Carl Hanser Verlag, 2019.
- [2] C. Klahn und M. Meboldt, Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung, Würzburg: Vogel Business Media GmbH & Co. KG, 2018.
- [3] A. Gebhardt, Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion, München: Carl Hanser Verlag, 2016.
- [4] PTC, „Ingenieur.de,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/3d-druck/duesentriebwerk-aus-dem-drucker/>. [Zugriff am 2023].
- [5] J. Kruse, „Institut für Integrierte Produktion Hannover,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.iph-hannover.de/de/dienstleistungen/fertigungsverfahren/additive-fertigung/>. [Zugriff am 6 September 2023].
- [6] Y.-C. Hagedorn, Additive Manufacturing of High Performance Oxide Ceramics via Selective Laser Melting, Aachen: Apprimus Verlag, 2013.
- [7] E. Wycisk, Ermüdungseigenschaften der laseradditiv gefertigten Titanlegierung TiAl6V4, Hamburg: Springer Verlag, 2017.
- [8] Trumpf, „TruPrint 1000,“ 2023. [Online]. Available: [https://www.trumpf.com/de\\_DE/produkte/maschinen-systeme/additive-fertigungssysteme/truprint-1000/](https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/maschinen-systeme/additive-fertigungssysteme/truprint-1000/). [Zugriff am 2023].
- [9] SLM Solutions, „SLM 500,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.slm-solutions.com/de/produkte-und-loesungen/maschinen/slm-500/>. [Zugriff am November 2023].
- [10] E. W. S.-W. Ha, Medizintechnik – Life Science Engineering, Springer, 2009.
- [11] T. B. E. M. C. R. J. E. F. N. B. Trina MajumdarI, Understanding the effects of PBF process parameter interplay on Ti-6Al-4V surface properties, PLOS ONE, 2019.
- [12] H. Singh, V. S. Sharma, S. Singh and M. Dogra, "Nanofluids assisted environmental friendly lubricating strategies for the surface grinding of titanium alloy: Ti6Al4V-ELI," ScienceDirect, 2018.
- [13] L. Cordova, C. Sithole, E. M. Rodríguez, I. Gibson and M. Campos, "Impact of powder reusability on batch repeatability of Ti6Al4V ELI for PBF-LB industrial production," Taylor & Francis, 2022.
- [14] W. C. MD, D. J. M. Bauk und R. H. J. M. Emerson, „Titanium As the Material of Choice for Cementless Femoral Components in Total Hip Arthroplasty,“ JB Lippincott Company, Philadelphia, 1995.
- [15] A. Clausing, „Synthese und Charakterisierung Niob- und Tantal-dotierter Zinnoxide als potentielle Katalysatorträgermaterialien für Brennstoffzellen,“ Chemnitz, 2018.
- [16] S. Brauer, „Medtech Online,“ 23 03 2021. [Online]. Available: <https://medteconline.de/info/magazine/wiki/stress->



- [34] KEYENCE CORPORATION, „Keyence,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.keyence.de/ss/products/microscope/roughness/surface/parameters.jsp>. [Zugriff am 2 Januar 2024].
- [35] T. A. Axel M. Gressner, Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik, Berlin, Heidelberg: Springer, 2019.
- [36] V. Seyda, Werkstoff- und Prozessverhalten von Metallpulvern in der laseradditiven Fertigung, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.
- [37] L. F. J. V. V. P. M. M. R. B. L. J.P. Kruth, „Selective laser melting of iron-based powder,“ *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. Volume 149, Nr. 1-3, pp. 616-622, 2004.
- [38] C. L. S. D. R. D. Wenbin Ji, „Microstructure, Properties and Crack Suppression Mechanism of High-speed Steel Fabricated by Selective Laser Melting at Different Process Parameters,“ *Chinese Journal of Mechanical Engineering volume*, Bd. 36, p. 46, 2023.
- [39] S. Q. J. H. G. M. Cai W, „Multi-Perspective Analysis of Building Orientation Effects on Microstructure, Mechanical and Surface Properties of SLM Ti6Al4V with Specific Geometry,“ *Materials (Basel)*, 2021.
- [40] University of Cambridge, „MECHANICAL TESTING OF METALS,“ LibreTexts, Cambridge, 2021.
- [41] J. C. W. Gerd Lütjering, „Titanium,“ Springer Berlin, Berlin, 2007.
- [42] H. B. J.-P. W. M. M. C. E. Peter Nils Johannes Lindecke, „Optimization of support structures for the laser additive manufacturing of TiAl6V4 parts,“ ScienceDirect, Hamburg, 2018.
- [43] D. M. D. J. J. V. H. Wittel, Roloff/Matek Maschinenelemente, Augsburg: Springer Vieweg Verlag, 2023.
- [44] T. L. Anderson, Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [45] L. Löber, Selektives Laserstrahlschmelzen von Titanaluminiden und Stahl, Dresden, 2015.

## Anhang

**Tabelle 9.1:** Supportvariationen von Block- und Kontursupport.

Nr.	Stützstruktur	Hatch (x/y)	Zähne Toplänge	Anzahl Zähne/ Berührungsflächen
		[mm]	[mm]	<i>n</i> Zähne
1	Block	0,5	0,2	308
2	Block	1	0,2	154
3	Block	1,5	0,2	98
4	Block	0,5	0,6	308
5	Block	1	0,6	154
6	Block	1,5	0,6	98
7	Block	0,5	1	308
8	Block	1	1	154
9	Block	1,5	1	98
37	Block	2,5	0,2	56
38	Block	4	0,2	28
39	Block	6	0,2	14
40	Block	2,5	0,6	56
41	Block	4	0,6	28
42	Block	6	0,6	14
43	Block	2,5	1	56
44	Block	4	1	28
45	Block	6	1	14
46	Block		/	0
10	Kontur	0,5	0,2	128
11	Kontur	1	0,2	84
12	Kontur	1,5	0,2	62
13	Kontur	0,5	0,6	128
14	Kontur	1	0,6	84
15	Kontur	1,5	0,6	62
16	Kontur	0,5	1	128
17	Kontur	1	1	84
18	Kontur	1,5	1	62
49	Kontur	2,5	0,2	42
50	Kontur	4	0,2	33 (0, nur Rand)
51	Kontur	6	0,2	26
52	Kontur	2,5	0,6	42
53	Kontur	4	0,6	33 (0, nur Rand)



## Anhang

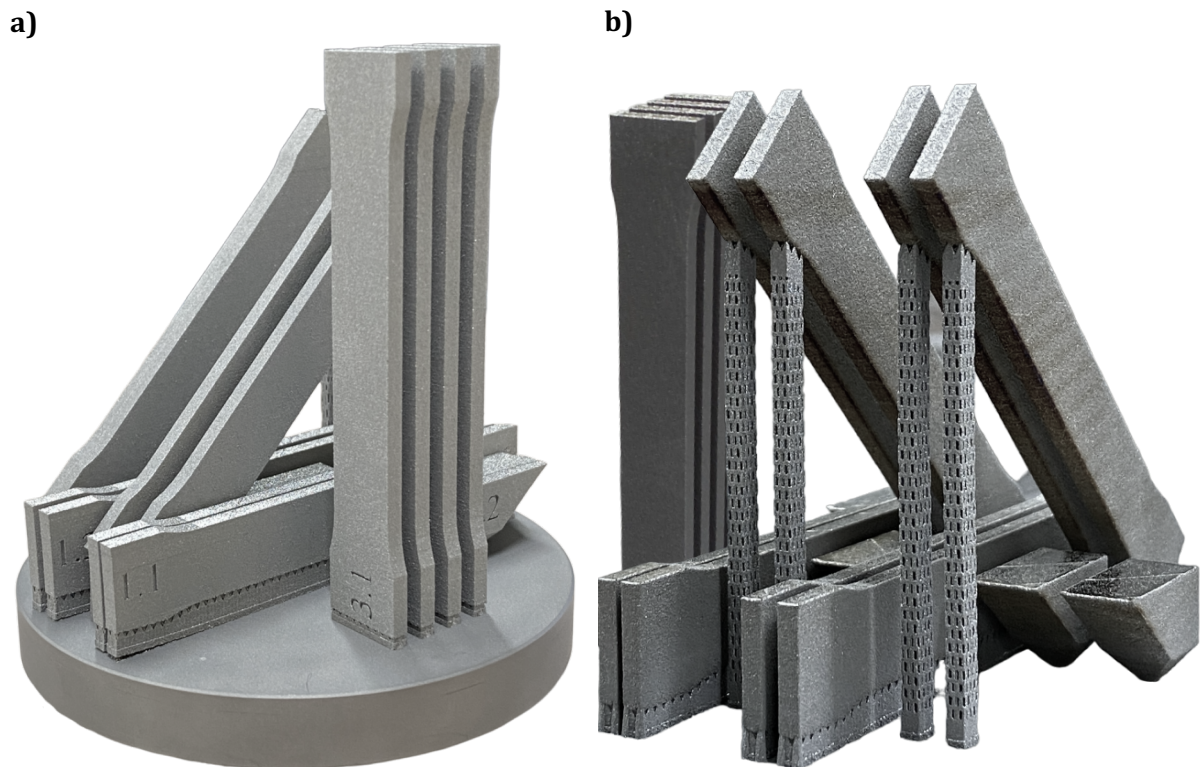
54	Kontur	6	0,6	26
55	Kontur	2,5	1	42
56	Kontur	4	1	33 (0, nur Rand)
57	Kontur	6	1	26

**Tabelle 9.2:** Supportvariationen von Kegel- und Baumsupport.

Nr.	Stützstruktur	Abstand (x/y)	Radius	Anzahl Berührungsflächen
		[mm]	[mm]	<i>n</i> Berührungsflächen
19	Kegel	0,8	0,2	25
20	Kegel	1,7	0,2	16
21	Kegel	2	0,2	12
22	Kegel	0,8	0,4	25
23	Kegel	1,4	0,4	16
24	Kegel	2	0,4	12
25	Kegel	0,8	0,6	25
26	Kegel	1,4	0,6	16
27	Kegel	1,8	0,6	12
58	Kegel	3	0,2	9
59	Kegel	4	0,2	5
60	Kegel	6	0,2	4 (0, nur Rand)
61	Kegel	3	0,4	9
62	Kegel	4	0,4	5
63	Kegel	6	0,4	4 (0, nur Rand)
64	Kegel	3	0,6	9
65	Kegel	4	0,6	5
66	Kegel	6	0,6	4 (0, nur Rand)
28	Baum	0,8	0,3	100
29	Baum	1,2	0,3	64
30	Baum	1,8	0,3	36

## Anhang

31	Baum	0,7	0,4	100
32	Baum	1,1	0,4	64
33	Baum	1,6	0,4	36
34	Baum	0,662	0,5	100
35	Baum	0,9	0,5	64
36	Baum	1,4	0,5	36
67	Baum	2	0,3	25
68	Baum	3	0,3	16
69	Baum	8	0,3	4 (0, nur Rand)
70	Baum	2	0,4	25
71	Baum	3	0,4	16
72	Baum	8	0,4	4 (0, nur Rand)
73	Baum	2	0,5	25
74	Baum	3	0,5	16
75	Baum	8	0,5	4 (0, nur Rand)



**Abbildung 9.1:** Zugproben TruPrint 1000 in a) und Zugproben SLM 500 in b).

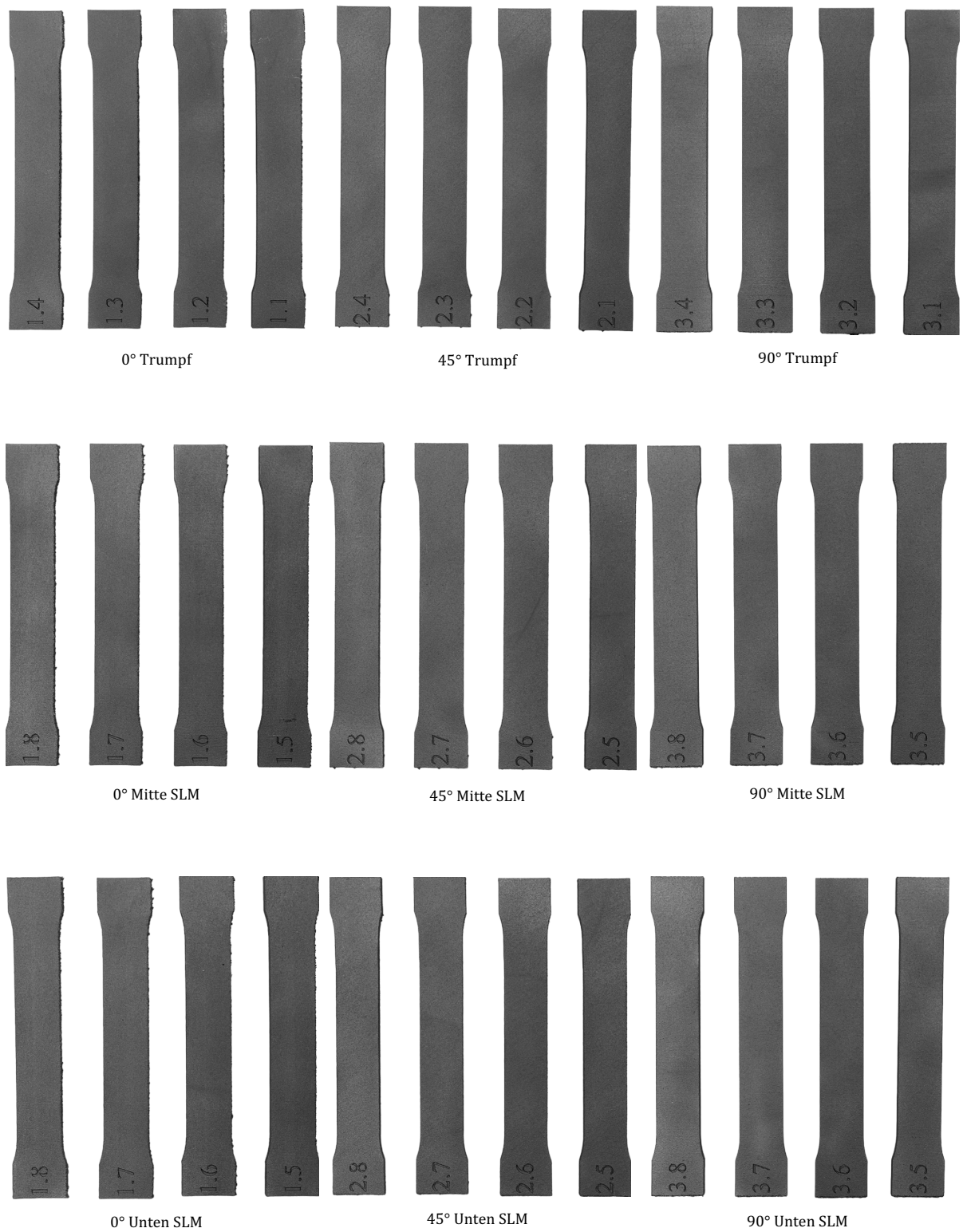
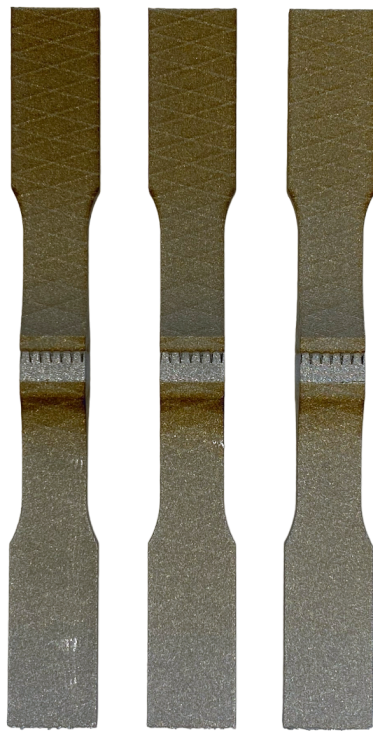
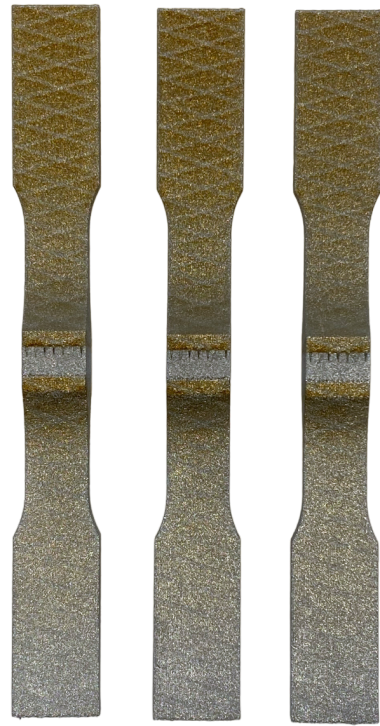


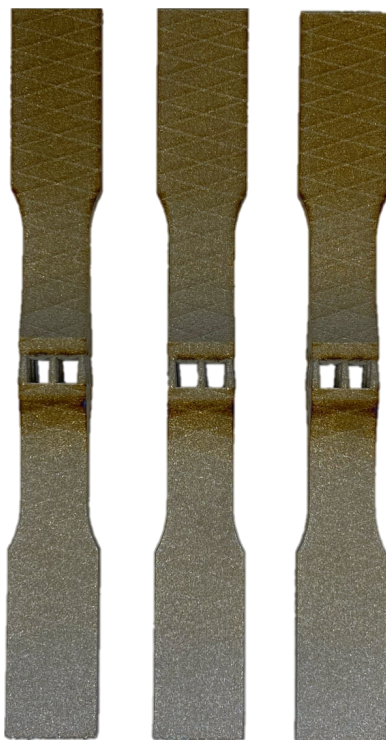
Abbildung 9.2: Gefertigte Zugproben.



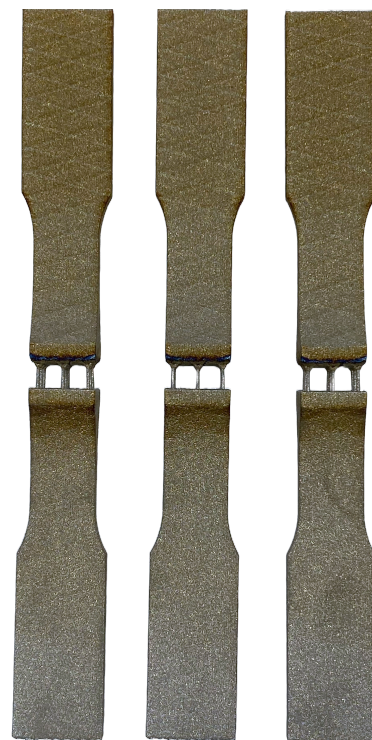
Blocksupport



Kontursupport

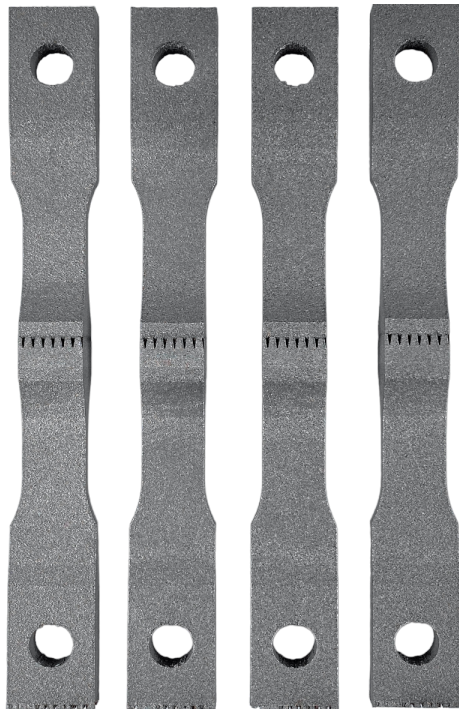


Kegelsupport

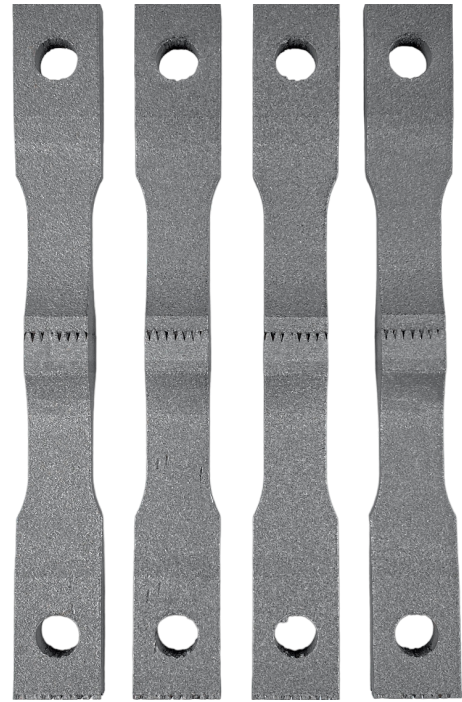


Baumsupport

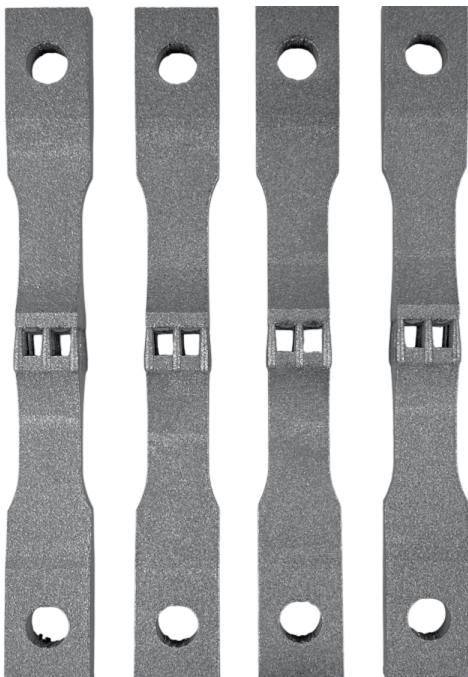
**Abbildung 9.3:** Gefertigte Zugproben mit Supports ohne Adaptereinspannung.



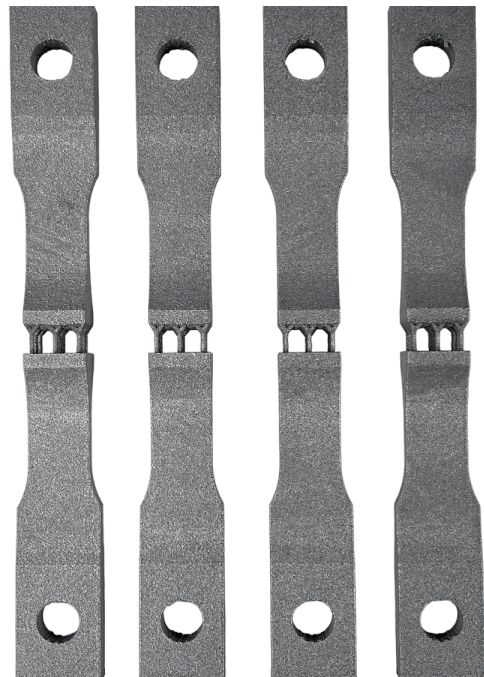
Blocksupport



Kontursupport



Kegelsupport



Baumsupport

**Abbildung 9.4:** Gefertigte Zugproben mit Supports und Splintloch.



## 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:  \_\_\_\_\_

Vorname:  \_\_\_\_\_

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

**Ermittlung geeigneter Stützstrukturen hinsichtlich vertikaler Haltekraft und Oberflächenqualität für die Additive Fertigung dentaler Implantate mittels selektiven Laser-Strahlschmelzens**

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 \_\_\_\_\_ ist erfolgt durch:

Hamburg \_\_\_\_\_  
Ort

 \_\_\_\_\_  
Datum

 \_\_\_\_\_  
Unterschrift im Original