

**Methodik zur Evaluierung von Auswirkungen der
geometrischen Komplexität auf die Produktivität additiver
Fertigungsverfahren am Beispiel des Selektiven Lasersinterns**

Dissertation

Zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

vorgelegt von

Tobias Christoph Häfele

Saarbrücken

2025

Tag des Kolloquiums: 19.05.2024

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
Prof. Dipl.-Phys. Dr.-Ing. Andreas Otto

Vorsitz: Prof. Dr-Ing. Dirk Bähre

Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Niklas König

Kurzzusammenfassung

Als einer der bedeutendsten Vorteile Additiver Fertigungsverfahren wird häufig die Gestaltungsfreiheit genannt. Jedoch bestehen Herausforderungen, da die suggerierte Gestaltungsfreiheit meist ohne Berücksichtigung der verschiedenen Verfahren und Wirkprinzipien dargestellt wird. Dabei zeigt sich im Vergleich unterschiedlicher Verfahren, dass die zu erzeugende Geometrie zum Teil signifikante Auswirkungen auf den Produktionsaufwand in Form von Zeit und Kosten hat.

Mit der vorliegenden Arbeit werden diese Problemstellungen aufgegriffen und eine Methodik entwickelt, welche die Evaluierung von Auswirkungen der geometrischen Komplexität auf den additiven Herstellprozess ermöglicht. Demonstriert wird die Methodik am Verfahren des Selektiven Lasersinterns (SLS) für Kunststoffe. Der Fokus liegt dabei auf der Analyse von Zusammenhängen zwischen geometrischen Einflussfaktoren, Prozessparametern sowie resultierenden Produktionsaufwänden.

Unter Beibehaltung von Randbedingungen wie dem Bauteilvolumen und der Bauhöhe wird gezeigt, dass sich die Generierdauer durch Steigerung der Komplexität zum Teil mehr als verdreifacht. Mithilfe der entwickelten Methodik können diese Auswirkungen direkt auf das Wechselspiel aus Geometrie und prozessspezifischen Faktoren, wie den Laserscanpfaden zurückgeführt werden. Folglich ist eine quantitative Kategorisierung der Komplexität in Abhängigkeit des Verfahrens möglich, die zusätzlich Rückschlüsse zur Gestaltung von Bauteilen und Bauaufträgen gewährt.

Abstract

Freedom of design is often cited as one of the major advantages of additive manufacturing. However, challenges remain, as the supposed freedom of design is usually presented without considering the various processes and operating principles. The comparison of different processes shows that the geometry to be produced sometimes has a significant impact on production effort in terms of time and costs.

In this work, these challenges are addressed and a methodology is developed to assess the impact of geometric complexity on additive manufacturing processes. The methodology is demonstrated using the Selective Laser Sintering (SLS) for plastics. The focus is on the analysis of correlations between geometric influencing factors, process parameters and the resulting production effort.

While maintaining boundary conditions such as part volume and build height, the results reveal that the generation time is more than tripled in some cases due to an increase in complexity. By using the developed methodology, these effects can be linked directly to the interaction of geometry and process-specific factors, such as the laser scan paths. Consequently, a quantitative categorization of the complexity in relation to the specific process is possible, which also allows conclusions to be made with regard to the design of parts and build jobs.

Vorwortⁱ

Die vorliegende Arbeit entstand begleitend zu meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor Industrielle Produktion der htw saar und dem Lehrstuhl für Produktentstehung der Universität des Saarlandes. Auf diesem Weg haben mich eine Vielzahl von Menschen unterstützt, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Bedanken möchte ich mich daher zunächst bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing Michael Vielhaber, der mich in seinen Lehrstuhl aufgenommen hat und mir seit 2018 die Chance zur Promotion ermöglicht hat. Die Freiheit zur Ausgestaltung des Themas sowie seine Unterstützung bei der wissenschaftlichen und inhaltlichen Umsetzung dieser Arbeit haben maßgeblich zum Gelingen der Promotion beigetragen.

Darüber hinaus bedanke mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Griebisch, der mich seit Studienbeginn 2010 als Chef und Mentor begleitet hat und maßgeblich zu meiner Entwicklung beigetragen hat. Durch ihn habe ich die Chance erhalten in das Themenfeld der Additiven Fertigung einzusteigen, mich dort zu entfalten und meine Kenntnisse in Lehre, Forschung und Industrie weiterzugeben.

Ein weiterer Dank gebührt Herrn Prof. Dipl.-Phys. Dr.-Ing. Andreas Otto von der Technischen Universität Wien für das Interesse an meiner Arbeit und die daraus resultierende Übernahme des Zweitgutachtens. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing Walter Calles, der mich bereits ab dem ersten Studiensemester unterstützt hat und maßgeblich zur persönlichen Entwicklung beigetragen hat. Herrn Prof. Dr. Gerald Kroisandt danke ich ebenfalls für die anregenden Diskussionen und sein Engagement bei der Durchsicht dieser Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen und Kolleginnen vom Lehrstuhl für Produktentstehung Uta Wilhelm, Pascal Stoffels, Jerome Kaspar, Simon Mörsdorf, Dominik Neumann, Christian König, Joshua Petry und Patrick Christoffel. Der offene Umgang miteinander sowie die unterschiedlichen Themengebiete und die gemeinsamen Aktivitäten haben die Zeit am Lehrstuhl sehr interessant und angenehm gestaltet. Ein großer Dank geht auch an meine Kollegen von der htw saar Matthias Wilbert, Marco Busse, Pascal Paulus und Yannick Ruppert, die mich zum Teil bereits seit Studienbeginn begleitet haben und maßgeblich zu meiner Entwicklung beigetragen haben.

ⁱ Aus Gründen der Lesbarkeit wird im Folgenden auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers verzichtet. Alle Formulierungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Herren Jan-Henrik Schneberger, Sören Buchholz, Carsten Kaldenhoff, Dr.-Ing. Tobias Speicher und Dr.-Ing. Daniel Lehser Pfeffermann, die durch ihre Diskussionsfreude und fachliche Beratung stark zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Meiner Mutter Frau Susanne Häfele, meiner Großmutter Frau Maria Grünwald und meinem Vater Herrn Hans Herrmann Häfele gilt hierbei mein größter Dank. Sie haben mir diesen Weg überhaupt ermöglicht und maßgeblich meine Kreativität und mein Wertesystem geprägt. Abschließend bedanke ich mich bei meiner Lebensgefährtin Madelaine Sternjakob, die mich über die Promotionsphase hinweg stets unterstützt und motiviert hat.

Tobias Häfele

Saarbrücken, den 01.01.2024

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis.....	I
II	Abbildungsverzeichnis.....	IV
III	Tabellenverzeichnis.....	VII
IV	Symbol- und Formelverzeichnis	IX
V	Abkürzungsverzeichnis	XII
1.	Einleitung.....	1
1.1.	Motivation	3
1.2.	Ziele und Struktur der Arbeit	8
1.2.1.	Positionierung und inhaltliche Abgrenzung	9
1.2.2.	Forschungsfragen	11
1.2.3.	Vorgehensweise und Struktur der Arbeit.....	12
2.	Grundlagen und Stand der Technik.....	15
2.1.	Definition zentraler Begriffe	15
2.2.	Additive Fertigung.....	18
2.2.1.	Definition und Eigenschaften	19
2.2.2.	Industrielle kunststoffbasierte AM-Verfahren	20
2.3.	Selektives Lasersintern	26
2.3.1.	Prozessablauf.....	27
2.3.2.	Material	34
2.3.3.	Prozessparameter.....	35
2.3.4.	Modelle zum Energieeintrag	42
2.3.5.	Bauteileigenschaften	44
2.3.6.	Wechselwirkungen der Prozessparameter mit der Bauteilgeometrie.....	45
2.4.	Ressourcenaufwand und wirtschaftliche Aspekte des SLS.....	51
2.4.1.	Herstellkosten.....	51
2.4.2.	Materialkosten und Prozessdauer.....	53
2.4.3.	Fertigungskosten und Personalkosten	59

2.5. Komplexität.....	64
2.5.1. Begriffsdefinition Komplexität.....	64
2.5.2. Methoden zur Evaluierung der Komplexität	69
2.5.3. Geometrische Attribute, Kennzahlen und Zielgrößen	81
2.6. Methoden zur Modellbildung, Versuchsplanung und Analyse	83
2.7. Bauteilgestaltung und Konstruktionsrichtlinien	86
3. Ableitung des Handlungsbedarfs	91
3.1. Erkenntnisse aus den Analysen	91
3.2. Ableitung des Forschungsbedarfs und Berücksichtigung in dieser Arbeit	94
4. Methodik zur Evaluierung des Komplexitätseinflusses auf das SLS	96
4.1. Aufbau und Struktur der Methodik	96
4.2. Systemanalyse und Prozessmodellbildung.....	98
4.3. Versuchsmethodik und -planung.....	101
4.3.1. Parameter und Faktoren	101
4.3.2. Versuchsausstattung und Prämissen.....	104
4.3.3. Konzeption der Versuchsproben und Versuchsplanung	109
4.4. Versuchsdurchführung	117
4.4.1. V1 - Vorversuch (Formiga P100).....	117
4.4.2. V2 - Packdichte	122
4.4.3. V3 - Bauteilorientierung	124
4.4.4. V4 - Bauteilgröße	131
4.4.5. V5 - Volumenreduktion	133
4.4.6. V6 - Vorversuch (Farsoon HT403P).....	136
4.4.7. V7 - Prozessparameter	139
4.4.8. V8 - Scanvektoren/Bearbeitungspfade	144
4.5. Bewertung der Auswirkungen auf die Prozesskette	151
4.5.1. Qualitative Bewertung des Herstellprozesses.....	151
4.5.2. Quantitative Bewertung der Herstellkosten	153
4.6. Ergebniszusammenfassung	156
4.6.1. Maschine, Material und Bauteilgeometrie.....	156
4.6.2. Methodik/Kennzahlen	158

4.6.3. Verfahrensspezifische Definition der Komplexität für das SLS	160
4.6.4. Anwendungsmöglichkeiten	161
5. Validierung der Methodik.....	165
5.1. Szenario 1 - Kategorisierung von Bauteilen.....	165
5.2. Szenario 2 - Auswirkungen für die Serienfertigung.....	172
5.3. Szenario 3 - Transfer auf das FFF-Verfahren (Markforged Mark II)	175
6. Zusammenfassung und Ausblick	178
6.1. Zusammenfassung	178
6.2. Ausblick.....	183
6.3. Transfer der Ergebnisse	185
7. Literaturverzeichnis.....	187
A Anhang	201
A.1 Berechnungen.....	201
a. Wirtschaftlichkeitskalkulation, inkl. Prämissen.....	201
A.2 Tabellen	205
a. Maschinenparameter	205
b. Versuchsdaten	205
A.3 Wissenschaftliche Veröffentlichungen	217
A.4 Betreute wissenschaftliche Abschluss- und Projektarbeiten im Themenumfeld	218

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anwendungszwecke	3
Abbildung 2: Gitterstrukturen zur Materialeinsparung	4
Abbildung 3: Vergleich konventioneller und additiver Fertigungsverfahren	5
Abbildung 4: Komplexitätssteigerung durch Fragmentierung von Flächen	6
Abbildung 5: Strukturen mit gleichem Bauteilvolumen und unterschiedlicher Komplexität.....	7
Abbildung 6: Struktur der Arbeit.....	12
Abbildung 7: Auswahl von Kunststoff-AM-Verfahren.....	21
Abbildung 8: Schematische Darstellung ausgewählter AM-Verfahren	22
Abbildung 9: Ausgewählte AM-Verfahren im Hinblick auf deren Bearbeitungsweise	23
Abbildung 10: Struktur des SLS-Kapitels	26
Abbildung 11: Grundlegende Parameter im Rahmen dieser Arbeit	27
Abbildung 12: Prozessablauf des SLS mit Kunststoffen	27
Abbildung 13: Unterschied der Geometrietreue bei niedriger und hoher Auflösung.....	28
Abbildung 14: Einfluss der Orientierung auf die Bearbeitungspfade	29
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Prozesskammer und des Prozessablaufs.....	31
Abbildung 16: Darstellung des Scanlinienabstands	38
Abbildung 17: Schematische Darstellung für Belichtungsflächen und Bearbeitungspfade	39
Abbildung 18: Kostenstruktur des additiven Herstellprozesses	53
Abbildung 19: Zusammensetzung der Aufbaurrate	54
Abbildung 20: Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung für den wirtschaftlichen Verfahrensvergleich.....	63
Abbildung 21: Ausgewählte geometrische Freiheiten gegenüber herkömmlichen Verfahren am Beispiel einer Aixbox und eines Spoilers des Saar Racing Teams und des Evolution Racing Teams Saar	67
Abbildung 22: Komplexitätssteigerung durch Fragmentierung von Flächen	69
Abbildung 23: (1-2) Bauteilvolumen zu Bounding Box Volumen, (3-4) Anzahl der Dreiecke.....	70
Abbildung 24: Ausgewählte Bauteilschichten verschiedener Strukturen	76
Abbildung 25: Aufbau der Methodik.....	97
Abbildung 26: Systemeingänge und Systemausgänge.....	98
Abbildung 27: Modell des SLS-Prozesses zur Identifikation der Kosten- und Zeittreiber	99
Abbildung 28: Zeit-/und Kostentreiber für die SLS-Anlagen P100 und HT403P	100

Abbildung 29: Schichtinformationen einer Gitterstruktur.....	102
Abbildung 30: Baufläche und Packdichte nach verschiedenen Definitionen	108
Abbildung 31: Schematischer Versuchsablauf	111
Abbildung 32: Menger Schwamm in den Stufen null bis fünf	113
Abbildung 33: Prüfkörper „Fragment“ in zwei Volumenvarianten.....	114
Abbildung 34: Schematische Darstellung der Versuchsgeometrien und des Baujobs	118
Abbildung 35: Schichtdauer für unterschiedliche Komplexitätsgrade – EOS Formiga P100	118
Abbildung 36: Scanvektoren für die Bauteile Würfel, Würfel45° und Zylinder in Stufe eins	119
Abbildung 37: Detailansicht von Q4-45 mit Blick auf das Curling der Außenbereiche.....	119
Abbildung 38: Konturlänge und Füllvektoren pro Volumen und Konturlänge/Fülllänge	120
Abbildung 39: Konturlänge und Füllvektoren pro Bounding Box Volumen.....	121
Abbildung 40: Packdichten von 5,38 % - 16,15 % für die Anlage Formiga P100	122
Abbildung 41: Prozessdauer für drei Packdichten, Materialien und Komplexitätsgrade	123
Abbildung 42: Darstellung einer Probe, die stehend und liegend aufgebaut wird	124
Abbildung 43: Auswirkungen der Drehung um die X- und Z-Ebene für drei Materialien.....	126
Abbildung 44: Korrelation der Generierdauer mit der Konturlänge/Volumen	127
Abbildung 45: Korrelation der Generierdauer mit der Konturlänge/Bounding Box Volumen ...	128
Abbildung 46: Korrelation der Generierdauer mit den Scanvektoren/Volumen	129
Abbildung 47: Korrelation der Generierdauer mit den Scanvektoren/Bounding Box Volumen	129
Abbildung 48: Korrelation der Generierdauer mit der Kennzahl Konturlänge/Fülllänge.....	130
Abbildung 49: Generierdauer für Würfel und Zylinder mit drei unterschiedlichen Materialien	132
Abbildung 50: Korrelation zwischen der Generierdauer, Konturlänge und Fülllänge.....	132
Abbildung 51: Korrelation zwischen der Generierdauer und den Füllvektoren mit unterschiedlicher Bezugsgröße	133
Abbildung 52: Generierdauer für den Menger-Schwamm in Stufe null bis vier	135
Abbildung 53: Aufbauraten für die Materialien PA12, PEBA und TPU	135
Abbildung 54: Generierdauer für vier Komplexitätsgrade des Würfels und des Zylinders	137
Abbildung 55: Konturlänge und Füllvektoren pro Volumen und Konturlänge/Fülllänge	138
Abbildung 56: Füllvektoren und Konturlänge pro Bounding Box Volumen.....	138
Abbildung 57: Belichtungsdauer pro Einzelquerschnitt.....	141
Abbildung 58: Schichtdauer verschiedener Geometrien mit einer Packdichte von ~10 %.....	141
Abbildung 59: Füllvektoren und Konturlänge pro Volumen sowie Kontur zur Fülllänge	142

Abbildung 60: Darstellung des Schichtquerschnitts	144
Abbildung 61: Belichtungsdauer für Strukturen mit Kantenlängen zwischen 8 und 1 mm	145
Abbildung 62: Belichtungsdauer für Strukturen mit Kantenlängen zwischen 28 und 3,5 mm ..	146
Abbildung 63: Aufbaurate für die Packdichten von 5 %	147
Abbildung 64: Aufbaurate für die Packdichten von 10 %	147
Abbildung 65: Rauchbildung für Komplexitätsstufe vier mit Parametersatz (P1)	147
Abbildung 66: Korrelation für (P1) und (P2) mit der Anzahl der Füllvektoren	149
Abbildung 67: Korrelation für (P1) und (P2) mit der Konturlänge	149
Abbildung 68: Herstellkosten und Gesamtdauer für die SLS-Systeme HT403P und P100	155
Abbildung 69: Potenzielle Anzahl von Bauaufträgen und Bauteilen pro Jahr	155
Abbildung 70: Anwendungsmöglichkeiten der Methodik	163
Abbildung 71: Wechselwirkungen im Herstellprozess durch die geometrische Komplexität....	164
Abbildung 72: Validierungskörper zur Evaluierung von Parametersatz (P1) für TPU-Material..	166
Abbildung 73: Darstellung unterschiedlicher Komplexitätsindikatoren	168
Abbildung 74: Aufbaurate gegenüber der Komplexität (Scanvektoren/Volumen)	169
Abbildung 75: Aufbaurate gegenüber der Komplexität (Scanvektoren/Volumen)	170
Abbildung 76: Aufbaurate gegenüber der Komplexität (Scanvektoren/Volumen)	171
Abbildung 77: Bodenschicht und Decksohle mit unterschiedlichen Strukturen und Texturarten	172
Abbildung 78: Detailansicht der beiden Dreiecks-Strukturen mit und ohne Konturmodus	173
Abbildung 79: Darstellung der beiden Scanstrategien für einen Ausschnitt von ca. 10 mm ²	173
Abbildung 80: Belichtungsdauer und Volumen für unterschiedliche Deckschichten und Belichtungsmodi	174
Abbildung 81: Generierdauer für Würfel und Zylinder; Markforged Mark II	176
Abbildung 82: Aufbaurate gegenüber der Komplexität (Konturlänge/Volumen)	176
Abbildung 83: Aufbaurate mit steigender Komplexität (Konturlänge/Volumen)	177

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Positionierung des Themas	11
Tabelle 2: Komplexitätseinfluss auf industrielle AM-Kunststoff-Verfahren	25
Tabelle 3: Wechselwirkungen zwischen SLS-Parametern, Merkmalen und der Produktivität	50
Tabelle 4: Bestandteile der Herstellkosten (HK)	52
Tabelle 5: Vergleich der Aufbauraten industrieller SLS-Anlagen der aktuellen Marktführer.....	55
Tabelle 6: Variable und fixe Kosten.....	59
Tabelle 7: Vergleich der Methoden zur Bewertung der Komplexität	80
Tabelle 8: Übersicht der geometrischen Attribute, Kennzahlen und Zielgrößen	82
Tabelle 9: Auszug bestehender DfAM-Restriktionen zum SLS-Verfahren	87
Tabelle 10: Vergleich der Forschungsfragen zum Stand der Technik	93
Tabelle 11: Defizite und Handlungsbedarf aus dem Stand der Technik	95
Tabelle 12: Übersicht der Bauteilattribute im Hinblick auf die berücksichtigten Daten	101
Tabelle 13: Merkmalskorrelation (4 = Starker Zusammenhang, 0 = kein Zusammenhang)	103
Tabelle 14: Aufstellung der Merkmale und Kennwerte nach Aussagekraft und Relevanz.....	104
Tabelle 15: Verfahren und Anlagensysteme, inkl. Hersteller und Bearbeitungsart	107
Tabelle 16: Verwendete Rechnerausstattung.....	107
Tabelle 17: Verwendete Software, inkl. Hersteller und Funktion.....	107
Tabelle 18: Würfel und Zylinder in verschiedenen Komplexitätsstufen (ohne Kompensation) .	112
Tabelle 19: Relative Entwicklung der Konturlänge mit zunehmender Komplexitätsstufe	114
Tabelle 20: Auflistung der ermittelten Faktoren	115
Tabelle 21: Übersicht der Versuche zur Ermittlung der Wechselwirkungen	116
Tabelle 22: Geschwindigkeiten und Scanlinienabstand [mm] verschiedener Materialien	125
Tabelle 23: Relative Entwicklung von Volumen und Packdichte von Stufe null bis vier.....	134
Tabelle 24: Einflüsse auf die Dauer und Kosten für die Prozesskette zweier SLS-Systeme.....	151
Tabelle 25: Rangfolge der aussagekräftigen Faktoren.....	159
Tabelle 26: Kennzahlen, inklusive Bestimmtheitsmaß und p-Wert.....	168
Tabelle 27: Maschinenstundensatz für die Anlagen Farsoon HT403P und EOS Formiga P100 ..	201
Tabelle 28: Fertigungsrandbedingungen	202
Tabelle 29: Zusammensetzung der Personalkosten, inkl. Lohnnebenkosten.....	202
Tabelle 30: Bauteilunabhängige Prozesszeiten für die Datenvorbereitung und das Rüsten	202

Tabelle 31: Bauteilabhängige Prozesszeiten – Teil 1	203
Tabelle 32: Bauteilabhängige Prozesszeiten – Teil 2	204
Tabelle 33: Übersicht der verwendeten Bearbeitungsparameter	205
Tabelle 34: Versuchsergebnisse Versuch 1 - Vorversuch (EOS Formiga P100).....	206
Tabelle 35: Versuchsergebnisse Versuch 2 - Packdichte	207
Tabelle 36: Versuchsdaten Versuch 5 - Volumenreduktion	207
Tabelle 37: Versuchsdaten Versuch 3 und 4 – Bauteilorientierung & Bauteilgröße – Teil 1.....	208
Tabelle 38: Versuchsdaten Versuch 3 und 4 – Bauteilorientierung & Bauteilgröße – Teil 2.....	209
Tabelle 39: Versuchsdaten Versuch 6 – Vorversuch (Farsoon HT403P)	210
Tabelle 40: Versuchsdaten Versuch 7 – Material und Prozessparameter	211
Tabelle 41: Versuchsdaten Versuch 8 – Scanvektoren/Bearbeitungspfade – Teil 1	212
Tabelle 42: Versuchsdaten Versuch 8 – Scanvektoren/Bearbeitungspfade – Teil 1	213
Tabelle 43: Versuchsdaten Szenario 1 – Teil 1	214
Tabelle 44: Versuchsdaten Szenario 1 – Teil 2	215
Tabelle 45: Versuchsdaten Szenario 2 – Modi: Ohne Kontur (OK), Mit Kontur (MK).....	216
Tabelle 46: Versuchsdaten Szenario 3 – Transfer auf das FFF-Verfahren	216
Tabelle 47: Wissenschaftliche Veröffentlichungen.....	217
Tabelle 48: Betreute wissenschaftliche Abschluss- und Projektarbeiten im Themenumfeld	218

IV Symbol- und Formelverzeichnis

	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
O	ρ	[g/mm ³]	Pulverdichte
O	λ	μm	Wellenlänge
A	A_{surf}	[mm ²]	Bauteiloberfläche
C	C_p	[J/g°C]	Spezifische Wärmekapazität
C	C_m	[€/kg]	Materialkosten pro Gewichtseinheit
C	C_r		Kompaktheitsverhältnisses
D	df	[mm]	Durchmesser des fokussierten Laserstrahls
E	E_d	[J/mm ²]	Flächenenergiedichte
E	E_v	[J/mm ³]	Volumenenergiedichte
E	E_{in}	[J/mm ³]	Gesamtenergiebedarf
E	E_d	[J/mm ²]	Energiedichte
E	E_v	[J/mm ³]	Volumenenergiedichte
E	E_G	[J/mm ³]	Gesamtenergiebedarf
E	E_{Las}	[J/mm ³]	Zugeführte Laserenergie
E	E_P	[J/mm ³]	Wärmeenergie
E	E_{pr}	[J/mm ³]	Aufheizenergie
F	FEK	[€]	Fertigungseinzelkosten
F	FGK	[€]	Fertigungsgemeinkosten
K	k_r		Aufwände durch erhöhte Materialaufwände
K	k_s		Aufwände für das Volumen notwendiger Stützstrukturen
K	$K_{Generieren}$	[€]	Kosten für den Generierprozess
K	$K_{Nacharbeit}$	[€]	Kosten für die Nacharbeit
K	$K_{Datenvorbereitung}$	[€]	Kosten für die Datenvorbereitung
K	K_{HQ}	[€/h]	Stundensatz für hochqualifiziertes Personal
K	$K_{Rüsten}$	[€]	Kosten für das Rüsten
K	K_{Fach}	[€/h]	Stundensatz für eine Fachkraft
K	K_{MSS}	[€/h]	Maschinenstundensatz Farsoon HT403P
K	$K_{Abkühlen}$	[€]	Kosten für das Abkühlen
K	$K_{MSS-Kühlstation}$	[€/h]	Maschinenstundensatz Externes Abkühlen

	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
L	L_t	[mm]	Schichtstärke
M	MCV		Konnektivitätswert
M	MEK	[€]	Materialeinzelkosten
M	MGK	[€]	Materialgemeinkosten
M	m_B		Verwendete Materialmenge
M	M	[€]	Materialkosten
N	N		Anzahl der Belichtungen pro Punkt
N	n_L		Anzahl der Schichten
N	$n_{Bauteile}$		Anzahl der Bauteile
S	S_D	[mm]	Scandistance (Scanlinienabstand)
S	SEK	[€]	Sondereinzelkosten
T	T_p	[h]	Zeit für die Bauphase
T	T_a	[h]	Zeit zum Auftragen des Pulvers
T	T_{sn}	[h]	Stillstandzeit des Lasers
T	T_s	[h]	Scanzeit des Lasers
T	T_{pr}	°C	Vorheiztemperatur
T	t_r	[s]	Zeit für den Pulverauftrag (recoat)
T	T_{Build}	[h]	Gesamtbauzeit
T	T_{xy}	[h]	Gesamtzeit zum Scannen
T	T_z	[h]	Gesamtzeit zum Pulverauftrag
T	T_{HC}	[h]	Zeit zum Aufheizen und Abkühlen des Pulverbetts
T	t_A	[s]	Abkühlzeit einer einzelnen Laserspür
T	t_R	[h]	Dauer zum Rüsten
T	t_D	[min]	Dauer für die Datenkonvertierung
T	t_A	[h]	Zeit zum Aufheizen und Inertisieren
T	t_{Bel}	[h]	Zeit zum Belichten
T	$t_{Entnahme}$	[h]	Zeit zur Entnahme des Baujobs
T	$t_{Entpacken}$	[h]	Zeit zum Entpacken
T	t_{Bes}	[h]	Zeit zum Beschichten
T	$t_{Abkühlen}$	[h]	Zeit zum Abkühlen
T	$t_{Strahlen}$	[h]	Zeit zum Strahlen

V	V_i	[J/mm ³]	Summe der Verluste
V	V_B	[cm ³]	Volumen der Bauteil(e)
V	V_{ext}	[cm ³]	Volumen des Begrenzungsrahmens
V	Vol_{part}	[cm ³]	Volumen der Bauteil(e)
V	v	[cm ³]	Volumen des Bauteils
V	Vol_{sup}	[cm ³]	Volumen der Stützstrukturen
V	V_K	[mm/s]	Scangeschwindigkeit für die Kontur
V	V_F	[mm/s]	Scangeschwindigkeit für die Füllung
V	V_S	[mm/s]	Scangeschwindigkeit für die Stützstrukturen
V	V_B	[cm ³]	Volumen des gesinterten Materials
W	W_B	[cm ³]	Verschwendetes Material
Z	Z_D	[%]	Zuschlagssatz für die Datenvorbereitung
Z	Z_G	[%]	Zuschlagssatz für das Generieren
Z	Z_N	[%]	Zuschlagssatz für die Nachbearbeitung
Z	Z_{Abk}	[%]	Zuschlagssatz für das Abkühlen

V Abkürzungsverzeichnis

O	3DP	3D-Printing
O	3MF	3D Manufacturing Format
A	ASTM	American Society for Testing and Materials
A	AM	Additive Manufacturing
A	AF	Additive Fertigung
A	AMF	Additive Manufacturing File Format
B	BJ	Binder Jetting
B	BB	Bounding Box
C	CAD	Computer-Aided Design
C	CFF	Continuous Fiber Fabrication
C	CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
C	Clip	Continuous Liquid Interface Production
C	CT	Computertomographie
C	CO ₂	Kohlenstoffdioxid
D	DfAM	Design for Additive Manufacturing
D	DIN	Deutsches Institut für Normung
D	DLP	Digital Light Processing (DLP)
D	DOE	Design of Experiments
E	EBM	Electron Beam Melting
F	FDM	Fused Deposition Modeling
F	FFF	Fused Filament Fabrication
F	FPS	Frames per second
F	FKV	Faserverstärkte Kunststoffe
H	HSS	High Speed Sintering
I	ISO	International Organization for Standardization
M	MJF	Multi Jet Fusion
M	MJM	Multijet Modeling
N	N ₂	Stickstoff
P	PJM	Polyjet Modeling
R	R ²	Bestimmtheitsmaß
S	SL	Stereolithographie

S	SLS	Selektive Laser Sintering / Selektives Lasersintern
S	SLM	Selektive Laser Melting
S	STL	Surface Tessellation Language
S	SLI	Slice Layer Information
V	VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1. Einleitung

Die Marktanforderungen an Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes haben stets einem Wandel unterlegen, welcher sich durch verändernde Rand- und Rahmenbedingungen begründet. Aktuell sind dies beispielsweise die vierte industrielle Revolution (Stichwort Industrie 4.0), das Pariser Klimaabkommen sowie die Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch (VDI-Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2017, S. 10). Im Fokus stehen dabei die Reduktion von Umweltbelastungen sowie die Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2018, S. 10). Strategien zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und Ressourceneffizienz können dabei produkt- oder prozessbezogen sein und beeinflussen sowohl Produktentwicklung als auch Produktion (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2018, S. 16).

Produktseitige Trends hin zu einer größer werdenden Variantenvielfalt und sinkenden Losgrößen ermöglichen die Differenzierung der angebotenen Leistungen, um sich vom Wettbewerb abzuheben. Andererseits erhöht diese variantenreiche Produktion die Komplexität und Kosten von Produktionsprozessen. Entgegen der Massenfertigung müssen diese Prozesse über eine hohe Dynamik und Anpassungsfähigkeit verfügen, bei gleichzeitiger Gewährleistung von Qualität, Wirtschaftlichkeit und Liefertreue. (Volling, 2009, S. 1–3), (Piller, 2008, S. 54)

Zeitgleich steht einer wachsenden Weltbevölkerung sowie dem damit einhergehenden Bedarf an Produkten und Rohstoffen die Verknappung eben dieser Rohstoffe gegenüber (Dückert et al., 2015, S. 12). Ein negativer Begleiteffekt ist die Entstehung von großen Abfallmengen, z.B. in industriellen Produktionsprozessen durch Verarbeitungsabfälle, Schrott, Ausschuss, Überschuss sowie der Entsorgung von Produkten nach der Nutzungsphase. Unter diesen Aspekten stellt die effiziente Nutzung von Technologien und den dabei verwendeten Ressourcen einen maßgeblichen Faktor zur Wettbewerbsfähigkeit und Versorgungssicherheit dar; dies gilt speziell für rohstoffarme Länder wie Deutschland (Dückert et al., 2015, S. 12). Beispielsweise nahmen für Deutschland die Materialaufwendungen im verarbeitenden Gewerbe für das Jahr 2017 durchschnittlich einen Anteil von 56,3 % am Gesamtumsatz ein (Statistisches Bundesamt, 2019, S. 3). Darüber hinaus umfasste der Gesamtanteil am industriellen Energieverbrauch für das verarbeitende Gewerbe und den Bergbau 39 % (Bundeszentrale für Politische Bildung et al., 2021, S. 432). Folglich ist eine verbesserte Ressourceneffizienz nicht nur aus Umweltaspekten sondern ebenfalls aus Gründen der Wettbewerbsfähigkeit bzw. zur Kostensenkung bedeutsam (Dückert et al., 2015, S. 10).

In Summe stellen diese Entwicklungen große Herausforderungen für bestehende Fertigungstechnologien dar. Diese zeigen sich beispielsweise anhand schärferer Auflagen zur ressourcenschonenden Nutzung, der Vermeidung von Emissionen und Abfall sowie steigender Rohstoff- und Energiepreise.

Mit Blick auf diese Entwicklungen stellt die Technologie der Additiven Fertigung (engl.: Additive Manufacturing = AM) vielversprechende Lösungsansätze dar. Auszugsweise sind Vorteile zu nennen, wie die Fertigung von Bauteilen ab Stückzahl eins infolge einer werkzeuglosen Fertigung sowie der Umstand, dass Bauteile prinzipiell nur mit der zur Funktionserfüllung notwendigen Materialmenge hergestellt werden können (Wohlers Associates, 2021, S. 148). Folglich können neben dem eingesetzten Material auch die Dauer und Kosten zur Produktentwicklung signifikant reduziert werden (Gibson et al., 2015, S. 4), (Schmid, 2015a, S. 3).

Konzipiert als Technologie zur Herstellung von Prototypen sind seit der Patentierung der industriell bedeutsamen Kunststoff-Verfahren **Stereolithography** (Charles Hull, 1984), **Selective Laser Sintering** (DTM Corporation, 1986), **3D-Printing** (MIT, 1989) und **Fused Deposition Modeling** (Scott Crump, 1989) eine Vielzahl dieser Verfahren für den industriellen Einsatz weiterentwickelt worden (Gibson et al., 2015, S. 37). Eine weitere bedeutende Entwicklung war hierbei die Ausweitung auf Metallverfahren, wie das **Selective Laser Melting** (Fraunhofer ILT; Dr. Fockele und Dr. Schwarze; 1995) (Gebhardt, 2016, S. 201), (Gibson et al., 2015, S. 35). Durch stetige Verbesserung der Maschinen, Materialien sowie der Genauigkeit und Gesamtqualität der Prozesse und Erzeugnisse können AM-Bauteile bereits als Endverbraucherteile verwendet werden (Gibson et al., 2015, S. 3–4), (Zeyn, 2017, S. 1), (Möhrle et al., 2017, S. 2). Je nach Einsatzzweck werden die Anwendungen untergliedert in die Bereiche „**Rapid Prototyping**“ zur Herstellung von Prototypen und Modellen sowie „**Rapid Manufacturing**“ zur Herstellung von Endprodukten (Gebhardt, 2016, S. 6), (Klahn et al., 2018, S. 12). Einen Zwischenbereich bildet das „**Rapid Tooling**“ zur Herstellung von Formwerkzeugen, das je nach Anwendungsfall einem der beiden Überbegriffe untergeordnet wird (Gebhardt, 2016, S. 6). Für den industriellen Einsatz stehen die Verfahren im Wettbewerb zu herkömmlichen Technologien wie Fräsen und Gießen sowie Wettbewerbern innerhalb des AM-Bereichs.

Die steigende Relevanz dieser Technologie zeigt sich anhand der jährlichen Wachstumsraten der weltweiten Einnahmen durch AM-Produkte und Dienstleistungen, welche von 1988 bis 2020 bei durchschnittlich 26,1 % lag, wobei in den Jahren von 2017 bis einschließlich 2020 ein Wachstum von 20,8 % erreicht wurde (Wohlers Associates, 2021, S. 106–107).

Laut einer durch Wohlers Associates Inc. durchgeführten Befragung nutzten Unternehmen im Jahre 2020 die Additive Fertigung bereits zu 31,5 % für Endbauteile und weitere Anwendungen im Unternehmensumfeld. In Abbildung 1 werden diese in Anlehnung an Wohlers dargestellt (Wohlers Associates, 2021, S. 30).

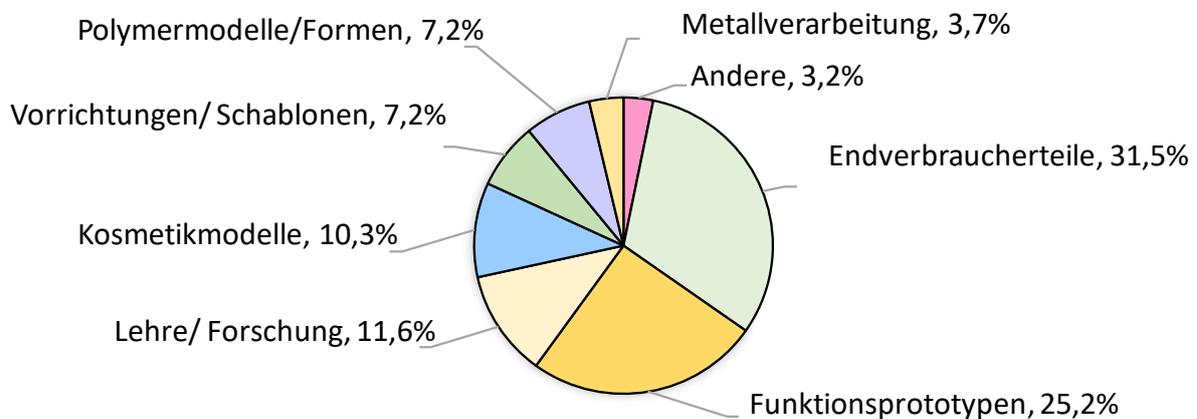


Abbildung 1: Anwendungszwecke in Anlehnung an (Wohlers Associates, 2021, S. 30).

1.1. Motivation

Durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren werden Produktentwicklern innovative Wege der Bauteilgestaltung ermöglicht. Hierbei kann theoretisch eine nahezu unbegrenzte geometrische Komplexität von dreidimensionalen Bauteilen realisiert werden. Dies ist möglich, da die Bauteile unter Vorgabe eines 3D-CAD-Modells schichtweise (additiv) aufgebaut werden, bzw. zur Herstellung in eine Abfolge von einfachen, zweidimensionalen- bzw. $2\frac{1}{2}$ -D²- Prozessschritten aufgeteilt werden (Klahn et al., 2018, S. 13). Entgegen herkömmlicher Verfahren sind sie daher nicht auf die Zugänglichkeit von Bearbeitungswerkzeugen angewiesen und benötigen keine bauteilspezifischen Werkzeuge, Formen und Kernelemente. Daraus abgeleitet können Bauteile bereits ab Stückzahl eins individuell hergestellt werden. Die Kosten für Hilfsformen- und Werkzeuge entfallen und müssen somit nicht auf die Gesamtstückzahl aufgeteilt werden, wie dies z.B. bei Spritzguss der Fall ist (Klahn et al., 2018, S. 14–15), (Poprawe et al., 2015, S. 50), (Gibson et al., 2015, S. 405), (Berger et al., 2017, S. 9).

² $2\frac{1}{2}$ -D: Abgeleitet aus der NC-Technologie erfolgt die Bahnerzeugung in X-Y-Ebene; die Zustellung erfolgt in Z-Richtung in Form der Schichtstärke (Berger et al., 2017, S. 7–8).

Folglich lassen sich individuelle Geometrien, Freiformflächen, innenliegende Kanäle sowie Hinterschnitte herstellen, die den Fertigungsaufwand (Dauer/Kosten) mit konventionellen Verfahren signifikant steigern würden oder im Fall von Gitterstrukturen sogar unmöglich wären. Abbildung 2 zeigt dies beispielhaft anhand von Grundstrukturen und einer kundenspezifischen orthopädischen Einlage.



Abbildung 2: Gitterstrukturen zur Materialeinsparung (Quelle: Labor Industrielle Produktion)

Hierdurch kann ein Bauteil theoretisch nur mit der zur Funktionserfüllung notwendigen Rohmaterialmenge hergestellt werden, wodurch sich enorme Vorteile im Hinblick auf Ressourceneffizienz und Leichtbau bieten (Klahn et al., 2018, S. 101), (Schmid, 2015a, S. 4). In Bezug auf die adressierten Probleme kann z.B. die Materialeffizienz gesteigert und Abfälle reduziert werden.

Mit Blick auf diese geometrischen Möglichkeiten werden regelmäßig die Begriffe „*geometrische Freiheit*“, „*geometry for free*“ und „*complexity for free*“ verwendet (Klahn et al., 2018, S. 14), (Bin Maidin, 2011, S. 80–81), (Hopkinson & Dickens, 2003, S. 32), (Hague et al., 2003, S. 26), (Poprawe et al., 2015, S. 50–51), (Gibson et al., 2015, S. 405). Gleichzeitig wird der Aufwand zur Herstellung komplexer Bauteilgeometrien mit diesen Verfahren häufig als vernachlässigbar beschrieben (Hopkinson & Dickens, 2003, S. 32), (Hague et al., 2003, S. 26), (Klahn et al., 2018, S. 14), (Brackett et al., 2011, S. 348–350), (Bin Maidin, 2011, S. 81), (Adam, 2015, S. 17), (Conner et al., 2014, S. 67), (Schmid et al., 2013, S. 3).

Unter dem Aspekt der Wettbewerbsfähigkeit ist die Nutzung dieser spezifischen Vorteile von besonderer Relevanz, da die wiederkehrenden Bauteilkosten im Vergleich zu konventionellen Verfahren höher sind – insbesondere dann, wenn sich das Produktionsvolumen erhöht und simple/identische Bauteile gefertigt werden (Wohlers Associates, 2021, S. 23), (Klahn et al., 2018, S. 14). In Abbildung 3 ist dieser Umstand dargestellt. In Anlehnung an bestehende Arbeiten erfolgt ein Vergleich konventioneller und additiver Verfahren in Bezug auf Kosten im Verhältnis zur Stückzahl (*Bild 1*) und der Bauteilkomplexität (*Bild 2*) (Poprawe et al., 2015, S. 51), (Kumke, 2018, S. 85), (Wohlers Associates, 2021, S. 23), (Hopkinson & Dickens, 2003, S. 38). Ein Ausblick unter Betrachtung der Komplexität innerhalb der Additiven Fertigung erfolgt in Abbildung 3 - Bild 3, wobei zu untersuchen ist, wie sich diese Kurven in der Realität verhalten.

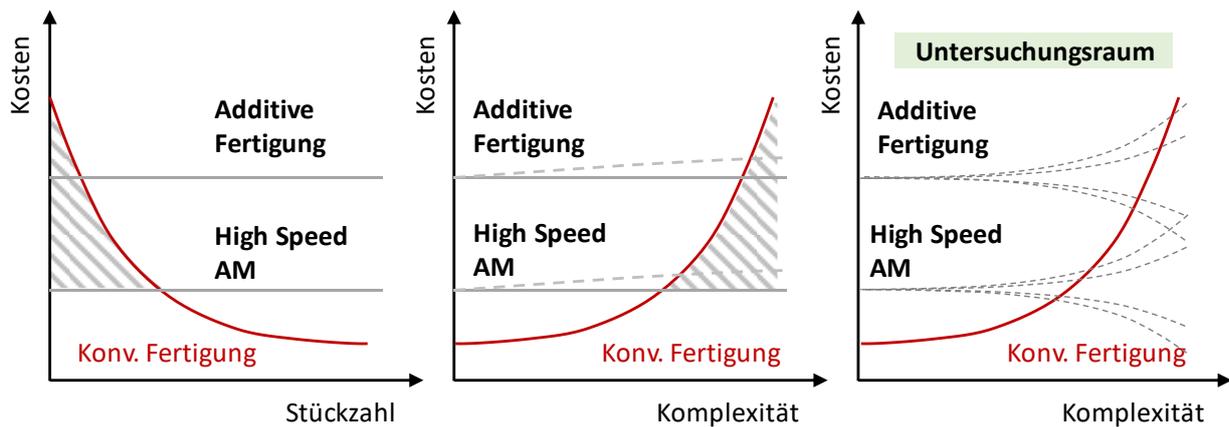


Abbildung 3: Vergleich konventioneller und additiver Fertigungsverfahren in Anlehnung an (Poprawe et al., 2015, S. 51), (Kumke, 2018, S. 85), (Wohlers Associates, 2021, S. 23), (Hopkinson & Dickens, 2003, S. 38).

Zu berücksichtigen ist dabei, dass sich diese Bemerkungen häufig auf einen Vergleich mit herkömmlichen Verfahren beziehen (Poprawe et al., 2015, S. 50), (Merkt et al., 2012, S. 99), (Wegner, 2015, S. 1), (Hopkinson & Dickens, 2003), (Kushnarenko, 2009, S. 54), (Boyard et al., 2013, S. 3). Seltener beziehen sich diese Aussagen auf Auswirkungen innerhalb der Additiven Fertigung, z.B. mit Blick auf den Ressourcenaufwand in Form von Zeit, Material und Energie (Pradel et al., 2017), (Meboldt & Klahn, 2018, S. 21), (Urbanic & Hedrick, 2016, S. 366), (George & Chowdary, 2020), (Ben Amor, Zongo, et al., 2022), (Ruffo et al., 2006a, S. 2).

Da der Komplexitätsbegriff in unterschiedlichen Definitionen verwendet wird, erfolgt in **Kapitel 2.5.1** eine ausführliche Differenzierung. Zum besseren Verständnis der folgenden Kapitel wird der Begriff in dieser Arbeit wie folgt definiert:

„Geometrische Komplexität oder Formkomplexität wird definiert durch die Anzahl, Gestalt und Häufigkeit von Elementen, die zur Beschreibung eines Bauteils notwendig sind und mit dem Herstellprozess Additiver Fertigungsverfahren in direkter Wechselwirkung stehen. Geometrische Elemente werden hierbei definiert als ein Punkt, eine Linie, eine Fläche oder ein Volumen. Die Einflusshöhe auf den Herstellprozess einschließlich Produktivität und Qualität ist in Form verfahrensspezifischer Kennzahlen festzustellen.“

Beispielhaft wird in Abbildung 4 unter Beibehaltung der Querschnittsfläche die Komplexität zweier Geometrieformen durch Fragmentierung gesteigert, wodurch Auswirkungen auf die Datenvorbereitung, den Generierprozess sowie die Nachbearbeitung entstehen.

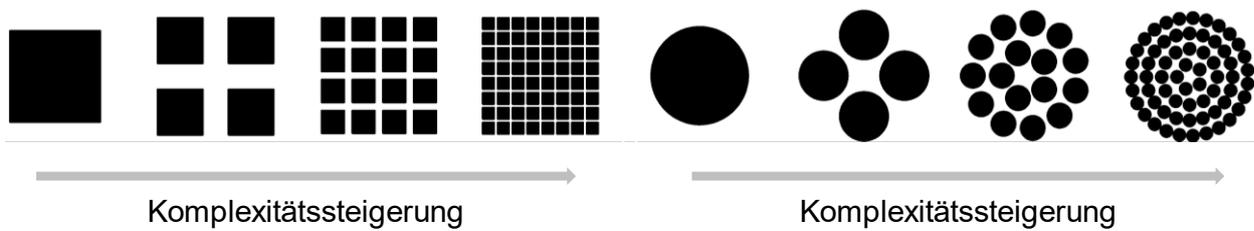


Abbildung 4: Komplexitätssteigerung durch Fragmentierung von Flächen (Eigene Darstellung)

Trotz zahlreicher AM-spezifischer Konstruktionsrichtlinien und Handlungsempfehlungen, welche in **Kapitel 2.7** behandelt werden, bestehen für die unterschiedlichen Verfahren zur Thematik meist keinerlei quantifizierte Referenzwerte zu den Auswirkungen einer Komplexitätsänderung. Dies ist zum Teil auf folgende Punkte zurückzuführen:

- Prozessbezogene Parameter fließen häufig nicht in den Design-Prozess ein oder sind nur unter speziellen Randbedingungen von Maschine, Werkstoff oder Fertigungsparametern gültig (Kumke, 2018, S. 44), (Adam & Zimmer, 2014, S. 26).
- Die Auflösung und Genauigkeit variieren in Abhängigkeit des Verfahrens, der Bauteilorientierung, Schichthöhe und Charakteristiken von Bauteil und Bauraum (Seepersad et al., 2012, S. 921), (Pradel, Zhu, et al., 2018a), (Pradel, Zhu, et al., 2018b, S. 190).
- Jedes AM-Verfahren verfügt über Eigenschaften und Einschränkungen, die zusätzlich vom Material abhängen und folglich bei der Evaluierung der Komplexität berücksichtigt werden müssen (Valentan et al., 2006, S. 296), (Sun et al., 2017, S. 262), (Pradel, Zhu, et al., 2018a, S. 313), (Ahuja et al., 2015).
- Bestehende Handlungsempfehlungen zur Anwendung AM-spezifischer Vorteile berücksichtigen zwar den Bereich der Materialeffizienz und Funktionsoptimierung, vernachlässigen aber häufig Auswirkungen auf die Produktivität, z.B. mit Blick auf die Maschinenlaufzeit und den Nachbearbeitungsaufwand.
- Methoden zu Wirtschaftlichkeitskalkulationen verstärken diesen Trend zusätzlich, da aufgrund von „*Complexity for free*“ meist nur Attribute wie das Volumen und die Bauhöhe betrachtet werden, wie in **Kapitel 2.7** verdeutlicht wird.

Zur beispielhaften Verdeutlichung werden in Abbildung 5 verschiedene Strukturen unterschiedlicher Komplexität mit gleichem Volumen und gleicher Bauhöhe dargestellt, welche sich in der Praxis sowohl auf die Maschinenlaufzeit als auch auf die Nachbearbeitung auswirken.

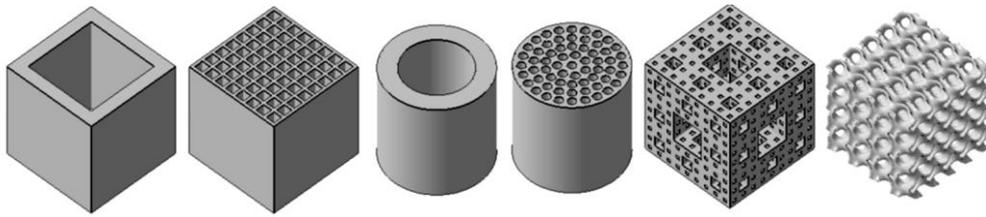


Abbildung 5: Strukturen mit gleichem Bauteilvolumen und unterschiedlicher Komplexität (Eigene Darstellung)

Entgegen des „Complexity for free“-Verständnisses sind im Zusammenhang mit der geometrischen Komplexität Problemstellungen aufgedeckt worden, die sich ähnlich auswirken:

- Die Anwendung wird funktions- und fertigungsgerecht nach bestehenden DfAM-Richtlinien ausgelegt, die thematisch aber hauptsächlich physikalische Limitationen der Verfahren hinsichtlich Maßhaltigkeit, Mechanik und Funktionsgewährleistung adressieren. Beispielhaft wird die Genauigkeit und Wiederholbarkeit von Merkmalen anhand von Würfeln, Zylindern, Schlitzen, Löchern, sowie Verzug, Krümmung und Oberflächengüte unter verschiedenen Bedingungen geprüft (Seepersad et al., 2012, S. 922), (Adam, 2015).
- Der Herstellprozess als solches, inklusive Datenaufbereitung, Nachbearbeitung, Endbearbeitung und Prüfung sowie die daraus resultierende Produktivität und der Ressourcenaufwand werden hingegen selten betrachtet (Klahn et al., 2018, S. 139), (Kushnarenko, 2009, S. 38) oder komplett vernachlässigt. Häufig sind daher iterative Optimierungsschritte notwendig, um den Ressourcenaufwand hinsichtlich Durchlaufzeit, Materialverbrauch und Personalaufwand zu verbessern und die Wirtschaftlichkeit des AM-Verfahrens gewährleisten zu können. Abzuleiten ist dieser Umstand daraus, dass bereits, je nach Verfahrensart und entsprechendem Bearbeitungswerkzeug ein erhöhter Fertigungsaufwand entsteht. Dieser wird durch die Art der Werkzeugpfadgenerierung, notwendigen Stützstrukturen sowie zu entfernendem Restmaterial beeinflusst. Demgegenüber wird der Begriff Komplexität häufig undifferenziert auf die gesamte Additive Fertigung bezogen, obwohl die enthaltenen Verfahren unterschiedliche Vorteile und Einschränkungen besitzen (Pradel, Zhu, et al., 2018a, S. 195).
- Zusätzlich wird die Prozessfähigkeit von der zu bearbeitenden Geometrie beeinflusst, wobei geometriebasierte Optimierungsansätze nur für spezielle Geometrien gültig sind und nicht verallgemeinert werden können (Eschey, 2012, S. 44).
- Weiterhin sind diese Verfahren zur Erfüllung von Qualitätsanforderungen, z.B. hinsichtlich Oberflächengüte und mechanischer Eigenschaften häufig noch nicht in der Lage und deshalb weiterhin auf die Nachbearbeitung mit konventionellen Verfahren angewiesen (Breuninger et al., 2013, S. 69–70), (Gebhardt et al., 2019, S. 247), (Klahn et al., 2018, S. 139).

Hierbei wird dieser Aspekt oft zu wenig oder zu spät betrachtet und allgemeingültige Aussagen lassen sich nicht treffen, da eine bauteilindividuelle Betrachtung notwendig ist (Gebhardt et al., 2019, S. 239), (Zeyn, 2017, S. 206).

- Durch den Nachbearbeitungsbedarf führt die erhöhte geometrische Komplexität erneut dazu, dass Geometrien nicht bearbeitet werden können oder aber zu einer signifikanten Kostenerhöhung durch die Nachfolgeprozesse. Beispielsweise beträgt der durchschnittliche Anteil der Post-Processing-Kosten von Serviceanbietern für Metallbauteile 26,7 % und für Kunststoffe 23 % (Wohlers Associates, 2021, S. 127). Hierbei können diese je nach geometrischer Komplexität - z.B. infolge der Zugänglichkeit und Verfahren - auch das Vielfache der eigentlichen Kosten des additiven Prozesses betragen (Gebhardt et al., 2019, S. 239).

Im Detail betrachtet sind die Vorzüge des „Complexity for free“-Ansatzes, in Abhängigkeit des Verfahrens und der dafür notwendigen Prozesskette, nur auf Teilbereiche des gesamten additiven Herstellprozesses anwendbar. Als vergleichsweise junge Technologie fehlen Anwendern zudem vielfach Erfahrungswerte, systematische Ansätze und Standards zum Einsatz als Serienfertigungsverfahren, die zumindest kurz bis mittelfristig einen Engpass zur Umsetzung darstellen können. Aufgrund der Tatsache, dass AM-Verfahren häufig an der Grenze zum wirtschaftlichen Einsatz stehen, erfolgt durch die vorliegende Arbeit eine systematische Aufarbeitung produktionsspezifischer Einflüsse der geometrischen Komplexität, um sie als Schlüsselfaktor zur Wettbewerbsfähigkeit nutzen zu können.

1.2. Ziele und Struktur der Arbeit

In diesem Kapitel wird eine Übersicht zu den anvisierten Zielen sowie der Struktur der Arbeit gegeben. Zunächst wird hierzu die Positionierung und inhaltliche Abgrenzung in **Kapitel 1.2.1** vorgenommen, gefolgt von den aus den Zielen abgeleiteten Fragestellungen in **Kapitel 1.2.2**. Die Vorgehensweise und Struktur der Arbeit wird abschließend in **Kapitel 1.2.3** beschrieben. Auf Basis der zuvor erläuterten Motivation ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer Methodik, welche die Evaluierung verschiedener Produktivitätsaspekte ermöglicht, die durch geometrische und verfahrensspezifische Faktoren beeinflusst werden. Hierzu werden konkret Auswirkungen der geometrischen Komplexität auf die Produktivität, den Ressourcenaufwand und folglich die Gesamtwirtschaftlichkeit des additiven Herstellprozesses beleuchtet.

Dies wird realisiert, indem das Wechselspiel der Faktoren Fertigungsverfahren, Material und Geometrie untersucht wird, welches in Kombination für den Ressourcenaufwand und für die Wirtschaftlichkeit verantwortlich ist.

Es erfolgt eine detaillierte Untersuchung am Beispielfahren des Selektiven Lasersinterns für Kunststoffe sowie eine allgemeine Betrachtung des Themas, die zur Anwendung und dem Transfer der Erkenntnisse auf weitere Verfahren dient. Um die Methodik als unterstützendes Werkzeug einsetzen zu können, werden folgende Teilziele definiert:

1. Die Analyse von Wirkmechanismen zwischen geometrischer Gestalt, additivem Herstellprozess und Material zur Identifikation möglicher Einflüsse (Ursache/Wirkung).
2. Die Quantifizierung der geometrischen Komplexität anhand definierter Merkmale, um eine Vergleichbarkeit und Bewertung von Bauteilen, z.B. hinsichtlich des Ressourcenaufwands zu ermöglichen.
3. Die Ableitung einer Methode zur Evaluierung des geometrischen Einflusses auf den Herstellprozess zur systematischen Unterstützung:
 - a. bei der Auswahl von Verfahren unter Berücksichtigung der Sensitivität von Teilaspekten des jeweiligen Herstellprozesses durch die geometrische Komplexität
 - b. bei der fertigungsgerechten Bauteilgestaltung in Bezug auf die Produktivität und Ressourceneffizienz
 - c. bei dem ressourcenschonenden und effizienten Einsatz additiver Verfahren.
4. Die Validierung der Methodik anhand eines Anwendungsbeispiels.

1.2.1. Positionierung und inhaltliche Abgrenzung

Wie in den vorherigen Ausführungen und im Folgenden **Kapitel 2** beschrieben wird, berücksichtigen bestehende Arbeiten die Auswirkungen der geometrischen Komplexität bzw. den Einfluss der Bauteilgestalt auf den additiven Herstellprozess nur unzureichend. Als Handlungsbedarf leitet sich ab, dass bestehende Produktionsstrategien und Konstruktionsrichtlinien dahingehend ergänzt werden müssen, dass sie Einflüsse auf die Produktivität und den Ressourcenaufwand in Abhängigkeit des verwendeten Herstellprozesses berücksichtigen. Hierzu sind Einflüsse der geometrischen Komplexität zu systematisieren und in einer geeigneten Methodik bereitzustellen, um Anwendern eine adäquate Unterstützung zu bieten.

Der Hauptfokus der Arbeit liegt dabei auf den Wechselwirkungen zwischen Geometrie, Herstellprozess und Material, wobei letzteres indirekt, in Form der zur Bearbeitung notwendigen Prozessparameter einfließt. Es erfolgt zudem eine Beschränkung auf kunststoffbasierte Verfahren. Diese ist notwendig, da eine Betrachtung von metallbasierten Verfahren durch Unterschiede zwischen Verfahren, Wirkprinzipien und thermomechanischen Wechselwirkungen der zu erzielenden Themenfokussierung entgegenläuft. Der Transfer auf weitere Verfahren wird jedoch im Ausblick in **Kapitel 6.3** diskutiert.

Weiterhin wird die vorgelagerte Produktentwicklung hauptsächlich im Hinblick auf die Entwicklung und Ausarbeitung der Bauteilgestalt sowie ihre Wechselwirkungen mit dem Herstellprozess behandelt. Hierzu werden in **Kapitel 2.7** zur Analyse der Wechselwirkungen Gestaltungskriterien aus vorhandenen DfAM-Richtlinien sowie einige der spezifischen Vorteile betrachtet und gegenüber den Auswirkungen auf die zuvor genannten Merkmale analysiert. Als Resultat entstehen Handlungsempfehlungen für bestehende DfAM-Varianten, um sie durch einen Produktivitäts- und Ressourcenanteil zu ergänzen.

Da die Vielfalt existierender AM-Verfahren inklusive der jeweiligen Herstellprozesse den Umfang dieser Arbeit übersteigen, wird als additives Verfahren aus der Kategorie „*Powder Bed Fusion (PBF)*“ das Selektive Lasersintern (SLS) für Kunststoffe verwendet. Als industrielles Verfahren mit hohem Marktanteil³ ist dieses für die Serienfertigung geeignet und ermöglicht die Herstellung von Funktionsteilen/Endbauteilen, womit es für die Entwicklung der Methodik geeignet ist (Klahn et al., 2018, S. 14). Zur Prüfung der Anwendbarkeit auf weitere Anlagensysteme und Verfahren werden die Versuche mit zwei unterschiedlichen SLS-Anlagensystemen durchgeführt. Es erfolgt ergänzend eine Diskussion zum Transfer auf weitere Anlagen, Verfahren und Materialien sowie eine Validierung anhand eines Beispielverfahrens in **Kapitel 5.3 und Kapitel 6.3**. Der Untersuchungsraum umfasst neben dem eigentlichen Generierprozess sowohl Anteile der Datenvorbereitung als auch die nachgelagerte Reinigung, jedoch keine Prozesse der Endbearbeitung/Veredelung und Qualitätssicherung/Bauteilprüfung. Eine Differenzierung der Prozesse erfolgt in **Kapitel 2.2.2**. Im Rahmen der fortschreitenden Industrialisierung von AM-Verfahren und dem erforderlichen Aufwand zur Anwendung der Methodik adressiert diese besonders die Serienfertigung von Bauteilen. Ein Validierungsbeispiel im Bereich Mass Customization bzw. kundenindividueller Massenproduktion erfolgt hierzu in **Kapitel 5.2**.

³ Nach Wohlers wurden Unternehmen bezüglich ihrer profitabelsten AM-Prozesse befragt, wobei die SLS-Systeme von EOS (13,6 %) und 3DS (6,8 %) zusammen einen Anteil von 20,4 % einnehmen (Wohlers Associates, 2021, S. 128).

Nachfolgend werden die fokussierten Arbeitsinhalte innerhalb der Themengebiete in Tabelle 1 verdeutlicht:

Tabelle 1: Positionierung des Themas

Legende: **Fokus** der Untersuchungen, **Teilbereiche** mit geringerem Detailgrad, **Nicht behandelt**

Verfahrenskategorie	Powder Bed Fusion	Material Extrusion	VAT Polymerization	Sheet Lamination	Material Jetting	Binder Jetting	Direct Energy Deposition
Verfahren	SLS		FFF		SLA		
Material	Kunststoff		Metall	Keramik		Faserverbund	
Produktentstehungsschritte nach VDI 2221	Produktentwicklung				Produktion		
	Konzeption, Planung, Idee	Entwicklung/Ausarbeitung	Produktionsmittelerwicklung	Produktionsmittelfertigung	Fertigung	Montage	
DfAM-Typ & Fokus	Limitationen	Potenziale	Produktivität	Nachbearbeitung	Endbearbeitung	Prüfung	
	Eigenschaften		Ressourcenaufwand		Toleranzen/Maßhaltigkeit		
Stückzahl	Einzelfertigung		Serienfertigung		Mass Customization	Massenfertigung	

1.2.2. Forschungsfragen

Abgeleitet aus den definierten Zielen soll die folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

Welchen Einfluss hat die geometrische Komplexität von Bauteilen auf den Herstellprozess additiver Fertigungsverfahren in Bezug auf Produktivität und Ressourcenaufwand?

Diese übergeordnete Fragestellung soll durch Aufteilung und Lösung von Teilforschungsfragen F1 bis F3 beantwortet werden:

F1 Welchen Einfluss hat die geometrische Komplexität auf die Produktivität abhängig von der Verfahrens- und Bearbeitungsweise, den Fertigungsparametern sowie dem zu bearbeitenden Material?

- a) Wie ist ihr Einfluss im Vergleich zu den Bauraumvariablen (z.B. Volumen, Packdichte)?
- b) Welchen Einfluss hat sie auf den Ressourcenaufwand im Herstellprozess?

F2 Wie kann der Einfluss der geometrischen Komplexität quantifiziert und kategorisiert werden, um Vergleichs- und Bewertungsmöglichkeiten zu schaffen und welche Bauteilmerkmale müssen dafür vorhanden sein?

F3 Welche Methoden sind notwendig, um eine Evaluierung der geometrischen Komplexität durchzuführen und wie sind diese in einer geeigneten Methodik umzusetzen?

1.2.3. Vorgehensweise und Struktur der Arbeit

In diesem Abschnitt erfolgt eine Kurzbeschreibung der einzelnen Kapitel, um eine Übersicht der Inhalte sowie deren Bezug zu den aufgestellten Fragestellungen zu schaffen. Der Aufbau der Arbeit orientiert sich hierbei an den Design Research Methodology-Grundsätzen (DRM) nach Blessing et al. (Blessing & Chakrabarti, 2009). Die vier definierten Phasen umfassen hierbei die Klärung der Forschungsfragen, die deskriptive Studie eins, die präskriptive Studie sowie die deskriptive Studie zwei. Die Struktur der Arbeit wird in Abbildung 6 dargestellt und nachfolgend durch eine detaillierte Beschreibung ergänzt.



Abbildung 6: Struktur der Arbeit

Aufbauend auf den bisherigen Erläuterungen zu den Zielen dieser Arbeit erfolgt in **Kapitel 2** zunächst eine Definition zentraler Begriffe sowie die Aufarbeitung der Grundlagen und des Standes der Technik. Diese schaffen die Basis zur **deskriptiven Studie 1**, welche die theoretische Beantwortung von Fragestellung eins und zwei ermöglicht. Mit Blick auf die Zielstellungen kann darauf aufbauend festgelegt werden, wie eine Verbesserung der Referenzsituation künftig aussehen soll.

Zur Beantwortung von **Forschungsfrage F1** wird analysiert, wie sich die Bearbeitungsweise und Materialien unterschiedlicher Verfahren gegenüber der geometrischen Bauteilkomplexität auswirken. Hierzu wird in **Kapitel 2.2** zunächst das Themenfeld der Additiven Fertigung adressiert, wobei neben fachspezifischen Begrifflichkeiten eine grobe Differenzierung subsumierter Verfahren inklusive Wirkweise, Material, und Nachbearbeitungsbedarf hergeleitet wird. Zur Analyse der Wechselwirkungen zwischen geometrischer Komplexität und dem Herstellprozess wird der Verfahrensablauf und die Funktionsweise des Selektiven Lasersinterns (SLS) in **Kapitel 2.3** erläutert. Nachfolgend werden in **Kapitel 2.4** die Entstehung des Ressourcenaufwands im SLS-Prozess und damit zusammenhängende Faktoren sowie Methoden zur Kalkulation der Aufwände beschrieben. Das Ziel ist hierbei deren wirtschaftliche Bedeutung im Vergleich zur geometrischen Komplexität herauszustellen, um diese in den Folgekapiteln bewerten zu können.

Ergänzend dazu erfolgt in **Kapitel 2.5** eine detaillierte Auseinandersetzung mit der geometrischen Komplexität hinsichtlich ihrer Bedeutung für Wissenschaft und Technik sowie das Prozessumfeld. Im Hinblick auf **Forschungsfrage F2** werden Methoden zur Bewertung und Quantifizierung der geometrischen Komplexität vorgestellt und auf ihre Anwendbarkeit und Aussagekraft geprüft. Darüber hinaus werden die methodenspezifischen Bauteilattribute hinsichtlich ihrer Verwertungsmöglichkeit für die zu erarbeitende Methodik untersucht. Als Grundlage für **Kapitel 4** werden in **Kapitel 2.6** die Themen Modellbildung, statistische Versuchsplanung und Auswertung behandelt. Zur fertigungsgerechten Probengestaltung in **Kapitel 4** sowie zur Ableitung von Handlungsempfehlungen werden abschließend in **Kapitel 2.7** entsprechende Arbeiten zur Bauteilgestaltung und Konstruktionsrichtlinien analysiert. In **Kapitel 3** erfolgt anschließend eine Zusammenfassung der Erkenntnisse sowie des Handlungsbedarfs für die Erarbeitung der Methodik.

Kapitel 4 bildet den Syntheseteil zur Beantwortung von **Forschungsfrage F1 und F2**, wobei gleichzeitig **Forschungsfrage F3** bearbeitet wird. Zunächst wird in **Kapitel 4.1** eine Übersicht zum Aufbau der Methodik erläutert. Aus den zuvor gewonnenen Erkenntnissen folgt die **präskriptive Studie 1**. Hierzu wird in **Kapitel 4.2** zur weiteren Bearbeitung ein Modell des Laser-Sinter-Prozesses erstellt, um dieses für die Folgeuntersuchungen auf die relevanten Prozesse, Ressourcen und Parameter zu reduzieren. Darauf aufbauend werden in **Kapitel 4.3** die Versuchsmethodik und -planung beschrieben, welche als Basis für die Versuchsdurchführung in **Kapitel 4.4** dienen. Durch entsprechende Versuche zu Wechselwirkungen zwischen der Generierdauer und Faktoren, wie dem Bauteilvolumen und der Anzahl an Werkzeugpfaden, werden die relevanten Einflussgrößen herausgestellt und als Handlungsempfehlungen zusammengefasst. Zur Darstellung der jeweiligen Einflüsse innerhalb der Prozesskette und ihrer wirtschaftlichen Auswirkungen werden in **Kapitel 4.5** Vergleiche zwischen unterschiedlich komplexen Bauteilen angestellt, die auf den in **Kapitel 2.4** vorgestellten Kalkulationsmethoden beruhen. In **Kapitel 4.6** erfolgt eine Zusammenfassung der Erkenntnisse.

Diese Erkenntnisse fließen zusammen mit jenen aus **Forschungsfrage F1 und F2** in die Beantwortung von **Forschungsfrage F3** ein, um eine Methodik bereitzustellen, die den Anwender zur Evaluierung des Einflusses der geometrischen Komplexität auf den vorhandenen additiven Herstellprozess befähigt. Sie bilden die Grundlage für die **deskriptive Studie 2**. Hierbei wird ermittelt, ob die Methodik für solche Szenarien angewendet werden kann, die in der Zielsetzung adressiert wurden und ob sie die Faktoren aufnimmt, die im Laufe der Arbeit definiert wurden.

Es erfolgt in **Kapitel 5** die Validierung der Methode anhand dreier unterschiedlichen Anwendungsszenarien. Für Szenario 1 wird in **Kapitel 5.1** die Kategorisierung von Bauteilen mittels Komplexitätskennwerten validiert. Hierzu wird eine Auswahl an Bauteilen zunächst kategorisiert und nachfolgend im Generierprozess gefertigt, um die Beschreibungsgüte zu prüfen. Szenario 2 behandelt in **Kapitel 5.2** die Wechselwirkungen aus Verfahren und Bauteilgestalt für das Beispiel einer Serienfertigung mittels SLS-Verfahren. Es wird dargestellt, wie sich die Variation der geometrischen- und verfahrensspezifischen Einflüsse zur Optimierung des Produktionsprozesses einsetzen lässt. Für Szenario 3 wird in **Kapitel 5.3** die Methodik auf das CFF-Verfahren übertragen, um die Transferfähigkeit zu prüfen.

Die finale Zusammenfassung, ein Ausblick für weitere Forschungsthemen und der Transfer der Ergebnisse werden in **Kapitel 6** beschrieben.

2. Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zur Beantwortung von Fragestellung 1 bis 3 geschaffen. Es erfolgt zunächst eine Definition zentraler Begriffe in **Kapitel 2.1**, um den Kontext für den weiteren Verlauf klar abzugrenzen. In **Kapitel 2.2** werden additive Verfahren im Allgemeinen behandelt und der Bezug zur Thematik für die unterschiedlichen Verfahren und Materialien hergestellt. Anschließend erfolgt eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem SLS-Verfahren in **Kapitel 2.3**. In diesem werden der Prozessablauf, Materialien, Parameter und Bauteileigenschaften aufgezeigt und deren Wechselwirkung mit der Komplexität diskutiert. Grundlagen zu dem Ressourcenaufwand im SLS-Verfahren werden durch Produktionsprämissen sowie die Kostenentstehung in **Kapitel 2.4** beschrieben. Danach erfolgt in **Kapitel 2.5** die Abgrenzung des Komplexitätsbegriffs hinsichtlich dessen Definition, gefolgt von Verfahren zur Quantifizierung und Kategorisierung der Komplexität inklusive der verwendeten Faktoren. Ergänzend werden Methoden zur Modellbildung, Versuchsplanung und Versuchsauswertung in **Kapitel 2.6** behandelt. Abschließend werden in **Kapitel 2.7** die Themen Bauteilgestaltung und Konstruktionsrichtlinien in Bezug zur Komplexität gesetzt.

2.1. Definition zentraler Begriffe

Im Vorfeld werden zur Konkretisierung des Handlungsrahmens einige der für diese Arbeit relevanten Begriffe voneinander abgegrenzt. Diese umfassen zunächst Begriffe aus der Produktentwicklung und der Produktion, welche in der Literatur unterschiedlich definiert werden und im Kontext der Arbeit festgelegt werden müssen. Zum besseren Verständnis werden Begriffe im Bezug zur Additiven Fertigung gesondert in **Kapitel 2.2** an der entsprechenden Textstelle behandelt.

Methodik, Methode, Vorgehensmodell

In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Methoden vorgestellt und erarbeitet, welche zur Lösung von Fragestellung 3 genutzt werden. Abgeleitet aus bestehenden Definitionen unter anderem von (Lindemann, 2009, S. 57–58), (Ehrlenspiel, 2007, S. 143–144), (Dudenredaktion, 2023), (VDI 2221 Blatt 1, 2019) und (Kumke, 2018, S. 25–26) orientieren sich die Begriffe in dieser Arbeit besonders an (Lindemann, 2009, S. 38–39; 57–58) und werden wie folgt aufgefasst:

- Als übergeordneter Begriff beschreibt die **Methodik** „eine planmäßige Verfahrensweise zur Erreichung eines bestimmten Ziels nach einem Vorgehensplan unter Einschluss von Strategien, Methoden, Werkzeugen und Hilfsmitteln.“ (Lindemann, 2009, S. 57–58).

- Eine **Method**e ist ein regelbasiertes und planmäßiges Vorgehen und gibt an, wie Tätigkeiten auszuführen sind, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Methoden werden in der Entwicklung eingesetzt, um die Ausführung von Aktivitäten zielgerichtet und systematisch zu unterstützen. Zur Art und Weise, wie und in welcher Abfolge diese Tätigkeiten durchzuführen und zu dokumentieren sind, werden entsprechende Vorschläge gegeben. Methoden können Teil einer Methodik sein, werden demgegenüber aber zur Unterstützung konkreter einzelner Schritte verwendet. Die Methode grenzt sich zu dem Begriff des Vorgehensmodells insofern ab, als dass diese beschreibt wie etwas zu tun ist, d.h. auf welche Art und Weise und mit welchem Ergebnis die Tätigkeiten auszuführen sind.
- Demgegenüber gibt das **Vorgehensmodell** an, was zu tun ist, d.h. welche Schritte auszuführen sind. Es dient als Hilfsmittel zur Planung zukünftiger Prozesse, der Orientierung innerhalb aktueller Prozesse und der Reflexion abgeschlossener Prozesse. Zusätzlich wird es zur zielorientierten Festlegung von Folgeschritten als auch zur Aufarbeitung vergangener Aktivitäten genutzt, um Lerneffekte für neue Entwicklungssituationen abzuleiten.

Produkt, Produktion, Fertigung

Aus dem Produktionsumfeld werden ebenfalls einige Begriffe zwecks eindeutiger Zuordnung voneinander abgegrenzt. In Anlehnung an bestehende Definitionen, unter anderem durch (Awiszus et al., 2020, S. 1), (Schmid et al., 2013, S. 9), (Westkämper et al., 2011, S. 1–3), (DIN 8580, 2003), (VDI 2223, 2004, S. 88) werden folgende Definitionen verwendet:

- Ein **Produkt** ist nach VDI 2223 ein „*Erzeugnis, das als Ergebnis des Entwickelns und Konstruierens hergestellt oder angewendet wird*“ (VDI 2223, 2004, S. 88).
- Die **Produktion** umfasst das Erzeugen von Gütern und Dienstleistungen, wohingegen die Erzeugung von Gütern fester Form/Stückgüter als **Fertigung** bezeichnet wird (Schmid et al., 2013, S. 9). Die **Fertigungstechnik** beschreibt hierbei die „*Gesamtheit aller Fertigungsmittel und Fertigungsverfahren zur Herstellung geometrisch bestimmter, fester Körper und beinhaltet vor allem die materialtechnischen Elemente eines Fertigungsprozesses*“ (Awiszus et al., 2020, S. 1). Aufgabe der Fertigungstechnik ist die wirtschaftliche Herstellung eines Werkstücks, welches mittels Zeichnung oder eines anderen Informationsträger vorgegebenen wird (Fritz, 2018, S. 2).

- Nach DIN 8580 bezeichnen **Fertigungsverfahren** „alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern“ (DIN 8580, 2003, S. 4). Ein **Fertigungsprozess** umfasst den planmäßigen Ablauf von Fertigungsvorgängen, bei dem Material durch physikalische und/oder chemische Einwirkung auf einen bestimmten Endzustand gebracht wird (Awiszus et al., 2020, S. 399). Basierend auf einem konstruierten und entwickelten Produkt wird der Fertigungsprozess in die Schritte Produktionsplanung und steuerung, Materialbereitstellung, Fertigung der Werkstücke und Montage eingeteilt (Heine et al., 2019, S. 9). Während des Fertigungsprozesses werden die Einzelteile der herzustellenden Gegenstände als **Werkstücke** bezeichnet (Heine et al., 2019, S. 9). Demgegenüber sind **Fertigungsmittel** wie Maschinen, Vorrichtungen, Werkzeuge, Prüfmittel u. a. zur Änderung von Form, Substanz oder Gefügeausbildung eines Bauteils erforderlich (Awiszus et al., 2020, S. 1).

Die Einteilung der **Fertigungsarten** erfolgt auf Basis der Definitionen von (Awiszus et al., 2020, S. 401), (Piller, 2008, S. 161), (Bloech et al., 2014, S. 198). In Abhängigkeit der zu erzeugenden Menge werden die Fertigungsarten wie folgt unterschieden:

- Unter **Einzelfertigung** wird eine sich nicht regelmäßig wiederholende Fertigung kleiner Mengen mit hohem Rüstaufwand verstanden.
- Demgegenüber umfasst die **Serienfertigung** eine regelmäßige Wiederholung der Fertigung, welche je nach der zu erzeugenden Menge in Klein-, Mittel- und Großserien unterteilt wird.
- Die **Massenfertigung** zeichnet sich durch die Fertigung der gleichen Gegenstände über längere Zeiträume ohne Umrüsten aus, wobei ein hoher Automatisierungsgrad vorliegt.
- Eine Sonderform, die **Mass Customization** (dt. kundenindividuelle Massenproduktion), wird definiert als „Produktion von Gütern und Leistungen, welche die unterschiedlichen Bedürfnisse jedes einzelnen Nachfragers dieser Produkte treffen, mit der Effizienz einer vergleichbaren Massen- bzw. Serienproduktion.“ (Piller, 2008, S. 161).

Produktivität, Ressourceneffizienz, Kosten

In Bezug auf die Produktivität von Fertigungsverfahren, dem ressourceneffizienten Einsatz der verwendeten Güter sowie deren Wirtschaftlichkeit werden folgende Definitionen verwendet:

- die **Produktivität** wird definiert als „das Verhältnis von Produktionsergebnis (Output) und Einsatz von Produktionsfaktoren (Input).“ (Pollert et al., 2010). Als Kennzahl werden Mengen zueinander in Beziehung gesetzt, die in der technischen Produktivität in physikalischen Maßeinheiten gemessen werden, z.B. die produzierte Menge zur Anzahl der Arbeitsstunden (Pollert et al., 2010).
- die **Ressourceneffizienz** stellt hierbei das Verhältnis eines bestimmten Nutzens in Form eines Produkts, einer Funktion oder funktionalen Einheit zu dessen Aufwand dar, z.B. durch Einsatz natürlicher Ressourcen, wie Energie, Rohstoffe, Wasser, Luft, Boden/Fläche (Dückert et al., 2015, S. 16). Der Nutzen kann ein konkretes Produkt bzw. eine Dienstleistung sein oder über eine Funktion bzw. funktionelle Einheit beschrieben werden (Weber, 2019, S. 8). Ein Prozess gilt als **effektiv**, wenn er das angestrebte Ziel erreicht; wie viele Ressourcen dafür benötigt werden, gibt die **Effizienz** an, d.h. umso höher die Effizienz, desto geringer der Aufwand zum Erreichen des Ziels (Westkämper et al., 2011), (Förster & Förster, 2018). Hierbei wird eine höhere Wertschöpfung erzielt, je schneller die Durchlaufzeit mit den verfügbaren Produktionsressourcen überwunden wird (Westkämper et al., 2011, S. 1–3).
- **Kosten** beschreiben dabei den in Geld bewerteten Verzehr von Gütern/Produktionsfaktoren zur Erstellung und zum Absatz der betrieblichen Erzeugnisse und zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft. Güter und Produktionsfaktoren sind in diesem Sinne z.B. Betriebsmittel, Material, menschliche Arbeit und Löhne. (Ehrlenspiel et al., 2005, S. 407), (VDI 2234, 1990, S. 9)

2.2. Additive Fertigung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zum Verständnis additiver Verfahren behandelt. Es erfolgt zunächst in **Kapitel 2.2.1** eine Übersicht zur Systematik, Definitionen sowie verschiedenen Verfahren, inklusive Wirkweisen und verfügbaren Materialien. Die Aufschlüsselung der Verfahren dient als Grundlage für **Kapitel 2.2.2**, in welchem eine Auswahl industrieller Kunststoff-Verfahren hinsichtlich ihrer Wechselwirkungen mit der geometrischen Komplexität analysiert werden.

2.2.1. Definition und Eigenschaften

Unter dem Begriff Additive Fertigungsverfahren (AF) oder auch Generative Fertigungsverfahren werden solche zusammengefasst, die dreidimensionale Bauteile in einem automatisierten, schichtweisen Prozess aus einem formlosen oder formneutralen Material aufbauen (Klahn et al., 2018, S. 11). Ebenfalls werden als Additive Fertigungsverfahren alle Fertigungsverfahren bezeichnet, die *„Bauteile durch Auf- oder Aneinanderfügen von Volumenelementen (Voxeln), vorzugsweise schichtweise, automatisiert herstellen.“* (Gebhardt, 2016, S. 3).

Die Eingruppierung nach DIN 8580 erfolgt auf unterschiedliche Weise, da die einzelnen Verfahren sich durch ihre Wirkweise unterscheiden und entsprechend keine eindeutige Zuordnung möglich ist (Kumke, 2018, S. 9), (Berger et al., 2017, S. 10). Ebenfalls ist die Einteilung nach der Herstellung der Geometrie möglich, wodurch die Fertigungsverfahren in subtraktive, formative und additive Fertigungsverfahren eingeteilt werden (Gebhardt, 2016, S. 1), (ISO/ASTM International, 2021, S. 5). Nach ISO/ASTM 52900:2021(E) werden innerhalb der Additiven Fertigung folgende Verfahrenskategorien definiert (ISO/ASTM International, 2021, S. 2–3), (Vaneker et al., 2020, S. 2):

- VAT Polymerization (VPP)
- Powder Bed Fusion (PBF)
- Material Jetting (MJT)
- Binder Jetting (BJ)
- Material Extrusion (MEX)
- Direct Energy Deposition (DED)
- Sheet Lamination (SHL)

Zusätzlich bestehen Hybridisierungsansätze dieser Grundverfahren mit herkömmlichen Verfahren, wie dem Zerspanen und Gießen (Gebhardt, 2016, S. 306). Diese zielen z.B. darauf ab, dass komplexe Geometrien mit geringem Materialverbrauch additiv generiert (z.B. zur Herstellung innerer Kavitäten) und simple Geometrien mit traditionellen Verfahren hergestellt werden (Martof et al., 2018, S. 118), (Zeyn, 2017, S. 49), (Häfele et al., 2019), (Manogharan et al., 2016, S. 22).

Nach DIN EN ISO 17296-2 (DIN, 2016, S. 7) und ISO/ASTM 52900:2021(E) (ISO/ASTM International, 2021, S. 2) werden additive Verfahren hinsichtlich der notwendigen Prozesse in zwei Kategorien eingeteilt:

- **Einstufige Prozesse**, bei denen die geometrische Grundform sowie grundlegende Materialeigenschaften des vorgesehenen Produkts gleichzeitig in einem Arbeitsgang entstehen.

- **Mehrstufige Prozesse**, bei denen die Bauteile in zwei oder mehreren Arbeitsgängen hergestellt werden. Ersterer liefert in der Regel die grundlegende geometrische Form und die Folgeschritte⁴ bringen das Bauteil auf die geforderten Eigenschaften des Materials (Metall, Keramik, Polymer, Verbundwerkstoff).
- Das Reinigen und Entfernen von Stützstrukturen wird hierbei nicht als separater Prozessschritt berücksichtigt.

Die Fertigungsverfahren unterscheiden sich dabei hinsichtlich dem Bearbeitungswerkzeug, wie z.B. Laser, Extruder, UV-Leuchtdiode (LED) und Druckköpfe, sowie den verwendeten Werkstoffen, zu denen Polymere, Metalle, Keramiken, Sande, Wachse und Verbundwerkstoffe zählen (Redwood et al., 2017, S. 22), (Berger et al., 2017, S. 10), (Wohlers Associates, 2021, S. 99–101). Das Material kann hierzu beispielhaft in Form von Pulver, als Granulat, als Flüssigkeit (z.B. Photopolymer), Filament, Draht oder als Laminat vorliegen (Berger et al., 2017, S. 10), (Wohlers Associates, 2021, S. 119). Nach Wohlers (Wohlers Associates, 2021, S. 120) liegen die Marktanteile der verschiedenen Materialtypen im Jahr 2020 bei 30,1 % Photopolymeren, 29,9 % Polymerpulvern und 19,7 % Filamenten, 18,2 % Metallen und 2,1 % Anderen.

Entsprechend der verwendeten Kombination aus Bearbeitungswerkzeug und Material entstehen aus den ursprünglichen Verfahrenskategorien eine Vielzahl an Subverfahren. Diese Kombination ist entscheidend, da neben der Geometrie beim Herstellprozess auch gleichzeitig die Stoffeigenschaften entstehen (Gebhardt, 2016, S. 1–2). Aufgrund der schichtweisen Fertigung verfügen sie in Abhängigkeit der Schichthöhe zusätzlich über einen charakteristischen Treppenstufeneffekt und je nach Verfahren über anisotrope Eigenschaften (Klahn et al., 2018, S. 110). Weiterhin unterscheiden sich die Verfahren hinsichtlich der notwendigen Prozesskette für den Herstellprozess bzw. deren Umfang, was in **Kapitel 2.2.2** näher beleuchtet wird.

2.2.2. Industrielle kunststoffbasierte AM-Verfahren

Wie bereits zuvor beschrieben wurde, existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahrensarten, welche auf verschiedene Art und Weise die dreidimensionale Generierung von Bauteilen ermöglichen. Dadurch bedingt unterscheiden sie sich ebenfalls in der Sensitivität gegenüber der zu erzeugenden Geometrie-(Komplexität), was im Folgenden weiter erläutert wird.

⁴ Für mehrstufige Prozesse sind nach VDI 3404 (VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2009, S. 34) die chemische oder thermische Umwandlung sowie die Infiltration zu nennen.

In Ergänzung zu dem SLS-Verfahren wird eine Auswahl⁵ kunststoffbasierter Verfahren, inklusive Unterscheidungsmerkmalen in Abbildung 7 dargestellt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die jeweiligen Abkürzungen der Unterverfahren verwendet, die wie folgt lauten:

- Stereolithographie (SL)
- Digital Light Processing (DLP)
- Polyjet Modeling (PJM)
- Multijet Modeling (MJM)
- 3D-Printing (3DP)
- Fused Filament Fabrication (FFF)
- Continuous Fiber Fabrication (CFF)
- Selektive Laser Sintering (SLS)
- High Speed Sintering (HSS)
- Multi Jet Fusion (MJF)

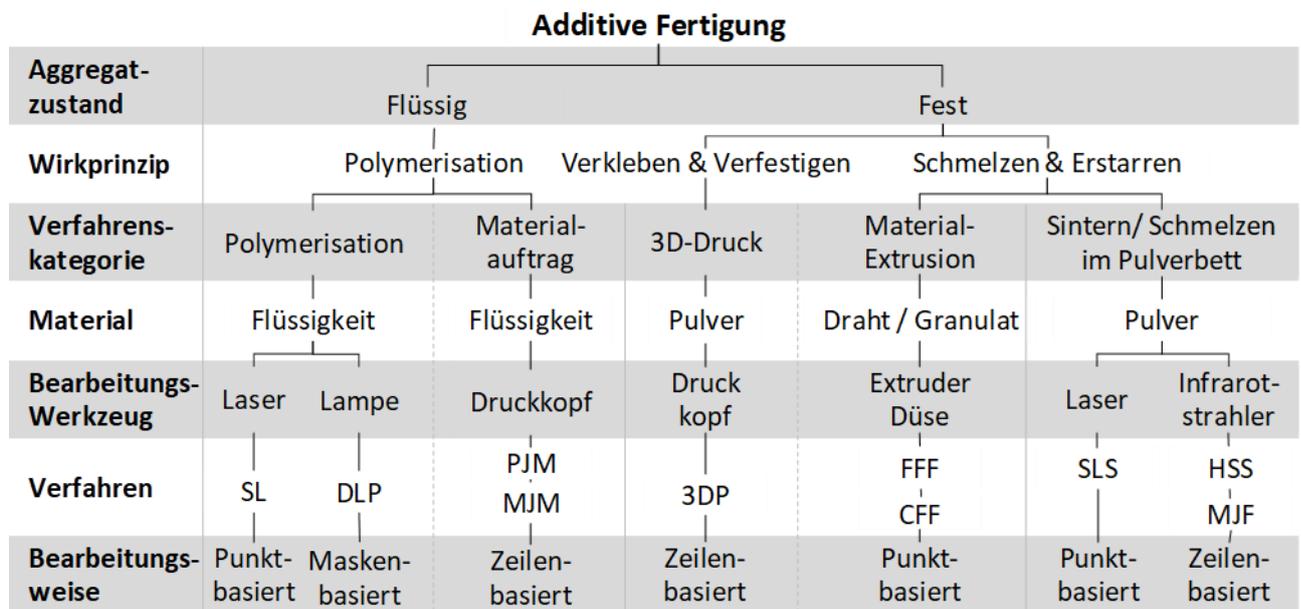


Abbildung 7: Auswahl von Kunststoff-AM-Verfahren in Anlehnung an (Kumke, 2018, S. 13)

Um abseits des SLS eine Abschätzung zu diesen Verfahren zu ermöglichen, werden diese nachfolgend anhand von vier Merkmalen beleuchtet, welche besonders mit der geometrischen Komplexität zusammenhängen. Diese beinhalten (1) die Anbindung zur Bauplattform, (2) den Einsatz von Stützstrukturen, (3) die Bearbeitungsweise und (4) den Nachbearbeitungsaufwand.

Das **erste Merkmal** umfasst die Notwendigkeit des Verfahrens die zu fertigenden Bauteile auf einer Bauplattform aufzubauen, was in Abbildung 8 dadurch gekennzeichnet ist, dass die Bauteile direkt mit dieser verbunden sind (vgl. FFF, SL, DLP, PJM). Das **zweite Merkmal** ist die Notwendigkeit Stützstrukturen herzustellen, um Überhänge darzustellen (vgl. Abbildung 8 - orangene Gitterstrukturen). In Abhängigkeit notwendiger Anbindungen zur Bauplattform und Stützstrukturen sind Verfahren wie FFF, SLA, DLP, PJM und MJM meist auf eine Ebene begrenzt.

⁵Die Kategorien „Sheet Lamination“ und „Direct Energy Deposition“ werden aufgrund der gewählten Positionierung nicht behandelt

Hingegen ermöglichen pulverbasierte Verfahren wie SLS, MJF, HSS, 3DP eine Bauraumbestückung in allen Ebenen, da das Pulver als passive Stütze dient (Kumke, 2018, S. 230), (Gibson et al., 2015, S. 143–144), (Breuninger et al., 2013, S. 28–31), (Goodridge & Ziegelmeier, 2017, S. 181). Eine Darstellung dieser Unterschiede ist in Abbildung 8 zu sehen, wobei die Bearbeitungsarten punktbasiert (1-3), zeilenbasiert (4, 5) und maskenbasiert (6) beispielhaft illustriert sind. Eine detaillierte Beschreibung der Verfahrensunterschiede erfolgt anschließend zu **Merkmal drei**.

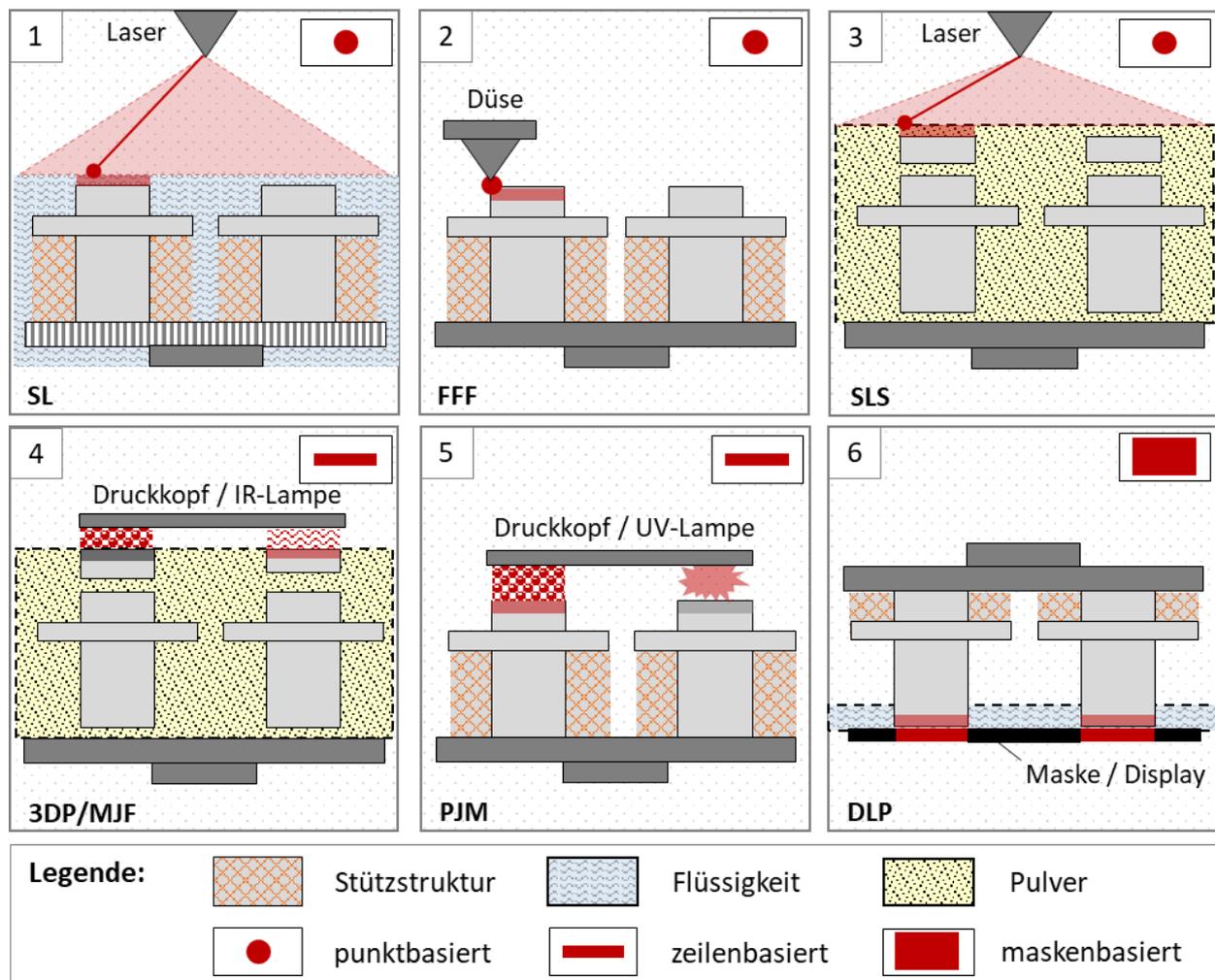


Abbildung 8: Schematische Darstellung ausgewählter AM-Verfahren (Eigene Darstellung)

Unter Berücksichtigung thermomechanischer Einflüsse kann bei pulverbasierten Verfahren folglich die komplette Baukammer genutzt werden um Bauteile zu platzieren und insofern geometrisch möglich auch ineinander zu verschachteln. Hierdurch kann die Packdichte⁶ und damit auch die Produktivität gesteigert werden (Goodridge & Ziegelmeier, 2017, S. 181), (VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2015, S. 12).

⁶ Die Packdichte beschreibt den Anteil des Bauteilvolumens am eingesetzten Bauraumvolumen, bzw. der Materialmenge.

Verfahren ohne dieses Pulverbett benötigen Stützstrukturen, speziell um überhängende Bauteilstrukturen zu stützen und Verzug entgegenzuwirken (Zeyn, 2017, S. 32), (Klahn et al., 2018, S. 114). Hierzu ist eine Anbindung zur Bauplattform oder dem Bauteil selbst notwendig, um ein Ablösen des Bauteils während des Generierens infolge auftretender Kräfte (Spannungen, Verzug) mit hinreichender Haftfläche und Stützstrukturen entgegenzuwirken. Diese Stützen müssen entweder aktiv platziert und generiert werden (z.B. FFF, SLA, DLP) oder werden passiv, z.B. in Form von nicht geschmolzenem Pulver, realisiert (z.B. SLS, MJF). Die Stützstrukturen können aus dem Baumaterial gefertigt werden oder aus einem zweiten Material, welches z.B. wasserlösliche Eigenschaften besitzt und die manuelle Entfernung damit erleichtert (Klahn et al., 2018, S. 114). Je nach Verfahren und Geometrie können diese einen höheren Materialanteil haben als das Bauteil selbst, sodass entgegen dem ressourceneffizienten Gedanken hohe Abfallmengen entstehen.

Als **drittes Merkmal** werden die unterschiedlichen Bearbeitungsweisen erfasst, um zu unterscheiden, wie die einzelnen Schichten und der zu erzeugende Bauteilquerschnitt realisiert werden. Eine Darstellung erfolgt in Abbildung 9, wobei folgende Arten differenziert werden:

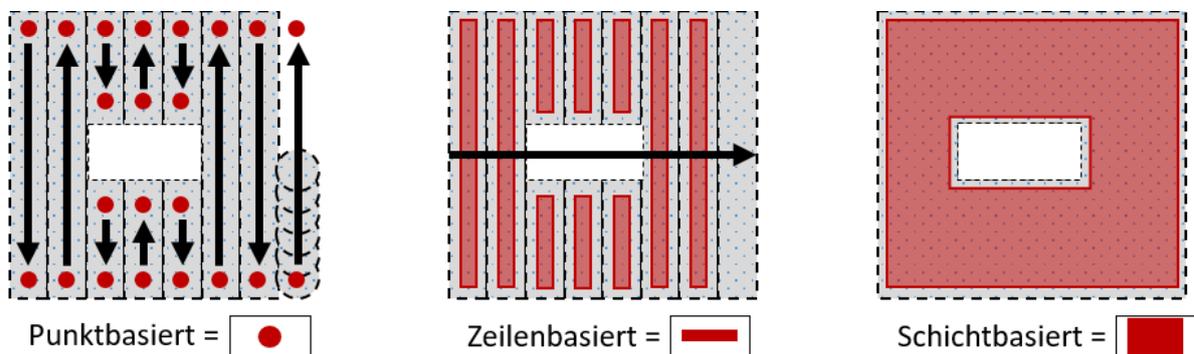


Abbildung 9: Ausgewählte AM-Verfahren im Hinblick auf deren Bearbeitungsweise (Eigene Darstellung)

- **Punktbasierte- und vektorbasierte Verfahren**, die das Bearbeitungswerkzeug von Punkt zu Punkt steuern. Resultierend daraus erhöhen fragmentierte Flächen infolge notwendiger Bewegungen/Positionswechsel inklusive dafür notwendiger Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge die Leerlaufzeit. Mit dieser Art der Bearbeitung wird die höchste Genauigkeit erreicht, allerdings ist sie auch die langsamste und hängt insbesondere von der Schichtkomplexität ab (Gebhardt, 2016, S. 85). Zu dieser Gruppe zählen z.B. die laserbasierten Verfahren Stereolithografie und Selektives Lasersintern sowie Extrusionsverfahren wie die Fused Filament Fabrication (Schmid, 2015a, S. 6), (Gibson et al., 2015, S. 64).

- **Linien-, zeilen- und rasterbasierte Verfahren**, welche zeilenweise das Bearbeitungswerkzeug verfahren und über die komplette Länge Material/Bindemittel selektiv an Bereichen applizieren, an denen ein Bauteil entstehen soll. Resultierend daraus wird eine höhere Druckgeschwindigkeit als bei punktbasierten Verfahren erreicht, da die Generierdauer nicht von der Komplexität abhängt (Zeyn, 2017, S. 60), (Gebhardt, 2016, S. 85). Zu diesen Verfahren zählen z.B. Absorptionstintendruck/Multijet Fusion, 3D-Drucken, Binder Jetting, Material Jetting, High-Speed Sintering und Selective Absorption Fusion. (Schmid, 2015a, S. 6), (Gebhardt et al., 2016, S. 55), (Pradel et al., 2017), (Gibson et al., 2015, S. 140), (Zeyn, 2017, S. 60), (Schmid, 2023, S. 14)
- **Schichtweise- und maskenbasierte Verfahren**, welche ganze Schichten/Flächen gleichzeitig belichten und damit unabhängig von der Bauteilanzahl und Geometrie sind (Gibson et al., 2015, S. 64), (Zhou et al., 2015, S. 3), (Gebhardt, 2016, S. 85). Diese haben Geschwindigkeitsvorteile und eine erhöhte Prozesseffizienz gegenüber vektorbasierten und zeilenbasierten Verfahren, da die Verwendung einer Maske zur Projektion eines kompletten Querschnitts genutzt werden kann, anstatt diesen sequentiell über Vektormuster zu bearbeiten (Gibson et al., 2015, S. 101). Hierzu zählen Verfahren wie Digital Light Processing und Continuous Liquid Interface Production (Gebhardt et al., 2016, S. 44), (Zeyn, 2017, S. 63).

Merkmal vier umfasst den Nachbearbeitungsaufwand durch mechanisches und/oder chemisches Entfernen von überschüssigem Material und Stützstrukturen. Bei harzbasierten Verfahren wie SLA und DLP erfolgt zusätzlich eine Reinigung zum Entfernen von Restharz und die vollständige Aushärtung mittels UV-Kammer (Gebhardt et al., 2016, S. 41).

Die Basis-Nachbearbeitung pulverbasierter Verfahren umfasst das (manuelle) Entpacken der Bauteile aus dem umschließenden Pulverkuchen, was unter anderem durch Hilfswerkzeuge, wie Bürsten und Pinsel zum Entfernen von Restpulver ergänzt werden kann. Durch komplexe Geometrien, z.B. in Form innenliegender Strukturen und Kanäle, kann dieser Vorgang sehr aufwändig sein (Klahn et al., 2018, S. 20). Anschließend erfolgt in der Regel ein Reinigungsstrahlen, wobei diese beiden Prozesse maßgeblich von der Zugänglichkeit abhängig sind. Zu berücksichtigen ist, dass das Kunststoffpulver z.B. nach dem SLS-Prozess eine schlechtere Fließfähigkeit aufweist, was die Entfernung erheblich erschwert (Klahn et al., 2018, S. 138). Abgeleitet aus den Ausführungen wird in folgender Tabelle 2 qualitativ verdeutlicht, auf welche Aspekte sich die geometrische Komplexität hinsichtlich der Produktivität unterschiedlicher Verfahren auswirkt.

Es wird bewertet, ob und wie stark sich die Bauteilgeometrie auf diese Aspekte auswirkt. Die Abstufung umfasst „hoch“ = 1 Pkt., „mittel“ = 0,5 Pkt. und „gering“ = 0 Pkt. Eine hohe Punktzahl bedeutet eine höhere Sensitivität des jeweiligen Verfahrens auf die geometrische Komplexität. Jedoch ist anzumerken, dass nur eine grobe Einschätzung gegeben wird, da die Vielzahl an Varianten und Materialien nicht abgedeckt werden kann. Darüber hinaus wird die Positionierung und Bauteilorientierung und damit zusammenhängende anisotrope Eigenschaften in dieser Darstellung nicht berücksichtigt, aber für das SLS in **Kapitel 2.3.3** erläutert.

Tabelle 2: Komplexitätseinfluss auf industrielle AM-Kunststoff-Verfahren

Verfahren Merkmal	SL	FFF/CFF	SLS	MJF/3DP/HSS	PJM/MJM	DLP
1 Anbindung	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
2 Stützstrukturen	Gleiches Material	Bau- oder Stützmat.	Pulver (passiv)	Pulver (Passiv)	Stützmaterial	Gleiches Material
3 Bearbeitung	Vektorbasiert	Vektorbasiert	Vektorbasiert	Zeilenbasiert	Zeilenbasiert	Flächenbasiert
4 Nachbearbeitung	Support + Reinigen + Aushärten	Support	Auspacken + Strahlen	Auspacken + Strahlen	Support + Reinigen	Support + Reinigen + Aushärten
Geometrischer Einfluss auf	4/4 Aspekte	4/4 Aspekte	2,5/4 Aspekte	2/4 Aspekte	3/4 Aspekte	3/4 Aspekte

Legende: 1 Punkt, 0,5 Punkte, 0 Punkte

Wie in Tabelle 2 erkennbar ist, werden linien- bzw. zeilenbasierte Verfahren im Generierprozess geringer beeinflusst, wobei die ungleichmäßige Wärmeverteilung auch hier die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Der Generierprozess maskenbasierter Verfahren wird praktisch nicht von der geometrischen Komplexität beeinflusst, sodass die Belichtungsdauer pro Schicht unabhängig von der Geometrie und Anzahl der Bauteile ist. Es sind jedoch geometriebedingte Stützstrukturen zu berücksichtigen, welche den Generierprozess verlängern und die dafür notwendige Nachbearbeitung. Bei dieser allgemeinen Vorabbewertung ist zusätzlich der Produktionsstandort zu berücksichtigen. Zwar werden die Anlagensysteme für den Generierprozess nahezu ohne Personal betrieben, jedoch sind die Datenvorbereitung sowie Nachbearbeitungsprozesse häufig durch manuelle Tätigkeiten geprägt und können erhebliche Kosten verursachen (Pradel, Zhu, et al., 2018b, S. 190), (Valentan et al., 2011, S. 7), (Vaneker et al., 2020, S. 5), (Manogharan et al., 2016, S. 14). Werden hierzu Mitarbeiterkosten des verarbeitenden Gewerbes verglichen⁷, sind die Unterschiede zwischen Hochlohnländern und Niedriglohnländern zu berücksichtigen.

⁷ Arbeitnehmerkosten betragen in Hochlohnländern wie Deutschland und Frankreich über 35 € pro Stunde und in Niedriglohnländern wie Ungarn und Polen unter 11 € pro Stunde (Statistisches Bundesamt, 2019, S. 3)

Da die Kosten für Mitarbeiter in Hochlohnländern einen erheblichen Anteil gegenüber den Maschinenkosten darstellen, reduziert sich der Wettbewerbsvorteil im Hinblick auf die automatisierte Bauteilgenerierung. In Abhängigkeit des verwendeten Materials, der Anlagentechnik und des Standorts verändert sich der jeweilige Kostenanteil, sodass diese qualitative Bewertung lediglich einen ersten Anhaltspunkt bietet.

Weiterführende Literatur zu Verfahren, Merkmalen und Nachbearbeitungsbedarf findet sich in folgenden Arbeiten (Valentan et al., 2011), (Gebhardt, 2016), (Gebhardt et al., 2016), (Schmid, 2015a), (Gibson et al., 2015), (Wohlers Associates, 2021), (Breuninger et al., 2013, S. 39).

2.3. Selektives Lasersintern

In diesem Kapitel werden die Grundlagen geschaffen, die einerseits zum Verständnis der Wechselwirkungen zwischen dem SLS-Prozess und der Komplexität entstehen und andererseits um die Methodenerarbeitung in **Kapitel 4** zu verstehen. Eine graphische Darstellung der Inhalte erfolgt in Abbildung 10 und wird im Folgenden erläutert.

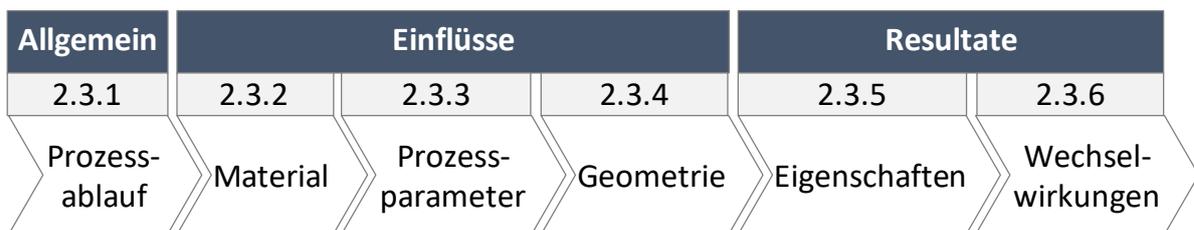


Abbildung 10: Struktur des SLS-Kapitels

Zunächst wird allgemein der **Prozessablauf des SLS** beschrieben. Anschließend wird erläutert, welchen Einfluss das **Material** und die **Prozessparameter** besitzen. Wie in Abbildung 11 dargestellt wird, erfolgt eine Aufschlüsselung grundlegender Parameter aus den Bereichen Material, Maschine, Bauraum, Laser und Scanner. Diese stellen einen für die Arbeit relevanten Auszug dar und können vertieft werden in Literatur wie (Wegner, 2015, S. 8), (Schmid, 2023, S. 20), (Beaman, 1992), (Yan et al., 2021). Als Ergänzung zu den Parametern werden verschiedene Modelle zum Energieeintrag während des Generierprozesses erläutert. Diese werden genutzt, um nachfolgend den **Einfluss der Geometrie** zu verdeutlichen. Aus den **Wechselwirkungen** zwischen Material, Prozessparametern und der Geometrie wird beschrieben, welche **Bauteileigenschaften** und Auswirkungen für den Herstellprozess entstehen.

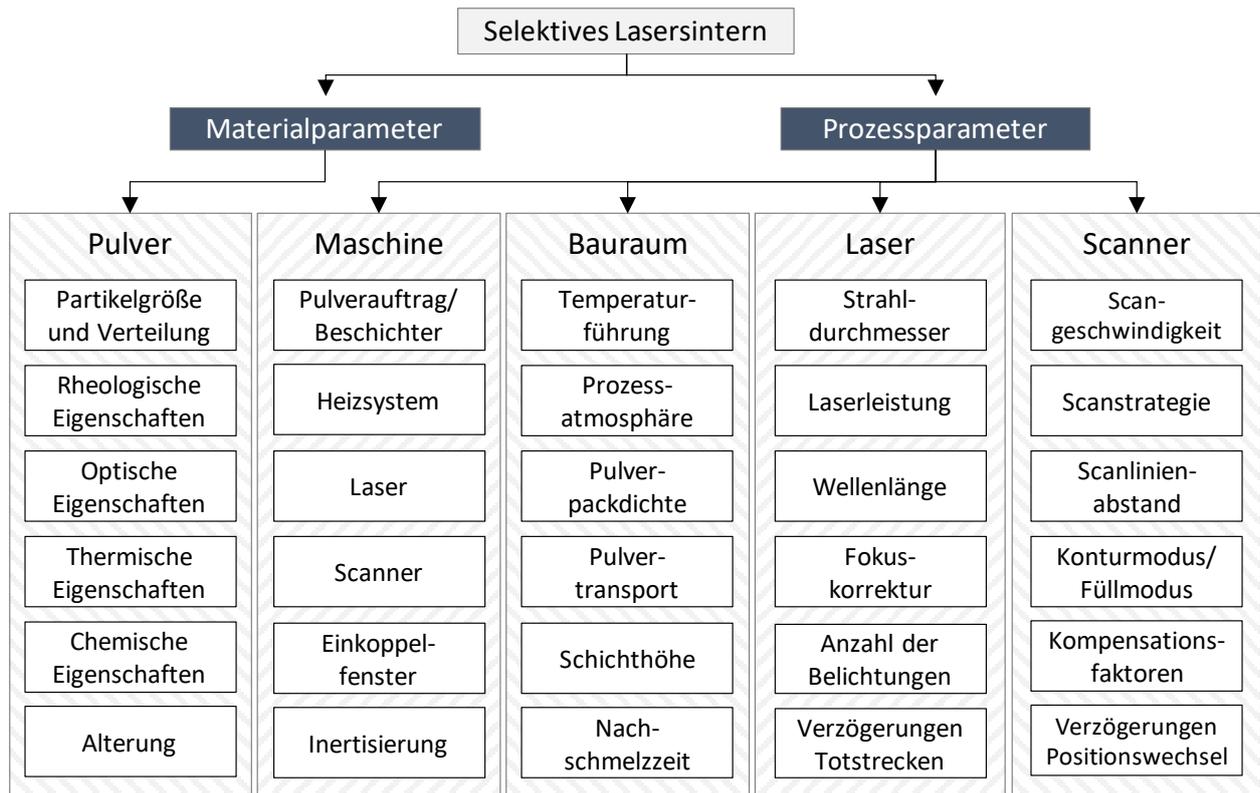


Abbildung 11: Grundlegende Parameter im Rahmen dieser Arbeit (Eigene Darstellung)

2.3.1. Prozessablauf

Der Prozessablauf des Selektiven Lasersinterns setzt sich grundsätzlich zusammen aus der Vorbereitung der Daten und der Maschine, dem Generierprozess sowie notwendiger und optionaler Nachbearbeitungsschritte zur Finalisierung der Bauteile. Diese untergliedern sich in Teilprozesse, welche in Abbildung 12 abgebildet und in den folgenden Abschnitten beschrieben werden. Die Einteilung erfolgt in Anlehnung an (Kumke, 2018, S. 9–11), (Zäh, 2006, S. 14–23), (Gibson et al., 2015, S. 5), (Gebhardt, 2016, S. 27), (Schmid, 2023, S. 54–67), (Baumers & Holweg, 2019, S. 798).

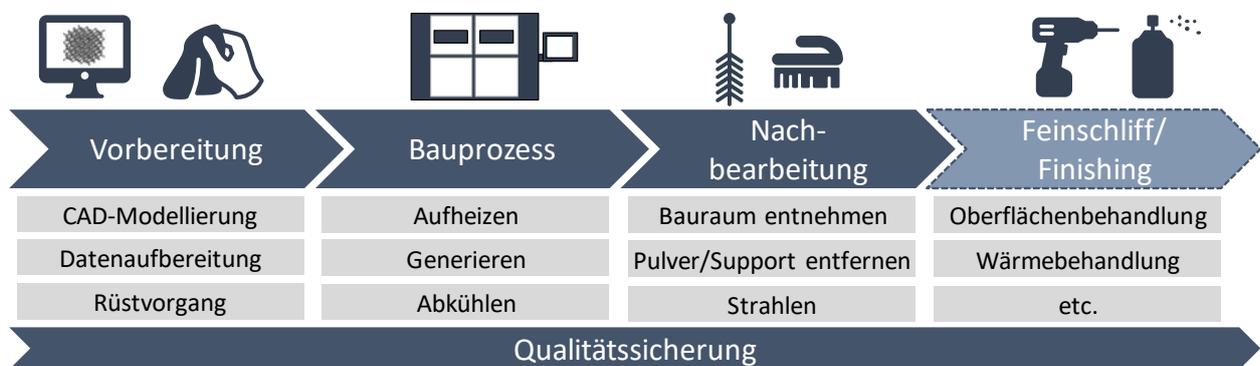


Abbildung 12: Prozessablauf des SLS mit Kunststoffen (Eigene Darstellung)

Datengenerierung und -aufbereitung

Die Aufbereitung der Daten erfolgt anhand zuvor generierter 3D-Daten, die eine komplette Beschreibung der äußeren Modellgeometrie ermöglichen und mittels CAD-Konstruktion oder 3D-Messverfahren, wie Streifenlichtprojektion und Computertomographie (CT), erzeugt werden (Gibson et al., 2015, S. 4), (Awiszus et al., 2020, S. 374), (Klahn et al., 2018, S. 45). Die Daten können hierzu in unterschiedlichen Formaten ⁸ ausgegeben werden, welche sich im Informationsgehalt unterscheiden, z.B. STL, 3MF, AMF (Zeyn, 2017, S. 13), (Gräßler et al., 2016, S. 212–213). Aufgrund der Marktdominanz als Standardformat wird im Rahmen dieser Arbeit nur das STL-Format behandelt (Gräßler et al., 2016, S. 215). Die Umwandlung in das STL-Datenformat bildet den ersten Schritt zur Überführung der Geometrieinformationen in ein maschinenspezifisches Steuerprogramm. Wie in Abbildung 13 dargestellt ist, erfolgt jedoch nur eine Annäherung an die mathematisch exakte Kontur bzw. die externe Oberfläche des Modells mittels Dreiecken. Folglich entscheidet deren Anzahl unter anderem darüber, welche (Un-)Genauigkeit erreicht wird (Awiszus et al., 2020, S. 375–376), (Valentan et al., 2011, S. 2).

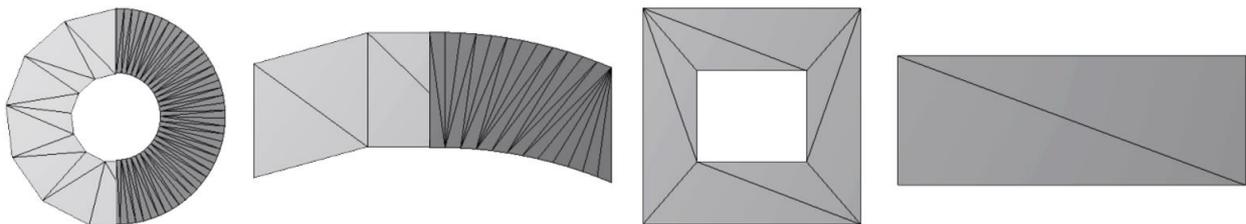


Abbildung 13: Unterschied der Geometrietreue bei niedriger und hoher Auflösung (Eigene Darstellung)

Die resultierende Geometrietreue und Datengröße korreliert dabei stark mit der Auflösung: Je höher die Auflösung, desto genauer ist die Annäherung an die CAD-Datei und desto größer die Datenmenge; umgekehrt nehmen Genauigkeit und Datenmenge ab (Klahn et al., 2018, S. 116). Zu beachten ist, dass die Auflösungsgrenze der Fertigungsanlage nicht überschritten wird, da die Maschine die Genauigkeit nicht abbilden kann und die Datenmenge größer ist als notwendig (Awiszus et al., 2020, S. 375). Eine große Datenmenge begünstigt dabei Verzögerungen der Datenvorbereitung (Klahn et al., 2018, S. 116), (Ga et al., 2018). Insofern die Fertigungsanlage die Daten erst vor jeder zu belichtenden Schicht sliced ⁹, können zusätzliche Verzögerungen entstehen.

⁸ STL: **S**urface **T**essellation **L**anguage/**S**tandard **T**ransformation **L**anguage; 3MF: **3D M**anufacturing **F**ormat; AMF: **A**dditive **M**anufacturing **F**ile **F**ormat (Zeyn, 2017, S. 12–13), (Gebhardt, 2016, S. 44)

⁹Das Slicen der aktuellen Schicht unmittelbar vor der Bearbeitung wird als „Slicing on the fly“ bezeichnet (Gebhardt, 2016, S. 181)

Dies kann dazu führen, dass die Schichtdatengenerierung mehr Zeit benötigt als die Laserbearbeitung. Eine hohe Datenmenge fördert zudem den Umstand, dass Daten von der Maschine nicht verarbeitet werden können oder der Bauraum trotz Kapazität nicht die volle Höhe und Packdichte nutzen kann. Demgegenüber führt eine zu niedrige Datenmenge/Anzahl an Dreiecken zu einer verringerten Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit des produzierten Bauteils (Valentan et al., 2011, S. 2). Aufbauend auf den STL-Daten werden die Bauteildaten mittels maschinenspezifischer Software weiterverarbeitet, um sie im virtuellen Bauraum anordnen zu können.

Nachfolgend erfolgt das Zerteilen (engl.: Slicen) der Bauteile in Schichten, welches von der anlagenspezifischen Schichtstärke (Z-Zustellung) abhängig ist (Awiszus et al., 2020, S. 377). Anhand dieser 2-½-D-Schichten werden die entsprechenden Maschinenparameter sowie die Bearbeitungspfade des Fokuspunktes festgelegt. Die Positionierung und Orientierung ist dabei maßgeblich für die Bauteilqualität verantwortlich, z.B. mit Blick auf mechanische und optische Eigenschaften sowie Formtoleranzen (Zeyn, 2017, S. 66–68). Zusätzlich definieren diese wie in Abbildung 14 dargestellt die Außenkonturen (schwarze Pfeile) sowie die Füllfläche (rote Pfeile) für die Bearbeitungspfade. Abschließend erfolgt die Datenübermittlung zur Maschine.

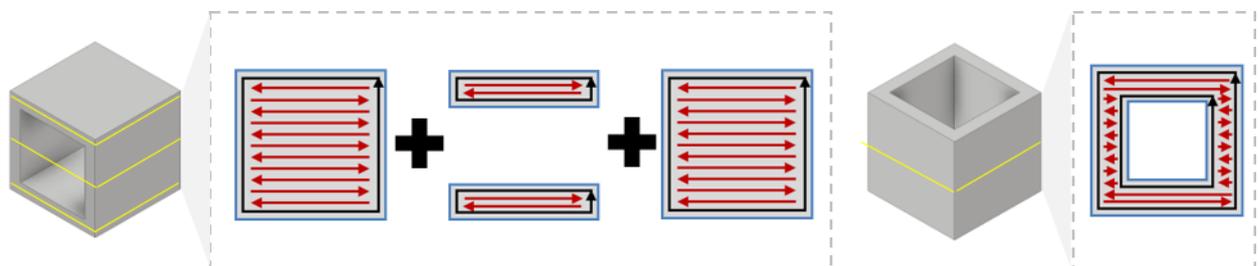


Abbildung 14: Einfluss der Orientierung auf die Bearbeitungspfade (Eigene Darstellung)

Rüsten

Der Rüstvorgang umfasst Tätigkeiten zur Vorbereitung der Maschine, wie das Reinigen sowie solche zur Vorbereitung des Materials, z.B. durch Sieben, Lagern und Mischen sowie das Befüllen der Anlage. Das Laserschutzglas muss beispielhaft nach jedem Prozess gereinigt werden, da Ablagerungen und das Einbrennen von Partikeln den Prozess maßgeblich beeinträchtigen und den Laser schädigen können (Schmid, 2015a, S. 16). Diese Ablagerungen und Einbrände entstehen durch das Ausgasen verschiedener Substanzen, die am Laserschutzglas kondensieren und somit die Transmission verschlechtern, was die Laserenergie auf dem Pulverbett verringert und das Strahlprofil weitet (Fulcher & Leigh, 2013, S. 160).

Aufheizprozess

Im gerüsteten Zustand wird die Anlage geschlossen und die Baukammer mit Schutzgas geflutet. In der Prozesskammer wird eine Stickstoffatmosphäre (N_2) geschaffen, um eine Pulverexplosion und die Oxidation des Materials zu verhindern, sodass je nach Material ein Restsauerstoffanteil von 0,1 bis 3,5 % verbleibt (Gebhardt, 2016, S. 166), (Klahn et al., 2018, S. 18), (Wegner, 2015, S. 39). Vor und während des Sinterprozesses wird das Pulvermaterial schichtweise aufgetragen und aufgeheizt, um die benötigte Energie des Lasers sowie thermisch induzierte Spannungen zu reduzieren (Nelson, 1993, S. 3). Das Material wird dabei unterhalb des Schmelzpunktes des jeweiligen Polymers erwärmt¹⁰ (Vasquez et al., 2011, S. 16), (Schmid, 2015a, S. 44). Hierzu wird eine Flächen- oder Mehrzonenheizung in der Prozesskammer genutzt, wobei zusätzliche Wärmequellen zum temperieren der Pulverzufuhr, der Baukammer sowie Wänden und Böden vorhanden sein können (Schmid, 2015a, S. 18), (Goodridge & Ziegelmeier, 2017, S. 193).

Der Pulvertransport erfolgt je nach Hersteller durch eine Beschichter Klinge, Pulverkassetten mit zwei Klingen oder mittels eines Rollenbeschichters; eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Vor- und Nachteile erfolgt in weiterer Literatur (Schmid, 2015a, S. 44–96), (Lupone et al., 2021, S. 5). Zu Beginn des Prozesses werden zunächst leere Pulverschichten aufgetragen, d.h. Material wird aufgetragen, ohne dass es vom Laser geschmolzen wird. Dieser Auftrag dient zur Herstellung eines thermisch stabilen Zustands und kann mehrere Stunden umfassen (Schmid, 2015a, S. 44), (Goodridge & Ziegelmeier, 2017, S. 183).

Generierprozess/Sinterprozess

Die notwendige Energie zum Schmelzen des Pulvermaterials wird im Folgenden durch die Oberflächenheizung sowie die Energie des Lasers realisiert. Zu Beginn des Sinterprozesses werden auf der vorgeheizten Pulverschicht - nach Vorgabe der Schichtdaten - die entsprechenden Bearbeitungspfade mittels Laser abgefahren und geschmolzen. Anschließend wird die Bauplattform um eine definierte Schichtstärke abgesenkt, eine neue Pulverschicht aufgetragen, beheizt und selektiv aufgeschmolzen, womit die Einzelschichten miteinander verbunden werden. Eine schematische Darstellung dieses Ablaufs erfolgt in Abbildung 15.

¹⁰ Für Nylon-12 wird die Betttemperatur beispielhaft mit 170-178°C angegeben, bei einer Schmelztemperatur von 184,8°C (Vasquez et al., 2011)

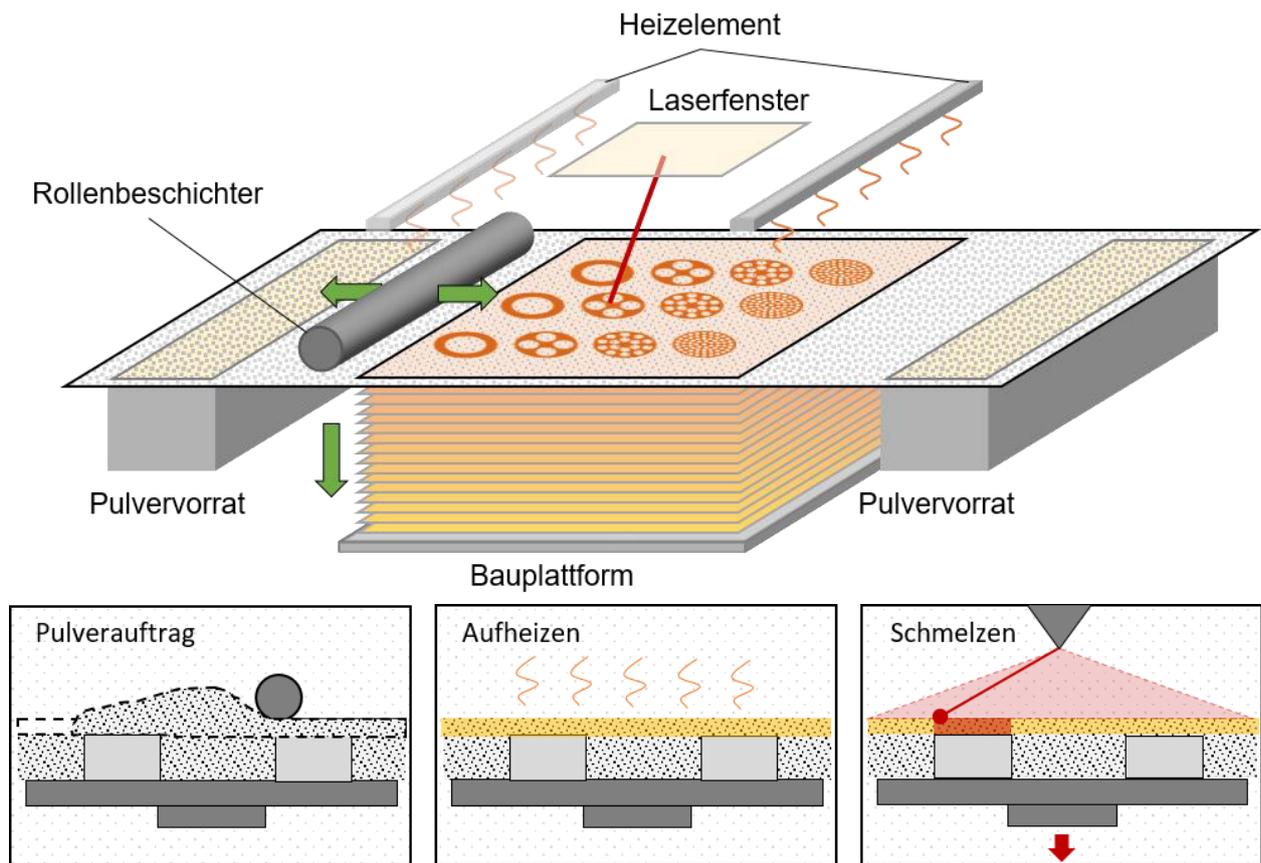


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Prozesskammer und des Prozessablaufs (Eigene Darstellung)

Die vollständige Schmelze des Bauteilquerschnitts infolge eines entsprechend hohen Energieeintrags kann zusätzlich dazu beitragen, dass neu aufgetragene Schichten durch den heißen Querschnitt von unten geheizt werden (Wegner, 2015, S. 94). Nach Abschluss der Belichtung liegt die Temperatur der Schmelze über der des umliegenden Pulvers, sodass mehr Wärmestrahlung des Heizstrahlers aufgenommen wird. Nach Wegner (Wegner, 2015, S. 93–95) erfolgt eine signifikante Abkühlung erst beim erneuten Pulverauftrag, sodass in der Zeit zwischen Belichtung und Pulverauftrag weitere Aufschmelzprozesse ablaufen. Diese wird als Nachschmelzzeit definiert und beeinflusst maßgeblich die Bauteilqualität und die mechanischen Eigenschaften. Die Prozessabfolge wiederholt sich bis zum Ende des Bauauftrags, wobei anschließend wiederum leere Pulverschichten aufgetragen werden, um thermisch induzierte Spannungen von außen zu reduzieren (Gebhardt et al., 2016, S. 47). Die Gestalt und das Volumen eines Bauteils sowie dessen Anordnung im Bauraum beeinflussen einerseits die lokale Temperaturverteilung und umliegende Bauteile; andererseits wird aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit auch die nachfolgende Abkühlzeit beeinflusst (Breuninger et al., 2013, S. 47). Dies ist zu berücksichtigen, da die Prozessführung des SLS auf eine gleichmäßige Temperaturführung im gesamten Bauraum angewiesen ist (Schmid, 2015a, S. 20), (Breuninger et al., 2013, S. 47).

Hierbei können Temperaturdifferenzen von wenigen Grad Celsius bereits Ausschuss hervorrufen, da Bauteile unzureichend versintert werden, sich durch zu starke Wärmeeinwirkung verziehen und sich je nach Material verfärben (Gebhardt, 2016, S. 167).

Abkühlprozess

Nach Abschluss des Bauprozesses befindet sich der Baujob noch immer nahe der Prozesstemperatur und benötigt daher ein langsames und kontrolliertes Abkühlen, um eine Schädigung der Bauteile auszuschließen. Die frühzeitige Entnahme der Bauteile führt zur unkontrollierten Kristallisation, Verzug und materialabhängig zum Vergilben der Oberfläche. (Schmid, 2015a, S. 50)

Der Abkühlprozess ist abhängig von dem eingesetzten Material, dem geschmolzenen Volumen, der Anzahl von Bauteilen sowie deren Packdichte. Als Orientierung zur Abschätzung der Abkühlzeit wird vereinfacht die Dauer des Generierprozesses angesetzt (Breuninger et al., 2013, S. 53), (Wohlers Associates, 2021, S. 189). Abhängig vom Anlagensystem werden die Prozesse *Vorheizen* und *Abkühlen* in der Maschine oder teilweise/gänzlich außerhalb der Maschine ausgeführt.

Nachbearbeitung

Die Nachbearbeitung oder auch Post-Prozess (engl. post-processing), sowie die Finish-Bearbeitung erfolgen im Anschluss und umfassen alle Prozesse, die dazu genutzt werden, um die hergestellten Bauteile in den Endzustand zu bringen (Awiszus et al., 2020, S. 378). Post-Processing definiert den Prozessanteil, der nach dem additiven Prozess erfolgt, um ein einsatzfähiges Bauteil zu erhalten; Finishing beschreibt hingegen nicht-additive Bearbeitungsschritte, die erst nach dem vollständig abgeschlossenen additiven Prozess nachgestellt werden können (Gebhardt, 2016, S. 105).

Schmid (Schmid, 2023, S. 86) vertritt eine weitere Auffassung, wobei der Post-Prozess die verfahrensbedingte Prozessnachbearbeitung durch Entpacken und Entpulvern sowie die bauteilspezifische Nachbearbeitung der einzelnen Bauteile umfasst. Im Rahmen dieser Arbeit werden unter Post-Processing die verfahrensbedingten Tätigkeiten Entpacken und Entpulvern aufgefasst. Hingegen werden die bauteilspezifische Nachbearbeitung oder Finishing-Prozesse nicht betrachtet, eine Vertiefung der Thematik erfolgt aber unter anderem in (Thompson et al., 2016), (Dobrovski, 2016). Im Anschluss an den Abkühlprozess wird die Baukammer entnommen und in eine Auspackstation überführt, in welcher die Bauteile vom Pulverkuchen separiert werden (Nelson, 1993, S. 3).

Dies wird auch als Ausbrechen oder „Breakout“ definiert (Gebhardt et al., 2016, S. 48). In Abhängigkeit des verwendeten Materials und unternehmensspezifischer Qualitätsanforderungen wird thermisch geschädigtes Material entfernt, überschüssiges Material teilweise oder ganz wiederverwendet, oder komplett entsorgt. Da das Auspacken lediglich eine erste Reinigungsstufe darstellt, erfolgt eine zusätzliche Reinigung mittels Strahlen, z.B. mit Glasperlen. Dieses ist notwendig, da der pulverförmige Ausgangsstoff und das schichtweise zusammenfügen dazu führen, dass die Werkstückoberfläche eine raue Oberflächenstruktur besitzt, die je nach Bauteilorientierung noch durch einen Treppenstufeneffekt verstärkt wird (Wegner, 2015, S. 7), (Klahn et al., 2018, S. 110).

Das Strahlen wird z.B. mit Glasperlen oder Korund durchgeführt, um Pulveragglomerate zu entfernen, die Oberflächenrauigkeit zu reduzieren, mechanische Eigenschaften zu verbessern und zur Vorbereitung für Nachfolgeprozesse (Breuninger et al., 2013, S. 75), (Kaddar, 2010, S. 105–106). Eine detaillierte Auseinandersetzung erfolgt in (Breuninger et al., 2013, S. 75–77). Nach Breuninger (Breuninger et al., 2013, S. 75) eignen sich für die großflächige Reinigung komplexer Bauteile ausschließlich das Reinigen mittels Strahlen. Die geometrische Komplexität bildet diesbezüglich einen maßgeblichen Faktor, da abhängig von der Bauteilgestalt die automatisierte Nachbearbeitung aufgrund möglicher Schäden oder bleibender Verschmutzungen nahezu ausgeschlossen ist, z.B. im Fall filigraner, dünnwandiger Bauteile oder solcher mit Hinterschnitten. Zusätzlich wird ein uneinheitlicher Abtrag von Oberflächen beschrieben, welcher zu Unterschieden in der Oberflächenbeschaffenheit führt (Gebhardt et al., 2019, S. 247).

Qualitätssicherung und -prüfung

Die **Qualitätssicherung und -prüfung** des Endprodukts stellt einen weiteren Prozess dar, der je nach Material und Prüfprozess auf die Zugänglichkeit angewiesen ist und von der geometrischen Form abhängt (Schneberger et al., 2020), (Häfele et al., 2019), (Klahn et al., 2018, S. 55–56). Beispielfhaft sind die Oberflächen-Qualität und Abmaß-Qualität zu nennen (Zeyn, 2017, S. 86). Diese Herausforderungen werden exemplarisch für Gitterstrukturen beschrieben (Thompson et al., 2016, S. 750), (Echeta et al., 2020). Im Rahmen der gewählten Positionierung steht die Thematik nicht im Fokus, jedoch werden entsprechende Querbezüge hergestellt, sodass diese als Ausblick für weitere Arbeiten berücksichtigt werden können.

2.3.2. Material

Grundlage für den SLS-Prozess bildet das pulverförmige Material, welches durch Additive und Füllstoffe ergänzt werden kann, um die Verarbeitung des Materials und die Eigenschaften der zu erzeugenden Bauteile zu beeinflussen. Aufgrund der Vielfalt an materialspezifischen Themenstellungen wird das Material in dieser Arbeit auszugsweise auf dessen Interaktionen mit dem Generierprozess und dem Nachbearbeitungsprozess behandelt. Entsprechend detaillierte Ausarbeitungen werden abgedeckt durch (Mielicki et al., 2012), (Lupone et al., 2021, S. 4–8), (Wegner, 2015, S. 9), (Schmid, 2015a, S. 76).

Als Materialien für den Lasersinterprozess kommen vor allem teilkristalline Thermoplaste, wie Polyamide (PA)/Nylon des Typs PA 12 und PA 11 zum Tragen. Weitere Werkstoffe für den SLS-Prozess sind Polycarbonat (PC), Polyaryletherketone (PAEK), Polypropylen (PP), thermoplastisches Polyurethan (TPU) und thermoplastische Elastomere (TPE). (Klahn et al., 2018, S. 19), (Gebhardt et al., 2016, S. 47), (Schmid, 2015a, S. 156–165), (VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2015, S. 11)

Mit Blick auf den Generierprozess unterscheiden sich die Materialien durch Attribute wie Partikelform, -größe und -verteilung, Rieselfähigkeit, Dichte und Verarbeitungstemperatur. Diese wirken sich beispielhaft auf die Neigung zum Bauteilverzug und zum Schrumpfen, die mechanischen Eigenschaften und die Abkühlzeit aus. (Breuninger et al., 2013, S. 54), (Schmid, 2015a, S. 98)

Eine höhere Pulverpackdichte führt in Bezug zum herzustellenden Bauteil zur Verringerung von inneren Spannungen, Verzug, Porosität sowie Rauheit. Darüber hinaus wird durch die Pulverpackdichte die thermische Leitfähigkeit des losen Pulvers bestimmt. (Sun et al., 2017, S. 57)

Zur Verarbeitung des Materials im SLS-Prozess wird ein spezifisches Sinterfenster benötigt. Dieses stellt einen thermischen Zwischenbereich zwischen Schmelzpunkt und Kristallisationspunkt dar. Das Sinterfenster variiert hierbei in Abhängigkeit von Eigenschaften wie chemischer Zusammensetzung, Laserabsorption, Oberflächenspannung, Fließfähigkeit der Schmelze sowie der thermischen Leitfähigkeit. (Schmid, 2015a, S. 76), (Sun et al., 2017, S. 57)

Zum Schmelzen des Materials wird eine materialspezifische Energiemenge benötigt, die durch das Vorwärmen sowie die eingebrachte Energiedichte des Lasers realisiert wird. Je nach Materialart und notwendiger Laserinteraktionsdauer ergeben sich folglich signifikante Unterschiede in der Bearbeitungsdauer, wie dies in den Versuchen in **Kapitel 4** dargestellt wird.

Da bei pulverbasierten Verfahren wie dem SLS nur ein geringer Teil des Pulverbetts aufgeschmolzen wird, kann das übrige Pulver zum Teil wiederverwendet werden. Die Packdichte bzw. der Bauraumausnutzungsgrad einer SLS-Anlage beträgt hierbei im Mittel 10 %, sodass nach dem Herstellprozess 90 % nicht gesintertes Restpulver verbleiben (Schmid, 2015a, S. 40). In Abhängigkeit der Prozessdauer und der dabei verwendeten Bauraumtemperaturen sowie dem Energieeintrag kommt es zu Alterungseffekten und dem Anbacken von umliegendem Pulver (Klahn et al., 2018, S. 20–51), (Breuninger et al., 2013, S. 63). Exemplarisch wird eine Erhöhung der Schmelztemperatur durch diese Alterung festgestellt (Wegner, 2015, S. 11). Mit Blick auf den geometrischen Einfluss werden diese thermischen Effekte unter anderem beeinflusst durch die Bauhöhe, Packungsdichte sowie das Belichtungsvolumen (Schmid, 2015a, S. 41). In Abhängigkeit der Dauer und Höhe des thermischen Einflusses wird die Wiederverwendung und das Bearbeitungsverhalten beeinträchtigt, was sich auf den Auffrischungsgrad auswirkt (Wegner, 2015, S. 1–2), (Breuninger et al., 2013, S. 63), (Klahn et al., 2018, S. 51). Dieser beschreibt die prozentuale Menge an Neupulver, die dem Restmaterial zugeführt wird (Schmid, 2015a, S. 44). Je nach Materialart führt ein hoher Anteil von Altpulver zu Bauteilen mit schlechter Oberflächenqualität, da durch die Alterung die Fließfähigkeit des Pulvers abnimmt (Klahn et al., 2018, S. 19–51). Um diesem Problem entgegenzuwirken, werden dem Gebrauchtpulver je nach Materialart bis zu 50 % Neupulver hinzugefügt (Schmid, 2015a, S. 40), (Klahn et al., 2018). Jedoch existieren ebenfalls Materialien, wie TPU, welche nahezu ohne Neupulver auskommen, sodass nur das entnommene Bauteilvolumen ausgeglichen werden muss (Schmid, 2015a, S. 163). Die Wiederverwertungs- und Auffrischraten entscheiden dabei über den Mehrwert einer Materialrückführung, d.h. ob das Restmaterial sorgfältig aus den Bauteilen entfernt wird, um es erneut zu nutzen oder ob es entsorgt wird. Entsprechend wirkt sich dieser Faktor auf den Materialkostenanteil sowie den Bearbeitungsaufwand durch das Personal aus. Eine Aufschlüsselung dieser Auswirkungen in Verbindung mit der geometrischen Komplexität erfolgt in **Kapitel 2.4**.

2.3.3. Prozessparameter

Die verschiedenen Einflussfaktoren auf den Lasersinterprozess wurden bereits in zahlreichen Arbeiten behandelt, unter anderem durch (Nelson, 1993), (Pham & Wang, 2000), (Sauer, 2005), (Zäh, 2006), (Kaddar, 2010), (Eschey, 2012), (Breuninger et al., 2013), (Gibson et al., 2015), (Wegner, 2015), (Schmid, 2015a). Für diese Arbeit werden sie jedoch nur auszugsweise dargestellt und selektiv zur Herleitung von Problemstellungen und Lösungsansätzen für **Kapitel 4** genutzt.

Die Bearbeitung beim Lasersintern erfolgt als Zusammenspiel aus eingebrachter Laserenergie bzw. Einwirkzeit des Lasers, Aufheizenergie und Bauraumtemperatur (Kaddar, 2010, S. 68). Aufbauend auf diesen Grundparametern werden verschiedene Varianten zur Beschreibung des Energieeintrags sowie dessen Berechnungsmöglichkeiten vorgestellt und Zusammenhänge mit der geometrischen Komplexität beschrieben.

2.3.3.1. Bauraum

Grundlage des Prozesses bildet der Bauraum, respektive die Prozesskammer, welche knapp unter die Schmelztemperatur des Polymers vorgeheizt wird, um das quasiisotherme Sintern zu ermöglichen (Schmid, 2015a, S. 20), (Gebhardt, 2016, S. 166). Der Gesamtenergiebedarf (E_G) des Verfahrens resultiert nach Bliedtner et al. (Bliedtner et al., 2013, S. 354) aus der zugeführten Laserenergie (E_{Las}), Wärmeenergie (E_P) und der Summe der Verluste (V_i) nach Formel (1):

$$E_G = E_{Las} + E_P - V_i \quad (1)$$

Folglich muss der Laser nur eine geringe Temperaturdifferenz zum Aufschmelzen des Materials überwinden (Gebhardt, 2016, S. 166). Dadurch werden hohe Temperaturgradienten beim Schmelzen und Abkühlen verringert, was Bauteilverzug und innere Spannungen reduziert (Bliedtner et al., 2013, S. 354), (Breuninger et al., 2013, S. 47). Es ist zu beachten, dass die zu- und abgeführte Wärmemenge abhängig ist von der zu belichtenden Geometrie bzw. der Schichtinformation (Blattmeier, 2012, S. 70). Die Aufheizenergie (engl.: preheating energy input) wird in Formel (2) nach Hofland et al. (Hofland et al., 2017, S. 4) definiert als Produkt aus spezifischer Wärmekapazität¹¹ C_p [J/g°C], Pulverdichte ρ [g/mm³] und der Vorheiztemperatur T_{pr} [°C]:

$$E_{pr} = C_p \cdot \rho \cdot T_{pr} \quad (2)$$

Die optimale Bautemperatur kann bei bestimmten Polymeren in einem engen Prozessfenster liegen, wodurch die Verarbeitung erschwert wird (Wegner, 2015, S. 11). Dies führt dazu, dass es bei zu hohen Temperaturen zu Problemen bei der homogenen Pulververteilung kommt; bei zu niedrigen Temperaturen hingegen zur frühzeitigen Kristallisation, was folglich zum Curling¹² oder Warming¹³ führen kann (Goodridge & Ziegelmeier, 2017, S. 193).

¹¹ Die spezifische Wärmekapazität C_p gibt die erforderliche Wärme an, um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. (Fischer, 2010, S. 103)

¹² Curling: Verzug der ersten Bauteilschichten, wobei die restlichen normal gebaut werden (Schmid, 2015a, S. 54)

¹³ Warming: Das Bauteil wird korrekt gebaut und verzieht sich nach der Fertigstellung (Schmid, 2015a, S. 54)

2.3.3.2. Laser und Scanner

Zur Bearbeitung werden aufgrund der hohen Absorptionswerte ($> 90\%$) für Werkstoffe wie Polyamid vorzugsweise CO₂-Laser (Kohlenstoffdioxidlaser) mit einer Wellenlänge (λ) im Bereich von 10,6 μm verwendet (Gebhardt, 2016, S. 84), (Hügel, 1992, S. 4), (Lupone et al., 2021, S. 9). Die notwendige Laserleistung (P) ist abhängig von dem Absorptionsgrad des Materials (ϵ), bzw. von der Temperatur und dem Absorptionsverhalten des Pulverbetts. Dieses wird wiederum von der Form, Größe und Packdichte des Pulvers sowie von dessen chemischer Zusammensetzung beeinflusst. (Schmid, 2015a, S. 16), (Gebhardt, 2016, S. 84), (Gibson et al., 2015, S. 123), (Lupone et al., 2021, S. 9)

Eine Erhöhung des Absorptionsgrads erhöht dabei die Wärmeeindringtiefe und kommt einer Vergrößerung der Laserleistung gleich, da ein höherer Energieanteil der Laserstrahlung aufgenommen wird (Rietzel, 2011, S. 9). In diesem Zusammenhang ist die Schichthöhe ein maßgeblicher Faktor. Im Falle des SLS beträgt diese typischerweise zwischen 100 – 150 μm , was dem zwei- bis dreifachen der Pulverpartikelgröße entspricht, um eine hinreichende Pulververteilung und Packdichte zu gewährleisten (Goodridge & Ziegelmeier, 2017, S. 192). Die Sintertiefe sollte hierzu größer sein als die Schichthöhe, aber kleiner als die doppelte Schichthöhe, um die vollständige Schmelze zu gewährleisten; gleichzeitig sollen thermische Spannungen und die Materialersetzung vermieden werden (Shen et al., 2018, S. 56).

Um das Material bearbeiten zu können, werden neben dem eigentlichen Laser zusätzliche Umlenkspiegel zur Strahlführung benötigt sowie ein Scankopf, der die Position des Laserstrahls durch zwei Galvanospiegel einstellt (Schmid, 2015a, S. 28). Damit der Laserstrahl eine homogen verteilte Leistung auf die Pulveroberfläche einkoppelt, die unabhängig vom Ablenkungswinkel erreicht wird, ist eine optische Korrektur notwendig. Die Korrektur des Scanners erfolgt in analoger Bauweise nachgeschaltet mittels F-Theta-Linse, in digitaler Variante vorgeschaltet im Strahlengang mittels beweglicher Korrekturlinse (Schmid, 2015a, S. 29). Der fokussierte Laserstrahl besitzt einen Strahldurchmesser (z.B. $d_f = 0,4\text{ mm}$) und wird mittels Scansystemen zur entsprechenden Position gelenkt, wobei die Geschwindigkeit als Scangeschwindigkeit (engl. scan speed) oder Ablenkgeschwindigkeit des Lasers (engl.: beam speed) angegeben wird (Schmid, 2015a, S. 21), (Nelson, 1993, S. 153). Sie beeinflusst maßgeblich die Prozessdauer und damit die Wirtschaftlichkeit. Sie unterliegt aber wie die Laserleistung Grenzen, da der Sinterprozess im Pulver Zeit benötigt, um vollständig abzulaufen (Kaddar, 2010, S. 67), (Breuninger et al., 2013, S. 48).

Nachschmelzeffekte bestimmen hierbei maßgeblich die Bauteilqualität, wobei eine von der Zykluszeit abhängige Mindestnachschmelzzeit von 10 s beschrieben wird (Wegner, 2015, S. 91–95). Im Zusammenhang mit der Scangeschwindigkeit nimmt die Sintertiefe zunächst bis zu einer bestimmten Scangeschwindigkeit zu, bei der das Material zu 100 % gesintert wird und nimmt wiederum mit steigender Geschwindigkeit ab (Deng et al., 1992, S. 104). Die obere Grenze für die Verarbeitungstemperatur ist materialspezifisch und erfordert spezielles Wissen über chemische und thermische Abläufe, da es bei zu hohen Temperaturen zur Materialersetzung und Porenbildung kommt (Wegner, 2015, S. 38–39), (Vasquez et al., 2011, S. 22).

Wie in Abbildung 16 – Bild 1 zu sehen ist, erfolgt die Positionierung des Lasers punktbasiert mittels Scanvektoren, die eine geometrieabhängige Scanvektorlänge aufweisen. Der Abstand dieser Scanlinien zueinander definiert den Überlappungsbereich und wird als Laserspuraabstand/Spuraabstand (engl. hatch distance/hatch spacing) oder Scanlinienabstand (engl.: scan spacing) bezeichnet (Bliedtner et al., 2013, S. 355), (Schmid, 2015a, S. 21). Dieser beeinflusst die Verbindungskraft der parallel nebeneinander angeordneten Spuren und ist neben der Schichtstärke maßgeblich für die Festigkeit des Bauteils verantwortlich (Kaddar, 2010, S. 62). In Abbildung 16 wird exemplarisch der Scanlinienabstand (H_s) von 0,15 und 0,25 mm und einem Strahldurchmesser $d_f = 0,4$ mm dargestellt. Der Scanlinienabstand hat hierbei einen hohen Einfluss auf die Sintertiefe, sodass diese in Versuchen von Deng et al. um bis zu 70 % erhöht werden konnte (Deng et al., 1992, S. 107). Grundsätzlich besitzt jede Scanlinie zwei Kontrollpunkte, die den Beginn und das Ende, bzw. das Ein- und Ausschalten des Laser definieren (Kaddar, 2010, S. 45).

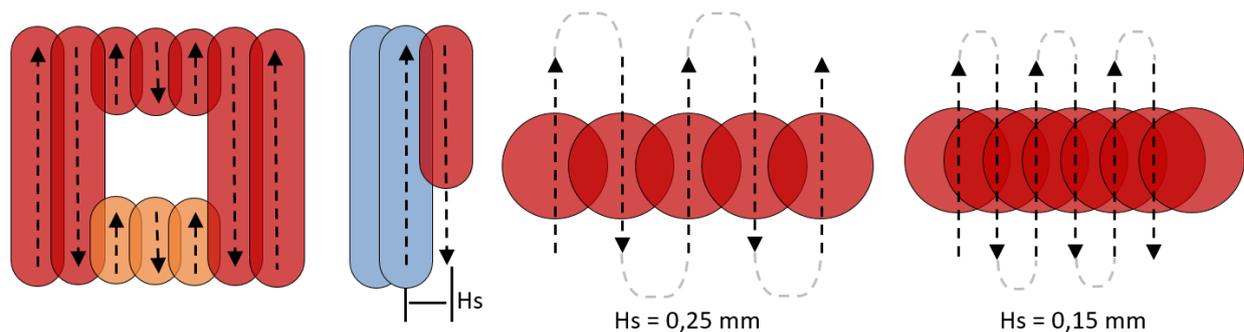


Abbildung 16: Darstellung des Scanlinienabstands in Anlehnung an (Kaddar, 2010, S. 66–79)

Der Wechsel von einer auf die andere Scanlinie kann durch verschiedene Fülltypen/Strategien realisiert werden (Kaddar, 2010, S. 47), (Schmid, 2015a, S. 50):

- Bei Typ 1 wird der Laser an den Konturrand geführt, aktiviert und innerhalb der Fläche auf die Scangeschwindigkeit beschleunigt. Gegen Ende der Kontur wird der Laser wieder abgebremst und an der Konturlinie deaktiviert.

- Bei Typ 2 wird vor Konturbeginn auf die Scangeschwindigkeit beschleunigt. Beim Überschreiten der Konturlinie wird der Laser aktiviert/deaktiviert und außerhalb abgebremst.

Aufgrund der konstanten Scangeschwindigkeit erreicht Typ 2 eine homogenere Energiedichte, was zu geringerem Verzug führt (Kaddar, 2010, S. 47). Die dafür notwendigen Vorgänge zum Beschleunigen und Abbremsen der Spiegel sowie das An- und Ausschalten des Lasers führen aber zu zeitlichen Verzögerungen (Nelson, 1993, S. 82), (Pham & Wang, 2000, S. 428). Zusammen mit der Zeit zum Auftragen des Pulvers (T_a) ergibt sich nach Formel (3) die Zeit für den Bauprozess (T_p), aus der Scanzeit (T_s) und der Stillstandzeit (T_{sn}) (Pham & Wang, 2000, S. 428):

$$T_p = T_a + T_{sn} + T_s \quad (3)$$

Zusätzlich werden durch Pham und Wang (Pham & Wang, 2000, S. 428) Auswirkungen in Form einer Einschwingzeit beschrieben, welche durch die Spiegelbewegung zum Sprung auf eine neue Position entstehen und umso länger sind, je höher die Sprunggeschwindigkeit ist. Insofern Unterbrechungen innerhalb der Belichtungsfläche auftreten, wird der Laser für diese "Totstrecken" ausgeschaltet, was je nach Geometrie zu langen Stillstandzeiten des Lasers führt, da er bewegt wird, aber nicht aktiviert ist (Kaddar, 2010, S. 45–48). Als Beispiel für entsprechende Sprünge wird in Abbildung 17 schematisch die unterschiedliche Fragmentierung einer gleichbleibenden Belichtungsfläche dargestellt. Die Sprünge (Bild 2 und Bild 4; grüne Punktlinie) erfolgen innerhalb eines Bauteils oder von Bauteil zu Bauteil.

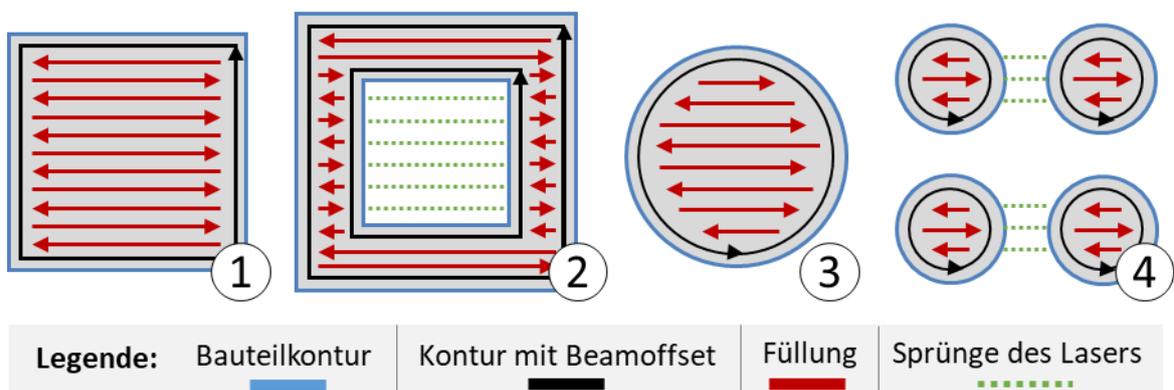


Abbildung 17: Schematische Darstellung für Belichtungsflächen und Bearbeitungspfade (Eigene Darstellung)

Je nach Anlagensystem beschreibt Nelson (Nelson, 1993, S. 158), dass der Anteil an Verzögerungen sowie die Sintertiefe bei kleinen Strukturstärken vergrößert wird. Folglich sind diese Verzögerungen abhängig von:

- der Anzahl zu bearbeitender Elemente und Bauteile
- der Flächenverteilung/Fragmentierung
- der Länge und Anzahl der Bearbeitungspfade

Gesteuert werden diese Verzögerungen über die Anzahl, Orientierung und Geometriekomplexität der Bauteile. Optimierungsmöglichkeiten dieser Stillstandzeiten bilden maschinenspezifische Optionen, die z.B. festlegen, welche Sprungweite der Laser innerhalb eines Bauteils maximal ausführen darf. Enthält das Bauteil Lücken, die größer sind als die maximale Sprungweite, erfolgt die Bearbeitung zunächst ohne Sprünge und der verbleibende Rest wird im Anschluss bearbeitet. Exemplarisch würde die Bearbeitung des Bauteils in Abbildung 17 – Bild 2 erst auf der linken Seite von oben bis zum unteren Ende fortgeführt und der verbleibende mittlere Teil rechts zum Schluss bearbeitet werden. Diese Option führt zur Verringerung der Fertigungszeit, gleichzeitig können aber auch infolge zeitlicher Verzögerungen sichtbare Übergänge entstehen (Kaddar, 2010, S. 49).

2.3.3.3. Belichtungsstrategien - Kontur und Füllung

Wie in Abbildung 17 dargestellt ist, erfolgt die Bearbeitung häufig in zwei Phasen, wobei der Bauteilquerschnitt in die Bereiche Kontur (engl.: Outline; schwarz) und Füllung (engl.: Infill; rot) unterteilt wird. Da der Laser jeweilig mit unterschiedlicher Laserleistung und Geschwindigkeit arbeitet, wird im Folgenden auch von Fill- und Outline-Laser gesprochen.

Der Fill-Laser bewirkt den Zusammenhalt innerhalb des Querschnitts und zur vorherigen Schicht, der Outline-Laser wird optional verwendet, um die Oberflächenqualität und die mechanischen Eigenschaften zu verbessern (Kaddar, 2010, S. 43). Die Kontur wird in der Regel mit reduzierter Geschwindigkeit bearbeitet und verlängert folglich die Bearbeitungszeit je länger, bzw. fragmentierter sie ist (Ruffo et al., 2006a, S. 7). Zusätzlich wird in diesem Fall die Zeit zum Scannen der Füllfläche ebenfalls verlängert, aufgrund notwendiger Positionswechsel und Sprünge (Ruffo et al., 2006a, S. 7). Je nach Hersteller werden zusätzliche Parameter für Boden und Deckschichten sowie Kanten/Ecken ermöglicht. Die Belichtung erfolgt jeweilig mit unterschiedlichen Parametern für die Geschwindigkeit und Laserleistung (Kaddar, 2010, S. 43). Diese Parameter werden beispielsweise durch materialspezifische Standardparameter von den Herstellern angegeben oder bereits durch feste Werte in der Maschine hinterlegt, wenn das Gesamtsystem darauf kalibriert wurde¹⁴. Die Parameter unterliegen teils der Verschwiegenheit, weshalb im weiteren Verlauf das Verhältnis der Geschwindigkeiten von Kontur und Füllung allgemein als **KF-Faktor** angegeben wird. Es entsteht ein Wertebereich von 0 bis 1, sodass komplexe Geometrien sich umso stärker auswirken, je höher die Geschwindigkeitsdifferenz ist.

¹⁴ Farsoon nutzt in der Anlage HT403P einen festen Wert von 3,8 m/s für die Kontur und 15,2 m/s für die Füllung (Farsoon Technologies, 2021a)

Der Einfluss ohne Kontur, mit Kontur, Doppelkontur sowie der Unterschied zwischen der Reihenfolge von Füllung und Kontur wird von Kaddar (Kaddar, 2010, S. 61–97) wie folgt beschrieben:

- Die Kontur hat einen positiven Effekt auf die Oberflächenrauheit, der verstärkt wird, wenn zuerst die Füllung und dann die Außenkontur belichtet wird.
- Eine Doppelbelichtung der Füllung mit voller Laserleistung erhöht die Festigkeit und verringert die Anisotropie¹⁵.
- Eine einfache Belichtung der Außenkontur steigert neben einer verbesserten Oberfläche die mechanischen Eigenschaften durch die zusätzliche Bindung¹⁶.
- Eine Doppelbelichtung der Außenkontur hat keinen weiteren positiven Effekt.
- Eine Verdopplung der Belichtung verdoppelt ebenso die Sinterzeit.

In weiteren Arbeiten wurde gezeigt, dass die Oberfläche maßgeblich die mechanischen Eigenschaften sowie das Bauteilversagen infolge der Kerbwirkung beeinflusst (Wegner, 2015, S. 70–74). Singh et al. (Singh et al., 2017, S. 29) beschreiben in Kombination mit der Pulverbetttemperatur eine Zunahme der Härte bei einfacher Belichtung, die wiederum mit einer Doppelbelichtung abnimmt. Zusätzlich nimmt durch den Schmelzvorgang die Reflexion des Materials ab, wodurch mehr Energie absorbiert wird; gleichzeitig nimmt die Transmission zu, sodass mehr Energie in tiefere Pulverschichten geleitet wird (Schmid, 2015a, S. 95). In Ergänzung hierzu wird das An- oder Aufschmelzen von Pulverkörnern außerhalb der belichteten Kontur durch Mehrfachbelichtungen beschrieben (Breuninger et al., 2013, S. 52).

2.3.3.4. Kompensationsfaktoren

Beim Schmelzen teilkristalliner Kunststoffe erfolgt eine große Volumenänderung, wodurch diese zum Schrumpfen neigen (Gebhardt, 2016, S. 167). Zusätzlich zu dieser materialbedingten Schrumpfung wirken sich verfahrensbedingte Einflüsse abhängig von der Bauteilgeometrie, der Größe und dem Volumen aus. Diesen kann mittels Schrumpffaktoren und Belichtungsstrategien entgegengewirkt werden (Gebhardt, 2016, S. 168). Zusätzlich zu den Belichtungsoptionen für Kontur und Füllung kann der Belichtungsvorgang einzelner Bauteile pro Schicht in der Abfolge variieren und die Scanrichtung des Lasers von Schicht zu Schicht in X- oder Y-Richtung wechseln (Schmid, 2015a, S. 51).

¹⁵ Bei den Zugproben wurde eine Verbesserung um 13,28 % erreicht (Kaddar, 2010, S. 61)

¹⁶ In Untersuchungen mit PA2200 um 11,51 % mit einfacher Belichtung; 13,28% mit doppelter (Kaddar, 2010, S. 60)

Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Strategien erfolgt durch Kaddar (Kaddar, 2010, S. 47). Je nach Strategie können Unterschiede hinsichtlich Verzug, Spannungen und Dichte entstehen, die sich folglich auf die mechanischen Eigenschaften auswirken (Gibson et al., 2015, S. 123), (Kaddar, 2010, S. 97), (Kushnarenko, 2009, S. 27). Hier ist jedoch der geometrische Einfluss aufgrund variierender Scanvektorklängen zu berücksichtigen. Überdies ergeben sich Verzugsmechanismen infolge verschiedener thermomechanischer Wechselwirkungen. Als Haupteinflussparameter für den Verzug werden Pulverbetttemperatur, Scanlinienabstand und Scangeschwindigkeit genannt (Negi & Sharma, 2016, S. 658). Dafür verantwortliche Effekte werden auf thermische Retraktion, Rekristallisation und Verdichtung des Pulvers sowie die Abkühlrate zurückgeführt (Benedetti et al., 2019, S. 6–8), (Lupone et al., 2021, S. 30).

Weitere Maßabweichungen entstehen, wenn der Laserstrahl die Sollkontur des Bauteils abfährt. Hierdurch wird zusätzliches Material mit der Breite des Strahlradius versintert, sodass Außenkonturen zu groß und Innenkonturen zu klein werden (Breuninger et al., 2013, S. 51). Diese Abweichungen können durch die Spurbreitenkompensation korrigiert werden, indem die Bauteilkontur mit einem Offset versehen wird, sodass diese nach dem Überfahren der Sollkontur entspricht (Breuninger et al., 2013, S. 51–52). Hierbei ist allerdings nur eine Kompromisslösung möglich, da bei einem größeren Offset die Außenabmessungen geringer werden, die Innenkonturen jedoch vergrößert werden (Breuninger et al., 2013, S. 51–52). Zur Verbesserung der Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität sind die entsprechenden Offset-Faktoren im Falle einer Parameteränderung anzupassen, um sicherzustellen, dass der Laser nicht innerhalb oder außerhalb der Sollkontur fährt (Kaddar, 2010, S. 96). Dies ist von Relevanz für die Versuche in **Kapitel 4**, um ein gleichbleibendes Volumen zu generieren.

Weitere detaillierte Untersuchung zu Gestaltabweichungen und zur Erhöhung der Prozessfähigkeit erfolgen unter anderem in (Eschey, 2012, S. 27–35), (Blattmeier, 2012), (Witt et al., 2015, S. 79), (Neugebauer, 2017).

2.3.4. Modelle zum Energieeintrag

Aus vorgenannten Parametern können in Abhängigkeit vom Detaillierungsgrad (1) die Energiedichte pro Flächeneinheit, (2) die Volumenenergiedichte und (3) der Gesamtenergiebedarf berechnet werden.

1) Energiedichte

Die Beschreibung des Energieeintrags erfolgt im simpelsten Fall mittels Energiedichte pro Flächeneinheit, welche ebenfalls durch die Andrew-Zahl (A_z), (engl.: Andrew Number (A_N)) ausgedrückt wird (Schmid, 2015a, S. 21), (Nelson, 1993, S. 153), (Kaddar, 2010, S. 76). Die **Energiedichte** E_d [J/mm^2] wird durch Formel (4) als Quotient aus Laserleistung (P) [W], Scanabstand (s) [mm] und Scangeschwindigkeit (v) [mm/s] gebildet (Hofland et al., 2017, S. 4), (Nelson, 1993, S. 153), (Vasquez et al., 2011, S. 4).

$$E_d = \frac{P}{s \cdot v} \quad (4)$$

Zu berücksichtigen ist, dass die eingesetzten Parameter zwar zum gleichen Ergebnis führen können - wie zum Beispiel durch Formel (5) dargestellt wird - das Sinterergebnis sich aber durchaus unterscheiden kann.

$$E_{d1} = \frac{15 \text{ W}}{0,25 \text{ mm} \cdot 1500 \text{ mm/s}} = \frac{30 \text{ W}}{0,25 \text{ mm} \cdot 3000 \text{ mm/s}} = 0,04 \frac{\text{J}}{\text{mm}^2} \quad (5)$$

In Untersuchungen konnte diesbezüglich festgestellt werden, dass die mechanischen Bauteileigenschaften geringer ausfallen, wenn diese mit höherer Geschwindigkeit gefertigt wurden (Schmid, 2015a, S. 22), (Hofland et al., 2017, S. 8), (Kaddar, 2010, S. 67–69). Schmid (Schmid, 2015a, S. 22) führt hierzu die fehlende Berücksichtigung der Zeitkonstante der Energieabsorption an, da die Energieaufnahme des Materials pro Zeiteinheit limitiert ist und demnach auch nicht durch hohe Laserleistungen ausgeglichen werden kann. Darüber hinaus ist der Energieeintrag limitiert aufgrund von Zersetzungseffekten (Wegner, 2015, S. 82). Trotz Vernachlässigung der Absorptionsfähigkeit des Pulvers, der Wärmeleitfähigkeit, dem Durchmesser des Laserstrahls und weiterer Parameter ermöglicht diese Formel für eine gegebene Versuchsanordnung eine grundlegende Versuchsplanung zur Identifikation eines geeigneten Prozessfensters (Kollenberg, 2020, S. 128).

2) Volumenenergiedichte

Als Erweiterung von Formel (4) kann die **Volumenenergiedichte** E_v [J/mm^3] nach Formel (6) durch Einbezug der Schichtstärke (t) [mm] berechnet werden (Witt & Wegner, 2015, S. 46), (Hofland et al., 2017, S. 4), (Grund, 2015, S. 58), (Kaddar, 2010, S. 77), (Wegner, 2015, S. 15).

$$E_v = \frac{P}{s \cdot v \cdot t} \quad (6)$$

Hier ist anzumerken, dass die Eindringtiefe des Lasers von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängt, sodass unter Berücksichtigung der Schichtstärke die Berechnung der eingebrachten Energie weniger exakt ist (Schmid, 2015a, S. 22).

3) Gesamtenergiebedarf

Zusammengeführt ergibt sich aus den Formeln (4) und (6) der gesamte volumetrische Energieeinsatz E_{in} [J/mm³] in Formel (7), welcher fünf variable Prozessparameter und zwei materialspezifische Parameter umfasst (Hofland et al., 2017, S. 4). Wiederum ist darauf hinzuweisen, dass dieses Modell, wie die zuvor beschriebenen nur eine vereinfachte Prozessbeschreibung ermöglicht.

$$E_{in} = \frac{P}{s \cdot v \cdot t} + Cp \cdot \rho \cdot T_{pr} \quad (7)$$

2.3.5. Bauteileigenschaften

Zur Bauteilauslegung ist zu beachten, dass je nach Bauteilausrichtung bzw. Raumorientierung (XYZ) im Bauraum eine ausgeprägte Anisotropie der Bauteileigenschaften entsteht (Schmid, 2015b, S. 177), (Hofland et al., 2017, S. 6), (Gebhardt et al., 2016, S. 174). Diese wirkt sich auf die Bauteilqualität, Bauzeit und Produktionskosten aus (Zhang et al., 2014, S. 147). Eine Reduktion dieser anisotropen Eigenschaften, vor allem in Z-Aufbauichtung, wird beispielhaft durch Erhöhung des Energieeintrags beschrieben, wobei zu hohe Energieeinträge die geometrische Genauigkeit von Bauteilen negativ beeinflussen können (Wegner, 2015, S. 82), (Hofland et al., 2017, S. 7). In Abhängigkeit der Energiedichte werden unter anderem folgende Eigenschaften beeinflusst (Vasquez et al., 2011), (Kumar, 2003), (Hofland et al., 2017), (Singh et al., 2017, S. 29):

- E-Modul, Zugfestigkeit, Streckgrenze, Dehnung, Bruchdehnung, Härte
- Bauteildichte, Oberflächenrauigkeit, Sintertiefe

Als Haupteinflussfaktoren für die Zugfestigkeit nennt Kaddar (Kaddar, 2010, S. 86) in Rangordnung die Laserleistung, den Linienabstand sowie die Scangeschwindigkeit und führt diese auf den Einfluss der Pulveroberflächentemperatur zurück. Als Haupteinflussfaktoren für die Bauteildichte, E-Modul, Zugfestigkeit und Bruchdehnung nennt Wegner (Wegner, 2015, S. 81) unabhängig von der Zielgröße Scanlinienabstand, Scangeschwindigkeit und Schichtstärke, wobei die Zugfestigkeit maßgeblich durch die Wechselwirkung aus Scanlinienabstand und Scangeschwindigkeit beeinflusst wird.

Für die Bruchdehnung ist die Laserleistung ein weiterer Haupteinflussfaktor, wobei die Pulverbetttemperatur den geringsten Einfluss hat und nur in Wechselwirkung mit der Laserleistung einen Haupteinflussfaktor bildet (Wegner, 2015, S. 81).

Hofland et al. (Hofland et al., 2017, S. 7) beschreiben die Haupteinflussfaktoren anhand von Untersuchungen mit 480 Zugproben als Scanlinienabstand und Schichthöhe, gefolgt von der Scangeschwindigkeit, Vorwärmtemperatur und der Laserleistung. Es ist zu berücksichtigen, dass der Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter auf die Bauteilqualität von der Kombination aus Anlage-, Prozess- und Werkstoff abhängt, sodass die Reproduzierbarkeit auf anderen Anlagen entsprechend beschränkt ist (Kushnarenko, 2009, S. 27).

2.3.6. Wechselwirkungen der Prozessparameter mit der Bauteilgeometrie

Als Wechselwirkungen aus den zuvor eingeleiteten Parametern mit der Bauteilgeometrie werden im Folgenden besonders die Anzahl und Länge der Scanvektoren sowie deren Auswirkungen auf die Prozessdauer und Temperaturführung adressiert.

1) Scanvektoren und Temperaturführung

Der **Scanvektorlänge** wird ein hohes Maß an Einfluss auf die Temperaturführung als auch auf den Energieeintrag zugesprochen, was bei variierenden Querschnitten einerseits zu inhomogenem Energieeintrag und andererseits zu Bauteilen mit inhomogenen Bauteileigenschaften führt (Wegner, 2015, S. 107). Als eines der Optimierungsziele beschreibt Nelson (Nelson, 1993, S. 157) die gleichmäßige Energieverteilung über die Pulveroberfläche, sodass der Wärmeverlauf ähnlich und die resultierende Sintertiefe gleichmäßig ist.

In Versuchen mit PA12 wurde dargestellt, dass bei Scanvektorlängen >25 mm die Temperatur der Schmelze 10 Sekunden nach der Belichtung mit zunehmender Länge ansteigt; hingegen fällt sie bei Längen <10 mm ab, beispielhaft um 8 K bei einer Länge von 5 mm (Wegner, 2015, S. 100). Die Auswirkungen der Nachschmelzzeit auf die Temperaturentwicklungen im Bauteilquerschnitt verstärken sich hierbei mit zunehmender Scanvektorlänge (Wegner, 2015, S. 96).

2) Scanvektoren und Materialzersetzung

Bei zu hoher Energiedichte wird für Thermoplaste ein Zersetzungsprozess in Form einer exothermen Reaktion ausgelöst (Wegner, 2015, S. 95), (Deng et al., 1992, S. 109). Schmidt beschreibt die Zersetzung für PA12 beim Überschreiten von 300 bis 350°C (Schmid, 2015a, S. 44). Die dabei

entstehenden Zersetzungsprodukte werden entweder als gasförmige runde Poren eingeschlossen oder an die Umgebung abgegeben; der Schmelze wird durch Verdampfung heißer Zersetzungsgase Wärme entzogen, was zur inhomogenen Temperaturverteilung im Querschnitt führt (Wegner, 2015, S. 95–100). Hierzu untersuchte Wegner beispielhaft das Energiedichtefenster von PA12 zwischen $0,018 \text{ J/mm}^2$ und $0,050 \text{ J/mm}^2$ ¹⁷. Es wurde festgestellt, dass bereits bei einer Energiedichte von $0,0325 \text{ J/mm}^2$ bei einer Scanvektorlänge unter 5 mm eine Zersetzungstemperatur von 318°C erreicht¹⁸ und teils überschritten wird (Wegner, 2015, S. 107). Neben der negativen Beeinflussung der Temperaturführung und mechanischen Eigenschaften verunreinigen diese Verdampfungseffekte das Laserschutzglas und die Prozesskammer. Resultierend führen diese zur Verringerung der Laserleistung und Lebensdauer des Laserschutzglases infolge notwendiger Reinigungsvorgänge und erhöhen die Gefahr eines Laserrückreflexes. Eine Verschmutzung durch Materialausgasung, z.B. durch verdampftes Wasser, führt bei langen Prozessen zum Beschlagen des Laserschutzglases, sodass die Laserleistung auf dem Pulverbett um bis zu 10 % abnimmt und folglich keine einheitlichen mechanischen Eigenschaften erreicht werden (Wegner, 2015, S. 66), (Fulcher & Leigh, 2013, S. 152). Wie bereits in **Kapitel 2.3.1** beschrieben wurde, reduziert sich die Lebensdauer des Laserfensters durch häufiges Reinigen, was die Produktionskosten erhöht (Fulcher & Leigh, 2013, S. 150).

3) Scanvektoren und Abkühlzeit

Ein maßgeblicher Faktor für die Temperaturverteilung im Bauteil ergibt sich durch die **Abkühlzeit** (t_A) [s] der einzelnen Bahnen, welche zunächst nach Formel (8) als Verhältnis aus der zu belichtenden Länge sowie der Scangeschwindigkeit gebildet wird. Exemplarisch wird eine Scangeschwindigkeit von 2000 mm/s dargestellt, die zur Bearbeitung eines Rechtecks mit einer Breite von 10 mm und einer Länge von 100 mm genutzt wird. Für die kürzere Strecke wird folglich eine Abkühlzeit von 0,005 s, für die längere 0,05 s benötigt, was einer Verzehnfachung der Abkühldauer entspricht. Die Kühlrate ist hierbei abhängig von der Geometrie der Bauteile, deren Packdichte und Verteilung im Bauraum (Schmid, 2015a, S. 85).

¹⁷ Energiedichtefenster, welches die höchsten mechanischen Eigenschaften erzeugt: $0,25 - 0,45 \text{ J/mm}^3$ (Wegner, 2015, S. 29); Auszugsweise definiert Witt für das Pulver PA2200 der Firma EOS ein Energiedichtefenster von $0,325$ bis $0,38 \text{ J/mm}^3$ für das Anlagensystem Formiga P100 (Witt & Wegner, 2015, S. 48), welches in dieser Maschinen/Materialkombination ebenfalls in den Versuch in **Kapitel 4** verwendet wird.

¹⁸ Die Schmelztemperatur von PA12 beträgt $184,8^\circ\text{C}$ (Vasquez et al., 2011, S. 11)

$$t_A = \frac{\text{Länge [mm]}}{\text{Scangeschwindigkeit} \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]} = \frac{10 \text{ mm}}{2000 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} = 0,005 \text{ s} \quad (8)$$

Die **Anzahl der Belichtungen pro Punkt**, d.h. wie häufig der Laser den gleichen Punkt belichtet, ergibt sich nach Kaddar (Kaddar, 2010, S. 66) aus nachfolgender Formel (9). Sie wird gebildet aus dem Quotienten aus Laserdurchmesser und Linienabstand. Die Anzahl der Belichtungen pro Punkt wird anhand von gängigen Beispielwerten dargestellt.

$$N = \frac{\text{Laserdurchmesser}}{\text{Scanlinienabstand}} = \frac{0,4 \text{ mm}}{0,2 \text{ mm}} = 2 \quad (9)$$

Die resultierende Abkühlzeit für kurze Strecken sowie das mehrfache Überfahren bestimmter Punkte begünstigt hierbei die Materialersetzung und führt zur Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften (Kaddar, 2010, S. 66–67). Zusätzlich wird die Zunahme der Porosität bzw. Abnahme der Bauteildichte durch Wegner (Wegner, 2015, S. 74) beschrieben. Für PA12 wird eine Abnahme der Masse beschrieben, insofern Temperaturen über 300°C erreicht werden (Vasquez et al., 2011, S. 1–2). Witt (Witt & Wegner, 2015, S. 48) und Wegner (Wegner, 2015, S. 107) haben hierzu den Einfluss der Scanvektorenlänge auf die erreichbaren Dichtewerte von Bauteilen aus Polyamid (PA2200) des Herstellers EOS untersucht. Hierbei wurden für Scanvektorenlängen von 25 bis 50 mm Dichtewerte über 0,97 g/cm³ erreicht, wohingegen bei 5 bis 10 mm Dichtewerte von 0,94 bis 0,96 g/cm³ ermittelt wurden (Witt & Wegner, 2015, S. 48), (Wegner, 2015, S. 107).

4) Scanvektoren und Sintertiefe

Darüber hinaus werden Einflüsse der Vektorenlänge auf die **Sintertiefe** durch Nelson beschrieben. Demnach weisen längere Scanvektoren eine geringere Sintertiefe auf, da die Verzögerung zwischen aufeinanderfolgenden Pulsen größer wird und somit mehr Wärme von der Oberfläche abstrahlt, d.h. dem Bauteil Energie entzogen wird (Nelson, 1993, S. 157–159). Die Sintertiefe wird dabei besonders durch die Laserenergie und Scangeschwindigkeit beeinflusst, (Nelson, 1993, S. 160). Zum Ausgleich von variierenden Vektorenlängen beschreibt Nelson (Nelson, 1993, S. 166) auszugsweise die Ansätze:

- die Geschwindigkeit proportional zur Vektorenlänge zu skalieren, um eine konstante Verzögerung zwischen den aufeinanderfolgenden Pulsen zu erhalten. Ziel ist dabei, dass jeder Punkt der gescannten Oberfläche die gleiche Abkühlzeit zwischen den aufeinanderfolgenden Pulsen zur Wärmeabstrahlung von der Oberfläche erhält.

- die Laserleistung parallel zur Geschwindigkeit zu steuern. Durch Beibehaltung eines konstanten Energieeintrags bleibt die Sintertiefe konstant. Hierzu wird zuerst die Laserleistung als Funktion der Vektorlänge kalkuliert, die dann wiederum mit der Geschwindigkeit parallel erhöht wird. Begrenzungen dieser Methode ergeben sich durch Grenzbereiche zur Materialzersetzung, sowie die Genauigkeit der Bauteile.

Nach diesem Prinzip müssen Bauteilbereiche mit kurzen Vektoren, wie z.B. dünne Wände oder Gitterstrukturen, mit deutlich geringerer Scangeschwindigkeit belichtet werden. Diese Strategie beschreibt Wegner für das SLS-System Formiga P100 des Herstellers EOS: Die Scangeschwindigkeit wird für kurze Scanvektoren reduziert, um Effekte zur Beschleunigung der Scannerspiegel zu kompensieren (Wegner, 2015, S. 106). Im Hinblick auf die vorliegende Arbeit ist dabei wichtig, dass die Bauteileigenschaften stets von der Scanvektorlänge bzw. der Querschnittsgeometrie abhängig sind. Dies kommt besonders zum Tragen bei geometrisch komplexen Bauteilen mit vielfältigen Querschnittsänderungen, Fragmenten und geringen Längen, wie z.B. Gitterstrukturen. Hierzu werden zusätzliche Einflüsse durch Schwankungen der Belichtungszeit infolge wechselnder Belichtungsrichtungen beschrieben: Bei sprunghaftem Wechsel der Belichtungsfläche führen diese infolge thermischer Differenzen zu charakteristischen Unebenheiten in Form von Oberflächenlinien (Blattmeier, 2012, S. 72). Zu Einflüssen der Schichtzeit beschreibt Wegner (Wegner, 2015, S. 30) das Auftreten von Absätzen in Aufbaurichtung. Diese bilden sich durch variierende Zykluszeiten in einem Bauteil aufgrund des damit verbundenen unterschiedlichen Schwindungsverhaltens. Weiterhin wird dargelegt, dass eine verbesserte Schichtanbindung durch kurze Schichtzeiten entsteht, da das neue Pulver stärker von unten aufgeheizt wird. Besonders für hohe Energiedichten wird eine Abnahme der Schmelztemperatur beschrieben, die nach ca. 10 Sekunden eintritt und bis zum erneuten Pulverauftrag dauert (Wegner, 2015, S. 133).

Basierend auf den bisherigen Analysen lassen sich bezugnehmend auf Fragestellung eins¹⁹ folgende theoretische Erkenntnisse ableiten:

- Die Bauteilgeometrie definiert die **Länge und Anzahl der Scanvektoren**, wobei deren Anzahl zusätzlich von dem Scanlinienabstand und der Spurbreitenkompensation beeinflusst wird.
 - Aufgrund zu kurzer Vektoren wird die Geschwindigkeit bei einigen Anlagensystemen automatisch reduziert, was die Prozesszeiten erhöht.

¹⁹ Fragestellung 1: „Welchen Einfluss hat sie auf die Produktivität abhängig von der Verfahrens- und Bearbeitungsweise sowie den Fertigungsparametern und dem zu bearbeitenden Material?“

- Je fragmentierter eine Fläche ist, desto mehr Scanvektoren und Positionswechsel inklusive Beschleunigungs- und Bremsvorgänge sowie das Aktivieren und Deaktivieren des Lasers sind notwendig. Folglich steigt die Prozessdauer durch den höheren Leerlauf des Lasers.
- Für kurze Vektoren und Scanlinienabstände nimmt die Abkühlzeit der Belichtungsfläche ab, die Sintertiefe zu und es entsteht eine inhomogene Temperaturverteilung.
- In Wechselwirkung mit dem **Scanlinienabstand** wirken sich diese kurzen Scanvektoren umso stärker auf die Prozessdauer aus, je kleiner dieser ist, da sich die Anzahl der Scanlinien mit zunehmender Komplexität/Flächenfragmentierung erhöht. Daraus abgeleitet führen kurze Vektoren, z.B. infolge komplexer Gitterstrukturen, zur verlängerten Generierdauer. Die Temperaturführung im Prozess wird schwieriger zu handhaben, wodurch die Prozessstabilität verringert und Ausschuss begünstigt wird.
- Der Anteil der **Kontur und Füllung** hängt direkt mit der Geometrie zusammen. Wird die zu belichtende Fläche in ihrer Komplexität gesteigert, z.B. durch Flächenfragmentierung, erhöht sich die Prozessdauer, je größer die Differenz zwischen Kontur- und Füllgeschwindigkeit ist. Eine mehrfache Belichtung erhöht diesen Faktor entsprechend.
- In Abhängigkeit des Materials und den Parametern entstehen für kurze Scanvektoren **Temperaturüberhöhungen**, die zu erhöhter Porosität führen und durch Verdampfungseffekte das Laserschutzglas und die Prozesskammer verunreinigen. Resultierend werden die Qualität des auftreffenden Laserstrahls und damit die Energiedichte sowie die Bauteileigenschaften nicht durchgängig gewährleistet, wodurch die Reproduzierbarkeit sinkt. Neben dem erhöhten Reinigungs- und Personalaufwand steigt bei zu hoher Verschmutzung die Chance eines Laserrückreflexes, sodass die Lebensdauer der Optik und des Lasers verringert werden.
- Die **Nachbearbeitung** wird maßgeblich durch die Zugänglichkeit sowie die Bauteiloberfläche und den Energieeintrag bzw. Pulveragglomerationen beeinflusst. Positive Effekte durch den Outline-Laser können dabei zur Reduktion des Aufwandes führen. In Abhängigkeit des verwendeten Materials und dessen Wiederverwertbarkeit variiert der Nutzen einer sorgfältigen Materialrückführung sowie der dafür notwendige Personalaufwand. Weiterhin ist die manuelle Nachbearbeitung dünnwandiger/filigraner Bauteile unumgänglich. Vorteile durch den personenlosen Generierprozess fallen mit hohem Nachbearbeitungsbedarf geringer aus und die Wirtschaftlichkeit in Hochlohnländern sinkt.

Durch diese Punkte ist bereits eine erste Vorhersage möglich, wie sich unterschiedlich komplexe Geometrien auf die Prozessdauer in Abhängigkeit des verwendeten Materials auswirken. Eine Zusammenfassung der Wechselwirkungen zwischen SLS-Verfahren und Bauteilparametern mit der Produktivität und Geometriefaktoren erfolgt in nachfolgender Tabelle 3. Ausgehend von den Einflussgrößen (1) wird dargestellt, wie sich eine Parameteränderung (2) auf die jeweilige Zielgröße (3) auswirkt. Die Bewertung erfolgt dabei als Hypothese basierend auf dem beschriebenen Stand der Technik und wird durch entsprechende Versuche in **Kapitel 4** überprüft.

Tabelle 3: Wechselwirkungen zwischen SLS-Parametern, Merkmalen und der Produktivität

		(2) Parameteränderung	(3) Zielgrößen													
			Produktivität								Geometriefaktoren (2D)					
(1) Einflussgrößen		Generierdauer	Aufbaurrate (cm ³ /h)	Belichtungsdauer/Schicht	Anzahl Sprünge/Schicht	Abkühlzeit/Querschnitt	Anteil Belichtung zu Beschichtung	Abkühlen nach Prozess	Materialrückführung	Nacharbeit/Strahlen	Anzahl Vektoren	Länge Vektoren	Anteil Kontur	Anteil Füllung	Einfluss Komplexität	
Bauteilparameter	Volumen/ Belichtungsfläche	↑	↑	↓	↑	-	-	↑	↑	↓	o	-	-	-	-	o
		↓	↓	↑	↓	-	-	↓	↓	↑	o	-	-	-	-	o
	Flächen Fragmentierung	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↑
		↓	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↓
	Bauteil- skalierung	↑	↑	↑	↑	-	↑	-	↓	↑	↓	-	↑	-	-	↓
		↓	↓	↓	↓	-	↓	-	↑	↓	↑	-	↓	-	-	↑
Orientierung des Bauteils XYZ ²⁰		↑	↑	↓	↑	↑	-	↑	↑	o	o	↑	-	-	-	↑
		↓	↓	↑	↓	↓	-	↓	↓	o	o	↓	-	-	-	↓
SLS-Parameter	Scangeschwindig- keit	↑	↓	↑	↓	-	↓	↓	↓	o	o	-	-	-	-	-
		↓	↑	↓	↑	-	↑	↑	↑	o	o	-	-	-	-	-
	Scanlinien- abstand	↑	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↓	o	o	↓	-	↑	↓	↓
		↓	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	o	o	↑	-	↓	↑	↑
	Schichthöhe	↑	↓	↑	-	↓	-	-	↓	o	↑	↓	-	-	-	↓
		↓	↑	↓	-	↑	-	-	↑	o	↓	↑	-	-	-	↑
	Spurbreite	↑	↓	↑	↓	↓	o	↓	↓	o	o	↓	↓	↑	↓	↓
		↓	↑	↓	↑	↑	o	↑	↑	o	o	↑	↑	↓	↑	↑
	Konturbelichtung	an	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	o	↑	↑	↑	↑	↓	↑
		aus	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	o	↓	↓	↓	↓	↑	↓
Anzahl Belichtungen	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	-	-	-	↑	
	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↓	-	-	-	↓	

²⁰ Unter der Annahme, dass eine Erhöhung des Parameters die Anzahl der auszuführenden Scanpfade erhöht

2.4. Ressourcenaufwand und wirtschaftliche Aspekte des SLS

In diesem Kapitel erfolgt eine Betrachtung des anfallenden Ressourcenaufwands sowie damit zusammenhängender wirtschaftlicher Aspekte des SLS-Prozesses. Diese bilden die Grundlage für die Versuche und die Wirtschaftlichkeitsberechnung in **Kapitel 4**. In **Kapitel 2.4.1** erfolgt zunächst eine Einordnung der Herstellkosten, inkl. zugehöriger Bestandteile und Einflussfaktoren, die innerhalb dieser Arbeit betrachtet werden. In **Kapitel 2.4.2** werden zunächst Einflüsse des zu fertigenden Bauauftrags auf die Prozessdauer und die Materialkosten erläutert. Die beiden Aspekte werden zusammen behandelt, da sie sich stark überschneiden und zum Teil aufeinander aufbauen. Hierzu werden typische Kenngrößen wie die Aufbaurrate und Packdichte sowie damit zusammenhängende Annahmen beschrieben. Darauf aufbauend erfolgt in **Kapitel 2.4.3** eine Übersicht zur Entstehung der Fertigungs- und Lohnkosten im SLS-Prozess. Die vorgestellten Inhalte werden zusätzlich mit Blick auf die Berücksichtigung der geometrischen Komplexität abgeglichen und bilden die Grundlage für den wirtschaftlichen Vergleich in **Kapitel 4.5**.

2.4.1. Herstellkosten

Als Zielgröße für die Bewertung der Komplexitätseinflüsse auf den Herstellprozess dient in den Versuchen in **Kapitel 4** besonders die Dauer des Generierprozesses (Bauzeit) und die damit zusammenhängenden Herstellkosten. Eine Vielzahl von Methoden beschäftigt sich hierbei sowohl mit der Abschätzung der Bauzeit als auch mit der Kostenberechnung, unter anderem (Hopkinson & Dickens, 2003), (Ruffo et al., 2006a), (Ruffo & Hague, 2007), (Klahn et al., 2018, S. 98–99), (Lindemann et al., 2012), (Rickenbacher et al., 2013), (Baumers et al., 2017). Der Anwendungszweck und Detaillierungsgrad dieser Kalkulationsmethoden unterscheiden sich zum Teil sehr stark durch Berücksichtigung unterschiedlicher Bewertungskriterien und den getroffenen Prämissen. Im Sinne einer transparenten Aufwandsaufschlüsselung wird zur Berechnung der Herstellkosten als Kalkulationsverfahren die differenzierende Zuschlagskalkulation verwendet, welche um Erkenntnisse aus bestehenden Arbeiten bzw. Besonderheiten der Additiven Fertigung ergänzt wird. Im Rahmen der Arbeit eignet sich diese, da es sich vorwiegend um eine Vorkalkulation handelt, bei der nicht alle unternehmensspezifischen Daten zugänglich sind.

Sie wird unterteilt in **direkte Kosten/Einzelkosten**, welche dem Arbeitsgegenstand/Kostenträger direkt zurechenbar sind (z.B. Materialeinzelkosten, Fertigungslohnkosten oder Sondereinzelkosten) sowie **indirekte Kosten/Gemeinkosten**, welche dem Arbeitsgegenstand/Kostenträger indirekt über Zuschläge zugerechnet werden (z.B. Raumkosten, Energiekosten). (Fischer, 2008, S. 28), (Awiszus et al., 2020, S. 425), (Ehrlenspiel et al., 2020, S. 444), (Kirchner, 2020, S. 277–278)

Die einzelnen Prozessschritte können entsprechend ihrer Verursachungshöhe jeweils beaufschlagt werden, z.B. auf die Materialeinzelkosten, die Fertigungslöhne oder die Herstellkosten (Weber, 2018, S. 75), (Fischer, 2008), (Awiszus et al., 2020, S. 425). Die Bestandteile der Herstellkosten werden in Anlehnung an (Buchholz & Gerhards, 2016, S. 97), (Fischer, 2008, S. 29), (Awiszus et al., 2020, S. 425) in Formel (10) und Tabelle 4 dargestellt und wie folgt erläutert.

$$\text{Herstellkosten} = \text{MEK} + \text{MGK} + \text{FEK} + \text{FGK} + \text{SEK} \quad (10)$$

Tabelle 4: Bestandteile der Herstellkosten (HK)

Bestandteil	Unterposition	Beispiel
Materialkosten (MK)	Materialeinzelkosten (MEK)	Rohstoffe
	Materialgemeinkosten (MGK)	Beschaffungskosten, Lagerkosten
Fertigungskosten (FK)	Fertigungseinzelkosten (FEK)	Direkt zurechenbare Lohnkosten
	Fertigungsgemeinkosten (FGK)	Raumkosten, Energiekosten
	Sondereinzelkosten der Fertigung (SEK)	Spezialwerkzeuge, Lizenzen

Die **Materialkosten (MK)** ergeben sich hierbei direkt aus dem Bauauftrag, bzw. Faktoren wie der Bauhöhe, der Packdichte, dem Materialverlust und weiteren Faktoren, die im nachfolgenden Kapitel beschrieben werden. Zur Berechnung der **Fertigungskosten (FK)** werden grundlegend die Prozesszeiten, jeweilige Maschinenstundensätze für die verwendeten Anlagen sowie die Personalkosten aufgenommen (Zeyn, 2017, S. 143), (Weber, 2018). Die Gemeinkosten werden anhand von Zuschlagssätzen auf die Kostenträger verteilt, wobei sich die Höhe aus dem Betriebsabrechnungsbogen (BAB) ergibt (Ehrlenspiel et al., 2020, S. 444). Mit Blick auf den Maschinenstundensatz werden in der Folge lediglich Besonderheiten durch die Additive Fertigung in **Kapitel 2.4.1.2** beschrieben, die Grundlagen zur Kalkulation richten sich nach (Awiszus et al., 2020, S. 432–438), (Zeyn, 2017, S. 144). Als Erweiterung können zu Berechnung der **Selbstkosten (SK)** anteilige Verwaltungsgemeinkosten, Vertriebsgemeinkosten und Sondereinzelkosten des Vertriebs aufgenommen werden (Buchholz & Gerhards, 2016, S. 97), (Awiszus et al., 2020, S. 425).

Da diese jedoch unternehmensspezifisch sind, beschränken sich die Rechnungen in dieser Arbeit auf die Herstellkosten. Eine schematische Darstellung in Anlehnung an (Fischer, 2008), (Fischer, 2010), (Weber, 2018) wird in Abbildung 18 gegeben. Teilbereiche, die nicht im Untersuchungsfokus liegen, werden in hellgrauer Schrift dargestellt. Detaillierte Informationen zu den einzelnen Kalkulationsarten finden sich in (Weber, 2018, S. 48–75), (Fischer, 2008, S. 27–33), (Ehrlenspiel et al., 2020, S. 442–452), (Awiszus et al., 2020, S. 425), (VDI 2234, 1990).

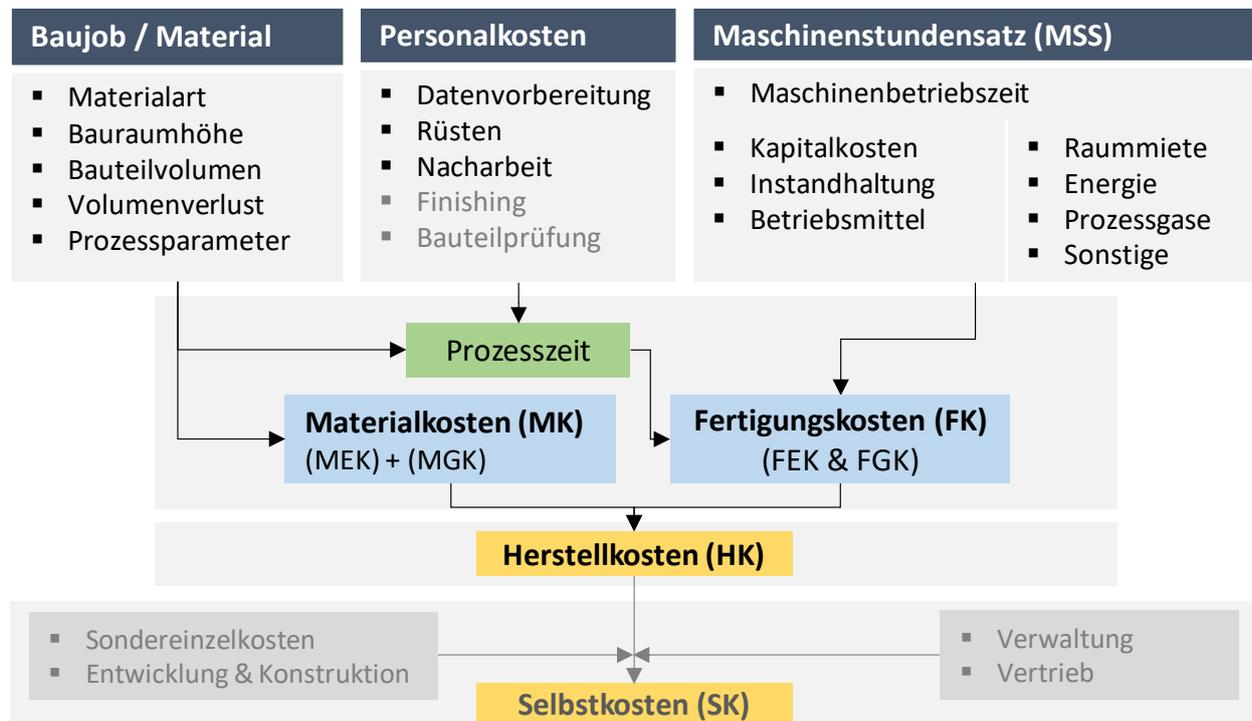


Abbildung 18: Kostenstruktur des additiven Herstellprozesses (Eigene Darstellung).

2.4.2. Materialkosten und Prozessdauer

Die Dauer des Bauauftrags sowie dabei entstehende Materialkosten sind von einer Vielzahl von Parametern abhängig, wie dies bereits in **Kapitel 2.3** beschrieben wurde. Die Produktivität additiver Fertigungssysteme wird häufig über die **Aufbaurate** definiert, wobei sie neben maschinen- und materialspezifischen Faktoren von dem Baujob selbst abhängig ist. Hierzu wird die Bauzeit beispielsweise über den Baufortschritt der Z-Komponente [mm/h], als generiertes Volumen pro Zeit [cm³/h], oder als Gesamtzeit für das Herstellen eines bestimmten Bauteils angegeben (Klahn et al., 2018, S. 63), (Gebhardt, 2016, S. 105). Ebenso kann die Verarbeitungsrate [kg/h] angegeben werden (Baumers et al., 2011, S. 2238). Als kostenbezogene Vergleichsgröße werden häufig die Kosten pro erzeugtem Volumen [€/cm³] oder Masse [€/kg] angegeben (Kumke, 2018, S. 22). Abbildung 19 zeigt eine Darstellung der direkt und indirekt einflussnehmenden Faktoren, welche nachfolgend weiter erläutert werden.

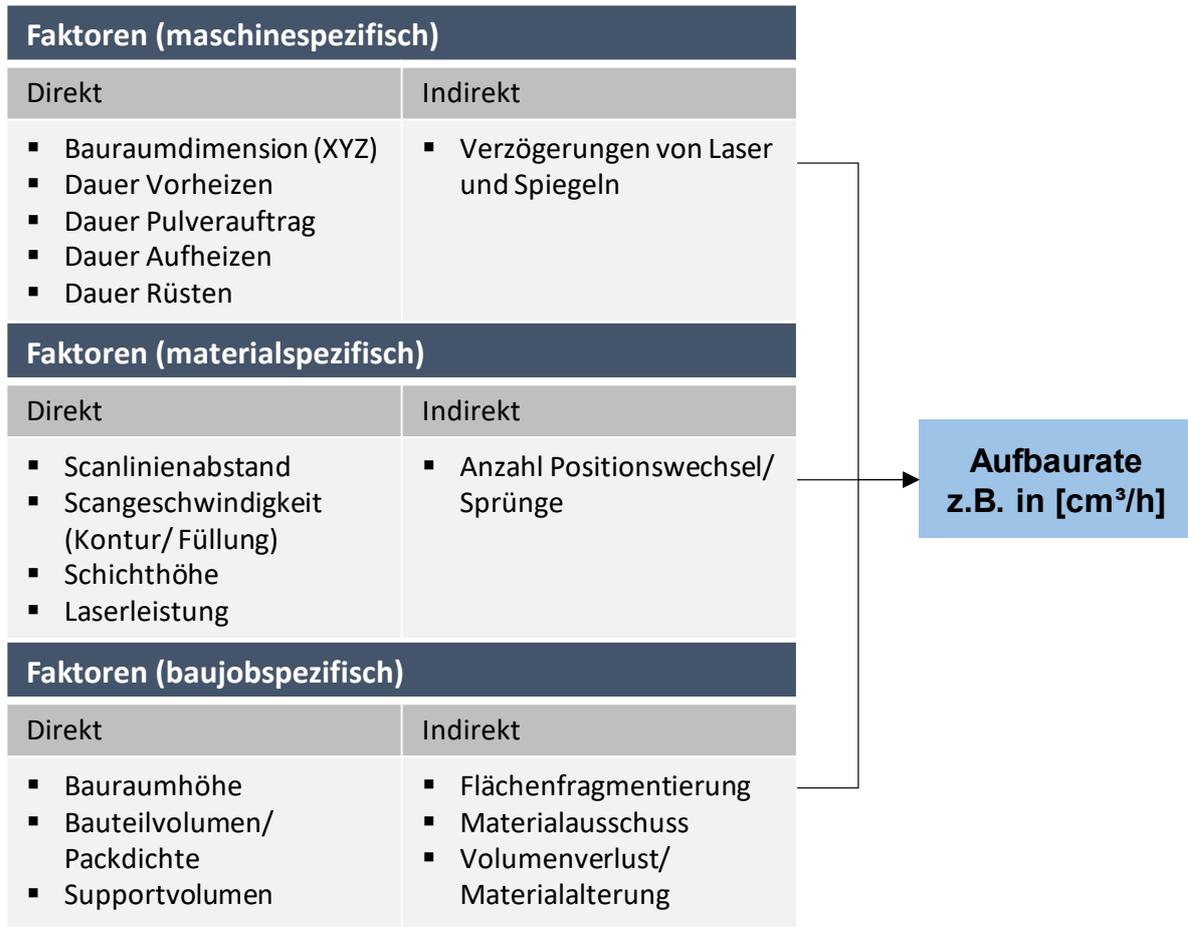


Abbildung 19: Zusammensetzung der Aufbaurrate (Eigene Darstellung)

In direktem Zusammenhang damit steht die **Packdichte** der Maschine, welche das Verhältnis des Bauteilvolumens zum Volumen des Pulverbetts angibt, das für die Produktion notwendig ist (Ruffo et al., 2006b, S. 1421). Eine alternative Bezeichnung ist der Bauraumausnutzungsgrad (Kumke, 2018, S. 22), (Lindemann & Jahnke, 2017). Hierbei muss differenziert werden, ob sich die Packdichte auf den Gesamtmaterialbedarf, z.B. mit Boden und Deckschicht, oder nur auf die Ebenen bezieht, in denen Bauteile generiert werden. Für den SLS-Prozess variiert dieser Anteil in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie, Größe, Länge und der Möglichkeit Bauteile ineinander zu verschachteln und zu stapeln. Die durchschnittliche Packdichte für das SLS wird hierbei mit einem Wert von 10 % angegeben (Schmid, 2015a, S. 40), (Baumers & Holweg, 2019, S. 796), (Baumers & Holweg, 2016, S. 1911). In Abhängigkeit der verwendeten Versuchsaufbauten werden in der Literatur weitere Packdichten von 4-12 % beschrieben (Ruffo et al., 2006b, S. 1422), (Baumers et al., 2011, S. 2237). Der Bauraumnutzungsgrad hat dabei einen hohen Einfluss auf die Stückkosten (Ruffo et al., 2006b, S. 1422), (Kumke, 2018, S. 22).

Von Herstellerseite wird die Aufbaurrate für die angebotenen Maschinen nur zum Teil mit der angenommenen Packdichte angegeben, dafür häufiger mit dem Hinweis, dass diese bauteilspezifisch ist. In Tabelle 5 werden hierzu auszugsweise verschiedene Hersteller und Anlagensysteme aus dem Bereich des SLS dargestellt. Die Auswahl erfolgt anhand industrieller SLS-Anlagen der Marktführer EOS, Farsoon und 3D-Systems in verschiedenen Ausführungen, um die Varianz in den Aufbauraten darzustellen (Schmid, 2023, S. 43). Zu berücksichtigen ist, dass bei einer Verfahrensauswahl die Wirtschaftlichkeitskalkulation unter anderem auf der Maschinenkapazität und der Aufbaurrate basiert. Reduziert die zu erzeugende Geometrie die Aufbaurrate des jeweiligen Verfahrens, wird die geforderte Kapazität nicht erreicht und das Produktions- bzw. Investmentszenario ist nicht realisierbar. Für die SLS-Anlagentechnik werden diese Auswirkungen in **Kapitel 4** dargestellt.

Tabelle 5: Vergleich der Aufbauraten industrieller SLS-Anlagen der aktuellen Marktführer

Verfahren	SLS					
	Hersteller Anlage	EOS P110 Velocis	Farsoon HT403P	3D-Systems sPro™ 60 HD-HS	EOS P770	Farsoon HT1001
Bauraumgröße (X,Y,Z)	250 mm 200 mm 330 mm	400 mm 400 mm 450 mm	381 mm 330 mm 460 mm	700 mm 380 mm 580 mm	1000 mm 500 mm 450 mm	550 mm 550 mm 750 mm
Bauvolumen	16,5 l	72 l	57,5 l	154 l	225 l	227 l
Aufbaurrate @Packdichte	Bis 1,2 l/h 5 %	Bis 4 l/h	1,8 l/h	Bis 5,6 l/h 5 %	Bis 15 l/h	3 l/h
Quelle	(EOS GmbH, 2019a)	(Farsoon Technolo- gies, 2021a)	(3D Sys- tems, Inc., 2021)	(EOS GmbH, 2019b)	(Farsoon Technolo- gies, 2021b)	(3D Sys- tems, Inc., 2021)

Neben der Bauhöhe und Packdichte sind die verwendete **Materialmenge** und das zu belichtende **Bauteilvolumen** ein wesentlicher Faktor vieler Kostenmodelle (Hopkinson & Dickens, 2003), (Gibson et al., 2015, S. 388), (Lindemann et al., 2012, S. 183), (Ruffo et al., 2006b). Nach Ruffo et al. (Ruffo et al., 2006b, S. 1421) ergibt sich die verwendete Materialmenge (m_B) für das SLS nach Formel (11). Hierzu wird die Materialdichte (ρ) multipliziert mit dem Volumen des gesinteren Materials (V_B) bzw. dem Volumen der Bauteile und dem verschwendeten Material (W_B), welches zum Beispiel bei der Bauteilreinigung anfällt.

$$m_B = \rho \cdot (V_B + W_B) \quad (11)$$

Gibson et al. (Gibson et al., 2015, S. 388) sowie Lindemann et al. (Lindemann et al., 2012, S. 183) definieren die Materialkosten für das SLS, SLM und FDM nach folgendem Prinzip:

- Zunächst wird das Volumen des Bauteils (v) multipliziert mit den Materialkosten pro Gewichtseinheit (C_m), der Dichte (ρ) und der Anzahl von Bauteilen (N). Der Faktor (k_s) berücksichtigt den Aufwand für das Volumen notwendiger Stützstrukturen und nimmt typische Werte von 1,1 bis 1,5 an.
- Der Faktor k_r berücksichtigt den erhöhten Materialaufwand, z.B. durch nicht recyclebare Materialien beim SLS-Prozess; er nimmt Werte zwischen 1,0 und 7,0 an. Zusammengefasst ergeben diese die Materialkosten nach Formel (12).

$$M = k_s \cdot k_r \cdot N \cdot v \cdot C_m \cdot \rho \quad (12)$$

Die Bauteilgeometrie beeinflusst damit direkt die Kosten durch den Bedarf an verwendetem Rohmaterial und die dazu notwendige Produktionszeit. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird in Anlehnung an (Ruffo et al., 2006b) (Gibson et al., 2015, S. 388), (Lindemann et al., 2012, S. 183) zur Kalkulation der Materialkosten (MK) eine Erweiterung von Formel (11) und (12) genutzt. Die **Materialkosten (MK)** werden nach Formel (13) folglich gebildet aus der benötigten Materialmenge bestehend aus dem Volumen des gesinterten Materials (V_B) und dem verschwendeten Material (W_B), welcher multipliziert werden mit der Materialdichte (ρ) den Materialkosten pro Gewichtseinheit (C_m) und dem Zuschlag (Z_M). Der Zuschlag beträgt typischerweise zwischen 5 und 20 % (Zeyn, 2017, S. 144), (Ehrlenspiel et al., 2020, S. 450).

$$MK = \rho * (V_B + W_B) * C_m * (1 + Z_M) \quad (13)$$

Hopkinson und Dickens (Hopkinson & Dickens, 2003) nehmen den Einfluss der Bauteilgeometrie ebenfalls über die zu sinternde Materialmasse auf. Es wird hierbei angenommen, dass die Kosten zum Herstellen eines komplexen Bauteils nicht höher sind und die Produktion nicht länger dauert als bei einem vergleichbaren simplen Bauteil gleicher Größe (Hopkinson & Dickens, 2003). Die Annahmen zur Komplexität werden hierbei hauptsächlich durch entfallende Kosten zur Werkzeugherstellung im Spritzguss hergeleitet. Entsprechende Versuche zum Nachweis der Auswirkungen für den SLS-Prozess werden innerhalb des Modells nicht vorgenommen, sodass für die Aussage keine quantifizierte Grundlage besteht. Auf diesen Annahmen werden in weiteren Arbeiten jedoch beispielhafte Thesen aufgestellt, wie:

- der Nutzungsgrad der Baukammer hat einen geringen Einfluss auf die Kosten in der Massenproduktion (Lindemann et al., 2012, S. 185)

- die Stückkosten können von der geometrischen Komplexität entkoppelt werden, da die Bauschichtgestalt keine signifikanten Auswirkungen auf diese hat (Adam, 2015, S. 17).

Ebenfalls wird sie in einer Vielzahl von Veröffentlichungen referenziert, unter anderem (Thomas & Gilbert, 2014, S. 27), (Adam, 2015, S. 17), (Baumers, 2012), (Almaghariz et al., 2016), (Gullapalli, 2016). Ruffo et al. (Ruffo et al., 2006b, S. 1420–1422) nutzen darauf aufbauend einen Ansatz, bei dem die Bauteilkosten anhand eines tätigkeitsbasierten Kostenmodells berechnet werden. Die Kosten für den Bauauftrag entstehen als Summe aus den indirekten Kosten (Gesamtbauzeit) und den direkten Kosten (das zum Herstellen benötigte Material). Die Gesamtbauzeit (T_{Build}) wird nach Formel (14) definiert als Summe aus der Gesamtzeit zum Scannen (T_{xy}), der Gesamtzeit zum Pulverauftrag (T_z) und der Zeit zum Aufheizen und Abkühlen des Pulverbetts (T_{HC}):

$$T_{Build} = T_{xy} + T_z + T_{HC} \quad (14)$$

Als Einflussfaktor für die Kostenentstehung werden die Bauteilgröße sowie die dadurch erreichbare Packdichte angeführt. Da die Kosten durch die Anzahl an Bauteilen geteilt werden, sind kleinere Bauteile aufgrund der prinzipiell höheren Packdichte günstiger (Ruffo et al., 2006b, S. 1422). Der Einfluss einer variierenden Komplexität wird hierbei nicht aufgenommen, da lediglich das Volumen bzw. die Pulvermenge betrachtet werden.

Klahn et al. (Klahn et al., 2018, S. 98–99) beschreiben ebenfalls eine volumenbezogene Kalkulationsmethode, in welcher der Break-Even-Point zwischen additiver und konventioneller Fertigung ermittelt wird. Hierbei wurden die Gesamtkosten pro Bauteilvolumen für das SLS-Verfahren mit einem Dienstleister ausgehandelt und einer konventionellen Prozesskette gegenübergestellt.

Baumers (Baumers, 2012) beschreibt hierzu, dass die Zeit zum Scannen der Füllung proportional zum Bauteilquerschnitt und der Laserenergie steigt. Stillstandzeiten aufgrund von Beschleunigungen der Spiegel und dem An- und Ausschalten des Lasers werden hierbei nicht betrachtet.

Gibson et al. (Gibson et al., 2015, S. 389–391) entwickelten hierzu für ihr Kostenmodell zusätzlich einen Korrekturfaktor, indem sie die durchschnittliche Belichtungsfläche des Bauteils mitaufnehmen. Sie nutzen einen Korrekturfaktor von Pham und Wang (Pham & Wang, 2000, S. 428), die diesen Faktor anhand von Sprüngen des Lasers entwickelt haben. Diese geben jedoch an, dass die Bestimmung der Anzahl an Sprüngen schwierig ist, da hierfür die Geometrie jeder Schicht im Detail betrachtet werden muss. Sie nehmen daher einen Sprung pro Scanlinie an.

Di Angelo und Di Stefano beschreiben hierzu ebenfalls Schwierigkeiten bei der genauen Kalkulation der Bauzeit durch Prozessparameter, welche sich auf die Bewegung des Bearbeitungswerkzeugs auswirken. Diese umfassen beispielsweise die Beschleunigung einer Düse oder des Lasers. Die Autoren definieren die Bauzeit als Summe der Generierzeit für jede Schicht und der Verzögerungszeit zwischen dieser und der nachfolgenden Schicht. (Di Angelo & Di Stefano, 2011)

Ruffo et al. (Ruffo et al., 2006a) betonen in einer weiteren Arbeit den Einfluss verschiedener geometrischer Formen auf den SLS-Prozess. Zum geometrischen Einfluss auf die Prozesskette erfolgen die Feststellungen:

- Die Vorbereitungsphase, bestehend aus Rüsten der Maschine, Herstellen der Temperatur und Stickstoffatmosphäre und der Pulverauftrag der Schichten zum Herstellen der korrekten Bett-Temperatur hängen nicht von der Geometrie ab.
- Die Bauhöhe steigert die Dauer des Recoat-Prozesses linear.
- Das Volumen wirkt sich auf den Scan-Prozess der Fläche aus.
- Weder Bauhöhe noch Volumen sind in der Lage den Scan-Prozess der Kontur zu beschreiben, welcher umso mehr Zeit in Anspruch nimmt, je länger und fragmentierter sie ist.
- Die Bauteilgestalt wirkt sich auf die Zeit zum Belichten der Außenkontur und der Füllung aus durch die Notwendigkeit von Positionswechseln.

Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, dass sich die Wartezeit zum Erreichen der vorgegebenen Temperatur nach dem Auftragen einer Schicht signifikant auf die Prozessdauer auswirkt (Ruffo et al., 2006a, S. 9). Aus den Erkenntnissen zu den geometrischen Auswirkungen auf die Zeit zum Scannen sowie den Recoat wird eine Formel zur Abschätzung der Bauzeit entwickelt. Zur Berücksichtigung der Geometrie auf den Scanprozess erfolgt die Definition eines Kompaktheitsverhältnisses (C_r) als Verhältnis zwischen dem Volumen der Bauteil(e) (V_B) und dem Volumen des Begrenzungsrahmens (V_{ext}) (Ruffo et al., 2006a, S. 13). Die Dauer für die gesamte Bauzeit ergibt sich hierbei aus der Summe aus:

- der Zeit zum Pulverauftrag
- der Zeit zum Scannen der Kontur und Füllung
- der Zeit für Pre- und Post-Processing (Zeit zum Aufheizen und Abkühlen).

In Summe werden mögliche Fragmentierungen des zu fertigenden Querschnitts und damit einhergehende Auswirkungen in keiner der vorgestellten Arbeiten hinreichend berücksichtigt. Diese müssen für komplexe Bauteile indirekt über die Generierdauer aufgenommen werden.

2.4.3. Fertigungskosten und Personalkosten

Die Fertigungskosten werden untergliedert in variable und fixe Kosten (Gebhardt, 2016, S. 548), wobei sich die variablen Kosten auf einen Bauprozess und damit auf die Anzahl der im Bauprozess hergestellten Bauteile beziehen, wie dies in Tabelle 6 dargestellt wird:

Tabelle 6: Variable und fixe Kosten

Variable Kosten	Fixe Kosten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materialkosten ▪ Betriebskosten <ul style="list-style-type: none"> ○ Energiekosten ○ Instandsetzungskosten ▪ Recyclingkosten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investitionskosten ▪ Nebeninvestitionen ▪ Wartung und Instandhaltung ▪ Raumkosten ▪ Personalkosten

Eine Besonderheit der Additiven Fertigung ist hierbei, dass während des Generierprozesses selbst nahezu keine Personalkosten anfallen, jedoch für die Prozesse der Vorbereitung und Nachbearbeitung (Lindemann et al., 2012, S. 182), (Rickenbacher et al., 2013). Die Kosten entstehen hierbei wie zuvor beschrieben in folgenden Bereichen (Lindemann et al., 2012), (Lindemann & Jahnke, 2017, S. 288), (Zeyn, 2017, S. 141):

- Vorbereitung des Baujobs (Rüsten - Material und Maschine, Datenvorbereitung)
- Produktion des Baujobs (Aufheizen, Generieren, internes Abkühlen)
- Manuelles Entfernen der Bauteile und Stützstrukturen
- Post-Processing und Verbesserung der Materialeigenschaften

Die **Fertigungskosten (FK)** setzen sich im Folgenden aus den Kosten zum Betrieb der Anlage, vor- und nachgelagerten Fertigungsschritten, jeweiligen Zuschlagssätzen sowie dem notwendigen Personal zusammen. In Summe ergeben sich die Fertigungskosten (FK) nach Formel (15):

$$FK = K_{Daten} + K_{Rüsten} + K_{Bauprozess} + K_{Abkühlen_extern} + K_{Nacharbeit} \quad (15)$$

Eine detaillierte Aufschlüsselung zur Zusammensetzung der jeweiligen Kostenpositionen wird nachfolgend erläutert. Die **Personalkosten** setzen sich zusammen aus den Arbeitskosten, inklusive Bruttoverdienst und Lohnnebenkosten sowie der Anzahl notwendiger Mitarbeiter. Zur Kalkulation wird hierbei unterschieden zwischen den Kosten von hochqualifiziertem Personal (K_{HQ}) für die Datenvorbereitung sowie Fachkräften (K_{Fach}), welche zum Rüsten und Bedienen der Maschine und nachfolgenden Nachbearbeitungsprozessen eingesetzt werden.

Vorbereitung des Baujobs

Im Falle der Vorbereitung entstehen zum einen Kosten beim **Rüsten des Materials und der Fertigungsanlage** sowie für die **Datenvorbereitung**. Die Kosten zur Datenvorbereitung werden beispielsweise durch das Positionieren und Parametrieren von Bauteilen sowie das Erstellen von Stützstrukturen hervorgerufen, da diese Tätigkeiten von hochqualifiziertem Personal durchgeführt werden. Entsprechende Personalanforderungen werden durch Marschall (Marschall, 2016) beschrieben. Es wird hierbei angemerkt, dass die Kosten in hohem Maße abhängig von der Komplexität der Bauteile und des Baujobs sind (Lindemann et al., 2012, S. 182). Zur Kalkulation ergeben sich folgende Formeln:

- Das **Rüsten** des Materials und der Anlage wird nach Formel (16) durch eine Fachkraft mit dem Stundensatz (K_{Fach}) ausgeführt, mit der notwendigen Dauer (t_R) und dem Zuschlag (Z_R) multipliziert:

$$K_{Rüsten} = t_R * K_{Fach} * (1 + Z_R) \quad (16)$$

- Für die **Datenvorbereitung** werden die Dauer (t_D) für die Datenkonvertierung, Bauteilreparatur, das Packen des Bauraums, Stützstrukturen, das Slicen, Parametrieren und den Datentransfer berechnet. Diese Tätigkeiten werden von hochqualifiziertem Personal mit einem Stundensatz (K_{HQ}) ausgeführt und dem Zuschlag (Z_D) multipliziert, sodass nachfolgende Formel (17) entsteht:

$$K_{Daten} = t_D * K_{HQ} * (1 + Z_D) \quad (17)$$

Produktion des Baujobs

Die Kosten zur Produktion des Baujobs ergeben sich besonders durch die **Maschinenkosten der SLS-Anlage**, die als Produkt aus Prozessdauer und Maschinenstundensatz (MSS) entstehen. Ergänzend zu den Baujobparametern in **Kapitel 2.4.2** und den SLS-Prozessparametern in **Kapitel 2.3** ergeben sich Einflüsse auf den Maschinenstundensatz durch folgende Punkte:

- Die **Nutzungszeit der Anlage/Maschinenbetriebszeit** wird davon beeinflusst, wie viele Schritte der Vor- und Nachbearbeitung innerhalb der Maschine vollzogen werden müssen, sodass eine Auslagerung dieser Prozesse eine höhere Produktivität gewährleistet (Zeyn, 2017, S. 12).
- Die **Kapazitätsauslastung** der Anlage bestimmt über die Umlage der Fixkosten signifikant die Produktionskosten pro Stück (Baumers & Holweg, 2019), (Baumers et al., 2017), (Feldmann & Pumpe, 2016, S. 43).

- Die **Energiekosten** resultieren aus der benötigten Elektrizität für die SLS-Anlage sowie zusätzliche Aggregate, wie z.B. den Chiller zur Kühlung des Lasers und den Stickstoffgenerator. Baumers et al. (Baumers et al., 2011, S. 2238) stellen beispielhaft für zwei SLS-Systeme dar, dass ca. 56-61 % des Gesamtenergiebedarfs zeitabhängig ist und größtenteils zum Kühlen und Aufheizen benötigt wird. Eine Beschleunigung des Prozesses erhöht folglich die Produktivität als auch die Energieeffizienz. Zusätzlich wird ein geometriebedingter Anteil der Energiekosten für zwei verschiedene SLS-Anlagen zwischen 4,48 und 5,43 % für den untersuchten Baujob angegeben. (Baumers et al., 2011, S. 2237–2238)

Da dieser Baujob jedoch nur eine Packdichte von 4 %, respektive 4,4 % aufweist, sind für die Serienproduktion mit mittleren 10 % Packdichte höhere Anteile zu erwarten.

Die Herstellkosten werden dabei auf die Bauteile umverteilt, die im entsprechenden Auftrag entstehen. Als Verteilungsschlüssel dient z.B. das Bauteilvolumen (Fera et al., 2018, S. 678). Neben dem Volumen der Bauteile und Stützstrukturen werden zudem die Fläche sowie die Anzahl der Schichten als Faktoren verwendet (Lindemann & Jahnke, 2017, S. 293–294). Zur Kalkulation werden im Folgenden nachstehende Formeln verwendet:

- Der **Bauprozess** erfolgt ohne Personal, sodass die Zeit zum Aufheizen und Inertisieren (t_A), die Zeit zum Belichten (t_{Bel}), sowie die Zeit zum Pulverauftrag (t_{Bes}) und Abkühlen in der Maschine ($t_{Abk.int}$) mit dem Maschinenstundensatz der jeweiligen Anlage ($K_{MSS-SLS}$) nach Formel (18) berechnet wird:

$$K_{Bauprozess} = (t_A + t_{Bel} + t_{Bes} + t_{Abk.int}) * K_{MSS-SLS} * (1 + Z_G) \quad (18)$$

Die Prozesszeiten für die Belichtung und Beschichtung können hierbei experimentell ermittelt werden oder mit entsprechenden Bauzeitabschätzungen, u. a. von (Lindemann & Jahnke, 2017, S. 293–294) berechnet werden.

Da in dieser Arbeit speziell die Steigerung der Prozessdauer infolge einer Komplexitätserhöhung dargestellt werden soll, werden zur Kalkulation bzw. den Vergleichen experimentell ermittelte Zeiten verwendet. Diese bieten gegenüber bestehenden Arbeiten den Vorteil, dass die Wirkweise von Positionswechseln, Sprüngen und unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfasst wird.

- Optional kann der **Abkühlprozess extern** in geschützter Umgebung erfolgen. Es wird dazu nach Formel (19) eine gesonderte Abkühlstation ($K_{MSS-Kühlstation}$) angenommen, in der der Bauauftrag abkühlen kann und welche mit der notwendigen Dauer ($t_{Abkühlenextern}$) multipliziert wird:

$$K_{Abkühlen_extern} = t_{Abkühlenextern} * K_{MSS-Kühlstation} * (1 + Z_{Abk}) \quad (19)$$

Nachbearbeitung

Die Kosten zur Nachbearbeitung des Baujobs entstehen unter anderem durch die Maschinenkosten für die Aupackstation und die Strahlanlage. Für beide Prozesse wird entsprechendes **Fachpersonal** benötigt, das in Abhängigkeit des Automatisierungsgrades entweder durchgängig eingebunden ist oder nur zum Teil. Wie bereits beschrieben, ist dieser Faktor von hoher Bedeutung, da personalbedingt je nach Produktionsstandort erhebliche Kosten entstehen können. Mit Blick auf die Nachbearbeitungskosten betonen (Vanecker et al., 2020, S. 5), dass diese einen beträchtlichen Anteil an den Gesamtkosten verursachen können. Hierbei wird auf die geringe Anzahl genauer Analysen verwiesen, die sämtliche Nachbearbeitungsschritte bis zur Realisierung des Endbauteils enthalten. Nach (Wohlers Associates, 2021, S. 127) wird der Anteil der Nachbearbeitung an den Gesamtkosten mit 23 % für Kunststoffe angegeben. Für die Nachbearbeitung wird im weiteren Verlauf folgendes Kalkulationsschema verwendet:

- Die Kosten für die **Nachbearbeitung** setzen sich zusammen aus dem notwendigen Facharbeiter (K_{Fach}) und dessen Zeit zur Entnahme ($t_{Entnahme}$) des Baujobs aus der Maschine sowie dem Entpacken der Bauteile ($t_{Entpacken}$) aus dem Pulverkuchen und dem Strahlen ($t_{Strahlen}$), welches sich nach der Anzahl an Bauteilen richtet. Die dafür notwendige Peripherie, u.a. Aupackstation, Strahlkabine und Werkbank, wird mittels entsprechendem Zuschlagsfaktor (Z_N) in folgender Formel 20 berücksichtigt.

$$K_{Nacharbeit} = ((t_{Entnahme} + t_{Entpacken}) + (t_{Strahlen}) * n_{Bauteile}) * K_{Fach} * (1 + Z_N) \quad (20)$$

In Summe wird der beschriebene Ressourcenaufwand und die Kostenfaktoren verwendet, um eine Wirtschaftlichkeitsberechnung in **Kapitel 4** zu ermöglichen. In Anlehnung an (Gibson et al., 2015, S. 387) wird für den Vergleich angenommen, dass alle Teile innerhalb des Baujobs von gleicher Gestalt und Größe sind, sodass die Kosten entsprechend zugerechnet werden können.

Die Methode kann hierbei durch Variation der einzelnen Faktoren zum Vergleich verschiedener Prozessketten genutzt werden. Mit Blick auf einen Verfahrenstransfer ist die vorgestellte Vorgehensweise mit entsprechenden Modifikationen auch auf weitere Verfahren anwendbar. Die Vorgehensweise zum Vergleich verschiedener Prozessketten ist in folgender Abbildung 20 in Anlehnung an (Eversheim, 2002, S. 93) dargestellt.

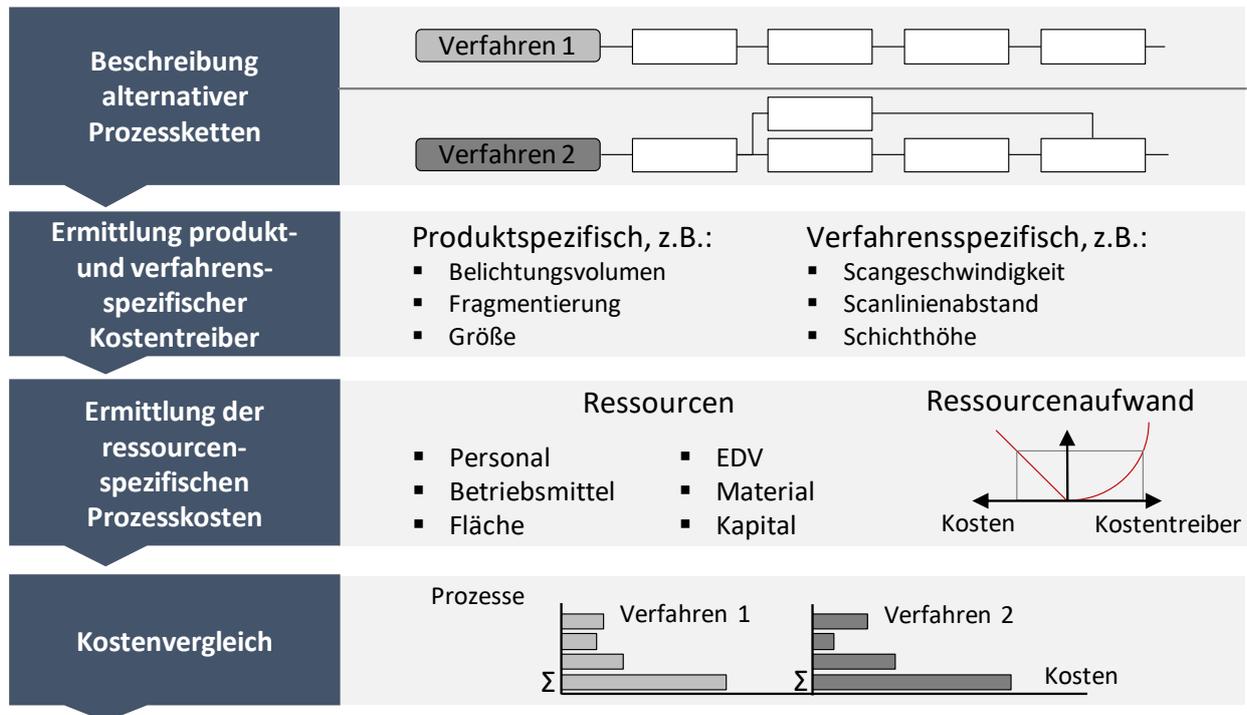


Abbildung 20: Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung für den wirtschaftlichen Verfahrensvergleich in Anlehnung an (Eversheim, 2002, S. 93)

2.5. Komplexität

Zur Thematik der Komplexität erfolgt zunächst in **Kapitel 2.5.1** eine Definition des Begriffs und die Abgrenzung verschiedener Komplexitätsarten zur Verdeutlichung des Untersuchungsraums. Im Hinblick auf Forschungsfrage zwei werden in **Kapitel 2.5.2** vorhandene Methoden zur Quantifizierung, Kategorisierung, Prognose und Kostenermittlung analysiert. Die verwendeten Bauteilattribute werden in **Kapitel 2.5.3** auf ihre Aussagekraft und Verwendungsmöglichkeiten geprüft.

2.5.1. Begriffsdefinition Komplexität

Der Begriff der Komplexität beschreibt laut *Duden* die „*Vielschichtigkeit*“ und „*das Ineinander vieler Merkmale*“ (Dudenredaktion, 2021).

Hierbei ist die Begriffsdefinition an sich bereits vielschichtig und davon abhängig in welcher Wissenschaftsdisziplin inklusive Untergruppe der Begriff definiert wird. Dies resultiert aus den jeweiligen Inhalten und Zielen, die mit dem Begriff verbunden werden, z.B. aus Sicht der Soziologie, Technik, Wirtschaft, Informatik und Organisation. (Bandte, 2007, S. 48–50)

Im technischen Bereich beschäftigen sich Publikationen z.B. mit der Komplexität in Fertigungsprozessen und Montageoperationen (Alkan et al., 2018), (Falck et al., 2012), (Armillotta, 2021). Im Kontext der Additiven Fertigung bezieht sich der Begriff meist auf die verfahrensspezifische konstruktive Freiheit und/oder die Design-Komplexität, um Geometrien zu generieren, die herkömmlich kaum oder nicht herstellbar sind. Im Folgenden werden hierzu die Definitionen verschiedener Autoren analysiert.

Die **Konstruktions-Komplexität** (engl. Design Complexity) beschreibt Bin Maidin (Bin Maidin, 2011, S. 80) als einen der größten Vorteile der Additiven Fertigung und versteht darunter die Fähigkeit, Geometrien beliebiger Komplexität ohne Werkzeuge herzustellen. Die **Gestaltungsfreiheit** wird dabei als eine der wichtigsten Besonderheiten beschrieben, da sie zur Reduktion der Durchlaufzeit und Gesamtfertigungsdauer beiträgt. (Bin Maidin, 2011, S. 80)

In Kombination mit dieser Freiheit wird besonders der Entfall von Werkzeugen/Werkzeugkosten in Verbindung gebracht (Bin Maidin, 2011, S. 82), (Klahn et al., 2018, S. 14), (Poprawe et al., 2015, S. 50), (Gibson et al., 2015, S. 405), (Pradel, Zhu, et al., 2018a, S. 190).

Hierzu wird häufig betont, dass die Gestaltungskomplexität bei Additiven Verfahren im Gegensatz zur konventionellen Fertigung keine Zusatzkosten verursacht (Bin Maidin, 2011, S. 81), (Hopkinson & Dickens, 2003, S. 32), (Hague et al., 2003, S. 26), (Adam, 2015, S. 17). In diesem Zusammenhang wird der Begriff „**Complexity for free**“ durch Klahn definiert als „*Große Gestaltungsfreiheit durch die weitgehende Unabhängigkeit der Fertigungskosten von der Bauteilkomplexität.*“ (Klahn et al., 2018, S. 14).

Gebhard et al. verstehen unter der Bezeichnung **komplexe Geometrien** „*Bauteile, die bei der Anwendung von additiven Fertigungsverfahren direkt und in einem Stück hergestellt werden können, während ihre Produktion mit konventionellen Verfahren mehrstufige Produktionsprozesse oder komplizierte Werkzeuge und eine finale Montage erfordern.*“ (Gebhardt et al., 2019, S. 17). Beispielhaft wird die Anwendung von (dreidimensionalen) konturnahen Kühlkanälen in Werkzeugeinsätzen beschrieben, welche die Produktivität des Werkzeugs verbessern, aufgrund bisheriger Restriktionen aber nicht realisierbar waren (Gebhardt et al., 2019, S. 18).

Conner et al. führen aus, dass sich die **Komplexität** auf die Anzahl der Merkmale bezieht, die ein Teil enthält, sowie auf die Geometrie und Lage dieser Merkmale. Hierbei definieren sie allgemeingültig: Je komplexer ein Teil ist - wenn nicht unmöglich - desto schwieriger ist es mit herkömmlichen subtraktiven oder formgebenden Verfahren herzustellen (Conner et al., 2014, S. 65). Als mögliche **Komplexitäten** werden nach Conner (Conner et al., 2014, S. 67) gelistet:

- Merkmale, wie Hinterschnitte, variable Wände und tiefe Kanäle,
- Geometrien, wie verdrehte und verzerrte Formen, Gitter und topologisch optimierte organische Formen,
- die Teilekonsolidierung und die Konsolidierung von Fertigungsschritten.

Kushnarenko beschreibt die **geometrische Komplexität** als „*das Auftreten und die Häufung geometrischer Konstruktionsmerkmale*“ (Kushnarenko, 2009, S. 47), wobei **geometrische Merkmale** die qualitative und quantitative Form, Gestalt und Abmessung von Bauteilen beschreiben (Kushnarenko, 2009, S. 46–47). Die Größe des Bauteils hat hierbei erst Auswirkungen auf die Bauteilkomplexität, insofern ein Fertigungsverfahren und die entsprechende Anlage ausgewählt wurde (Kushnarenko, 2009, S. 50).

Es ist somit eine Erweiterung zur **technologischen Bauteilkomplexität** notwendig, welche neben Verfahren und Anlage von Faktoren wie werkstoffspezifischen Eigenschaften eines Bauteils, der Stückzahl, sowie Fertigungszeit und Kosten abhängig ist. Es wird die Notwendigkeit einer Trennung zwischen geometrischer- und technologischer Komplexität beschrieben, da die Komplexität nur in Bezug auf eine bestimmte Technologie Gültigkeit besitzt. (Kushnarenko, 2009, S. 50–53)

Kumke definiert den Begriff **Komplexität** in seiner Arbeit als „*Umfang der Möglichkeiten zur Gestaltung eines Bauteils, Produkts oder Systems, z. B. hinsichtlich Größe, Elementanzahl und Elementinteraktionen. Die Komplexität steigt mit der erforderlichen Menge an Informationen, die zur vollständigen Beschreibung eines Bauteils, Produkts oder Systems erforderlich sind (z. B. werden zur Beschreibung einer Freiformfläche mehr Informationen als zur Beschreibung einer Ebene benötigt).*“ (Kumke, 2018, S. 76–77)

Eine systematische Einteilung dieser (konstruktiven) Freiheiten erfolgt durch Gibson et al. (Gibson et al., 2015, S. 404ff) und Kumke (Kumke, 2018, S. 76), wobei unterschieden wird zwischen Materialkomplexität, hierarchischer Komplexität, funktionaler Komplexität und Formkomplexität. Im Folgenden werden diese Begrifflichkeiten voneinander abgegrenzt.

- Die **Formkomplexität (engl.: shape complexity)**, oder **geometrische Komplexität** beschreibt die Möglichkeit zur Herstellung nahezu jeder möglichen Geometrie, die aus den vergleichsweise geringen Limitierungen im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren resultiert (vgl. **Kap 2.2.1**), (Kumke, 2018, S. 77), (Gibson et al., 2015, S. 404), (Rosen, 2007, S. 1). Hierzu zählen unter anderem Freiformflächen, Hinterschnitte, interne Kanäle und bionisch inspirierte Gitterstrukturen. Valentan et al. beschreiben zusätzlich, dass die Komplexität eines Bauteils nicht nur von dessen Form, sondern ebenfalls von dessen Größe abhängt, da sie im Verhältnis zu den beschreibenden Elementen steht (Valentan et al., 2011, S. 4). Beispielhaft steigert sich die Komplexität zur Herstellung eines Bauteils in Miniaturform gegenüber eines solchen in normaler Größe.

In Anlehnung an Kumke (Kumke, 2018, S. 77–79) werden in Abbildung 21 verschiedene Arten der geometrischen Komplexität dargestellt, welche an zwei Bauteilen aus dem Rennsport demonstriert werden. Eine umfassende Übersicht verschiedener Komplexitäten inklusive möglicher Features erfolgt in (Kumke et al., 2018).

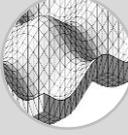
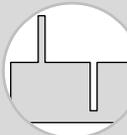
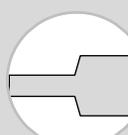
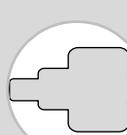
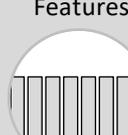
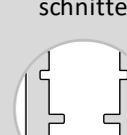
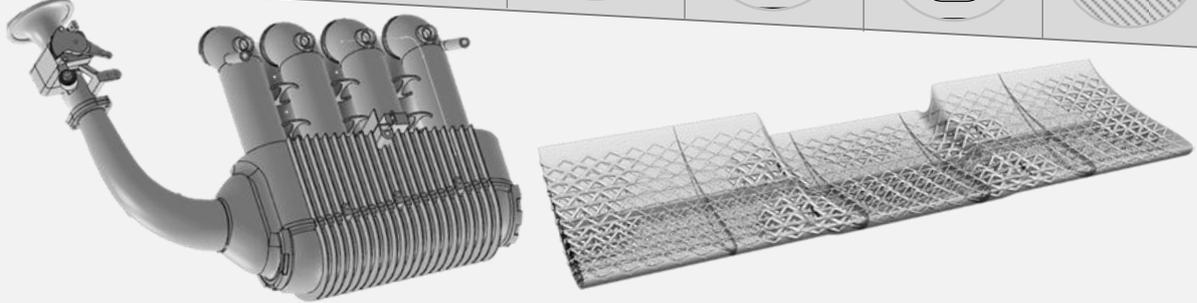
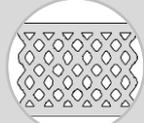
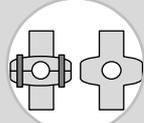
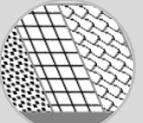
Formkomplexität						
Freiformflächen	Große Aspektverhältnisse	Wandstärken Kombinationen	Große Querschnittsänderungen	Kleiner Abstand zwischen Features	Innenliegende Wände/Rippen & Hinterschnitte	Freiformgeometrien in Hohlräumen/Kanälen
						
						
						
Sandwichbauweise ohne Fügen	Integralbauweise/Bauteilreduktion	Funktionserweiterung	Gitterstrukturen	Oberflächen-texturen	Kleine Wandstärken	
Funktionale Komplexität			Hierarchische Komplexität			

Abbildung 21: Ausgewählte geometrische Freiheiten gegenüber herkömmlichen Verfahren am Beispiel einer Aixbox und eines Spoilers (Bildquelle Spoiler: (Lehmon et al., 2019)) des Saar Racing Teams und des Evolution Racing Teams Saar

- Die **Materialkomplexität** umfasst unter anderem Möglichkeiten zur Bauteilanpassung durch lokale, graduelle oder abrupte Änderung der Bauteileigenschaften während des Fertigungsprozesses (Gibson et al., 2015, S. 409), (Rosen, 2007, S. 1). Hierdurch können funktional gradierte und heterogene Materialien sowie Multi-Materialien realisiert werden, um die Materialzusammensetzung und Eigenschaften entsprechend den Anforderungen zu variieren (Gibson et al., 2015, S. 410). Speziell bei vektorbasierten Verfahren besteht die Möglichkeit der lokalen Veränderung der Werkstoffeigenschaften. Beispielhaft wird dies realisiert, indem ein Bauteil an verschiedenen Punkten mit unterschiedlichen Parametern bearbeitet wird, z.B. mit variabler Intensität (Gibson et al., 2015, S. 408).
- Unter **Hierarchischer Komplexität** werden Möglichkeiten zur Fertigung komplexer Strukturen mit skalierbarer Größe beschrieben, d.h. die Skalierbarkeit von Features und Strukturen auf Nano-, Micro-, Meso- und Makroebene (Gibson et al., 2015, S. 408), (Kumke, 2018, S. 78), (Rosen, 2007, S. 1).

- Die **Funktionale Komplexität / Funktionsintegration** entsteht als Ergebnis aus den vorherigen Komplexitätsarten (Kumke, 2018, S. 78). Diese wird definiert als „*Einbringung zusätzlicher funktioneller Eigenschaften in ein Erzeugnis*“ (Kies, 2018, S. 269).

Hierdurch können nach Kumke (Kumke, 2018, S. 78):

- mehrere Einzelteile zu einem Bauteil zusammengefasst werden,
- relativ zueinander bewegliche Bauteile direkt gefertigt und Fügeschritte eingespart werden,
- zusätzliche Funktionen in einem Bauteil umgesetzt werden, ohne dessen Bauteilanzahl zu erhöhen,
- Komponenten in das Bauteil eingebettet werden.

Als Erweiterung der Gestaltungsfreiheit werden die **Konsolidierung von Bauteilen** sowie die **Integration von Teilen** beim Drucken beschrieben. Diese besitzen das Potenzial Kosten zu reduzieren durch den Entfall von Montagekosten und dem Handling mehrerer Teile sowie der Einsparung von Material und Lagerkosten. (Bin Maidin, 2011, S. 82), (Ituarte et al., 2019), (Hague et al., 2003), (Hopkinson & Dickens, 2003, S. 33), (Pradel, Zhu, et al., 2018a, S. 192)

Eine fertigungsbezogene Ergänzung erfolgt durch El Maraghy und Urbanic (ElMaraghy & Urbanic, 2003). Sie weisen darauf hin, dass die Komplexität variiert durch die Anzahl und Vielfalt der Merkmale, welche hergestellt, montiert und getestet werden müssen (Fera et al., 2018). In Anlehnung an Kushnarenko (Kushnarenko, 2009, S. 48–50) und Valentan et al. (Valentan et al., 2011, S. 4–8) ist die Komplexität technologie- bzw. verfahrensabhängig, sodass der damit einhergehende Bezug stets hergestellt werden sollte, um den Begriff zielgerichtet einsetzen zu können.

Wie in **Kapitel 2.2.2** erörtert wurde, reagieren die verfahrensspezifischen Prozessanteile des Herstellprozesses unterschiedlich auf die Bauteilgeometrie, sodass eine allgemein formulierte Komplexität und Gestaltungsfreiheit für Additive Fertigungsverfahren nicht zielführend ist. Eine Bewertung des geometrischen Einflusses muss entsprechend für die gewählte Verfahrens-/Material-Konfiguration vorgenommen werden.

Definition des Komplexitätsbegriffs in dieser Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit und angelehnt an Kumke (Kumke, 2018) sowie El Maraghy und Urbanic (ElMaraghy & Urbanic, 2003) bezieht sich der Begriff Komplexität auf die Bereiche der geometrischen Komplexität/Formkomplexität und wird für diese Arbeit wie folgt definiert:

*„**Geometrische Komplexität** oder **Formkomplexität** wird definiert durch die Anzahl, Gestalt und Häufigkeit von Elementen, die zur Beschreibung eines Bauteils notwendig sind und mit dem Herstellprozess Additiver Fertigungsverfahren in direkter Wechselwirkung stehen. Geometrische Elemente werden hierbei definiert als ein Punkt, eine Linie, eine Fläche oder ein Volumen. Die Einflusshöhe auf den Herstellprozess einschließlich Produktivität und Qualität ist in Form verfahrensspezifischer Kennzahlen festzustellen.“*

Die Definition geometrischer Elemente erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 17450-1:2012-04 (DIN EN ISO 17450-1, 2012) sowie DIN EN ISO 22432 (DIN EN ISO 22432, 2012). Sie können analytisch und parametrisch beschrieben werden und umfassen Basiselemente wie Linie, Kugel, Zylinder, Kegel, Quader und Torus (Gröger, 2013, S. 35), (Kushnarenko, 2009, S. 46–48). Beispielhaft wird in Abbildung 22 unter Beibehaltung der Querschnittsfläche die Komplexität zweier Geometrieformen durch Fragmentierung gesteigert, wodurch Auswirkungen auf die Datenvorbereitung, den Generierprozess sowie die Nachbearbeitung entstehen.

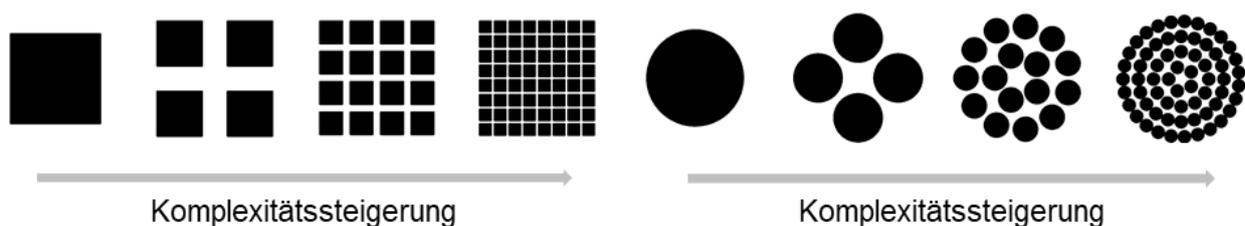


Abbildung 22: Komplexitätssteigerung durch Fragmentierung von Flächen (Eigene Darstellung)

2.5.2. Methoden zur Evaluierung der Komplexität

Als Erweiterung der Definitionen zur geometrischen Komplexität werden im Folgenden die verschiedenen Methoden und Ansätze erörtert, die zum Evaluieren, Quantifizieren und Kategorisieren der Komplexität bestehen. Aufgrund der jeweiligen Ziele werden unterschiedliche Herangehensweisen verfolgt, die im Folgenden auszugsweise beschrieben werden.

Im Hinblick auf **Fragestellung 2**²¹ werden überwiegend Publikationen behandelt, die eine Quantifizierung der Komplexität beabsichtigen und diese zur Kategorisierung nutzen. Um einen Vergleich der Komplexität verschiedener Geometrien zu realisieren, können entsprechende Merkmale/Daten aus 3D-CAD-Modellen und/oder STL-Dateien sowie 2D-Schichtinformationen extrahiert werden. Hierzu zählen beispielhaft das Volumen und die Fläche eines Körpers. Da diese Informationen isoliert betrachtet wenig Aussagekraft besitzen, z.B. aufgrund unterschiedlicher Bauteildimensionen, werden sie oftmals in Form von Verhältniszahlen/Kennzahlen beschrieben. Im Folgenden werden hierzu verschiedene Methoden beschrieben, die aufgrund der verwendeten Merkmale in zweidimensionale und dreidimensionale Ansätze geteilt werden.

2.5.2.1. Bewertung der Komplexität anhand von 3D-Bauteilmerkmalen

Valentan et al. vergleichen die Komplexität unterschiedlicher Bauteile auf Basis von STL-Daten, respektive durch Verhältniszahlen der Merkmale Volumen, Oberfläche, Anzahl von Dreiecken sowie des minimalen Blockvolumens²². In Abbildung 23 wird exemplarisch das Volumen eines Bauteils zu dessen Bounding Box sowie die Anzahl der Dreiecke in zwei Varianten dargestellt.

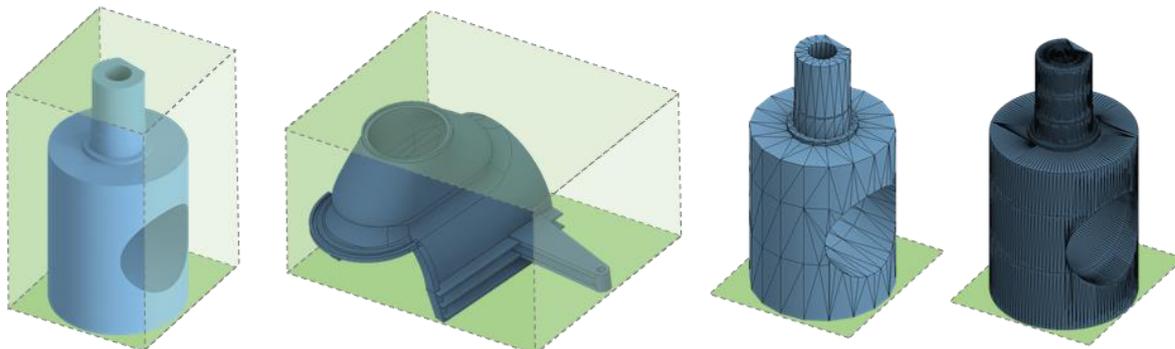


Abbildung 23: (1-2) Bauteilvolumen zu Bounding Box Volumen, (3-4) Anzahl der Dreiecke (Eigene Darstellung)

Als Indikatoren für komplexe Bauteile werden die Anzahl von Dreiecken als Einzelwert benannt, sowie das Verhältnis des Volumens zur Anzahl der Dreiecke. In Summe ermöglicht dieser Ansatz eine einfache Bewertung, jedoch werden signifikante Fehler für komplexe dünnwandige Bauteile beschrieben. Des Weiteren ist dieser Ansatz nicht in der Lage die Konvexität und Konkavität von Teilen zu bestimmen, was für eine klassische Bearbeitung von Relevanz sein kann. (Valentan et al., 2006, S. 294–296), (Valentan et al., 2008, S. 76–79).

²¹ Fragestellung 2: „Wie kann der Einfluss der geometrischen Komplexität quantifiziert und kategorisiert werden, um Vergleichs- und Bewertungsmöglichkeiten zu schaffen und welche Bauteilmerkmale müssen dafür vorhanden sein?“

²² Das minimale Blockvolumen, welches auch als Bounding Box bezeichnet wird, gibt die minimalen Maße eines Quaders an, der das Bauteil aufnehmen kann (Klahn et al., 2018, S. 65), (Zhang et al., 2014, S. 147).

Darauf aufbauend entwickeln Valentan et al. einen Verfahrensvergleich, um AM-Verfahren mit und ohne Stützstrukturen mit den konventionellen Verfahren Drehen und Fräsen zu vergleichen. Zu den bestehenden Merkmalen wird die Bauteilgröße als Kriterium hinzugefügt. Hierzu wird beschrieben, dass eine Verringerung der Bauteilgröße die Komplexität erhöht. (Valentan et al., 2011, S. 4–5)

Zusätzlich wird im Hinblick auf die Nachbearbeitung hervorgehoben, dass es notwendig ist für jede Technologie, den jeweiligen Einfluss der Komplexität auf die benötigte Dauer zu ermitteln. Als Grundlage zur Ermittlung dieser Auswirkungen wird beschrieben, dass einige Bauteile zu fertigen sind, um die benötigte Zeit zu messen. Aus den Messwerten wird das Verhältnis aus Komplexität zur benötigten Dauer als Durchschnittswert ausgegeben, der für Folgeaufträge genutzt werden kann. Es wird darauf verwiesen, dass dieser Ansatz aufgrund der manuellen Tätigkeiten nicht exakt ist, aber eine ungefähre Abschätzung ermöglicht. Dieses Vorgehen ist laut Valentan et al. für alle Verfahren geeignet, die eine händische Entfernung von Supportstrukturen erfordern, wie beispielsweise SLS, SLA, PJ, SLM, EBM. (Valentan et al., 2011, S. 4)

Pradel et al. (Pradel et al., 2017, S. 3) nutzen in ihrer Methode ebenfalls Informationen aus dem STL-Format. Für das FDM-Verfahren wird ein Komplexitätsindex aus dem Verhältnis der Bauteiloberfläche zum Volumen der umgebenden Bounding Box definiert. Für den Vergleich variieren die Geometrie, Bauteilhöhe und Wandstärke, sodass insgesamt 16 verschiedene Bauteile entstehen. Als Resultat wird darauf hingewiesen, dass die Formkomplexität die Produktionszeit sowie den Materialverbrauch direkt beeinflusst. Problematisch ist hierbei allerdings die Beschreibung der Komplexität anhand von zwei Merkmalen sowie die gleichzeitige Veränderung diverser Parameter. Unter anderem wird mit der Oberfläche auch das Volumen variiert, was zwangsläufig zu einer Erhöhung des Materialverbrauchs und der Fertigungsdauer führt.

Aufbauend auf der Arbeit von Pradel et. al nutzen George und Chowdary (George & Chowdary, 2020) die Design-Komplexität als Leistungsindikator für das Verfahren der Material-Extrusion. Hierzu werden die Beziehungen zwischen Konstruktionsmerkmalen und den Auswirkungen auf die Konstruktionskomplexität, Bauzeit und Maßhaltigkeit untersucht.

In einer weiteren Arbeit von Pradel et al. (Pradel, Bibb, et al., 2018, S. 1) werden die Verfahren Fused Deposition Modeling und Material Jetting miteinander verglichen. Hierzu wird der Einfluss der Oberfläche, Bauteilgröße und die Vergrößerung des Umfangs untersucht.

Als Versuchsproben wurden zwei Quader mit Ausschnitt verwendet, die jeweils in zwei Größen sowie zwei Wandstärken ausgeführt wurden. Zusätzlich wird der Umfang der Proben um 15 % vergrößert, indem eine zackenförmige Kontur verwendet wird. Durch Extrusion der Geometrien (5 mm Höhe) wurden insgesamt acht Versuchsproben generiert. Diese werden durch die beiden Verfahren jeweils dreifach gefertigt, um die Auswirkungen der Bauteilattribute auf die resultierende Fertigungsdauer mittels linearer Regression darzustellen. Für das FDM-Verfahren konnte folglich gezeigt werden, dass die Bauteilgröße mit 57,9 %, die Oberfläche mit 24,4 % sowie der Umfang mit 4,4 % für die Fertigungsdauer verantwortlich ist. Für das Material Jetting, welches zeilenbasiert arbeitet, wurde festgestellt, dass die Dauer zu 100 % von der Größe abhängt. (Pradel, Bibb, et al., 2018, S. 8–9)

Zu berücksichtigen ist wiederum, dass der Umfang der Proben lediglich um 15 % gesteigert wurde, wohingegen die Größe verdoppelt und die Fläche um 80 % gesteigert wurde. Zusätzlich sind für die Regressionsanalyse lediglich acht Werte vorhanden, wenn die Mehrfachfertigung ausgeblendet wird.

Wie bereits in der Motivation (siehe Kapitel 1.1) beschrieben wurde, beschäftigen sich eine Vielzahl von Forschungsarbeiten mit dem Vergleich der Wirtschaftlichkeit von additiven gegenüber konventionellen Verfahren. Grundlage für eine Vielzahl von Publikationen bildet hierbei die Arbeit von Joshi und Ravi (Joshi & Ravi, 2010), welche die Bauteilkomplexität anhand von bestehenden Daten aus dem Bereich der Fertigung von Werkzeugen und Kernen für die Gussfertigung ableiten. Hierzu bilden Sie unter anderem aus Merkmalen wie Volumen und Oberfläche verschiedene Kennwerte. Diese werden mit verfahrensspezifischen Attributen, wie der Anzahl von Kernen sowie deren Volumen, Wandstärke und Eindringtiefe ergänzt. Als Zielgröße wird ein Komplexitätsfaktor definiert, der daraus entsteht, dass die Kosten des zu fertigenden Werkzeugs abzüglich der Kosten zum Fertigen des gleichen Volumens als Block ins Verhältnis zu den Kosten zum Fertigen des Volumens als Block gesetzt werden. Demnach ist das Bauteil umso komplexer, je höher die Kosten ausfallen. Anhand von 40 Bauteilen, inklusive geometrischer Attribute und Komplexitätsfaktoren, wird eine Regressionsanalyse durchgeführt. Die daraus abgeleitete Regressionsgleichung beschreibt modellhaft die Zusammenhänge aus geometrischen Attributen und dem Fertigungsaufwand. Hierdurch können Bauteile einerseits kategorisiert und der Fertigungsaufwand weiterer Bauteile im Vorfeld abgeschätzt werden. (Joshi & Ravi, 2010, S. 686–688)

Einige Autoren haben dieses Modell genutzt, um darauf aufbauend Methoden zur Evaluierung der Komplexität zu entwickeln (Almaghariz et al., 2016), (Conner et al., 2014), (Gullapalli, 2016), (Greco et al., 2023). Almaghariz et al. (Almaghariz et al., 2016) vergleichen das Verfahren des 3D-Sandprinting für Gusskerne mit herkömmlichen Verfahren hinsichtlich deren Wirtschaftlichkeit (Stückzahl vs. Komplexität), um den Break-Even Point zu ermitteln, bzw. zu ermitteln, ab welcher Komplexität der 3D-Druck das wirtschaftlichere Verfahren ist.

Ebenfalls darauf aufbauend entwickelten Conner et al. (Conner et al., 2014, S. 70) eine Methode zur Unterstützung bei der Auswahl von AM-Anwendungen auf Basis der Faktoren Komplexität, Stückzahl und Individualisierung. Zur Ermittlung der Komplexität wird eine modifizierte Variante des Ansatzes von Joshi und Ravi verwendet: Gusspezifische Kennzahlen, wie Anzahl und Volumen der Kernelemente, werden in einen Faktor umgewandelt, welcher die Anzahl der Löcher aufnimmt und somit verfahrensneutraler ist. Die verwendeten Merkmale umfassen die Oberfläche, das Bauteilvolumen, die Anzahl von Dreiecken, die Anzahl an Löchern und das Blockvolumen/Volumen der Bounding Box. Es wird darauf hingewiesen, dass die Anzahl an Dreiecken als Gradmesser der Komplexität begrenzt ist, da diese durch die vorgelagerte Software sowie den Nutzer variiert werden kann.

Gullapalli (Gullapalli, 2016, S. 23–36) nutzt den Ansatz zur Bestimmung der Komplexität zur Untersuchung des Einsatzes von 3D-Sanddrucksystemen sowie FDM-Systemen für verschiedene Phasen des Sandgussprozesses. Die Bauteile umfassen Muster, Kerne und Formen. Probleme beim Transfer auf weitere Fertigungsverfahren ergeben sich teils durch spezifische Merkmale, wie die Anzahl- und das Volumen der Kerne. Darüber hinaus ist die Komplexität nur dahingehend relevant, wenn sie zu hohe Kosten bei herkömmlichen Verfahren verursacht nicht aber im Vergleich mit Additiven Verfahren.

Greco (Greco et al., 2023) erstellen auf Basis der Methoden von Joshi und Ravi (Joshi & Ravi, 2010) sowie Valentan et al. (Valentan et al., 2008, S. 76–79) eine Kennzahl zur Bestimmung der geometrischen Komplexität. Durch einen Vergleich mit Expertenmeinungen wird eine Regressionsgleichung erstellt, die eine Vorhersage für künftige Bauteile ermöglichen soll. Probleme können hierbei entstehen, da die Zielgröße auf der subjektiven Wahrnehmung und Erfahrung der Experten beruht.

In einer weiteren Methode stellen Merkt et al. (Merkt et al., 2012) einen Vergleich zwischen dem additiven Verfahren SLM und den konventionellen Verfahren Fräsen und Gießen auf, um die Technologieauswahl zu unterstützen. Hierzu werden aus STL-Merkmalen verschiedene Kennzahlen gebildet, anhand derer die Formkomplexität von Bauteilen verglichen werden kann. Diese werden gebildet aus dem Verhältnis aus Bauteilvolumen zur Anzahl von Dreiecken, Bauteilvolumen zu Oberfläche sowie Bauteilvolumen zu Bounding Box-Volumen. Daraus abgeleitete Referenzbereiche sollen dem Anwender als Hilfestellung dienen, um anhand der Geometriekomplexität die Eignung für das entsprechende Fertigungsverfahren zu bestimmen.

Es entstehen hieraus einige Herausforderungen, die es zu beachten gilt: Einerseits ist die Anzahl der Dreiecke abhängig von der gewählten STL-Auflösung, sodass der Vergleich nur auf Basis von gleichen Einstellungen sinnvoll ist. Zudem bildet die Bounding Box in Abhängigkeit der vorliegenden Geometrie hohes Fehlerpotenzial, wie dargestellt wurde durch Valentan et al. (Valentan et al., 2008). Folglich ist ein Vergleich vornehmlich für Bauteile mit ähnlicher Geometrie anwendbar.

Zhang et al. (Zhang et al., 2014, S. 147) stellen für die Bewertung der Bauteilgestaltung eine Vielzahl von Indizes vor, die unterschiedliche Aspekte, wie die Orientierung und Fertigbarkeit im AM-Prozess bewerten. Der verwendete Geometrie-Indikator soll dabei wiedergeben, in welchem Umfang die Design-Vorteile des AM genutzt werden. Zur Berechnung wird das Volumen der Bounding Box im Verhältnis zum Volumen des Bauteils gesetzt. Es wird darauf Bezug genommen, dass dieses Verhältnis bereits durch Ruffo et al. (Ruffo et al., 2006b) zur Beschreibung der Komplexität verwendet wurde.

Ein weiter Ansatz erfolgt durch Harthogh und Vietor (Hartogh & Vietor, 2018, S. 75–86), die eine Komplexitätszahl durch die Umfangslinie sowie den Flächeninhalt eines Bauteils definieren. Durch den Vergleich der Bauteilaußenkontur mit der eines Kreises wird auf den verfahrensbedingten Aufwand geschlossen. Dies wird daraus abgeleitet, dass zur Bearbeitung eines Kreises mit minimaler Umfangslänge ein Maximum an Fläche eingeschlossen wird, d.h. die Länge der Bearbeitungspfade wird minimal. Eine Erhöhung des Bearbeitungsaufwandes resultiert folglich, insofern bei gleicher Bauteilfläche die Länge der Außenkontur ansteigt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Probleme durch die Simplifizierung von Umfang und Flächen entstehen, da keine Unterschiede durch Bauteilausrichtung und -drehung aufgenommen werden. Die Methode deckt das FFF-Verfahren ab und berücksichtigt den Bauprozess; ein Transfer auf weitere Verfahren wird in Aussicht gestellt (Hartogh & Vietor, 2018, S. 86).

In der Methode von Kushnarenko (Kushnarenko, 2009, S. 47) werden verschiedene Bewertungskriterien, wie die Größe der CAD-Datei, die Anzahl von Booleschen Operationen beim Konstruieren sowie die Anzahl von Merkmalen dargestellt. Als Verhältnisse werden das Volumen der Bounding Box zum Gewicht oder zu der Anzahl an Freiformflächen benannt. Die Bauteilkomplexität wird zunächst nach der Formel von Schoop berechnet, wobei beschrieben wird, dass diese sich nicht für eine digitalisierte oder mathematisch beschriebene 3D-Geometrie eignet, oder eine Export Datei wie das STL-Format (Kushnarenko, 2009, S. 48). Es wird auf entsprechende Probleme hingewiesen, die bei reiner Betrachtung geometrischer Merkmale ohne Bezug zur einzusetzenden Fertigungstechnologie entstehen. Resultierend wird eine Vorgehensweise zur Bestimmung der technologischen Bauteilkomplexität beschrieben, die als Summe von drei Faktoren entsteht (Kushnarenko, 2009, S. 53):

- (G_{kg}) - Auswahl einer Strategie zur Bewertung der geometrischen Bauteilkomplexität ausgehend vom Geometrieformat.
- (G_{kv}) und (G_{ka}) - Bewertung der technologischen Bauteilkomplexität ausgehend von den Verfahrensbeschränkungen sowie den Anlagebeschränkungen.

Abschließend wird die Summe der Faktoren mit einem Korrekturfaktor (K_f) zur Entscheidung relevanter Kriterien, wie der Stückzahl, multipliziert.

2.5.2.2. Bewertung der Komplexität auf Grundlage von 2D-Schichten

Bezugnehmend auf die Problemstellungen bei den Ansätzen, die auf der Arbeit von Joshi und Ravi aufbauen, folgen weitere Arbeiten. Martof et al. (Martof et al., 2018, S. 120) erstellen hierzu einen neuen Ansatz auf Basis von Python-Analysefunktionen. Diese dienen zur Detektion von Konturen sowie zur Berechnung der Umfangslänge, Fläche und Identifikation von Konkavitäts- und Konvexitätsmerkmalen. Als Komplexitätsbeispiele werden ein Kreis als einfachste Geometrie sowie ein Stern mit gleicher Fläche aber größerem Umfang als komplexe Geometrie beschrieben. Diese basieren auf der Arbeit von Watson (Watson, 2012), welcher die Komplexität des Umfangs von binären Digitalbildern untersucht hat. Als Erweiterung des Ansatzes erfolgt zusätzlich die Einteilung in äußere und innere Komplexität. Für die Anwendung im Bereich der Gussverfahren kann hierdurch entschieden werden, ob das Bauteil konventionell, additiv oder hybrid zu fertigen ist, z.B. zum 3D-Druck der inneren Geometrie. Grenzen dieser Unterscheidung entstehen z.B. bei Gitterstrukturen (Abbildung 24 – Bild 3), da der interne Umfang einen Wert von 0 annimmt.

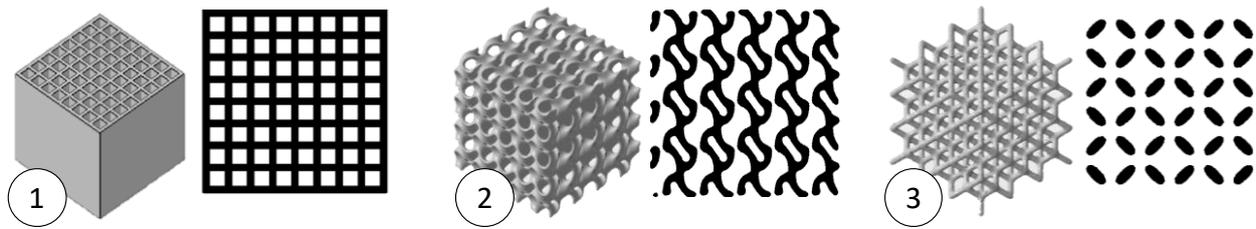


Abbildung 24: Ausgewählte Bauteilschichten verschiedener Strukturen (Eigene Darstellung)

Im Gegensatz zu den Arbeiten von Joshi und Ravi, Almaghariz et al., Conner et al. und Gullapalli, erfordert dieser Ansatz kein verfahrensspezifisches Wissen zu Kernen und anderen Merkmalen, erreicht aber ähnliche Ergebnisse. Darüber hinaus wird eine mögliche Erweiterung im dreidimensionalen Raum durch die Arbeit von Walker et al. (Walker et al., 2017) in Aussicht gestellt (Martof et al., 2018, S. 132).

Ein weiterer Ansatz erfolgt durch Garashchenko (Garashchenko, 2018), welcher die geometrische Komplexität von Konturen anhand von Schichtdaten additiver Verfahren bestimmt. Die Konturlänge wird zunächst unter Zuhilfenahme der Zellmethode bestimmt. Hierbei wird die Kontur angenähert durch Zellen mit definierter Größe und entsprechender Anzahl. Resultierend wird die fraktale Dimension der Kontur gebildet, welche Auskunft über den Füllgrad der Ebene durch die Kontur angibt. Die Methode wird hierbei ohne Berücksichtigung eines Verfahrens angewendet, sodass die Kennzahl keine Aussage zu den resultierenden Effekten besitzt.

Psarra und Grajewski (Psarra & Grajewski, 2001) entwickelten in ihrer Methode einen Index zur Messung der Komplexität von Gebäudegrundrissen. Hierbei wird der Grad der Konvexität des Umfangs als Index für die Komplexität einer Form beschrieben: Dieser gibt einen Prozentsatz der Orte an, die miteinander verbunden sind, ohne eine Grenze zu überschreiten oder außerhalb des Bereichs der Form zu liegen. Er wird definiert als mittlerer Konnektivitätswert (MCV).

Auf diesem MCV-Index aufbauend untersucht Baumers (Baumers, 2012) in seiner Abhandlung den Einfluss der Formkomplexität auf den Energieverbrauch des additiven Fertigungssystems am Beispiel des Electron Beam Melting (EBM) Verfahrens. Hierbei werden die Korrelationen zwischen der Energieaufnahme und drei Parametern der Formkomplexität berechnet:

- die Fläche des maximalen Querschnitts,
- der Umfang des maximalen Querschnitts,
- der mittlere Konnektivitätswert (MCV).

Die Ergebnisse zeigen eine starke Korrelation des Energieverbrauchs mit der Querschnittsfläche, eine mäßige mit dem Umfang und eine schwache mit dem MCV-Index, was darauf hinweist, dass die Komplexität keinen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch hat (Baumers, 2012). Zu berücksichtigen ist, dass lediglich Schichtinformationen eines einzigen Probekörpers mit variierendem Querschnitt zur Bewertung genutzt wurden und zudem nur ein einziges Verfahren untersucht wird (Baumers, 2012, S. 88–89). Zudem werden für das Bauteil weniger als 30 Schichten erzeugt; hierbei steigt der gemessene Komplexitätswert zwar an, gleichzeitig wird aber die Größe der Fläche variiert und eine deutliche Abnahme des Umfangs dokumentiert (Baumers, 2012, S. 132–133). Eine Aussage über die Komplexität wäre in diesem Fall nur sinnvoll, wenn die zu generierende Fläche, bzw. das Volumen gleich groß ist und der Umfang, bzw. die Geometrie der Schicht variiert. Festzuhalten ist zusätzlich, dass unterbrochene Werkzeugpfade und die Datenqualität nicht betrachtet werden. Im Vergleich eines simplen mit einem komplexen Bauteil ergeben sich jedoch durch die zuvor beschriebenen Prozesseinflüsse deutliche Unterschiede in der Laufzeit der Generiermaschine und folglich auch auf die Energieaufnahme. Zudem wird die beschriebene Benchmark-Geometrie als Gradmesser für die Komplexität verschiedener Verfahren dargestellt. Jedoch wird trotz Verfügbarkeit der Verfahren SLS und DMLS die Versuchsreihe zur Überprüfung der Komplexität nur anhand des EBM-Verfahrens getestet.

In einer vorherigen Arbeit von 2011 wurde durch Baumers et al. (Baumers et al., 2011) der geometrische Anteil am Stromverbrauch des SLS-Verfahrens untersucht. Es wurde ein geometriebedingter Anteil für zwei verschiedenen SLS-Anlagen zwischen 4,48 und 5,43 % für den untersuchten Baujob angegeben. Dieser umfasste zwei Prothesen, welche eine Packdichte von 4, respektive 4,4 % aufweisen. Der geometrische Anteil wurde anhand von drei ausgewählten Schichten innerhalb des Baujobs ermittelt. Hier ist wiederum in Frage zu stellen, welche Aussagekraft drei Schichten besitzen, wenn das untersuchte Bauteil über die Bauhöhe häufige Querschnittsänderungen aufweist. Darüber hinaus sind für die Serienproduktion mit mittleren 10 % Packdichte höhere Anteile zu erwarten.

Die Methode von Fera et al. (Fera et al., 2018, S. 675) soll als Unterstützung zur Technologieauswahl beitragen, indem die Bauteilkomplexität statt des Produktionsvolumens als Entscheidungstreiber verwendet wird. Es wird eine Methode zur Messung der Komplexität entwickelt, die auf den Arbeiten von Psarra und Grajewski (Psarra & Grajewski, 2001), Urbanic und Hedrick (Urbanic & Hedrick, 2016) und Zhouhui Lian et al. (Zhouhui Lian et al., 2012) basiert.

Die Formkomplexität wird dabei berechnet durch das Verhältnis aus Bauteilvolumen und konvexem Hüllvolumen. Als Hypothese für das Modell wird angenommen:

- Die Zuordnung von Bauteilen zu einem Baujob ist zufällig.
- Die Produktionskosten werden nicht durch die unterschiedlichen Höhen der Teile in einem Baujob beeinflusst.
- Die Haupteinflussfaktoren auf die Produktionskosten additiver Verfahren sind das Bauteilvolumen sowie die Volumenaufbaurrate.

Mit diesen Annahmen wird im SLM-Verfahren ein Baujob mit 40 unterschiedlichen Bauteilen hergestellt. Als Ergebnis werden Kosten für AM-Verfahren gegenüber der Komplexität abgebildet, wobei eine horizontale Linie entsteht, d.h. die Komplexität hat keinerlei Einfluss. Problematisch ist wiederum, dass nur ein einziger Baujob erstellt wird und alle Bauteile gleichzeitig gefertigt werden. Entsprechend ist eine Separierung der benötigten Dauer schwer möglich. Auswirkungen einer Bauteilrotation auf die resultierende Komplexität werden aufgrund des angenommenen konvexen Hüllvolumens ebenfalls nicht berücksichtigt. Des Weiteren ist die Bauhöhe einer der Hauptkostentreiber und wird als nicht wichtig angenommen. Zudem wird kein Bezug hergestellt zu dem gefertigten Material oder den verwendeten Parametern. Dies ist von Interesse, insofern eine materialabhängige Wartezeit nach dem Belichten benötigt wird, sodass die Dauer pro Schicht „verwässert“ wird.

Ben Amor et al. verwenden in ihrer Arbeit einen Ansatz zur Kostenminimierung durch Optimierung der Faktoren geometrische Komplexität, Bauteilorientierung und Wärmeschrumpfung (Ben Amor, Zongo, et al., 2022). Für die Komplexität werden aus den Schichtdaten graphische SVG-Daten (Scalable Vector Graphics) abgeleitet, um daraus fünf Bewertungsfaktoren zu bilden. Diese umfassen den Unterschied zwischen (1) den Oberflächen zweier aufeinanderfolgender Schichten und (2) dem Schwerpunkt der Schichten. Weiterhin werden für jede Schicht (3) die Anzahl der Hohlräume, (4) das Verhältnis der Schichtfläche zu der Oberfläche einer Kugel mit gleichem Volumen und (5) die Anzahl unabhängiger Oberflächen und Hohlräume erfasst (Ben Amor, Tahan, et al., 2019), (Ben Amor, Abdellaoui, et al., 2019), (Ben Amor, Tahan, et al., 2019), (Ben Amor, Tahan, et al., 2022a), (Ben Amor, Tahan, et al., 2022b).

Aus den beschriebenen Methoden werden in folgender Tabelle 7 die zur Thematik angrenzenden Methoden sowie deren Eignung für die Bearbeitung des Themas dargestellt. Die Methoden werden begrenzt auf solche, die eine Quantifizierung der Komplexität auf Basis von 3D- und 2D Daten ermöglichen und ohne das Vorhandensein spezifischer Algorithmen nachvollziehbar sind.

Zur Analyse der jeweiligen Inhalte werden die Methoden in fünf Kriterienbereiche eingeteilt, um die Eignung zur Anwendung auf das SLS zu prüfen:

1. **Einsatzzweck** - Welches Ziel wird mit der Methode verfolgt und wird hierzu eine entsprechende Komplexitätskennzahl kalkuliert?
2. **Prozesseinflüsse**
 - Welche Daten werden zur Analyse verwendet und werden Wechselwirkungen zwischen der Bauteilgeometrie und dem Fertigungsprozess betrachtet?
 - Werden materialabhängige Änderungen der Fertigungsparameter wie die Bearbeitungsgeschwindigkeit erfasst?
 - Werden baujobspezifische Einflüsse wie die Rotation von Bauteilen und deren Auswirkung auf die zu generierende 2D-Schicht erfasst?
3. **Verwendete Verfahren und Bestandteile des Herstellprozesses** - Welche Verfahren, inkl. Bearbeitungsarten werden untersucht und werden weitere Bestandteile als der Generierprozess betrachtet?
4. **Ressourcen** - Welche Ressourcen werden innerhalb der Methode erfasst?
5. **Prüfkörper** - Werden entsprechende Prüfkörper zur Kalkulation der Komplexität verwendet und eignen sich diese aufgrund ihrer Systematik zur Verwendung im SLS?

Die Analyse der beschriebenen Methoden liefert hierbei folgende Erkenntnisse:

Es bestehen vielfältige Ansätze, die eine Bewertung der Komplexität zum Bauteilvergleich, der Quantifizierung mittels Kennzahlen und zur Bauzeitabschätzung nutzen. Verfahrensunabhängige Methoden bieten durch quantifizierte Vergleichswerte und/oder Expertenmeinungen eine initiale Abschätzung der Komplexität. Die Aussagekraft dieser Methoden ist jedoch beschränkt durch den fehlenden Verfahrensbezug, inkl. entsprechender Auswirkungen auf die Fertigungsdauer und Kosten. Explizite Methoden, die eine hinreichende Lösung für das SLS bieten, sind bisher nicht vorhanden. Verfahrensspezifische Methoden, die vielfältig auf den 3D-Druck (3DP) ausgelegt wurden, sind aufgrund der zeilenbasierten Bearbeitungsart nur bedingt auf das vektorbasierte SLS übertragbar, da die spezifischen Prozesseinflüsse nicht erfasst werden. Unter anderem basieren die dabei verwendeten Kennzahlen auf 3D-Daten, die keine Aussage über die resultierenden Werkzeugpfade beim SLS zulassen. Methoden, die auf das FFF-Verfahren ausgelegt wurden sind dazu besser geeignet, da die Bearbeitungsart auf ähnliche Weise beeinflusst wird.

Entsprechend bieten die erläuterten 2D-Attribute und Kennzahlen Ansätze, die auf ihre Übertragbarkeit geprüft werden. Resultierende Wechselwirkungen zwischen Bauteilattributen und der Fertigung werden vielfach thematisiert, sind jedoch aufgrund der Bearbeitungsart wiederum nur begrenzt übertragbar. Umfangreiche Beschreibungen zum SLS Verfahren erfolgen hierbei durch Ruffo et al. (Ruffo et al., 2006a). Unberücksichtigt bleiben jedoch methodenübergreifend SLS-spezifische Prozesseinflüsse durch Änderungen des Materials, inkl. notwendiger Bearbeitungsparameter. Die Rotation von Bauteilen wird ebenfalls nur von einer geringen Anzahl an Arbeiten erfasst und setzt die Betrachtung von 2D-Schichten voraus. Teilaspekte der verwendeten Methoden werden im Folgenden auf ihre Aussagekraft geprüft.

Tabelle 7: Vergleich der Methoden zur Bewertung der Komplexität

Legende:	1			2			3			4	5		
	Bauteilvergleich-/ Kategorisierung	Kalkulation Komplexitäts-kennwert(e)	Bauzeit Abschätzung	2D/3D-Analyse	Wechselwirk.: Bauteilattribute/Fertigung	Materialabhängige Parameter	Einfluss der Bauteildrehung (XYZ-Achse)	Verfahren: (1) SLS, (2) FFF, (3) MJM, (4) 3DP, (5) SLM, (6) EBM, (7) Casting, (8) Fräsen, (9) Drehen (10) Zerspanen	Bearbeitungsart: Vektor, Linie, Fläche	Pre-Processing	Nachbearbeitung AM	Ressourcen (Zeit, Kosten)	Prüfkörper
Behandelt = ✓ z. T. behandelt = (●) nicht behandelt = -													
Inhalte sind: Übertragbar teilweise übertragbar nicht übertragbar													
(Ruffo et al., 2006a)	-	●	✓	3D	✓	-	-	1	V	●	●	Z	✓
(Valentan et al., 2008)	✓	✓	-	3D	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
(Valentan et al., 2011)	✓	●	-	3D	●	-	● XY	1, 8, 9	V	●	✓	-	✓
(Merkt et al., 2012)	✓	-	-	3D	-	-	-	5, 7, 10	V	-	-	-	✓
(Baumers, 2012)	-	-	✓	2D	-	-	-	6, (5), (1)	V	●	-	Z,K	✓
(Conner et al., 2014)	✓	✓	-	3D	✓	-	-	4, 7	L	-	-	K	✓
(Almaghariz et al., 2016)	✓	✓	-	3D	✓	-	-	4, 7	L	-	-	K	✓
(Gullapalli, 2016)	✓	✓	-	3D	✓	-	-	4, 2, 7	V,L	-	-	K	✓
(Pradel et al., 2017)	●	✓	-	3D	✓	-	-	2	V	-	-	Z	✓
(Fera et al., 2018)	✓	✓	-	3D	●	-	-	5	V	-	-	K	✓
(Garashchenko, 2018)	✓	✓	-	2D	-	-	● XY	-	-	-	-	-	✓
(Hartogh & Vietor, 2018)	✓	✓	-	2D	✓	-	● XY	2	V	●	-	Z,K	✓
(Martof et al., 2018)	✓	✓	-	2D	-	-	● XY	2, 4, 10	L	-	-	K	✓
(Pradel, Bibb, et al., 2018)	✓	●	-	2D	✓	-	-	2, 3	V, L	-	-	Z	✓
(George & Chowdary, 2020)	✓	✓	-	3D	✓	-	-	2	V	-	-	Z	✓
(Ben Amor, Tahan, et al., 2022b)	✓	✓	-	2D	✓	-	XY	2	V	-	-	Z,K	✓
(Greco et al., 2023)	✓	✓	-	3D	-	-	● XY	-	-	-	-	-	✓
Fokus dieser Arbeit	✓	✓	-	2D	✓	✓	XYZ	1	V	●	●	Z,K	✓

2.5.3. Geometrische Attribute, Kennzahlen und Zielgrößen

Aus einer CAD-Datei lassen sich standardmäßig Attribute wie Bauteilvolumen, Bauteiloberfläche, Datengröße sowie die Dimensionen in X, Y und Z extrahieren. Durch AM-spezifische Software wie Netfabb, Magics und Cura lassen sich zusätzliche, teils verfahrensspezifische Informationen auslesen. Hierzu zählen unter anderem das Volumen der Stützstruktur, die projizierte Fläche auf der Bauplattform und weitere Merkmale (Autodesk, 2022), (Materialise, 2022), (Ultimaker BV, 2022). Schichtspezifische Daten zur Kontur und den Scanvektoren sind hierbei selten vertreten und meist nicht standardmäßig auslesbar. Diese können zum Teil über kostenpflichtige Erweiterungen der zuvor genannten Programme extrahiert werden, z.B. mittels Netfabb „*Advanced Toolpath Utility*“ (Autodesk, 2022). Eigenständige Programme, wie der 3D-Evolution Partfinder, sind auf das Sammeln von Metadaten ausgelegt, um Bauteile zu klassifizieren und passende Verfahren zuzuordnen (Additive Innovation GmbH, 2019).

Weitere Software, teils aus völlig anderen Fachbereichen, bzw. für Zwecke abseits der Additiven Fertigung entwickelt, ermöglicht zusätzlich das Auslesen von 2D-Merkmalen, wie Konturen und Krümmungen (Watson, 2012), (Psarra & Grajewski, 2001), (Walker et al., 2017).

Angelehnt an die Methoden des vorherigen Kapitels wird in folgender Tabelle 8 aufgeschlüsselt, welche Bauteilattribute (1), Kennzahlen (2) und Zielgrößen (3) verwendet wurden. Ergänzend zu Tabelle 7 erfolgt ein detaillierter Abgleich mit prozessbedingten Einflüssen auf den SLS-Prozess (4). Der Fokus liegt auf der Identifikation von Änderungen der zu fertigenden Scanpfade durch Rotation des Bauteils und Änderungen der Prozessparameter.

Für die beschriebenen Methoden und Kennzahlen bestehen hierbei folgende ungelöste Defizite für das SLS-Verfahren:

- Es werden keine Werkzeugpfade erfasst, die als Resultat aus der Schichtgeometrie und den Bearbeitungsparametern die Anzahl, Länge und Verteilung der Scanvektoren und damit verbundene Positionswechsel bestimmen.
- Eine Bauteildrehung um die Z-Achse wird nicht erfasst, sie wirkt sich aber ebenso auf die Anzahl und Länge der Scanvektoren aus.
- Materialspezifische Bearbeitungsparameter, wie der Scanlinienabstand und die Scangeschwindigkeit werden nicht erfasst. Diese wirken sich ebenso auf die Länge und Anzahl der Scanvektoren sowie die Bearbeitungsgeschwindigkeit aus.

- Zur Erfassung des Komplexitätseinflusses sind die in Relation gestellten Zielgrößen vielfach nicht in der Lage. Beispielsweise kann eine Abschätzung der Bauzeit und Kosten nicht genutzt werden, insofern diese mit festen Aufbauraten kalkuliert werden. Experimentelle Versuche sind hierbei vorzuziehen, um die Effekte am realen Prozess nachzuweisen. In Anlehnung an die analysierten Methoden ist jedoch sicherzustellen, dass lediglich die Komplexität betrachtet wird und sonstige Randbedingungen beibehalten werden.

Tabelle 8: Übersicht der geometrischen Attribute, Kennzahlen und Zielgrößen

Legende: ✓ = ja (1 Pkt.) ● = mit Einschränkung (0,5 Pkt.) ■ = nein (0 Pkt.)	(1) Attribute							(2) Kennzahlen					(3) Zielgröße			
	(3D) - Bauteilvolumen	(3D) - bounding box Volumen	(3D) - konvexes Hüllvolumen	(3D) - Bauteiloberfläche	(3D) - Anzahl Dreiecke	(2D) - Querschnittsfläche	(2D) - Konturlänge	(2D) - Anzahl Konturen	Bauteiloberfläche / Sphärenverhältnis	Bauteilvol. vs. bounding box Vol.	Bauteilvol. vs. Bauteiloberfläche	Oberfläche vs. bounding box vol.	Konturlänge vs. Querschnittsfläche	experimentelle Bauzeit	geschätzte/kalkulierte Bauzeit	Andere (z.B. Expertenmeinungen)
(4) Einflüsse																
Rotation (z-Achse)	■	✓	■	■	■	■	■	■	■	✓	■	■	■	■	■	■
Rotation (x/y-Achse)	■	✓	■	■	■	✓	✓	✓	■	✓	■	✓	✓	■	■	■
Material/Prozessparameter	■	■	■	■	■	●	✓	✓	■	■	■	■	✓	■	■	■
Einfluss auf SLS-Prozess (max.: 3)	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	1,5	2	2	0,0	2,0	0,0	2,0	2,0			
(Ruffo et al., 2006a)	✓	✓	■	■	■	■	■	■	■	✓	■	■	■	✓	✓	■
(Valentan et al., 2008)	✓	✓	■	✓	✓	■	■	■	■	✓	✓	✓	■	■	■	✓
(Valentan et al., 2011)	■	✓	■	✓	✓	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	✓
(Merkt et al., 2012)	✓	✓	■	✓	✓	■	■	■	■	✓	✓	✓	■	■	■	■
(Conner et al., 2014)	✓	✓	■	✓	✓	■	■	■	✓	✓	■	■	■	■	✓	■
(Almaghariz et al., 2016)	✓	✓	■	✓	■	■	■	■	✓	✓	■	■	■	■	✓	■
(Gullapalli, 2016)	✓	✓	■	✓	■	■	■	■	✓	✓	■	■	■	■	✓	■
(Pradel et al., 2017)	■	✓	■	✓	■	■	■	■	■	■	■	✓	■	✓	■	■
(Fera et al., 2018)	✓	■	✓	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	✓	■
(Garashchenko, 2018)	■	■	■	■	■	■	✓	✓	■	■	■	■	■	■	■	■
(Hartogh & Vietor, 2018)	■	■	■	■	■	✓	✓	■	■	■	■	■	■	■	✓	■
(Martof et al., 2018)	■	■	■	■	■	✓	✓	✓	■	■	■	■	✓	■	✓	■
(Pradel, Bibb, et al., 2018)	■	✓	■	■	■	✓	✓	■	■	■	■	■	■	✓	■	■
(George & Chowdary, 2020)	✓	■	■	✓	■	■	■	■	■	■	✓	■	■	✓	■	■
(Ben Amor, Tahan, et al., 2022b)	■	■	■	■	■	✓	■	■	■	■	■	■	■	■	✓	■
(Greco et al., 2023)	✓	✓	✓	✓	✓	■	■	■	✓	✓	■	■	■	■	■	✓
Verwendet in dieser Arbeit	■	■	■	■	■	■	■	■	■	✓	■	✓	✓	✓	✓	■

2.6. Methoden zur Modellbildung, Versuchsplanung und Analyse

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen zur Evaluierung der Wechselwirkungen zwischen der Komplexität und den AM-Verfahren geschaffen. Hierzu werden Ansätze aus dem Bereich Systemanalyse und Modellbildung beschrieben, die notwendig sind, um den Herstellprozess auf die für die Methodik relevanten Aspekte zu reduzieren. Darauf aufbauend werden die statistische Versuchsplanung und multivariate Analysemethoden beschrieben, die als Grundlage zur Erstellung und Auswertung der Versuche notwendig sind.

Systemanalyse und Modellbildung

Im ersten Schritt erfolgt die Systemanalyse des Herstellprozesses. Das **System** wird nach Siebertz et al. beschrieben als „*das zu untersuchende Gebilde*“ (Siebertz et al., 2017, S. 3), welches klar definierte Systemgrenzen aufweisen muss. Systeme bestehen aus „*Elementen und deren Relation, einer Systemgrenze über die sich die Wechselwirkung des Systems mit seiner Umwelt, aber auch durch die Dynamik des Systems beschreiben lässt*“ (Winzer, 2013, S. 96). Nach Siebertz et al. (Siebertz et al., 2017, S. 3) ist bei der Systembeschreibung zudem festzulegen, ob Eingangsgrößen zum System gehören oder außerhalb von diesem liegen. Dies ist von Bedeutung, da nur für systemzugehörige Größen eine optimale Einstellung gefunden werden kann und bei den restlichen mit Variationen zu rechnen ist.

Da die Betrachtung des realen Systems häufig nicht möglich ist oder mit hohem Aufwand einhergeht, sind Modelle ein wesentlicher Gegenstand wissenschaftlichen Arbeitens und wissenschaftlicher Theorien (Bandow & Holzmüller, 2010, S. 5). Nach VDI6333 wird ein **Modell** definiert als „*Vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System*“ (VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2014, S. 3). Dieses „*unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.*“ (VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2014, S. 3). **Prozessmodelle** werden nach Koch definiert als „*vereinfachte Abbildungen von Prozessen in einem Unternehmen oder zwischen Unternehmen*“ (Koch, 2015, S. 47). In Abhängigkeit der verfolgten Ziele unterscheiden sich Prozessmodelle mit Blick auf den Detaillierungsgrad und Umfang. Das Modell wird hierbei umso komplexer, je vollständiger es ist, und die Handhabung wird zunehmend schwieriger bis unmöglich (Backhaus et al., 2016, S. 69).

Versuchsplanung

Zur Untersuchung des Produkt-/Prozessverhaltens durch entsprechende Einflüsse, z.B. die Änderung von Parametern auf das Prozessergebnis oder Designänderungen auf das Produkt, sind entsprechende Versuche und eine statistische Auswertung notwendig. Die Versuche dienen hierbei der Aufdeckung von Zusammenhängen, wobei diese erklärbar und reproduzierbar gemacht werden sollen. Die **Versuchsplanung**, auch Design of Experiments (DOE), unterstützt hierbei die Bestimmung eines geeigneten Untersuchungsumfangs. Dies ist einerseits zur Begrenzung von Zeit und Kosten wichtig, andererseits aber auch, um relevante Unterschiede erkennen zu können. (Kleppmann, 2016, S. 1–4), (Klein, 2020, S. 15–36)

Die Auslegung dieser Pläne erfolgt anhand verschiedener Gesichtspunkte, wie dem Verhältnis von Aufwand zu dem Wert der Ergebnisse, sodass der Versuchsumfang entsprechend variiert. Detaillierte Beschreibungen hierzu sind beschrieben in (Kleppmann, 2016, S. 24), (Siebertz et al., 2017, S. 5–6), (Klein, 2020, S. 15–36).

Grundsätzlich wird die Menge der Eingangsgrößen als **Parameter** bezeichnet. Diese werden z.B. im Hinblick auf die Größe ihres Einflusses auf das System betrachtet, um sie auf eine Teilmenge zu reduzieren. Die daraus verbleibenden Parameter, welche im Versuchsplan enthalten sind, werden als **Faktoren** bezeichnet. Die Einstellung dieser Faktoren erfolgt in Stufen, wobei jeder Faktor auf mindestens zwei Stufen getestet wird. In der frühen Phase der Untersuchungen werden große Stufenabstände empfohlen, welche durch die Funktionsfähigkeit des Systems sowie dem realistischen Einstellbereich einzelner Faktoren begrenzt werden. Vorversuche können hierbei als Hilfsmittel dienen, um zu überprüfen, ob das System in diesen Einstellungskombinationen funktioniert. (Siebertz et al., 2017, S. 5–6)

Für den Stufenabstand ist zu beachten, dass bei nur zwei Stufen zu große Abstände entstehen können, die zur Ergebnisverfälschung führen und die Identifikation von nicht linearen Zusammenhängen erschweren. Dagegen führen zu kleine Abstände dazu, dass Effekte durch Zufallsstreuung überlagert werden können und der Versuchsumfang steigt. Um die Zufallsstreuung zu reduzieren, werden nicht im Scope liegende Einflussgrößen möglichst konstant gehalten. (Kleppmann, 2016, S. 27–28)

Multivariate Analysemethoden

Zur Auswertung der Versuche kommen strukturprüfende Verfahren zum Einsatz, die zur Kausalanalyse verwendet werden. Diese dienen zur Untersuchung von Ursache und Wirkung zwischen den Haupteinflussfaktoren der Formkomplexität mit den Zielgrößen des zuvor definierten Herstellprozesses. Für diese Art der Untersuchung eignet sich die **Regressionsanalyse**, insofern abhängige und unabhängige Variablen im metrischen Skalenniveau vorhanden sind, oder die **Varianzanalyse**, wenn die unabhängige Variable im nominalen Skalenniveau ist (Backhaus et al., 2016, S. 16). Detaillierte Ausführungen hierzu finden sich in (Backhaus et al., 2016, S. 64–98), (Siebertz et al., 2017, S. 232). Als weiteres Werkzeug dient die **Korrelationsanalyse**. Durch eine Korrelation wird der Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Zufallsvariablen untersucht, z.B. ob und wie stark diese zusammenhängen (Klein, 2020, S. 91–93).

Zur Prüfung können folgende Kenngrößen herangezogen werden²³:

- **Globale Gütemaße:** Das Bestimmtheitsmaß, die F-Statistik und der Standardfehler.
- **Maße zur Prüfung der Regressionskoeffizienten:** Der t-Wert und der Beta-Wert.
- **Der Determinationskoeffizient R-Quadrat (R^2), auch Bestimmtheitsmaß:** Gibt an, wie die Varianz der abhängigen Variable, bzw. die Streuung der Daten durch die unabhängige Variable erklärt wird. Sie ist eine normierte Größe, deren Wertebereich zwischen null und eins liegt, wobei sie umso größer ist, je höher der Anteil der erklärten Streuung an der Gesamtstreuung ist²⁴.
- **Das korrigierte Bestimmtheitsmaß:** Wird benötigt bei multipler Regression, da sich das Bestimmtheitsmaß mit der Anzahl erklärender Variablen erhöht, unabhängig von einer Verbesserung. Es ist immer kleiner oder maximal gleich groß wie das Bestimmtheitsmaß.

Um zu gewährleisten, dass ein Zusammenhang zwischen abhängiger und unabhängiger Variable besteht, müssen die Regressionskoeffizienten ungleich Null sein. Hierzu wird das Modell mittels **Nullhypothese H_0** geprüft, welche besagt, dass kein Zusammenhang besteht und die Regressionskoeffizienten alle Null sind. Eine vereinfachte Variante dieses Tests ermöglicht der **p-Wert** der F-Statistik. Als Kriterium wird vorausgesetzt das $p < \alpha$, sodass die Nullhypothese verworfen wird. Das **Signifikanzniveau α** gibt dabei die **Irrtumswahrscheinlichkeit** des Tests an und wird standardmäßig bei 0,05 oder 0,01 bzw. 5 und 1 % angesetzt. (Backhaus et al., 2016, S. 87–90)

²³ Vgl. (Backhaus et al., 2016, S. 80–86)

²⁴ Die **Effektstärke** wird nach (Cohen, 1992) eingeteilt in: 0,2 = gering, 0,5 = mittel, 0,8 = hoch

2.7. Bauteilgestaltung und Konstruktionsrichtlinien

In diesem Kapitel werden Konstruktionsrichtlinien und –empfehlungen aus dem Bereich Design for Additive Manufacturing (DfAM) thematisiert, um einerseits darzustellen, wie das Thema der Komplexität in bestehenden Arbeiten berücksichtigt wird; andererseits werden hierbei die Randbedingungen zur Dimensionierung der Probekörper *für Kapitel 4.3.3* ermittelt. Im Hinblick auf die zuvor beschriebenen Komplexitätsvarianten beschäftigen sich eine Vielzahl wissenschaftlicher Publikationen mit Themen rund um die Bauteilgestaltung für AM-Verfahren (DfAM), um Konstrukteure bei der Lösungserarbeitung zu unterstützen. Publikationen zur Entwicklung und Konstruktion für AM-Verfahren im Hinblick auf die allgemeine Herangehensweise, Gestaltung, Potenziale und weitere Themen sind vielfach vertreten. Neben den Ausführungen im folgenden Kapitel wird die Thematik in weiteren Publikationen vertieft, unter anderem in (Lachmayer & Lippert, 2020a), (Lachmayer & Lippert, 2020b), (Bertsche, 2007), (Richard & Schramm, 2019), (ISO/ASTM International, 2017), (Boyard et al., 2013, S. 3). Diese teilen sich in **restriktive Ansätze** (AM-Konstruktionsregeln) meist einzelner Verfahren als auch in **opportunistische Ansätze** zur Nutzung der AM-Potenziale sowie Kombinationen dieser Ansätze auf (Kumke, 2018, S. 43).

Restriktive DfAM-Ansätze

Restriktive DfAM-Ansätze bilden die Grundlage zur Gewährleistung der Herstellbarkeit, da eine Nichteinhaltung den Prozess erschweren oder verhindern würde. Publikationen thematisieren hierzu konstruktive Randbedingungen für Elemente wie Wandstärken, Strukturstärken, Kanäle/Bohrungen, Spalten, etc. (Klahn et al., 2018), (Adam, 2015), (Redwood et al., 2017), (Breuninger et al., 2013), (Kumke, 2018). In Tabelle 9 wird hierzu auszugsweise eine Auswahl von Konstruktionsempfehlungen/Restriktionen dargestellt, die für die Erstellung der Versuchsproben in **Kapitel 4** von Bedeutung sind. Adam und Zimmer (Adam & Zimmer, 2014, S. 26) sowie Kumke (Kumke, 2018, S. 44) beschreiben hierzu, dass die quantitativen Werte nur Gültigkeit unter den verwendeten Randbedingungen (Maschine, Werkstoffparameter) besitzen. Die Bedeutung prozessbezogener Parameter auf den Konstruktionsprozess wird ebenfalls in weiteren Arbeiten betont (Rosen, 2007), (Seepersad et al., 2012), (Ahuja et al., 2015). Zusätzlich wird die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften vom Material und der Ausrichtung beschrieben (Kaddar, 2010), (Rosso et al., 2020), (Hofland et al., 2017), (Di Angelo et al., 2020). Die Empfehlungen in Tabelle 9 geben einen ersten Anhaltspunkt für die Gestaltung einfacher Geometrien und dienen als Orientierung für die Versuche in **Kapitel 4**.

Tabelle 9: Auszug bestehender DfAM-Restriktionen zum SLS-Verfahren

Quelle	Dimension/ Feature	Kanaldurchmesser ²⁵ [mm]	Merkmalsgröße/ Durchmesser außen [mm]	Wandstärke [mm]	Rundungsradius Kanten (ra/ri) [mm]	Länge Innenradius (ri) [mm]	Spaltbreite [mm]
(Seepersad et al., 2012, S. 927–928)	xy	≥0,6...1.3		≥ 0,8			
	z	≥ 1,1...2		≥ 0,6			
(Redwood et al., 2017, S. 194)	xy	≥ 1,5	≥ 0,8	0,7...2.0			≥ 1
	z						
(Breuninger et al., 2013, S. 124–142)	xy	≥ 2...6		0,45...0,55			≥ 0,4...0,6
	z			≥ 0,3			
(Adam, 2015, S. 60–117)	xy	≥ 1,6	≥ 1,2	≥ 1,0	ra ≥ 0,6	≤ 10*ri	≥ 0,6
	z	>> ds	>> ds		ri ≥ 0,8		
(Klahn et al., 2018, S. 138–144)	xy	≥ 1,2		≥ 0,7-1			≥ 0,4...0,9
	z	≥ 1,4		≥ 0,5			≥ 0,4...0,9
Min. Wert für Versuche		0,6	0,8	0,45	0,8	≤ 10*ri	0,4

Legende: ds = Schichtstärke; ra = Außenradius; ri = Innenradius

Jedoch stoßen sie an ihre Grenzen, sobald komplexere Bauteile, besonders solche mit inneren Strukturen, Kanälen und Hinterschnitten zum Tragen kommen. Hierzu sind zusätzlich Einflüsse durch die Materialeigenschaften sowie die Dimensionen, z.B. der Durchmesser eines Kanals zu dessen Länge zu berücksichtigen. Dieser Umstand ist problematisch, da vielfältig darauf hingewiesen wird, dass AM-spezifische Vorteile und die Wettbewerbsfähigkeit erst durch Nutzung der inhärenten Gestaltungsfreiheit realisiert werden kann. Quantifizierte Werte stehen den Konstrukteuren aber nur für einfache Geometrien zur Verfügung und müssen daher fallspezifisch für komplexere Geometrien ermittelt werden.

Wie bereits im vorherigen Kapitel aufgezeigt wurde, entstehen zusätzliche Probleme durch Vernachlässigung der geometrischen Komplexität bzw. deren realer Auswirkung. Adam (Adam, 2015, S. 17) beschreibt hierzu beispielhaft, dass dreidimensionale fertigungstechnische Herausforderungen in zweidimensionale überführt werden und die Bauteilschichtgestalt innerhalb der Bauebene keinen signifikanten Einfluss auf die Stückkosten ausübt. Daraus wird abgeleitet, dass bei additiven Fertigungsverfahren die Stückkosten eines Bauteils von dessen Komplexität entkoppelt werden können (Adam, 2015, S. 17).

²⁵ Abhängig von dem umgebenden Bauteilvolumen (Klahn et al., 2018, S. 145)

Adam bezieht sich hierbei wie einige andere Autoren auf die Arbeit von Hopkinson und Dickens (Hopkinson & Dickens, 2003) aus dem Jahre 2003, die bereits in **Kapitel 2.4** beschrieben wurde. Im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren sind die Einflüsse komplexer Geometrien auf AM-Verfahren zweifelhaft geringer. Wie im Verfahrensvergleich in **Kapitel 2.2.2** dargestellt wurde, ist der Einfluss auf Bearbeitungs- und Materialebene aber ein maßgeblicher Faktor für die spätere Wettbewerbsfähigkeit innerhalb additiver Fertigungsverfahren.

Zusätzlich ist sicherzustellen, dass die geometrische Ausführung nicht mit Konstruktionsanforderungen, wie der Reinigbarkeit und Wartung kollidieren, da diese wie bereits beschrieben hohe Zeit- und Personalaufwände nach sich ziehen (Pradel, Zhu, et al., 2018a, S. 192), (Kollenberg, 2020, S. 189), (Meboldt & Klahn, 2018, S. 21). Eine frühzeitige Beachtung der Nacharbeit im Konstruktionsprozess ist daher von hoher Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit (Klahn et al., 2018, S. 139). Entsprechende Empfehlungen zur Reinigbarkeit werden wiederum exemplarisch in Form quantifizierter Werte für einfache geometrische Elemente bereitgestellt oder als qualitative allgemeine Empfehlungen vermittelt (Breuninger et al., 2013, S. 122), (Kollenberg, 2020, S. 189), (VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2015). Beispielhaft werden für Kanalstrukturen Verhältnisse von Länge zur Breite definiert, die eine Pulverentfernung gewährleisten (Adam, 2015, S. 120), (Kollenberg, 2020, S. 189). Für Konstrukteure entstehen somit die gleichen Probleme, die zuvor beschrieben wurden.

Opportunistische Ansätze

Den restriktiven Ansätzen gegenüber unterstützen opportunistische Ansätze Konstrukteure bei der Nutzung AM-spezifischer Gestaltungsfreiheiten und ermöglichen in Kombination mit den restriktiven Ansätzen die vollständig AM-gerechte Konstruktion (Kumke, 2018, S. 43). Neue Designmöglichkeiten umfassen hierbei häufig die Aspekte Nachhaltigkeit, Ressourcennutzung, Emissionen und die Funktionalität der Bauteile (Ahuja et al., 2015, S. 7). Neben den in **Kapitel 2.5.1** beschriebenen Gestaltungsmöglichkeiten, z.B. zur Potenzialentfaltung von Bauteilen durch neue Funktionen, werden im Folgenden jene erläutert, die das Potenzial durch Ressourceneffizienz sowie die Produktivität des Herstellprozesses entfalten.

Ressourceneffizienz

Im Hinblick auf komplexe Geometrien beschäftigen sich wissenschaftliche Arbeiten häufig mit den Unterschieden verschiedener Designvarianten und deren Einfluss auf den Ressourcenverbrauch bei der Fertigung und in der Anwendung.

Diese umfassen z.B. die Bauteilneugestaltung auf Ebene der Micro- und Macro-Komplexität durch Gitterstrukturen und Topologie-Optimierung (Ituarte et al., 2019, S. 3), (Thompson et al., 2016, S. 740–745). Ansätze der Bionik, die aufgrund von fertigungstechnischen Limitationen bisher nicht möglich waren, ermöglichen hierbei hohes Potenzial zur Ressourceneffizienz.

Wie durch Mattheck gezeigt wurde, können mit geringem Aufwand bereits in der Konstruktionsphase nicht tragende Bauteilbereiche, respektive solche ohne Funktion, entfernt und jene mit Spannungsspitzen durch Materialanlagerung verstärkt werden. Dies kann sich positiv auf die Materialeffizienz und Lebensdauer der Teile auswirken. (Mattheck, 1997, S. 55), (Mattheck, 2017)

Eine Vielzahl von Arbeiten beschäftigt sich daher mit der Anwendung bionischer Prinzipien bei der Bauteilgestaltung für AM-Verfahren, unter anderem durch die Nutzung von Gitterstrukturen. Beispiele hierfür finden sich in (Emmelmann et al., 2011, S. 1), (Schmidt, 2016), (Rosen, 2007), (Yuan et al., 2017), (Maconachie et al., 2019), (Fiona Schulte, 2021), (Teufelhart, 2016). Vayre et al. (Vayre et al., 2012, S. 635) beschreiben hierzu die beiden Ansätze:

- Formensuche durch Topologie-Optimierung,
- Definition der Funktionsoberflächen mit anschließender Verbindung durch Formen, Gitterstrukturen und Multimaterial.

Lindemann et al. (Lindemann et al., 2012, S. 186) beschreiben, dass Gitterstrukturen das Potenzial zur Reduktion des Materialvolumens und damit der Kosten für den Bauauftrag haben. Poprawe et al. (Poprawe et al., 2015, S. 50–51) erreichen ebenfalls eine Reduktion der Herstellkosten für Metallbauteile infolge einer Volumenreduktion optimierter Bauteile mit hoher geometrischer Komplexität. Wegner (Wegner, 2015, S. 1) beschreibt hierzu, dass bei AM-Verfahren im Normalfall kein Anstieg der Fertigungskosten zu beobachten ist, sondern eher das Gegenteil, insofern über die höhere Bauteilkomplexität, Integralbauweisen und integrierte Funktionen die Wirtschaftlichkeit verbessert wird. Die Anwendung dieser Prinzipien führt beispielhaft in Kombination mit der Optimierung von (Fluid-)Kanälen zu Produkten, die neben Gewichtseinsparungen verbesserte Funktionen aufweisen, z.B. infolge geringerer Strömungsverluste oder konturnaher Werkzeugkühlung (Chekurov et al., 2019), (Struve, 2021), (Thompson et al., 2016, S. 740–742). Es wird aber darauf hingewiesen, dass die Nutzung von Gitterstrukturen nicht als das eigentliche Ziel gesehen werden sollte, da diese nicht besser sein müssen als ein strukturoptimiertes Bauteil (Vayre et al., 2012), (Ituarte et al., 2019, S. 4). Hinzu kommt, dass komplexe Produkte einen größeren Aufwand bei der Konzeption und Konstruktion benötigen (Schmidt, 2016, S. 138).

Produktivität

Arbeiten, die sich explizit mit der geometrischen Komplexität und deren Auswirkungen auf die Produktivität des AM-Herstellprozesses befassen, liegen vereinzelt vor und umfassen meist Verfahren der Material-Extrusion. Pradel et al. (Pradel et al., 2017), (Pradel, Bibb, et al., 2018) stellen beispielhaft Untersuchungen mit dem FFF- und MJM-Verfahren an und vergleichen die Produktionsdauer verschieden komplexer Konstruktionsvarianten miteinander. Hierbei werden deutliche Unterschiede in der Fertigungsdauer in Abhängigkeit des verwendeten Verfahrens dargestellt, was sich verfahrensbedingt durch die Art der Pfadgenerierung ergibt. Zur Reduktion der Bauzeit wird für die Materialextrusion eine Minimierung der Bauteilgröße, der Oberfläche sowie des Umfangs angegeben; für das Multijet-Verfahren eine Reduktion der Bauteilgröße, da sowohl Oberfläche und Umfang des Bauteils keine Rolle für maskenbasierte Verfahren spielen (Pradel, Bibb, et al., 2018, S. 9–10).

Urbanic und Hedrick (Urbanic & Hedrick, 2016, S. 355–366) untersuchten die Auswirkungen der Bauteilgestaltung auf den FFF-Prozess. Das Bauteildesign wird hierbei auf die Nutzung mittels FFF optimiert, was unter anderem durch DFAM und Design for Assembly sowie eine angepasste Komplexität realisiert wird. Als Faktoren die direkt mit der Bauzeit verbunden sind, werden der Umfang der zurückgelegten Strecke und das Bauteilvolumen benannt. Es wird ebenfalls auf die verringerte Geschwindigkeit zur Herstellung der Außenkontur hingewiesen, welche im Falle einer komplizierten Kontur zur Verlängerung der Bauzeit führt (Urbanic & Hedrick, 2016, S. 356).

Diese Faktoren werden ebenfalls von Ahsan und Khoda beschrieben (Ahsan & Khoda, 2016), die sich mit der Werkzeugpfadoptimierung für das FFF-Verfahren befassen. Hierbei werden Auswirkungen der Bauteilorientierung auf die Kontinuität und Länge der Werkzeugpfade sowie Wechsel der Pfadrichtungen inklusive Start und Stop-Vorgängen beschrieben.

Mebold und Klahn (Meboldt & Klahn, 2018, S. 21) stellen beim Vergleich verschiedener Konstruktionsvarianten für das SLM-Verfahren mehrere Effekte durch eine erhöhte Komplexität fest:

- Interne Strukturen verhindern die konventionelle mechanische Nachbearbeitung.
- Sowohl Fertigungsdauer, als auch Nachbearbeitung werden beeinträchtigt, insbesondere durch die Verwendung von Gitterstrukturen.
- Die Verringerung der Komplexität führt zur Reduktion der Nachbearbeitung durch verringerten Verzug und bessere Zugänglichkeit.

Weitere Arbeiten, die sich mit produktivitätssteigernden Themen auseinandersetzen, finden sich in (Lachmayer & Lippert, 2018), (Winkelmann & Flath, 2021), (Wohlers Associates, 2021, S. 159).

3. Ableitung des Handlungsbedarfs

Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus dem zurückliegenden **Kapitel 2** zusammengefasst und hinsichtlich deren Bedeutung für die definierte Themenstellung analysiert. Eine zusammenfassende Tabelle relevanter Arbeiten erfolgt in **Kapitel 3.1**, welche als Grundlage zur Ableitung des Forschungsbedarfs in **Kapitel 3.2** dient.

3.1. Erkenntnisse aus den Analysen

Durch vorherige Erörterungen zum Stand der Technik konnte dargestellt werden, dass Kenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen Verfahren, Materialien und Geometrien sowie die damit einhergehende Produktivität und den Ressourcenaufwand noch immer unzureichend vorhanden sind. Ein Gesamtzusammenhang in Form einer systematischen Verknüpfung der Themen Komplexität, Produktivität und Ressourcen fehlt hierbei, da die Themen nur vereinzelt und meist voneinander getrennt behandelt wurden. Wie in **Kapitel 2.7** dargestellt wurde, begründet sich dieser Umstand zum Großteil daraus, dass Arbeiten aus dem Feld des DfAM eher auf verfahrens-limitierende und/oder opportunistische geometrische Aspekte eingehen. Diese betrachten zwar die Herstellbarkeit und Funktionsweise des Bauteils als solches, die Produktivität des Herstellprozesses wird dabei aber meist unzureichend betrachtet. Verfahrensspezifische/fertigungsbezogene Arbeiten weisen hingegen auf geometrische Einflüsse hin, stellen diese aber zumeist nicht ausreichend dar, bzw. stellen keine Verbindung zur Bauteilgestaltung her, da sie nicht zu deren Untersuchungsfokus gehört.

Produktivität, Ressourcen und Wettbewerbsfähigkeit

In Bezug zu Fragestellung 1 konnte in **Kapitel 2.3** exemplarisch für das SLS dargestellt werden, welche Auswirkungen infolge der gewählten Geometrie und des Herstellprozesses entstehen können. Entgegen des „*geometry for free*“-Ansatzes entstehen signifikante Auswirkungen auf:

- Prozessbezogene Faktoren wie Prozessführung, Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit
- Bauteilspezifische Faktoren wie Maßhaltigkeit, mechanische und optische Eigenschaften
- Ressourcenspezifische Faktoren wie Fertigungsdauer, Materialverbrauch und Abfall, Energie und Hilfsstoffe sowie Hardwareverschleiß.

Hierdurch konnte gezeigt werden, welcher Umfang sich bereits für die Wechselwirkung eines einzigen additiven Verfahrens ergibt.

Da jedes weitere Verfahren eigene spezifische Randbedingungen und Wechselwirkungen besitzt, ist die Untersuchung anhand eines Verfahrens mit Option zur Erweiterung im Rahmen dieser Ausarbeitung zielführend. Aus den Analysen wurde ebenfalls deutlich, dass bestehende Ansätze zum Thema Komplexität hauptsächlich auf den Vergleich von additiven und herkömmlichen Verfahren ausgelegt sind. Es wurde dargestellt, dass sich dieser Umstand ebenfalls auf die Kostenkalkulation auswirkt, wobei die Komplexität infolge idealisierter und teils veralteter Vorstellungen nicht ausreichend berücksichtigt wird. Aus wirtschaftlicher Sicht entstehen entsprechende Probleme bei der Kalkulation von Bauteilkosten, Maschinen- und Personalkapazitäten, Investitionen sowie für die Wartung und Instandhaltung aufgrund von:

- Berechnungen mit festen Aufbauraten, die sich jedoch mit der Komplexität verändern.
- Einflüssen auf mechanische und optische Eigenschaften, die teils zu Ausschuss führen.
- Die Vernachlässigung der Nachbearbeitungs- und Prüfaufwände komplexer Bauteile.

Dabei wird deutlich, dass eine Verfahrensbewertung aufgrund der von den Herstellern angegebenen Aufbauraten, ohne Kenntnis über die Wechselwirkungen mit der Geometrie, keine hinreichende Aussage über die Produktivität gewährleistet, bzw. diese signifikant abweichen kann.

In Anlehnung an Fragestellung zwei wurden in **Kapitel 2.5.2** und **Kapitel 2.5.3** bestehende Methoden zur Analyse, Quantifizierung und Kategorisierung erörtert sowie deren verwendete Attribute analysiert. Da sich ein Großteil dieser Arbeiten vor allem mit der Verbindung zwischen 3D-Printing und dem Gießen befasst, sind diese nur bedingt auf weitere Verfahren übertragbar. Dies ist teils auf die Art der Bearbeitung zurückzuführen, da beim Transfer auf das SLS-Verfahren, respektive vektorbasierte Verfahren weitere Merkmale berücksichtigt werden müssen. Vereinzelt Methoden, wie jene von Pradel et al. (Pradel, Bibb, et al., 2018), Martof et al. (Martof et al., 2018), Walker et al. (Walker et al., 2017), und Valentan et al. (Valentan et al., 2011) sind nicht verfahrensspezifisch limitiert und bieten Lösungsansätze für die Methode in **Kapitel 4**.

In Tabelle 10 wird eine Auswahl von identifizierten Arbeiten mit Blick auf die Forschungsfragen und deren Beantwortungsgrad dargestellt. Zusätzlich wird das jeweilige AM-Verfahren und dessen Themenbezug in die Bewertung aufgenommen. Neben den in Tabelle 7 und Tabelle 8 analysierten Bewertungsmethoden wird Tabelle 10 erweitert um Arbeiten mit Fokus auf die Produktion und Bauteilgestaltung. Durch die Vielzahl an Veröffentlichungen wurde eine Rangfolge gebildet, um die wichtigsten Arbeiten hervorzuheben. Es erfolgt eine gleichgewichtete Bewertung der Unterpunkte mit einem Wert zwischen eins und vier zur Bildung einer Durchschnittswertung. In nachfolgender Tabelle werden die relevantesten Arbeiten mit einem Wert über eins erfasst.

Tabelle 10: Vergleich der Forschungsfragen zum Stand der Technik

Wertung	Quelle	F1 - Einflüsse				F2 - Bewertung		F3 - Methodik	
		Verfahren, Bearbeitung	Material, Parameter	Bauraumvariablen	Ressourcen	Quantifizierung Kategorisierung	Bauteil-merkmale	Methodik/ Methode	Verfahren
2,13	(Ruffo et al., 2006a)	●	●	●	●	○	○	○	SLS
2,00	(Wegner, 2015)	●	●	●	●	○	○	○	SLS
1,88	(Kaddar, 2010)	○	●	●	●	○	○	○	SLS
1,88	(Nelson, 1993)	●	●	●	●	○	○	○	SLS
1,75	(Gebhard, 2016)	●	○	●	●	○	○	○	SLS
1,75	(Gibson et al., 2021/2015)	●	○	●	●	○	○	○	SLS
1,75	(Pradel et al., 2017)	○	○	○	○	○	○	○	FFF
1,75	(Lachmayer et al., 2018b)	○	○	○	○	○	○	○	FFF
1,63	(Martof et al., 2018)	○	○	○	○	●	●	○	3DP
1,63	(Pham and Wang, 2000)	○	○	○	○	○	○	○	SLS
1,63	(Valentan et al., 2011)	○	○	○	○	○	○	○	STL
1,50	(Zeyn, 2017)	○	○	○	○	○	○	○	SLS, SLM
1,50	(Klahn et al., 2018)	○	○	○	○	○	○	○	SLS
1,50	(Pradel, 2019)	○	○	○	○	○	○	○	ME, MJ
1,50	(Baumers, 2012)	○	○	○	○	○	○	○	EBM
1,50	(Breuninger, 2013)	○	○	○	○	○	○	○	SLS
1,38	(Ahsan & Khoda, 2016)	●	○	○	○	○	○	○	FFF
1,38	(Kushnarenko, 2009)	○	○	○	○	○	○	○	SLM
1,38	(Ben Amor et al. 2022a)	○	○	○	○	○	○	○	FFF
1,38	(Fera et al., 2018)	○	○	○	○	○	○	○	SLM
1,38	(Gullapalli, 2016)	○	○	○	○	○	○	○	3DP,FFF
1,38	(George and Chowdary, 2020)	○	○	○	○	○	○	○	MEX
1,38	(Kumke, 2018)	○	○	○	○	○	○	○	AM
1,25	(Valentan et al., 2006)	○	○	○	○	○	○	○	STL
1,25	(Conner et al., 2014)	○	○	○	○	○	○	○	3DP
1,25	(Almaghariz et al., 2016)	○	○	○	○	○	○	○	3DP
1,25	(Valentan et al., 2008)	○	○	○	○	○	○	○	STL
1,13	(Merkt et al., 2012)	○	○	○	○	○	○	○	SLM
1,13	(Winkler, 2020)	○	○	○	○	○	○	○	SLM
1,13	(Wohlers Associates, 2021)	○	○	○	○	○	○	○	AM
1,13	(Greco et al., 2023)	○	○	○	○	○	○	○	AM
1,13	(Baumers et al., 2011)	○	○	○	○	○	○	○	SLS
1,13	(Lindemann et al., 2012)	○	○	○	○	○	○	○	SLS,SLM
1,13	(Garashchenko, 2018)	○	○	○	○	○	○	○	AM

○ = 0 Frage wird nicht behandelt
○ = 1 Frage wird nur angeschnitten
○ = 2 Frage wird teilweise beantwortet, jedoch mit großen Lücken für diese Arbeit
○ = 3 Frage wird beantwortet, jedoch mit Lücken für diese Arbeit
○ = 4 Frage wird vollumfänglich beantwortet

Fazit: Ein systematischer Ansatz, der die Verknüpfung zwischen Geometriekomplexität sowie dem Herstellverfahren und dem zugehörigen Material bzw. dafür notwendiger Prozessparametern abbildet, ist zum derzeitigen Stand der Technik nicht vorhanden. Daraus abgeleitet kann die Wettbewerbsfähigkeit innerhalb einer Verfahrensgruppe unter Berücksichtigung der Komplexität nicht verglichen werden.

3.2. Ableitung des Forschungsbedarfs und Berücksichtigung in dieser Arbeit

In Anbetracht dessen, dass Additive Fertigungsverfahren zunehmend zur Produktion von Endbauteilen verwendet werden, konkurrieren diese Verfahren nicht nur mit herkömmlichen Verfahren, sondern ebenfalls mit solchen innerhalb der additiven Verfahrenskategorien. Das Verständnis über die grundlegenden Zusammenhänge aus Verfahren, Material und Geometrie bilden dabei eine Schlüsselrolle: Diese wirkt sich auf die Produktivität und den Ressourcenverbrauch des eingesetzten Verfahrens sowie der zu erzeugenden Bauteile aus und bestimmt damit maßgeblich dessen Wettbewerbsfähigkeit.

Zur Erfüllung der Ziele aus **Kapitel 1.2** sind hierzu einerseits die theoretischen Erkenntnisse aus **Fragestellung F1 und F2** zu systematisieren und in praktischen Versuchen nachzuweisen. Diese bilden die Grundlage für **Forschungsfrage F3**, durch deren Beantwortung die geometrischen Einflüsse herausgestellt und in einer Methode umgesetzt werden, um sie zur Evaluierung der geometrischen Einflüsse einsetzen zu können. Unter Berücksichtigung der anfangs definierten Forschungsfragen, die nachfolgend wiederholt werden, besteht eine Vielzahl von Defiziten, welche in Kombination mit dem daraus abgeleiteten Handlungsbedarf in Tabelle 11 abgebildet werden.

- F1** Welchen Einfluss hat die geometrische Komplexität auf die Produktivität abhängig von der Verfahrens- und Bearbeitungsweise, den Fertigungsparametern sowie dem zu bearbeitenden Material?
- a) Wie ist ihr Einfluss im Vergleich zu den Bauraumvariablen (z.B. Volumen, Packdichte)?
 - b) Welchen Einfluss hat sie auf den Ressourcenaufwand im Herstellprozess?
- F2** Wie kann der Einfluss der geometrischen Komplexität quantifiziert und kategorisiert werden, um Vergleichs- und Bewertungsmöglichkeiten zu schaffen und welche Bauteilmerkmale müssen dafür vorhanden sein?
- F3** Welche Methoden sind notwendig, um eine Evaluierung der geometrischen Komplexität durchzuführen und wie sind diese in einer geeigneten Methodik umzusetzen?

Tabelle 11: Defizite und Handlungsbedarf aus dem Stand der Technik

Defizit	Handlungsbedarf
Forschungsfrage 1 – Wirkmechanismen: Geometrie, Herstellprozess, Material	
1 Verzögerungen im Fertigungsprozess vektorbasierter Verfahren werden zum Teil beschrieben, jedoch werden die Auswirkungen im Zusammenhang mit der Komplexität nicht explizit behandelt, geschweige denn quantifiziert.	Verzögerungen, welche im Wechselspiel aus Geometrie und Verfahren entstehen, sind systematisch zu quantifizieren, um die Auswirkungen bewerten zu können.
2 Das Material, respektive die dafür notwendigen Prozessparameter besitzen eine unterschiedliche Sensitivität gegenüber komplexen Geometrien; eine systematische Betrachtung fehlt bisher.	In Ergänzung zu Defizit 1, ist der Einfluss des verwendeten Materials, bzw. die dafür notwendigen Prozessparameter ebenfalls aufzunehmen.
3 Wie durch Wegner (Wegner, 2015, S. 107) beschrieben, wurde der inhomogene Energieeintrag infolge der Scanvektorenlänge weder für dessen betrachtete Anlagensysteme, noch für andere SLS-Systeme berücksichtigt. Effekte auf die Schichtanbindung, Verzug und Materialzersetzung, sind im Kontext unzureichend beschrieben.	In Ergänzung zu Defizit 1 sind die verwendeten Versuchsproben auf Zersetzungseffekte und temperaturinduzierten Verzug infolge eines inhomogenen Temperatureintrags qualitativ aufzunehmen.
Forschungsfrage 2 – Methoden zur Analyse, Quantifizierung, Kategorisierung	
4 Der Großteil vorhandener Methoden ist zur Verwendung mit vektorbasierten Verfahren, respektive dem Transfer auf weitere Verfahren ungeeignet, da die verwendeten Attribute wenig Aussagekraft besitzen und/oder maßgebliche Faktoren fehlen.	Notwendige Geometriemerkmale sind zu analysieren, und Einflüsse ausgewählter geometrischer Attribute auf den Herstellprozess zu quantifizieren. Möglichkeiten zur Transferfähigkeit sind entsprechend zu prüfen.
5 Die Integration der Formkomplexität zur Kalkulation der Wirtschaftlichkeit/Kapazitätsplanung wird bisher unzureichend berücksichtigt, sodass multiple Probleme bei der Kalkulation entstehen.	In Ergänzung zu Defizit 4 sind entsprechende Merkmale zu eruieren und auf ihre Anwendbarkeit zu prüfen.
Forschungsfrage 3 – Methoden zur Evaluierung des geometrischen Einfluss	
6 Zur Evaluierung des geometrischen Einflusses ist bisher keine systematische Methode vorhanden, welche die fertigungstechnischen Aspekte mit den geometriespezifischen Aspekten verknüpft.	Aufbauend auf bisherigen Erkenntnissen ist eine Methode zur Evaluierung und Quantifizierung der Komplexität zu entwickeln.
7 Zu den Auswirkungen einer Komplexitätssteigerung in Verbindung mit dem eingesetzten Verfahren sind bisher keine Handlungsempfehlungen vorhanden, welche die Produktivität adressieren.	Die Erkenntnisse aus F1, F2 und F3 sind als Handlungsempfehlungen abzuleiten.

4. Methodik zur Evaluierung des Komplexitätseinflusses auf das SLS

In **Kapitel 4** werden die Erkenntnisse aus dem zuvor abgeleiteten Handlungsbedarf aufgegriffen und unter Zuhilfenahme verschiedener Methoden und Versuche zu einer Methodik entwickelt, deren Struktur im Folgenden erläutert wird.

4.1. Aufbau und Struktur der Methodik

Als Grundlage der Methodik und zugehöriger Versuche wird in **Kapitel 4.2** eine Systemanalyse des SLS-Verfahrens durchgeführt und ein Modell des Herstellprozesses abstrahiert. Mit diesem Modell wird zunächst identifiziert, welche Teilprozesse von der geometrischen Komplexität beeinflusst werden und welche Prozesse signifikante Auswirkungen auf die Zeit- und Kostenentstehung haben. Aufbauend auf den Methoden aus **Kapitel 2.5.2** wird in **Kapitel 4.3** die Versuchsmethodik- und Planung behandelt. Für die Ableitung von Handlungsempfehlungen sind experimentelle Untersuchungen und die Definition entsprechender Prüfkörper notwendig, welche die Einflussparameter und Zielgrößen systematisch einbeziehen. Es wird hierzu eine Analyse potenzieller Einflussparameter vorgenommen. Unter Berücksichtigung ausgewählter Kriterien werden diese gefiltert und zur Auswahl von Einflussfaktoren für die Gestaltung der Proben genutzt. Anschließend erfolgt ein Überblick über die verwendete Versuchsausstattung, inklusive Hard- und Software sowie Materialien und AM-Anlagen. Abschließend wird bezugnehmend auf **Kapitel 2.6** die Konzeption der Versuchsproben beschrieben.

Bei der Versuchsdurchführung in **Kapitel 4.4** erfolgt eine Evaluierung der Einflussfaktoren im Hinblick auf deren Auswirkungen auf die Herstelldauer und Begleiteffekte, wie Materialersetzung und Bauteilverzug. Für die Versuche werden Bauteile mit unterschiedlicher Komplexität sowie verschiedener Kombinationen aus Maschinen, Prozessparametern und Materialien gefertigt und/oder simuliert. Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgröße sowie deren Rangfolge werden mit Hilfe der Korrelations- und Regressionsanalyse ermittelt. In Abhängigkeit der Rangfolge wird dargestellt, welche Faktoren sich auf die jeweilige Material-Prozesskombination auswirken und in welcher Stärke. Hierdurch kann abgeleitet werden, welche Kombination das höchste Potenzial für den Einsatz in einem Produkt respektive für dessen Gestalt bietet. Zusammen mit **Kapitel 4.5**, in dem die gewonnenen Erkenntnisse in Bezug zu dem wirtschaftlichen Aufwand gesetzt werden, erfolgt eine Beschreibung der Erkenntnisse und Ableitung von Handlungsempfehlungen in **Kapitel 4.6**.

In Abbildung 25 wird das Vorgehen innerhalb der Methodik dargestellt. Validität und Effizienz der Methode werden sichergestellt, indem sie durch verschiedene Benchmark-Bauteile in **Kapitel 5** nachgewiesen werden.



Abbildung 25: Aufbau der Methodik

4.2. Systemanalyse und Prozessmodellbildung

In diesem Kapitel erfolgt zunächst die Analyse und Abstraktion des Herstellprozesses. Um die relevanten Teilprozesse hinsichtlich Kosten- und Zeitaufwand identifizieren zu können, wird die Prozesskette aufgeschlüsselt und auf die relevanten Bestandteile reduziert.

Systemdefinition und -grenzen

Die Definition der Systeme sowie deren Grenzen wird zunächst innerhalb des SLS-Prozesses beschrieben, um eine transparente Übersicht der Ein- und Ausgänge zu erhalten und Zusammenhänge identifizieren zu können. In Abbildung 27 werden die Systeme „AM-Software“, „Pulveraufbereitung“, „SLS-Anlagensystem“ sowie „Auspackstation und Strahlkabine“ inklusive Ein- und Ausgängen aufgeschlüsselt. In Anlehnung an die Prozessbeschreibung des SLS-Prozesses aus **Kapitel 2.3** adressieren diese entsprechend des Untersuchungsgegenstands solche Elemente, die sich auf die zu erzeugende Geometrie sowie den daraus resultierenden Ressourcenaufwand auswirken.

Systemeingänge		System		Systemausgänge	
Prozess: Datenvorbereitung					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Volumenkörper (CAD) ▪ STL-Daten <ul style="list-style-type: none"> – Flächen – Dreiecke ▪ Datenmenge 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ AM-Software <ul style="list-style-type: none"> – Bauraumanordnung – Reparatur – Slicing 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schichtdaten <ul style="list-style-type: none"> – Bearbeitungspfade – Anteil Kontur/Füllung ▪ Informationen <ul style="list-style-type: none"> – Prozessdauer – Materialverbrauch 	
Prozess: Rüsten					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Restpulver ▪ Neupulver 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reinigungsmittel 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pulveraufbereitung ▪ SLS-Anlagensystem 	
Prozess: Generieren (Aufheizen, Generieren, Abkühlen)					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pulvermaterial ▪ Elektr. Energie 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prozessgase ▪ Schichtdaten 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ SLS-Anlagensystem 	
Prozess: Nacharbeiten					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bauteile ▪ Restpulver 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Strahlgut 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auspackstation & Strahlkabine 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verlustleistung/Wärme ▪ Bauteile, inkl. Restpulver ▪ Restpulver ▪ schadhafte Pulver 					

Abbildung 26: Systemeingänge und Systemausgänge (Eigene Darstellung)

Modellelemente des Herstellprozesses

In Anlehnung an den Ablauf der SLS-Prozesskette aus **Kapitel 2.3.1**, wird im Folgenden das Modell aufgebaut. Für die übergeordneten Prozesse werden folgende Prämissen definiert:

- Zur Vorbereitung zählt die **Datenvorbereitung**, welche alle Prozesse umfasst, die zur Bereitstellung eines Baujobs notwendig sind sowie das **Rüsten**, welches alle Prozesse zur Vorbereitung von Material und Maschine einschließt.
- Der Bauprozess umfasst das **Aufheizen** des Bauraumes, inklusive Fluten mit Schutzgas, das **Generieren** (Beschichten und Belichten) sowie das **Abkühlen**. Das **Abkühlen** wird dabei unterteilt in die Dauer zum Abkühlen in der Anlage sowie die Dauer zum externen Abkühlen, z.B. in einer Einrichtung zur definierten Abkühlung unter Schutzgas.
- Die **Nachbearbeitung** umfasst das Entpacken des Bauauftrages sowie das Strahlen.

Eine grafische Darstellung des Prozessablaufs erfolgt in nachfolgender Abbildung 27. Prozesse mit hohem Einfluss auf die Kosten und Dauer werden entsprechend gelb hervorgehoben.

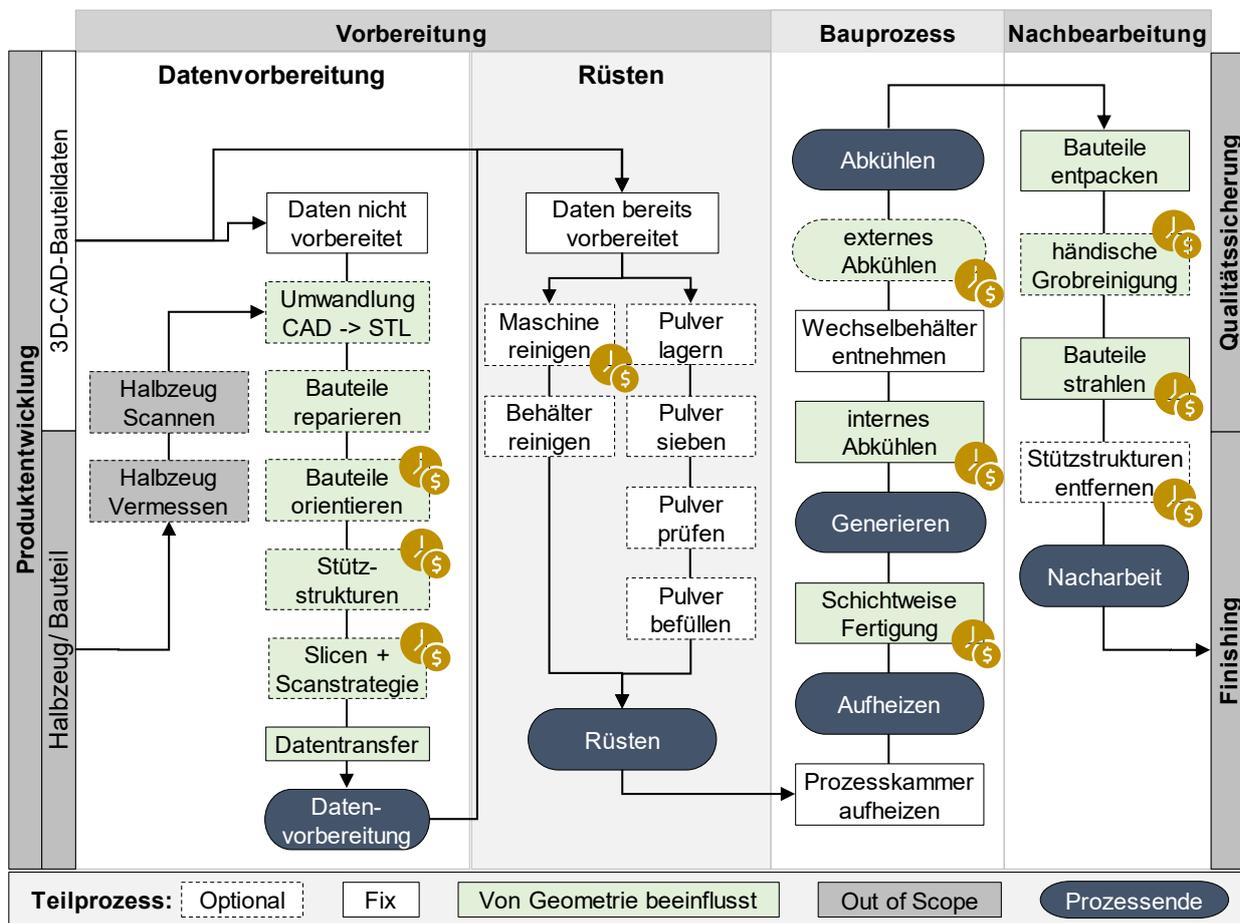


Abbildung 27: Modell des SLS-Prozesses zur Identifikation der Kosten- und Zeittreiber (Eigene Darstellung)

Die Prozesse unterscheiden sich in der Dauer, dem Personalaufwand sowie den dafür notwendigen Geräten und Maschinen. Entsprechend variieren Personalkosten und Maschinenstundensatz. Daraus abgeleitet benötigen Prozesse wie die Datenvorbereitung weniger Zeit, sind aber durch das hochqualifizierte Personal kostenintensiv.

Prozesse wie das Abkühlen benötigen je nach Material die Zeit der Generierdauer zum Abkühlen, wobei sich die Kosten danach richten, ob in der Anlage oder extern abgekühlt wird. Zur Verdeutlichung dieser Umstände werden die Prozessbestandteile des SLS-Prozesses in Abbildung 28 für zwei SLS-Anlagensysteme anhand realer Bauaufträge exemplarisch dargestellt. Prozesse, bei denen die Komplexität direkten Einfluss auf die Dauer und Kosten des Gesamtprozesses hat, werden grün umrandet. Die Szenarien umfassen für beide Maschinen Aufträge mit 100 % der Bauhöhe, einer Packdichte von ca. 10 % und dem Material TPU88A. Die Dauer für das Beschichten und Heizen sowie das Belichten entstammt den Versuchen aus **Kapitel 4.4.1** und **Kapitel 4.4.6** (Würfel - Stufe drei). Exemplarisch wird die Prozesskette für eine mittlere Bauteilkomplexität dargestellt. Hierdurch werden bereits Unterschiede in der Zeit- und Kostenentstehung der jeweiligen Maschine und Teilprozesse aufgezeigt. Die vollständigen Prämissen sind im Anhang in Tabelle 31 und Tabelle 32 enthalten.

Es ist erkennbar, dass unabhängig von der untersuchten Anlage besonders die Generierdauer bestehend aus Belichten sowie Beschichten und Heizen den höchsten Einfluss auf den Herstellprozess besitzt, da sie direkt mit der anschließenden Abkühldauer gekoppelt ist. Im Hinblick auf den Fokus der Arbeit wird im Folgenden besonders die Generierdauer als Zielgröße betrachtet, jeweilige Anmerkungen zu den übrigen Teilprozessen erfolgen versuchsabhängig.

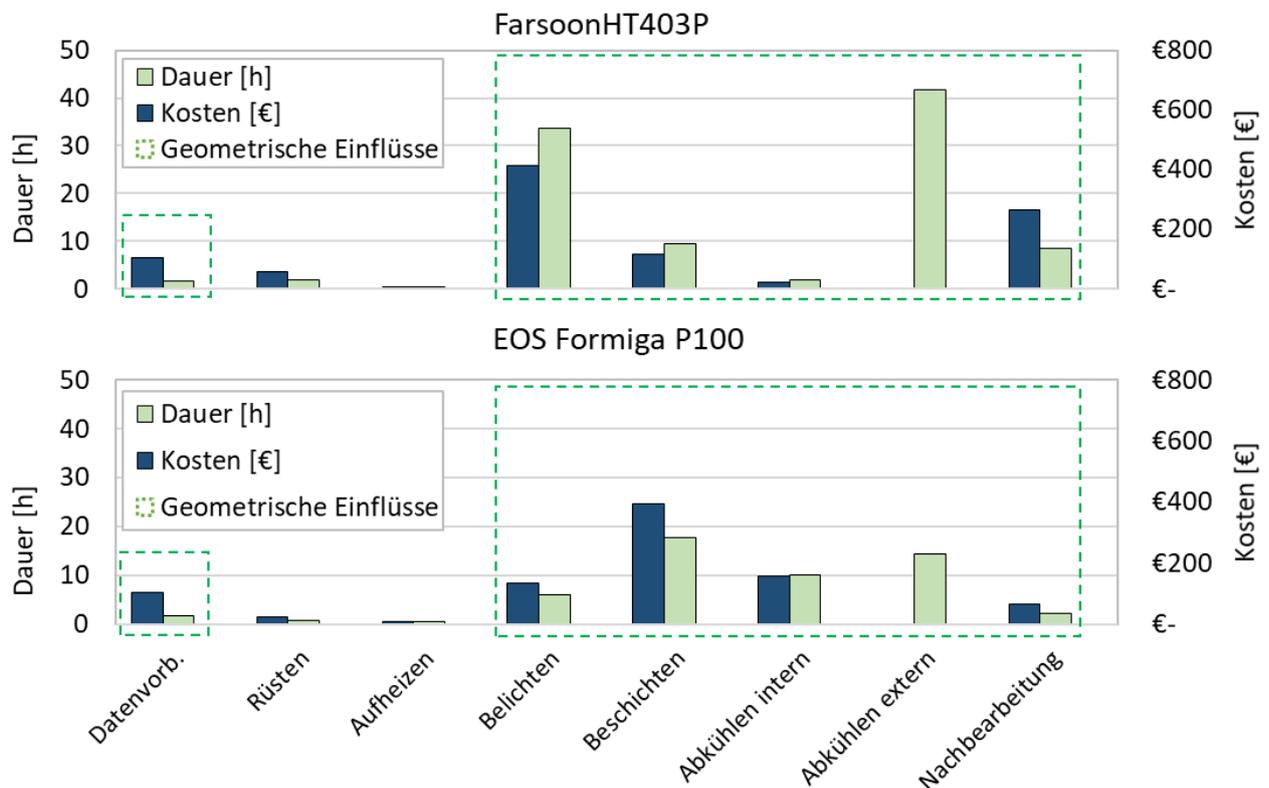


Abbildung 28: Zeit-/und Kostentreiber für die SLS-Anlagen P100 und HT403P

4.3. Versuchsmethodik und -planung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zur Konzeption der Versuchsproben erläutert. Aufbauend auf den Methoden in **Kapitel 2.6** erfolgt eine detaillierte Auseinandersetzung mit den geometrischen Parametern sowie deren Wechselwirkungen in **Kapitel 4.3.1**. Dies dient zur Identifikation und Vermeidung von Multikollinearität sowie zur Reduktion der aufzunehmenden Faktoren auf eine Teilmenge mit großem Einfluss auf die Zielgröße. In **Kapitel 4.3.2** werden die Randbedingungen hinsichtlich verwendeter Anlagen, Materialien und Software erläutert und die Versuchsprämissen definiert. Den Abschluss bildet die Konzeption der Proben in **Kapitel 4.3.3**.

4.3.1. Parameter und Faktoren

Wie bereits in **Kapitel 2.5** dargestellt wurde, können aus der Bauteilgeometrie vielfältige Parameter extrahiert werden. In folgender Tabelle 12 werden die verschiedenen Einflussgrößen hinsichtlich ihrer Herkunft gruppiert. Es erfolgt der Ausschluss (grau) und die Priorisierung (grün) von überschneidenden Attributen, welche miteinander wechselwirken.

Tabelle 12: Übersicht der Bauteilattribute im Hinblick auf die berücksichtigten Daten

	Attribut 1	Attribut 2	Attribut 3
Bauraumfüllung	Packdichte	Anzahl Bauteile	-
Höhe	Anzahl Schichten	Bauhöhe	-
Fläche	Oberfläche gesamt	Fläche Up-Down-Skin	Mantelfläche
Volumen	Volumen Bauteil(e)	Volumen Bounding Box	-
Kontur und Füllung	Konturlänge	Fülllänge	-
Vektoren	Vektorlänge	Anzahl Konturvektoren	Anzahl Füllvektoren

Als Prämissen zur Auswahl der Attribute werden folgende Annahmen getroffen:

- Als Maß für die Bauraumfüllung wird die **Packdichte** genommen, da sie entgegen der Anzahl an Bauteilen eine maschinenübergreifende Vergleichsgröße darstellt.
- Für die Höhe wird die **Anzahl der Schichten** gewählt, da die Schichtstärke Einfluss auf die Produktivität nimmt, wohingegen die reine Bauhöhe keine Aussage darüber zulässt.
- Als Fläche wird die gesamte **Oberfläche** aufgenommen. Die Mantelfläche wird ebenfalls betrachtet, aber indirekt über die Konturlänge abgebildet.
- Als Volumen wird das **Bauteilvolumen** sowie das **Bounding Box Volumen** aufgenommen.

- Verfahrensspezifisch können verschiedene Bestandteile aus Kontur und Füllung sowie der Bearbeitungspfade extrahiert werden, wobei die Konstellation der Einzelattribute und entstehende Wechselwirkungen experimentell überprüft werden müssen. Durch den Offset des Lasers werden die **Konturlänge** und damit die **Anzahl der Konturvektoren** definiert sowie die eingeschlossene Füllfläche. Diese Füllfläche ergibt in Kombination mit dem Scanlinienabstand die **Fülllänge** sowie **Anzahl der Füllvektoren** (vgl. Abbildung 29). Diese ergeben zusammen die **Anzahl der Vektoren**, welche indirekte Rückschlüsse auf die Anzahl der Positionswechsel ermöglichen. Durch die **Anzahl der Belichtungen** werden die jeweiligen Faktoren zusätzlich multipliziert.

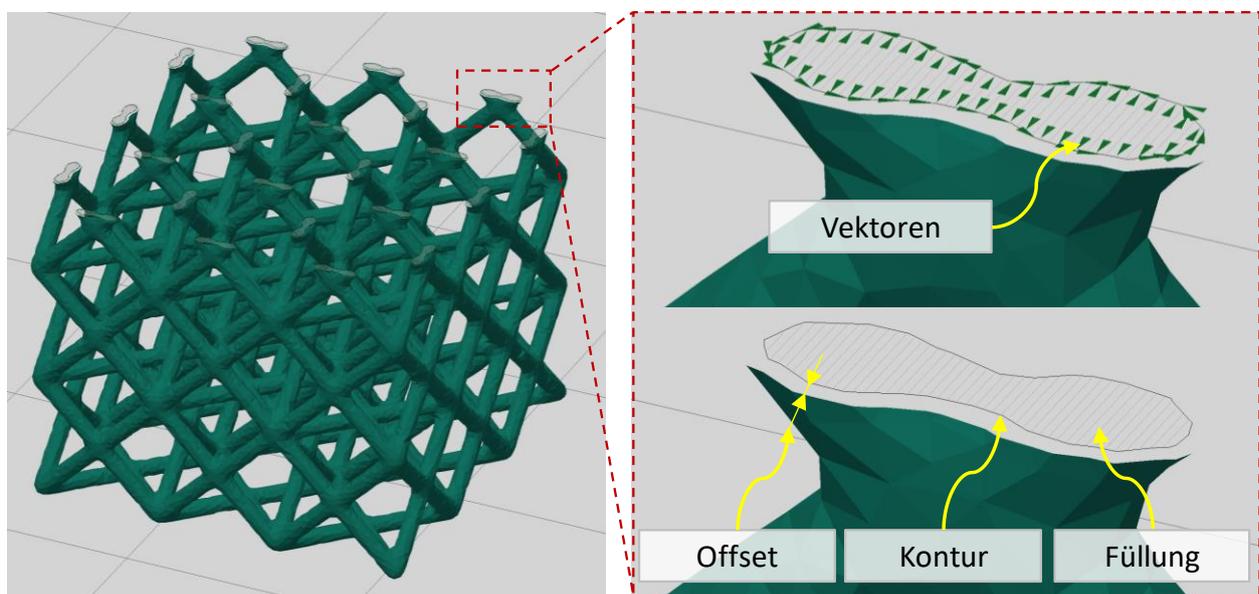


Abbildung 29: Schichtinformationen einer Gitterstruktur (Eigene Darstellung)

Aufgrund bestehender Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern und der Bau- raumgestaltung, z.B. durch die Packdichte, Bauhöhe und Orientierung der Bauteile, werden diese nachfolgend auf mögliche Korrelationen analysiert. Die Bewertung dieser Merkmalskorrelatio- nen erfolgt als Hypothese in Anlehnung an die Darstellung der Wechselwirkungen aus Tabelle 3 sowie empirischen Vorversuchen. In Tabelle 13 werden die Korrelationen nach den Auswirkun- gen auf die jeweiligen Parameter zusammengefasst. Die Wertung der Zusammenhänge richtet sich nach deren Stärke und wird von null (Kein Zusammenhang) bis vier (starker Zusammenhang) vorgenommen. Es wird davon ausgegangen, dass sich ein Bauteil in einer Ebene befindet, wobei es durch Multiplikation in der X-Y-Ebene entsprechend die Packdichte erhöht (siehe Kennzeich- nung *). Die Multiplikation in Z-Ebene steigert hierbei die Anzahl an notwendigen Schichten.

Tabelle 13: Merkmalskorrelation (4 = Starker Zusammenhang, 0 = kein Zusammenhang)

	Konturlänge	Fülllänge	Volumen	Fläche	Anzahl Dreiecke	Bounding Box Volumen	Anzahl Scanvektoren	Vektorlänge	Anzahl Ebenen*	Packdichte*	Drehung	Beam-Offset	Scanlinienabstand
Konturlänge	4												
Fülllänge	4	4											
Volumen	2	2	4										
Fläche	3	3	2	4									
Anzahl Dreiecke	2	2	0	2	4								
Bounding Box Volumen	0	1	2	1	0	4							
Anzahl Scanvektoren	4	4	1	2	3	1	4						
Vektorlänge	4	4	1	3	3	1	4	4					
Anzahl Ebenen*	4	4	4	4	4	4	4	4	4				
Packdichte*	4	4	4	4	4	4	4	4	0	4			
Drehung	3	3	0	0	0	3	3	3	1	2	4		
Beam-Offset	4	4	0	0	0	0	4	4	0	0	0	4	
Scanlinienabstand	0	4	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	4

Nachfolgend werden die Attribute und Kennzahlen der zuvor analysierten Methoden aus Tabelle 8 um potenzielle SLS-Kennzahlen ergänzt. Diese werden wiederum danach bewertet, welche Aussagekraft sie hinsichtlich verschiedener Einflüsse durch den Bauauftrag und die Prozessparameter besitzen. Die Kriterien umfassen nach Tabelle 14:

- (1,2) Die Rotation des Bauteils, d.h.: Wird eine Drehung um die xyz-Achse erkannt?
- (3) Einflüsse des verwendeten Materials und dafür notwendige Prozessparameter, d.h.: Wird der Einfluss durch verschiedene Geschwindigkeiten, Scanlinienabstände und Kompensationsfaktoren erkannt?
- (4) Spezifische Aussagen zur Komplexität für das SLS, d.h.: Werden produktionsbeeinflussende Faktoren, wie die Positionswechsel des Lasers und die Anzahl der Scanvektoren erkannt?

Zusätzlich wird erfasst, ob die Daten standardisiert ausgelesen werden können, da häufig Einschränkungen oder keine Lösungen vorhanden sind. Abgeleitet aus diesen Kriterien werden die Parameter und Kennzahlen zur weiteren Untersuchung gefiltert und in Tabelle 14 festgehalten.

Unter Berücksichtigung SLS-spezifischer Einflussfaktoren werden fünf Kennzahlen definiert. Die Konturlänge wurde bereits in einigen zuvor beschriebenen Methoden in Form des Bauteilumfangs verwendet. Aufgrund der SLS-Bearbeitungsweise, inkl. Kontur und Füllmodus, sind ähnliche Effekte wie bei dem FFF-Verfahren zu erwarten. Die Scanpfade und deren Länge werden erstmalig in dieser Arbeit als Kennzahlen eingeführt. Anhand der beschriebenen Erkenntnisse besitzen diese großes Potenzial zur Beschreibung der Komplexität.

Die Bewertung der Kennzahlen erfolgt hierbei lediglich als initiale Entscheidungshilfe und beruht auf Hypothesen und Vorversuchen. Der experimentelle Nachweis zur Beschreibungsgüte der jeweiligen Kennzahlen erfolgt in **Kapitel 4.4.** anhand von acht Versuchen, welche speziell die Einflüsse adressieren. Eine Validierung zur Beschreibungsgüte der neuen und alten Kennzahlen erfolgt zusätzlich in dem Validierungsszenario 1 in **Kapitel 5.1.** Eine Auflistung der Kennzahlen und ihre Anwendung in den entsprechenden Versuchen wird in **Kapitel 4.3.3.** ergänzend bei der Konzeption der Versuchsproben dargestellt.

Tabelle 14: Aufstellung der Merkmale und Kennwerte nach Aussagekraft und Relevanz

	Attribute					Kennzahlen (alt)				Kennzahlen neu					
	(3D) - Bauteilvolumen	(3D) - Bounding Box Volumen	(3D) - Bauteiloberfläche	(2D) - Querschnittsfläche	(2D) - Konturlänge	(2D) - Anzahl Konturen	Bauteilvol. vs. Bounding Box Vol.	Bauteilvol. vs. Bauteiloberfläche	Oberfläche vs. Bounding Box Vol.	Konturlänge vs. Querschnittsfläche	Konturlänge / Fülllänge	Konturlänge / Bauteilvol.	Konturlänge / Vol. Bounding Box Vol.	Anzahl Vektoren / Bauteilvol.	Anzahl Vektoren / Bounding Box Vol.
Legende:															
Erfüllung															
✓ = ja (1 Pkt.)															
● = mit Einschränkung (0,5 Pkt.)															
■ = nein (0 Pkt.)															
(1) Einflüsse															
(1) Rotation (z-Achse)	■	✓	■	■	■	■	✓	■	✓	■	✓	■	●	✓	✓
(2) Rotation (x/y-Achse)	■	✓	■	✓	✓	✓	✓	■	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
(3) Material/ Prozessparameter	■	■	■	●	✓	✓	■	■	■	✓	✓	✓	✓	✓	✓
(4) Komplexität SLS	■	■	■	■	✓	✓	■	■	■	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Punkte (max.)	0,0	2,0	0,0	1,5	3,0	3,0	2,0	0,0	2,0	3,0	4,0	3,0	3,0	4,0	4,0
Standardisiert auslesbar	✓	✓	✓	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●*	●*
* Entsprechende Lösungsmöglichkeiten werden innerhalb der Versuche aufgezeigt															

4.3.2. Versuchsausstattung und Prämissen

In diesem Kapitel werden die Fertigungsanlagen, Materialien und Programme beschrieben, welche zur Durchführung und Auswertung der Versuche genutzt werden. Abschließend werden die Prämissen beschrieben, welche eine eindeutige Versuchsausführung gewährleisten.

Anlagentechnik

Wie zuvor in **Kapitel 2.3** beschrieben wurde, ergeben sich für den SLS-Prozess einige Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Anlagentechnik, z.B. mit Blick auf Belichtungsstrategien und Bearbeitungsparameter. Für die Versuche werden zwei SLS-Systeme verwendet, eine **Formiga P100** der Firma EOS aus dem Jahr 2011 sowie eine **HT403P** der Firma Farsoon aus dem Jahr 2021. Nachfolgend werden diese mit P100 und HT403P abgekürzt. Die Anlagen sind jeweils mit einem CO₂-Laser ausgestattet, unterscheiden sich aber in Merkmalen wie der Bauraumgröße, in der Art der Pulverbereitstellung und -verteilung, des Scanners, der Laserleistung und Aufbaurate. Nähere Details können den Herstellerangaben entnommen werden (EOS GmbH, 2019a), (Farsoon Technologies, 2021a). Mit Blick auf die Bearbeitungsparameter besteht der Unterschied, dass für die Farsoon Anlage die jeweiligen Geschwindigkeiten für Kontur und Füllung auf feste Werte kalibriert sind²⁶. Folglich werden materialspezifisch die Parameter Laserleistung, Scanlinienabstand sowie Temperatur von Pulverbett und Baukammer angepasst. Für die EOS-Anlage wird zusätzlich zu diesen Parametern die Scangeschwindigkeit variiert.

Für die jeweiligen Anlagensysteme bestehen abseits dieser Hauptparameter zusätzliche Parameter, welche aber im Bezug zur Aufgabenstellung konstant gehalten werden. Durch die Vielzahl an Unterscheidungsmerkmalen wird gewährleistet, dass die Versuchserkenntnisse einerseits übertragbar sind, bzw. auch entsprechende Differenzen zwischen den Anlagen detektiert werden; andererseits wird durch Verwendung einer Anlage nach neuestem Stand der Technik sichergestellt, dass die Versuchsergebnisse für die entsprechende Anlagengeneration von Bedeutung sind. Zur Prüfung des Methodentransfers auf das FFF-Verfahren werden Versuche mit der Anlage Markforged Mark II durchgeführt. Durch die Möglichkeit zur Verarbeitung von Verstärkungsfasern wird es neben FFF auch als „*Continuous Fiber Fabrication*“ bezeichnet.

Zum Slicen und Simulieren der Bauzeit werden die jeweiligen herstellereigenen Programme PSW3.3 (EOS), BuildStar (Farsoon) und Eiger (Markforged) verwendet. Wie bereits durch Ruffo et al. (Ruffo et al., 2006a, S. 4) beschrieben wurde, hat die Simulation der Bauzeit den Vorteil, dass nur ein Teil der Versuche im realen Prozess durchgeführt werden muss. Dies spart Zeit und Kosten und erleichtert darüber hinaus das Screening der Faktoren.

²⁶ Die Geschwindigkeiten zum Belichten der Füllung und Kontur sind durch die Anlage fixiert und werden mit 15.240 mm/s und 3.810 mm/s durchgeführt.

Die Güte der Bauzeitabschätzung muss allerdings an realen Prozessen validiert werden, was jeweilig in **Kapitel 4.4.1** und **Kapitel 4.4.6** beschrieben wird. Ruffo et al. (Ruffo et al., 2006a, S. 4) betonen, dass die Vorhersagegenauigkeit hierbei ebenfalls einhergeht mit einer besonders für komplexe Bauteilen langsamen Berechnungsdauer, die auch mit leistungsfähigen Rechnern nicht schneller wird. Zudem kann die fehlerhafte Berücksichtigung von temperaturbezogenen Effekten in Abhängigkeit der Software zum Unterschätzen der realen Bauzeit führen.

Material

Der Einfluss des Materials wird über die benötigten Bearbeitungsparameter abgebildet. In Abhängigkeit der verwendeten Anlagensysteme ist die Auswahl der verfügbaren Materialien entweder herstellerspezifisch beschränkt (EOS) oder offen (Farsoon). Zu den Materialien werden vordefinierte Parametersätze des Anlagenherstellers bereitgestellt oder im Falle eines offenen Systems vom Materialhersteller mittels Richtwerten vorgegeben. Die Auswahl für die Versuche erfolgt anhand des vorhandenen Materialportfolios mit Blick auf die notwendigen Bearbeitungsparameter. Es wurde darauf geachtet, dass diese sich innerhalb eines Anlagensystems stark voneinander unterscheiden, um unterschiedliche Wechselwirkungen mit der Prozessdauer hervorzurufen, bzw. eine repräsentative Bandbreite abzubilden. Hinzu wird die Marktrelevanz einbezogen²⁷. Zur Versuchsdurchführung werden mit der EOS-Anlage drei verschiedene Werkstoffe verarbeitet: PA2200 (PA) sowie PEBA2301 (TPE) der Firma EOS und TPU88A (TPU) der Firma BASF, wobei die jeweiligen Standardparameter der Hersteller verwendet werden. Diese sind im Anhang in Tabelle 32 beigefügt. Die HT403P wird im Labor der htw saar speziell zur Fertigung von TPU88A (TPU) der Firma BASF verwendet. Statt verschiedener Materialien werden für die Versuche entsprechend unterschiedliche Parametersets für das gleiche Material (TPU88A) verwendet. Diese unterscheiden sich signifikant durch den Scanlinienabstand und die Anzahl der Belichtungen, sodass der Parametereinfluss deutlich wird. Für die Markforged-Anlage wird als Material Onyx verwendet, welches das Standardmaterial des Herstellers ist. Die Parameter sind durch den Hersteller überwiegend festgelegt, sodass lediglich die Anzahl der Boden-, Deck- und Wandschichten sowie die Schichtstärke und das Füllmuster variiert werden können. Eine Übersicht der Anlagen erfolgt in Tabelle 15.

²⁷ Polyamide und speziell PA12 haben über die Jahre den größten Marktanteil in der Kategorie der pulverbettbasierten Verfahren (Wohlers Associates, 2021, S. 78), wobei sich zunehmend flexible Materialien, wie TPU und TPE etablieren (Wohlers Associates, 2021, S. 102).

Tabelle 15: Verfahren und Anlagensysteme, inkl. Hersteller und Bearbeitungsart

Verfahren zur Methodenerstellung	Anlage (Hersteller)	Bearbeitungsart
Selektives Lasersintern (SLS)	Formiga P100 (EOS GmbH)	vektorbasiert
	Farsoon HT403P (Farsoon)	
Verfahren zum Methodentransfer		
Continuous Fiber Fabrication (CFF)	Mark II (Markforged)	vektorbasiert

Hardware und Software

Für die Ermittlung der Generierdauer werden zum Teil rechnerbasierte Simulationen durchgeführt und zum Teil reale Bauaufträge gefertigt, die zusätzlich gefilmt werden. Eine Übersicht der verwendeten Hard- und Software ist in Tabelle 16 und Tabelle 17 dargestellt. Wie in nachfolgender Tabelle zu sehen ist, ist die Leistung des Rechners zum Stand der Arbeit auf höchstem Niveau, sodass Probleme aufgrund der Komplexität nicht auf die Leistung des PCs zurückzuführen sind.

Tabelle 16: Verwendete Rechnerausstattung

Attribut	Bezeichnung
Betriebssystem	64-Bit Betriebssystem, Windows 10 Pro
CPU	Intel(R) Core(TM) i9-10900K CPU @ 3,7GHz
RAM	64,0 GB, 3700MHz
GPU	Nvidia Quadro RTX 5000; 16GB GDDR 6

Für die Datenanalyse wird Microsoft Excel, IBM SPSS Statistics sowie Minitab Statistical Software verwendet. Die Datengenerierung erfolgt mittels Inventor 2021 und Rhinoceros 7. Die Anordnung der Bauteile erfolgt mit der Software Netfabb 23, Magics V21 und Eiger V3.14.15. Das Slicing und die Parametrierung erfolgt in der jeweiligen Anlagensoftware (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Verwendete Software, inkl. Hersteller und Funktion

Kategorie	Software (Hersteller)	Funktion
Datengenerierung, Statistik und Auswertung	Inventor 2021 & Rhinoceros 7	CAD-Datengenerierung
	MiniTab & IBM SPSS Statistics	Datenbank & Statistik
	Adobe Photoshop 2022	Mustererkennung/Bildanalyse
	Python	Datenanalyse
	DaVinci Resolve V18	Videobearbeitung
Anlage SLS	Netfabb 23 (Autodesk)	Bauteilausrichtung/Slicing
	Magics 21 (Materialise)	
	BuildStar V1.5.3 (Farsoon)	
	PSW 3.3 (EOS GmbH)	Datenübertragung & Bauzeitsimulation
Anlage CFF	Eiger V3.14.15; Slicer V3.70.0	Slicing & Bauzeitsimulation

Das Auslesen der Scanvektoren wird anhand von 2D-Schichtdaten zunächst mittels Photoshop vorgenommen. Hierbei werden die Scanvektoren schichtweise gezählt. Da die einzelnen Schichten jeweilig manuell ausgewertet werden müssen, ist die Auswertung zunächst nur für Bauteile mit möglichst konstanten Querschnittsflächen möglich. Durch die Erkenntnisse der Versuchsdurchführung in Kapitel 4 konnte abschließend eine automatisierte Auswertung mittels Python umgesetzt werden, sodass die folgenden Validierungsversuche ohne geometrische Einschränkung realisiert werden konnten.

Die Packdichte wird in den Versuchen und bei der nachfolgenden Wirtschaftlichkeitskalkulation mit unterschiedlichen Bezugsgrößen angegeben. Dies ist notwendig, da der Bauraum als Bezugsgröße unterschiedlich definiert werden kann und somit keine Vergleichbarkeit gewährleistet wäre. Die Größe laut Hersteller unterscheidet sich von der realen Größe aufgrund spezifischer Abstände zu Randbereichen und abgerundeten Außenbereichen (Abbildung 30 – 2). Für die Kalkulation des Materialverbrauchs ist dieser Umstand essenziell, da auf die Fläche der EOS-Baukammer ein Mehrverbrauch von ca. 28 % zu verbuchen ist. In der Wirtschaftlichkeitskalkulation in **Kapitel 4.5** wird entsprechend die gesamte Fläche berücksichtigt, da diese mit Pulver bedeckt wird. Weiterhin entstehen Differenzen zwischen Angaben der Hersteller zur Baukammer und der jeweiligen Slicer-Software. Da innerhalb des Slicers die nutzbare Fläche angegeben wird, wird diese für die Versuche verwendet, um eine einheitliche Auswertung zu gewährleisten (Abbildung 30 – 1 und 2). Weiterhin wird in den Versuchen differenziert, ob sich die Packdichte auf die gesamte Bauhöhe bezieht oder auf die Höhe der jeweiligen Bauteile (Abbildung 30 - 3).

	Herstellerangabe	Istmaße	Datenvorbereitung
Farsoon	400x400x450 mm ³	400x400x450 mm ³	375x375x450 mm ³
EOS	250x200x330 mm ³	280x230x330 mm ³	250x200x330 mm ³

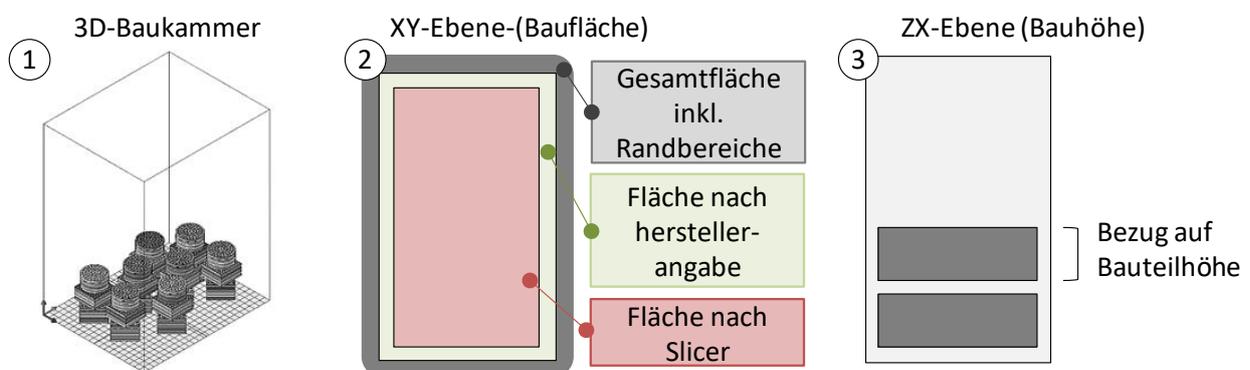


Abbildung 30: Baufläche und Packdichte nach verschiedenen Definitionen (Eigene Darstellung)

Darüber hinaus werden folgende Prämissen für die Versuche festgelegt, um eine einheitliche Datengrundlage zu gewährleisten und gleichbleibende Maschinenrandbedingungen festzulegen, sodass diese nicht für jeden Versuch einzeln wiederholt werden müssen:

- Die verwendete Schichtstärke für alle Versuche beträgt 0,1 mm um eine Vergleichbarkeit unter den Anlagen und Verfahren zu gewährleisten.
- Die Kompensationsfaktoren werden zur Kalkulation der geometrischen Merkmale einberechnet.
- Die STL-Datensätze werden mit folgenden Einstellungen in Inventor 2021 erzeugt: Flächenabweichung = 0,005, Normalen-Abweichung = 3, Max. Kantenlänge = 15, Seitenverhältnis = 21,5.
- Für den Bauraum der P100 wird eine Bodenschicht von 6 mm und eine Deckschicht von 5 mm gesetzt. Für die HT403P wird eine Bodenschicht von 6 mm und eine Deckschicht von 2,5 mm gesetzt. Der Abstand der Proben in XY-Ebene liegt bei 4 mm, in Z-Richtung bei 2 mm. Für die Markforged-Anlage werden drei Boden- und Deckschichten, drei Wandschichten sowie das Füllmuster Solid verwendet.

4.3.3. Konzeption der Versuchsproben und Versuchsplanung

Anhand des abgeleiteten Handlungsbedarfes sowie der identifizierten Wechselwirkungen aus Geometrie und SLS-Prozess werden nachfolgend verschiedene Versuchskörper abgeleitet, um die theoretischen Erkenntnisse zu quantifizieren. Diese sollen zur Evaluierung der Material/Parameterkombination bzw. deren Sensitivität gegenüber der Komplexität geprüft werden. Ausgehend von Tabelle 3, in welcher die grundlegenden Wechselwirkungen zwischen geometrischen- und verfahrensspezifischen Faktoren mit der Produktivität dargestellt wurden, erfolgt die Versuchsplanung anhand folgender Faktoren:

- Als **produktspezifische bzw. geometrische Einflussfaktoren** verbleiben entsprechend das Volumen, die Belichtungsfläche, die Fragmentierung der 2½-D-Flächen, die Bauteilskalierung sowie die Drehung des Bauteils. Diese sind individuell steuerbar, wobei eine Definition der jeweiligen Schrittweite/Faktorstufe notwendig ist.
- Als **verfahrensspezifische Einflussfaktoren** sind Variationen der Scangeschwindigkeit, des Scanlinienabstands, der Schichthöhe, der Spurbreite und der Belichtungen möglich. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese jedoch nicht im Einzelnen untersucht, sondern durch feste Parametersätze mit entsprechendem Unterscheidungsgrad abgebildet.

Zur Eingrenzung des Untersuchungsraums wurden die potenziellen Faktoren hinsichtlich des Effekts auf die Zielvariable „Generierdauer“ analysiert. Diese wird in den jeweiligen Versuchen aufgrund der Unterscheidung von Simulations- und Messdaten wie folgt unterschieden:

- Durch die Simulation wird die Generierdauer aufgenommen.
- Im realen Prozess wird die Belichtungsdauer pro Bauteilquerschnitt bzw. pro Schicht sowie die Dauer zum Generieren der kompletten Bauteilhöhe in Z-Richtung ermittelt. Differenziert wird hierbei zwischen der „Belichtungsdauer“, d.h. Anfang bis Ende der Bauteilbelichtung, sowie dem „Aufheizen und Pulverauftrag“, welcher ab Ende der Belichtung bis zum erneuten Beginn der Belichtung definiert wird.

Die Versuchsplanung richtet sich wie in **Kapitel 2.6** beschrieben nach entsprechenden Grundlagen der statistischen Versuchsplanung. Im Vorfeld konnten durch Screeningexperimente bereits Erkenntnisse zu den Faktoren und Faktorstufen sowie Fehlermöglichkeiten zur Gestaltung des Versuchsaufbaus und der Versuchsproben gewonnen werden. Aufgrund der Charakteristik der Versuchsproben und der Unterteilung in Simulation und experimentelle Messungen unterscheiden sich die Versuche in Abhängigkeit der zu ermittelnden Zielgröße und dem dafür verwendeten Versuchsumfang.

Der Versuchsablauf sieht hierbei vor, dass zunächst für beide SLS-Anlagen Vorversuche durchgeführt werden, um die Auswirkungen der Komplexität im realen Prozess und die Gültigkeit der Bauzeitabschätzung nachzuweisen. Diese werden jeweils in Versuch V1 und Versuch V6 durchgeführt, wobei die Ergebnisse im Sinne einer nachvollziehbaren Versuchsplanung bereits vorgezogen dargestellt werden. Folglich kann eine Bauzeitabschätzung lediglich für die EOS Anlage mit einer mittleren Abweichung von 3,62 % durchgeführt werden; die der Farsoon Anlage ist mit einer Abweichung von über 40 % nicht verwendbar, sodass die entsprechenden Versuche real gefertigt werden müssen.

Im Sinne einer ressourcenschonenden Versuchsdurchführung werden zur Prüfung der Grundannahmen zunächst Simulationen mit der EOS-Software durchgeführt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen erfolgt anschließend der Transfer auf die Farsoon Anlage im experimentellen Versuch. Hierbei wird jedoch nur der Vorversuch für beide Anlagen gleich durchgeführt. Aufgrund der Möglichkeit zur freien Einstellung der Bearbeitungsparameter für das Farsoon System werden weitere Hypothesen geprüft, die mit dem EOS-System aufgrund der geschlossenen Parameter nicht möglich sind. Detaillierte Erläuterungen zu den jeweiligen Versuchen werden nachfolgend beschrieben.

Folgende Abbildung 31 zeigt vorab eine schematische Darstellung des Versuchsablaufs, wobei die realen Versuche mit einem grünen Punkt gekennzeichnet sind. Im Gegensatz zu Arbeiten aus dem Stand der Technik, welche eine Vielzahl unterschiedlicher Bauteile und Geometrien nutzen, werden im Sinne einer strukturierten Vorgehensweise zunächst einheitliche geometrische Grundformen verwendet, wie z.B. Kreis und Viereck. Diese gewährleisten in extrudierter Form einen gleichbleibenden Querschnitt beim schichtweisen Aufbau.

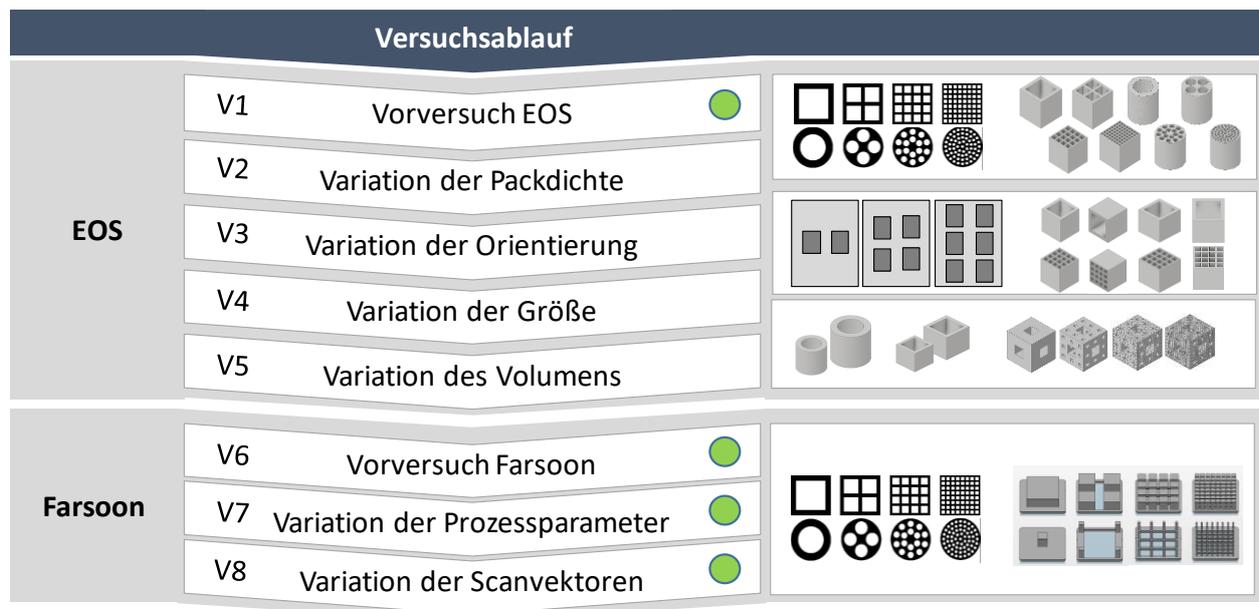


Abbildung 31: Schematischer Versuchsablauf

Diese Vorgehensweise reduziert zu Beginn die Anzahl an Einfluss- und Störgrößen und ermöglicht eine systematische Anpassung der Faktoren. Resultierend sind zur Ermittlung der Auswirkungen auf die Generierdauer folgende Bauteile definiert worden: Für **Versuch 1 bis 4** sowie **Versuch 6 und 7** sind zwei Bauteile aus den Grundformen Kreis und Viereck abgeleitet worden, welche in extrudierter Form einen Würfel und einen Zylinder mit einer Bounding Box in Form eines Würfels ergeben. Zur Steigerung der Komplexität werden diese mit variierenden Ausschnitten versehen, um eine Fragmentierung zu realisieren (Tabelle 18). Weiterhin können die Bauteile in ihrer Orientierung um die Z-Achse verändert werden, ohne eine Veränderung der **Bauhöhe** hervorzurufen. Um die X-Y-Achse eignet sich hierzu eine Drehung um 90°. Das **Volumen** der Bauteile sowie deren Bauteilhöhe bleiben innerhalb eines Versuchs gleich, um zu gewährleisten, dass lediglich die Komplexität verändert wird. Zur Steigerung der Komplexität durch Fragmentierung werden die Ausschnitte innerhalb des Bauteils stufenweise von 1 auf 4, 16 und 64 Ausschnitte erhöht.

Die Schrittweite wurde durch vorherige Screeningversuche sowie Empfehlungen der Literatur (Kleppmann, 2016, S. 27–28) nach folgenden Faktoren gewählt:

1. Es wird ein hinreichend großer Effekt bei der Antwortvariable/Zielvariable hervorgerufen.
2. Die abgedeckte Bandbreite kann in den Gestaltungsprozess zurückgeführt werden.
3. Es wird gewährleistet, dass nichtlineare Effekte zwischen der kleinsten und höchsten Stufe identifiziert werden können, die z.B. durch physikalische oder technische Phänomene auftreten.
4. Die Mindestwandstärke wird auf höchster Stufe nicht unterschritten.
5. Die Anzahl der Positionswechsel/Sprünge wird durch Fragmentierung gesteigert.

Tabelle 18: Würfel und Zylinder in verschiedenen Komplexitätsstufen (ohne Kompensation)

	Kantenlänge	 W1	 W2	 W3	 W4	 Z1	 Z2	 Z3	 Z4
Anzahl Löcher		1	4	16	64	1	4	16	64
Lochgröße [mm]	40	30	15	7,5	3,75	26,4	13,2	6,6	3,3
	50	37,5	18,75	9,37	4,68	33	16,5	8,25	4,13
Wandstärke min [mm]	40	5	3,3	2	1,1	6,8	2,3	0,9	0,7
	50	6,25	4,16	2,5	1,38	8,5	2,94	1,13	0,88
Konturlänge XY [mm]	40	280	400	640	1120	209	292	457	789
	50	437,5	625	1000	1750	260,8	364,4	571,8	986,5
		-	+43%	+129%	+300%	-	+40%	+119%	+278%
Volumen [cm³]	40	28				28,36			
	50	54,68				55,39			

Die Probekörper aus Tabelle 18 werden durch Vorversuche im realen Prozess mit der EOS-Anlage (Versuch 1) sowie der Farsoon Anlage (Versuch 6) gefertigt, um Rückschlüsse zur Tauglichkeit der Simulation und Begleiteffekten, wie der Rauchbildung zu erhalten. Für den Fertigungsprozess werden die Proben jeweils auf separaten Ebenen gefertigt, um die Auswirkungen auf die Dauer zum Generieren (Belichten, Pulverauftragen und Heizen) möglichst ohne Störeinflüsse aufnehmen zu können. Die Proben werden im Vorversuch zusätzlich mit reduzierter Z-Höhe ausgeführt, da der Prozess gefilmt und durch weitere Messungen begleitet wird.

Die Ausführung mit voller Probenhöhe würde mehrere Bauaufträge mit einer Bearbeitungsdauer von über 24 Stunden erfordern und ist mit Blick auf den Nutzen zum Aufwand nicht adäquat. Diesbezüglich wird nur eine Probendrehung um die Z-Achse berücksichtigt, da die Verringerung der Höhe keine Querschnittsänderung in Form einer Drehung um die X-Y-Achse zulässt. Die Simulationsversuche mit der EOS-Anlage werden mit ca. 2/3 der Bauhöhe ausgeführt, sodass der Einfluss der jeweiligen Faktoren ausreichend dargestellt wird. Diese Höhe repräsentiert den Mittelweg zwischen Szenarien mit unzureichender Höhe sowie idealisierten Baujobs in voller Höhe.

Durch Ruffo et al. (Ruffo et al., 2006a, S. 7) wurde untersucht, wie sich die Bauhöhe für den Fall auswirkt, dass die gleichen Bauteile inklusive gleicher Packdichte mit verschiedenen Bauhöhen gefertigt werden. Es konnte hierbei gezeigt werden, dass bei gleichbleibender Schichtbelegung ein linearer Verlauf entsteht, sodass dieser Faktor in weiteren Versuchen nicht als einzelne Versuchsgröße untersucht wird.

Zur Evaluierung des **Größeneinflusses** werden die Proben mit Bezug zu deren Bounding Box als Würfel mit einer Kantenlänge von 40 mm sowie mit 50 mm ausgeführt, was nahezu einer Verdopplung des Volumens entspricht. Die Bauteilgröße wurde im Hinblick auf die Produktion entsprechend so gewählt, dass die Erkenntnisse nicht durch zu geringe Strukturstärken eingeschränkt werden, die Bauteilgröße durch Multiplikation zur Gegenüberstellung der 40 mm Version geeignet ist und der Materialaufwand beschränkt wird (siehe Tabelle 18).

Für **Versuch V5** wird auf den sogenannten Menger-Schwamm²⁸ zurückgegriffen, mit dessen Hilfe systematisch die Komplexität gesteigert und gleichzeitig das Volumen reduziert wird. Er umfasst die Stufen von null bis fünf, wobei mit zunehmender Stufe das Bauteilvolumen abnimmt und die Anzahl der Elemente bzw. die Konturlänge zunimmt. Abbildung 32 zeigt die verschiedenen Stufen. Im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen wird geprüft, welcher Aufwand bei der Umsetzung AM-spezifischer Vorteile wie der **Volumenreduktion** und Erhöhung der Komplexität entsteht. Dieses Bauteil wurde bereits von Hartogh und Vietor (Hartogh & Vietor, 2018) als Maß für die Komplexität von Bauteilen verwendet. Es wird beschrieben, dass mit zunehmendem Iterationsschritt eine Fläche entsteht, deren Komplexität ab einem gewissen Grad nicht mehr mit additiven Verfahren hergestellt werden kann (Hartogh & Vietor, 2018, S. 75).

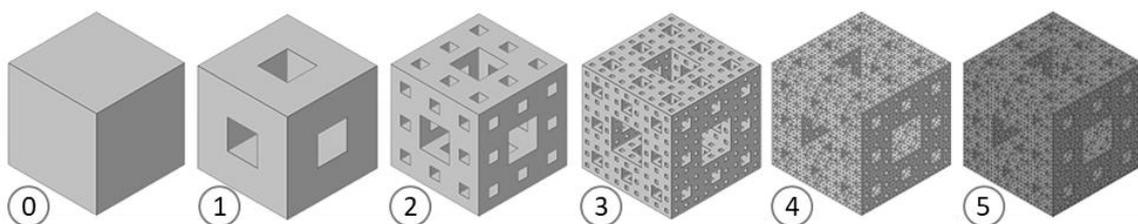


Abbildung 32: Menger Schwamm in den Stufen null bis fünf (Eigene Darstellung)

Für **Versuch V8** wird eine weitere Probenart erstellt, die gezielt zur Variation der Scanvektorlänge und der Anzahl an Vektoren geeignet ist.

²⁸ Dieser basiert auf dem zweidimensionalen Sierpinski Teppich, welcher dadurch entsteht, dass mit fortlaufender Stufe jeweils das innere Neuntel des Würfels gelöscht wird, womit ein unendlich langer Umfang mit einer geschlossenen Fläche entsteht, die gegen Null strebt (Hartogh & Vietor, 2018, S. 75). Wird diese zweidimensionale Struktur auf einen dreidimensionalen Würfel übertragen, entsteht das Fraktal Menger-Schwamm (engl. Menger Sponge) (Helmberg, 2007, S. 50), welches als Standardbauteil in Netfabb 23 erzeugt werden kann.

Die Proben in Abbildung 33 wurden entsprechend so gestaltet, dass bei gleichbleibendem Volumen die Querschnittsfläche mit jeder Komplexitätsstufe geteilt wird. Die Kantenlänge nimmt hierbei systematisch ab und die Anzahl der Sprünge zu. Der Anteil von Kontur zur Füllung steigt mit jeder Stufe an. Durch diesen ist eine Erhöhung der Belichtungsdauer infolge der reduzierten Konturgeschwindigkeit zu erwarten. Die Proben werden geteilt in Strukturen mit einer Kantenlänge von 28, 14, 7 und 3,5 mm, um den Einfluss größerer Querschnitte aufzunehmen sowie 8, 4, 2 und 1 mm zur Berücksichtigung feiner Strukturen. Die Konturlänge wird mit jeder Stufe verdoppelt wie dies in nachfolgender Tabelle 19 dargestellt ist. Zur Vermeidung ungleichmäßiger Abkühlzeiten und Verzug wurde der Probekörper quadratisch gestaltet.

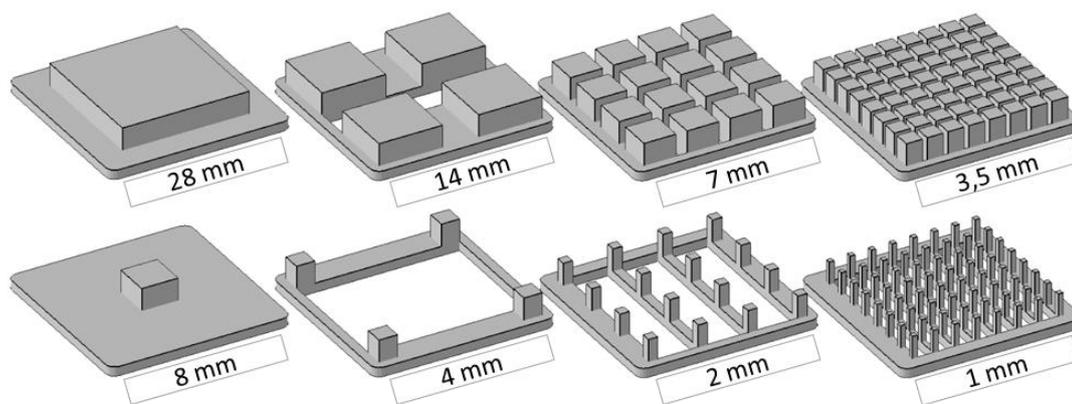


Abbildung 33: Prüfkörper „Fragment“ in zwei Volumenvarianten

Tabelle 19: Relative Entwicklung der Konturlänge mit zunehmender Komplexitätsstufe

Konturlänge	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
Variante				
Groß (Fläche = 784 mm ²)	112 mm	224 mm	448 mm	896 mm
Klein (Fläche = 64 mm ²)	32 mm	64 mm	128 mm	256 mm

Die Kantenlänge ist so definiert worden, dass die Strukturen einerseits mit Bezug zu den DfAM-Richtlinien aus Tabelle 9 fertigbar sind und die Abstufung wie bereits zuvor eine Bandbreite für die Rückführung in den Gestaltungsprozess zulässt. Darüber wird erfasst, welchen Einfluss die Belichtung der Außenkontur besitzt. Die Bodenschicht dient dem Zusammenhalt der einzelnen Elemente, fließt aber nicht in die Messungen mit ein. Die Versuche werden nach vollfaktorieller Versuchsplanung durchgeführt, welche die Kantenlänge (acht Stufen), die Parametersätze (zwei Stufen) sowie den Modus ohne und mit Kontur umfasst (zwei Stufen). Die Parametersätze der Maschine umfassen Änderungen der Parameter „Scanlinienabstand“, „Laserleistung“ und „Anzahl der Belichtungen“. Die Scangeschwindigkeit und die Schichthöhe bleiben konstant.

Mit den Probenkörpern werden zusammengefasst folgende Untersuchungen angestellt:

EOS-Formiga P100

- In **Versuch V1** wird die Auswirkung der Komplexität als Vorversuch an der Anlage Formiga P100 getestet. Hierdurch werden grundsätzliche Auswirkungen auf die Prozessdauer sowie indirekte Faktoren, wie Materialersetzung und Bauteilverzug aufgenommen.
- In **Versuch V2** wird geprüft, welche Auswirkungen die Packdichte in Kombination mit der Komplexität besitzt. Hierzu wird lediglich die Würfelgeometrie verwendet.
- In **Versuch V3** wird untersucht, welchen Einfluss materialspezifische Parameter sowie die Bauteilorientierung auf die Generierdauer besitzen.
- In **Versuch V4** wird zusätzlich die Größe der Versuchskörper um 25 % erhöht, um den Größeneffekt auf die Komplexität aufzunehmen.
- In **Versuch V5** werden Versuchsproben in Form eines Menger Schwamms verwendet, wobei zusätzlich zur Komplexitätssteigerung das Volumen reduziert wird.

Farsoon HT403P

- In **Versuch V6** werden die Probekörper aus Versuch V1 verwendet, um den Transfer auf eine weitere SLS-Anlage (Farsoon HT403P) zu prüfen.
- In **Versuch V7** werden die Probekörper „Würfel“ und „Zylinder“ mit zwei verschiedenen Parametersätzen gefertigt, um die Sensitivität gegenüber verschiedenen Bearbeitungsparametern darzustellen.
- In **Versuch V8** werden Proben verwendet, die speziell zur Analyse der Bearbeitungspfade ausgelegt sind.

Zusätzlich wird in folgender Tabelle 20 eine Übersicht der jeweilig untersuchten Kennzahlen der Versuche (V1-V8) sowie der Validierungsszenarien (S1-S3) dargestellt. Diese unterscheiden sich aufgrund des Versuchsziels und der Auswertemöglichkeiten. Der gesamte Versuchsplan wird in nachfolgender Tabelle 21 abgebildet.

Tabelle 20: Auflistung der ermittelten Faktoren

Versuch	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	S1	S2	S3
Konturlänge / Volumen	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓
Konturlänge / Bounding Box	✓	-	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	-
Konturlänge / Fülllänge	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	-	-
Anzahl Vektoren / Volumen	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-
Anzahl Vektoren / Bounding Box	✓	-	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	-

Tabelle 21: Übersicht der Versuche zur Ermittlung der Wechselwirkungen

Versuch		V1	V2	V3		V4	V5	V6	V7	V8
Vorversuch EOS										
Packdichte										
Drehung x										
Drehung z										
Drehung y										
Volumen										
Größe										
Material										
Anlage										
Messgröße										
1	Geometrie	Würfel & Zylinder	Würfel	Würfel	Würfel	Würfel	Menger Schwamm	Würfel & Zylinder	Würfel & Zylinder	Fragment klein Fragment groß
2	Anlage	EOS	EOS	EOS	EOS	EOS	EOS	Farsoon	Farsoon	Farsoon
3	Material	TPU	TPU, PA12, PEBA	TPU, PA12, PEBA	TPU, PA12, PEBA	TPU, PA12, PEBA	TPU, PA12, PEBA	TPU (P1)	TPU (P1) TPU (P2)	TPU (P1) TPU (P2)
4	Simulation/ Real	S + R	S	S	S	S	S	R	R	R
5	Bauteilgröße	40x40x3	40	40	50	50	70	40x40x3	40x40x3	siehe Versuch
6	Komplexitätsstufen	4	4	4	4	4	5	4	4	4
7	Bauhöhe/ Höhe Versuch	107,6	218,3	218,3	218,3/216,3	218,3	224,3	-	-	-
8	Packdichte	11,2 %/ 11,3 %	5,6%/11,2% /16,8%	10,8 % / 10,9 %		siehe Versuch		11,5 %/ 11,6 %	11,5 %/ 11,6 %	0,7 %/ 8,9 %
9	Drehung x	-	-	90	-	-	-	-	-	-
10	Drehung z	ja	-	-	45	-	-	ja	-	-
11	Volumen	-	ja	-	-	+25%	ja	-	-	ja
12	Oberfläche	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja
13	Kontur	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja
14	Anzahl/Länge Vektoren	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
15	Messgröße	Bauzeit Schichtdauer	Bauzeit	Bauzeit	Bauzeit	Bauzeit	Bauzeit	Schichtdauer	Schichtdauer	Schichtdauer
16	Forschungsfrage	1&2	1&2	1&2	1&2	1&2	1&2	1&2	1&2	1&2
17	Legende	Aktive Veränderung		Indirekte Veränderung		Keine Veränderung				

4.4. Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel werden basierend auf den vorherigen Ausführungen zur Probenkonzeption und dem Versuchsplan die jeweiligen Versuche beschrieben. Es erfolgt hierzu die entsprechende Beschreibung zum Versuchsziel, dem Versuchsaufbau, der Versuchsauswertung und Diskussion sowie daraus abgeleitete Erkenntnisse.

4.4.1. V1 - Vorversuch (Formiga P100)

Versuchsziel

Der erste Versuch wird durchgeführt, um die Generierdauer für verschiedene Komplexitätsstufen im realen Fertigungsprozess zu ermitteln und Begleiteffekte, wie Verzug und Materialersetzung aufzunehmen. Es wird geprüft, welchen Einfluss die Kontur- und Fülllänge sowie die Scanpfade besitzen. Zusätzlich werden die Simulationsergebnisse mit der realen Bauzeit verglichen. Die Ergebnisse wurden auszugsweise veröffentlicht in (Häfele et al., 2023).

Versuchsaufbau

Um sicherzustellen, dass diese Ergebnisse entsprechend verwendbar sind, werden einerseits vergangene Bauaufträge mit der angegebenen Simulationsdauer verglichen. Hierzu ist für 22 Aufträge mit dem Material PA12 eine Abweichung mit einem Mittelwert von 3,62 % ermittelt worden, der Median beträgt 3,28 %, der Minimalwert 0,95 %, der Maximalwert 7,59 %. Zur Prüfung des Transfers auf das Material TPU88A sowie zur Validierung der Genauigkeit im realen Generierprozess wird ein Auftrag mit Geometrien unterschiedlicher Komplexität gefertigt. Aufgrund der Notwendigkeit die Schichtzeiten sowie die gesamte Prozessdauer aufzunehmen, wird im Rahmen des Vorversuchs eine angepasste Version der Bauteile Würfel und Zylinder mit 40 mm Kantenlänge genutzt. Diese unterscheidet sich dahingehend, dass lediglich ein gleichbleibender Querschnitt aufgenommen wird, welcher mit 3 mm Höhe gefertigt wird. Entsprechend wird nur eine 45°-Drehung um die Z-Achse erfasst, da eine Drehung um die X-Y-Achse die vollständige Größe erfordert. Wie in Abbildung 34 zu sehen ist, werden innerhalb des Versuches vier Komplexitätsgrade des quadratischen- und zylindrischen Bauteils gefertigt, um jeweils 30 Schichten zur Auswertung zu generieren. Diese werden jeweils separat in einer Ebene mit einer Stückzahl von acht gefertigt. Die Packdichte der jeweiligen Schichten beträgt für den Würfel 11,2 % und für den Zylinder 11,3 %. Es wird eine Bauhöhe von 82,1 mm generiert. Neben der Gesamtdauer werden die Prozesse Belichten sowie Pulverauftrag und Heizen aufgenommen.

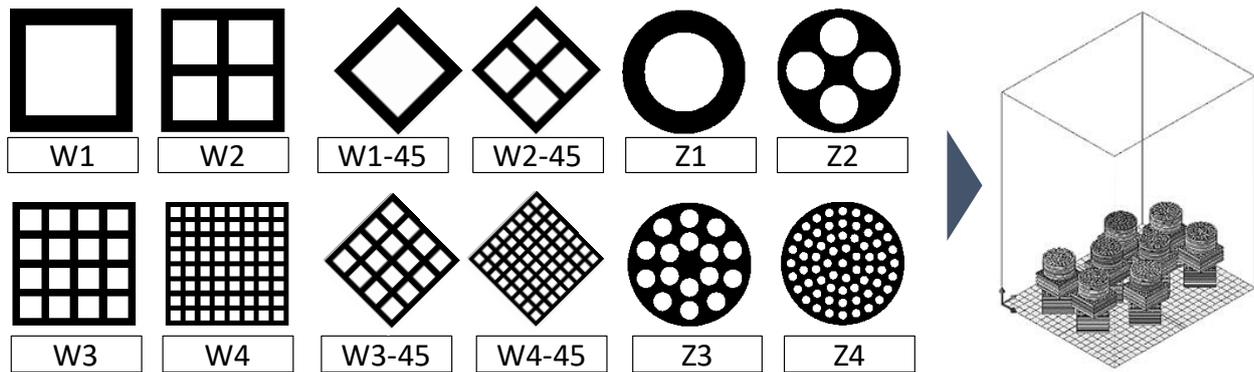


Abbildung 34: Schematische Darstellung der Versuchsgeometrien und des Baujobs

Versuchsauswertung und -diskussion

Die simulierte Dauer wurde mit 06:06:27 Stunden angegeben; der reale Bauauftrag wurde nach 05:58:53 Stunden abgeschlossen, was einer Abweichung von 2,06 % entspricht. Unter dem Gesichtspunkt der ressourcenschonenden Versuchsdurchführung werden mit diesen Abweichungen hinreichend genaue Aussagen getroffen. Folglich werden die EOS-spezifischen Versuche in den Folgeversuchen V2, V3, V4 und V5 simuliert. Zur Darstellung der Auswirkungen wird in Abbildung 35 die Generierdauer für die jeweiligen Bauteile angegeben. Zusätzlich wird die prozentuale Steigerung der Gesamtdauer ausgehend von Stufe eins dargestellt. Die Würfel, welche um 45° gedreht wurden, erfordern die längste Bearbeitungsdauer, jedoch sind Länge und Anzahl der Scanvektoren gleichmäßiger verteilt, wie dies in Abbildung 36 dargestellt wird. Von Stufe eins bis vier ergeben sich Verlängerungen der Belichtungsdauer für den Würfel um 33 %, für den Würfel mit 45° -Drehung um 67 % sowie für den Zylinder um 79 %. Die Dauer zum Pulverauftrag und Heizen steigt für den Würfel um 13 %, für den Würfel mit 45°-Drehung um 17 % sowie für den Zylinder um 13 %.

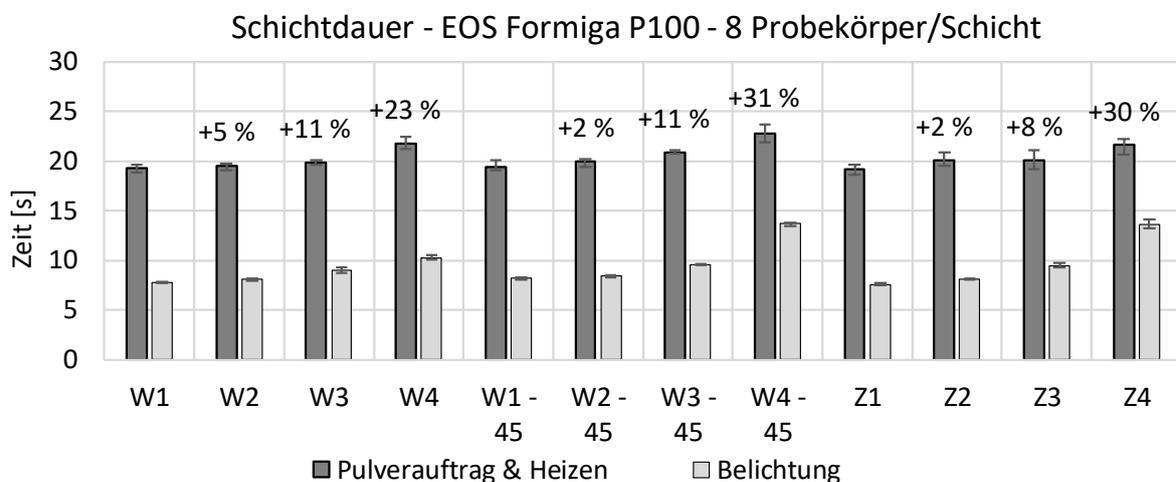


Abbildung 35: Schichtdauer für unterschiedliche Komplexitätsgrade – EOS Formiga P100 (Die prozentualen Steigerungsraten der Gesamtdauer beziehen sich jeweilig auf Stufe eins)

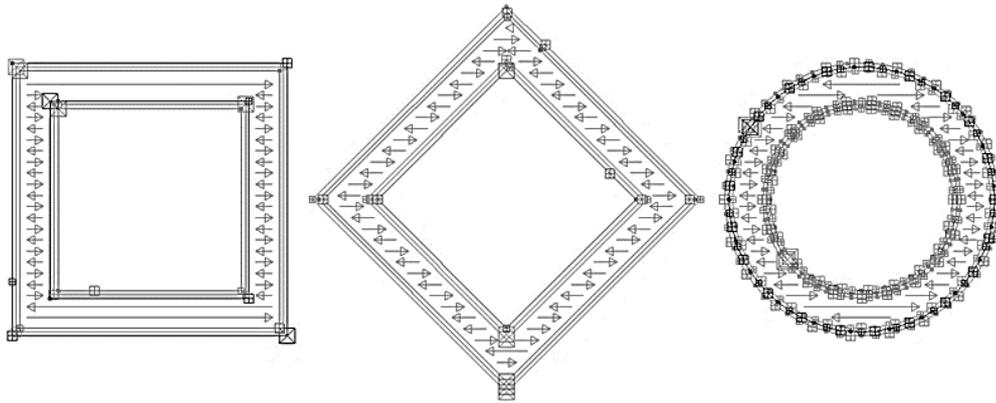


Abbildung 36: Scanvektoren für die Bauteile Würfel, Würfel45° und Zylinder in Stufe eins

Entsprechend benötigt der Heizprozess mehr Zeit, um die thermische Stabilität durch Aufheizen/Abkühlen wiederherzustellen. Diesen Umstand beschreiben Ruffo et al. (Ruffo et al., 2006a, S. 9) ebenfalls in ihren Untersuchungen. Der Anteil des Pulverauftrags an der Generierdauer pro Schicht nimmt trotz ausreichend hoher Packdichte einen Wert zwischen 61 und 72 % an. Lediglich bei den höchsten Komplexitätsstufen reduziert sich dieser Wert für Z4 und W4-45 auf einen Anteil von 61 bis 62 %. Eine These besteht darin, dass es aufgrund zu kurzer Scanpfade zu Temperaturüberhöhungen kommt, die folglich eine Materialersetzung /Verdampfungseffekte hervorrufen. Diese kühlen stärker aus und müssen in Folge wieder stärker beheizt werden. Eine weitere Erklärung wird durch Wegner (Wegner, 2015, S. 133) beschrieben. Dieser gibt an, dass es besonders bei hohen Energiedichten dazu kommt, dass die Schmelztemperatur im Querschnitt nach Erreichen des maximalen Niveaus - ca. 10 Sekunden nach der Belichtung - wieder langsam absinkt bis zum erneuten Pulverauftrag. Besonders für die Stufe vier der jeweiligen Probekörper wird diese Zeit überschritten (Wegner, 2015, S. 133).

Neben den Messdaten sind hierzu negative Begleiteffekte festgestellt worden, die sich insofern äußern, dass ab Stufe drei für alle Geometrien eine sichtliche Materialersetzung eintritt. Diese nimmt mit Stufe vier weiter zu und zeichnet sich durch eine gesteigerte Rauchbildung aus. Ab Komplexitätsstufe vier ist bei allen Geometrien, besonders bei den quadratischen Proben, ein Bauteilverzug in Form von Curling festzustellen, wie dies nachfolgend dargestellt wird.

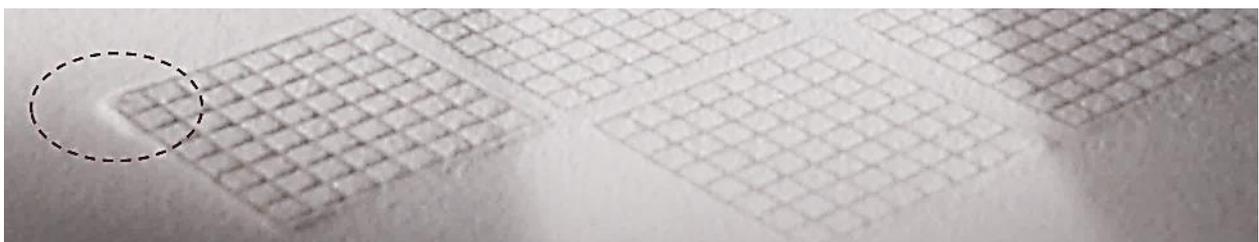


Abbildung 37: Detailansicht von Q4-45 mit Blick auf das Curling der Außenbereiche (Eigene Darstellung)

In Anlehnung an die vorgestellten Formeln zum Energieeintrag und die Abkühldauer der Einzelbahnen nimmt die Abkühlzeit für kleine Strukturen (in diesem Fall höhere Komplexitätsgrade) ab und die eingebrachte Energiemenge zu. Mit Blick auf Bauteile mit unterschiedlichen Querschnitten ergeben sich durch die Länge und den Energieeintrag unterschiedliche Sintertiefen. Für feste Parametersätze bedeutet dies, dass große Querschnitte entsprechend gut verbunden werden, der Energieeintrag bei kleinen Strukturen allerdings zur Temperaturüberhöhung und Materialzersetzung führt. Eine mögliche Verbesserung könnte durch Reduktion der Energiedichte umgesetzt werden, sodass diese auf kleine Strukturen angepasst wird. Hierzu ist zu prüfen, für welche Querschnitte geeignete Verbindungsfestigkeiten gewährleistet werden, da die Energie nicht mehr ausreichen könnte, um eine Verbindung für größere Querschnitte zu schaffen.

Zur weiteren Analyse von Zusammenhängen zwischen der Generierdauer und den geometrischen Faktoren Konturlänge, Füllvektoren und Fülllänge sind deren Streudiagramme untersucht worden und in Abbildung 38 sowie Abbildung 39 dargestellt. Resultate hieraus sind:

- Die **Konturlänge/Volumen** weist ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,8082$ auf, d.h. es besteht eine starke Korrelation mit der Generierdauer. Probleme entstehen allerdings, da sich durch die 45°-Drehung keine Änderung der Konturlänge ergibt und somit keine Erklärung für eine verlängerte Generierdauer möglich ist. Das Bestimmtheitsmaß verschlechtert sich zusätzlich durch den Bezug zur Bounding Box.
- Im Vergleich verbessert sich das Bestimmtheitsmaß durch die **Füllvektoren/Volumen** auf $R^2 = 0,862$, da der Einfluss der Drehung aufgenommen wird. Eine Aufnahme aller Vektoren führt wiederum zur Verringerung auf $R^2 = 0,7509$, da die Geschwindigkeiten für die Belichtung der Kontur und Füllung unterschiedlich sind und entsprechend nicht erfasst werden. Der Bezug zum **Bounding Box Volumen** (BB Vol.) verringert den Wert ebenfalls.
- Das Verhältnis aus **Konturlänge/Fülllänge** erreicht einen Wert von $R^2 = 0,7763$ und liefert eine mittlere bis hohe Beschreibungsgüte.

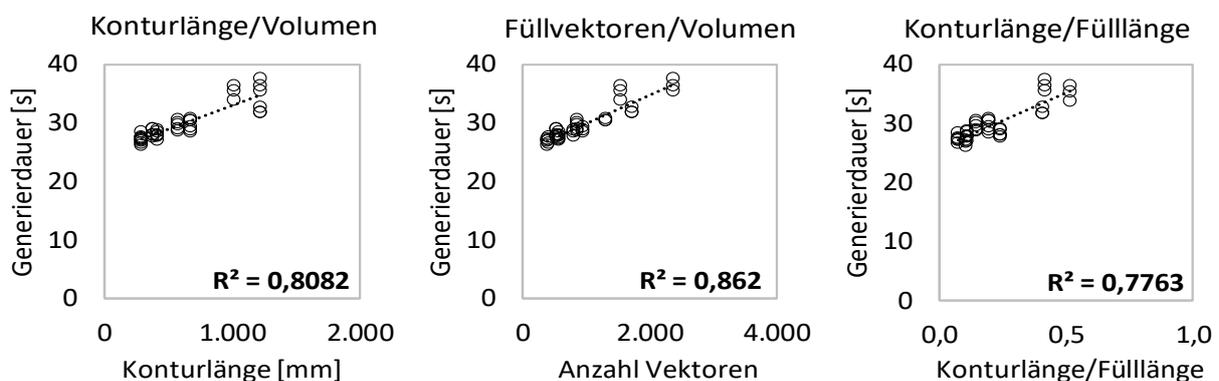


Abbildung 38: Konturlänge und Füllvektoren pro Volumen und Konturlänge/Fülllänge

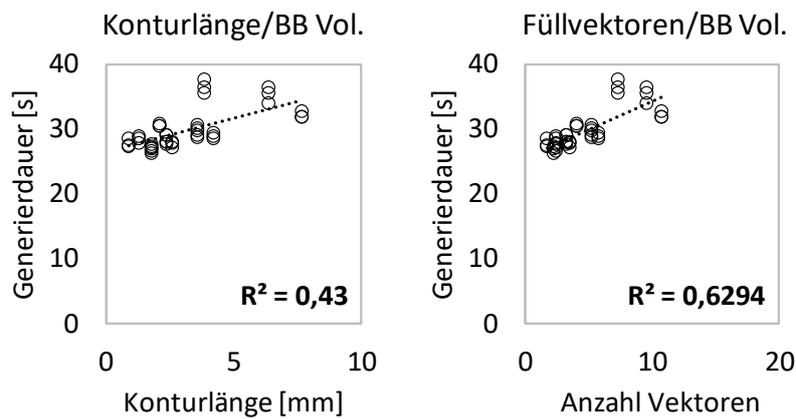


Abbildung 39: Konturlänge und Füllvektoren pro Bounding Box Volumen

Zu berücksichtigen ist, dass die Anzahl der untersuchten Geometrien und Einflüsse in diesem Vorversuch lediglich einen grundlegenden Einblick bieten.

Es sind folgende Erkenntnisse festzuhalten:

- Obwohl das eingesetzte Material einen KF-Wert von 1 besitzt, zeigt die Komplexität signifikante Auswirkungen. Da die Kontur theoretisch nicht mit verringerter Geschwindigkeit bearbeitet wird, ist die Verlängerung entweder auf die notwendigen Positionswechsel des Scanners zurückzuführen oder anlagentechnisch auf eine Drosselung der Geschwindigkeit für kleine Scanvektoren, wie dies in **Kapitel 2.3.3** beschrieben wurde.
- Die Dauer des Generierprozesses für die P100 wird maßgeblich durch den **Pulverauftrag und das Heizen** der Schichten beeinflusst, sodass die Bauhöhe, respektive die **Anzahl der Schichten** einen Haupteinfluss auf die Maschinenlaufzeit bilden. Die Dauer zum Belichten steigt mit zunehmender Komplexität signifikant an, jedoch bleibt die Dauer zum Pulverauftrag und Heizen der dominierende Faktor.
- Zusätzlich erhöht sich die Dauer für das Aufheizen mit zunehmender Komplexität. Eine eindeutige Herleitung ist zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht möglich.
- Die Verlängerung der Prozessdauer erhöht allgemein die thermische Belastung des Materials (beschleunigte Alterung) sowie den Verbrauch von Hilfsstoffen und Energie.
- Entgegen bisheriger Annahmen nimmt die Komplexität neben der Bauhöhe signifikanten Einfluss auf das Fertigungsergebnis in Bezug auf die Prozesssicherheit und Bauteilqualität.
- Die Kennzahlen bieten eine überwiegend hohe Beschreibungsgüte, insofern sie sich auf das Bauteilvolumen beziehen. Die Berücksichtigung der Bounding Box verschlechtert die Aussagekraft deutlich und bietet entgegen der theoretischen Annahmen keine verbesserte Aussagekraft hinsichtlich einer Bauteilrotation.

4.4.2. V2 - Packdichte

Versuchsziel:

In diesem Versuch werden die Auswirkungen der geometrischen Komplexität gegenüber der Packdichte untersucht. Diese setzt sich aus der belichteten Fläche im Verhältnis zu der Pulverfläche zusammen. Ähnlich wie bei der Bauhöhe ist auch hier davon auszugehen, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen der Packdichte und der Belichtungsdauer gibt. Dies ist von Interesse, da die Folgeversuche mit reduzierter Packdichte und damit geringerem Rechenaufwand simuliert werden können.

Versuchsaufbau:

Als Probekörper dient das Bauteil „Würfel“ mit 40 mm Kantenlänge und den Materialien PA12, TPU88a und PEBA3201. Das Bauteil wird in den Komplexitätsstufen eins und vier simuliert, um die Grenzbereiche abzudecken. Die Packdichte wird in drei Stufen ausgeführt, um die Linearität zu prüfen. In Anlehnung an den Stand der Technik in **Kapitel 2.4.2** wird eine mittlere Packdichte²⁹ von 10,77 % gewählt, die auf 5,38 % reduziert und auf 16,15 % erhöht wird, um entsprechende Abweichungen vom Durchschnitt zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 40). Die Packdichte in der jeweiligen Bauteilschicht beträgt 5,6%, 11,2 % und 16,8 %. Die Bauhöhe beträgt 218,3 mm.

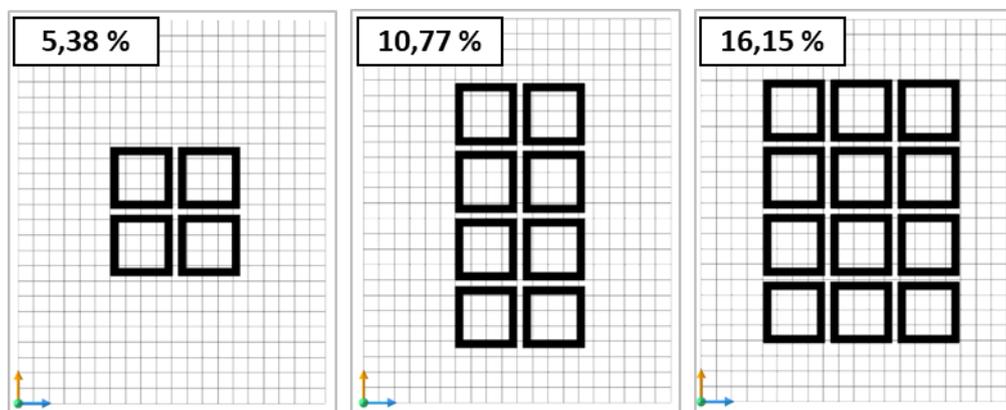


Abbildung 40: Packdichten von 5,38 % - 16,15 % für die Anlage Formiga P100

Die untere Grenze der Packdichte wird beispielhaft für Bauteile mit großer Bounding Box und niedrigem Volumen erreicht, z.B. durch Anwendung von Gitterstrukturen. Ein Validierungsbeispiel erfolgt hierzu in **Kapitel 5.2**. Die obere Grenze bilden Bauteile, welche geometrisch gut stapelbar und/oder verschachtelt angeordnet werden können, z.B. durch einen Bauauftrag mit gemischten Geometrien.

²⁹ Diese bezieht sich auf die angegebenen XY-Abmessungen von 200x250 mm²

Hier ist die maximale Schichtdauer zu berücksichtigen, welche mit der Kristallisation der Bauteile zusammenhängt, da eine zu lange Dauer das Curling begünstigt. Es ist zu beachten, dass die Bauteile für die Simulation keinen Anspruch auf thermische oder mechanische Eigenschaften haben, da als Zielgröße die Generierdauer betrachtet wird. Der Einfluss der Bauteilposition und die gleichmäßige Temperaturverteilung werden entsprechend vernachlässigt, sind aber für die Gesamtauslegung des SLS-Prozesses von Bedeutung, wie dies in **Kapitel 2.3.** beschrieben wurde.

Versuchsauswertung und -diskussion:

Für alle Materialien konnte für Packdichten von 5,38 % bis 16,15 % ein nahezu linearer Verlauf der Generierdauer gezeigt werden (siehe Abbildung 41). Mit zunehmender Packdichte steigt die Schichtdauer aufgrund des Belichtungsvolumens an, die Auswirkungen der Komplexität bleiben jedoch innerhalb der jeweiligen Stufe erhalten. Mit zunehmender Packdichte werden die Differenzen zwischen den Komplexitätsstufen entsprechend höher bzw. ebenfalls multipliziert. Insbesondere nimmt die Steigung für das Material PEBA signifikant zu. Die Notwendigkeit einer Doppelbelichtung sowie der geringe KF-Wert von 0,33 sind hierbei als mögliche Einflüsse zu nennen.

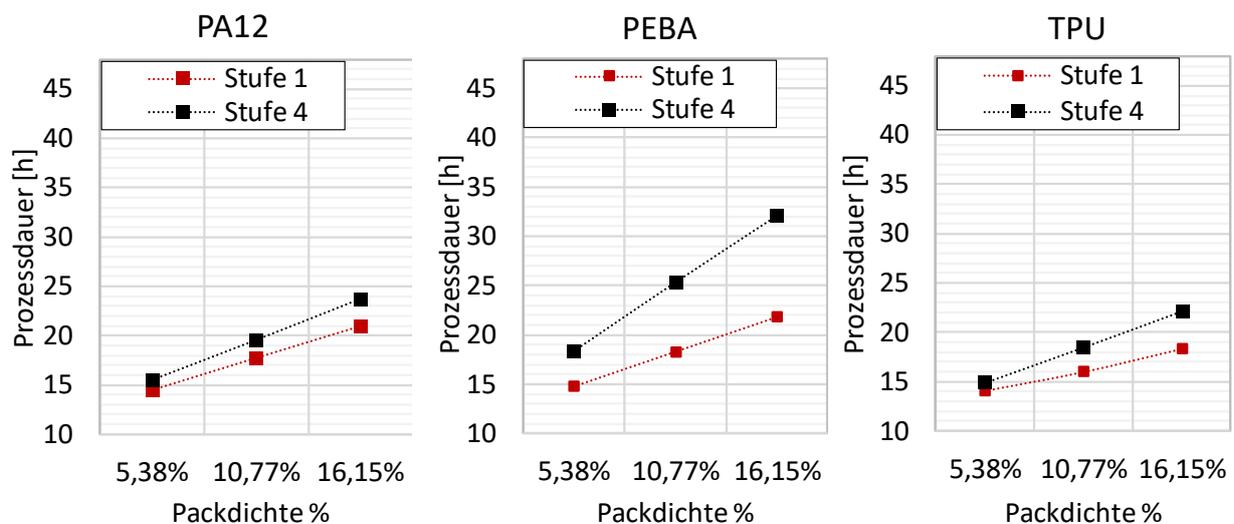


Abbildung 41: Prozessdauer für drei Packdichten, Materialien und Komplexitätsgrade

Es sind folgende Erkenntnisse festzuhalten:

- Effekte der Komplexität auf die Prozessdauer werden mit höherer Packdichte deutlicher sichtbar, allerdings steigt der Berechnungsaufwand zur Simulation ebenfalls an. Dies gilt insbesondere für die höchsten Komplexitätsstufen, da diese mit hoher Packdichte teils mehrere Stunden bis Tage benötigen. Weiterhin wird die Mindestwartezeit bei zu geringer Packdichte teils unterschritten, sodass Effekte auf die Belichtungsdauer nicht messbar sind.

- Die Folgeversuche werden mit einer Packdichte von ca. 10 % ausgeführt, da die Auswirkungen der Komplexität über die Packdichten nahezu gleich nachweisbar sind und der Wert am nächsten an den durchschnittlichen Packdichten in der Literatur liegt.
- Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die Packdichte für den realen Prozess Auswirkungen auf die Gesamtprozess- und Abkühldauer besitzt. Effekte zur Materialzersetzung sind ebenfalls nicht enthalten.

4.4.3. V3 - Bauteilorientierung

Versuchsziel:

Ziel des Versuchs ist es, die Auswirkungen der Komplexität anhand der Proben Würfel und Zylinder mit verschiedenen Materialien und Orientierungen darzustellen. Hierzu werden diese mit gleichbleibendem Bauteilvolumen, gleicher Packdichte und gleicher Bauhöhe ausgeführt. Diese Methode wird zur Prüfung des „Complexity-for-free“-Ansatzes genutzt, da kein Mehraufwand in Form von Material und Bauhöhe entsteht. Hintergrund ist hierbei, dass sich Faktoren wie das Volumen und die Fläche bei einer Drehung nicht verändern. Hingegen finden Veränderungen in der 2D-Bearbeitungsebene statt, indem der Umfang, die Anzahl und Länge von Scanvektoren sowie die notwendigen Positionswechsel/Sprünge variieren. Beispielhaft wird dies anhand von Abbildung 42 an einer stehenden und einer liegenden Probe dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Querschnitt der ersten Variante komplexer ist, als jener in der zweiten Variante. Durch den Versuch wird ermittelt, wie sich die Variation der Kontur- und Fülllänge sowie die notwendigen Bearbeitungspfade auf die Generierdauer auswirken.

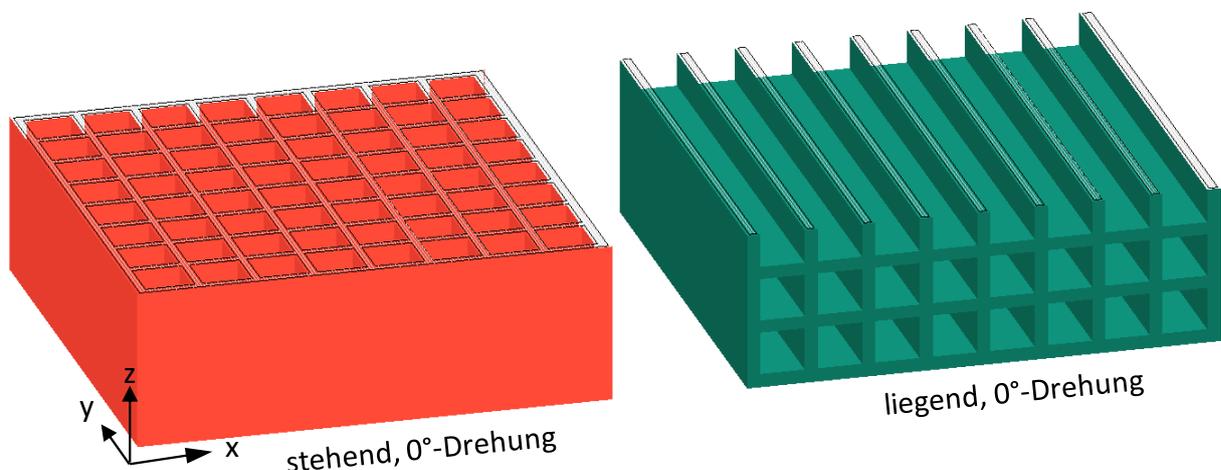


Abbildung 42: Darstellung einer Probe, die stehend und liegend aufgebaut wird (Eigene Darstellung)

Versuchsaufbau:

Als Versuchsproben werden die Bauteile Würfel und Zylinder mit 40 mm Kantenlänge in vier Komplexitätsstufen verwendet. Beide Bauteilarten werden mit den drei Materialien PA12, PEBA sowie TPU simuliert, um den Einfluss der Bearbeitungsparameter darzustellen. Der materialspezifische Schrumpffaktor erhöht in unterschiedlicher Größenordnung das Bauteilvolumen, ist jedoch innerhalb eines Materialversuchs gleich. Die Bauaufträge werden mit fünf Ebenen von je acht Bauteilen ausgeführt, sodass eine Bauhöhe von 218,3 mm und eine Packdichte von 10,8 % (Würfel)/10,9 % (Zylinder) resultiert.

Unterschiede zwischen den Bauteilen entstehen für den Zylinder aufgrund der Umwandlung in das STL-Format bzw. durch die Annäherung der Oberfläche mittels Dreiecken. Wie in Tabelle 22 aufgelistet wird, ergibt sich beim Vergleich der materialspezifischen Geschwindigkeiten zwischen Kontur und Füllung (KF-Faktor) die höchste Differenz für das Material PEBA, gefolgt von PA12 und TPU. Im Vergleich verfügt TPU jedoch über den geringsten Scanlinienabstand, sodass eine höhere Anzahl von Scanvektoren generiert wird. Mit Blick auf die Geschwindigkeit für TPU sollte die Konturbelichtung nahezu keine Auswirkung auf die Dauer besitzen, jedoch steigt die Dauer für Positionswechsel wiederum an. Der Parametersatz von PEBA umfasst zusätzlich zum geringen KF-Faktor eine Doppelbelichtung der Außenkontur, was die Sensitivität gegenüber komplexen Geometrien weiter steigert.

Tabelle 22: Geschwindigkeiten und Scanlinienabstand [mm] verschiedener Materialien

	PA12	PEBA	TPU
KF-Faktor	0,6	0,33	1
Scanlinienabstand	0,25	0,25	0,18

Die Orientierung der Bauteile entspricht im Grundzustand einer 0°-Drehung um die Z-Achse und wird zusätzlich in zwei Abstufungen verändert:

- Der Grundzustand wird so verändert, dass die Würfel um **90° um die X-Achse** gedreht werden, sodass deren Querschnitt über die Bauteilhöhe unterschiedlich belichtet wird. Die Anzahl der Vektoren wird verringert und deren Länge vergrößert (vgl. Abbildung 42).
- Als zweite Variante werden die Referenzproben um **45° um die Z-Achse** gedreht, wobei die Anzahl der Vektoren steigt, deren Länge abnimmt und sie homogener verteilt werden.

Die beiden Winkel werden gewählt, um jeweilig den größtmöglichen Effekt auf die Prozessdauer zu erreichen und die Bauhöhe nicht zu verändern. Zielgröße ist die Generierdauer.

Versuchsauswertung und -diskussion:

Wie in Abbildung 43 zu sehen ist, variiert die Sensitivität gegenüber der Komplexität je nach Material. In allen Fällen steigt mit zunehmender Komplexität die Fertigungsdauer an. Ausgehend von dem Grundzustand ergeben sich für alle Materialien signifikante Unterschiede bei einer Drehung von 90° um die X-Achse sowie 45° um die Z-Achse. Diese werden mit zunehmender Komplexitätsstufe signifikant gesteigert.

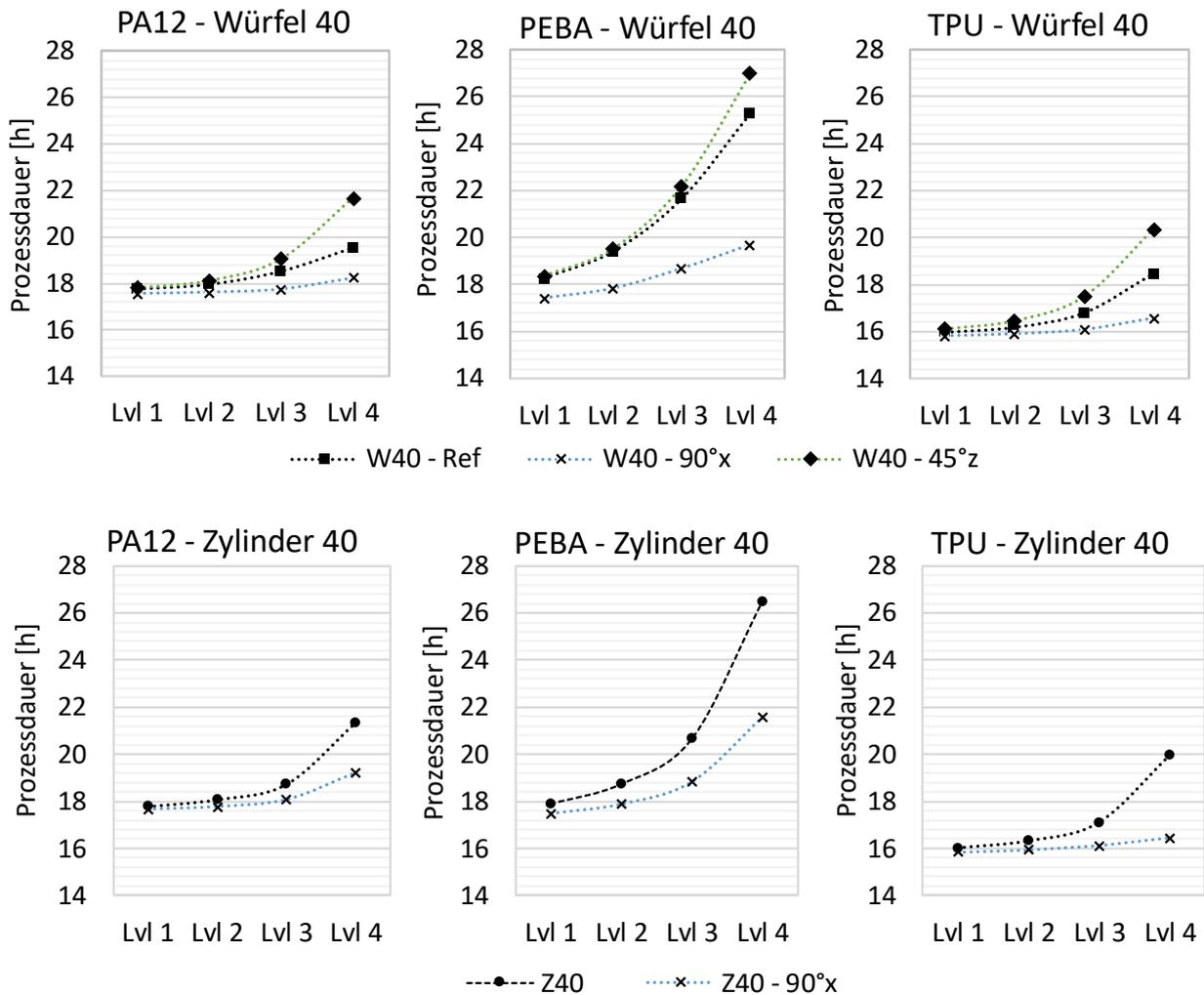


Abbildung 43: Auswirkungen der Drehung um die X- und Z-Ebene für drei Materialien

Bei der Drehung um die X-Achse wird die ursprüngliche Geometrie reduziert auf einzelne Rechtecke, welche die Anzahl der Sprünge signifikant reduzieren. Auch hier sind die Unterschiede besonders bei einer Doppelbelichtung (PEBA) und geringen Scanlinienabständen (TPU) erkennbar. Im Hinblick auf die Materialien ergeben sich zwischen den Komplexitätsstufen eins und vier die höchsten Differenzen für die Proben mit 45° -Drehung um die Z-Achse. Es resultieren Steigerungen für PEBA um 48,07 %, für PA12 um 19,91 % und für TPU um 24,56 %. Diese sind zurückzuführen auf die Anzahl von Füllvektoren, respektive der Anzahl von Positionswechseln.

Wird berücksichtigt, dass mit einer mittleren Packdichte von 10,77 % sowie einer Bauhöhe von ca. 66 % der möglichen Höhe kalkuliert wurde, resultieren entsprechende Verlängerungen der Generierdauer mit höherer Packdichte und Bauhöhe. Folglich nimmt die Ausrichtung von Bauteilen nicht nur durch die Bauhöhe Einfluss auf die Produktivität, sondern ebenfalls durch die Gestaltung der Bearbeitungspfade. Zur Bauteilgestaltung sind demnach neben der Bauhöhe und mechanischen Eigenschaften die Bearbeitungspfade als wesentlicher Faktor zu berücksichtigen. Entgegen den in **Kapitel 2.5.2.** beschriebenen Bewertungsmethoden, die häufig das Volumen und die Bauteiloberfläche als Indikatoren verwenden, wird gezeigt, dass die Konturlänge bzw. indirekt die Mantelfläche³⁰ und die Anzahl der Füllvektoren von Bedeutung sind. Die Zusammenhänge zwischen der Generierdauer und der Konturlänge sind als Streudiagramme in Abbildung 44 und Abbildung 45 dargestellt. Resultate hieraus sind:

- Die Kennzahl **Konturlänge/Volumen** besitzt für jedes Material eine hohe Beschreibungsgüte. Für PEBA besteht mit $R^2 = 0,9773$ ein sehr hoher Zusammenhang, wobei dieses Material im Vergleich mit verringerter Konturgeschwindigkeit sowie einer Doppelbelichtung der Kontur bearbeitet wird. TPU88A und PA12 weisen geringere Korrelationen auf. Trotz des TPU-KF-Wertes von 1, welcher keine Reduktion der Konturgeschwindigkeit vorsieht, besteht ein starker Zusammenhang, sodass als mögliche Einflüsse entweder der Scanlinienabstand oder eine durch die Anlage reduzierte Scangeschwindigkeit verantwortlich sein können. Über die Materialien hinweg wird eine Beschreibungsgüte von $R^2 = 0,8028$ erreicht, da kein Unterscheidungsmerkmal vorliegt. Wird die Kennzahl **Konturlänge/Bounding Box Volumen** (BB Vol.) betrachtet, verschlechtert sich die Beschreibungsgüte wiederum maßgeblich, wie dies in Abbildung 45 ersichtlich ist.

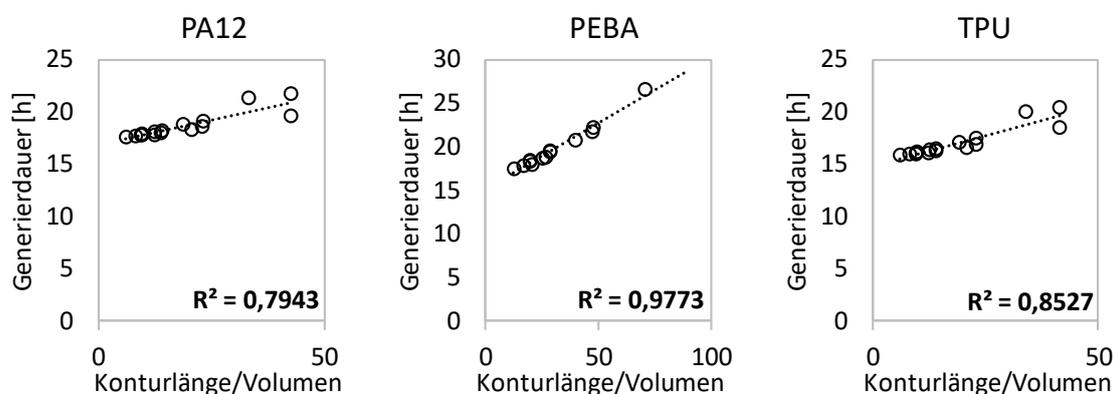


Abbildung 44: Korrelation der Generierdauer mit der Konturlänge/Volumen

³⁰ Da die Boden- und Deckschicht nur einen geringen Anteil am Gesamtbauteil einnehmen, z.B. in den Versuchsproben 6/400 Schichten pro Bauteil (ca. 1,5 %), jedoch ca. 11 % der Fläche einnehmen ist eine Gesamtbetrachtung der Fläche nicht zielführend.

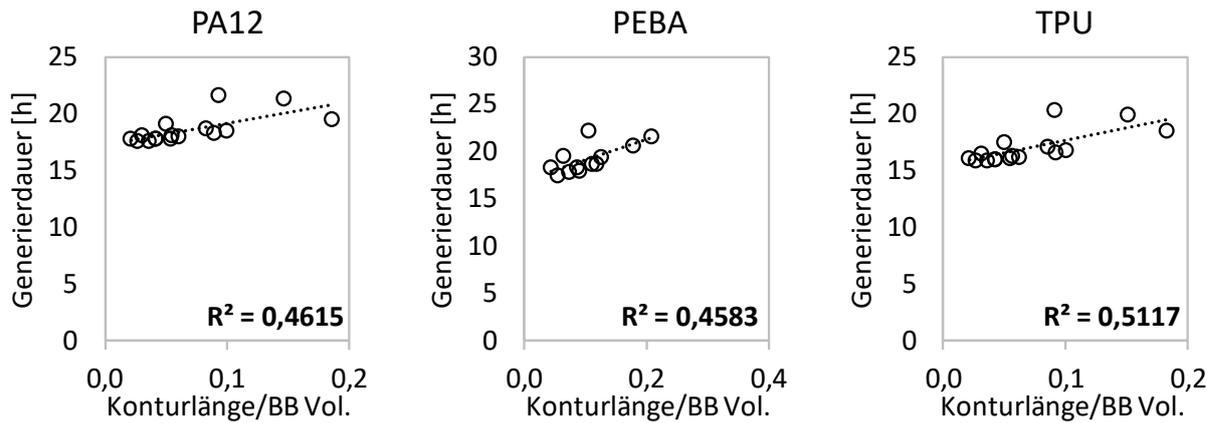


Abbildung 45: Korrelation der Generierdauer mit der Konturlänge/Bounding Box Volumen

Um die parameterübergreifenden Werte zu verbessern, wird nachfolgend eine Regressionsanalyse der Konturlänge/Volumen unter Zuhilfenahme des Scanlinienabstands durchgeführt:

- Die Beschreibungsgüte des korrigierten R^2 verbessert sich mit der **Konturlänge/Volumen** und dem **Scanlinienabstand** von 0,8028 auf 0,9121. Es wird in beiden Fällen eine statistische Signifikanz von $p = 0,000$ erreicht, wodurch die Nullhypothese abgelehnt wird. Diese Kombination lässt zunächst eine parameterübergreifende Verwendung zu, jedoch ist die Übertragbarkeit zu prüfen.

Als weiterer Faktor wird für die jeweiligen Materialien die Anzahl der Füllvektoren ermittelt. Diese sind von Interesse, da sie indirekte Schlüsse zu den Positionswechseln des Scanners zulassen. Einschränkungen bestehen für die PEBA-Proben ab Stufe vier, da der Offset des Lasers dazu führt, dass der Querschnitt zum Teil nur noch aus Außenlinien besteht und wenige Fülllinien generiert werden. Diese führen wiederum zu starken Abweichungen, sodass sie für die Auswertung vernachlässigt werden müssen. Die Zusammenhänge zwischen der Generierdauer und den Füllvektoren sind wiederum als Streudiagramme in Abbildung 46 und Abbildung 47 dargestellt. Resultate hieraus sind:

- Für alle Materialien besteht ein starker Zusammenhang mit den Füllvektoren, wobei der Bezug auf das Bauteilvolumen wiederum eine bessere Beschreibungsgüte bietet als zu dem Bounding Box Volumen. Eine hohe Beschreibungsgüte für das Material PEBA kann hierbei durch die fehlenden Daten der Komplexitätsstufe vier resultieren. Dieses Phänomen tritt über die gesamten Versuche hinweg einmalig auf.
- Einschränkungen entstehen ebenfalls für die Beschreibung verschiedener Materialien, da die Geschwindigkeit nicht einfließt und somit kein Vergleich möglich ist. Über die Materialien hinweg wird eine unzureichende Beschreibungsgüte von $R^2 = 0,1901$ erreicht.

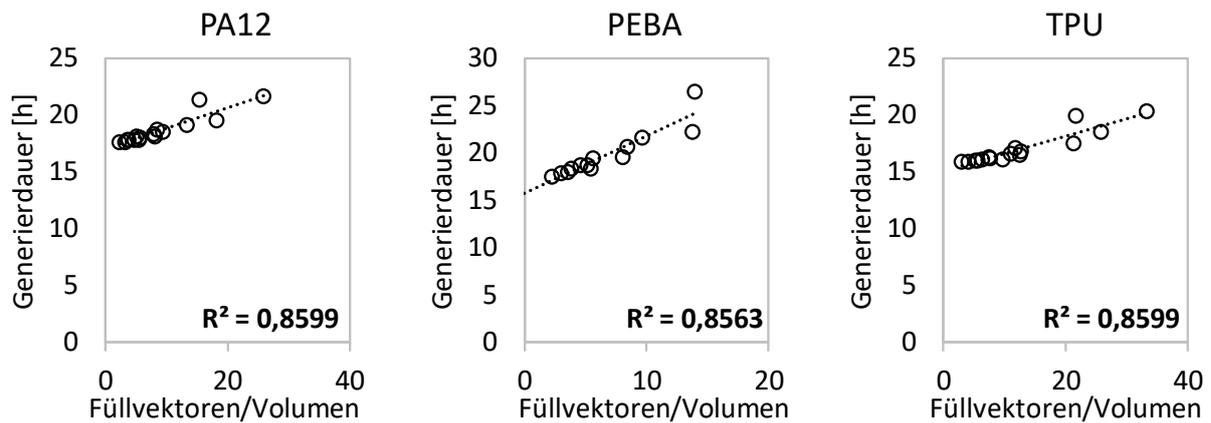


Abbildung 46: Korrelation der Generierdauer mit den Scanvektoren/Volumen

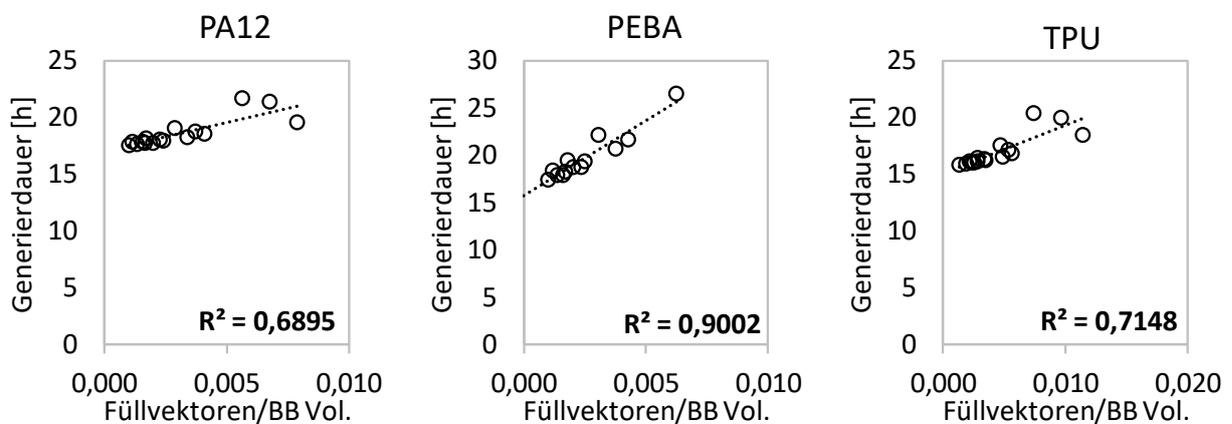


Abbildung 47: Korrelation der Generierdauer mit den Scanvektoren/Bounding Box Volumen

Um die parameterübergreifenden Werte zu verbessern, wird nachfolgend eine Regressionsanalyse der Füllvektoren unter Zuhilfenahme der Geschwindigkeit der Füllung durchgeführt:

- Hierdurch verbessert sich die Beschreibungsgüte des korrigierten R^2 für die **Füllvektoren und Geschwindigkeit der Füllung** von 0,1901 auf 0,6872. In beiden Fällen wird eine statistische Signifikanz von $p = 0,000$ erreicht. Folglich können die Füllvektoren in Kombination mit der Geschwindigkeit parameterübergreifend verwendet werden, insofern dieser Unterscheidungsfaktor berücksichtigt wird. Die Übertragbarkeit ist wiederum zu prüfen.

Als weiterer Faktor wird das Verhältnis von **Konturlänge zur Fülllänge (LK/LF)** in Abbildung 48 dargestellt. Diese Kennzahl erreicht ebenfalls eine überwiegend hohe Beschreibungsgüte. Eine Besonderheit ergibt sich hierbei für den materialübergreifenden Wert, welcher ohne zusätzliche Hilfsfaktoren eine Beschreibungsgüte von $R^2 = 0,8539$ erreicht.

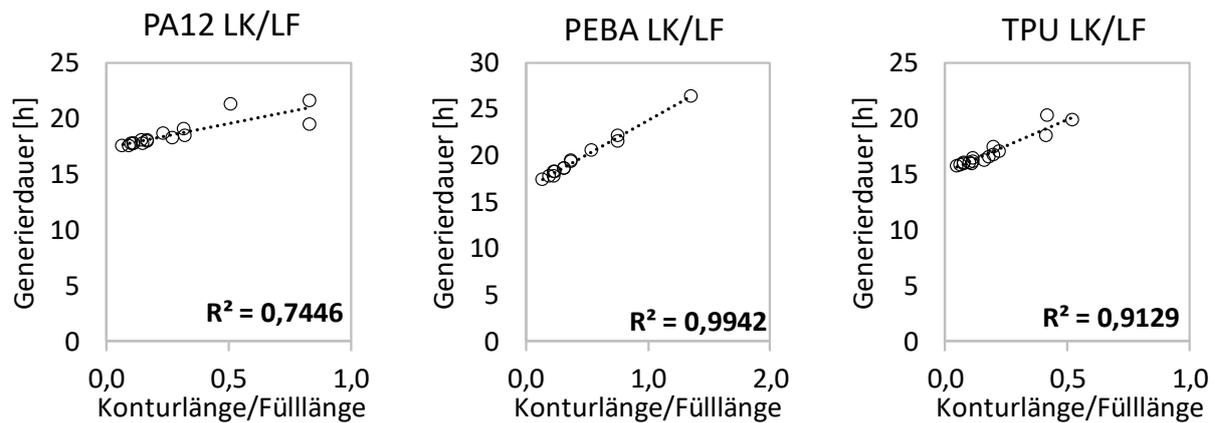


Abbildung 48: Korrelation der Generierdauer mit der Kennzahl Konturlänge/Fülllänge

Es sind folgende Erkenntnisse festzuhalten:

- Materialspezifische Parameterunterschiede der Bearbeitungsgeschwindigkeit wirken sich signifikant auf die Sensitivität gegenüber komplexen Strukturen aus. Hierbei trägt ein geringer Scanlinienabstand, die Doppelbelichtung sowie eine niedrige Konturgeschwindigkeit besonders zur Verlängerung der Prozessdauer bei.
- Die **Konturlänge/Volumen** kann als Faktor zur Ermittlung der Sensitivität unterschiedlicher Materialien gegenüber der Komplexität verwendet werden. Sie ist einzeln jedoch nur innerhalb eines spezifischen Materials anwendbar, da unterschiedliche Geschwindigkeiten und die Anzahl an Scanvektoren unberücksichtigt bleiben und somit keine Differenzierung möglich ist. Die zusätzliche Berücksichtigung des Scanlinienabstands ermöglicht dabei eine parameterübergreifende Beschreibung.
- Die **Anzahl der Füllvektoren/Volumen** kann als weiterer Faktor zur Bewertung der Komplexität für eine definierte Material/Parameterkombination genutzt werden, da sie verfahrens- und materialspezifische Faktoren wie den Scanlinienabstand beinhaltet. Zur parameterübergreifenden Verwendung ist der Bezug zur Füllgeschwindigkeit notwendig.
- Die Kennzahl **Konturlänge/Fülllänge** bietet für die einzelnen Materialien sowie für einen materialübergreifenden Vergleich eine hohe Beschreibungsgüte.

4.4.4. V4 - Bauteilgröße

Versuchsziel:

Wie bereits in **Kapitel 2.5.2** beschrieben wurde, sollte sich die Größenänderung eines Bauteils auf dessen Komplexität auswirken. Innerhalb des Versuches wird hierzu geprüft, wie sich eine Bauteilvergrößerung bei nahezu gleichem Gesamtbauteilvolumen auf die Generierdauer und die Aufbaurrate auswirkt. Analysiert wird zudem, wie sich diese Änderung auf die Kontur und Füllung sowie die Anzahl der Bearbeitungspfade auswirkt. Hierbei wird überprüft, ob und wie die zuvor dargestellten Zusammenhänge bei Variation der Bauteilgröße anwendbar sind.

Versuchsaufbau:

In diesem Versuch wird die Kantenlänge der Probekörper Würfel und Zylinder von 40 auf 50 mm erhöht, bzw. um 25 % verlängert. Das Bauteilvolumen verdoppelt sich hierbei nahezu (Faktor 1,953). Die Komplexität wird in vier Stufen variiert. Der Versuch wird exemplarisch mit PA12 ausgeführt. Es werden insgesamt 20 Bauteile auf 4 Ebenen gefertigt, wobei eine Bauhöhe von 216,3 mm generiert wird. Die Packdichte beträgt 10,64 % für die Würfel und 10,76 % für die Zylinder. Gegenüber der 40 mm Variante wird die Packdichte verringert um 0,13 % (Würfel) und 0,15 % (Zylinder), die Bauhöhe wird reduziert um 2 mm. Die Drehung wird für den Würfel wiederum um 90°-XY und 45°-Z getestet. Neben der Generierdauer wird die Aufbaurrate bzw. das generierte Volumen pro Stunde erfasst, um eine Bezugsgröße für verschiedene Volumina zu ermöglichen.

Versuchsauswertung und -diskussion:

Wie in Abbildung 49 dargestellt ist, steigt die Generierdauer mit zunehmender Komplexität für die Kantenlänge von 50 mm weniger stark an, als mit einer Kantenlänge von 40 mm. Hierbei reduziert sich die Generierdauer der größeren Bauteile im Durchschnitt um 4,77 %. Beim Vergleich der einzelnen Stufen entstehen im Verhältnis der 50 mm zur 40 mm Variante signifikante Unterschiede, wie dies in Abbildung 49 zu sehen ist. Besonders für die Stufen drei und vier ergeben sich Differenzen in der Generierdauer, die in der Spitze bis zu 8,15 % betragen (vgl. Stufe vier – 45), wohingegen sie auf den Stufen eins bis drei maximal 5,51 % aufweisen (vgl. Stufe drei – 45). Im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen ändert sich in diesem Versuch das Bauteilvolumen. Für einen Vergleich verschiedener Größen wird folglich die Konturlänge sowie die Anzahl der Füllvektoren in Relation zu dem jeweiligen Volumen und der Bounding Box gesetzt, da ansonsten keine Aussagekraft besteht. Zusätzlich wird das Verhältnis der Konturlänge zur Fülllänge betrachtet, da es keine Bezugsgröße benötigt.

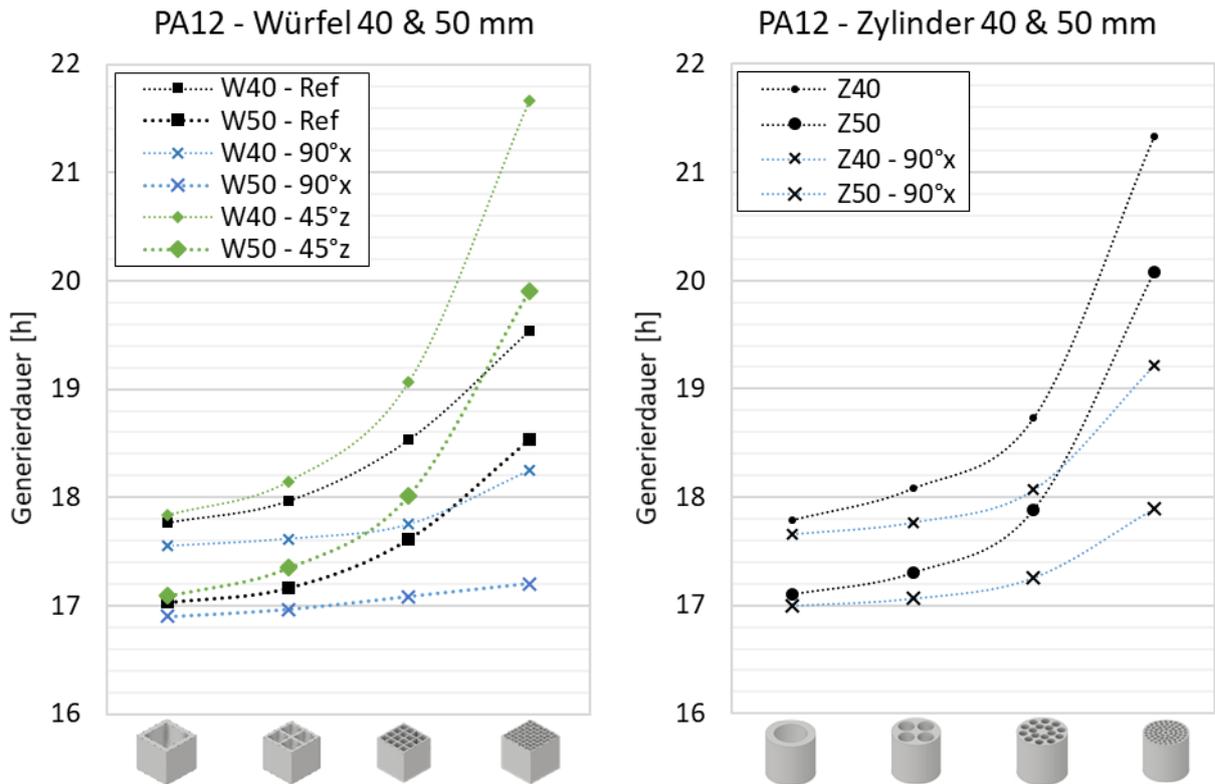


Abbildung 49: Generierdauer für Würfel und Zylinder mit drei unterschiedlichen Materialien

Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen, dass sowohl der Bezug zum Volumen für die **Konturlänge** als auch für die **Anzahl der Füllvektoren** eine hohe Beschreibungsgüte bietet. Der Bezug zur Bounding Box verringert hierbei für beide Faktoren die Beschreibungsgüte signifikant, sodass das Volumen als Bezugsgröße zu favorisieren ist. Das Verhältnis aus **Konturlänge zur Fülllänge** liefert wiederum eine mittlere bis hohe Beschreibungsgüte.

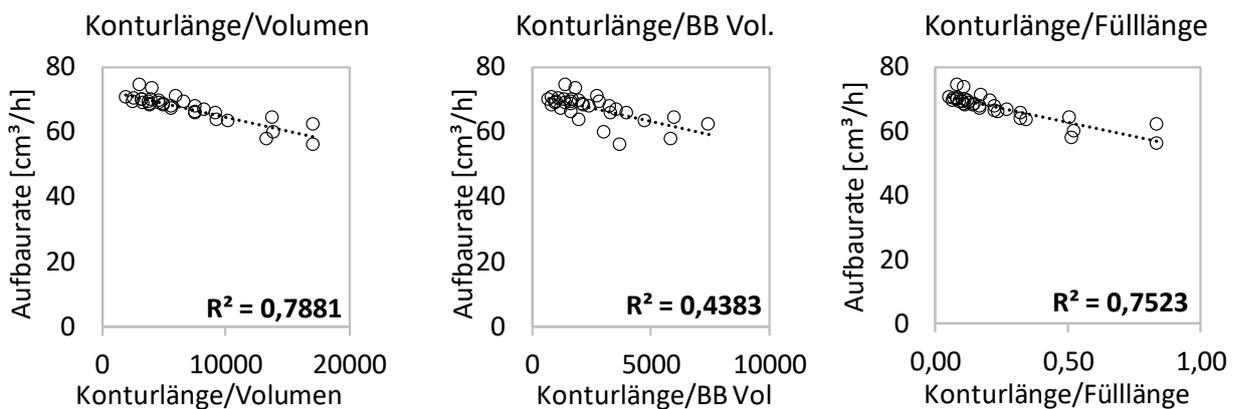


Abbildung 50: Korrelation zwischen der Generierdauer, Konturlänge und Fülllänge

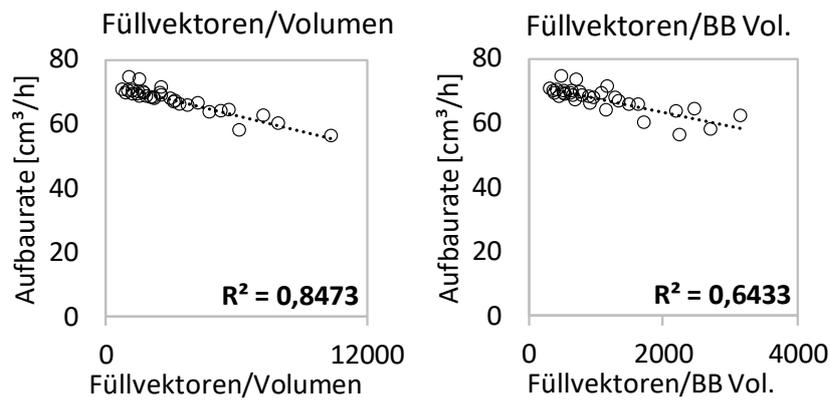


Abbildung 51: Korrelation zwischen der Generierdauer und den Füllvektoren mit unterschiedlicher Bezugsgröße

Es sind folgende Erkenntnisse festzuhalten:

- Für den Vergleich unterschiedlich großer Bauteile ist unter Verwendung der Konturlänge und Anzahl der Vektoren eine Bezugsgröße herzustellen. Hierdurch wird für die analysierten Proben sowohl für die Konturlänge als auch für die Füllvektoren eine hohe Beschreibungsgüte erreicht. Als Bezugsgröße liefert das Bauteilvolumen im Vergleich zur Bounding Box die bessere Beschreibungsgüte.
- Das Verhältnis der Konturlänge zur Fülllänge liefert im Vergleich eine reduzierte Beschreibungsgüte, die jedoch ohne zusätzliche Bezugsgröße auskommt.
- Zu beachten ist hier, dass sich die Aussagekraft der verschiedenen Bewertungsfaktoren nur auf einen begrenzten Probenumfang beschränkt. Die Anwendung auf verschieden große und unterschiedliche Geometrien wird hierzu ergänzend in **Kapitel 5.1** validiert.

4.4.5. V5 - Volumenreduktion

Versuchsziel:

In diesem Versuch wird geprüft, wie sich die Umsetzung AM-spezifischer Vorteile in Form einer Volumenreduktion bei gleichzeitiger Erhöhung der Komplexität auf die Generierdauer auswirken. Zusätzlich wird geprüft, welchen Einfluss die materialspezifischen Parameter einnehmen.

Versuchsaufbau:

Als Bauteil wird der Menger-Schwamm aus **Kapitel 4.4.4.** verwendet. In Anlehnung an die Gestaltungsrichtlinien aus **Kapitel 2.7** und die Bauraumkapazität sind die Bauteile mit einer Kantenlänge von 70 mm ausgeführt worden, sodass die Details fertigungsgerecht bis Stufe vier dargestellt werden können.

Die Mindeststrukturstärke sowie der minimale Lochdurchmesser betragen hierbei 0,864 mm. Es werden drei Ebenen mit je zwei Bauteilen ausgeführt, sodass eine Bauhöhe von 224,3 mm entsteht. In Tabelle 23 werden die Daten für das Volumen und die Packdichte der Stufen null bis vier aufgelistet.

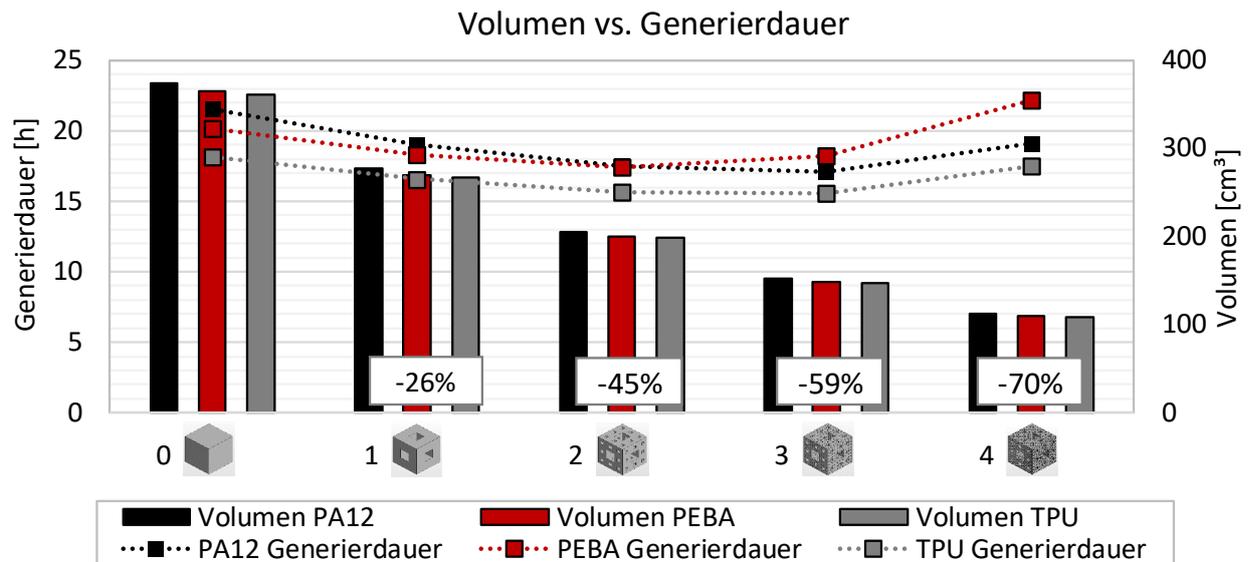
Tabelle 23: Relative Entwicklung von Volumen und Packdichte von Stufe null bis vier

	 Stufe 0	 Stufe 1	 Stufe 2	 Stufe 3	 Stufe 4
Volumen	-	-26 %	-45 %	-59 %	-70 %
Packdichte	19,23 %	14,25 %	10,55 %	7,82 %	5,79 %

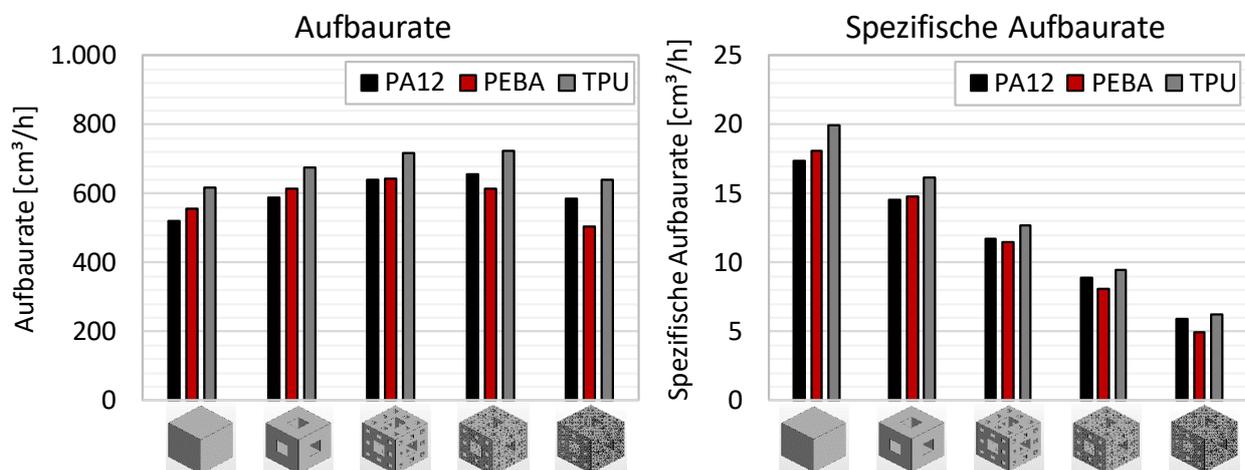
Da bereits ab Stufe vier erhebliche Leistungseinbrüche der Soft- und Hardware eintreten, konnte Stufe fünf nicht simuliert werden. Im Versuch ist die Rechnerleistung für Stufe fünf bereits bei einer Bauteilanzahl von zwei Stück/Ebene (Packdichte 4,38 %) signifikant eingeschränkt und die Vorbereitung im virtuellen Bauraum nicht mehr in voller Funktion ausführbar. Die Datenmenge nimmt für Stufe fünf einen Wert von 622 MB pro Bauteil ein. In einem Test zum Übertrag auf weitere Verfahren konnten die FFF-Slicer Cura und Eiger bereits ab Stückzahl eins nicht mehr mit dieser Datenmenge umgehen. Zielgröße ist erneut die Dauer für den Generierprozess.

Versuchsauswertung und -diskussion:

Durch Variation gleich mehrerer Parameter zeigt sich, dass trotz signifikanter Reduktion des Bauteilvolumens die Fertigungsdauer signifikant durch die Komplexität ansteigt. In Abbildung 52 wird ausgehend von Stufe null die prozentuale Reduktion des Volumens dargestellt. Zusätzlich ist zu sehen, dass die Generierdauer von Stufe null bis zur Stufe drei für PA12 und TPU verringert wird; für PEBA verringert sie sich nur bis Stufe zwei. Dieser Bereich stellt für das jeweilige Material einen Kompromiss dar, da sowohl Material als auch Produktionsdauer reduziert werden. Ab Stufe drei steigt die Generierdauer für alle Materialien wieder an, sodass im Vergleich zu Stufe null zwar 70 % des Volumens eingespart werden, jedoch liegt die Generierdauer nur knapp unter der eines Vollblocks (TPU: -19 %, PA12: - 11 %) oder sogar höher (PEBA: +3 %).



Hierbei ist der relative Vergleich zu Stufe null für die Konstruktionsfreiheit im AM-Bereich nicht repräsentativ. Werden hingegen die Stufen drei und Stufe vier gegenübergestellt, ergeben sich für eine Volumenreduktion von 11 % jeweils Verlängerungen der Generierdauer für PA12 (12,05 %), für PEBA (21,8 %) und für TPU (12,7 %). Die Aufbaurrate als Quotient aus Bauraumvolumen und Generierdauer sowie die spezifische Aufbaurrate als Quotient aus Bauteilvolumen und Generierdauer werden in Abbildung 53 abgebildet.



Es sind folgende Erkenntnisse festzuhalten:

- Sowohl die Fertigung von Vollkörpern (Stufe null) als auch eine übersteigerte Komplexität (Stufe vier) wirken sich ungünstig auf die Fertigungsdauer aus. Stufe zwei und drei dienen in diesem Beispiel als „Sweet Spot“, der sinnbildlich den besten Kompromiss aus Komplexität, Materialeinsatz und notwendiger Generierdauer bietet.

- Qualitative Verbesserungen ergeben sich in der Datenvorbereitung durch Verwendung der Stufen null bis drei, da die Bearbeitung von Stufe vier bereits zu erheblichen Störungen des Arbeitsflusses führt. Der Aufwand in der Datenvorbereitung steigt entsprechend an und verhindert im Falle von Stufe fünf sogar die Umsetzung.

Im Hinblick auf die Kategorisierung der Komplexität könnte der Menger-Schwamm, bzw. auch bereits der zweidimensionale Sierpinski-Teppich als Referenzbauteil mit definierter Schrittweite dienen. Die systematische Steigerung der Komplexität könnte zur Evaluierung verschiedene Komplexitätsstufen für verschiedene Anlagen, Materialien und Parametersets genutzt werden. Eine Überprüfung dieser These erfolgt im Validierungsszenario eins in **Kapitel 5.1**.

4.4.6. V6 - Vorversuch (Farsoon HT403P)

Versuchsziel:

Aufgrund von Unterschieden in der Anlagentechnik inklusive der Software zur Simulation der Bauzeit werden die Versuche aus Versuch V1 ebenfalls mit der Farsoon-SLS-Anlage durchgeführt. Hiermit dient der Versuch einerseits zur Prüfung des Erkenntnistransfers, andererseits um Begleiteffekte, wie Verzug und Rauchbildung im realen Prozess aufzunehmen. Die Ergebnisse wurden auszugsweise veröffentlicht in (Häfele et al., 2023).

Versuchsaufbau:

Der Versuchsaufbau wurde in Anlehnung an Versuch V1 lediglich auf die Größe der Baukammer angepasst. Entsprechend werden die gleichen Versuchskörper und Komplexitätsgrade genutzt. Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung konnte mit den vorhandenen Bauaufträgen keine hinreichende Genauigkeit der Bauzeitsimulation erzielt werden (Abweichung >40 %), sodass die Simulation für die weiteren Versuche nicht zielführend ist. Entsprechend sind die Folgeversuche für das Anlagensystem HT403P gefertigt worden. Die Probekörper werden jeweils separat in einer Ebene gefertigt mit einer Stückzahl von 23 und einer Packdichte von 11,45 % (Würfel) bzw. 11,6 % für den Zylinder. Der resultierende KF-Faktor beträgt 0,25, womit ein hoher Konturanteil zur Erhöhung der Belichtungsdauer führen sollte. Zur Messung der Zielgrößen Belichtungsdauer sowie Pulverauftrag und Heizen werden jeweilig 30 Schichten gefilmt.

Versuchsauswertung und -diskussion

Wie in Abbildung 54 abgebildet ist, steigen sowohl die Belichtungsdauer pro Einzelquerschnitt als auch die Zeit zum Heizen und Pulverauftrag mit zunehmender Komplexität an. Zusätzlich wird zur Differenzierung der Einzelprozesse die prozentuale Steigerung der Generierdauer von der jeweiligen Komplexitätsstufe eins bis vier dargestellt. Von Stufe eins bis vier ergeben sich Verlängerungen der Belichtungsdauer für den Würfel um 246 %, für den Würfel mit 45°-Drehung um 261 %, sowie für den Zylinder um 235 %. Ähnlich wie in Versuch V1 steigt auch hier die Dauer für den Pulverauftrag und das Heizen für den Würfel um 35 %, für den Würfel mit 45°-Drehung um 52 %, sowie für den Zylinder um 47 %. Prozentual liegt im Vergleich zur Anlage Formiga P100 eine höhere Steigerung vor, jedoch ist der Anteil der beiden Prozesse an der Gesamtschichtzeit signifikant geringer. Der Anteil des Pulverauftrags an der Generierdauer pro Schicht nimmt hierbei im Durchschnitt 22 % ein und sinkt bei der höchsten Stufe auf 13 % ab. Lediglich bei der niedrigsten Komplexitätsstufe wird ein Wert von 31 % erreicht.

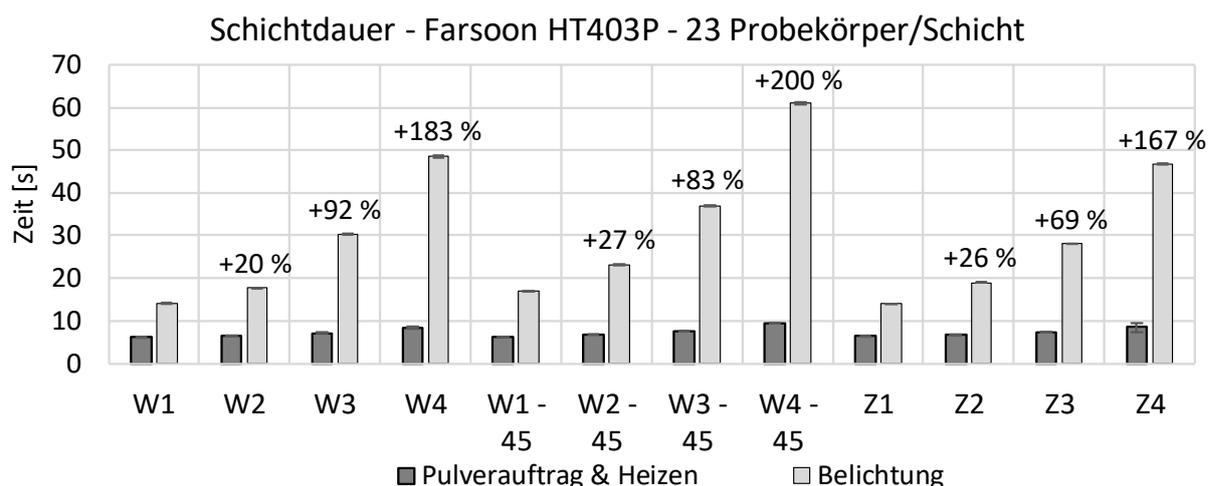


Abbildung 54: Generierdauer für vier Komplexitätsgrade des Würfels und des Zylinders (Die prozentualen Steigerungsraten der Gesamtdauer beziehen sich jeweils auf Stufe eins)

Im Umkehrschluss nimmt der Anteil der Belichtung besonders für komplexe Strukturen zu. Im Durchschnitt wird ein Wert von 78 % erreicht, der für die höchste Stufe auf 87 % ansteigt. Im Vergleich zur P100 nimmt die Zeit zum Belichten bei dieser Anlage deutlich zu, was aus Produktivitätssicht erstrebenswert ist. Diesbezüglich sind die gemessenen Steigerungen mit zunehmender Komplexität umso bedeutender, da sie im Vergleich größere Auswirkungen besitzen. Zur Prüfung der Zusammenhänge zwischen der Generierdauer und geometrischen Faktoren sind wiederum entsprechende Streudiagramme in Abbildung 55 und Abbildung 56 untersucht worden. Resultate hieraus sind:

- Die **Konturlänge/Volumen** weist eine sehr hohe Beschreibungsgüte von $R^2 = 0,9469$ auf. Eine Drehung um 45° wird allerdings weiterhin nicht erfasst. Der Bezug auf die Bounding Box verschlechtert den Wert auf $R^2 = 0,533$.
- Für die **Füllvektoren/Volumen** wird der höchste Wert mit $R^2 = 0,9853$ erreicht. Der Einfluss der Drehung wird hierbei aufgenommen. Unter Berücksichtigung der gesamten Scanvektoren entsteht lediglich ein Wert von $R^2 = 0,6592$, da Geschwindigkeitsunterschiede der Kontur und Füllung nicht einfließen. Das Verhältnis zum Bounding Box Volumen (BB Vol.) verschlechtert die Beschreibungsgüte auf $R^2 = 0,7259$.
- Die **Konturlänge zur Fülllänge** erreicht einen Wert von $R^2 = 0,91$.
- Die Beschreibungsgüte steigt im Vergleich zu den Analysen aus V1 an, da die Auswirkungen durch die Belichtungsdauer zunehmen und somit genauere Aussagen zulassen.

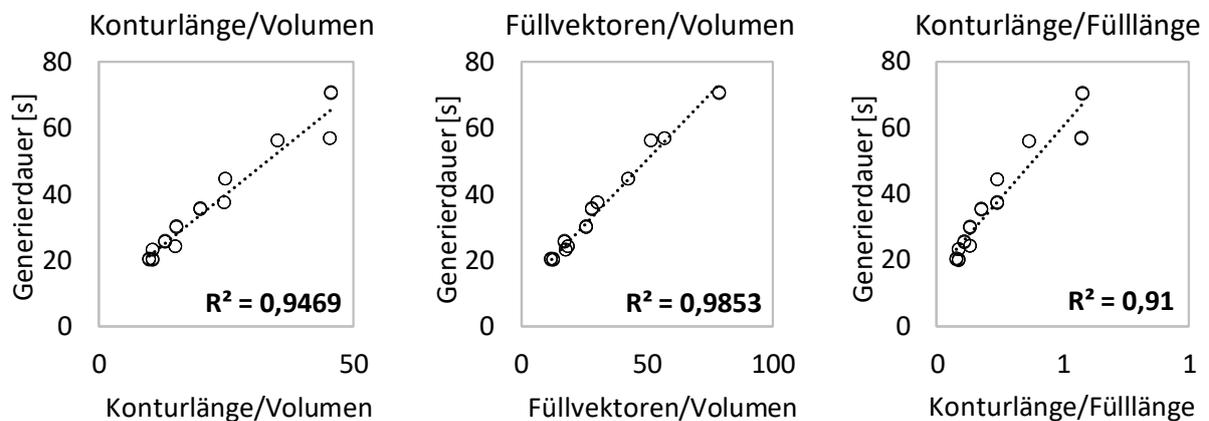


Abbildung 55: Konturlänge und Füllvektoren pro Volumen und Konturlänge/Fülllänge

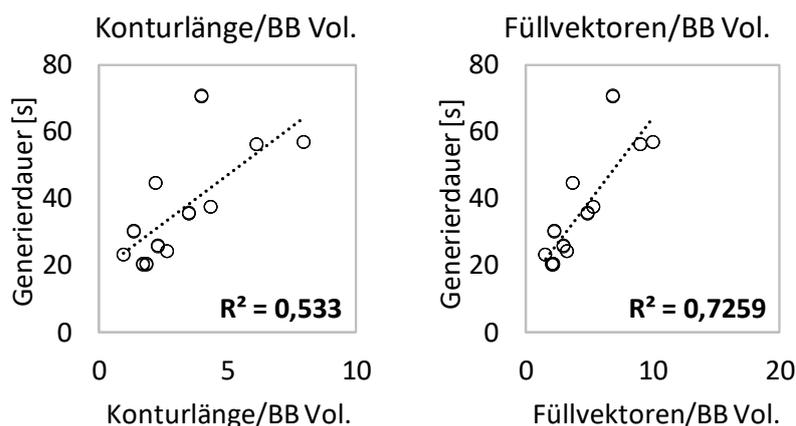


Abbildung 56: Füllvektoren und Konturlänge pro Bounding Box Volumen

Es sind folgende Erkenntnisse festzuhalten:

- Die Generierdauer für die Anlage HT403P wird entgegen der P100 maßgeblich durch den **Belichtungsvorgang** beeinflusst, sodass die Füllvektoren und die Konturlänge einen Haupteinfluss auf die Maschinenlaufzeit bilden.

- Die Dauer zum Belichten steigt mit zunehmender Komplexität an und bildet den dominierenden Faktor in Bezug zur Generierdauer. Zusätzlich erhöht sich die Dauer für das Heizen mit zunehmender Komplexität.
- Die Verlängerung der Prozessdauer führt wiederum zur Erhöhung der thermischen Belastung des Materials (beschleunigte Alterung) sowie den Verbrauch von Hilfsstoffen und Energie.
- Entgegen bisheriger Annahmen nimmt die Komplexität neben der Bauhöhe signifikanten Einfluss auf das Fertigungsergebnis in Bezug auf die Prozesssicherheit und Bauteilqualität.

4.4.7. V7 - Prozessparameter

Versuchsziel:

Die Verwendung unterschiedlicher Parametersets für ein spezifisches Material bietet die Möglichkeit, um aktiv auf die Produktivität als auch auf optische und mechanische Bauteileigenschaften Einfluss zu nehmen. Im Folgenden wird geprüft, wie sich zwei unterschiedliche Parametersets für das Material TPU88A auf die Belichtungsdauer und Begleiteffekte wie Rauchbildung und Verzug auswirken. Als Parameter mit Bezug zur Produktivität werden der Scanlinienabstand und die Anzahl der Belichtungen analysiert.

Versuchsaufbau:

Die Proben umfassen den Würfel sowie den Zylinder mit 40 mm Kantenlänge in je vier Komplexitätsstufen. Zur Verringerung des Messaufwandes und der fehlenden Möglichkeit zur Simulation werden die Probekörper gemeinsam in einer Ebene gefertigt. Die Orientierung der Proben erfolgt in Anlehnung an V1 und V6, sodass der untersuchte Querschnitt über die Höhe gleichbleibend mit einer Höhe von 3 mm gefertigt wird. Es entstehen somit 30 Schichten, die gefilmt werden. Einschränkungen entstehen insofern, dass nur die Belichtungsdauer verglichen werden kann, da die Dauer zum Heizen und Pulverauftrag nicht differenzierbar ist. Ein Nachweis über die Auswirkungen der Komplexität auf das Heizen und den Pulverauftrag wurde jedoch in V6 erbracht. Neben der konstant gehaltenen Schichtstärke verbleiben als Einflussgrößen für die Produktivitätssteigerung der Scanlinienabstand und die Anzahl der Belichtungen. Die Parametersätze sind wie folgt definiert:

- **Parametersatz 1 (P1)** basiert auf Richtwerten des Materialherstellers, welcher eine Doppelbelichtung der Füllung und Kontur mit einer Leistung von 30 W, respektive 12,5 W angibt. Die Schichtstärke beträgt 0,1 mm und der Scanlinienabstand 0,1 mm. Die Flächenenergiedichte beträgt 19,73 mJ/mm² pro Belichtung.
- **Parametersatz 2 (P2)** basiert auf einer Eigenentwicklung für Gitterstrukturen. Es erfolgt eine einfache Belichtung der Füllung und Kontur mit 60 W, respektive 15 W. Die Schichtstärke beträgt 0,1 mm und der Scanlinienabstand 0,2 mm. Es wird eine Flächenenergiedichte von 19,73 mJ/mm² erreicht.

Es erfolgen entsprechende Anpassungen der Kompensationsfaktoren, um das belichtete Volumen konstant zu halten. Nach den Ausführungen zu den Prozessparametern aus **Kapitel 2.4.3** ist für (P1) eine erhebliche Verlängerung der Prozessdauer bei hohem Konturanteil sowie durch eine große Anzahl von Positionswechseln zu erwarten. Im Vergleich zu (P2) erzeugt (P1) mit einem Scanlinienabstand von 0,1 mm und der Doppelbelichtung die vierfache Anzahl an Scanvektoren.

Versuchsauswertung und -diskussion:

Wie in den vorherigen Versuchen beobachtet wurde, ergeben sich mit der HT403P deutliche Unterschiede in der Belichtungsdauer sowie sichtbare Materialzersetzungen. Abbildung 57 zeigt hierzu die Parametersätze (P1) und (P2) und deren Belichtungsdauer für die beiden Strukturarten in vier unterschiedlichen Komplexitätsstufen. Unabhängig von den Bearbeitungsparametern erfolgt eine Steigerung der Belichtungsdauer, welche von Stufe eins zur Stufe vier für (P1) im Durchschnitt um den Faktor 3,23 und für (P2) um den Faktor 3,34 höher ist. Ähnlich wie bei den Versuchen mit PEBA führt die Doppelbelichtung auch hier besonders bei höheren Komplexitätsstufen zur Steigerung der Belichtungsdauer. Auswirkungen einer Energieüberhöhung werden mit beiden Parametersätzen, aber besonders mit dem Standardparametersatz (P1) ab Komplexitätsstufe drei und vier durch übermäßige Rauchbildung sichtbar. Eine Halbierung des Scanlinienabstands von (P2) zu (P1) führt dazu, dass die Abkühldauer der Einzelbahnen verringert wird. Im anschließenden Reinigungsprozess der SLS-Anlage konnten hierzu überdurchschnittliche Verunreinigungen des Laserschutzglases sowie der Prozesskammer festgestellt werden. Die ausschließliche Fertigung der Stufen drei und vier mit Parametersatz (P1), inkl. einer mittleren Bauhöhe und Packdichte werden den Reinigungsaufwand sowie Qualitätseinbußen durch ungleichmäßigen Energieeintrag und die Gefahr einer Schädigung deutlich erhöhen.

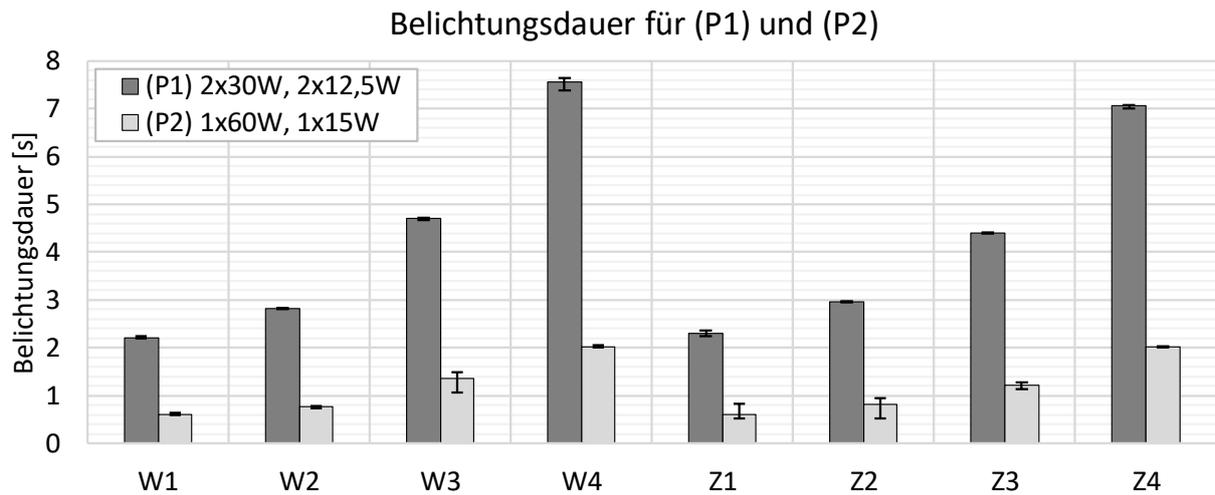


Abbildung 57: Belichtungsdauer pro Einzelquerschnitt

Eine Quantifizierung dieser Aussagen wird aufgrund des Schadenspotenzials sowie des Reinigungs- und Personalaufwands nicht systematisch untersucht. Die Prävention dieser Effekte ist jedoch unabhängig von der Versuchsreihe mit Blick auf die Ressourcenschonung vorzuziehen. Durch Hochrechnung für eine schichtbezogene Packdichte von ca. 10 %, respektive 20 Bauteilen, wird in Abbildung 58 die Dauer zur Belichtung einer Einzelschicht mit den jeweiligen Parametersätzen dargestellt. Der Pulverauftrag und das Heizen werden als rote Linie dargestellt. Im Vergleich zu Versuch V6 steigt die Dauer zum Belichten im Verhältnis zum Pulverauftrag und Aufheizen weiter an. Mit steigender Komplexität erhöht sich dieser Anteil, sodass die Prozessdauer im Vergleich zur Anlage P100 deutlich stärker von der Komplexität des Bauteils als von der Bauhöhe abhängt.

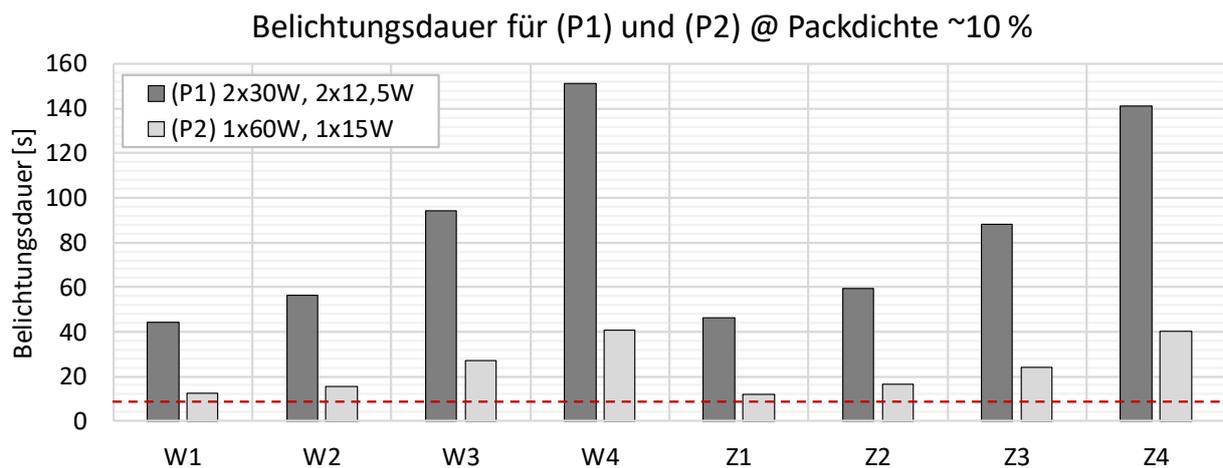


Abbildung 58: Schichtdauer verschiedener Geometrien mit einer Packdichte von ~10 %

Nachfolgend werden die Proben hinsichtlich der Faktoren Anzahl der Scanvektoren, Konturlänge sowie Fülllänge analysiert. Die Zusammenhänge zwischen diesen und der Generierdauer werden in entsprechenden Streudiagrammen in Abbildung 59 dargestellt. Resultate hieraus sind:

- Die **Konturlänge/Volumen** weist parameterübergreifend ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,3394$ auf, da die unterschiedlichen Scanlinienabstände nicht erfasst werden. Innerhalb der Parametersets wird hingegen eine Beschreibungsgüte von über 90 % erreicht.
- Für die **Füllvektoren/Volumen** wird parameterübergreifend der höchste Wert mit $R^2 = 0,9884$ erreicht. Unter Berücksichtigung der gesamten Scanvektoren verringert sich die Beschreibungsgüte, da Geschwindigkeitsunterschiede der Kontur und Füllung nicht einfließen.
- Das Verhältnis der **Konturlänge (LK) zur Fülllänge (LF)** erreicht ein hohes Bestimmtheitsmaß innerhalb der einzelnen Parametersätze, jedoch ist es nicht mehr aussagekräftig für eine parameterübergreifende Bewertung.

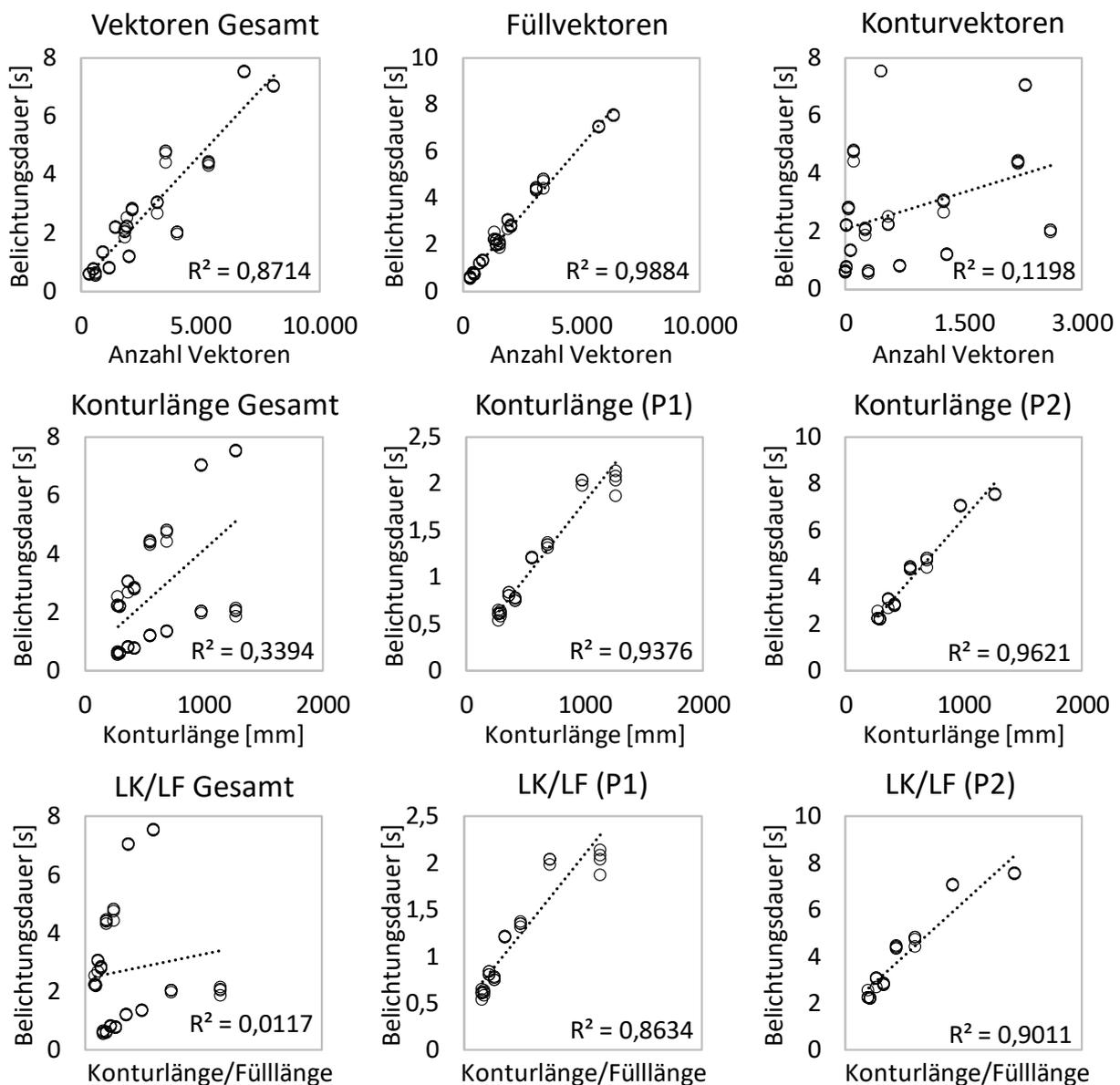


Abbildung 59: Füllvektoren und Konturlänge pro Volumen sowie Kontur zur Fülllänge

Um die parameterübergreifenden Werte zu verbessern, wird nachfolgend eine Regressionsanalyse der Konturlänge unter Zuhilfenahme des Scanlinienabstands durchgeführt:

- Hierdurch verbessert sich die Beschreibungsgüte des korrigierten R^2 mit **Konturlänge und Scanlinienabstand** von 0,3394 auf 0,869. Es wird in beiden Fällen eine statistische Signifikanz von $p = 0,000$ erreicht. Folglich kann die Konturlänge in Kombination mit dem Scanlinienabstand parameterübergreifend verwendet werden, insofern dieser Unterscheidungsfaktor berücksichtigt wird.

Es sind folgende Erkenntnisse festzuhalten:

- Die Belichtungsdauer steigt in Abhängigkeit der verwendeten Bearbeitungsstrategie signifikant an, was besonders im Fall von Parametersatz (P1) durch den geringen Scanlinienabstand in Kombination mit der Doppelbelichtung zum Tragen kommt. Wie in Abbildung 57 dargestellt wurde, erhöht sich die Belichtungsdauer mit steigender Komplexität durchschnittlich um den Faktor 3,3. Mit Blick auf Abkühleffekte sowie die vorzeitige Kristallisation ist sicherzustellen, dass die Packdichte und Komplexität mit der geforderten Bauteil- und Prozessqualität hergestellt werden können.
- Eine Maximierung der Packdichte zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, wie durch Ruffo et al. und Baumers et al. beschrieben wird, ist demnach nicht für alle Geometrien und Anlagen zielführend (Ruffo et al., 2006b), (Baumers et al., 2011), (Baumers, 2012).
- Eine Verlängerung der Prozessdauer führt gleichzeitig zu einem höheren Energieverbrauch, da dieser hauptsächlich von der Laufzeit der SLS-Anlage abhängig ist. Entgegen den Annahmen von Baumers et al. kann geschlossen werden, dass die Geometrie bzw. die Komplexität stärkere Auswirkungen auf den Energieverbrauch des Generierprozesses hat (Baumers et al., 2011), (Baumers, 2012).
- Die Pulverentfernung mittels Druckluft- und Glasperlenstrahlen ist für (P1) ab Stufe drei und vier aufgrund von Materialanhaftungen nicht mehr ohne weitere manuelle Bearbeitungsschritte durch das Personal möglich. Diese sind auf einen übermäßigen Energieeintrag zurückzuführen.
- In Summe entsteht sowohl für die Generierdauer als auch für die Nachbearbeitungsdauer ein signifikanter Aufwand, der im Hinblick auf die Wettbewerbsfähigkeit innerhalb eines Verfahrens berücksichtigt werden muss.

4.4.8. V8 - Scanvektoren/Bearbeitungspfade

Versuchsziel:

In diesem Versuch werden im Vergleich zu vorherigen Versuchen die Länge und Anzahl der Scanvektoren innerhalb einer Komplexitätsstufe homogen verteilt, sodass Störgrößen infolge unterschiedlicher Scanlängen in einem Bauteil ausgeschlossen werden können. Durch Verwendung unterschiedlicher Parametersets werden gleichzeitig Einflüsse des Materials sowie notwendige Bearbeitungsparameter dargestellt. Zusätzlich werden innerhalb der Parameter die Belichtungsmodi aufgenommen, sodass die Effekte mit- und ohne Konturbelichtung ersichtlich werden. Mit Bezug auf V7 wird gleichzeitig überprüft, wie sich die Bauteileigenschaften, z.B. die Schichtanbindung über die unterschiedlichen Strukturen hinweg verhalten.

Versuchsaufbau:

Die Proben der Art „Fragment“ werden in Längen von 28, 14, 7 und 3,5 mm (Gruppe F1) sowie 8, 4, 2 und 1 mm (Gruppe F2) mit einer Höhe von 5 mm gefertigt (siehe Abbildung 60). Als Material wird TPU88A mit den Parametersätzen (P1) und (P2) verwendet. Zusätzlich werden die beiden Parametersätze mit und ohne Kontur verwendet, sodass die zwei Fragmentgruppen jeweils in vier Konfigurationen gefertigt werden. Pro Schichtebene wird jeweils eine Fragmentgruppe hergestellt. Als Zielgröße wird die Belichtungsdauer der Strukturen mittels Video festgehalten.

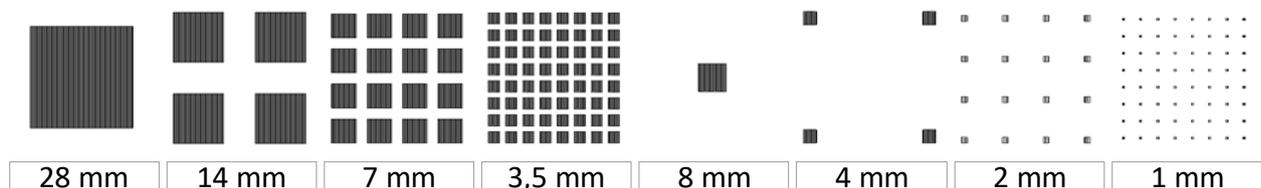


Abbildung 60: Darstellung des Schichtquerschnitts

Versuchsauswertung und -diskussion

Wie in Abbildung 61 und Abbildung 62 zu sehen ist, steigt die Belichtungsdauer mit zunehmender Komplexität für alle Parametersätze an. Zusätzlich ist auf der Sekundärachse die Anzahl der Scanvektoren aufgetragen und als gestrichelte Linie dargestellt. Durch die Doppelbelichtung sowie den halbierten Scanlinienabstand wirkt sich die Komplexität besonders auf (P1) aus. Darüber hinaus ist zu sehen, dass sich die Komplexität stärker auf die Strukturen zwischen 8 und 1 mm auswirkt als auf diejenigen zwischen 28 und 3,5 mm. Dies ist vergleichbar mit Versuch V5 da die Miniaturisierung dazu führt, dass der Anteil der Kontur im Vergleich zur Füllung zunimmt.

Bezüglich der resultierenden Belichtungsdauer sind für die jeweiligen Strukturen und Parametersätze folgende Resultate festgestellt worden:

- **Strukturen 8-1 mm:** Von der niedrigsten zur höchsten Komplexitätsstufe steigt die Belichtungsdauer pro Querschnitt für Parametersatz (P1) mit Kontur um den Faktor 4,5, ohne Kontur um den Faktor 3,4; Für den Parametersatz (P2) steigt sie mit Kontur um den Faktor 2,79, ohne Kontur um den Faktor 2,92.
- **Strukturen 28-3,5 mm:** Von der niedrigsten zur höchsten Stufe steigt die Belichtungsdauer pro Querschnitt für Parametersatz (P1) mit Kontur um den Faktor 3,1, ohne Kontur um den Faktor 2,81; für den Parametersatz (P2) steigt sie mit Kontur um den Faktor 3,07, ohne Kontur um den Faktor 2,48.

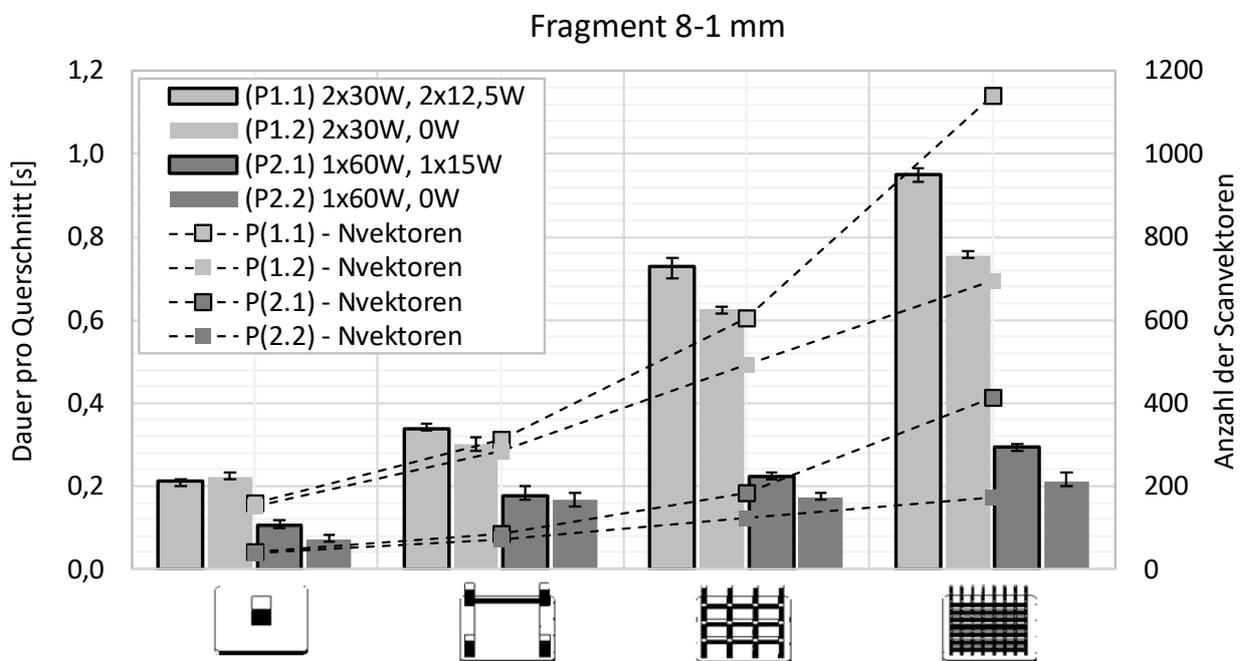


Abbildung 61: Belichtungsdauer für Strukturen mit Kantenlängen zwischen 8 und 1 mm

Unabhängig von dem Geschwindigkeitsvorteil zwischen (P1) und (P2) verlängert sich die Dauer mit steigender Komplexität mindestens um den Faktor 2,81 für (P1) bzw. 2,48 für (P2). Die Anzahl der Scanvektoren erhöht sich besonders für (P1.1), da zusätzlich zu der Erhöhung der Konturlänge eine Doppelbelichtung vorgenommen wird. Um eine Abschätzung über die Auswirkungen für einen Bauauftrag zu erhalten, müssen diese Zeiten mit der Anzahl von Bauteilen sowie der Anzahl der zu belichtenden Schichten multipliziert werden.

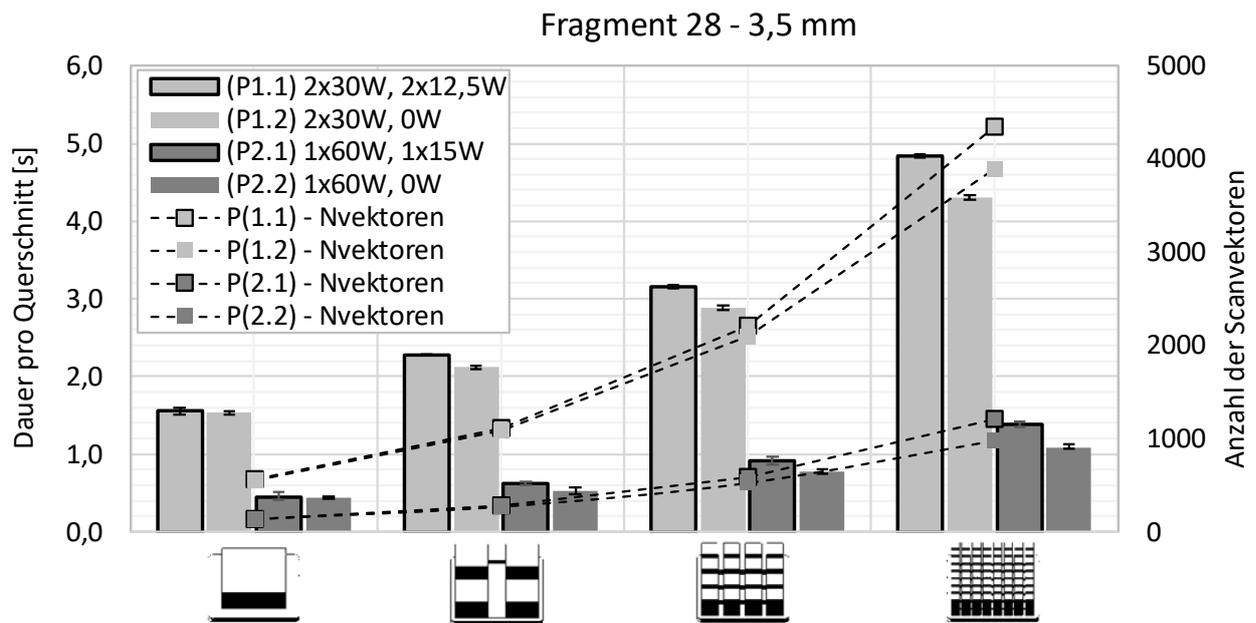
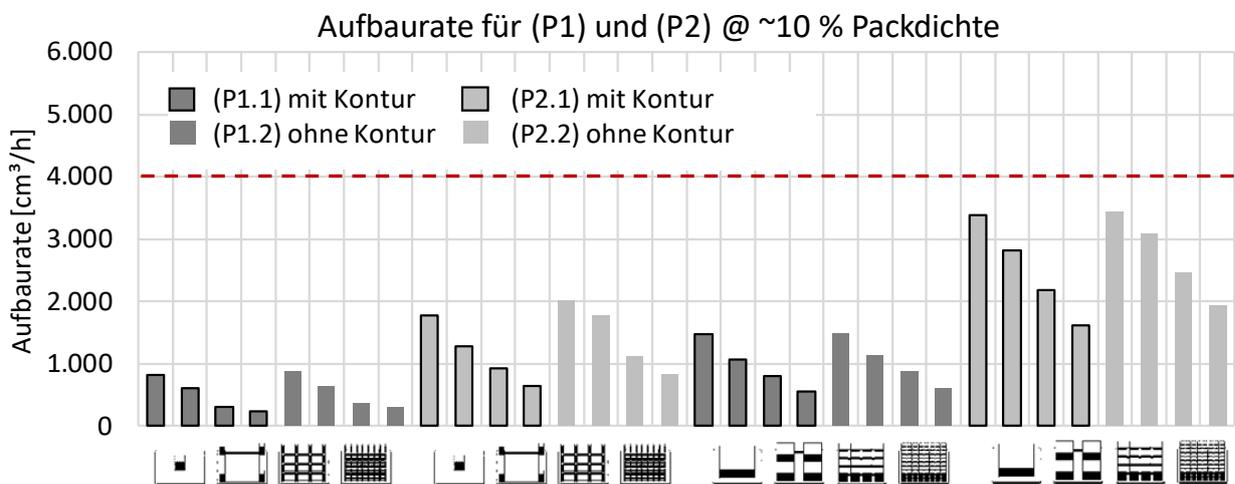
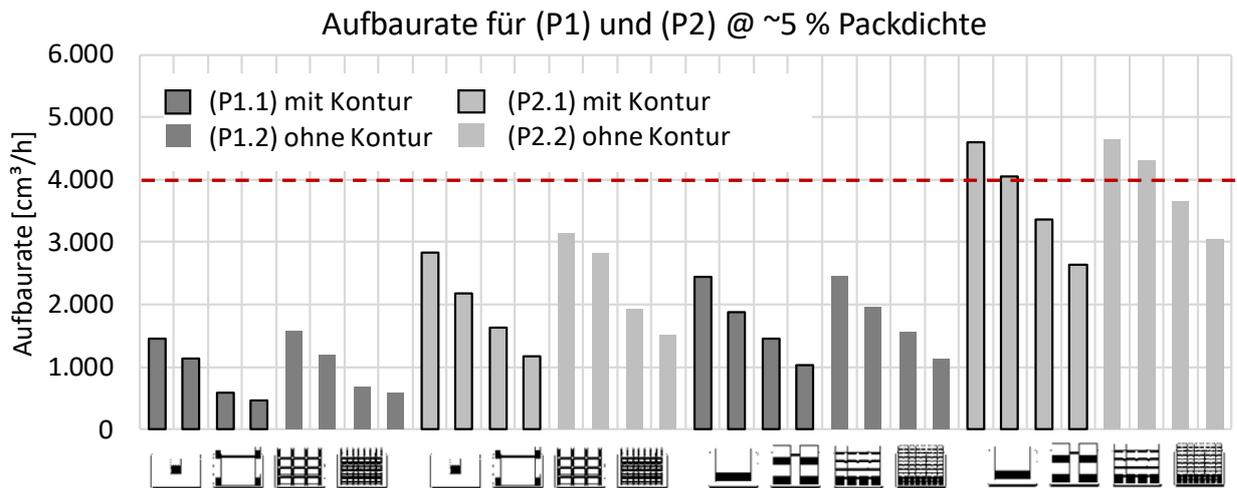


Abbildung 62: Belichtungsdauer für Strukturen mit Kantenlängen zwischen 28 und 3,5 mm

In Abbildung 63 und Abbildung 64 erfolgt hierzu eine Berechnung der Aufbauraten für Packdichten von 4,92 % und 4,9 % sowie 9,84 % und 9,8 %, die nachfolgend vereinfacht mit ca. 5 % und ca. 10 % angegeben werden. Diese wurden anhand der gemessenen Belichtungsdauer skaliert und unter Bezug der Dauer zum Pulverauftrag und Heizen berechnet. Als Bezugsgröße wird in diesem Fall eine Bauraumfläche von 400x400 mm² verwendet, da sich die angegebene Aufbaurrate in **Kapitel 2.4.2** auf diese bezieht. Abgeleitet aus den berechneten Werten und einer Orientierung der angegebenen Aufbaurrate von bis zu 4.000 cm³/h kann angenommen werden, dass dieser Wert sich ähnlich wie bei anderen Herstellern auf 5 % Packdichte bezieht. Wie in Abbildung 63 dargestellt ist, wird die Aufbaurrate auch mit dieser geringen Packdichte lediglich für die Komplexitätsstufe eins und zwei mit (P2) erreicht. Abgesehen von der niedrigsten Komplexitätsstufe unterschreitet Parametersatz (P1) diese Aufbaurrate in allen Fällen um über 50 % und unterschreitet ihn teils um mehr als 75 %.

Wie in Abbildung 64 dargestellt ist, setzt sich dieser Trend mit erhöhter Packdichte fort, sodass eine Wirtschaftlichkeitskalkulation auf Basis der angegebenen Aufbaurrate nicht zielführend ist, bzw. zu erheblichen Fehlkalkulationen führt. Zu berücksichtigen ist hier, dass die Versuche mit einer Schichtstärke von 0,1 mm durchgeführt wurden. Insofern eine Erhöhung der Schichtstärke in Abhängigkeit der Bauteilanforderungen möglich ist, verringern sich die zu belichtenden Schichten und die Aufbaurrate steigt an. Der Einfluss der Komplexität bleibt hierbei erhalten, er wirkt sich allerdings auf weniger Schichten aus.



Neben den zeitlichen Unterschieden für die Komplexitätsstufen drei und vier sind, ähnlich wie in den Versuchen mit der Anlage P100, sichtbare Materialzersetzungen aufgetreten. In Abbildung 65 wird die Rauchbildung für Komplexitätsstufe vier mit Parametersatz (P1) dargestellt. Im gereinigten Zustand wurde weiterhin für den Parametersatz (P1) festgestellt, dass Strukturen der Stufe drei und vier übermäßig stark aufgeschmolzen wurden. Als Folge wurde eine enorme Pulveragglomeration festgestellt, die einerseits den Reinigungsaufwand für das Entpacken und Strahlen erhöht und andererseits die Maßhaltigkeit der Bauteile verringert.



Abbildung 65: Rauchbildung für Komplexitätsstufe vier mit Parametersatz (P1)

Im Rahmen der Untersuchungen stehen diese Faktoren zwar nicht im Betrachtungsfokus, jedoch sind sie für weitere Forschungsarbeiten zu berücksichtigen. Zur weiteren Analyse der Zusammenhänge zwischen der Generierdauer und den geometrischen Faktoren Konturlänge und Füllvektoren sind deren Streudiagramme untersucht worden und nachfolgend in Abbildung 66 und Abbildung 67 dargestellt. Resultate hieraus sind:

- Die **Anzahl der Vektoren** kann für dieses Anlagensystem parameterübergreifend verwendet werden, da sie mit dem Scanlinienabstand, Beam-Offset und der Anzahl von Belichtungen zu bzw. abnimmt. Da die reine Betrachtung der Konturvektoren keine Aussagekraft für die verschiedenen Belichtungsmodi bietet, z.B. ohne Konturbelichtung, wird lediglich die gesamte Anzahl der Scanvektoren und die Anzahl der Füllvektoren betrachtet.
- Die **Gesamtanzahl der Vektoren** bietet über beide Parametersätze ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,921$, wobei die einzelnen Parametersets einen geringeren Wert aufweisen. Die **Anzahl der Füllvektoren** verbessert die Beschreibungsgüte global ($R^2 = 0,934$) als auch innerhalb eines Parametersatzes, da Geschwindigkeitsunterschiede entfallen.
- Entgegen der P100 bleibt die Geschwindigkeit für dieses Anlagensystem materialübergreifend erhalten, sodass neben den Füllvektoren keine Zusatzfaktoren benötigt werden.
- Die **Konturlänge** liefert innerhalb der jeweiligen Parametersets und Belichtungsmodi (mit/ohne Kontur) ebenfalls eine sehr hohe Beschreibungsgüte, wie dies in Abbildung 67 dargestellt wird. Werden beide Belichtungsmodi innerhalb eines Parametersatzes vermischt, verringert sich das Bestimmtheitsmaß, es verbleibt jedoch für (P1) bei $R^2 = 0,921$ und für (P2) bei $R^2 = 0,903$. Parametersatzübergreifend fällt das Bestimmtheitsmaß auf $R^2 = 0,514$ und liefert somit keine hinreichende Aussagekraft mehr.

Wie zuvor in Versuch V4 eine Aussage getroffen wurde, wird auch hier geprüft, wie sich die Beschreibungsgüte durch Einbeziehen des Scanlinienabstands verändert:

- Durch die Regressionsanalyse verbessert sich die Beschreibungsgüte des korrigierten R^2 mit **Konturlänge und Scanlinienabstand** von 0,514 auf 0,7509. Es wird in beiden Fällen eine statistische Signifikanz von $p = 0,000$ erreicht.

Für weitere Versuche ist das Einbeziehen verschiedener verfahrensspezifischer Faktoren zu prüfen, da dieser Versuch nur einen begrenzten Untersuchungsraum bietet. Entsprechend sind Faktoren wie die Anzahl von Belichtungen nicht im Vorfeld auszuschließen.

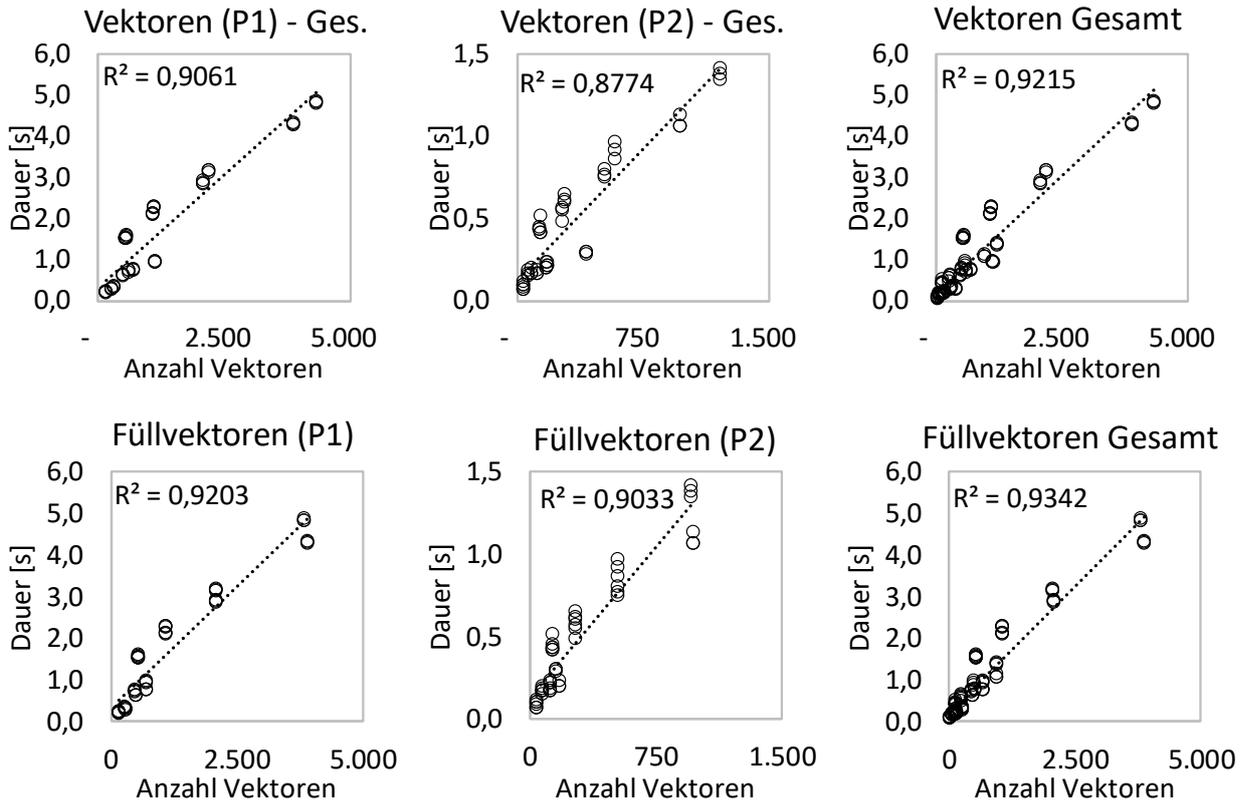


Abbildung 66: Korrelation für (P1) und (P2) mit der Anzahl der Füllvektoren

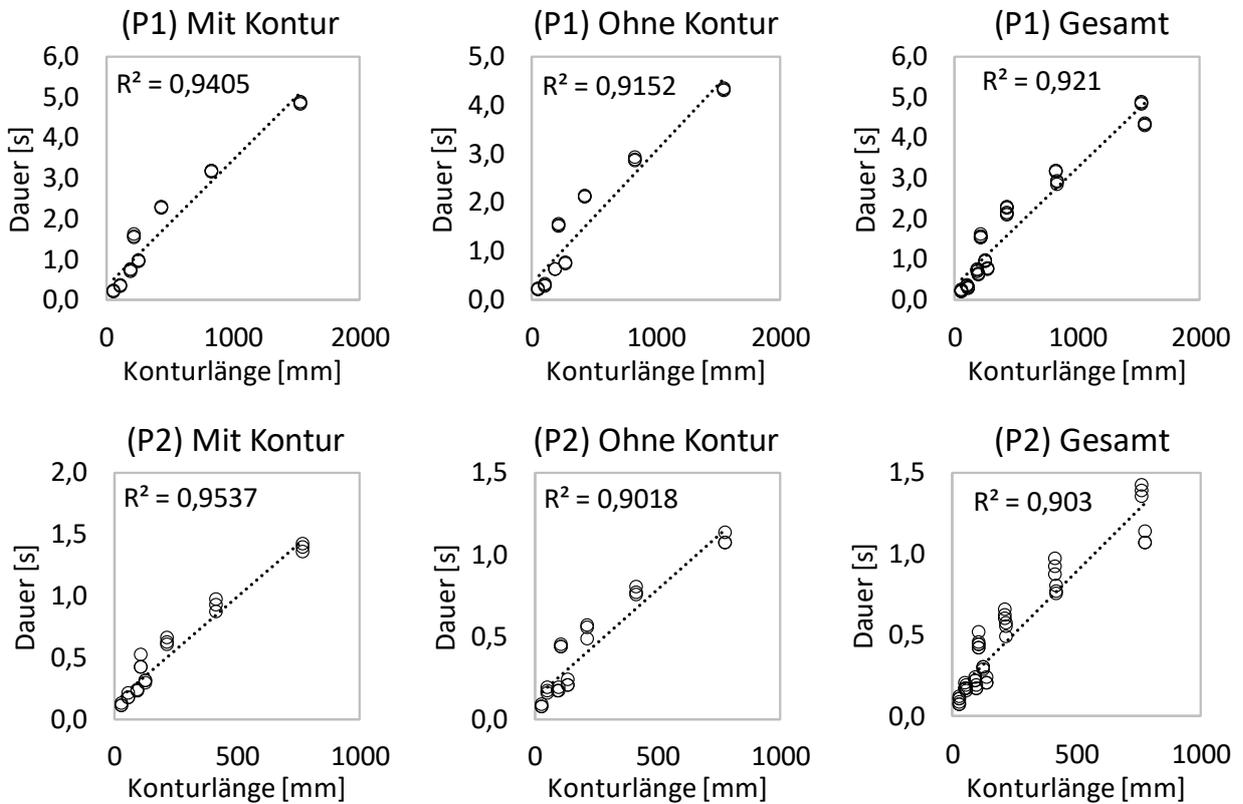


Abbildung 67: Korrelation für (P1) und (P2) mit der Konturlänge

Es sind folgende Erkenntnisse festzuhalten:

- Die Anzahl an Vektoren bietet eine sehr hohe Beschreibungsgüte, die zudem für die untersuchten Proben verbessert wird, wenn lediglich die Anzahl der Füllvektoren betrachtet wird. Insofern dieses Vorgehen auf weitere Bauteile übertragbar ist, verringert sich der Aufwand zur Datenbeschaffung.
- Die Konturlänge bietet als Einzelfaktor innerhalb der Parametersets eine sehr hohe Beschreibungsgüte. Parameterübergreifend wird diese jedoch nicht erreicht. Durch Einbezug verfahrensspezifischer Faktoren wie dem Scanlinienabstand, wird wiederum eine hohe Beschreibungsgüte erreicht.

Die Feststellungen basieren auf entsprechend definierten Versuchsproben, sodass eine Validierung anhand verschiedener Bauteile notwendig ist.

4.5. Bewertung der Auswirkungen auf die Prozesskette

In diesem Kapitel erfolgt abgeleitet aus den Versuchsreihen zunächst eine Bewertung der Prozesskette auf qualitativer Basis, welche anschließend in ein Kalkulationsschema überführt wird, welches bereits in **Kapitel 2.4** erläutert wurde. Hierdurch werden die Versuchsdaten aufgeschlüsselt in die Faktoren Zeit, Material und Personal sowie resultierende Kosten, um eine transparente Darstellung der Auswirkungen zu erhalten.

4.5.1. Qualitative Bewertung des Herstellprozesses

Zunächst erfolgt in nachfolgender Tabelle 24 eine qualitative Bewertung der Prozessbestandteile und deren Sensitivität gegenüber der geometrischen Komplexität mit Blick auf Kosten und Dauer für die jeweiligen SLS-Anlagen. Diese wurde anhand der Erkenntnisse der bisherigen Versuche abgeleitet, wobei die Höhe des Einflusses in niedrig, mittel und hoch eingeteilt wird. Eine Quantifizierung wird hierbei bewusst vermieden, da der Untersuchungsfokus auf dem Generierprozess liegt und die Vor- und Nachbearbeitung stark in Abhängigkeit der eingesetzten Hard- und Software sowie dem entsprechenden Personal variiert. Stattdessen erfolgt zu den jeweiligen Aspekten und Varianten nachfolgend eine kurze Erläuterung.

Tabelle 24: Einflüsse auf die Dauer und Kosten für die Prozesskette zweier SLS-Systeme

Prozessschritt		Einfluss der Geometrie		Einfluss auf Dauer		Einfluss auf Kosten	
		P100	HT403P	P100	HT403P	P100	HT403P
Vorbereitung							
1	Datumumwandlung	✓	✓	Mittel	Mittel	Niedrig	Niedrig
2	Bauteile orientieren	✓	✓	Mittel	Mittel	Niedrig	Niedrig
3	Bauteile slicen	✓	✓	Hoch	Hoch	Niedrig	Niedrig
4	Datentransfer	✓	✓	Mittel	Mittel	Niedrig	Niedrig
5	Rüsten ³¹	(✓)	(✓)	Mittel	Mittel	Niedrig	Niedrig
Bauprozess							
6	Aufheizen	-	-	-	-	-	-
7	Belichten/Schmelzen	✓	✓	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
8	Beschichten/ Heizen	✓	✓	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
9	Abkühlen intern	✓	✓	Hoch	Mittel	Hoch	Mittel
10	Abkühlen extern	✓	✓	Hoch	Mittel	Niedrig	Niedrig
Nachbearbeitung							
11	Entpacken	✓	✓	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
12	Strahlen	✓	✓	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
13	Folgeschritte	✓	✓	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch

³¹ Im Fall der Materialersetzung steigt der Aufwand zur Reinigung der Prozesskammer und des Laserschutzglases

- Die **Vorbereitung der Daten** ist zunächst unabhängig von dem Anlagensystem, jedoch nimmt die Anzahl der Bauteile für größere Bauräume und damit die zu verarbeitenden Daten entsprechend zu. Folglich wirken sich hohe Komplexitätsgrade besonders auf die Bauteilorientierung und -positionierung aus, sodass automatisierte Nesting-Vorgänge in den Versuchen nicht mehr möglich waren bzw. Abstürze begünstigt haben. Diese Auswirkungen erstrecken sich zudem auf das Slicing, da die Parameterzuordnung anhand der zuvor angeordneten Daten vorgenommen wird.
- Der **Rüstvorgang** wird beeinflusst, insofern es durch die Bearbeitung komplexer Geometrien zur Rauchbildung und entsprechenden Ablagerungen an den Wänden sowie dem Laserschutzglas kommt. Hierdurch steigen zum einen die Personalkosten, zum anderen sinkt die Maschinenlaufzeit pro Jahr. Die Rauchbildung variiert hierbei in Abhängigkeit des verwendeten Materials inkl. Additiven sowie der Luftfeuchte, wodurch eine allgemeingültige Aussage nicht trivial ist.
- Der **Bauprozess** ist in der Aufheizphase unabhängig von der Komplexität. Jedoch ergeben sich im Generierprozess die höchsten Einflüsse auf die Lasermaterialbearbeitung, den Pulverauftrag und das Heizen. Dies ist besonders kritisch, da eine erhöhte Materialalterung aufgrund verlängerter Zeiten bei hohen Temperaturen stattfindet.
- Zusätzlich wirkt sich diese Dauer direkt auf den anschließenden **Abkühlprozess** aus. Dessen Dauer variiert jedoch in Abhängigkeit des Materials und dessen Verarbeitungstemperatur sowie der generierten Packdichte und Bauhöhe, sodass eine allgemeingültige Aussage nicht vorgenommen werden kann. Unter der Annahme, dass die Dauer lediglich der Generierdauer entspricht, erfolgt jedoch bereits eine enorme Steigerung der Gesamtdauer. Zudem ist zu unterscheiden, ob die Abkühlphase in der Maschine, nur zum Teil in der Maschine oder extern erfolgt. Dies wirkt sich wiederum auf die Kapazität sowie auf die Flexibilität der Maschine aus und ist aus organisatorischer und wirtschaftlicher Perspektive relevant.
- **Nachbearbeitungsprozesse**, wie das Entpacken und Strahlen, werden ebenfalls stark von der Komplexität beeinträchtigt, wobei Dauer und Kosten besonders mit niedrigem Automatisierungsgrad durch den personalintensiven Einsatz steigen.

4.5.2. Quantitative Bewertung der Herstellkosten

Unter Einbezug der Versuchsdaten aus **Kapitel 4** wird der Herstellprozess quantitativ abgebildet, um eine Übersicht zur Kostenverantwortung der Teilbereiche zu erhalten. Aufbauend auf entsprechenden Maschinenstundensätzen werden die Versuche V1 und V6 abgebildet, welche das Potenzial einer entsprechenden Komplexitätsanpassung für zwei verschiedene Anlagensysteme darstellen. Der Maschinenstundensatz, die Fertigungsrandbedingungen und Personalkosten inklusive angenommener Prämissen sind im Anhang in Tabelle 27 bis 30 beigefügt. Zur Kalkulation werden die Messwerte zur Dauer des Generierprozesses und für das Heizen sowie den Pulverauftrag aus den Versuchen verwendet, welche im Anhang in Tabelle 31 und Tabelle 32 zu finden sind. Auf Basis dieser Daten werden mit der zeit- und tätigkeitsbezogenen Kalkulation in Kombination mit dem Maschinenstundensatz die Herstellkosten als Summe aus den Materialkosten, Fertigungskosten inkl. jeweiliger Arbeitskosten und Zuschläge gebildet.

Als weitere Prämissen werden angenommen:

- Als Abkühldauer wird die Generierdauer angenommen. Die interne und externe Abkühlung der beiden Anlagensysteme unterscheidet sich dahingehend, dass für die P100 eine interne Mindestabkühldauer von zehn Stunden angesetzt wird, welche für die HT403P lediglich zwei Stunden beträgt.
- Durch den Umstand, dass einige Prozesse nicht quantifiziert wurden, da sie nicht im Fokus der Untersuchungen stehen, wird der Aufwand für die Datenvorbereitung, das Rüsten und Nachbearbeiten für alle Komplexitätsstufen gleichbleibend angenommen.

Hierbei werden folgende Aspekte vernachlässigt:

- Für die Datenvorbereitung werden Störungen des Arbeitsablaufs vernachlässigt, obwohl sich die Dauer zum Teil vervielfacht.
- Für Komplexitätsstufe vier entsteht eine stärkere Pulveragglomeration, die in Kombination mit einer schlechteren Zugänglichkeit die Menge an verlorenem/schadhaftem Pulver und den Personalaufwand erhöht.
- Die Rüstdauer wird durch den Reinigungsaufwand infolge von Rauchbildung und Materialalterung erhöht und steigert folglich den Personalbedarf.
- Das Entpacken und Strahlen der Teile benötigt mehr Zeit und damit Personalkapazität, wobei gleichzeitig die Menge an rückführbarem Pulver verringert wird.

- Der Stromverbrauch, als auch der Druckluftverbrauch variiert in Abhängigkeit der Packdichte bzw. der Belichtungsdauer, dem Material und dafür notwendiger Heizleistung.

Die Szenarien werden nachfolgend in Abbildung 68 dargestellt. Die Steigerung der Zeit und Kosten ist prozentual für eine Steigerung der Komplexität von Stufe eins auf Stufe vier angegeben. Zu erkennen ist, dass sowohl die Dauer als auch die Kosten mit zunehmender Komplexität signifikant erhöht werden, da die Belichtungsdauer einen großen Teil der Herstelldauer einnimmt und sich nachfolgend auf die Abkühlzeit auswirkt. Wie bereits in den Versuchen beschrieben wurde, nimmt die Belichtungsdauer für die Anlage HT403P einen größeren Anteil ein als für die Anlage P100. Die Dauer und Kosten für den folgenden Abkühlprozess fallen für die HT403P in Relation zur P100 geringer aus, da der Prozess größtenteils unabhängig von der Maschine stattfindet. Hierdurch entfällt der Maschinenstundensatz für diese Dauer und die Kapazität für weitere Aufträge steigt. Wie in Abbildung 69 zu sehen ist, führen diese Unterschiede auf ein Jahr gesehen dazu, dass die Anzahl von Maschinenstarts und produzierten Bauteilen erheblich variiert.

Bei dieser Betrachtung sind folgende Szenarien und Folgen zu bedenken:

- Der Aufwand für die Datenvorbereitung reduziert sich für die Serienfertigung von immer gleichen Bauteilen, insofern der Baujob unverändert produziert wird.
- Die Rüstzeit für die Aufbereitung des Pulvers sowie die Nachbearbeitung mittels Strahlen kann je nach Automatisierungsgrad und Ausstattung reduziert werden.
- Die Generierdauer kann durch Anwendung alternativer Belichtungsstrategien, z.B. durch Verringerung von Positionswechseln und Sprüngen reduziert werden. Darüber hinaus spielt die Geometrie der zu fertigenden Bauteile eine zentrale Rolle, wenn es um die erreichbare Packdichte geht. Es wurde hierbei erläutert, dass die Dauer pro Schicht materialspezifischen Limitationen unterliegt, die mit Blick auf die Prozessstabilität und Bauteilqualität einzuhalten sind.
- Die Abkühldauer innerhalb und außerhalb der Maschine erhöht sich für Materialien wie Polyamid (z.B. PA12) deutlich, wodurch weitere Kosten entstehen und die Fertigungskapazität verringert wird.
- Die Auffrischrate des verwendeten TPU-Materials beträgt lediglich 10 %. Bei der Verwendung anderer Materialien (z.B. PA12 und PA11) sind Auffrischraten von bis zu 50 % möglich, die sich resultierend auf den Kostenanteil des Materials auswirken.

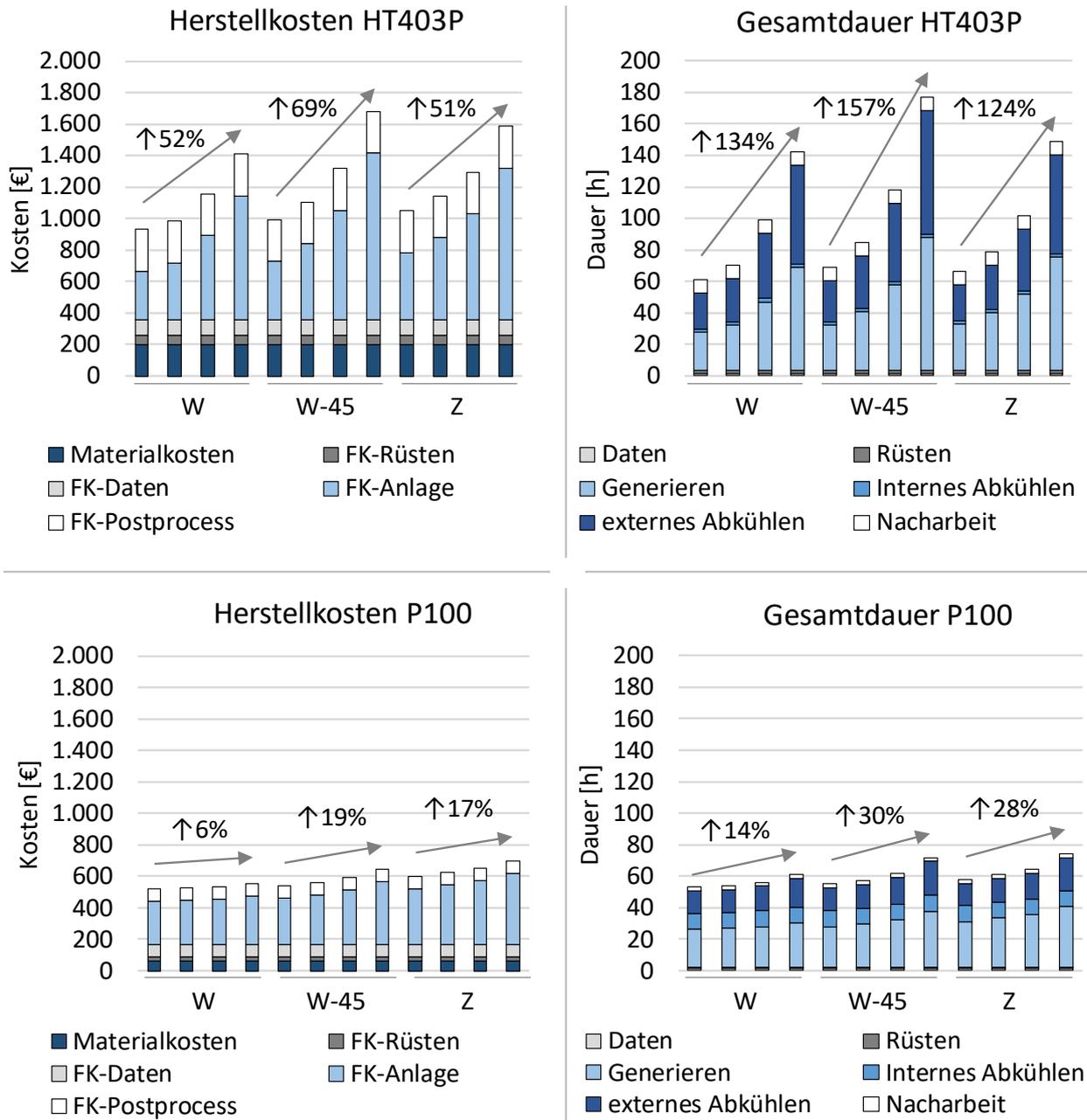


Abbildung 68: Herstellkosten und Gesamtdauer für die SLS-Systeme HT403P und P100

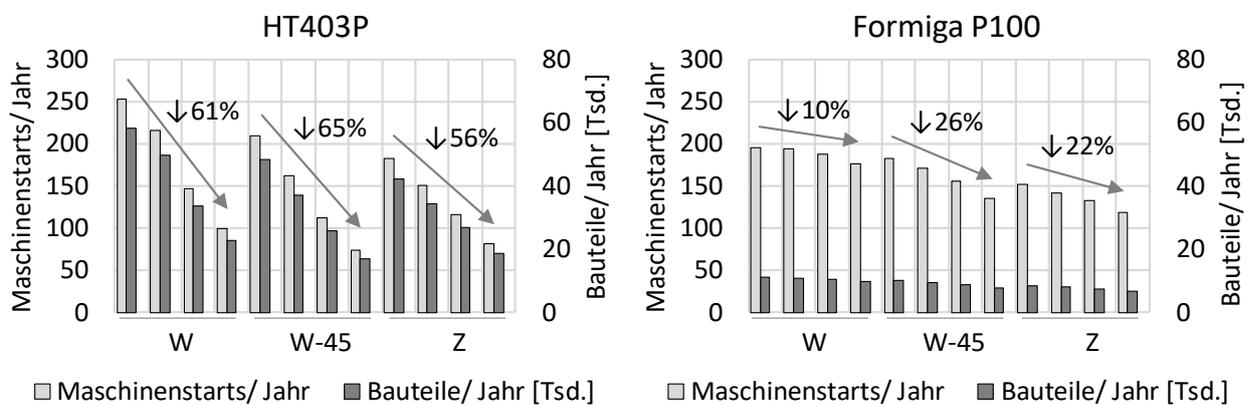


Abbildung 69: Potenzielle Anzahl von Bauaufträgen und Bauteilen pro Jahr

4.6. Ergebniszusammenfassung

In diesem Kapitel werden Erkenntnisse in Bezug auf die Versuche und die Auswirkungen auf die Prozesskette zusammengefasst und entsprechende Handlungsempfehlungen abgeleitet, welche als Grundlage zur Validierung in **Kapitel 5** dienen. Die adressierten Bereiche umfassen hierbei die SLS-Anlagentechnik, die Materialien inkl. notwendiger Bearbeitungsparameter, die Bauteilgeometrie sowie die Methodik selbst. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird eine verfahrensspezifische Definition der Komplexität abgeleitet und mögliche Anwendungsgebiete erörtert.

4.6.1. Maschine, Material und Bauteilgeometrie

Maschine

Durch die Versuche mit zwei unterschiedlichen SLS-Anlagensystemen wurde gezeigt, welchen Einfluss die Maschinensystematik besitzt:

- Der Einfluss der Komplexität ist für beide Anlagen signifikant und steigt mit zunehmendem Anteil der Laserinteraktionsdauer in Bezug zur Generierdauer an.
- Die neue Anlagengeneration (Farsoon HT403P) zeigt den Trend zur Verringerung von nicht wertschöpfenden Anteilen wie dem Pulverauftrag sowie der Auslagerung von Abkühlprozessen, wodurch der Einfluss der Komplexität an Bedeutung gewinnt.
- Für das Anlagensysteme EOS Formiga P100 konnte im Falle von TPU gezeigt werden, dass die Generierdauer überwiegend von dem Pulverauftrag und Heizen abhängt und eine geringere Sensitivität gegenüber komplexen Geometrien besteht. Anhand der Simulationen konnte eine ähnliche Sensitivität für PA12 dargestellt werden. Für TPE wurde im Vergleich die höchste Sensitivität festgestellt, bedingt durch eine hohe Differenz zwischen Kontur- und Füllgeschwindigkeit sowie die doppelte Konturbelichtung. Obwohl die Generierdauer für diese Anlage maßgeblich von der Anzahl der zu erzeugenden Schichten bzw. der Bauhöhe beeinflusst wird, besitzt die Komplexität einen signifikanten Einfluss auf die Produktionsdauer.

Diese Kriterien können bereits bei der Anlagenauswahl genutzt werden, um den Einfluss durch komplexe Geometrien abzuschätzen und diesen entsprechend vorzubeugen.

Material

Für die unterschiedlichen Materialien sowie die dafür notwendigen Bearbeitungsparameter wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Der Einfluss der Komplexität variiert in Abhängigkeit des Materials bzw. direkt mit den dafür notwendigen Bearbeitungsparametern. Die Anzahl und Länge der Vektoren verändert sich hierbei besonders durch den Scanlinienabstand, die Anzahl von Belichtungen für Kontur und Füllung sowie durch den Beam-Offset. Diese Kriterien können ebenfalls bei der Materialauswahl genutzt werden, um den Einfluss durch komplexe Geometrien abzuschätzen und entsprechend einzuplanen, bzw. diesen vorzubeugen.
- Die Auswahl eines geeigneten Komplexitätsgrades führt durch Verringerung von Temperaturdifferenzen und Materialersetzungen zu Prozessverbesserungen hinsichtlich Maßhaltigkeit, Reproduzierbarkeit und Hardwareverschleiß.
- Speziell für komplexe Geometrien steigt der Reinigungsaufwand infolge verringerter Zugänglichkeit und Pulveragglomeration. Die Anhaftung von Pulver wird dabei durch hohe Energieeinträge verstärkt. Dies geht zudem mit einer reduzierten Rückführbarkeit von Material einher. Eine systematische Analyse dieser Einflüsse auf die Nachbearbeitung ist weder im Stand von Wissenschaft und Technik noch in dieser Arbeit durchgeführt worden und bietet entsprechendes Forschungspotenzial.
- Auswirkungen auf die mechanischen Bauteileigenschaften in Abhängigkeit der Komplexität durch Wärmeverteilung, Materialersetzung u.a. sind bisher noch nicht analysiert worden. Diese stellen aber ein weiteres Optimierungskriterium dar, welches bei der Produkt- und Produktionsoptimierung berücksichtigt werden sollte.

Bauteilgeometrie

Die Auswirkungen der verschiedenen Geometriemerkmale, die in der Produktgestaltung berücksichtigt werden sollten, werden im Folgenden beschrieben:

- **Bauteilvolumen:** Definiert die zu belichtende Fläche sowie den direkten Materialverbrauch und beeinflusst die Wärmeverteilung sowie die Zeit zum Abkühlen.
- **Bauteilhöhe:** Beschreibt die Anzahl der aufzutragenden Schichten und beeinflusst maßgeblich die Generierdauer. Der Einfluss variiert hierbei durch die Verteilung der Prozesse Laserbearbeitung sowie Pulverauftrag und Heizen. Je größer der Anteil der Belichtung an der Generierdauer ist, desto geringer ist der Einfluss der Bauteilhöhe.

- **Konturlänge:** Gibt Aufschluss über die Komplexität des Bauteils und hat in den Versuchen starke Wechselwirkungen mit der Generierdauer aufgewiesen. Ihre Bedeutung variiert dabei unter anderem durch die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Belichtungsmodi für Kontur und Füllung. Zum Vergleich unterschiedlicher Bauteile ist jedoch eine Bezugsgröße wie das Bauteilvolumen notwendig, damit der Einfluss korrekt zugeordnet wird.
- **Bauteilorientierung:** Beeinflusst neben der Bauhöhe direkt die Anzahl und Länge der Vektoren sowie die Konturlänge und somit maßgeblich die Generierdauer. Zusätzlich werden die mechanischen Eigenschaften stark davon beeinflusst.
- **Struktur- und Wandstärke:** In Abhängigkeit der verwendeten Geometrie wird die Anzahl und Länge der Scanvektoren sowie notwendige Positionswechsel definiert. Diese wirken sich sowohl auf die Generierdauer, Temperaturverteilung als auch auf die Materialersetzung und Bauteileigenschaften aus.

4.6.2. Methodik/Kennzahlen

Aus den Versuchen ergeben sich mit Blick auf die Komplexitätsindikatoren für die Anlagen und Materialien unterschiedliche Rangfolgen. Die Eignung der Kennzahlen ist davon abhängig, ob der Vergleich innerhalb eines Materials/Parametersatzes oder materialübergreifend/parameterübergreifend angestellt wird. In Tabelle 25 werden hierzu die Varianten für beide Anlagen dargestellt. Diese wurden anhand der Versuchsergebnisse abgeleitet und werden in **Kapitel 5** validiert. Als Rangfolge resultiert folgende Aufstellung:

1. **Anzahl Füllvektoren/Volumen:** Parameterintern wird für beide Anlagensysteme die höchste Beschreibungsgüte erreicht. Parameterübergreifend trifft dies ebenfalls für die Farsoon-Anlage zu. Da für die EOS P100 materialspezifisch die Geschwindigkeiten von Kontur und Füllung variiert werden, wird nur ein mittleres Bestimmtheitsmaß erreicht.
2. **Konturlänge/Volumen:** Parameterintern bietet diese Kennzahl ein durchweg hohes Bestimmtheitsmaß. Dieses bleibt parameterübergreifend erhalten, insofern Parameter wie der Scanlinienabstand berücksichtigt werden.
3. **Konturlänge/Fülllänge:** Parameterintern liefert diese Kennzahl für beide Anlagen ein mittleres bis hohes Bestimmtheitsmaß, das im Falle der EOS P100 ebenfalls parameterübergreifend erhalten bleibt.

Tabelle 25: Rangfolge der aussagekräftigen Faktoren

EOS Formiga P100		Farsoon HT403P	
Innerhalb eines Parametersatzes	Parameter-übergreifend	Innerhalb eines Parametersatzes	Parameter-übergreifend
Anzahl Füllvektoren/ Volumen	Konturlänge/ Volumen (+ Scanlinien- abstand)	Anzahl Füllvektoren/ Volumen	Anzahl Füllvektoren/ Volumen
Konturlänge/Volumen	Konturlänge/Fülllänge	Konturlänge/Volumen	Konturlänge/Volumen (+ Scanlinienabstand)
Konturlänge/Fülllänge	Anzahl Füllvektoren/ Volumen	Konturlänge/Fülllänge	

Hieraus können folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet werden:

- Insofern die Bauteilorientierung nicht durch optische und/oder mechanische Bauteilanforderungen eingeschränkt wird, ist jene zu wählen, welche die geringste Anzahl an Scanvektoren und/oder die geringste Konturlänge hervorruft, um die Anzahl an Positionswechsel möglichst gering zu halten.
- Für die Bauteilgestalt ist eine möglichst geringe Differenz zwischen der Strukturstärke anzustreben, um mit einem Parametersatz sowohl den Schichtzusammenhalt als auch eine raucharme Fertigung bzw. dichte Bauteile zu gewährleisten.
- Da die Anzahl von Scanvektoren sehr stark mit der resultierenden Generierdauer korreliert, sind alle Parameter, welche die Anzahl steigern, auf alternative Einstellungen zu prüfen. Exemplarisch sind der Scanlinienabstand und die Anzahl von Belichtungen zu nennen.

Es ist anzumerken, dass die ermittelten Korrelationen keine Kausalität, sondern einen Zusammenhang beschreiben, dessen Stärke in den jeweiligen Versuchen nachgewiesen wurde.

4.6.3. Verfahrensspezifische Definition der Komplexität für das SLS

Abgeleitet aus diesen Erkenntnissen wird die Definition der Komplexität in **Kapitel 2.5.** verfahrensspezifisch ergänzt, sodass folgende Definition entsteht:

*„**Geometrische Komplexität** oder **Formkomplexität** wird definiert durch die Anzahl, Gestalt und Häufigkeit von Elementen, die zur Beschreibung eines Bauteils notwendig sind und mit dem Herstellprozess Additiver Fertigungsverfahren in direkter Wechselwirkung stehen. Geometrische Elemente werden hierbei definiert als ein Punkt, eine Linie, eine Fläche oder ein Volumen. Die Einflusshöhe auf den Herstellprozess einschließlich Produktivität und Qualität ist in Form verfahrensspezifischer Kennzahlen festzustellen.“*

Verfahrensspezifische Anmerkungen – Selektives Lasersintern:

Auf die einzelne Schicht bezogen entsteht eine Querschnittsfläche sowie die zugehörige Berandung (Kontur), welche die Grundlage für die Füll- und Konturbearbeitungspfade darstellen.

- **Anmerkung 1:** Die Verteilung der Querschnittsfläche (Fragmentierung) sowie die verfahrensspezifischen Parameter Scanlinienabstand, Anzahl der Belichtungen und Beam-Offset definieren die Anzahl und Länge der Bearbeitungspfade.*
- **Anmerkung 2:** Die Querschnittsverteilung beeinflusst die Anzahl notwendiger Positionswechsel inklusive Verzögerungen und Beschleunigungen des Scanners sowie den Leerlauf des Lasers durch Ein- und Ausschalten.*
- **Anmerkung 3:** Insofern unterschiedliche Scangeschwindigkeiten in den Bereichen Kontur und Füllung verwendet werden, kann ein großer Konturanteil zur Verlängerung der Generierdauer führen.*

4.6.4. Anwendungsmöglichkeiten

Mit den zuvor beschriebenen Erkenntnissen sowie der verfahrensspezifischen Definition werden folgende Fälle und Anwendungsmöglichkeiten identifiziert:

1. Anwendung: Verfahrensunspezifische Komplexität

Anhand der Verhältnisse zwischen Basisfaktoren wie Volumen und Fläche kann, wie in den Methoden aus **Kapitel 3.2** beschrieben wurde, bereits eine grobe verfahrensunspezifische Kategorisierung vorgenommen werden. Die Güte dieser Kennzahlen hängt jedoch stark von dem betrachteten Verfahren ab.

2. Anwendung: Verfahrensspezifische Komplexität

Unter Bezugnahme auf ein spezifisches Verfahren ergeben sich mehrere Anwendungsmöglichkeiten, die spezifisch nutzbar sind. Hierbei werden folgende Anwendungen unterschieden:

2.1. Materialauswahl/Materialvergleich

Bevor es zu einem Bauteilvergleich kommt, können bereits in der Materialauswahl grundlegende Parameter, z.B. durch Herstellervorgaben miteinander verglichen werden. Beispielsweise liefern der Scanlinienabstand, die Anzahl der Belichtungen sowie die Schichtstärke Anhaltspunkte, die sich auf die Generierdauer auswirken. Der Vergleich von Materialien liefert im Hinblick auf die vom Hersteller vorgegebenen Parameter bereits eine Abschätzung zu deren Sensitivität gegenüber komplexen Geometrien.

2.2. Bauteilvergleich

Im weiteren Verlauf ist zu unterscheiden, inwiefern verschiedene Materialien infrage kommen und in welchem Ausmaß die Parameter verändert werden können/dürfen. Die Wahl des Materials kann z.B. infolge notwendiger Zertifizierungen und Anforderungen auf ein Material limitiert sein. Hierbei ist wiederum zu unterscheiden, ob die Bearbeitungsparameter ebenfalls fixiert sind oder angepasst werden können. Es ergeben sich die Kombinationen:

2.2.1. Material fixiert/Parameter fixiert

Im ersten Fall kann die Wechselwirkung mit der Komplexität verhältnismäßig schnell in den Entwicklungsprozess zurückgeführt werden, da sich die Prozess-Materialkombination immer gleich auswirkt. Dieser Fall trifft auf Anlagensysteme zu, die nur mit herstellereigenen Materialien und überwiegend fest vorgegebenen Parametern arbeiten.

2.2.2. Material variabel/Parameter fixiert

Der zweite Fall umfasst die Auswahl verschiedener Materialien, welche mit festen Parametersets bearbeitet werden. Dieser Fall trifft wiederum auf Anlagensysteme zu, die mit herstellereigenen Materialien und überwiegend fest vorgegebenen Parameter arbeiten.

2.2.3. Material fixiert/Parameter variabel

Der dritte Fall umfasst die Beibehaltung eines spezifischen Materials, z.B. durch die Notwendigkeit von speziellen Materialeigenschaften und/oder Zertifizierungen, wobei die Bearbeitungsparameter an die zu fertigende Komplexität angepasst werden können.

2.2.4. Material variabel/Parameter variabel

Der vierte Fall bietet Freiheiten in beiden Bereichen, sodass bei der Bauteil- und Prozessentwicklung bereits präventiv die Kombination aus Komplexität, Material und möglichen Parametersets berücksichtigt werden kann.

Anschließend sind verfahrensspezifische Vergleichsmerkmale zu ermitteln, welche entsprechende Rückschlüsse auf die Auswirkungen hinsichtlich Prozessdauer und Kosten zulassen. Eine schematische Darstellung der verschiedenen Anwendungen erfolgt in Abbildung 70. Es ist anzumerken, dass die durchgeführten Versuche, Kalkulationen und Erkenntnisse durch den zuvor definierten Fokus dieser Arbeit geprägt sind. Hierbei sind im Rahmen einer umfassenden Bauteilentwicklung und Produktionsplanung zahlreiche weitere Aspekte zu beachten, die im Ausblick aufgegriffen werden.

Um eine Übersicht der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Bereichen zu erhalten, werden in Abbildung 71 die Erkenntnisse aus dem analysierten Stand von Wissenschaft und Technik sowie die gewonnenen Versuchserkenntnisse als grafische Übersicht dargestellt. Diese bilden die Grundlage für Weiterentwicklungen, welche im Ausblick aufgegriffen werden. Die Bereiche inklusive deren Wechselwirkungen und Verknüpfungen untereinander wurden auf bestehenden Kenntnissen aufgebaut, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird.

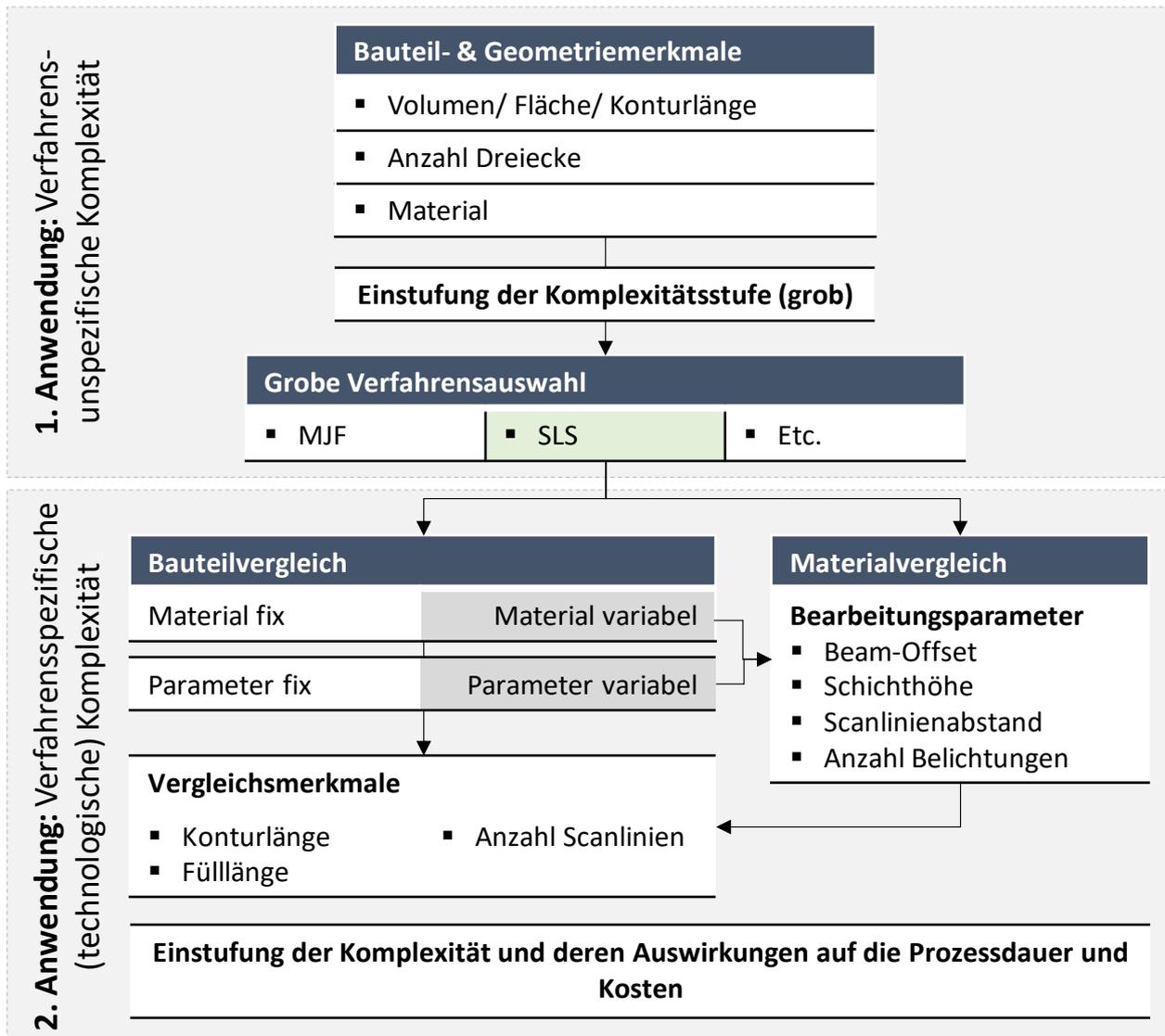


Abbildung 70: Anwendungsmöglichkeiten der Methodik (Eigene Darstellung)

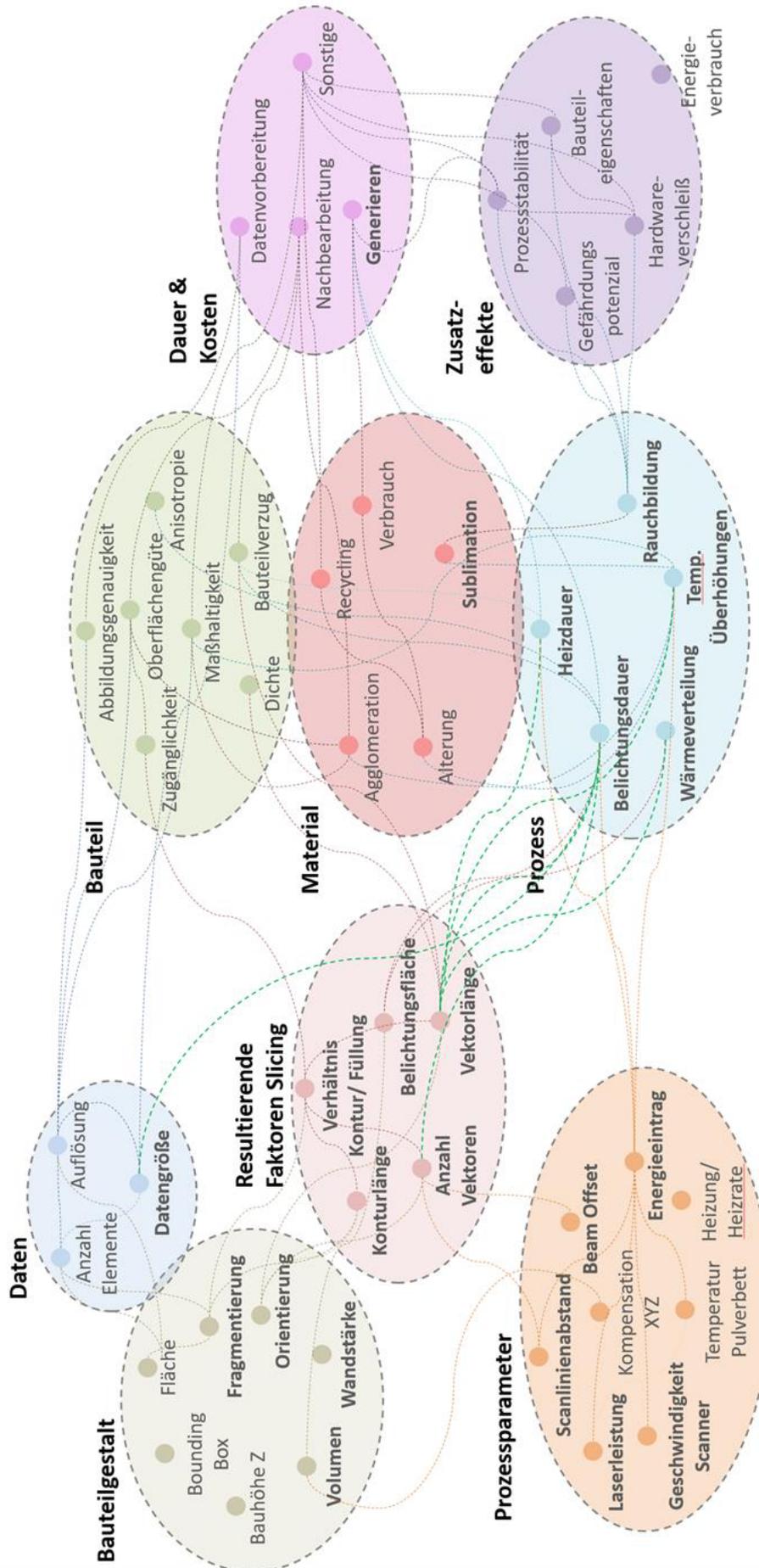


Abbildung 71: Wechselwirkungen im Herstellprozess durch die geometrische Komplexität (Eigene Darstellung)

5. Validierung der Methodik

In diesem Kapitel werden die bisherigen Erkenntnisse und Methoden anhand ausgewählter Szenarien auf ihre Funktionsfähigkeit geprüft. Hiermit wird sichergestellt, dass diese auch außerhalb von definierten Versuchsproben gültig sind bzw. die Funktionsfähigkeit vorhanden ist. Gleichzeitig werden Rückschlüsse über die Anwendbarkeit sowie mögliche Restriktionen der Methodik aufgedeckt. Die gewählten Szenarien sind hierzu auf verschiedene Einsatzmöglichkeiten ausgerichtet, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

- In **Szenario 1** wird zunächst geprüft, inwieweit eine quantifizierte Komplexitätsbewertung Rückschlüsse auf den Fertigungsaufwand im Generierprozess zulässt. Die Inhalte dieses Szenarios wurden auszugsweise in (Haefele et al., 2024) veröffentlicht.
- **Szenario 2** umfasst einen Serienfertigungsprozess, wobei festgestellt werden soll, welche Auswirkungen die Komplexität der zur Verfügung stehenden Produktvarianten auf den Produktionsprozess hat.
- In **Szenario 3** wird der Transfer auf das ebenfalls vektorbasierte Verfahren der Materialextrusion anhand der Anlage Markforged Mark II dargestellt.

5.1. Szenario 1 - Kategorisierung von Bauteilen

Versuchsziel:

In diesem Szenario werden die zuvor erarbeiteten Kennzahlen zur Quantifizierung und Kategorisierung der Komplexität auf ihre Validität geprüft. Im Gegensatz zu den zuvor verwendeten Versuchskörpern sollen unterschiedliche Bauteile miteinander verglichen werden, um die Anwendbarkeit der Erkenntnisse für den realen Einsatz zu validieren. Diese Vorgehensweise umfasst den verfahrensspezifischen Bauteilvergleich (Anwendung 2) und den Fall 2.2.1 (Material und Parametersatz fixiert, siehe **Kapitel 4.6**). Die Anwendung wird beispielhaft auf eine Verfahrens-/Materialkombination mit der Anlage HT403P sowie dem Material TPU88A mit dem Parametersatz (P2) durchgeführt. In Bezug auf die Kennwerte aus **Kapitel 4.3.1** werden die Indikatoren (1) bis (3) auf ihre Aussagekraft geprüft und den zuvor erarbeiteten Kennzahlen (4) bis (6) gegenübergestellt:

- | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| 1. Bauteilvolumen | 2. Volumen/
Bounding Box Volumen | 3. Oberfläche/
Bounding Box Volumen |
| 4. Scanvektoren/
Volumen | 5. Konturlänge/
Fülllänge | 6. Konturlänge/
Volumen |

Versuchsaufbau:

Zur Kategorisierung werden im Folgenden drei verschiedene Bauteilszenarien mit insgesamt 34 Bauteilen betrachtet, wie dies in Abbildung 72 zu sehen ist. Diese umfassen die Gruppen (1) steigende Komplexität bei konstantem Volumen (2), steigende Komplexität bei verringertem Volumen und zwei Größen (rot) und (grün) sowie (3) variable Komplexität und variables Volumen.

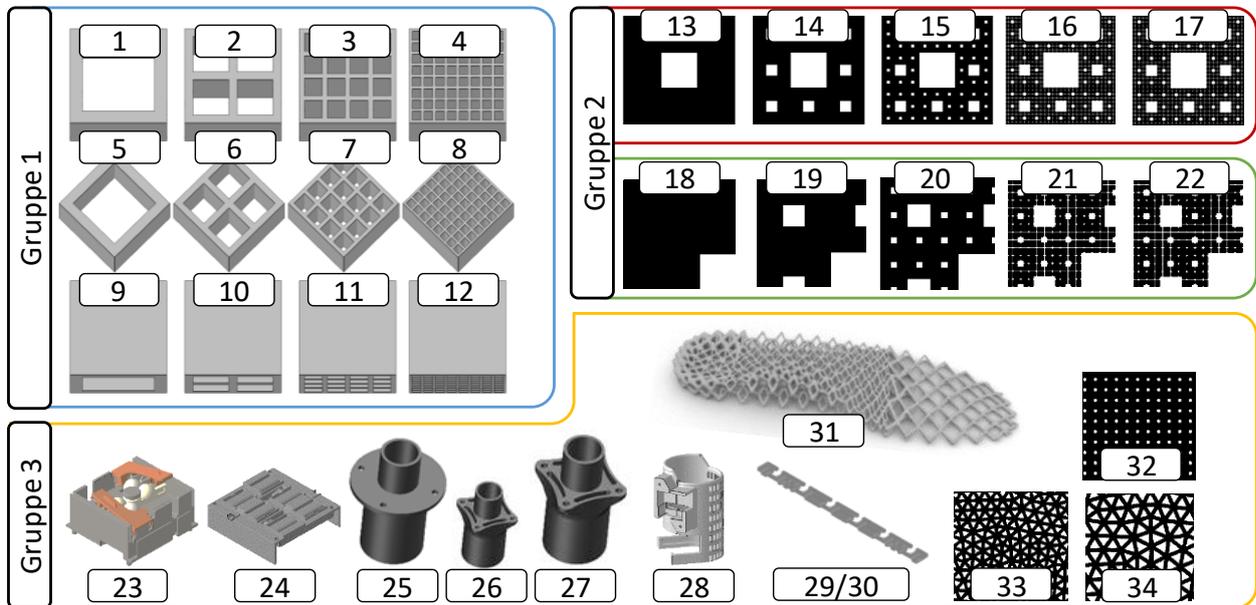


Abbildung 72: Validierungskörper zur Evaluierung von Parametersatz (P1) für TPU-Material

Diese Gruppen werden im Folgenden detailliert beschrieben:

1. **Steigende Komplexität, konstantes Bauteilvolumen:** Berücksichtigt werden die Probekörper „Würfel“ aus den Vorversuchen mit den Orientierungen „stehend“, „liegend“ und mit „45°-Drehung“ um die Z-Achse. Hierdurch werden zusätzlich Rückschlüsse über die Komplexität der vorherigen Versuche in Relation zu den restlichen Geometrien gezogen.
2. **Steigende Komplexität, reduziertes Bauteilvolumen:** Mit Bezug auf die Versuche zur Fertigung des Menger-Schwamms in Versuch V6 wird der zweidimensionale Sierpinski-Teppich in fünf Stufen gefertigt, um Auswirkungen der Komplexität in der Ebene durch Variation der Kontur- und Fülllänge sowie der notwendigen Positionswechsel systematisch zu steigern. Im Vergleich zu den Probekörpern der Vorversuche wird mit steigender Komplexität zusätzlich eine Volumenreduktion erreicht. Hierdurch werden zuvor beschriebene Vorgehen adressiert, welche eine Steigerung der Komplexität bei gleichzeitiger Reduktion des Volumens und der Fertigungsdauer vorsehen. Die Probekörper werden in den Stufen eins bis fünf mit einer Kantenlänge von 112 mm (rot) sowie 250 mm (grün) und einer Höhe von 2 mm in Stückzahl eins ausgeführt. Für die 250 mm Variante wird aufgrund der resultierenden Packdichte nur ein Viertel des entsprechenden Querschnitts erzeugt.

Die Probengröße ist mit Blick auf Komplexitätsstufe fünf ausgelegt worden, sodass für die 112 mm Variante die minimalen Geometriedetails abgebildet werden können.

3. **Variable Komplexität, variables Bauteilvolumen:** Als Probekörper werden Bauteile aus unterschiedlichen Serienanwendungen mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden gefertigt, welche zum Teil in Miniaturform und in unterschiedlicher Orientierung abgebildet werden. Um bei der Auswahl eine hinreichende Verteilung der Komplexitätskennwerte zu gewährleisten, sind zuvor Screeningversuche zu den Komplexitätskennwerten verschiedener Bauteile aufgenommen worden. Die Orientierung der Bauteile richtet sich hierbei nach den Anforderungen hinsichtlich der Oberflächengüte und der mechanischen Eigenschaften. Eine Drehung um 90° wird daher nur für das Bauteil „Abdeckklappe“ berücksichtigt. Das Bauteil „Absaugung (additiv)“ wird zusätzlich in Miniaturform gefertigt.

Alle Probekörper werden jeweils auf einer separaten Ebene gefertigt, um die Generierdauer bauteilspezifisch zuordnen zu können. Als Aufbaurrate dient in der Folge das erzeugte Bauteilvolumen [cm³] zur ermittelten Generierdauer [h]. Die jeweiligen Daten können im Anhang in Tabelle 43 und Tabelle 44 eingesehen werden.

Versuchsauswertung und –diskussion:

Die Aufbaurrate für die jeweiligen Bauteile und die relevantesten Kennwerte aus Kapitel 4.3.1 werden durch Scatter-Plots in Abbildung 73 dargestellt. Weiterhin werden weitere Kennwerte aus Kapitel 2.5.3 in Tabelle 26 aufgelistet. In Abbildung 74 und Abbildung 75 erfolgt eine detaillierte Beschreibung anhand des Kennwertes Füllvektoren pro Volumen.

Kennwertspezifische Erkenntnisse

Zunächst ist in Abbildung 73 zu erkennen, dass je nach betrachtetem Kennwert enorme Unterschiede entstehen, die besonders zwischen den alten Kennwerten (1-3) und den neuen (4-6) erkennbar sind. Die Aufbaurrate nimmt hierbei mit zunehmender Komplexität besonders mit konstantem, aber auch mit reduziertem Volumen signifikant ab. Das Bauteilvolumen (1) besitzt entgegen der Literatur zum SLS einzeln betrachtet keine Aussagekraft, obwohl es vielfach als maßgeblicher Treiber für die Bauzeit dargestellt wird. Für die Kennwerte Volumen/Bounding Box Volumen (2) und Oberfläche/Bounding Box Volumen (3) sind im Falle des SLS ebenfalls nur ein schwacher bis mittlerer Zusammenhang erkennbar. Demgegenüber ist für die Kennwerte (4-6) eine starke Korrelation zwischen der Komplexität und der Aufbaurrate ersichtlich, wobei sich die jeweiligen Kennzahlen durch die Verteilung auf der X-Achse unterscheiden.

Als Trendlinie wird ein Polynom zweiten Grades gewählt. Für das Bestimmtheitsmaß entsteht die abfallende Rangfolge Füllvektoren/Volumen, Konturlänge/Volumen und Konturlänge/Fülllänge.

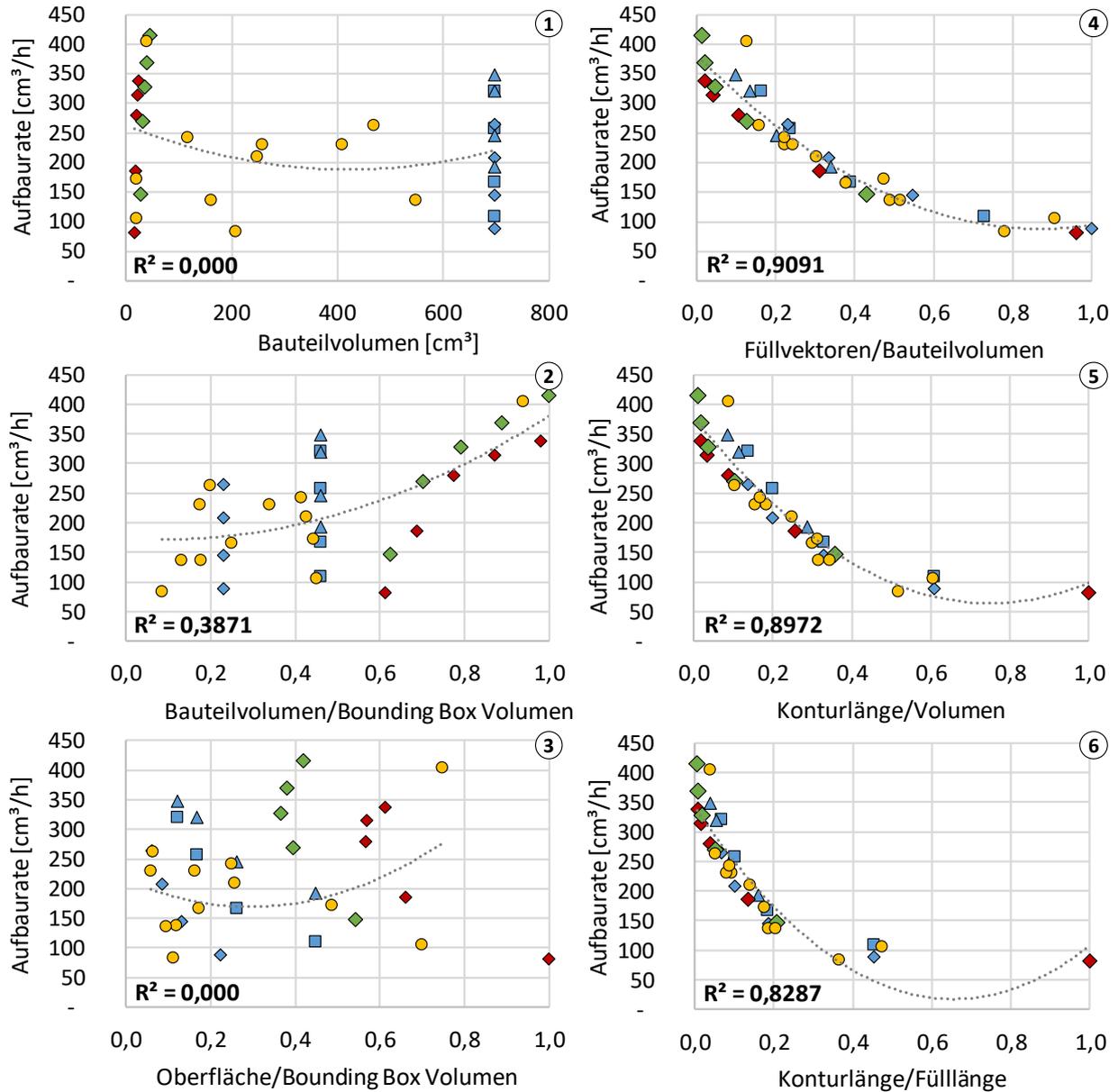


Abbildung 73: Darstellung unterschiedlicher Komplexitätsindikatoren

Tabelle 26: Kennzahlen, inklusive Bestimmtheitsmaß und p-Wert

Kennzahl	R ²	P-wert
(1) Bauteilvolumen	0,0000	*** p < 0,001;
(2) Bauteilvolumen / Bounding Box Volumen	0,3871***	**P < 0,01;
(3) Oberfläche / Bounding Box Volumen	0,0000	* p < 0,05
(4) Füllvektoren / Bauteilvolumen	0,9091**	
(5) Konturlänge / Bauteilvolumen	0,8972***	
(6) Konturlänge / Fülllänge	0,8286***	
(7) Konturlänge / Bounding Box Volumen	0,1961*	
(8) Füllvektoren / Bounding Box Volumen	0,2304*	
(9) Oberfläche / Bauteilvolumen	0,2223**	

Bauteilspezifische Erkenntnisse

Zur Analyse der einzelnen Bauteilgruppen wird zunächst der Bezug auf Abbildung 73 hergestellt. Die detaillierte Analyse wird im Folgenden anhand des Indikators Füllvektoren/Volumen gegenüber der Aufbaurrate durchgeführt, da er die beste Beschreibungsgüte liefert. Zusätzlich wird die Packdichte miteinbezogen, welche bei veränderlichen Volumen als Blasengröße dargestellt und um die entsprechenden Werte ergänzt wird. In Abbildung 74 bis Abbildung 76 werden die Probekörper der jeweiligen Gruppe grafisch dargestellt.

Würfel: Für die Würfelproben aus Gruppe eins ist eine homogene Verteilung über die X-Achse besonders für Kennwert (4) zu sehen (siehe Abbildung 73). In Abbildung 74 ist zu erkennen, dass die Probekörper mit 45°-Drehung als komplexeste Bauteile detektiert werden und im Vergleich auch die niedrigste Aufbaurrate erreichen. Für die Würfel mit einer konstanten Packdichte von 11,5 % sinkt die Aufbaurrate für die höchste Komplexität (Bauteil 8 – Würfel 45° - Komplexität Stufe vier) um bis zu 74,37 % im Vergleich zur niedrigsten Komplexitätsstufe (Bauteil 9 – W-90°). Die Dauer pro Schicht erhöht sich hierbei von 17,8 auf 70,4 Sekunden, der Baufortschritt in Millimeter pro Stunde wird reduziert von 20,15 auf 5,11 mm/h. Für die Kennwerte eins bis drei ist keine Systematik erkennbar, da durch das gleichbleibende Volumen kein Unterschied entsteht.

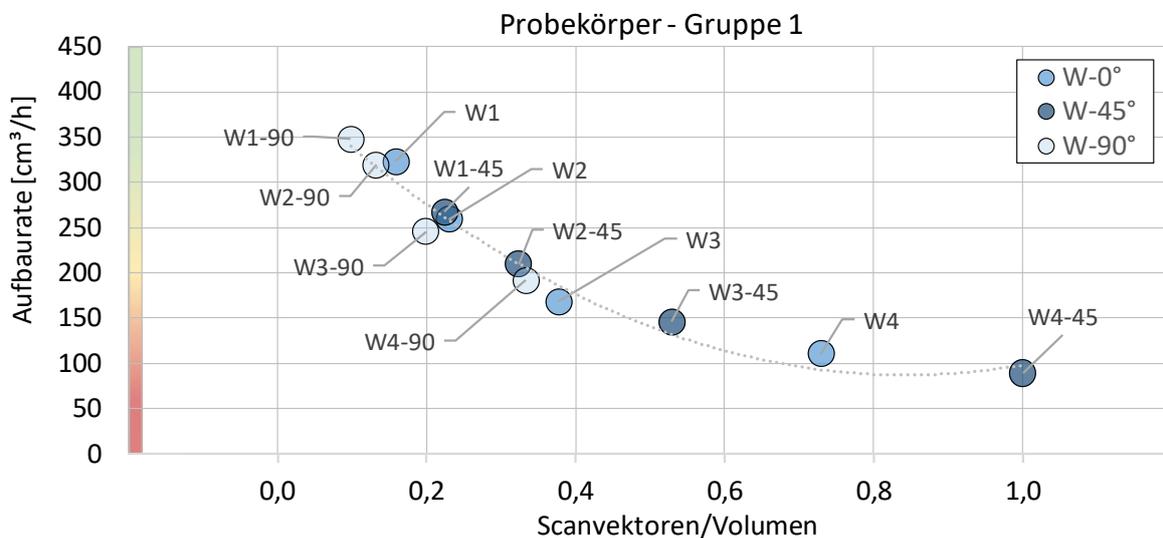


Abbildung 74: Aufbaurrate gegenüber der Komplexität (Scanvektoren/Volumen)

Sierpinski Teppich: Mit Blick auf die Sierpinskivarianten in Gruppe zwei ist in Abbildung 75 zu erkennen, dass diese sich deutlich voneinander unterscheiden, was auf den Effekt der Miniaturisierung zurückzuführen ist. Die 112 mm Variante (rot) bildet hierbei nahezu die höchsten Komplexitätswerte für die Kennzahlen vier bis sechs, wohingegen die Werte für die 250 mm Variante den unteren bis mittleren Komplexitätsbereich abdecken.

Für die 250 mm Variante wurde die Aufbaurrate für Stufe fünf (Bauteil 22) im Vergleich zu Stufe eins (Bauteil 18) um 43 % reduziert trotz einer Volumenreduktion von ca. 37 %. Die Aufbaurrate der 112 mm Variante wird von Stufe fünf (Bauteil 17) zu Stufe eins (Bauteil 13) um 63% reduziert, trotz des geringeren Volumens (-44,5%). Weiterhin ist in Abbildung 76 zu sehen, dass die 112 mm Variante notwendig ist, um die Höchstwerte der Applikationsbauteile abzudecken. Im Vergleich zu den zuvor definierten Komplexitätskennzahlen bietet der Sierpinski-Teppich eine gute Darstellung der Wechselwirkungen zwischen Komplexität und Aufbaurrate. Die resultierenden Stützstellen sind hierbei allerdings noch nicht hinreichend homogen verteilt, da die Stufen eins und zwei zu dicht beieinanderliegen, wohingegen zwischen Stufe vier und fünf ein zu großer Abstand entsteht.

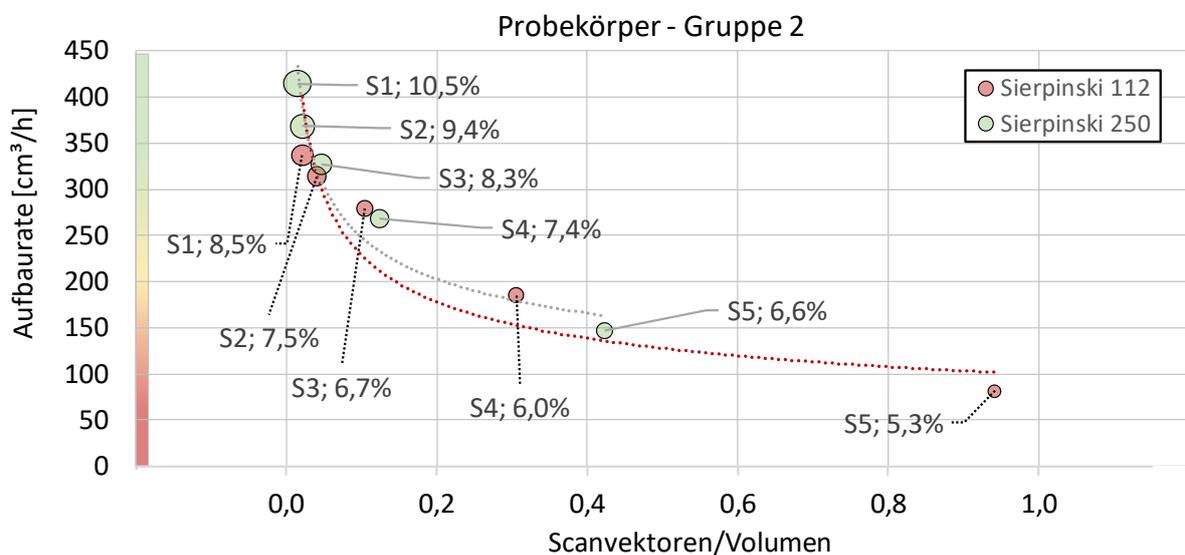


Abbildung 75: Aufbaurrate gegenüber der Komplexität (Scanvektoren/Volumen) mit Angabe der Packdichte [%]

Validierungsbauteile: Auch in den Anwendungsbeispielen führt die Komplexität bei Packdichten unter 10 % trotz des reduzierten Volumens zu enormen Produktivitätsverlusten. Hierbei ist zu erkennen, dass sowohl die Würfel als auch die Sierpinski-Varianten im Vergleich zu den Validierungsbauteilen eine gute Repräsentation der Auswirkungen über verschiedene Komplexitätsgrade bieten (Abbildung 76). Das Verhältnis aus Scanvektoren und Volumen erreicht in Summe bereits ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,912$. Es bestehen jedoch vereinzelt Abweichungen, die weiteren Erklärungsbedarf benötigen. Beispielhaft wird dieser Umstand dargestellt anhand der Bauteile 31 (Einlage) und 33 (Deckschicht fein). Letzteres besitzt eine höhere Komplexität, aber auch eine höhere Packdichte, d.h. mehr Volumen pro Zeit wird aufgebaut. Um die Genauigkeit dieses Vergleichs verbessern zu können, müssten die Bauteile jeweils mit der gleichen Packdichte gefertigt werden, was durch die unterschiedlichen Geometrien nicht möglich oder prozessbedingt nicht sinnvoll ist.

Es wird deutlich, dass die Methodik bereits eine Kategorisierung mit hoher Beschreibungsgüte ermöglicht, jedoch eine Restunsicherheit verbleibt. Durch Einbezug weiterer Informationen zur Maschinensystematik und der Wirkweise von Parametern könnte diese womöglich verringert werden. Für den Transfer und Vergleich von und mit unterschiedlichen Anlagensystemen ist jedoch eine Schnittmenge an Informationen zu wählen, die dem Aufwand gerecht wird.

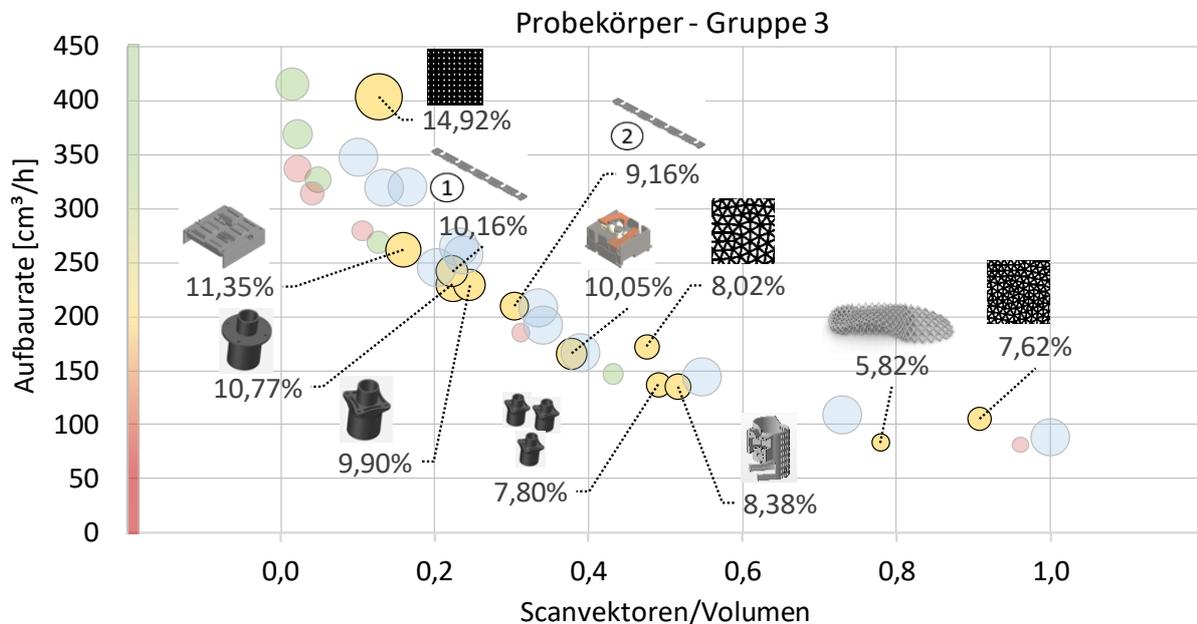


Abbildung 76: Aufbaurrate gegenüber der Komplexität (Scanvektoren/Volumen) mit Angabe der Packdichte [%]

Weiterhin wurde für die Parameterkombination keine Doppelbelichtung verwendet, welche in Anlehnung an **Kapitel 4.7** noch stärkere Einbrüche der Aufbaurrate verursachen würde. Die benötigte Dauer pro Schicht nimmt hierbei bereits für Bauteile mit 5-7 % Packdichte Werte von über 30 Sekunden an. Eine Steigerung der Packdichte in den Bereich von 10 % ist zwar aus wirtschaftlicher Sicht wünschenswert, jedoch verlängert sich dadurch bedingt auch die Schichtdauer. Wie bereits in **Kapitel 2.3** beschrieben wurde, unterliegt das Sinterfenster des jeweiligen Materials zeitlichen Limitationen, wodurch sich Auswirkungen in Form von Spannungen und Curling ergeben. Das verwendete TPU neigt hierbei nur in geringem Maße zum Curling, jedoch besteht die Annahme, dass sich eine übermäßige Verlängerung der Schichtdauer für sehr komplexe Bauteile negativ auf die mechanischen und optischen Eigenschaften auswirken kann. Für Materialien wie Polyamid 11/12 ist hier mit deutlich stärkerem Curling sowie Spannungen im Bauteil und daraus resultierenden Problemen mit der Prozessstabilität zu rechnen. Entsprechend ist die Komplexität ein limitierender Faktor für die Packdichte. In Summe bestärken diese Aspekte die Notwendigkeit einer entsprechenden Berücksichtigung für die Bauteil- und Verfahrensauswahl, die Wirtschaftlichkeits- und Kapazitätskalkulation sowie die Bauteilkonstruktion.

5.2. Szenario 2 - Auswirkungen für die Serienfertigung

Versuchsziel:

Das zweite Szenario umfasst ein Beispiel zur Serienfertigung von orthopädischen Einlagen, welche kundenindividuell generiert werden. Das Produkt setzt sich dabei aus verschiedenen Strukturen zur Dämpfung und Unterstützung entsprechender Fußareale zusammen sowie verschiedenen Arten der Decksohle, wie dies in Abbildung 77 zu sehen ist. Im Rahmen des Beispiels werden verschiedene Geometrien der Decksohle hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Prozessdauer und Materialeffizienz geprüft. Besonders im Fokus steht die Fertigungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Komplexität, da die Wirtschaftlichkeit sowohl von den Kosten als auch von der Flexibilität der Lieferzeiten abhängt.

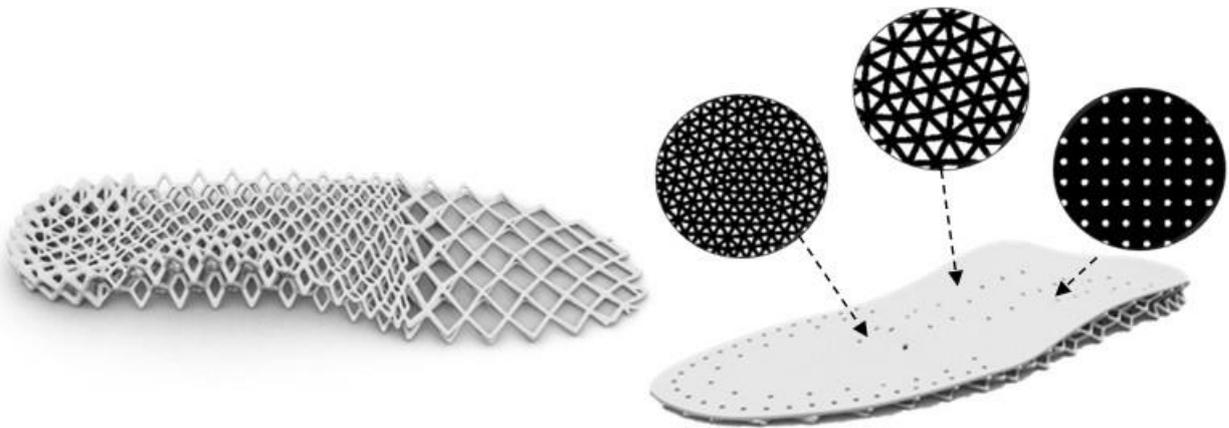


Abbildung 77: Bodenschicht und Decksohle mit unterschiedlichen Strukturen und Texturarten (Bildquelle: Labor Industrielle Produktion)

Versuchsaufbau:

Die Fertigung wird mit der Anlage HT403P und dem Material TPU88A ausgeführt. Als Variablen werden drei Deckschichten mit dem Parametersatz (*P2*) mit und ohne Kontur verwendet. Der Parametersatz umfasst eine einfache Belichtung der Füllung und Kontur mit 60 W/15 W. Die Schichtstärke beträgt 0,1 mm, der Scanlinienabstand 0,2 mm. Es wird eine Flächenenergiedichte von 19,73 mJ/mm² erreicht. Innerhalb des Versuchs wird ermittelt, ob und wie stark der Parametersatz sich auf die verschiedenen Strukturarten auswirkt, welche in Abbildung 78 gezeigt werden. Als Probekörper werden jeweils quadratische Flächen mit einer Kantenlänge von 150 mm und einer Stärke von 1,8 mm hergestellt, die Packdichte erreicht Werte zwischen 7,12 und 14,11 %. Die Auswahl der Strukturen erfolgte durch das Partnerunternehmen unter funktionellen Anforderungen.

In Abbildung 79 wird ein Ausschnitt von 10x10 mm der Dreiecksstrukturen dargestellt; die Struktur ist mittig geteilt, um die Strategien mit und ohne Kontur (MK/OK) zu verdeutlichen. Für den Versuch werden jeweils 18 Schichten der einzelnen Geometrien gefilmt, wobei jeweils vier ausgewertet werden.

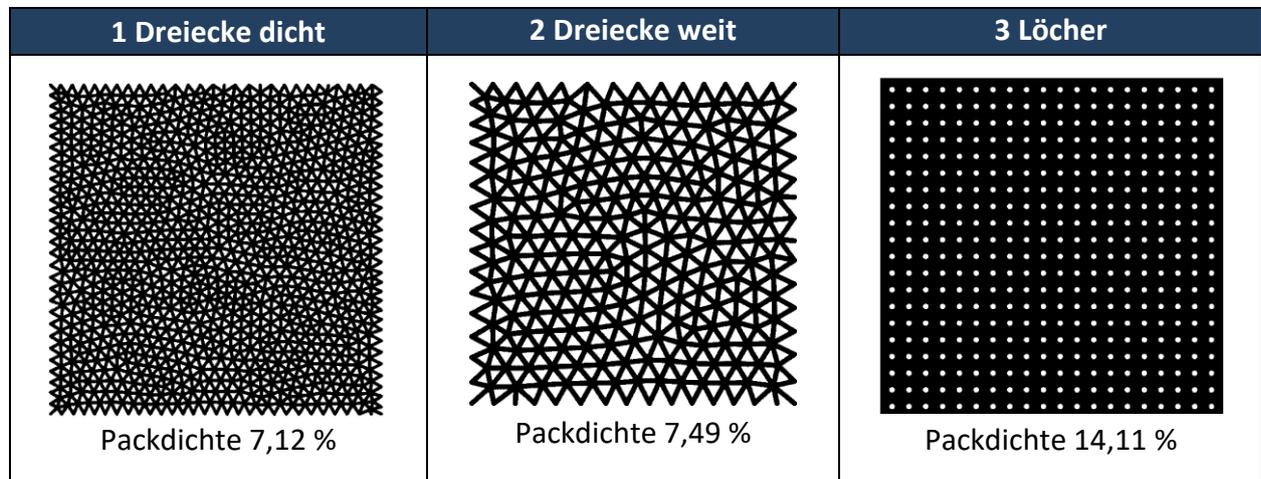


Abbildung 78: Detailansicht der beiden Dreiecks-Strukturen mit und ohne Konturmodus

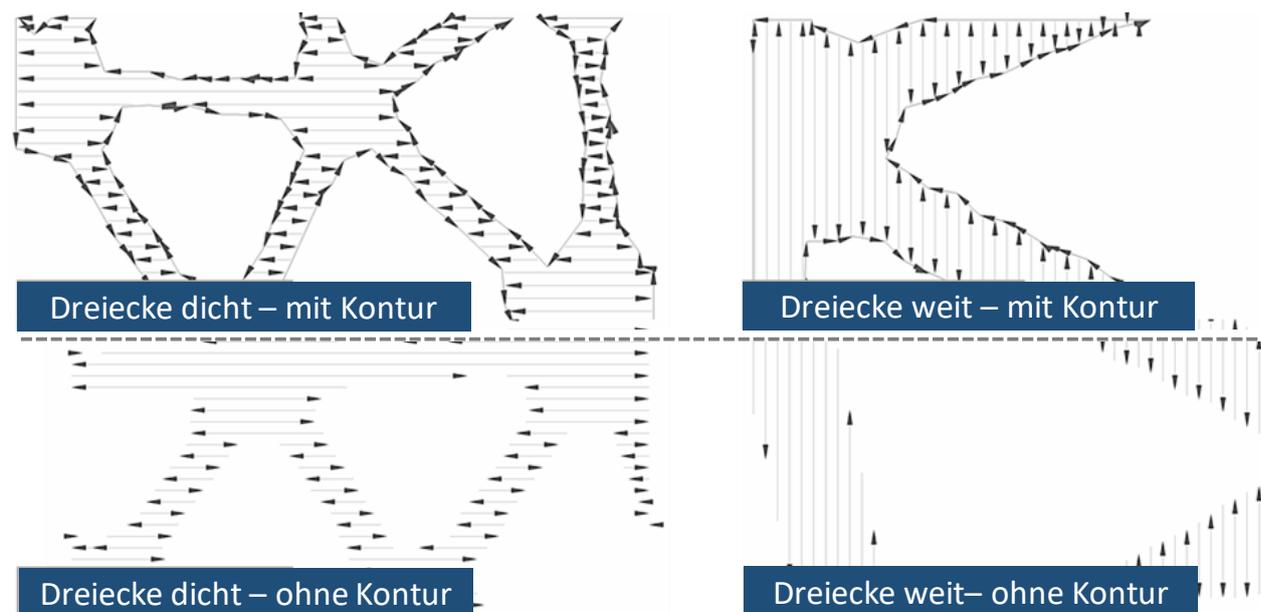


Abbildung 79: Darstellung der beiden Scanstrategien für einen Ausschnitt von ca. 10 mm² (Eigene Darstellung)

Versuchsauswertung und –diskussion:

Wie in Abbildung 80 zu erkennen ist, nimmt die Generierdauer besonders für die beiden Dreiecksmuster inklusive Konturbelichtung zu. Die Deckschicht „Dreiecke dicht“ benötigt einerseits für alle Konfigurationen am längsten und führt andererseits aufgrund der hohen Anzahl und geringen Länge an Scanvektoren zur erhöhten Materialzersetzung inklusive Rauchbildung.

Hierbei weist die Deckschicht „Löcher“ trotz des höheren Volumens, welches in Bezug zu Muster eins fast doppelt so hoch ist, eine signifikant geringere Bearbeitungszeit auf. Eine Kompromisslösung aus erzeugtem Volumen und Bearbeitungsdauer wird hierbei durch Muster zwei abgedeckt. Wie bereits in Szenario eins ist auch hier festzustellen, dass die Auswirkungen der Komplexität im Vergleich zum erzeugten Bauteilvolumen einen deutlich höheren Einfluss besitzen. Weiterhin ist zu sehen, dass mit zunehmender Komplexität auch die Verwendung des Konturmodus stärkere Anstiege der Fertigungsdauer verursacht. Mit Blick auf die Kosten ist hierbei abzuwägen, inwiefern die Generierdauer und der damit verbundene Maschinenstundensatz gegenüber den Materialkosten zu bewerten ist. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass die dargestellte Dauer sich nur auf den Generierprozess beschränkt, sodass entsprechende Zeiten zum Abkühlen, Entpacken und Nachbearbeiten aufzurechnen sind. Hierdurch wird bereits im Konstruktionsprozess die resultierende Fertigungsdauer maßgeblich beeinflusst. Darüber hinaus wird deutlich, auf welche Weise die Sensitivität gegenüber der geometrischen Komplexität in den Design-Prozess aufgenommen werden kann, um bei erhaltener Funktionalität die Produktivität zu steigern.

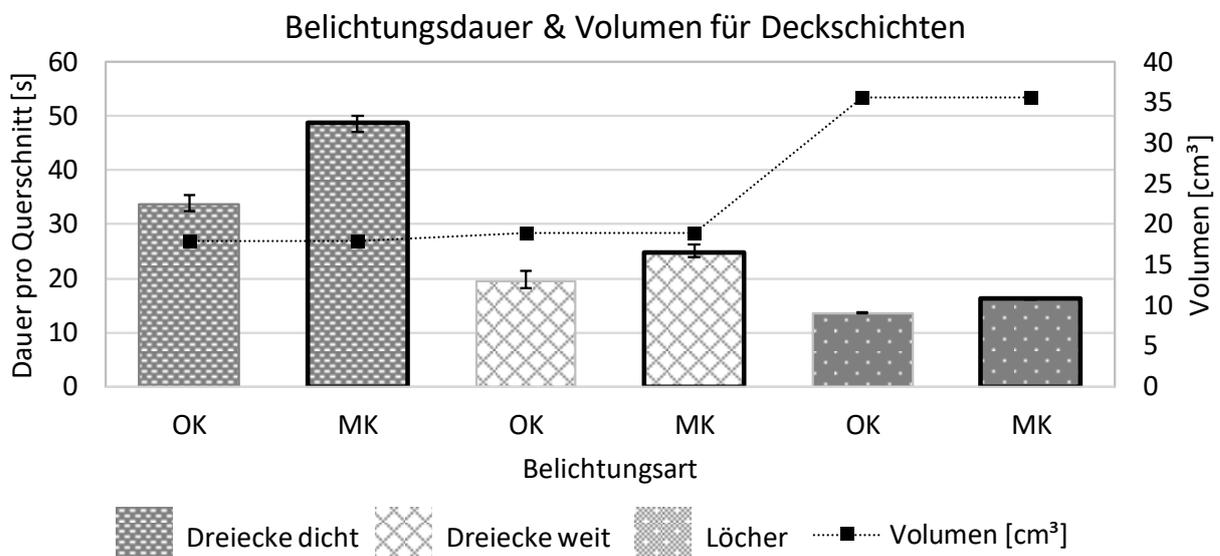


Abbildung 80: Belichtungsdauer und Volumen für unterschiedliche Deckschichten und Belichtungsmodi

Restriktionen ergeben sich zum derzeitigen Stand durch die fehlende Integration in entsprechenden CAD-Software-Tools, welche Konstrukteuren ein direktes Feedback ermöglichen würden. Weiterhin spielt auch hier die automatisierte Datengewinnung eine entscheidende Rolle.

5.3. Szenario 3 - Transfer auf das FFF-Verfahren (Markforged Mark II)

Versuchsziel:

In Anlehnung an die Referenzversuche mit dem SLS-Verfahren wird ein Transfer der Erkenntnisse auf weitere AM-Verfahren geprüft. Hierzu wird das FFF-Verfahren am Beispiel einer industriellen Anlage (Mark II) der Firma Markforged geprüft. Die Auswahl dieser Anlage ist von Interesse, da die Einflussnahme auf die Parameter der Anlage seitens des Herstellers begrenzt wird. Eine Abschätzung der Komplexitätsauswirkungen fördert in diesem Fall das Bewusstsein für den entstehenden Ressourcenaufwand, sodass ein entsprechend einzuhaltendes Maximallevel definiert werden kann und/oder Kategorien für ein Bauteilscreening gebildet werden können.

Versuchsaufbau:

Als Material wird das Standardmaterial Onyx, ein kurzfaserverstärktes Nylon, verwendet. Die Schichtstärke beträgt 0,1 mm. Die Fertigung erfolgt mit dem Füllmodus „solide“, zwei Wandschichten und jeweils drei Boden- und Deckschichten. In Anlehnung an die Versuche V1 und V6 werden die Bauteile Würfel und Zylinder in vier Abstufungen jeweils mit Stückzahl eins simuliert. Für den Würfel werden wiederum Drehungen von 90° um die X-Achse und 45° um die Z-Achse vorgenommen. Zusätzlich wird die Kantenlänge von 40 auf 50 mm für beide Probevarianten erhöht. Für die Versuchsausführung werden die Proben mit der firmeneigenen Slicer-Software simuliert, da die Fertigungsdauer trotz geringer Stückzahl einen hohen Zeitaufwand erfordert.

Versuchsauswertung und –diskussion:

Wie in Abbildung 81 zu sehen ist, nimmt die Generierdauer für alle Komplexitätsstufen zu. Im Gegensatz zum SLS-Verfahren beeinflusst die Bauteilgröße aufgrund des direkten Materialverbrauchs erheblich die Prozessdauer. Eine Steigerung der Komplexität bei gleichbleibendem Bauteilvolumen erhöht signifikant die Dauer des Generierprozesses (bis zu Faktor 4). Dabei reagieren größere Bauteile weniger sensitiv auf eine Steigerung der Komplexität, da sich das Verhältnis von Kontur zu Volumen vergleichsweise verringert, wie dies in Abbildung 82 dargestellt ist.

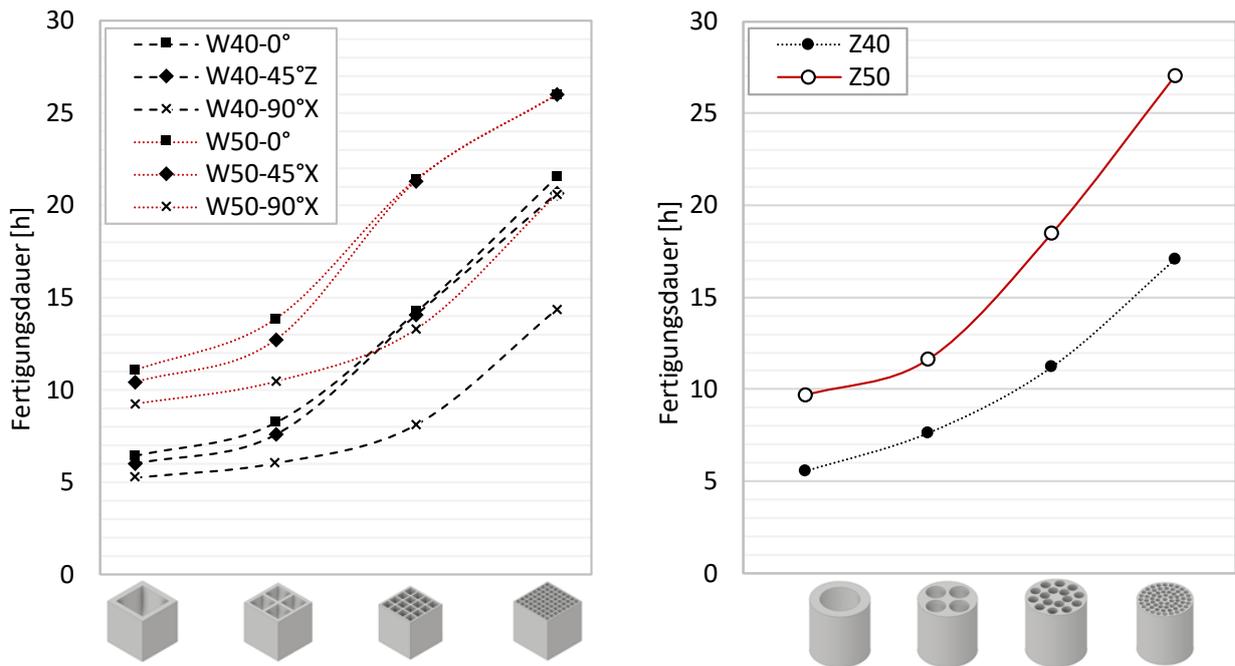


Abbildung 81: Generierdauer für Würfel und Zylinder; Markforged Mark II

Die Auswirkungen einer Miniaturisierung wirken entsprechend auch hier sowohl auf den Komplexitätsfaktor als auch auf die Generierdauer. Eine 90°-Drehung der Bauteile in der X/Y-Ebene bewirkt eine signifikante Reduktion der Fertigungsdauer zwischen 18 und 43 % (klein) bzw. 16 und 38 % (groß). Die Drehung um die Z-Achse bewirkt zunächst den gegenteiligen Effekt im Vergleich zum SLS-Verfahren. Dies liegt jedoch daran, dass die Füllung standardmäßig in 45°-Richtung aufgetragen wird, sodass sich die Bearbeitungspfade bei einer 45°-Drehung verringern. Eine entsprechende Drehung bewirkt dabei eine Reduktion der Dauer von 1-8 % (klein) und 6-8 % (groß).

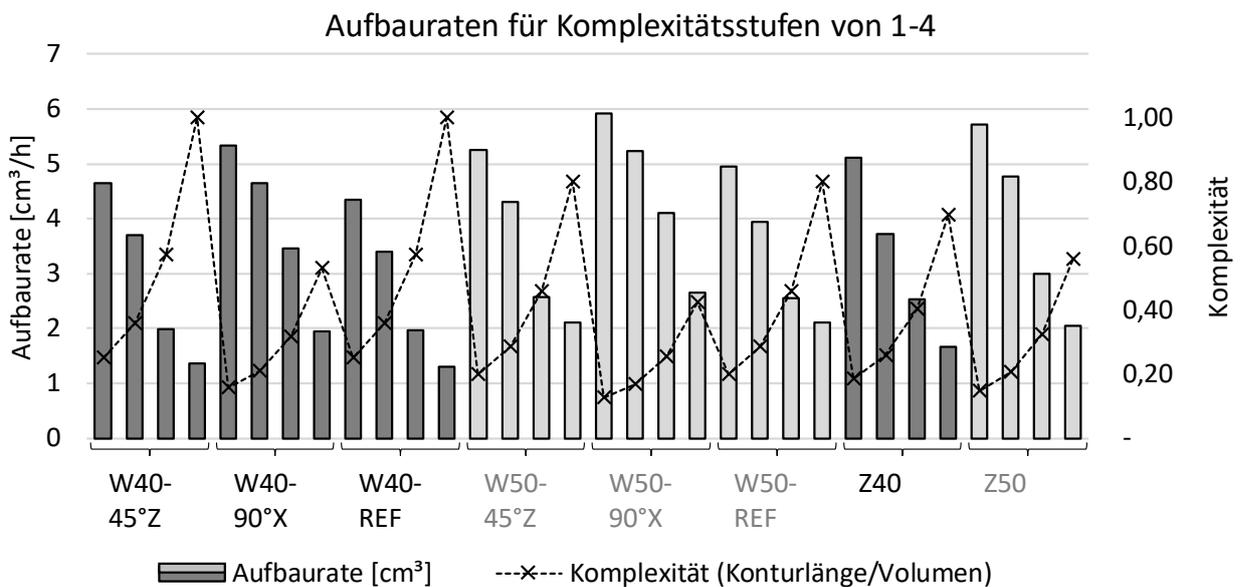


Abbildung 82: Aufbaureate gegenüber der Komplexität (Konturlänge/Volumen)

Wie in Abbildung 83 zu sehen ist, bietet die Konturlänge auch in diesem Fall eine signifikante Beschreibungsgüte mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2=0,9521$. Für den Datensatz sind allerdings zwei Simulationswerte ausgegeben worden, die augenscheinlich ein Limit der Simulation von 26 Stunden überschritten haben. Diese stammen von den Proben „W50-Ref“ und „W50-45°Z“ der Komplexitätsstufe vier. Insofern diese entfernt werden, steigt das Bestimmtheitsmaß auf $R^2=0,9703$. Der Transfer auf ein weiteres vektorbasiertes Verfahren zeigt, dass die beschriebenen Auswirkungen der Komplexität auch in veränderter Größenordnung auf das Verfahren des FFF anwendbar sind. Jedoch wurden Stützstrukturen, welche den Aufwand weiter erhöhen, noch nicht betrachtet. Weiterhin wurden typische Füllmuster nicht näher betrachtet. Es ist jedoch anzunehmen, dass diese sich ebenfalls signifikant auf die Produktivität auswirken, da sie direkt den Materialverbrauch und die Anzahl der notwendigen Bewegungspfade beeinflussen.

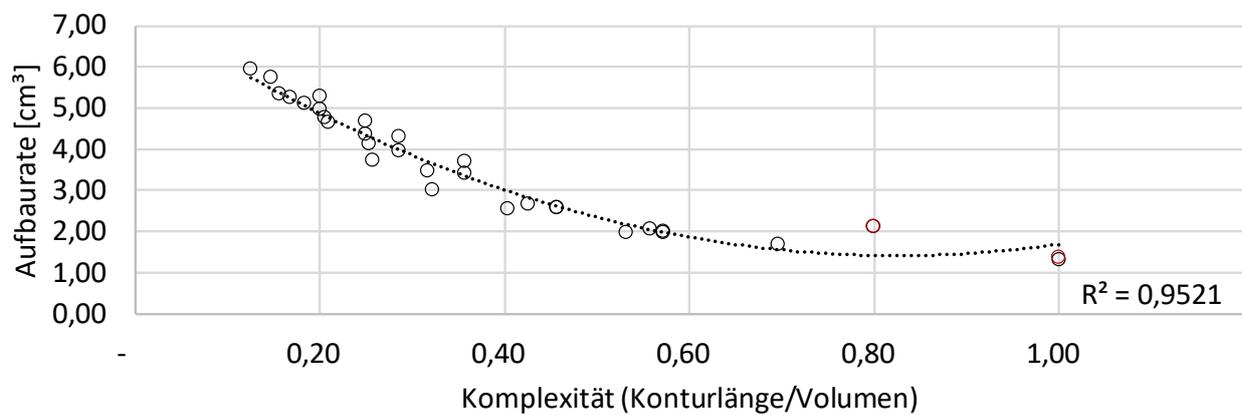


Abbildung 83: Aufbaureate mit steigender Komplexität (Konturlänge/Volumen)

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1. Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die gesammelten Erkenntnisse zusammengefasst und zur Beantwortung der Forschungsfragen verwendet. Zuletzt erfolgt ein Ausblick auf weitere Forschungsthemen, die auf Basis der Arbeit weiterverfolgt werden können und jene, die bewusst nicht innerhalb dieser Arbeit behandelt wurden. Mit Blick auf die Forschungsfragen in **Kapitel 1.2.2**, werden diese noch einmal aufgegriffen und den gewonnenen Erkenntnissen gegenübergestellt:

F1: „Welchen Einfluss hat die geometrische Komplexität auf die Produktivität abhängig von der Verfahrens- und Bearbeitungsweise, den Fertigungsparametern sowie dem zu bearbeitenden Material?“

- Für eine Auswahl verschiedener additiver Verfahren konnte gezeigt werden, dass deren Sensitivität gegenüber der Komplexität stark von der Bearbeitungsweise und den verwendeten Materialien abhängt. Für den Generierprozess ergeben sich maßgebliche Unterschiede durch die Einteilung in punkt-, linien- und schichtbasierte Bearbeitungsweisen. Geometriebedingte Aufwände entstehen besonders für punktbasierte Verfahren, wobei linien- und schichtbasierte Verfahren nahezu unabhängig davon sind. Abseits von diesen zeitlichen Aufwänden durch die Bearbeitungsart können zusätzliche materialbedingte Aufwände in Form notwendiger Stützstrukturen entstehen, die generiert und in der Nachbearbeitung wieder entfernt werden müssen.
- Für das Selektive Lasersintern konnte dargestellt werden, dass die punktbasierte Bearbeitungsweise in direkter Wechselwirkung mit dem Material sowie den materialspezifischen Fertigungsparametern steht und zu signifikanten Prozessverlängerungen führt. Es wurde gezeigt, dass die Geometrie besonders stark wechselwirkt mit Faktoren wie der Anzahl von Scanvektoren, der Bauteilkontur sowie notwendiger Positionswechsel des Scanners. Weiterhin ergeben sich in Abhängigkeit der Anlagentechnik unterschiedliche Zeitanteile und Auswirkungen der Teilprozesse Lasermaterialbearbeitung, Pulverauftrag und Heizen. Die Zeit pro Schicht unterliegt hierbei materialspezifischen Grenzen, die durch das jeweilige Sinterfenster vorgegeben werden. Eine Überschreitung fördert hierbei die frühzeitige Kristallisation, wodurch Curling, Bauteilverzug sowie inhomogene Oberflächen begünstigt

werden. Insofern die entsprechende Geometrie nicht veränderbar ist, verbleibt zur Reduktion der Schichtdauer lediglich eine Anpassung der Packdichte. Bezogen auf die Prozessstabilität wurden weitere Auswirkungen infolge geringer Scanvektorklängen beschrieben. Diese können zur inhomogenen Temperaturverteilung des Pulverbetts, Rauchbildung und Beeinträchtigungen der mechanischen Bauteileigenschaften führen. Da die Generierdauer je nach Material und Qualitätsanforderungen direkt mit der Abkühldauer gekoppelt ist, multiplizieren sich die Aufwände entsprechend.

- Für Nachbearbeitungs- und Finishingprozesse wurde herausgestellt, dass die Vielzahl unterschiedlicher Operationen zum Reinigen und/oder Verbessern der Oberfläche direkt von der geometrischen Komplexität der Bauteile abhängen. Dieser Aspekt ist entgegen den Auswirkungen auf den Generierprozess weitaus präsenter im Stand von Wissenschaft und Technik beschrieben. Dies liegt mitunter daran, dass entsprechende Prozesse zu großen Teilen auf konventionellen Verfahren beruhen, deren Zugänglichkeit wiederum stark von komplexen Geometrien beeinflusst wird.

F1 a.: „Wie ist ihr Einfluss im Vergleich zu den Bauraumvariablen (z.B. Volumen, Packdichte)?“

- Für die untersuchten Anlagensysteme konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Komplexität einen signifikanten Einfluss auf die resultierende Aufbaurrate besitzt. Hierbei variiert die Einflusshöhe in Abhängigkeit des verwendeten Anlagensystems und der Bearbeitungsparameter. Maßgeblich ist in diesem Bezug der zeitliche Anteil zwischen Belichtungsdauer sowie dem Pulverauftrag und Heizen zu nennen. Hierbei wirkt sich die Komplexität umso stärker aus, je höher der Anteil der Lasermaterialbearbeitung ist. Weiterhin wurde dargestellt, dass die Packdichte bzw. das Bauteilvolumen selbst wenig Aussagekraft besitzt, aber in Verbindung mit der jeweiligen Geometrie als Multiplikator fungiert. Die Komplexität ist hierbei als weitaus kritischer einzuordnen, da sie zu enormen Verlängerungen der Schichtzeiten führt und somit die Prozessstabilität maßgeblich beeinflusst. Limitationen der Packdichte können die Folge sein. Demgegenüber gewinnt die maximale Bauhöhe umso größere Bedeutung, je höher der Anteil zum Pulverauftragen und Heizen ausfällt, da diese mit der Schichtanzahl multipliziert werden. Entsprechend ist eine Berücksichtigung der Komplexität bei der Kapazitätsplanung und/oder Geschäftsmodellen entscheidend für die Wirtschaftlichkeit.

F1 b.: „Welchen Einfluss hat sie auf den Ressourcenaufwand im Herstellprozess?“

Die Komplexität des zu fertigenden Bauteils hat maßgeblichen Einfluss auf die einzelnen Phasen des Herstellprozesses, wobei die Einflüsse wie folgt aufgetreten sind:

- **Datenvorbereitung:** Im Hinblick auf die verwendeten Daten wurde festgestellt, dass sich die Komplexität besonders in Form von Freiformflächen und Rundungen auf die Dauer der Datenvorbereitung auswirkt. Betroffen sind z.B. die Bauteilanordnung und das Nesting. Besonders die Rechner werden signifikant verlangsamt, was im Hinblick auf das dafür notwendige, hochqualifizierte Personal nachteilig ist. Abseits von sich wiederholenden Aufträgen, bei denen die Baujob-Daten und Parameter gleichbleiben, entstehen bei variierenden Bauaufträgen entsprechende Personalkosten für die Datenvorbereitung.
- **Bauprozess:** Wie in den Versuchen gezeigt wurde, werden primär die Belichtungsdauer sowie die Dauer zum Pulverauftrag und Heizen erhöht. Entsprechend kann eine geometriebedingte Erhöhung der Schichtzeit dazu führen, dass zulässige Schichtzeiten überschritten werden. Daraus folgend kann eine Reduktion der Packdichte und/oder weitere Aufwände zur Qualitätssicherung (z.B. durch defekte Bauteile) notwendig werden. Mit erhöhter Prozessdauer steigt zudem der Energiebedarf der Maschine inkl. Peripherie zum Kühlen des Lasers und der Stickstoffherstellung. Eine längere Prozessdauer begünstigt zusätzlich die Alterung des Materials, z.B. durch Nachkondensation, wodurch der Materialbedarf steigt und die Recyclingfähigkeit abnimmt.

Neben den Auswirkungen auf die Dauer des Generierprozesses sind qualitative Faktoren, wie die Materialersetzung und Rauchbildung sowie damit einhergehende Probleme durch erhöhten Reinigungsaufwand und Hardwareverschleiß, dargestellt worden. Die entstehende Rauchbildung führt dazu, dass der Reinigungsaufwand für die Baukammer, inklusive Wänden, Heizkörpern, Laserschutzglas etc. signifikant erhöht wird und damit auch gleichzeitig der notwendige Personalaufwand. Diesbezüglich steigt der Einsatz von Reinigungschemikalien sowie die Dauer, in der das Personal diesen ausgesetzt ist. Überdies führen Ablagerungen am Laserschutzglas während des Bauprozesses zu einer inhomogenen Energiedichte über die Bauhöhe hinweg, was einer gleichmäßigen Bauteilqualität entgegenwirkt. Resultierende Abnahmen der mechanischen Bauteileigenschaften über die gesamte Bauhöhe reduzieren hierbei die Qualität. Der Aufwand zur Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters in Abhängigkeit der Geometrie und Bauhöhe erhöht dabei die initialen Auftragskosten.

- **Nachbearbeitung:** Im Rahmen der theoretischen Inhalte konnte dargestellt werden, dass eine frühzeitige Berücksichtigung der Thematik zu empfehlen ist, um Kosten durch Folgeprozesse präventiv zu vermeiden. Es konnte diesbezüglich dargestellt werden, dass im Stand der Technik und Wissenschaft bereits ein größeres Bewusstsein für die Komplexitätsthematik vorhanden ist, jedoch noch keine Systematik.

Innerhalb der Versuche wurden besonders für komplexe Strukturen mit geringen Aspektverhältnissen Probleme mit der Zugänglichkeit festgestellt, die zusätzlich durch zu hohe Energieeinträge die Reinigung erschwert haben. In der Folge wird die Rückführbarkeit von Restmaterial sowie die Reinigung erschwert, was die Material- und Personalkosten erhöht. Da Nachbearbeitung und Bauteilprüfung maßgeblich auf die Bauteilzugänglichkeit angewiesen sind, dient diese Arbeit als Grundlage für weitere Untersuchungen. Eine systematische Analyse der Komplexitätsthematik mit Fokus auf die Nachbearbeitung ist mit Blick auf deren Kostenanteil von ca. 20-30 % an den Gesamtkosten empfehlenswert.

F2: „Wie kann der Einfluss der geometrischen Komplexität quantifiziert und kategorisiert werden, um Vergleichs- und Bewertungsmöglichkeiten zu schaffen und welche Bauteilmerkmale müssen dafür vorhanden sein?“

Im Stand der Technik konnte gezeigt werden, dass eine Kategorisierung der Bauteilkomplexität für einen Vergleich additiver und herkömmlicher Verfahren bereits durch einzelne Faktoren und/oder Verhältnisse durchgeführt werden kann. Im Detail betrachtet sind jedoch Einschränkungen festgestellt worden, insofern die Komplexität nicht technologie- und anlagenspezifisch beschrieben wird. Durch die systematische Auswahl von Einflussfaktoren wurden im Falle des SLS-Verfahrens die Faktoren Konturlänge, Fülllänge und Anzahl der Vektoren herausgestellt. Innerhalb der Versuche konnte gezeigt werden, dass diese Faktoren eine hohe Beschreibungsgüte bieten, die Datenbeschaffung jedoch im Falle der Vektoren, besonders für variierende Querschnitte, weder standardmäßig noch automatisiert möglich ist. Durch Hinzunahme des Volumens als Bezugsgröße konnte der Vergleich über verschiedene Größen und Bauteilvolumen gewährleistet werden. Die Berücksichtigung von Fertigungsparametern wie dem Scanlinienabstand oder der Geschwindigkeit ermöglicht dabei einen materialübergreifenden Vergleich. Die Ausarbeitung einer finalen Komplexitätsmetrik ist hierbei noch ausstehend.

F3: „Welche Methoden sind notwendig, um eine Evaluierung der geometrischen Komplexität durchzuführen und wie sind diese in einer geeigneten Methodik umzusetzen?“

Durch die entwickelte Methodik konnte gezeigt werden, dass zur Evaluierung zunächst eine Wissensgrundlage geschaffen werden muss, um die Einflüsse auf den Herstellprozess transparent abzubilden. Die Grundlage bilden hierbei die **Systemanalyse und Prozessmodellbildung**, welche mit entsprechenden *Flussdiagrammen* realisiert werden. Anhand dieser Daten können verfahrensspezifisch entsprechend sensitive Teilprozesse und Zielgrößen identifiziert und priorisiert werden. In Abhängigkeit des zu betreibenden Aufwandes und der zur Verfügung stehenden Daten bietet die *tätigkeitsbezogene Wirtschaftlichkeitskalkulation* hierbei wichtige Details zur Entscheidungsgrundlage.

In der **Versuchsmethodik** werden in Abhängigkeit der zuvor priorisierten Teilprozesse entsprechende Einflussparameter identifiziert. Hierbei ist bereits zu prüfen, welche Software notwendig ist, um diese zu extrahieren. In Abhängigkeit der Software können hierzu eine Vielzahl von Merkmalen aus den 3D- sowie den Schichtdaten ausgelesen werden. Diese sind hinsichtlich des Einflusses auf die definierte Zielgröße und Wechselwirkungen untereinander, z.B. mittels *Merkmalskorrelation*, zu analysieren. Anschließend ist zu prüfen, ob die jeweiligen Parameter in der Lage sind, verfahrensspezifische Einflüsse der Komplexität zu erfassen. Als Beispiel ist hier die Bauteilorientierung im SLS-Verfahren zu nennen. Nach Abschluss dieser Analyse werden die verbleibenden Parameter als Einflussfaktoren definiert. Basierend auf diesen Informationen sind Versuchsproben zu entwickeln, welche diese Einflussfaktoren berücksichtigen und eine systematische Steigerung der Komplexität unter verschiedenen Randbedingungen hervorrufen. Beispielhaft ist die Komplexitätssteigerung unter Beibehaltung des Volumens und/ oder der Packdichte zu nennen.

Die anschließende **Versuchsdurchführung** dient zur Ermittlung der primären Zielgröße, z.B. in Form der Prozessdauer. Die Datengenerierung kann hierbei im realen Prozess durch *Video- und Audioaufnahmen* oder mittels *Simulation* erfolgen. Die Simulation ist hierbei geeignet, um verschiedene Szenarien grundlegend auf ihre Auswirkungen zu testen bzw. ein Screening vorzunehmen. Jedoch werden thermophysikalische Phänomene, wie Rauchbildung und Curling, nicht erfasst, die sich auf die Prozessstabilität auswirken. Die Versuchsergebnisse und Erkenntnisse sind nachfolgend hinsichtlich ihrer

Bedeutung für die **Wirtschaftlichkeit der Prozesskette** zu bewerten. Die *tätigkeitsbasierte Wirtschaftlichkeitskalkulation* stellt hierfür ein adäquates Mittel dar. Durch Analyse verschiedener Szenarien mit unterschiedlichen Geometrien, Anlagen, Materialien und Fertigungsparametern können die Auswirkungen transparent in die Produkt- und Produktionsplanung aufgenommen werden.

Den Abschluss bildet die **Validierung** mit verschiedenen Anwendungsbeispielen, welche die Eignung der Methodik abseits von speziellen Versuchsproben prüft.

6.2. Ausblick

In Ergänzung zu den bereits beschriebenen Faktoren wird im Folgenden der Forschungs- und Weiterentwicklungsbedarf für unterschiedliche Punkte beschrieben.

- **Datenvorbereitung:** In der Datenvorbereitung werden aufgrund hochkomplexer Bauteile bereits hohe zeitliche Aufwände für die Orientierung von Bauteilen, die Generierung von Stützstrukturen, die Bauteilreparatur, das Slicing, die Simulation und weitere Operationen benötigt. Mit Blick auf das notwendige hochqualifizierte Personal und Auswirkungen auf Folgeprozesse sollten Auswirkungen der Komplexität auf diese Prozessphase ebenfalls systematisch analysiert und durch Handlungsempfehlungen unterstützt werden.
- **Anlagensystem und Material:** Wie in den Versuchen und Szenarien dargestellt wurde, konnte die Methodik im Rahmen dieser Arbeit bereits auf zwei SLS-Anlagensysteme mit unterschiedlichen Bauteilen, Parametern und Materialien angewendet werden. Als Erweiterung der Thematik wird die Untersuchung der **zulässigen Schichtdauer** mit hoher Priorität eingestuft, da sie die Prozesssicherheit und Bauteilqualität maßgeblich beeinflusst. Hinsichtlich der Prozesssicherheit ist zu prüfen, ab wann es zu Kristallisationsvorgängen, Curling und weiteren Phänomenen kommt. Darüber hinaus ist zu prüfen, wie sich die Schichtdauer auf die mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Packdichte (Wärmemenge) verhält und welche Auswirkungen sie auf die Ausbildung von schrumpfungsbedingten Oberflächeneffekten besitzt. Weiterhin sollte der **Einfluss der Scanvektorenlänge** systematisch untersucht werden, da er wie bereits beschrieben maßgebliche Effekte auf die Bauteildichte sowie die Rauchbildung beim Belichtungsvorgang besitzt. Die Untersuchung resultierender mechanischer Eigenschaften für verschiedene Scanlängen kann dazu beitragen, dass kurze Scanlängen mit geringeren Energiedichten

bearbeitet werden können. Resultierend hieraus könnte die eingebrachte Leistung reduziert und/oder der Scanlinienabstand erhöht werden, was die Produktivität steigert. Die gleichzeitige Vermeidung der Rauchbildung würde hierbei die Prozesssicherheit und Bauteilqualität über die gesamte Bauhöhe verbessern.

- **Ressourcenverbrauch:** Die im Rahmen der Wirtschaftlichkeitskalkulation angenommenen Ressourcenverbräuche wurden zunächst als gleichbleibend angenommen. Wie sich die Energiekosten zur Lasermaterialbearbeitung und zum Heizen im Vergleich zu den Durchschnittswerten verhalten, ist zum derzeitigen Stand noch nicht klar. Weiterhin sind die Auswirkungen einer verlängerten thermischen Belastung und die damit einhergehende Materialalterung in Abhängigkeit der Komplexität noch nicht hinreichend erforscht. Im Sinne wachsender Bestrebungen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz ist zu analysieren, wie sich die Ressourcenverbräuche beim Lasersintern zusammensetzen und wie diese in Abhängigkeit der zu fertigenden Geometrie und Packdichte variieren.
- **Datenanalyse und Auswertung:** Zur weiteren Anwendung der Methodik bzw. der erarbeiteten Kennzahlen ist die Umsetzung in Form einer eigenständigen Software oder als Zusatzmodul bestehender (CAD-)Programme zu prüfen. Voraussetzung für eine effiziente Datenanalyse ist die automatisierte Extraktion entsprechender Schichtdaten inkl. der zugehörigen Maschinenparameter. Auf Basis dieser Daten können die vorgestellten Kennwerte automatisiert gebildet und den entsprechenden Anwendern zur Verfügung gestellt werden.
- **Nachbearbeitung:** Wie bereits im Stand der Technik und in den Versuchen beschrieben wurde, entstehen durch geometrisch komplexe Strukturen vielfältige Herausforderungen. Diese entstehen zum Teil durch die Notwendigkeit, dass die entsprechenden Verfahren weiterhin auf die Zugänglichkeit der zu bearbeitenden Bauteilflächen angewiesen sind. Da die Nachbearbeitung einen maßgeblichen Anteil an den Gesamtkosten trägt, ist eine Erweiterung bestehender restriktiver DfAM-Ansätze mit entsprechender Ausrichtung auf die Nutzung geometrisch komplexer Bauteile zielführend, wenn es um die Steigerung der Produktivität geht. Eine weitere Möglichkeit der Produktivitätssteigerung ergibt sich durch die Abstimmung der Bearbeitungsparameter mit der zu generierenden Geometrie. Wie zuvor beschrieben wurde, ist zu analysieren, wie sich die Scanvektorlänge auf die Energiedichte auswirkt, da die eingebrachte Wärme maßgeblich die Maßhaltigkeit, die Entstehung von Agglomerationen sowie die Oberflächenbeschaffenheit steuert.

- **Wirtschaftlichkeit und Produktionsplanung:** In Bezug auf die vorgestellten Methoden zur Wirtschaftlichkeitskalkulation nach dem Stand der Technik konnte gezeigt werden, dass diese sich weiterhin stark am Volumen des Bauteils sowie dessen Bounding Box orientieren. Wie durch die Versuche gezeigt wurde, liefern beide Indikatoren aber keinen hinreichenden Zusammenhang. Ansätze, die eine Maximierung der Packdichte als Voraussetzung wirtschaftlicher Maschinennutzung beschreiben, sind ebenfalls im Hinblick auf die Thematik neu zu bewerten. Die ermittelten Komplexitätsindikatoren können hierbei zur Weiterentwicklung bestehender Wirtschaftlichkeitskalkulationen genutzt werden. Folglich kann der Einfluss unterschiedlich komplexer Bauteile verursachungsgerecht zugeordnet werden, wodurch im Vergleich zu einer Mischkalkulation ein verbessertes Kostenbewusstsein entsteht.

6.3. Transfer der Ergebnisse

Transfer auf weitere Materialien und Maschinen

Da die untersuchten Anlagen und Materialien nur einen Ausschnitt der verfügbaren Kombinationen abdecken, ist die **Anwendung auf weitere Anlagen- und Materialkombinationen** zu prüfen. Einerseits sind hier hardwarespezifische Unterschiede durch Baukammergrößen, die Art der Pulverbereitstellung und -applikation, Heizelemente und Scanner sowie die Art und Anzahl an Laserstrahlquellen zu nennen. In Bezug auf den zeitlichen Anteil am Generierprozess stellen besonders letztere interessante Untersuchungsbereiche dar. Bezogen auf das Sinterfenster und damit einhergehende Limitationen der Dauer pro Schicht kann diese Dauer neben der Packdichte und Geometrie hardwareseitig auf mehreren Wegen verändert werden. Zu nennen sind hier die Verwendung von Faserlasern mit Scangeschwindigkeiten von derzeit bis zu 20 m/s und die Verwendung von mehreren Laserstrahlquellen gleichzeitig. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Anwendung eines variablen Strahldurchmessers, wodurch Konturbereiche mit geringerem Strahldurchmesser bearbeitet werden und Füllbereiche mit entsprechend größeren Durchmessern. Insofern es die Produkthanforderungen zulassen, ist zudem die Nutzung von geschwärzten Pulvern aufgrund der höheren Energieabsorption als produktivitätssteigernde Maßnahme einzubeziehen. Die Verwendung höherer Schichtstärken und Scanlinienabstände sowie die größere Sintertiefe bieten entsprechendes Potenzial für diese Pulver.

Weiterhin ist der Erkenntnistransfer auf metallbasierte Verfahren zu prüfen, deren Bearbeitung ebenfalls punktbasiert abläuft und deren Nachbearbeitung stark von traditionellen Verfahren geprägt ist. Als Beispiel ist das Selective Laser Melting zu nennen, welches dem Ablauf des SLS stark ähnelt. Die Prozesstemperaturen bedingen hierbei die Anbindung der Bauteile an eine Bauplattform und/oder Stützstrukturen, unter anderem um die Wärme abzuleiten und Verzug vorzubeugen. Im Hinblick auf die Bearbeitungsparameter resultieren weiterhin die Scanlinien aus dem Zusammenspiel aus Laserpunktdurchmesser und Scanlinienabstand. Maßgebliche Unterschiede entstehen jedoch durch die verwendeten Scanstrategien. Im Vergleich zu einfachen Streifen und Kreuzbelichtung beim SLS-Verfahren, wird die Querschnittsfläche beispielhaft in der Systematik eines Schachbretts belichtet. Entsprechend wird die Anzahl der Scanlinien bereits hierdurch erheblich beeinflusst. Weiterhin ist die Schichtdauer in Abhängigkeit des Materials darauf angewiesen, dass die eingebrachte Wärme ausreichend Zeit zum Abfließen erhält. Auswirkungen auf die Produktivität metallbasierter Verfahren sind jedoch zu großen Teilen bei der Nachbearbeitung und dem Finishing zu erwarten, da die Bauteile häufig als „Rohteile“ additiv gefertigt und zur Funktionsfähigkeit mit traditionellen Verfahren nachbearbeitet werden.

Transfer auf weitere Verfahren

Neben dem Lasersintern von Kunststoffen ist zu prüfen, ob und in welchem Umfang die Methodik auf weitere punktbasierte Verfahren wie die Fused Filament Fabrication, die Stereolithographie und das Selektive Strahlschmelzen angewendet werden kann. Der Einbezug von Stützstrukturen wurde in dieser Arbeit noch nicht vorgenommen, ist jedoch für diese Verfahren ein essenzieller Bestandteil. Eine Anpassung auf linien- und schichtbasierte Verfahren sollte ebenfalls geprüft werden. Dies dient einerseits dem Nachweis, welche Auswirkungen die Komplexität auf diese Verfahren besitzt und andererseits kann identifiziert werden, welche Bauteilattribute für diese Verfahren von Bedeutung sind. Da die Einflüsse der Komplexität sich für linien- und schichtbasierte Verfahren meist nur auf die Generierdauer beziehen, ist eine Analyse der eingesetzten Ressourcen für den gesamten Prozess von Interesse. Beispielhaft werden im Multi Jet Fusion-Verfahren unterschiedliche Binderflüssigkeiten zur Bearbeitung der Füllung und Kontur verwendet, welche verschiedene Kosten verursachen.

7. Literaturverzeichnis

1. 3D Systems, Inc. (2021). Datenblatt - Drucker für selektives Lasersintern - Produktion thermoplastischer Teile mit SLS-3D-Druckern. Zugriff am 3.2.2023. Verfügbar unter: www.3dsystems.com
2. Adam, G. A. O. (2015). *Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling*. Dissertation. Paderborn.
3. Adam, G. A. O. & Zimmer, D. (2014). Design for Additive Manufacturing—Element transitions and aggregated structures. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7(1), 20–28. doi:10.1016/j.cirpj.2013.10.001
4. Additive Innovation GmbH. (2019). 3DPartfinder for Additive Manufacturing. Zugriff am 27.5.2022. Verfügbar unter: https://additive-innovation.com/fileadmin/content/Broschueren/3D_Partfinder_EN.pdf
5. Ahsan, N. & Khoda, B. (2016). AM optimization framework for part and process attributes through geometric analysis. *Additive Manufacturing*, 11, 85–96. doi:10.1016/j.addma.2016.05.013
6. Ahuja, B., Karg, M. & Schmidt, M. (2015). Additive manufacturing in production: challenges and opportunities. In H. Helvajian, A. Piqué, M. Wegener & B. Gu (Hrsg.), . Gehalten auf der SPIE LASE, San Francisco, California, United States. doi:10.1117/12.2082521
7. Alkan, B., Vera, D. A., Ahmad, M., Ahmad, B. & Harrison, R. (2018). Complexity in manufacturing systems and its measures: a literature review. *European J. of Industrial Engineering*, 12(1), 116. doi:10.1504/EJIE.2018.089883
8. Almaghariz, E. S., Conner, B. P., Lenner, L., Gullapalli, R., Manogharan, G. P., Lamoncha, B. et al. (2016). Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores. *International Journal of Metalcasting*, 10(3), 240–252. doi:10.1007/s40962-016-0027-5
9. Armillotta, A. (2021). On the role of complexity in machining time estimation. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(8), 2281–2299. doi:10.1007/s10845-021-01741-y
10. Autodesk. (2022). Autodesk. *Autodesk - Fusion 360 mit Netfabb*. Zugriff am 26.5.2022. Verfügbar unter: www.autodesk.de/products/netfabb/
11. Awiszus, B., Bast, J. & Hänel, T. (2020). *Grundlagen der Fertigungstechnik*. (M. Kusch, Hrsg.) (7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage.). München: Hanser.
12. Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Weiber, R. (2016). *Multivariate Analysemethoden*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-46076-4
13. Bandow, G. & Holzmüller, H. H. (2010). „Das ist gar kein Modell!": *unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften* (Gabler Research) (1. Auflage.). Wiesbaden: Gabler Research.
14. Bandte, H. (2007). *Komplexität in Organisationen: organisationstheoretische Betrachtungen und agentenbasierte Simulation* (Gabler Edition Wissenschaft) (1. Aufl.). Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. [u.a.].
15. Baumers, M. (2012). *Economic Aspects of Additive Manufacturing: Benefits, Costs and Energy Consumption*. Dissertation. Loughborough University.

16. Baumers, M., Beltrametti, L., Gasparre, A. & Hague, R. (2017). Informing additive manufacturing technology adoption: total cost and the impact of capacity utilisation. *International Journal of Production Research*, 55(23), 6957–6970. doi:10.1080/00207543.2017.1334978
17. Baumers, M. & Holweg, M. (2016). Cost Impact of the Risk of Build Failure in Laser Sintering, *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 12.
18. Baumers, M. & Holweg, M. (2019). On the economics of additive manufacturing: Experimental findings. *Journal of Operations Management*, 65(8), 794–809. doi:10.1002/joom.1053
19. Baumers, M., Tuck, C., Bourell, D. L., Sreenivasan, R. & Hague, R. (2011). Sustainability of additive manufacturing: measuring the energy consumption of the laser sintering process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(12), 2228–2239. doi:10.1177/0954405411406044
20. Beaman, J. J. (1992). Application of Factorial Design in Selective Laser Sintering (1992 International Solid Freeform Fabrication Symposium).
21. Ben Amor, S., Abdellaoui, S., Tahan, A., Louhichi, B. & Tavares, J. M. R. S. (2019). Choosing the Best Direction of Printing for Additive Manufacturing Process in Medical Applications Using a New Geometric Complexity Model Based on Part CAD Data (Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics). In J.M.R.S. Tavares & R.M. Natal Jorge (Hrsg.), *VipIMAGE 2019* (Band 34, S. 679–692). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-32040-9_70
22. Ben Amor, S., Tahan, A. & Louhichi, B. (2019). Proposition of a Geometric Complexity Model for Additive Manufacturing Process Based on CAD. *2019 23rd International Conference Information Visualisation (IV)* (S. 442–448). Gehalten auf der 2019 23rd International Conference Information Visualisation (IV), Paris, France: IEEE. doi:10.1109/IV.2019.00080
23. Ben Amor, S., Tahan, A. & Louhichi, B. (2022a). The Impact of Geometric Complexity on Printing Time and Cost for Additive Manufacturing. *Advances in mechanical engineering and mechanics II: selected papers from the 5th Tunisian Congress on Mechanics, CoTuMe 2021, March 22-24, 2021* (S. 466). Cham.
24. Ben Amor, S., Tahan, A. & Louhichi, B. (2022b). The Impact of Geometric Complexity on Printing Time and Cost for Additive Manufacturing (AM) Process (Lecture Notes in Mechanical Engineering). (T. Bouraoui, T. Benameur, S. Mezlini, C. Bouraoui, A. Znaidi, N. Masmoudi et al., Hrsg.) *Advances in Mechanical Engineering and Mechanics II*, 203–210. doi:10.1007/978-3-030-86446-0_27
25. Ben Amor, S., Zongo, F., Eltaief, A., Maatki, A., Louhichi, B. & Tahan, A. (2022). A new method to select optimal part building orientation for additive manufacturing processes based on geometric complexity and heat shrinkage. *Progress in Additive Manufacturing*. doi:10.1007/s40964-022-00324-4
26. Benedetti, L., Brulé, B., Decreamer, N., Evans, K. E. & Ghita, O. (2019). Shrinkage behaviour of semi-crystalline polymers in laser sintering: PEKK and PA12. *Materials & Design*, 181, 107906. doi:10.1016/j.matdes.2019.107906

27. Berger, U., Hartmann, A. & Schmid, D. (2017). *3D-Druck - Additive Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing* (Bibliothek des technischen Wissens) (2. Auflage, mit Bilder-CD.). Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel - Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG.
28. Bertsche, B. (2007). *Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte — Rapid Prototyping* (VDI-Buch). (H.-J. Bullinger, Hrsg.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-69880-7
29. Bin Maidin, S. (2011). *Development of a design feature database to support design for additive manufacturing (DfAM)*. Dissertation. Loughborough University.
30. Blattmeier, M. (2012). *Strukturanalyse von lasergesinterten Schichtverbunden mit werkstoffmechanischen Methoden* (Research). Wiesbaden: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-8348-2501-8
31. Blessing, L. T. M. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer London. doi:10.1007/978-1-84882-587-1
32. Bliedtner, J., Müller, H. & Barz, A. (2013). *Lasermaterialbearbeitung: Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele; mit 110 Tabellen*. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl.
33. Bloech, J., Bogaschewsky, R., Buscher, U., Daub, A., Götze, U. & Roland, F. (2014). *Einführung in die Produktion* (Springer-Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-31893-1
34. Boyard, N., Rivette, M., Christmann, O. & Richir, S. (2013). A design methodology for parts using Additive Manufacturing. In P. da Silva Bártolo, A. de Lemos, A. Pereira, A. Mateus, C. Ramos, C. Santos et al. (Hrsg.), *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping* (S. 399–404). CRC Press. doi:10.1201/b15961-74
35. Brackett, D., Ashcroft, I. & Hague, R. (2011). Topology Optimization For Additive Manufacturing.
36. Breuninger, J., Becker, R., Wolf, A., Rommel, S. & Verl, A. (2013). *Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion für selektives Lasersintern*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
37. Buchholz, L. & Gerhards, R. (2016). *Internes Rechnungswesen* (BA KOMPAKT). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-48405-0
38. Bundeszentrale für Politische Bildung, D., Statistisches Bundesamt, W. B. f?r S. & Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, P. D. S.-ökonomische P. (2021). *Datenreport 2021 ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*. Zugriff am 29.1.2022. Verfügbar unter: <http://www.gbv.de/dms/maecenata/1750939096.pdf>
39. Chekurov, S., Kajaste, J., Saari, K., Kauranne, H., Pietola, M. & Partanen, J. (2019). Additively manufactured high-performance counterflow heat exchanger. *Progress in Additive Manufacturing*, 4(1), 55–61. doi:10.1007/s40964-018-0059-x
40. Cohen, J. (1992). Quantitative Methods in Psychology: A power primer. *Psychological Bulletin*, 112(1), 155–159. doi:10.1037/0033-2909.112.1.155
41. Conner, B. P., Manogharan, G. P., Martof, A. N., Rodomsky, L. M., Rodomsky, C. M., Jordan, D. C. et al. (2014). Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. *Additive Manufacturing* (Band 1–4, S. 64–76). doi:10.1016/j.addma.2014.08.005

42. Deng, X. (Michael), Zong, G. & Beaman, J. J. (1992). Parametric Analysis for Selective Laser Sintering of a Polymer System (1992 International Solid Freeform Fabrication Symposium).
43. Di Angelo, L. & Di Stefano, P. (2011). A neural network-based build time estimator for layer manufactured objects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(1–4), 215–224. doi:10.1007/s00170-011-3284-8
44. Di Angelo, L., Di Stefano, P. & Guardiani, E. (2020). Search for the Optimal Build Direction in Additive Manufacturing Technologies: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(3), 71. doi:10.3390/jmmp4030071
45. DIN. (2016). *EN ISO 17296-2:2016; Additive Fertigung – Grundlagen – Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe*. Richtlinie Nr. EN ISO 17296-2:2016. (S. 16). Berlin: DIN-Normenausschuss Werkstofftechnologie (NWT).
46. *DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren_ - Begriffe, Einteilung*. Richtlinie Nr. DIN 8580:2003-09. (2003). (S. 13). Beuth Verlag GmbH. doi:10.31030/9500683
47. *DIN EN ISO 17450-1:2012-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS)_ - Grundlagen_ - Teil_1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung (ISO_17450-1:2011); Deutsche Fassung EN_ISO_17450-1:2011*. Richtlinie Nr. DIN EN ISO 17450-1:2012-04. (2012). (S. 70). Beuth Verlag GmbH. doi:10.31030/1815276
48. *DIN EN ISO 22432:2012-03, Geometrische Produktspezifikation (GPS)_ - Zur Spezifikation und Prüfung benutzte Geometrielemente (ISO_22432:2011); Deutsche Fassung EN_ISO_22432:2011*. Nr. DIN EN ISO 22432:2012-03. (2012). (S. 60). Beuth Verlag GmbH. doi:10.31030/1742212
49. Doubrovski, E. L. (2016). *Design Methodology for Additive Manufacturing: Supporting Designers in the Exploitation of Additive Manufacturing Affordances*. Delft University of Technology. doi:10.4233/UUID:D4214BB0-5BFD-43FE-AF42-01247762B661
50. Dückert, E., Schäfer, L., Schneider, R. & Wahren, S. (2015). *Analytische Untersuchung zur Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe*.
51. Dudenredaktion. (2021). Komplexität, die. *Duden*. Zugriff am 30.8.2021. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/node/81596/revision/81632>
52. Dudenredaktion. (2023). Methode. *Duden*. Zugriff am 5.2.2023. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Methode>
53. Echeta, I., Feng, X., Dutton, B., Leach, R. & Piano, S. (2020). Review of defects in lattice structures manufactured by powder bed fusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(5–6), 2649–2668. doi:10.1007/s00170-019-04753-4
54. Ehrlenspiel, K. (2007). *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (3., aktualisierte Aufl.). München: Hanser.
55. Ehrlenspiel, K., Kiewert, A. & Lindemann, U. (2005). *Kostengünstig entwickeln und konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung* (VDI-Buch) (5., bearb. Aufl.). Berlin: Springer.
56. Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U. & Mörtl, M. (2020). *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-62591-0
57. ElMaraghy, W. H. & Urbanic, R. J. (2003). Modelling of Manufacturing Systems Complexity. *CIRP Annals*, 52(1), 363–366. doi:10.1016/S0007-8506(07)60602-7

58. Emmelmann, C., Sander, P., Kranz, J. & Wycisk, E. (2011). Laser Additive Manufacturing and Bionics: Redefining Lightweight Design. *Physics Procedia*, 12, 364–368. doi:10.1016/j.phpro.2011.03.046
59. EOS GmbH. (2019a, Januar). Formiga P110 Velocis system data sheet. Zugriff am 13.3.2022. Verfügbar unter: www.eos.info
60. EOS GmbH. (2019b, Januar). P770 system data sheet. Zugriff am 13.3.2021. Verfügbar unter: www.eos.info
61. Eschey, C. (2012, November 13). *Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung*. Dissertation. München: TU München.
62. Eversheim, W. (2002). *Organisation in der Produktionstechnik. 3: Arbeitsvorbereitung* (4., bearb. und korrig. Aufl.). Berlin Heidelberg: Springer.
63. Falck, A.-C., Örtengren, R. & Rosenqvist, M. (2012). Relationship between complexity in manual assembly work, ergonomics and assembly quality. *Ergonomics for Sustainability and Growth, NES 2012 (Nordiska Ergonomisällskapet) konferens, Saltsjöbaden, Stockholm, 19-22 augusti, 2012*.
64. Farsoon Technologies. (2021a, August 10). 403P Series. Zugriff am 13.3.2021. Verfügbar unter: <http://en.farsoon.com/images/403P%20Series1.pdf>
65. Farsoon Technologies. (2021b, August 10). HT1001P1.pdf. Zugriff am 13.3.2021. Verfügbar unter: <http://en.farsoon.com/images/HT1001P1.pdf>
66. Feldmann, C. & Pumpe, A. (2016). *3D-Druck – Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit (essentials)*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-15196-6
67. Fera, M., Macchiaroli, R., Fruggiero, F. & Lambiase, A. (2018). A new perspective for production process analysis using additive manufacturing—complexity vs production volume. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1–4), 673–685. doi:10.1007/s00170-017-1221-1
68. Fiona Schulte, S. W. (2021). Potentiale additiv gefertigter Gitterstrukturen – ein Review. *DS 111: Proceedings of the 32nd Symposium Design for X*. Gehalten auf der Proceedings of the 32nd Symposium Design for X, The Design Society. doi:10.35199/dfx2021.07
69. Fischer, J. O. (2008). *Kostenbewusstes Konstruieren: praxisbewährte Methoden und Informationssysteme für den Konstruktionsprozess* (1. Aufl.). Berlin Heidelberg: Springer.
70. Fischer, K.-F. (2010). *Taschenbuch der Technischen Formeln* (4., neu bearb. Aufl.). München: Fachbuchverl. Leipzig im Hanser Verl.
71. Förster, R. & Förster, A. (2018). *Einführung in die Fertigungstechnik: Lehrbuch für Studenten ohne Vorpraktikum*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-54702-1
72. Fritz, A. H. (2018). *Fertigungstechnik* (Springer-Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-56535-3
73. Fulcher, B. & Leigh, D. K. (2013). Effects of Laser Window Degredation on Laser Power and Distribution in Laser Sintering, 12. University of Texas at Austin. doi:10.26153/TSW/15421
74. Ga, B., Gardan, N. & Wahu, G. (2018). Methodology for Part Building Orientation in Additive Manufacturing. *Computer-Aided Design and Applications*, 16(1), 113–128. doi:10.14733/cadaps.2019.113-128

75. Garashchenko, Y. (2018). Estimation of Complexity of Field Contours of Layer Building with the Use of Cell Method of Determining the Fractal Dimension. *Acta Mechanica Slovaca*, 22(2), 16–23. doi:10.21496/ams.2018.012
76. Gebhardt, A. (2016). *Additive Fertigungsverfahren: additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion* (5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage.). München: Hanser. doi:10.3139/9783446445390.fm
77. Gebhardt, A., Kessler, J. & Schwarz, A. (2019). *Produktgestaltung für die Additive Fertigung*. München: Hanser. doi:10.1007/978-3-446-46133-8
78. Gebhardt, A., Kessler, J. & Thurn, L. (2016). *3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)* (2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage.). München: Hanser.
79. George, N. & Chowdary, B. (2020). Design complexity as a driver for additive manufacturing process improvement. *Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology (IConETech-2020)* (S. 730–738). Gehalten auf der International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology (IConETech-2020), Faculty of Engineering, The University of the West Indies, St. Augustine. doi:10.47412/HEXU4041
80. Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* (2. Auflage). Springer-Verlag New York.
81. Goodridge, R. & Ziegelmeier, S. (2017). 7 - Powder bed fusion of polymers (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials). In M. Brandt (Hrsg.), *Laser Additive Manufacturing* (S. 181–204). Woodhead Publishing. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00007-5
82. Gräßler, I., Taplick, P., Pottebaum, J., Scholle, P. & Reiher, T. (2016). Data Management For Additive Manufacturing: Survey On Requirements And Current State.
83. Greco, A., Manco, P., Russo, M. B. & Gerbino, S. (2023). Complexity-driven product design: part 1—methodological framework and geometrical complexity index. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. doi:10.1007/s12008-023-01426-1
84. Gröger, S. (2013). *Funktionsgerechte Spezifikation geometrischer Eigenschaften mit dem System der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation*. Dissertation. Chemnitz: Technischen Universität Chemnitz.
85. Grund, M. (2015). *Implementierung von schichtadditiven Fertigungsverfahren: mit Fallbeispielen aus der Luftfahrtindustrie und Medizintechnik* (Light Engineering für die Praxis). Berlin: Springer Vieweg.
86. Gullapalli, R. A. (2016). *A Study of Mixed Manufacturing Methods in Sand Casting Using 3D Sand Printing and FDM Pattern-making Based on Cost and Time*. Master Thesis.
87. Haefele, T., Schneberger, J.-H., Buchholz, S., Vielhaber, M. & Griebisch, J. (2024). Evaluation of productivity in laser sintering by measure and assessment of geometrical complexity. *Rapid Prototyping Journal*. Emerald. doi:10.1108/rpj-07-2024-0289
88. Häfele, T., Schneberger, J., Buchholz, S., Vielhaber, M. & Griebisch, J. (2023). The impact of geometric complexity on manufacturing process efficiency of Selective Laser Sintering. *56th CIRP Conference on Manufacturing Systems, CIRP CMS '23* (S. 6). Kapstadt, South Africa (accepted to be published).

89. Häfele, T., Schneberger, J.-H., Kaspar, J., Vielhaber, M. & Griebisch, J. (2019). Hybrid Additive Manufacturing – Process Chain Correlations and Impacts. *Procedia CIRP* (Band 84, S. 328–334). doi:10.1016/j.procir.2019.04.220
90. Hague, R., Campbell, I. & Dickens, P. (2003). Implications on design of rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217(1), 25–30. doi:10.1243/095440603762554587
91. Hartogh, P. & Vietor, T. (2018). Vorhersage der Fertigungszeit und -kosten für die additive Serienfertigung. In R. Lachmayer, R.B. Lippert & S. Kaierle (Hrsg.), *Additive Serienfertigung: Erfolgsfaktoren und Handlungsfelder für die Anwendung* (S. 69–87). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-56463-9_5
92. Heine, B., Schmid, D., Dambacher, M., Holzwarth, F. & Klein, F. (2019). *Industrielle Fertigung: Fertigungsverfahren, Mess- und Prüftechnik* (Bibliothek des technischen Wissens) (8., neubearbeitete Auflage, mit CD.). Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG.
93. Helmborg, G. (2007). *Getting acquainted with fractals*. Berlin; New York: Walter de Gruyter.
94. Hofland, E. C., Baran, I. & Wismeijer, D. A. (2017). Correlation of Process Parameters with Mechanical Properties of Laser Sintered PA12 Parts. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 1–11. doi:10.1155/2017/4953173
95. Hopkinson, N. & Dickens, P. (2003). Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217(1), 31–39. doi:10.1243/095440603762554596
96. Hügel, H. (1992). *Strahlwerkzeug Laser: eine Einführung* (Teubner-Studienbücher Maschinenbau). Stuttgart: Teubner.
97. ISO/ASTM International. (2017). *Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing*. ASTM International. doi:10.1520/F3154-17
98. ISO/ASTM International. (2021). *Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary*. BSI British Standards. doi:10.3403/30448424
99. Ituarte, I. F., Kretzschmar, N. & Chekurov, S. (2019). Measuring the value of DfAM in metal powder bed fusion direct part production, 5.
100. Joshi, D. & Ravi, B. (2010). Quantifying the Shape Complexity of Cast Parts. *Computer-Aided Design and Applications*, 7(5), 685–688. doi:10.3722/cadaps.2010.685-700
101. Kaddar, W. (2010, November 17). *Die generative Fertigung mittels Laser Sintern: Scanstrategien, Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen und optischen Eigenschaften beim LS von Thermoplasten und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten*. Dissertation. Universität Duisburg-Essen.
102. Kies, T. (2018). *10 Grundregeln zur Konstruktion von Kunststoffprodukten* (2., aktualisierte Auflage.). München: Hanser.
103. Kirchner, E. (2020). *Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung: Von der Idee zum erfolgreichen Produkt*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-61762-5

104. Klahn, C., Meboldt, M., Fontana, F., Leutenecker-Twelsiek, B. & Jansen, J. (2018). *Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung: Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten* (Ein Fachbuch von Konstruktionspraxis) (1. Auflage.). Würzburg: Vogel Business Media.
105. Klein, B. (2020). *Entwicklungsbegleitende Versuchstechniken: im Maschinen- und Fahrzeugbau* (1. Auflage.). Tübingen: expert.
106. Kleppmann, W. (2016). *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren* (Praxisreihe Qualitätswissen) (9., überarbeitete Auflage.). München Wien: Hanser.
107. Koch, S. (2015). *Einführung in das Management von Geschäftsprozessen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-44450-4
108. Kollenberg, W. (2020). *Additive Fertigung keramischer Komponenten: Grundlagen und Anwendungen* (Prozesswärme Edition) (1. Auflage.). Essen: Vulkan Verlag.
109. Kumar, S. (2003). Selective laser sintering: A qualitative and objective approach. *JOM*, 55(10), 43–47. doi:10.1007/s11837-003-0175-y
110. Kumke, M. (2018). *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-22209-3
111. Kumke, M., Watschke, H., Hartogh, P., Bavendiek, A.-K. & Vietor, T. (2018). Methods and tools for identifying and leveraging additive manufacturing design potentials. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 12(2), 481–493. doi:10.1007/s12008-017-0399-7
112. Kushnarenko, O. M. (2009). *Entscheidungsmethodik zur Anwendung generativer Verfahren für die Herstellung metallischer Endprodukte*. Dissertation. Aachen Shaker 2009: Magdeburg, Univ.
113. Lachmayer, R. & Lippert, R. B. (2018). *Additive Serienfertigung: Erfolgsfaktoren und Handlungsfelder für die Anwendung*. (S. Kaierle, Hrsg.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-56463-9
114. Lachmayer, R. & Lippert, R. B. (2020a). *Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-59789-7
115. Lachmayer, R. & Lippert, R. B. (2020b). *Konstruktion für die Additive Fertigung 2018*. (S. Kaierle, Hrsg.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-59058-4
116. Lehmon, D., Häfele, T., Lehser-Pfeffermann, D., Rückert, F. & Griebisch, J. (2019). ADDITIVE PRODUCTION OF AERODYNAMIC ADD-ON PARTS FOR A RACING CAR WITH LOAD-ADAPTED LIGHTWEIGHT DESIGN OPTIMIZATION AND THE USE OF HYBRID MATERIAL, 10.
117. Lindemann, C. F. W. & Jahnke, U. (2017). 11 - Modelling of laser additive manufactured product lifecycle costs (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials). In M. Brandt (Hrsg.), *Laser Additive Manufacturing* (S. 281–316). Woodhead Publishing. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00011-7
118. Lindemann, C., Jahnke, U., Moi, M. & Koch, R. (2012). Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in. *23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium* (S. 12). Verfügbar unter: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/2012/2012-12-Lindemann.pdf>

119. Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-01423-9
120. Lupone, F., Padovano, E., Casamento, F. & Badini, C. (2021). Process Phenomena and Material Properties in Selective Laser Sintering of Polymers: A Review. *Materials*, 15(1), 183. doi:10.3390/ma15010183
121. Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O. et al. (2019). SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design*, 183, 108137. doi:10.1016/j.matdes.2019.108137
122. Manogharan, G., Wysk, R. A. & Harrysson, O. L. A. (2016). Additive manufacturing–integrated hybrid manufacturing and subtractive processes: economic model and analysis. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(5), 473–488. doi:10.1080/0951192X.2015.1067920
123. Marschall, H. (2016). *Personal für die additive Fertigung (essentials)*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-13307-8
124. Martof, A., Gullapalli, R., Kelly, J., Rea, A., Lamoncha, B., Walker, J. M. et al. (2018). Economies of Complexity of 3D Printed Sand Molds for Casting, 120–132. doi:10.26153/tsw/17003
125. Materialise. (2022). Materialise Magics. Verfügbar unter: <https://www.materialise.com/de/software/magics>
126. Mattheck, C. (1997). *Design in der Natur: der Baum als Lehrmeister (Rombach Wissenschaften Reihe Ökologie) (3., überarb. und erw. Neuaufl.)*. Freiburg im Breisgau: Rombach.
127. Mattheck, C. (2017). *Die Körpersprache der Bauteile: Enzyklopädie der Formfindung nach der Natur (1. Auflage)*. Eggenstein-Leopoldshafen: Karlsruher Institut für Technologie - Campus Nord.
128. Meboldt, M. & Klahn, C. (2018). *Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017*. Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-66866-6
129. Merkt, S., Hinke, C., Schleifenbaum, H. & Voswinckel, H. (2012). Geometric complexity analysis in an integrative technology evaluation model (ITEM) for selective laser melting (SLM). *The South African Journal of Industrial Engineering*, 23(2). doi:10.7166/23-2-333
130. Mielicki, M. C., Wegner, A., Gronhoff, B., Wortberg, J. & Witt, G. (2012). Prediction of PA12 melt viscosity in Laser Sintering by a Time and Temperature dependent rheological model. (L. RTejournal, Hrsg.), 32.
131. Möhrle, M., Emmelmann, C. & Müller, J. (2017). *Industrialisierungsstudie Additive Fertigung - Herausforderungen-von-Ansaetze*.
132. Negi, S. & Sharma, R. K. (2016). Study on shrinkage behaviour of laser sintered PA 3200GF specimens using RSM and ANN. *Rapid Prototyping Journal*, 22(4), 645–659. doi:10.1108/RPJ-08-2014-0090
133. Nelson, J. C. (1993). *Selective laser sintering: A Definition of the Process and an Empirical Sintering Model*. Dissertation. Austin, USA: University of Texas.

134. Neugebauer, F. (2017). *Material- und Prozessmodellierung zur effizienten FEM-Berechnung der Verzugsentstehung beim Laser-Sintern von teilkristallinen Thermoplasten*. Dissertation. Universität Bremen.
135. Pham, D. T. & Wang, X. (2000). Prediction and reduction of build times for the selective laser sintering process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 214(6), 425–430. doi:10.1243/0954405001517739
136. Piller, F. T. (2008). *Mass Customization: ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter* (Gabler Edition Wissenschaft Markt- und Unternehmensentwicklung) (4., überarb. und erw. Aufl., Nachdr.). Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.
137. Pollert, A., Kirchner, B. & Polzin, J. M. (2010). *Duden Wirtschaft von A bis Z: Grundlagenwissen für Schule und Studium, Beruf und Alltag* (4. Aufl.). Mannheim Leipzig Wien Zürich: Dudenverl.
138. Poprawe, R., Hinke, C., Meiners, W., Schrage, J., Bremen, S. & Merkt, S. (2015). SLM Production Systems: Recent Developments in Process Development, Machine Concepts and Component Design (Lecture Notes in Production Engineering). In C. Brecher (Hrsg.), *Advances in Production Technology* (S. 49–65). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-12304-2_5
139. Pradel, P., Bibb, R., Zhu, Z. & Moultrie, J. (2017). Complexity Is Not For Free: The Impact of Component Complexity on Additive Manufacturing Build Time.
140. Pradel, P., Bibb, R., Zhu, Z. & Moultrie, J. (2018). Exploring the Impact of Shape Complexity on Build Time for Material Extrusion and Material Jetting. In M. Meboldt & C. Klahn (Hrsg.), *Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017* (S. 24–33). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-66866-6_3
141. Pradel, P., Zhu, Z., Bibb, R. & Moultrie, J. (2018a). A framework for mapping design for additive manufacturing knowledge for industrial and product design. *Journal of Engineering Design*, 29(6), 291–326. doi:10.1080/09544828.2018.1483011
142. Pradel, P., Zhu, Z., Bibb, R. & Moultrie, J. (2018b). Investigation of design for additive manufacturing in professional design practice. *Journal of Engineering Design*, 29(4–5), 165–200. doi:10.1080/09544828.2018.1454589
143. Psarra, S. & Grajewski, T. (2001). Describing Shape and Shape Complexity Using Local Properties. *Proceedings. 3rd International Space Syntax Symposium Atlanta 2001*, 17.
144. Redwood, B., Garrett, B. & Schöffler, F. (2017). *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs.
145. Richard, H. A. & Schramm, B. (2019). *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen: Neue Erkenntnisse und Praxisbeispiele*. (T. Zipsner, Hrsg.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-27412-2
146. Rickenbacher, L., Spierings, A. & Wegener, K. (2013). An integrated cost-model for selective laser melting (SLM). *Rapid Prototyping Journal*, 19(3), 208–214. doi:10.1108/13552541311312201
147. Rietzel, D. (2011). Grundlegende Betrachtungen zur Modellierung transienter thermischer Vorgänge beim selektiven Lasersintern von Thermoplasten. (L. RTEjournal, Hrsg.), 9.

148. Rosen, D. W. (2007). Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. *Computer-Aided Design and Applications*, 4(5), 585–594. doi:10.1080/16864360.2007.10738493
149. Rosso, S., Meneghello, R., Biasetto, L., Grigolato, L., Concheri, G. & Savio, G. (2020). In-depth comparison of polyamide 12 parts manufactured by Multi Jet Fusion and Selective Laser Sintering. *Additive Manufacturing*, 36, 101713. doi:10.1016/j.addma.2020.101713
150. Ruffo, M. & Hague, R. (2007). Cost estimation for rapid manufacturing ' simultaneous production of mixed components using laser sintering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(11), 1585–1591. doi:10.1243/09544054JEM894
151. Ruffo, M., Tuck, C. & Hague, R. (2006a). Empirical laser sintering time estimator for Duraform PA. *International Journal of Production Research*, 44(23), 5131–5146. doi:10.1080/00207540600622522
152. Ruffo, M., Tuck, C. & Hague, R. (2006b). Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(9), 1417–1427. doi:10.1243/09544054JEM517
153. Sauer, A. (2005). *Optimierung der Bauteileigenschaften beim Selektiven Lasersintern von Thermoplasten* (Berichte aus der Fertigungstechnik). Aachen: Shaker.
154. Schmid, D., Dambacher, M., Kaufmann, H., Kirchner, A., Koke, T., Konold, P. et al. (2013). *Produktion - Technologie und Management* (Bibliothek des technischen Wissens) (1. Aufl.). Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer.
155. Schmid, M. (2015a). *Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen: Technologie, Prozesse und Werkstoffe*. München: Hanser.
156. Schmid, M. (2015b). *Additive Fertigung mit Selektivem Lasersintern (SLS) (essentials)*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-12289-8
157. Schmid, M. (2023). *Lasersintern (LS) mit Kunststoffen: Technologie, Prozesse und Werkstoffe* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage.). München: Hanser. doi:10.3139/9783446470132
158. Schmidt, T. (2016). *Potentialbewertung generativer Fertigungsverfahren für Leichtbauteile*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-52996-6
159. Schneberger, J.-H., Kaspar, J. & Vielhaber, M. (2020). Post-processing and testing-oriented design for additive manufacturing – A general framework for the development of hybrid AM parts. *Procedia CIRP*, 90, 91–96. doi:10.1016/j.procir.2020.01.059
160. Seepersad, C. C., Govett, T., Kim, K., Lundin, M. & Pinero, D. (2012). A Designer's Guide for Dimensioning and Tolerancing SLS Parts (S. 921–931). Gehalten auf der Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX.
161. Shen, F., Yuan, S., Chua, C. K. & Zhou, K. (2018). Development of process efficiency maps for selective laser sintering of polymeric composite powders: Modeling and experimental testing. *Journal of Materials Processing Technology*, 254, 52–59. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.11.027
162. Siebertz, K., van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017). *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-55743-3

163. Singh, S., Sachdeva, A. & Sharma, V. S. (2017). Optimization of selective laser sintering process parameters to achieve the maximum density and hardness in polyamide parts. *Progress in Additive Manufacturing*, 2(1–2), 19–30. doi:10.1007/s40964-017-0020-4
164. Statistisches Bundesamt. (2019, Mai 29). Kennzahlen der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes 2017. www.destatis.de. Zugriff am 28.1.2022. Verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Tabellen/kennzahlen-verarbeitendes-gewerbe.html?view=main\[Print\]](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Tabellen/kennzahlen-verarbeitendes-gewerbe.html?view=main[Print])
165. Struve, A. (2021). *Generatives Design zur Optimierung additiv gefertigter Kühlkörper* (Light Engineering für die Praxis). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-63071-6
166. Sun, S., Brandt, M. & Easton, M. (2017). Powder bed fusion processes: an overview (Woodhead Publishing series in electronic and optical materials). In M. Brandt (Hrsg.), *Laser additive manufacturing: materials, design, technologies, and applications* (S. 54–70). Amsterdam; Boston: Elsevier/Woodhead Publishing, Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier.
167. Teufelhart, S. (2016). *Belastungsoptimiertes Design von Gitterstrukturen für die additive Fertigung nach dem bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung*. Dissertation. München: Technische Universität München.
168. Thomas, D. S. & Gilbert, S. W. (2014). *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing*. Nr. NIST SP 1176. (S. NIST SP 1176). National Institute of Standards and Technology. doi:10.6028/NIST.SP.1176
169. Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I. et al. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*, 65(2), 737–760. doi:10.1016/j.cirp.2016.05.004
170. Ultimaker BV. (2022). Ultimaker Cura. *Ultimaker Cura*. Verfügbar unter: <https://ultimaker.com/de/software/ultimaker-cura>
171. Urbanic, R. J. & Hedrick, R. (2016). Fused Deposition Modeling Design Rules for Building Large, Complex Components. *Computer-Aided Design and Applications*, 13(3), 348–368. doi:10.1080/16864360.2015.1114393
172. Valentan, B., Brajliah, T., Drstvensek, I. & Balic, J. (2006). Evaluation of shape complexity based on STL data. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 17(1), 4.
173. Valentan, B., Brajliah, T., Drstvensek, I. & Balic, J. (2008). Basic solutions on shape complexity evaluation of STL data. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 26(1), 8.
174. Valentan, B., Brajliah, T., Drstvenšek, I. & Balič, J. (2011). Development of a Part-Complexity Evaluation Model for Application in Additive Fabrication Technologies. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 57(10), 709–718. doi:10.5545/sv-jme.2010.057
175. Vaneker, T., Bernard, A., Moroni, G., Gibson, I. & Zhang, Y. (2020). Design for additive manufacturing: Framework and methodology. *CIRP Annals*, 69(2), 578–599. doi:10.1016/j.cirp.2020.05.006
176. Vasquez, M., Haworth, B. & Hopkinson, N. (2011). Optimum sintering region for laser sintered nylon-12. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(12), 2240–2248. doi:10.1177/0954405411414994

177. Vayre, B., Vignat, F. & Villeneuve, F. (2012). Designing for Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 3, 632–637. doi:10.1016/j.procir.2012.07.108
178. VDI 2221 Blatt 1:2019-11 - Entwicklung technischer Produkte und Systeme Modell der Produktentwicklung. Richtlinie Nr. VDI 2221 Blatt 1. (2019). (S. 56). Düsseldorf: VDI.
179. VDI 2223:2004-01 - Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Richtlinie Nr. VDI 2223. (2004). (S. 94). Düsseldorf: VDI.
180. VDI 2234:1990-01 - Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur. Richtlinie Nr. VDI 2234. (1990). (S. 38). Düsseldorf: VDI.
181. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH. (2018, Mai). Wettbewerbsvorteil Ressourceneffizienz, Definition, Grundlagen, Fakten und Beispiele. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH.
182. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik. (2009). *VDI 3404: Generative Fertigungsverfahren - Rapid Technologien (Rapid Prototyping): Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen*. Richtlinie Nr. 3404. (S. 48). Düsseldorf: VDI.
183. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik. (2014). *VDI 3633 Blatt 1 - Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen Grundlagen*. Richtlinie Nr. 6333 Blatt 1. (S. 48). Düsseldorf: VDI.
184. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik. (2015). *VDI 3405 Blatt 3 - Additive Fertigungsverfahren - Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen*. Richtlinie Nr. VDI 3405 Blatt 3-Zurückgezogen. (S. 32). Düsseldorf: VDI.
185. VDI-Zentrum Ressourceneffizienz GmbH. (2017). Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes, 274.
186. Volling, T. (2009). *Auftragsbezogene Planung bei variantenreicher Serienproduktion*. Wiesbaden: Gabler. doi:10.1007/978-3-8349-8071-7
187. Walker, J. M., Bodamer, E., Kleinfehn, A., Luo, Y., Becker, M. & Dean, D. (2017). Design and mechanical characterization of solid and highly porous 3D printed poly(propylene fumarate) scaffolds. *Progress in Additive Manufacturing*, 2(1–2), 99–108. doi:10.1007/s40964-017-0021-3
188. Watson, A. (2012). Perimetric Complexity of Binary Digital Images. *The Mathematica Journal*, 14. doi:10.3888/tmj.14-5
189. Weber, M. (2019). Leitfaden Ressourceneffizienz, Ressourcen schonen - Effizienz steigern. (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Hrsg.), 64.
190. Weber, P. (2018). *Kostenbewusstes Entwickeln und Konstruieren: Grundlagen – Methoden – Beispiele* (Kontakt & Studium) (4. Auflage.). Renningen: expert verlag.
191. Wegner, A. (2015). *Theorie über die Fortführung von Aufschmelzvorgängen als Grundvoraussetzung für eine robuste Prozessführung beim Laser-Sintern von Thermoplasten*. Dissertation. Universität Duisburg-Essen.
192. Westkämper, E., Warnecke, H.-J., Dinkelmann, M. & Haag, H. (2011). *Einführung in die Fertigungstechnik* (Fertigung) (8., aktualisierte und erw. Aufl., korrigierter Nachdr.). Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
193. Winkelmann, A. & Flath, C. (2021). *Sharing Economy in der Industrie: Unternehmensübergreifende Auslastung von Produktionskapazitäten am Beispiel der additiven Fertigung*. (F.

- Thiesse, Hrsg.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-33923-4
194. Winzer, P. (2013). *Generic Systems Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-30365-4
195. Witt, G., Ambrosy, J. & Neugebauer, F. (2015). Untersuchung von Bauteilverzug und Kristallisation beim Laser-Sintern von Polyamid 12. doi:10.1007/978-3-662-48473-9_6
196. Witt, G. & Wegner, A. (2015). *Neue Entwicklungen in der Additiven Fertigung*. (J. Sehr, Hrsg.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-48473-9
197. Wohlers Associates. (2021). *Wohlers report 2021: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*. Fort Collins (Colo.): Wohlers Associates.
198. Yan, C., Shi, Y., Zhaoqing, L., Wen, S. & Wei, Q. (2021). *Selective laser sintering additive manufacturing technology*. Amsterdam: Academic Press.
199. Yuan, S., Shen, F., Bai, J., Chua, C. K., Wei, J. & Zhou, K. (2017). 3D soft auxetic lattice structures fabricated by selective laser sintering: TPU powder evaluation and process optimization. *Materials & Design*, 120, 317–327. doi:10.1016/j.matdes.2017.01.098
200. Zäh, M. (2006). *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren* (Kostengünstig Produzieren). München Wien: Hanser.
201. Zeyn, H. (2017). *Industrialisierung der Additiven Fertigung: digitalisierte Prozesskette - von der Entwicklung bis zum einsetzbaren Artikel* (1. Auflage.). Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH.
202. Zhang, Y., Bernard, A., Gupta, R. K. & Harik, R. (2014). Evaluating the Design for Additive Manufacturing: A Process Planning Perspective. *Procedia CIRP*, 21, 144–150. doi:10.1016/j.procir.2014.03.179
203. Zhou, C., Ye, H. & Zhang, F. (2015). A Novel Low-Cost Stereolithography Process Based on Vector Scanning and Mask Projection for High-Accuracy, High-Speed, High-Throughput, and Large-Area Fabrication. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 15(1). doi:10.1115/1.4028848
204. Zhouhui Lian, Godil, A., Rosin, P. L., & Xianfang Sun. (2012). A new convexity measurement for 3D meshes. *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (S. 119–126). Gehalten auf der 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Providence, RI: IEEE. doi:10.1109/CVPR.2012.6247666

A Anhang

A.1 Berechnungen

a. Wirtschaftlichkeitskalkulation, inkl. Prämissen

Tabelle 27: Maschinenstundensatz für die Anlagen Farsoon HT403P und EOS Formiga P100

Maschinenstundensatz	Farsoon HT403P	EOSP100
Mögliche Maschinenlaufzeit [Stunden/ Jahr]	8760	8760
Arbeitsfreie Tage	-1200	-1200
Stillstand pro Arbeitstag	-630	-630
Betriebsbedingte Stillstandzeiten	-100	-100
Instandhaltungszeit	-100	-100
Maschinenlaufzeit pro Jahr [Stunden/ Jahr]	6.730	6.730
Anschaffungs- oder Wiederbeschaffungskosten	250.000 €	180.000 €
Nutzungsdauer der Maschine (Afa-Dauer)	7 Jahre	7 Jahre
Kalkulatorische Zinssatz	2%	2%

Maschinenkosten	Kosten p.a.	
Kalk. Abschreibungen	35.714 €	25.714 €
Kalk. Zinsen	2.500 €	1.800 €
Instandhaltungs- und Wartungskosten [7,5%]	18.750 €	13.500 €
Raumbedarf in m ²	25,00	20,00
Raumkostensatz pro m ² pro Jahr	100,00	100,00
Raumkosten	2.500 €	2.000 €
Energiebedarf pro Stunde in kWh	6,00 kWh	2,00 kWh
Energiekosten pro kWh	0,30 €	0,30 €
Energiekosten	12.114 €	4.038 €
Druckluftverbrauch [m ³ /h]	1,58 m ³	10,00 m ³
Kosten Druckluft [€/m ³]	0,027 €	0,027 €
Entsorgungskosten	- €	- €
Sonstige Kosten	287 €	1.817 €
MSS Gesamt	10,68 €	7,26 €

Tabelle 28: Fertigungsrandbedingungen

Fertigungsrandbedingungen		
	Farsoon	EOS
Bauraum	40x40x45 cm (72.000 cm ³)	28x23x33 cm (21.252 cm ³)
Schüttdichte Material	0,5 g/ cm ³	
Auffrischrate (Neupulver & Verlust durch Nachbearbeitung)	13 % (10 % + 3 %)	
Schichtstärke	0,1 mm	
Anzahl Schichten - Belichtung	4000	2800
Anzahl Schichten - Leerschicht	500	500
Materialkosten	36 €/kg	
Anzahl Bauteile	230	56
Bauteilvolumen	28 cm ³	

Tabelle 29: Zusammensetzung der Personalkosten, inkl. Lohnnebenkosten

Personalkosten			
	Tage	Stunden/Tag	Stunden/Jahr
Mögliche Arbeitszeit in Stunden	365	8	2920
Arbeitsfreie Tage pro Jahr	140	8	1120
Krankheit und sonstige Ausfälle	15	8	120
Arbeitsstunden pro Jahr	210	8	1680

	Kosten/Jahr	Kosten/ Stunde	Anzahl
Verdienst Fachpersonal*	45.360,00 €	27,00 €	1
Verdienst Spezialist*	85.680,00 €	51,00 €	1

*(inkl. 30 % Lohnnebenkosten)

Tabelle 30: Bauteilunabhängige Prozesszeiten für die Datenvorbereitung und das Rüsten

	Farsoon	EOS
Datenvorbereitung [h]	1,50	1,33
Datenkonvertierung	0,17	0,17
Bauteil reparieren	0,17	0,17
Bauram packen	0,50	0,50
Stützstrukturen	0,00	0,00
Slicen	0,17	0,17
Datentransfer	0,17	0,17
Maschine parametrisieren	0,33	0,17
Rüsten [h]	1,83	0,83
Maschine rüsten	1,5	0,5
Material rüsten	0,33	0,33

Tabelle 31: Bauteilabhängige Prozesszeiten – Teil 1

	Farsoon												Aufschlag
	W1	W2	W3	W4	W1-45	W2-45	W3-45	W4-45	Z1	Z2	Z3	Z4	
Generieren [h]	24,58	29,07	43,71	65,35	28,94	37,50	54,61	84,53	29,73	36,58	48,56	72,47	
Aufheizen	0,50	0,50	0,50	0,50	1,50	2,50	3,50	4,50	5,50	6,50	7,50	8,50	
Belichten	15,59	19,62	33,66	53,96	18,80	25,74	41,07	67,81	15,48	21,04	31,19	51,90	
Beschichten	8,49	8,95	9,55	10,89	8,64	9,26	10,04	12,22	8,75	9,05	9,88	12,07	
Abkühlen [h]	24,58	29,07	43,71	65,35	28,94	37,50	54,61	84,53	29,73	36,58	48,56	72,47	
Abkühlen intern	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	
Abkühlen extern	22,58	27,07	41,71	63,35	25,94	33,50	49,61	78,53	22,73	28,58	39,56	62,47	
Nachbearbeitung [h]	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	
Baujob Entnahme	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	
Bauteile Entpacken	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	
Strahlen/ Bauteil	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	
Waschen/ Bauteil	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Sonstige Schritte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Gesamtdauer [h]	60,99	69,98	99,26	142,53	69,70	86,84	121,06	180,90	71,28	85,00	108,96	156,78	
Kostenart	W1	W2	W3	W4	W1-45	W2-45	W3-45	W4-45	Z1	Z2	Z3	Z4	
MEK	168,48	168,48	168,48	168,48	168,48	168,48	168,48	168,48	168,48	168,48	168,48	168,48	
MGK	33,70	33,70	33,70	33,70	33,70	33,70	33,70	33,70	33,70	33,70	33,70	33,70	
Materialkosten	202,18	202,18	202,18	202,18	202,18	202,18	202,18	202,18	202,18	202,18	202,18	202,18	20%
FEK-Anlage	283,80	331,79	488,14	719,17	341,02	443,19	636,58	966,75	392,17	476,08	614,70	880,67	
FGK-Anlage	28,38	33,18	48,81	71,92	34,10	44,32	63,66	96,68	39,22	47,61	61,47	88,07	
FK-Anlage	312,18	364,97	536,95	791,09	375,12	487,50	700,24	1063,43	431,38	523,68	676,17	968,74	10%
FEK-Rüsten	49,50	49,50	49,50	49,50	49,50	49,50	49,50	49,50	49,50	49,50	49,50	49,50	
FGK-Rüsten	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	
FK-Rüsten	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	20%
FEK-Daten	76,50	76,50	76,50	76,50	76,50	76,50	76,50	76,50	76,50	76,50	76,50	76,50	
FGK-Daten	15,30	15,30	15,30	15,30	15,30	15,30	15,30	15,30	15,30	15,30	15,30	15,30	
FK-Daten	91,80	91,80	91,80	91,80	91,80	91,80	91,80	91,80	91,80	91,80	91,80	91,80	20%
FEK-Postprocess	229,50	229,50	229,50	229,50	229,50	229,50	229,50	229,50	229,50	229,50	229,50	229,50	
FGK-Postprocess	34,43	34,43	34,43	34,43	34,43	34,43	34,43	34,43	34,43	34,43	34,43	34,43	
FK-Postprocess	263,93	263,93	263,93	263,93	263,93	263,93	263,93	263,93	263,93	263,93	263,93	263,93	15%
Sondereinzelkosten	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fertigungskosten	727 €	780 €	952 €	1.206 €	790 €	903 €	1.115 €	1.479 €	847 €	939 €	1.091 €	1.384 €	
Herstellkosten	929 €	982 €	1.154 €	1.408 €	992 €	1.105 €	1.318 €	1.681 €	1.049 €	1.141 €	1.293 €	1.586 €	
Steigerung		6%	24%	52%		11%	33%	69%		9%	23%	51%	
Baufaufträge & Bauteile p.a.													
Maschinenstarts/ Jahr	253	216	147	99	210	162	112	74	183	150	116	81	
Bauteile/ Jahr [Tsd.]	58,19	49,68	33,81	22,77	48,3	37,26	25,76	17,02	42,09	34,5	26,68	18,63	
Differenz		↓15%	↓42%	↓61%		↓23%	↓47%	↓65%		↓18%	↓37%	↓56%	

Tabelle 32: Bauteilabhängige Prozesszeiten – Teil 2

	EOS												Aufschlag
	W1	W2	W3	W4	W1-45	W2-45	W3-45	W4-45	Z1	Z2	Z3	Z4	
Generieren [h]	24,30	24,66	25,73	28,16	25,76	27,30	30,00	35,60	29,05	31,27	33,24	38,63	
Aufheizen	0,50	0,50	0,50	0,50	1,50	2,50	3,50	4,50	5,50	6,50	7,50	8,50	
Belichten	6,02	6,27	7,04	7,99	6,38	6,53	7,47	10,64	5,90	6,28	7,36	10,56	
Beschichten	17,78	17,90	18,18	19,68	17,87	18,27	19,03	20,45	17,65	18,48	18,38	19,57	
Abkühlen [h]	24,30	24,66	25,73	28,16	25,76	27,30	30,00	35,60	29,05	31,27	33,24	38,63	
Abkühlen intern	10,00	10,00	10,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00	
Abkühlen extern	14,30	14,66	15,73	18,16	14,76	15,30	17,00	21,60	14,05	15,27	16,24	20,63	
Nachbearbeitung [h]	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	
Baujob Entnahme	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	
Bauteile Entpacken	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
Strahlen/ Bauteil	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	
Waschen/ Bauteil	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Sonstige Schritte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Gesamtdauer [h]	54,47	55,20	57,32	62,20	57,38	60,48	65,86	77,06	63,97	68,40	72,35	83,12	
Kostenart	W1	W2	W3	W4	W1-45	W2-45	W3-45	W4-45	Z1	Z2	Z3	Z4	
MEK	49,73	49,73	49,73	49,73	49,73	49,73	49,73	49,73	49,73	49,73	49,73	49,73	
MGK	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	9,95	
Materialkosten	59,68	20%											
FEK-Anlage	249,08	251,72	259,43	277,13	266,90	285,41	312,23	360,14	319,87	343,22	364,84	411,20	
FGK-Anlage	24,91	25,17	25,94	27,71	26,69	28,54	31,22	36,01	31,99	34,32	36,48	41,12	
FK-Anlage	273,99	276,89	285,38	304,84	293,59	313,95	343,45	396,15	351,86	377,54	401,32	452,32	10%
FEK-Rüsten	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	
FGK-Rüsten	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	
FK-Rüsten	27,00	20%											
FEK-Daten	68,00	68,00	68,00	68,00	68,00	68,00	68,00	68,00	68,00	68,00	68,00	68,00	
FGK-Daten	13,60	13,60	13,60	13,60	13,60	13,60	13,60	13,60	13,60	13,60	13,60	13,60	
FK-Daten	81,60	20%											
FEK-Postprocess	68,40	68,40	68,40	68,40	68,40	68,40	68,40	68,40	68,40	68,40	68,40	68,40	
FGK-Postprocess	10,26	10,26	10,26	10,26	10,26	10,26	10,26	10,26	10,26	10,26	10,26	10,26	
FK-Postprocess	78,66	15%											
Sondereinzelkosten	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fertigungskosten	461 €	464 €	473 €	492 €	481 €	501 €	531 €	583 €	539 €	565 €	589 €	640 €	
Herstellkosten	521 €	524 €	532 €	552 €	541 €	561 €	590 €	643 €	599 €	624 €	648 €	699 €	
Steigerung		1%	2%	6%		4%	9%	19%		4%	8%	17%	
Maschinenstarts/ Jahr	196	194	188	176	183	171	156	135	152	142	133	118	
Bauteile/ Jahr [Tsd.]	10,976	10,864	10,528	9,856	10,248	9,576	8,736	7,56	8,512	7,952	7,448	6,608	
Differenz		↓1%	↓4%	↓10%		↓7%	↓15%	↓26%		↓7%	↓13%	↓22%	

A.2 Tabellen

a. Maschinenparameter

In Tabelle 33 erfolgt hierzu eine Übersicht der verwendeten Bearbeitungsparameter für die SLS-Anlagen EOS Formiga P100 sowie Farsoon HT403P und die Materialien PA2200, PEBA2301, TPU.

Tabelle 33: Übersicht der verwendeten Bearbeitungsparameter

Material Parameter	EOS Formiga P100			Farsoon HT403P			
	PA2200 (PA12)	PEBA (TPE)	TPU	P(1.1) MK	P(1.2) OK	P(2.1) MK	P(2.2) OK
Contour							
Speed [mm/s]:	N/A	N/A	N/A	3.810	-	3.810	-
Power [W]:	N/A	N/A	N/A	12,5	-	15	-
Scancount	1	2	1	2		2	
Füllung							
Scandistance [mm]	0,25	0,25	0,18	0,1	0,1	0,2	0,2
Speed [mm/s]	N/A	N/A	N/A	15.240	15.240	15.240	15.240
Power [W]	N/A	N/A	N/A	30	30	60	60
Scancount	1	1	1	2	2	1	1
KF-Faktor	0,6	0,33	1	0,25	0,25	0,25	0,25
Offset							
Beam [mm]	0,295	0,4	0,17	0,254	0,254	0,254	0,254
Outline [mm]	N/A	N/A	N/A	0,229	0,229	0,229	0,229
Scale Factor							
x	3,431	2,63	2,07	3,4	3,4	3,4	3,4
y	3,370	2,57	2,16	3,4	3,4	3,4	3,4
Z0	2,20	1,40	1,40	-	-	-	-
Z300	1,60	0,6	0,60				
Z	1,9	1,0	1,0	1,3 ^{*32}	1,3	1,3	1,3
Legende: N/A – Die Parameter unterliegen der Verschwiegenheit							

b. Versuchsdaten

In Ergänzung zu den Versuchen aus **Kapitel 4.4** werden nachfolgend die entsprechenden Versuchsdaten aufgeschlüsselt. Zwecks Seitennutzung variiert die Reihenfolge der Ergebnisse.

³²Der Skalierungsfaktor wird im Falle der HT403P mit einem Z-Koeffizienten berechnet, sodass die Skalierung durch die Formel $1,01300-1,18110e-005z$ berechnet wird.

Versuch V1 – Vorversuch (EOS Formiga P100)

Tabelle 34: Versuchsergebnisse Versuch 1 - Vorversuch (EOS Formiga P100)

Bauteil	LK [mm]	LH [mm]	LK/LH	Nscan (Fill)	Nscan (contour)	Nscan (total)	Generierdauer [s]	TBel [s]	TBes [s]
W1	289	3789	0,08	397	8	405	26,58	7,68	18,90
	289	3789	0,08	397	8	423	27,50	7,83	19,67
	289	3789	0,08	397	8	423	27,12	7,72	19,40
W2	415	3668	0,11	573	20	593	27,03	8,00	19,03
	415	3668	0,11	573	20	593	27,87	8,05	19,82
	415	3668	0,11	573	20	593	27,70	8,12	19,58
W3	676	3393	0,20	941	68	1009	29,38	9,25	20,13
	676	3393	0,20	941	68	1005	28,47	8,70	19,77
	676	3393	0,20	941	68	1005	28,85	9,22	19,63
W4	1228	2985	0,41	1726	260	1986	31,70	10,48	21,22
	1228	2985	0,41	1726	260	2171	31,73	10,08	21,65
	1228	2985	0,41	1726	260	2171	32,67	10,25	22,42
W1 - 45	289	3786	0,08	560	8	574	27,15	8,10	19,05
	289	3786	0,08	560	8	730	28,37	8,23	20,13
	289	3786	0,08	560	8	730	27,43	8,28	19,15
W2 - 45	416	3669	0,11	808	20	834	27,83	8,40	19,43
	416	3669	0,11	808	20	943	28,73	8,50	20,23
	416	3669	0,11	808	20	943	28,50	8,30	20,20
W3 - 45	678	3432	0,20	1313	68	1402	30,78	9,63	21,15
	678	3432	0,20	1313	68	1644	30,42	9,53	20,88
	678	3432	0,20	1313	68	1644	30,40	9,65	20,75
W4 - 45	1228	2946	0,42	2365	260	2670	37,48	13,80	23,68
	1228	2946	0,42	2365	260	2725	35,43	13,50	21,93
	1228	2946	0,42	2365	260	2725	36,42	13,75	22,67
Z1	289	2709	0,11	377	168	545	26,18	7,55	18,63
	289	2709	0,11	377	168	557	26,83	7,67	19,17
	289	2709	0,11	377	168	557	27,22	7,55	19,67
Z2	380	2392	0,24	532	344	876	27,98	8,03	19,95
	380	2392	0,24	532	344	899	27,63	8,13	19,50
	380	2392	0,24	532	344	899	28,92	8,07	20,85
	380	2392	0,24	532	344	899	28,00	8,02	19,98
	380	2392	0,24	532	344	899	29,00	8,13	20,87
Z3	575	2604	0,15	854	1368	2256	28,98	9,80	19,18
	575	2604	0,15	854	1368	2256	30,50	9,40	21,10
	575	2604	0,15	854	1368	2222	29,60	9,38	20,22
	575	2604	0,15	854	1368	2256	28,67	9,32	19,35
	575	2604	0,15	854	1368	2256	30,07	9,42	20,65
Z4	1016	1954	0,52	1544	2840	4384	33,85	13,23	20,62
	1016	1954	0,52	1544	2840	4461	35,38	13,40	21,98
	1016	1954	0,52	1544	2840	4461	36,37	14,08	22,28

Versuch V2 – Packdichte

Tabelle 35: Versuchsergebnisse Versuch 2 - Packdichte

Komplexitätsgrad und Material	Generierdauer [h] @ Packdichte %		
	5,38 %	10,77 %	16,15 %
Lvl 1_PA12	14,50	17,77	20,99
Lvl 4_PA12	15,48	19,54	23,72
Lvl 1_PEBA	14,75	18,27	21,78
Lvl 4_PEBA	18,30	25,30	32,09
Lvl 1_TPU	14,07	15,99	18,35
Lvl 4_TPU	14,88	18,47	22,15

Versuch V5 – Volumenreduktion

Tabelle 36: Versuchsdaten Versuch 5 - Volumenreduktion

	Generierdauer [h]	Differenz	Volumen [cm ³]	LF [mm]	LK [mm]	Aufbaurrate [cm ³ /h]	Aufbau spez [cm ³ /h]
PA12	21,48	-	374	14.691.594	208.110	522	17,39
	19,05	-11%	277	10.756.788	280.031	589	14,53
	17,48	-19%	205	7.655.675	468.050	641	11,73
	17,08	-20%	152	5.114.725	964.116	656	8,89
	19,14	-11%	113	2.638.229	2.469.335	586	5,88
PEBA	20,13	-	365	14.261.937	205.369	557	18,11
	18,28	-15%	270	10.370.996	276.703	613	14,77
	17,43	-19%	200	7.309.341	467.200	644	11,48
	18,23	-15%	148	4.661.107	987.774	615	8,13
	22,20	3%	110	2.025.554	2.677.391	505	4,95
TPU	18,13	-	361	21.135.658	210.430	619	19,93
	16,57	-23%	268	15.555.458	281.840	677	16,15
	15,65	-27%	198	11.275.838	466.445	717	12,67
	15,53	-28%	147	7.828.833	930.786	722	9,46
	17,49	-19%	109	4.803.734	2.201.975	641	6,22

Versuch V3 & V4 – Bauteilorientierung und Material/ Bauteilgröße

Tabelle 37: Versuchsdaten Versuch 3 und 4 – Bauteilorientierung & Bauteilgröße – Teil 1

	Stufe	Tges [h]	Füllvektoren [total]	Tges [h]	LK/ Bauteil	BB Vol./ Bauteil	Vol/ Bauteil	LF/ Bauteil	LK/LF	LK/Vol	LK/BB	Füll- vek./ vol.	Füll- vek./ BB vol.
TPU-Ref-40	1	15,99	166.000	15,99	115.440	67.136	29,5	1.515.540	0,08	3.910	1,72	5.622	2,47
	2	16,20	229.200	16,20	166.024	67.136	29,5	1.467.152	0,11	5.623	2,47	7.762	3,41
	3	16,81	374.800	16,81	270.276	67.136	29,5	1.357.048	0,20	9.154	4,03	12.694	5,58
	4	18,47	764.400	18,47	491.076	67.136	29,5	1.194.124	0,41	16.631	7,31	25.888	11,39
TPU-45°-40	1	16,12	226.400	16,12	115.592	134.273	29,5	1.514.552	0,08	3.915	0,86	7.668	1,69
	2	16,47	325.600	16,47	166.402	134.273	29,5	1.467.757	0,11	5.636	1,24	11.027	2,42
	3	17,50	533.600	17,50	271.346	134.273	29,5	1.372.664	0,20	9.190	2,02	18.072	3,97
	4	20,37	964.000	20,37	491.172	134.273	29,5	1.178.396	0,42	16.635	3,66	32.648	7,18
TPU-90°-40	1	15,82	89.700	15,82	72.473	67.136	29,5	1.548.611	0,05	2.454	1,08	3.038	1,34
	2	15,90	123.300	15,90	97.378	67.136	29,5	1.532.129	0,06	3.298	1,45	4.176	1,84
	3	16,08	190.200	16,08	147.497	67.136	29,5	1.472.002	0,10	4.995	2,20	6.442	2,83
	4	16,57	323.700	16,57	247.534	67.136	29,5	1.371.926	0,18	8.383	3,69	10.963	4,82
TPU-Zyl-40	1	16,02	155.600	16,02	115.486	67.136	29,9	1.083.402	0,11	3.861	1,72	5.203	2,32
	2	16,32	222.000	16,32	152.112	67.136	29,9	956.832	0,16	5.086	2,27	7.423	3,31
	3	17,10	355.200	17,10	230.008	67.136	29,9	1.041.765	0,22	7.690	3,43	11.876	5,29
	4	19,95	648.400	19,95	406.291	67.136	29,9	781.687	0,52	13.585	6,05	21.680	9,66
PA12-Ref-40	1	17,77	116.000	17,77	117.420	69.881	30,4	1.061.428	0,11	3.859	1,68	3.813	1,66
	2	17,97	169.200	17,97	169.568	69.881	30,4	1.006.160	0,17	5.573	2,43	5.561	2,42
	3	18,53	286.800	18,53	279.036	69.881	30,4	868.172	0,32	9.171	3,99	9.426	4,10
	4	19,54	550.800	19,54	518.524	69.881	30,4	620.600	0,84	17.042	7,42	18.103	7,88
PA12-45°-40	1	17,83	163.200	17,83	117.591	139.760	30,4	1.057.508	0,11	3.865	0,84	5.364	1,17
	2	18,14	241.600	18,14	169.998	139.760	30,4	997.828	0,17	5.587	1,22	7.941	1,73
	3	19,07	403.200	19,07	280.954	139.760	30,4	875.758	0,32	9.234	2,01	13.252	2,88
	4	21,67	787.200	21,67	518.284	139.760	30,4	620.829	0,83	17.034	3,71	25.873	5,63
PA12-90°-40	1	17,55	69.800	17,55	73.813	69.881	30,4	1.107.501	0,07	2.426	1,06	2.294	1,00
	2	17,62	93.500	17,62	99.241	69.881	30,4	1.075.268	0,09	3.262	1,42	3.073	1,34
	3	17,75	140.150	17,75	150.640	69.881	30,4	1.018.229	0,15	4.951	2,16	4.606	2,01
	4	18,25	236.000	18,25	250.601	69.881	30,4	929.301	0,27	8.236	3,59	7.756	3,38
PA12-Zyl-40	1	17,79	109.600	17,79	116.312	69.881	30,8	1.107.761	0,10	3.774	1,66	3.556	1,57
	2	18,08	158.000	18,08	153.335	69.881	30,8	1.065.764	0,14	4.975	2,19	5.127	2,26
	3	18,73	261.600	18,73	231.901	69.881	30,8	981.115	0,24	7.525	3,32	8.488	3,74
	4	21,33	474.000	21,33	409.848	69.881	30,8	799.475	0,51	13.299	5,86	15.380	6,78

Tabelle 38: Versuchsdaten Versuch 3 und 4 – Bauteilorientierung & Bauteilgröße – Teil 2

	Stufe	Tges [h]	Füllvektoren [total]	Tges [h]	LK/ Bauteil	BB Vol./ Bauteil	Vol/ Bauteil	LF/ Bauteil	LK/LF	LK/Vol	LK/BB	Füll-vek./ vol.	Füll-vek./ BB vol.
PA12-Ref-50	1	17,03	180.500	17,03	189.375	136.486	59,6	2.298.976	0,08	3.175	1,39	3.027	1,32
	2	17,17	263.500	17,17	272.810	136.486	59,6	2.210.492	0,12	4.574	2,00	4.418	1,93
	3	17,62	441.500	17,62	446.115	136.486	59,6	1.988.249	0,22	7.480	3,27	7.403	3,23
	4	18,53	842.000	18,53	818.388	136.486	59,6	1.613.658	0,51	13.722	6,00	14.118	6,17
PA12-45°-50	1	17,09	256.000	17,09	189.648	272.969	59,6	2.280.717	0,08	3.180	0,69	4.292	0,94
	2	17,35	375.000	17,35	273.755	272.969	59,6	2.184.501	0,13	4.590	1,00	6.288	1,37
	3	18,02	628.000	18,02	448.445	272.969	59,6	1.988.734	0,23	7.519	1,64	10.530	2,30
	4	19,90	1.182.000	19,90	827.833	272.969	59,6	1.583.847	0,52	13.881	3,03	19.819	4,33
PA12-90°-50	1	16,90	109.750	16,90	115.154	136.486	59,6	2.218.179	0,05	1.931	0,84	1.840	0,80
	2	16,97	147.063	16,97	154.723	136.486	59,6	2.175.203	0,07	2.594	1,13	2.466	1,08
	3	17,08	222.063	17,08	233.917	136.486	59,6	2.083.147	0,11	3.922	1,71	3.723	1,63
	4	17,20	371.349	17,20	392.305	136.486	59,6	1.908.327	0,21	6.578	2,87	6.227	2,72
PA12-Zyl-50	1	17,10	171.500	17,10	194.429	136.486	63,6	2.369.382	0,08	3.056	1,42	2.696	1,26
	2	17,30	245.500	17,30	253.379	136.486	63,6	2.303.115	0,11	3.983	1,86	3.859	1,80
	3	17,88	404.000	17,88	376.837	136.486	63,6	2.164.865	0,17	5.923	2,76	6.350	2,96
	4	20,07	753.000	20,07	649.324	136.486	63,6	1.879.686	0,35	10.206	4,76	11.836	5,52
PEBA-Ref-40	1	18,27	115.200	18,27	234.220	67.775	29,8	993.203	0,24	7.858	3,46	3.865	1,70
	2	19,39	169.600	19,39	338.988	67.775	29,8	901.989	0,38	11.372	5,00	5.690	2,50
	3	21,65	288.000	21,65	560.887	67.775	29,8	746.856	0,75	18.817	8,28	9.662	4,25
	4	-	-	-	1.054.240	67.775	29,8	390.716	2,70	35.368	15,55	-	-
PEBA-45°-40	1	18,37	162.400	18,37	234.825	135.551	29,8	996.311	0,24	7.878	1,73	5.448	1,20
	2	19,52	242.000	19,52	340.677	135.551	29,8	915.058	0,37	11.429	2,51	8.119	1,79
	3	22,19	411.600	22,19	566.381	135.551	29,8	747.630	0,76	19.001	4,18	13.808	3,04
	4	-	-	-	1.054.784	135.551	29,8	392.939	2,68	35.386	7,78	-	-
PEBA-90°-40	1	17,42	68.400	17,42	147.694	67.775	29,8	1.056.139	0,14	4.955	2,18	2.295	1,01
	2	17,83	91.500	17,83	198.609	67.775	29,8	1.030.518	0,19	6.663	2,93	3.070	1,35
	3	18,68	137.550	18,68	301.082	67.775	29,8	946.750	0,32	10.101	4,44	4.615	2,03
	4	-	-	-	505.602	67.775	29,8	795.271	0,64	16.962	7,46	-	-
PEBA-Zyl-40	1	17,89	109.200	17,89	245.046	67.775	30,2	1.058.084	0,23	8.116	3,62	3.617	1,61
	2	18,73	158.000	18,73	319.677	67.775	30,2	1.001.256	0,32	10.588	4,72	5.233	2,33
	3	20,65	255.200	20,65	480.357	67.775	30,2	882.838	0,54	15.910	7,09	8.452	3,77
	4	26,49	423.600	26,49	852.150	67.775	30,2	631.288	1,35	28.224	12,57	14.030	6,25

Versuch V6 – Vorversuch (Farsoon HT403P)**Tabelle 39: Versuchsdaten Versuch 6 – Vorversuch (Farsoon HT403P)**

	LK [mm]	LF [mm]	LK/LF	Nscan (Fill)	Nscan (contour)	Nscan (total)	Generier- dauer [s]	TBes [s]	TBes [s]
W1	293,08	3354,4	0,09	362	7	369	20,00	13,97	6,03
	293,08	3354,4	0,09	362	7	369	20,15	14,02	6,13
	293,08	3354,4	0,09	362	7	369	20,28	14,10	6,18
W2	422,36	3210,5	0,13	525	19	544	24,20	17,65	6,55
	422,36	3210,5	0,13	525	19	544	24,17	17,62	6,55
	422,36	3210,5	0,13	525	19	544	24,20	17,72	6,48
W3	691,14	2885,8	0,24	860	71	931	37,48	30,27	7,22
	691,14	2885,8	0,24	860	71	931	37,32	30,33	6,98
	691,14	2885,8	0,24	860	71	931	37,30	30,28	7,02
W4	1269,42	2211,6	0,57	1612	246	1858	56,90	48,33	8,57
	1269,42	2211,6	0,57	1612	246	1858	56,90	48,72	8,18
	1269,42	2211,6	0,57	1612	246	1858	56,72	48,63	8,08
W1 - 45	293,56	3375,1	0,09	511	14	525	23,20	16,88	6,32
	293,56	3375,1	0,09	511	14	525	23,10	16,88	6,22
	293,56	3375,1	0,09	511	14	525	23,20	16,98	6,22
W2 - 45	424,27	3214,2	0,13	739	33	772	30,07	23,28	6,78
	424,27	3214,2	0,13	739	33	772	30,02	23,20	6,82
	424,27	3214,2	0,13	739	33	772	29,85	23,02	6,83
W3 - 45	696,92	2886	0,24	1206	142	1348	44,45	36,98	7,47
	696,92	2886	0,24	1206	142	1348	44,43	36,85	7,58
	696,92	2886	0,24	1206	142	1348	44,55	37,07	7,48
W4 - 45	1274,06	2206,2	0,58	2207	525	2732	70,40	60,85	9,55
	1274,06	2206,2	0,58	2207	525	2732	70,73	61,38	9,35
	1274,06	2206,2	0,58	2207	525	2732	70,38	60,87	9,52
Z1	274,69	3517,9	0,08	343	296	639	20,32	13,93	6,38
	274,69	3517,9	0,08	343	296	639	20,38	13,93	6,45
	274,69	3517,9	0,08	343	296	639	20,13	13,92	6,22
Z2	365,2	3404,6	0,11	487	696	1183	25,38	18,95	6,43
	365,2	3404,6	0,11	487	696	1183	25,65	18,95	6,70
	365,2	3404,6	0,11	487	696	1183	25,62	18,90	6,72
Z3	555,74	3174,7	0,18	792	1230	2022	35,35	28,03	7,32
	555,74	3174,7	0,18	792	1230	2022	35,52	28,10	7,42
	555,74	3174,7	0,18	792	1230	2022	35,43	28,07	7,37
Z4	980,86	2693,5	0,36	1460	2604	4064	55,98	46,63	9,35
	980,86	2693,5	0,36	1460	2604	4064	56,12	46,78	9,33
	980,86	2693,5	0,36	1460	2604	4064	56,05	46,72	9,33

Versuch V7 – Material und Prozessparameter

Tabelle 40: Versuchsdaten Versuch 7 – Material und Prozessparameter

		Dauer Belichtung [s]	Länge Kontur [mm]	Länge Füllung [mm]	LK/LF	Füllvektoren	Konturvektoren	Vektoren gesamt			Dauer Belichtung [s]	Länge Kontur [mm]	Länge Füllung [mm]	LK/LF	Füllvektoren	Konturvektoren	Vektoren gesamt
1x60W, 1x15W	Q1	0,58	293	3354	0,09	361	8	369	2x30W, 2x12,5W	Q1	2,22	293	6743	0,04	1446	10	1456
	Q1	0,62	293	3354	0,09	361	8	369		Q1	2,22	293	6743	0,04	1446	10	1456
	Q1	0,63	293	3354	0,09	361	8	369		Q1	2,23	293	6743	0,04	1446	10	1456
	Q1	0,62	293	3354	0,09	361	8	369		Q1	2,20	293	6743	0,04	1446	10	1456
	Q2	0,75	422	3210	0,13	523	21	544		Q2	2,83	422	6426	0,07	2094	42	2136
	Q2	0,75	422	3210	0,13	523	21	544		Q2	2,85	422	6426	0,07	2094	42	2136
	Q2	0,77	422	3210	0,13	523	21	544		Q2	2,78	422	6426	0,07	2094	42	2136
	Q2	0,78	422	3210	0,13	523	21	544		Q2	2,82	422	6426	0,07	2094	42	2136
	Q3	1,35	691	2886	0,24	859	72	931		Q3	4,42	691	5792	0,12	3464	112	3576
	Q3	1,37	691	2886	0,24	859	72	931		Q3	4,75	691	5792	0,12	3464	112	3576
	Q3	1,35	691	2886	0,24	859	72	931		Q3	4,80	691	5792	0,12	3464	112	3576
	Q3	1,32	691	2886	0,24	859	72	931		Q3	4,83	691	5792	0,12	3464	112	3576
	Q4	2,08	1269	2212	0,57	1603	255	1858		Q4	7,53	1269	4412	0,29	6430	456	6886
	Q4	1,87	1269	2212	0,57	1603	255	1858		Q4	7,53	1269	4412	0,29	6430	456	6886
	Q4	2,13	1269	2212	0,57	1603	255	1858		Q4	7,57	1269	4412	0,29	6430	456	6886
	Q4	2,03	1269	2212	0,57	1603	255	1858		Q4	7,57	1269	4412	0,29	6430	456	6886
	Z1	0,62	275	3518	0,08	343	296	639		Z1	2,23	275	7036	0,04	1372	552	1924
	Z1	0,60	275	3518	0,08	343	296	639		Z1	2,25	275	7036	0,04	1372	552	1924
	Z1	0,53	275	3518	0,08	343	296	639		Z1	2,53	275	7036	0,04	1372	552	1924
	Z1	0,65	275	3518	0,08	343	296	639		Z1	2,23	275	7036	0,04	1372	552	1924
	Z2	0,83	365	3405	0,11	488	695	1183		Z2	3,03	365	6812	0,05	1948	1252	3200
	Z2	0,80	365	3405	0,11	488	695	1183		Z2	3,07	365	6812	0,05	1948	1252	3200
	Z2	0,80	365	3405	0,11	488	695	1183		Z2	2,67	365	6812	0,05	1948	1252	3200
	Z2	0,83	365	3405	0,11	488	695	1183		Z2	3,08	365	6812	0,05	1948	1252	3200
	Z3	1,20	556	3175	0,18	729	1293	2022		Z3	4,38	556	6352	0,09	3152	2200	5352
	Z3	1,22	556	3175	0,18	729	1293	2022		Z3	4,33	556	6352	0,09	3152	2200	5352
	Z3	1,22	556	3175	0,18	729	1293	2022		Z3	4,42	556	6352	0,09	3152	2200	5352
	Z3	1,20	556	3175	0,18	729	1293	2022		Z3	4,47	556	6352	0,09	3152	2200	5352
Z4	2,03	981	2694	0,36	1451	2613	4064	Z4	7,05	981	5390	0,18	5810	2286	8096		
Z4	2,03	981	2694	0,36	1451	2613	4064	Z4	7,07	981	5390	0,18	5810	2286	8096		
Z4	1,98	981	2694	0,36	1451	2613	4064	Z4	7,03	981	5390	0,18	5810	2286	8096		
Z4	2,03	981	2694	0,36	1451	2613	4064	Z4	7,07	981	5390	0,18	5810	2286	8096		

Versuch V8 – Scanvektoren

Tabelle 41: Versuchsdaten Versuch 8 – Scanvektoren/Bearbeitungspfade – Teil 1

2x30W, 2x12,5W						2x30W, 0W					
Dauer [s]	Vektoren gesamt	Füll- vektoren	Kontur- länge [mm]	Fülllänge [mm]	LK/LF	Dauer [s]	Vektoren gesamt	Füll- vektoren	Kontur- länge [mm]	Fülllänge [mm]	LK/LF
0,23	158	150	60	1.123	0,053	0,27	151	151	60	1.138	0,053
0,23	159	150	60	1.123	0,053	0,27	151	151	60	1.138	0,053
0,23	160	150	60	1.123	0,053	0,27	151	151	60	1.138	0,053
0,33	311	279	112	976	0,115	0,34	283	283	113	1.004	0,113
0,33	312	279	112	976	0,115	0,34	283	283	113	1.004	0,113
0,33	313	279	112	976	0,115	0,34	283	283	113	1.004	0,113
0,73	605	477	191	712	0,268	0,63	493	493	197	761	0,259
0,73	606	477	191	712	0,268	0,63	493	493	197	761	0,259
0,73	607	477	191	712	0,268	0,63	493	493	197	761	0,259
0,94	1.142	694	252	341	0,738	0,73	694	694	278	376	0,738
0,94	1.143	694	252	341	0,738	0,73	694	694	278	376	0,738
0,94	1.144	694	252	341	0,738	0,73	694	694	278	376	0,738
1,56	558	550	220	15.116	0,015	1,53	551	551	220	15.171	0,015
1,56	558	550	220	15.116	0,015	1,53	551	551	220	15.171	0,015
1,56	558	550	220	15.116	0,015	1,53	551	551	220	15.171	0,015
2,28	1.111	1079	432	14.563	0,030	2,12	1.083	1083	433	14.671	0,030
2,28	1.111	1079	432	14.563	0,030	2,12	1.083	1083	433	14.671	0,030
2,28	1.111	1079	432	14.563	0,030	2,12	1.083	1083	433	14.671	0,030
3,16	2.205	2077	831	13.487	0,062	2,88	2.093	2093	837	13.695	0,061
3,16	2.205	2077	831	13.487	0,062	2,88	2.093	2093	837	13.695	0,061
3,16	2.205	2077	831	13.487	0,062	2,88	2.093	2093	837	13.695	0,061
4,84	4.342	3830	1532	11.459	0,134	4,31	3.894	3894	1558	11.845	0,131
4,84	4.342	3830	1532	11.459	0,134	4,31	3.894	3894	1558	11.845	0,131
4,84	4.342	3830	1532	11.459	0,134	4,31	3.894	3894	1558	11.845	0,131

Tabelle 42: Versuchsdaten Versuch 8 – Scanvektoren/Bearbeitungspfade – Teil 1

		1x60W, 1x15W					1x60W, 0W					
Dauer [s]	Vektoren gesamt	Füll- vektoren	Konturlänge [mm]	Fülllänge [mm]	LK/LF	Dauer [s]	Vektoren gesamt	Füll- vektoren	Konturlänge [mm]	Fülllänge [mm]	LK/LF	
1x8mm	0,08	41	37	30	281	0,107	0,08	38	38	30	281	0,107
1x8mm	0,08	41	37	30	281	0,107	0,08	38	38	30	281	0,107
1x8mm	0,08	41	37	30	281	0,107	0,08	38	38	30	281	0,107
4x4mm	0,11	86	70	56	244	0,229	0,10	71	71	57	244	0,232
4x4mm	0,11	86	70	56	244	0,229	0,10	71	71	57	244	0,232
4x4mm	0,11	86	70	56	244	0,229	0,10	71	71	57	244	0,232
16x2mm	0,22	183	119	95	178	0,536	0,18	123	123	99	178	0,554
16x2mm	0,22	183	119	95	178	0,536	0,18	123	123	100	178	0,560
16x2mm	0,22	183	119	95	178	0,536	0,18	123	123	101	178	0,565
64x1mm	0,33	413	157	126	77	1,626	0,24	173	173	139	77	1,791
64x1mm	0,33	413	157	126	77	1,626	0,24	173	173	140	77	1,804
64x1mm	0,33	413	157	126	77	1,626	0,24	173	173	141	77	1,817
1x28mm	0,45	141	137	110	3.779	0,029	0,44	138	138	110	3.779	0,029
1x28mm	0,45	141	137	110	3.779	0,029	0,44	138	138	110	3.779	0,029
1x28mm	0,45	141	137	110	3.779	0,029	0,44	138	138	110	3.779	0,029
4x14mm	0,62	286	270	216	3.641	0,059	0,53	271	271	217	3.641	0,060
4x14mm	0,62	286	270	216	3.641	0,059	0,53	271	271	217	3.641	0,060
4x14mm	0,62	286	270	216	3.641	0,059	0,53	271	271	217	3.641	0,060
16x7mm	0,92	583	519	415	3.372	0,123	0,77	523	523	419	3.372	0,124
16x7mm	0,92	583	519	415	3.372	0,123	0,77	523	523	419	3.372	0,124
16x7mm	0,92	583	519	415	3.372	0,123	0,77	523	523	419	3.372	0,124
64x3,5mm	1,38	1.213	957	766	2.865	0,267	1,09	973	973	779	2.865	0,272
64x3,5mm	1,38	1.213	957	766	2.865	0,267	1,09	973	973	779	2.865	0,272
64x3,5mm	1,38	1.213	957	766	2.865	0,267	1,09	973	973	779	2.865	0,272

Validierungsbeispiel 1 / Szenario 1 - Kategorisierung

Tabelle 43: Versuchsdaten Szenario 1 – Teil 1

	Bauteil	Bauftrag			Volumen [cm ³]				Fläche [cm ²]		
		Anzahl (N)	Z-höhet [mm]	Pack-dichte	Vol. total (Vt)	Bounding Box Vol. (BB)	Vol. Far-son	V/BB Norm	Fläche (A)	A/BB	A/Vol
1	W1	23	40,40	12,28%	697,48	67,58	5.681	0,46	133,19	0,12	0,01
2	W2	23	40,40	12,28%	697,48	67,58	5.681	0,46	183,99	0,17	0,01
3	W3	23	40,40	12,28%	697,48	67,58	5.681	0,46	285,59	0,26	0,02
4	W4	23	40,40	12,28%	697,48	67,58	5.681	0,46	488,78	0,45	0,03
5	W1-45	23	40,40	12,28%	697,48	135,16	5.681	0,23	133,19	0,06	0,01
6	W2-45	23	40,40	12,28%	697,48	135,16	5.681	0,23	183,99	0,08	0,01
7	W3-45	23	40,40	12,28%	697,48	135,16	5.681	0,23	285,59	0,13	0,02
8	W4-45	23	40,40	12,28%	697,48	135,16	5.681	0,23	488,78	0,22	0,03
9	W1-90	23	40,40	12,28%	697,48	67,58	5.681	0,46	133,19	0,12	0,01
10	W2-90	23	40,40	12,28%	697,48	67,58	5.681	0,46	183,99	0,17	0,01
11	W3-90	23	40,40	12,28%	697,48	67,58	5.681	0,46	285,59	0,26	0,02
12	W4-90	23	40,40	12,28%	697,48	67,58	5.681	0,46	488,78	0,45	0,03
13	Sierpinski_1_112	1	2,03	8,48%	24,15	25,28	285	0,98	250,93	0,61	0,38
14	Sierpinski_2_112	1	2,03	7,53%	21,47	25,28	285	0,87	232,77	0,57	0,40
15	Sierpinski_3_112	1	2,03	6,70%	19,08	25,28	285	0,77	231,47	0,57	0,45
16	Sierpinski_4_112	1	2,03	5,95%	16,96	25,28	285	0,69	269,89	0,66	0,59
17	Sierpinski_5_112	1	2,03	5,29%	15,08	25,28	285	0,61	409,36	1,00	1,00
18	Sierpinski_1_250	1	3,04	10,54%	45,06	46,20	428	1,00	312,67	0,42	0,27
19	Sierpinski_2_250	1	3,04	9,37%	40,05	46,20	428	0,89	284,90	0,38	0,28
20	Sierpinski_3_250	1	3,04	8,33%	35,61	46,20	428	0,79	273,00	0,36	0,30
21	Sierpinski_4_250	1	3,04	7,40%	31,65	46,20	428	0,70	295,73	0,40	0,36
22	Sierpinski_5_250	1	3,04	6,59%	28,17	46,20	428	0,63	404,65	0,54	0,56
23	Clamp top	20	38,91	10,05%	549,82	113,01	5.472	0,25	316,54	0,17	0,02
24	Clamp bottom	16	17,00	10,77%	257,53	48,81	2.391	0,34	127,29	0,16	0,02
25	Absaugung	20	29,38	11,35%	469,07	120,52	4.132	0,20	121,58	0,06	0,01
26	Absaugung AM	20	29,38	9,90%	409,02	120,16	4.132	0,17	112,98	0,06	0,01
27	Absaugung AM mini	63	14,69	7,80%	161,05	14,80	2.066	0,18	28,25	0,12	0,01
28	Halter Gitter	72	46,60	8,38%	549,21	60,35	6.553	0,13	92,88	0,10	0,01
29	Abdeckung I	7	8,10	10,16%	115,71	41,08	1.139	0,41	166,10	0,25	0,06
30	Abdeckung I-X90°	15	19,25	9,16%	247,95	39,91	2.707	0,42	165,32	0,26	0,03
31	Einlage	4	25,31	5,82%	207,29	629,86	3.559	0,08	1146,43	0,11	0,21
32	Löcher	1	1,82	14,92%	38,18	41,75	256	0,94	505,47	0,75	0,51
33	Dreiecke fein	1	1,82	7,62%	19,51	44,47	256	0,45	503,66	0,70	1,00
34	Dreiecke grob	1	1,82	8,02%	20,52	47,43	256	0,44	374,14	0,49	1,00

Tabelle 44: Versuchsdaten Szenario 1 – Teil 2

	Scanlinien				Kontur		Aufbaurrate	Generierdauer	
	Fülllänge (LF) total [mm]	Anzahl Füllvektoren total	Anzahl Füllvektoren Volumen Normiert	LK/LF Normiert	Konturlänge [mm] (LK) total	LK/Vol Normiert	Aufbaurrate Bauteil [cm ³ /h]	Generierdauer [h]	Schichtdauer [s]
1	31.230.217	3.372.030	0,16	0,07	2.695.944	0,14	320	2,181	19,433
2	29.892.816	4.881.060	0,24	0,10	3.900.082	0,20	257	2,717	24,207
3	27.157.839	8.010.900	0,39	0,19	6.405.168	0,33	167	4,186	37,300
4	20.447.185	14.977.318	0,73	0,45	11.802.222	0,61	109	6,377	56,828
5	31.423.640	4.755.308	0,23	0,07	2.696.062	0,14	265	2,637	23,500
6	29.926.577	6.860.498	0,33	0,10	3.900.715	0,20	208	3,359	29,933
7	26.872.682	11.233.890	0,55	0,19	6.407.847	0,33	144	4,837	43,100
8	20.535.269	20.538.674	1,00	0,45	11.811.555	0,61	88	7,900	70,400
9	32.577.876	2.061.076	0,10	0,04	1.655.775	0,09	348	2,005	17,866
10	31.930.870	2.767.268	0,13	0,05	2.221.363	0,11	319	2,183	19,455
11	30.397.346	4.173.833	0,20	0,09	3.352.500	0,17	245	2,842	25,322
12	27.471.295	6.990.436	0,34	0,16	5.614.762	0,29	192	3,633	32,376
13	1.176.463	15.440	0,02	0,01	12.351	0,02	337	0,072	12,734
14	1.033.117	26.160	0,04	0,02	20.863	0,03	314	0,068	12,142
15	931.489	59.636	0,11	0,04	47.292	0,09	279	0,068	12,142
16	698.885	155.654	0,31	0,14	121.339	0,26	185	0,092	16,288
17	330.052	426.583	0,96	1,00	419.394	1,00	81	0,186	32,973
18	2.121.056	19.949	0,02	0,01	15.145	0,01	415	0,109	12,862
19	1.877.562	25.845	0,02	0,01	20.261	0,02	369	0,109	12,862
20	1.644.431	50.131	0,05	0,02	37.874	0,04	327	0,109	12,895
21	1.392.546	118.194	0,13	0,05	91.589	0,10	269	0,118	13,947
22	1.066.940	358.143	0,43	0,21	280.885	0,36	147	0,192	22,697
23	21.279.933	6.121.500	0,38	0,17	4.616.596	0,30	166	3,318	30,697
24	11.064.486	1.695.456	0,22	0,09	1.321.952	0,18	229	1,122	23,764
25	20.795.653	2.203.780	0,16	0,05	1.362.573	0,10	262	1,791	21,940
26	17.382.156	2.952.780	0,25	0,08	1.771.885	0,16	229	1,784	21,855
27	5.966.969	2.327.409	0,49	0,19	1.414.375	0,32	137	1,178	28,856
28	20.265.635	8.341.344	0,52	0,21	5.289.589	0,35	135	4,053	31,313
29	4.803.430	758.513	0,22	0,09	548.011	0,17	242	0,478	21,235
30	9.751.125	2.213.325	0,30	0,14	1.725.375	0,25	210	1,183	22,114
31	6.435.727	4.757.192	0,78	0,37	2.998.454	0,52	83	2,493	35,460
32	1.850.884	143.114	0,13	0,04	93.448	0,09	404	0,095	18,701
33	546.981	521.042	0,91	0,47	328.991	0,61	106	0,185	36,520
34	801.092	287.243	0,48	0,18	178.851	0,31	172	0,119	23,601

Validierungsbeispiel 2 / Szenario 2 - Auswirkungen

Tabelle 45: Versuchsdaten Szenario 2 – Modi: Ohne Kontur (OK), Mit Kontur (MK)

Dreiecke dicht			Dreiecke weit			Löcher		
OK	MK		OK	MK		OK	MK	
TBel [s]	TBel [s]	Volumen [cm ³]	TBel [s]	TBel [s]	Volumen [cm ³]	TBel [s]	TBel [s]	Volumen [cm ³]
35,38	50,02	180108	21,36	24,78	189516	13,72	16,12	357129
33,9	49,44	180108	19,7	26,28	189516	13,68	16,38	357129
33,3	48,58	180108	18,62	24,62	189516	13,42	16,24	357129
32,48	47,2	180108	18,22	23,84	189516	13,58	16,36	357129

Validierungsbeispiel 3 / Szenario 3 - Transfer

Tabelle 46: Versuchsdaten Szenario 3 – Transfer auf das FFF-Verfahren

	Aufbaurrate [cm ³]	Generierdauer [h]	Vol [cm ³]	Konturlänge [mm]	Kontur/Vol	Komplexität
W1-40-45	4,65	6,0	28.000	11200	0,40	0,25
W2-40-45	3,69	7,6	28.000	16000	0,57	0,36
W3-40-45	1,99	14,1	28.000	25600	0,91	0,57
W4-40-45	1,35	20,7	28.000	44800	1,60	1,00
W1-40-90	5,33	5,3	28.000	7000	0,25	0,16
W2-40-90	4,64	6,0	28.000	9400	0,34	0,21
W3-40-90	3,45	8,1	28.000	14200	0,51	0,32
W4-40-90	1,95	14,4	28.000	23800	0,85	0,53
W1-40-Ref	4,35	6,4	28.000	11200	0,40	0,25
W2-40-Ref	3,40	8,2	28.000	16000	0,57	0,36
W3-40-Ref	1,97	14,2	28.000	25600	0,91	0,57
W4-40-Ref	1,30	21,6	28.000	44800	1,60	1,00
W1-50-45	5,26	10,4	54.688	17500,1	0,32	0,20
W2-50-45	4,31	12,7	54.688	25000,1	0,46	0,29
W3-50-45	2,57	21,3	54.688	40000,1	0,73	0,46
W4-50-45	2,10	26,0	54.687	69998,6	1,28	0,80
W1-50-90	5,92	9,2	54.688	10937,5	0,20	0,12
W2-50-90	5,23	10,5	54.688	14687,5	0,27	0,17
W3-50-90	4,11	13,3	54.688	22187,5	0,41	0,25
W4-50-90	2,65	20,6	54.687	37186	0,68	0,42
W1-50-Ref	4,95	11,1	54.688	17500,1	0,32	0,20
W2-50-Ref	3,95	13,8	54.688	25000,1	0,46	0,29
W3-50-Ref	2,56	21,4	54.688	40000,1	0,73	0,46
W4-50-Ref	2,10	26,0	54.687	69998,6	1,28	0,80
Z-40-1	5,11	5,6	28.362	8343,013	0,29	0,18
Z-40-2	3,72	7,6	28.361	11659,979	0,41	0,26
Z-40-3	2,53	11,2	28.361	18293,911	0,65	0,40
Z-40-4	1,66	17,1	28.361	31561,765	1,11	0,70
Z-50-1	5,72	9,7	55.394	13037,79	0,24	0,15
Z-50-2	4,76	11,6	55.392	18220,49	0,33	0,21
Z-50-3	3,00	18,5	55.392	28586,34	0,52	0,32
Z-50-4	2,05	27,0	55.392	49372,7	0,89	0,56

A.3 Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Tabelle 47: Wissenschaftliche Veröffentlichungen

- 1 Häfele, T., Schneberger, J. H., Buchholz, S.; Vielhaber, M.; Griebisch, J.; *Evaluation of productivity in Laser Sintering by measure and assessment of geometrical complexity; Rapid Prototyping Journal; 06.12.2024.*
- 2 Häfele, T., Schneberger, J. H., Buchholz, S., Griebisch, J., Vielhaber, M.; *Geometrical complexity from a technological point of view; In: 56th CIRP Manufacturing Systems Conference, 24.-26.10.2023, Cape Town International Convention Centre-South Africa, Africa.*
- 3 Lehmon, D.; Häfele, T.; Lehser-Pfeffermann, D.; Rückert, F.; Griebisch, J.: *Additive Production of Aerodynamic Add-on Parts for a Racing Car with Load-adapted Lightweight Design Optimization and the Use of Hybrid Material; In: 8th International Conference and Exhibition of Clean Energy (ICCE 2019), August 12-14 2019, Montreal, Canada*
- 4 Lehser-Pfeffermann, D.; Häfele, T.; Lehmon, D.; Hamman, J.; Griebisch, J.; Rückert, F.: *Aerodynamically and structurally optimized rotor of a vertical axis small wind turbine for suburban areas. In: 8th International Conference and Exhibition of Clean Energy (ICCE 2019), August 12-14 2019, Montreal, Canada.*
- 5 Schneberger, J. H., Häfele, T., Kaspar, J., Griebisch, J., Vielhaber, M.: *Hybrid Additive Manufacturing - Requirements Engineering Framework for Process Chain Considerations; In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), 05.-08.2019, Delft, Netherlands, DS 94, Vol. 1(1), 2019, S. 3651-3660.*
- 6 Tobias Häfele, Jan-Henrik Schneberger, Jerome Kaspar, Michael Vielhaber, Jürgen Griebisch: *Hybrid Additive Manufacturing – Process Chain Correlations and Impacts; In: 29th CIRP Design Conference, 08.-10.05.2019, Póvoa de Varzim, Portugal, Procedia CIRP, Vol. 84, 2019, S. 328-334*
- 7 Jerome Kaspar, Stephan Bechtel, Tobias Häfele, Franziska Herter, Jan Schneberger, Dirk Bähre, Jürgen Griebisch, Hans-Georg Herrmann, Michael Vielhaber: *Integrated Additive Product Development for Multi-Material Parts; In:16th Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM), October 2-4, 2018, Lexington, Kentucky, USA, Procedia Manufacturing, Vol. 33, 2019, S. 3-10*
- 8 Daniel Lehser-Pfeffermann, Tobias Häfele, Frank U. Rückert, Jürgen Griebisch, Tobias Müller, Franz Joos: *Location-Optimized Aerodynamic Rotor Design of Small Wind Turbines and Lightweight Implementation Using Additive Hybrid Material; In: Mechanics and Mechanical Engineering International Journal, 2018, June, Vol. 22, Issue 2, Lodz, Poland, S. 437-446, DOI: 10.24425/ather.2022.140922*
- 9 J. Kaspar, T. Häfele, C. Kaldenhoff, J. Griebisch, M. Vielhaber: *Hybrid Additive Design of FRP Components – Fiber-Reinforced Sandwich Structures Based on Selective Laser Sintering Technology; In: 27th CIRP-Design Conference (CIRP Design 2017). 2017. Cranfield, England.*

A.4 Betreute wissenschaftliche Abschluss- und Projektarbeiten im Themenumfeld**Tabelle 48: Betreute wissenschaftliche Abschluss- und Projektarbeiten im Themenumfeld**

- 1 *Alexander Zarth; 2024; Prozessanalyse des SLS-Verfahrens mit Fokus auf die Prozessbeeinflussung durch Feuchtigkeit und die Auswirkung auf mechanischen Eigenschaften von TPU-Sinterbauteilen; Master-Projektarbeit; htw saar; Saarbrücken*
- 2 *Steffen Schwarz; 2023; Einfluss der Bauteilgestalt auf die Nachbearbeitung in der pulverbasierten Additiven Fertigung am Beispiel des Lasersinterns für Kunststoffe; Bachelor-Thesis; htw saar; Saarbrücken*
- 3 *Christopher Gehl; 2023; Sicherheit im 3D-Druck: Auswirkungen des Selektiven Lasersinter Verfahrens auf das Personal; Master-Projektarbeit; htw saar; Saarbrücken*
- 4 *Amine Kartal; 2023; Das selektive Lasersintern von Elastomeren: Einfluss der Maschinenparameterkonfigurationen auf die Bauteilqualität; Bachelor-Thesis; htw saar; Saarbrücken*
- 5 *Sören Buchholz; 2022; Parameterstudie zur Optimierung der Produktivität eines TPU-Pulvers im selektiven Laser-Sintern am Beispiel von gitterstrukturbasierten orthopädischen Einlagen; Master-Thesis; htw saar; Saarbrücken*
- 6 *Dominique Lehmon; 2018; Conceptual approach to digitalizing the value chain in the footwear industry by use of additive manufacturing technologies; Master-Thesis; htw saar; Saarbrücken*
- 7 *Dominique Lehmon; 2018; Auslegung und Gestaltung einer parametrisierten Laufsohle mittels graphischem Algorithmen-Editor; Master-Projektarbeit; htw saar; Saarbrücken*
- 8 *Domenico Cimino; 2018; Characterization of the behavior and properties of onyx printed specimens; Bachelor-Thesis; htw saar; Saarbrücken*
- 9 *Matthias Feld; 2014; Oberflächenbehandlung von Laser-Sinter-Bauteilen aus Polyamid (PA12); Bachelor-Thesis; htw saar; Saarbrücken*

