

# Masterarbeit

David Stachg

**Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur  
simultanen Herleitung von Prozessparametern und  
Konstruktionsregeln im Kontext der sinterbasierten  
Additiven Fertigung**

David Stachg

Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur  
simultanen Herleitung von Prozessparametern und  
Konstruktionsregeln im Kontext der sinterbasierten  
Additiven Fertigung

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung  
im Studiengang *Master of Science Berechnung und Simulation im Maschinenbau*  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jens Telgkamp  
Zweitprüferin: Prof. Dr.-Ing. Jutta Abulawi

Eingereicht am: 26. April 2023

**David Stachg**

**Thema der Arbeit**

Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur simultanen Herleitung von Prozessparametern und Konstruktionsregeln im Kontext der sinterbasierten Additiven Fertigung

**Stichworte**

Additive Fertigung, Sintern, Leichtbau, Fused Filament Fabrication, Fused Granular Fabrication, 3D-Druck, statistische Versuchsplanung, Fused Deposition Modeling, Composite Extrusion Modeling

**Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit ist ein Teil der Vorbereitungen für die Anteile des BMWK-geförderten Projekts *SIGNAL*, die an der HAW Hamburg durchgeführt werden. Im Projekt werden sinterbasierte additive Prozessrouten untersucht, wobei die extrusionsbasierten Prozesse den Schwerpunkt der HAW und somit auch den dieser Arbeit bilden. Es wird eine Strategie entwickelt, mit der Bauteile aus dem Mobilitätssektor identifiziert werden können, deren Fertigung mittels der im Projekt betrachteten Prozessrouten potenzialträchtig ist. Weiterhin wird eine Methodik hergeleitet, die für die simultanen Untersuchungen von Prozessparametern und Konstruktionsregeln im Kontext dieser Prozessrouten angewandt werden kann.

**Title of Thesis**

Development of a methodical approach for the simultaneous derivation of process parameters and design principles in the context of sinter-based Additive Manufacturing

**Keywords**

Additive Manufacturing, Sintering, Lightweight Design, Fused Filament Fabrication, Fused Granular Fabrication, Process Parameters, Design Principles, 3D-Printing, Design of Experiments, Fused Deposition Modeling, Composite Extrusion Modeling

**Abstract**

This work is part of the preparations for the shares of the BMWK-funded project *SIGNAL*, which are carried out at Hamburg UAS. In the project, sinter-based additive manufacturing routes are investigated, with extrusion-based processes being the main focus of the HUAS and thus of this thesis as well. A strategy to identify components from the mobility sector with potential to be manufactured using the process routes investigated within the project is developed. Furthermore, a methodology that can be applied for the simultaneous investigation of process parameters and design principles in the context of these process routes is derived.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>viii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung . . . . .	1
1.2 Methodisches Vorgehen . . . . .	2
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>4</b>
2.1 Pulvermetallurgie . . . . .	4
2.2 Pulverspritzguss . . . . .	7
2.3 Additive Fertigung . . . . .	9
2.3.1 Sinterbasierte additive Prozessrouten . . . . .	11
2.3.2 Fused Filament Fabrication . . . . .	13
2.3.3 Fused Granular Fabrication . . . . .	17
2.4 Konstruktionsregeln . . . . .	18
2.4.1 Fertigungsgerechtes Konstruieren . . . . .	19
2.4.2 Konstruktionsregeln für die Additive Fertigung . . . . .	21
2.5 Potenziale der Additiven Fertigung . . . . .	26
2.6 Identifikation potenzieller Bauteile . . . . .	30
2.7 Statistische Versuchsplanung . . . . .	32
<b>3 Bauteilkategorisierung und -strategie</b>	<b>36</b>
3.1 Besonderheiten der verschiedenen Branchen . . . . .	36
3.1.1 Besonderheiten des Luftfahrt-Sektors . . . . .	36
3.1.2 Besonderheiten des Bahn-Sektors . . . . .	39

3.1.3	Besonderheiten des Automotive-Sektors . . . . .	42
3.2	Identifikation relevanter Anforderungen . . . . .	44
3.3	Bauteilstrategien . . . . .	48
3.3.1	Bauteilstrategie für den Luftfahrt-Sektor . . . . .	48
3.3.2	Bauteilstrategie für den Bahn-Sektor . . . . .	58
3.3.3	Bauteilstrategie für den Automotive-Sektor . . . . .	61
3.4	Aspekte der relevanten Technologien . . . . .	62
3.5	Anwendung der Bauteilstrategie . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Methodik zur Entwicklung von Prozessparametern</b>	<b>70</b>
4.1	Gegenüberstellung bisheriger Arbeiten . . . . .	70
4.2	Herleitung der Methodik . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Methodik zur Entwicklung von Konstruktionsregeln</b>	<b>87</b>
5.1	Gegenüberstellung bisheriger Arbeiten . . . . .	87
5.2	Herleitung der Methodik . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Methodik zur simultanen Entwicklung von Prozessparametern und Konstruktionsregeln</b>	<b>97</b>
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>103</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>105</b>
	<b>Anhang</b>	<b>113</b>
<b>A</b>	<b>Freigegebene Notizen aus persönlichen Gesprächen</b>	<b>114</b>
A.1	Notizen aus dem Gespräch mit S. Grunert . . . . .	114
A.2	Notizen aus dem Gespräch mit H. Schneevogt . . . . .	117
A.3	Notizen aus dem Gespräch mit M. Hillebrecht und Th. Doering . . . . .	121
A.4	Notizen aus dem Gespräch mit S. Riecker . . . . .	124
A.5	Notizen aus dem Gespräch mit J. Schaper . . . . .	126
	Selbstständigkeitserklärung . . . . .	128

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Methodisches Vorgehen im Kontext der Kategorisierung . . . . .	3
1.2	Methodisches Vorgehen im zweiten Themenkomplex . . . . .	3
2.1	Konventionelle Prozesskette der Pulvermetallurgie [52] . . . . .	4
2.2	Zeit-Temperatur-Verlauf für einen Entbinder-Sinter-Prozess [17] . . . . .	9
2.3	Ablauf des MIM-Prozesses in Anlehnung an [52] . . . . .	9
2.4	Prinzip des FFF [86] . . . . .	14
2.5	Auswirkung der Schichtdicke [83] . . . . .	16
2.6	Verschiedene Füllmuster mit verschiedenen Füllichten [83] . . . . .	16
2.7	Prinzip des FGF [69] . . . . .	18
2.8	Hinweise zur Bauteilgestaltung [35] . . . . .	19
2.9	Beispielhafte Konstruktionsregel aus [79] . . . . .	22
2.10	Beispielhafte Konstruktionsregel aus [2] . . . . .	24
2.11	Auszug aus dem Konstruktionskatalog aus [54] . . . . .	25
2.12	Anwendungsbereiche der konventionellen Fertigungsverfahren [52] . . . . .	29
2.13	Potenzialträchtige Anwendungsbereiche der AM nach [6] . . . . .	29
3.1	Luftfahrt-Zielsystem 1: Leichtbau-Potenzial . . . . .	50
3.2	Luftfahrt-Zielsystem 2: Einsatzbedingungen . . . . .	51
3.3	Luftfahrt-Zielsystem 3: AM-Potenzial . . . . .	52
3.4	Luftfahrt-Zielsystem 4: Wirtschaftlichkeit . . . . .	52
3.5	Durchgeführte Nutzwertanalyse mit idealem Ergebnis . . . . .	56
3.6	Erste beispielhaft durchgeführte Nutzwertanalyse . . . . .	57
3.7	Zweite beispielhaft durchgeführte Nutzwertanalyse . . . . .	58
3.8	Bahn-Zielsystem 1: Leichtbau-Potenzial . . . . .	59
3.9	Bahn-Zielsystem 2: Einsatzbedingungen . . . . .	60
3.10	Bahn-Zielsystem 3: AM-Potenzial . . . . .	60
3.11	Bahn-Zielsystem 4: Wirtschaftlichkeit . . . . .	61
3.12	Abzudeckendes Spektrum der Demonstratoren . . . . .	66

3.13	Ablauf der Bauteilkategorisierung . . . . .	68
4.1	Definition des Systems der Prozessroute (System 1) . . . . .	78
4.2	Definition des Systems der Prozessroute (System 2) . . . . .	79
4.3	Ishikawa-Diagramm für die Qualität des FFF-Grünlings . . . . .	81
4.4	Ishikawa-Diagramm für die Qualität des FFF-Sinterteils . . . . .	82
6.1	Methodisches Vorgehen zur simultanen Entwicklung von Prozessparametern und Konstruktionsregeln . . . . .	100
6.2	Exemplarische Struktur bisheriger Konstruktionsregeln . . . . .	101
6.3	Zieldreieck der Produktion in Anlehnung an [42] . . . . .	102
6.4	Exemplarische Struktur für anforderungsbasierte Konstruktionsregeln . . . . .	102

# Tabellenverzeichnis

2.1	Ausgewählte Prozessparameter beim FFF . . . . .	14
2.2	Faktoren und deren Beschaffenheit nach [2] . . . . .	23
2.3	Leichtbaustrategien . . . . .	27
2.4	Bewertungskriterien für die Expertenbewertung [58] . . . . .	31
3.1	Anforderungskategorien nach [10] . . . . .	45
3.2	Relevante Anforderungskategorien in Anlehnung an [10] . . . . .	46
3.3	Ausprägungen hinter den Maßzahlen für die Nutzwertanalyse . . . . .	55
3.4	Aspekte der relevanten Technologien . . . . .	65
4.1	Übersicht verschiedener Methoden zu Parameteruntersuchungen . . . . .	71
4.2	Untersuchte Zielgrößen in Abhängigkeit der Einflussgrößen . . . . .	75
4.3	Zu untersuchende Zielgrößen der jeweiligen Teilprozesse . . . . .	80
4.4	Zusammenfassung der Methodik . . . . .	85
5.1	Übersicht verschiedener Methoden zur Herleitung von Konstruktionsregeln . . . . .	88
5.2	Zusammenfassung der Methodik . . . . .	95

# Abkürzungsverzeichnis

<b>AM</b>	Additive Manufacturing
<b>AMC</b>	Acceptable Means of Compliance
<b>ANOVA</b>	Analysis of Variance
<b>BJ</b>	Binder Jetting
<b>BMBF</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung
<b>BMWK</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
<b>CEM</b>	Composite Extrusion Modeling
<b>CMF</b>	Cold Metal Fusion
<b>DB</b>	Deutsche Bahn AG
<b>DfAM</b>	Design for Additive Manufacturing
<b>DfM</b>	Design for Manufacturing
<b>DfX</b>	Design for X
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>DoE</b>	Design of Experiments
<b>EASA</b>	European Union Aviation Safety Agency
<b>FCS</b>	fatigue critical structure
<b>FDM</b>	Fused Deposition Modeling
<b>FFD</b>	Fused Feedstock Deposition
<b>FFF</b>	Fused Filament Fabrication

<b>FGF</b>	Fused Granular Fabrication
<b>FLM</b>	Fused Lamination Manufacturing
<b>GC</b>	Gelcasting
<b>HAW</b>	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
<b>IATF</b>	International Automotive Task Force
<b>LGP</b>	Liste güteprüfpflichtiger Produkte
<b>MIM</b>	Metal Injection Moulding
<b>MJ</b>	Moldjet
<b>MOGA</b>	Multi-Objective Genetic Algorithm
<b>OEM</b>	Original Equipment Manufacturer
<b>PEM</b>	Pellet Extrusion Modeling
<b>PSE</b>	principal structure element
<b>RM</b>	Rapid Manufacturing
<b>RP</b>	Rapid Prototyping
<b>RT</b>	Rapid Tooling
<b>SLS</b>	Selektives Lasersintern
<b>QLÜ</b>	Qualitätsunabhängige Lieferantenüberwachung
<b>VDA</b>	Verband der Automobilindustrie

# Symbolverzeichnis

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>
$\beta$	Regressionskoeffizient (Wahrer Wert)
$\Delta\mu$	Technologisch relevanter Unterschied (Effekt)
$\varepsilon$	Zufälliger Fehler
$\sigma$	Standardabweichung der Verteilung
$b$	Regressionskoeffizient (Geschätzt)
$g_s$	Stufengewichtung
$g_k$	Knotengewichtung
$m$	Anzahl der Faktorstufenkombinationen eines Versuchsplanes
$n$	Anzahl der Faktorstufen je Faktor
$N$	Versuchsumfang
$p$	Anzahl der Faktoren
$T_s$	Schmelztemperatur
$T_{sint}$	Sintertemperatur
$x$	Wert einer Faktorstufe oder Einflussgröße
$y$	Wahrer Wert der Zielgröße
$\hat{y}$	Schätzwert der Zielgröße

# 1 Einleitung

Der globale Markt für Produkte und Dienstleistungen der Additiven Fertigung wächst stetig. In demselben Zuge nimmt die Industrialisierung der Technologien zu. So verschiebt sich der Anwendungsfokus immer weiter vom ursprünglichen Zweck, dem Prototypenbau, hin zur Fertigung von Einbauteilen. Speziell für Bereiche mit hohen Anforderungen an die Optimierung von Bauteilgewicht und -funktion, wie der Luftfahrt oder Medizintechnik, wird die Additive Fertigung als einer der entscheidenden Innovationstreiber gesehen. Der Verarbeitung von Metallen kommt eine besondere Bedeutung für die Fertigung mechanisch belasteter Komponenten zu. Bisher sind in diesem Kontext vor allem Verfahren etabliert, die Metallpulver verarbeiten. Die mit diesen Verfahren verbundenen Kosten sind jedoch oft ein Hindernis für die serielle Additive Fertigung von Bauteilen. [3, 81]

In den letzten Jahren sind vermehrt Verfahren in den Fokus der Untersuchungen gerückt, in denen nicht der finale Werkstoff für die direkte Fertigung der Bauteile genutzt wird: die sinterbasierten Prozessrouten. Innerhalb dieser Prozessrouten werden Metall-Kunststoff-Gemische in verschiedenen Formen verarbeitet. So erzeugte Bauteile erhalten ihre Form durch den Prozess der Additiven Fertigung, ihre finalen Eigenschaften erlangen sie jedoch erst durch Folgeprozesse. Neben wirtschaftlichen Vorteilen gegenüber etablierten metallverarbeitenden Verfahren, bieten diese Prozessrouten im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren ökologische Potenziale.

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Im Rahmen des BMWK-geförderten Projekts *SIGNAL* sollen ausgewählte sinterbasierte Prozessrouten untersucht werden. Das Projekt wird von einem Forschungskonsortium, bestehend aus sechs Partnern und sieben assoziierten Partnern, durchgeführt. Für die Untersuchungen liegt der Fokus auf der Fertigung von mechanischen Komponenten aus Titan und Aluminium. Die Einsatzbereiche dieser Komponenten sind verschiedene Mobilitätssektoren.

Die Projektinhalte befassen sich unter anderem mit der Entwicklung der Additiven Fertigungsverfahren in diesem Kontext. So sollen geeignete Prozessparameter der jeweiligen Verfahren identifiziert und entsprechende Konstruktionsregeln formuliert werden. Außerdem sollen die Möglichkeiten der verschiedenen Verfahren anhand konkreter Demonstrator-Bauteile analysiert werden. Die HAW Hamburg verantwortet mehrere Arbeitspakete innerhalb des Projekts. Neben der Entwicklung von zwei extrusionsbasierten Technologien, werden unter anderem das Arbeitspaket zur Entwicklung von Konstruktionsregeln für alle im Projekt betrachteten Verfahren, sowie das Arbeitspaket zur Entwicklung einer Bauteilstrategie von der HAW verantwortet. Bei der Vorbereitung der gerade genannten Arbeitspakete setzt diese Masterarbeit an.

Es soll ein Ansatz für eine Bauteilstrategie entwickelt werden. Mithilfe dieser Bauteilstrategie sollen Bauteile der verschiedenen Mobilitätssektoren identifiziert werden, deren Fertigung mittels der im Projekt behandelten Prozessrouten potenzialträchtig ist. Diese Strategie basiert auf der kategorischen Betrachtung der Anwendungen und den damit verbundenen Anforderungen an die Bauteile aus den Mobilitätssektoren.

Es soll weiterführend eine Methodik entwickelt werden, die sich mit der Integration der Entwicklungen von Prozessparametern und Konstruktionsregeln im Kontext der sinterbasierten additiven Fertigung befasst. Durch die Schwerpunktsetzung innerhalb des Projekts beschränkt sich diese Methodik auf die extrusionsbasierten Prozesse.

## 1.2 Methodisches Vorgehen

Als Basis für die Entwicklung der Bauteilstrategie findet eine grundständige Analyse der Rahmenbedingungen der Mobilitätssektoren statt. Für diese Analyse werden Normen und Regelwerke aus dem Luftfahrts-, dem Bahn- und dem Automotive-Sektor betrachtet. Um die praktische Anwendbarkeit der Bauteilstrategie zu stärken, werden Interviews mit Experten der jeweiligen Branchen durchgeführt. Aus den Erkenntnissen werden anschließend die relevanten Bauteilanforderungen identifiziert und die verschiedenen Bauteilstrategien entwickelt. Um ihre potenziell vorhandenen Auswirkungen auf die Bauteilstrategie zu identifizieren, werden die verschiedenen Technologien aus dem SIGNAL-Projekt verglichen. Im letzten Schritt wird eine Methode formuliert, die auf der Bauteilstrategie beruht und mit der passende Demonstrator-Bauteile im Rahmen des Projektes ausgewählt werden können. Dieser methodische Ablauf für die Entwicklung der Bauteilstrategie ist in **Abbildung 1.1** dargestellt.

Für die methodische simultane Entwicklung von Prozessparametern und Konstruktionsregeln werden methodische Untersuchungen im Kontext der Prozessparameter gegenübergestellt und

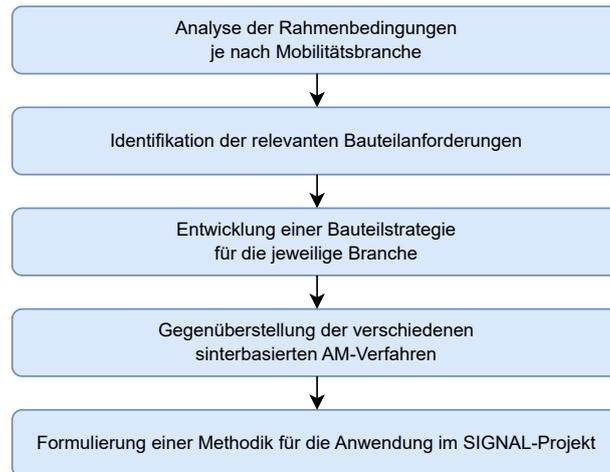


Abbildung 1.1: Methodisches Vorgehen im Kontext der Kategorisierung

anschließend auf die Anwendung innerhalb der sinterbasierten Prozessrouten transferiert. Darauf folgend werden analog dazu methodische Untersuchungen im Kontext der Konstruktionsregeln gegenübergestellt und anschließend auf die Anwendung innerhalb der sinterbasierten Prozessrouten transferiert. Die gewonnenen Erkenntnisse werden genutzt, um eine Methode zu formulieren, die der Untersuchung beider Themenbereiche dient. Das methodische Vorgehen ist in **Abbildung 1.2** dargestellt.

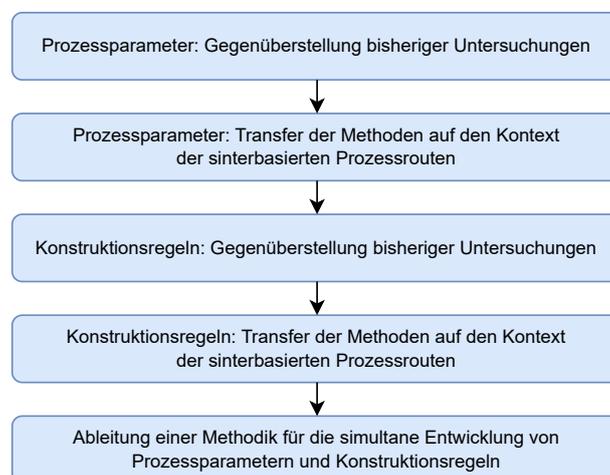


Abbildung 1.2: Methodisches Vorgehen im zweiten Themenkomplex

## 2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird in für diese Arbeit relevante Technologien und Methoden eingeführt. Neben den Technologien selbst wird über deren Potenziale sowie der methodischen Herangehensweise zur Ausnutzung dieser Potenziale informiert.

### 2.1 Pulvermetallurgie

Die Pulvermetallurgie ist ein Bereich der Fertigungstechnik, in dem es um die Herstellung und Weiterverarbeitung von (metallischem) Pulver geht. So erhalten Bauteile in verschiedenen Prozessschritten ihre Form und ihre mechanischen Eigenschaften. Die Begrifflichkeiten der Pulvermetallurgie sind in [27] definiert. Konventionell besteht die Prozesskette innerhalb der Pulvermetallurgie aus den in **Abbildung 2.1** dargestellten Prozessschritten. [52]

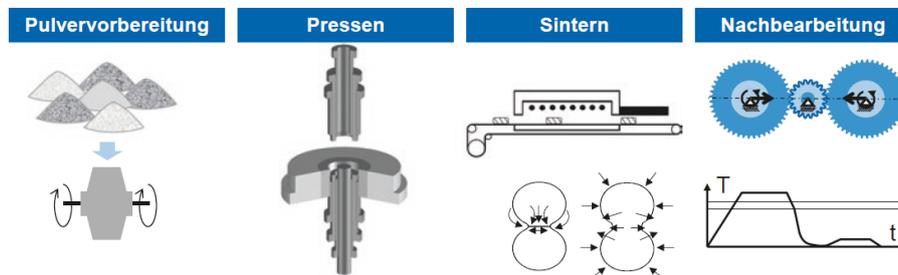


Abbildung 2.1: Konventionelle Prozesskette der Pulvermetallurgie [52]

Die Prozesskette beginnt mit der Herstellung des Pulvers, welches aus einem reinen Werkstoff oder einer Legierung bestehen kann. Nach der Herstellung des Pulvers wird es in die gewünschte Form gepresst. Die Dichte des Materials nimmt durch den Pressvorgang zu. Dies geschieht in der Regel in einem geschlossenen Presswerkzeug bei Raumtemperatur. Das so entstehende Werkstück wird *Grünling* genannt und ist im Vergleich zum Fertigteil, das *Sinterteil* genannt wird, sehr spröde. Es ist zwingend notwendig, dass der Grünling eine für den Weitertransport

zu Folgeprozessen ausreichende Festigkeit besitzt. Der Zusammenhalt des Werkstoffs basiert in diesem Zustand nur auf Adhäsion. [52]

Nach [52] ist das Matrizenpressen in der Pulvermetallurgie das Verfahren, welches am häufigsten für die Formgebung eingesetzt wird. Matrize, Dornen sowie Ober- und Unterstempel bilden das Werkzeug für diesen Prozessschritt. Das Pulver wird für diesen Vorgang in die Kavität der Matrize gefüllt. Da die Dichte des Pulvers durch das Pressen zunimmt, muss das Volumen des zugeführten Materials größer sein als das der gepressten Geometrie. Der sogenannte *Füllfaktor* ergibt sich aus dem Verhältnis von Zieldichte und Füll-dichte:

$$Füllfaktor = \frac{Füll-dichte}{Fertigdichte} \quad (2.1)$$

Dieser Füllfaktor wird verwendet, um die Materialmenge zu berechnen, die dem Prozess je zu fertigendem Bauteil zuzuführen ist. Die Gleichung

$$Füllhöhe = Füllfaktor \cdot Fertighöhe \quad (2.2)$$

muss auf alle Absätze der Grünlingsgeometrie angewandt werden. Die Füllhöhen sämtlicher Absätze bilden dann aufsummiert die Gesamtfüllhöhe für die Matrize. Nach dem Befüllen beginnt der Pressvorgang. Der Druck auf das Material wird kraftgesteuert durch eine oder mehrere Werkzeugkomponenten aufgebracht. Der aufzubringende Pressdruck hängt von der Pressdichte des Grünlings ab. [37, 52]

Nach der Herstellung des Grünlings geht es in der Prozesskette weiter mit dem Sintern. Hierbei wird die Festigkeit des Bauteils durch Wärmebehandlung gesteigert. Das Bauteil wird auf eine Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur aufgeheizt, bei der Diffusionsvorgänge im Material einen festen Gefügeverband erzeugen. Diese Diffusionsvorgänge werden durch die Steuerung der Temperatur und des Drucks kontrolliert herbeigeführt. Die Diffusion bezeichnet Platzwechsel der Atome oder der Moleküle in Stoffen aller Art. Dies gilt sowohl für Festkörper als auch für kristalline Körper. [9]

Durch die Diffusion wachsen die Bestandteile des Werkstoffes im Grünling durch verschiedene Mechanismen zusammen. Die Dichte erhöht sich und die Poren verrunden. Außerdem erfährt der Grünling eine Volumenabnahme. Diese hängt maßgeblich von Faktoren wie der Art des Werkstoffes, der Dichte des Grünlings, der Temperatur des Sintervorgangs sowie der Zeit des Sintervorgangs ab. In [37] wird die Sintertemperatur  $T_{sint}$  mit

$$T_{sint} \approx \frac{2}{3} \cdot T_s \text{ bis } \frac{3}{4} \cdot T_s \quad (2.3)$$

bezieht, wobei  $T_s$  die Schmelztemperatur des Werkstoffes ist. Liegt ein Pulvergemisch vor, ist die höchste Schmelztemperatur innerhalb des Gemisches anzusetzen. Nach [52] können sich Pulver, die aus demselben Werkstoff bestehen, aber unterschiedlich hergestellt worden sind, unter denselben Sinterbedingungen unterschiedliche Eigenschaften entwickeln. Beispielförmig werden hier die Porosität des Materials sowie Festigkeitswerte genannt. Das hängt damit zusammen, dass auch die Form der Berührstellen des Pulvers einen Einfluss auf den Prozess besitzt.

Der Sinterprozess besteht aus verschiedenen Phasen. Er beginnt mit dem Kontaktwachstum. Es werden Sinterbrücken gebildet. Bei Eisenpulver entsprechen diese Vorgänge dem Fließen und der Oberflächendiffusion, die an den Berührstellen stattfindet. Es folgt die sukzessive Schließung der Poren und somit die Abnahme der Porosität des Werkstückes. Das Bauteil erfährt Schrumpfung. Beim Sintern von Eisenpulver wäre dieser Vorgang die Gitterdiffusion. Durch Platzwechsel im Inneren der Pulverteilchen bilden sich neue Kristalle. In der Endphase des Sinterprozesses werden die Poren, die nun in runder, feiner Form vorliegen, weiter kontinuierlich geschlossen. [37, 52]

[76] bietet für die Beschreibung des Sintervorgangs eine weitere Perspektive: die geometrische Gefügemodellierung der Schwindung. So ist eine geometrische Einteilung des Sintervorgangs in drei Phasen möglich. Die erste Phase stellt das Sinteranfangsstadium dar. In diesem Stadium nehmen Kontaktwachstum sowie Zentrumsannäherung und in diesem Zuge auch die Bindefestigkeit innerhalb des Pulvergemisches zu. Die Pulverteilchen sind nach wie vor als Pulverteilchen erkennbar, die relative Dichte des Systems steigt jedoch um 10 %. Die zweite Phase ist das Sinterzwischenstadium, in dem die relative Dichte auf bis zu 95 % zunimmt. In diesem Stadium sind die einzelnen Pulverteilchen nicht mehr als solche erkennbar. Es entstehen Festphasen, die jedoch weiterhin von Porenphasen, also Lufteinschlüssen, durchdrungen sind. Als letztes Stadium wird in [76] das Sinterspätstadium genannt, in dem die einzelnen, isolierten Poren in eine polykristalline Matrix eingebettet sind. Die hier stattfindende Verdichtung ist gering und verläuft träge. Der Wert der Dichte konvergiert mit einem Wert, der unterhalb der theoretisch erreichbaren Dichte liegt.

Für Sintervorgänge ist die Form, in der der Werkstoff vorliegt, von grundlegender Bedeutung. Er sollte also keine Zusammensetzung mehrerer Festkörper sein, sondern eine große spezifische Oberfläche aufweisen. Diese spezifische Oberfläche bezieht sich auf die Masse des betrachteten Volumens. Eine große spezifische Oberfläche wird durch einen pulverförmigen Werkstoff erreicht. Durch diese große Oberfläche weisen die einzelnen Bestandteile des dispersen Körpers eine hohe Oberflächenenergie und eine hohe Oberflächenspannung auf. Diese Oberflächenspannung ist die Basis für die Diffusionsvorgänge während des Sinterns. [76]

## 2.2 Pulverspritzguss

Die Technologie des Pulverspritzgießens kombiniert Vorgänge aus dem Kunststoffspritzgießen und der Pulvermetallurgie. Der Anteil der Pulvermetallurgie ist hier der Prozess des Sinterns. Das Sintern erfolgt im Anschluss an den formgebenden Spritzguss-Prozess und modifiziert die mechanischen Eigenschaften des Bauteils entsprechend den Anforderungen. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, erfährt das Bauteil während des Sinterns eine Schrumpfung. Die Schrumpfung sollte als Nebeneffekt bei der Dimensionierung der Grünteile berücksichtigt werden. Das Fertigteil, also das Bauteil nach dem Sintervorgang, sollte endkonturnah sein und möglichst geringe Nachbearbeitung erfahren müssen, um die Gestaltungsfreiheiten des Verfahrens ausnutzen zu können. Die Schrumpfvorgänge, die durch das Sintern ausgelöst werden, können durch empirische Untersuchungen oder Simulationen im Vorfeld betrachtet werden. [52]

Im Unterschied zur reinen Pulvermetallurgie wird beim Pulverspritzguss nicht nur der Werkstoff verarbeitet, aus dem das Fertigteil besteht. Das verarbeitete Material, *Feedstock* genannt, besteht zudem aus Kunststoff-Zusätzen. Diese Zusätze werden in diesem Kontext als *Binder* bezeichnet. Der Feedstock basiert entweder auf Metall- oder Keramikpulver. Der Fokus in dieser Arbeit liegt also auf dem sogenannten *Metallspritzguss*, welches im Englischen als *Metal Injection Moulding (MIM)* bezeichnet wird. [52]

Der Fertigungsprozess beginnt mit der Aufbereitung des Feedstocks. Dafür werden die einzelnen Bestandteile, also metallische Anteile und die Anteile des Binders, vermischt und homogenisiert. Dies kann auch in mehreren Stufen erfolgen. Notwendig ist ein mehrstufiges Vorgehen, wenn das Metallpulver kein reiner Werkstoff, sondern eine Legierung ist. In dem Fall wird erst das Legierungspulver angemischt, bevor die Binderanteile eingebracht werden. Die Homogenisierung wird durch Temperatureinbringung in den Mischprozess ermöglicht. [52]

Für die erfolgreiche Prozessdurchführung ist die Zusammensetzung des Feedstocks ausschlaggebend. Der genutzte Binder ist generell kein einzelnes Polymer, sondern ein System aus verschiedenen Polymeren, die dem Feedstock verschiedene Eigenschaften zukommen lassen. Das *Basis-Polymer* ist in der Regel ein niedrig-viskoses Material. Dadurch kommt es zu einer hohen Fließfähigkeit des Materials während der Formgebung. Diese wird durch die Prozesstemperaturen ermöglicht. Außerdem ist die Löslichkeit des Basis-Polymers in einem geeigneten Lösungsmittel wichtig, damit eine Teilentbinderung auf chemischer Basis stattfinden kann. Neben dem Basis-Polymer gibt es das sogenannte *Backbone-Polymer*, welches die Stabilität des Bauteils bis zum Sintern gewährleistet. Das Backbone-Polymer sorgt also für den Stoffzusammenhalt innerhalb des Bauteils nach dem Entfernen des Basis-Polymers. Es wird mittels thermischer Entbinderung aus dem Bauteil entfernt. Eine weitere wichtige Komponente in dem Bindersystem bilden

oberflächenaktive Substanzen. Durch diese ist eine vollständige Benetzung der Partikeloberflächen gewährleistet. Zudem sind sie die Basis für eine homogene Verteilung der Pulverteilchen in dem Feedstock. [63]

Für die Granulierung des Materials ist ein gängiger Weg, dass die Pulvermischung im plastifizierten Zustand stranggespresst wird. Im stranggepressten Zustand wird das Material dann granuliert, also in gleichmäßige Stücke zerteilt. Diese Stücke bestehen aus homogenen Materialmischungen und besitzen ein größeres Volumen als die ursprünglichen Pulverteilchen. Die Größe dieser Granulate ist variabel und unterscheidet sich in Abhängigkeit des Werkstoffs sowie der Prozessanforderungen. [52]

Auf die Granulierung folgt der tatsächliche Vorgang des Spritzgießens. Der Feedstock wird plastifiziert und dem Extruder der Maschine zugeführt. Wie diese Plastifizierung umgesetzt wird, hängt von dem verwendeten Binder und seinen Eigenschaften ab. In dem Extruder wird das Material von einer Schnecke unter Druck in das geschlossene Spritzguss-Werkzeug, welches aus zwei Teilen besteht, gepresst. Um eine vollständige Füllung des Werkzeuges zu gewährleisten, wird nach der Beendigung des Füllvorgangs noch einmal Material nachgepresst. Ist dies geschehen, muss das Bauteil abkühlen. Wenn das Werkstück kühl ist, kann das Werkzeug geöffnet und das Bauteil entnommen werden. Das so entstandene Bauteil ist der Grünling. [52]

Nach dem Spritzgießen gilt es, den Binderanteil aus dem Grünling zu entfernen. Dieser Schritt ist das sogenannte *Entbindern*. Nach [87] birgt der Entbinderungsprozess einige Risiken, wie zum Beispiel Riss- oder Porenbildung. Auch die Deformation des Bauteils gehört zu den Risiken der Entbinderung. Es gibt zwei Arten der Entbinderung: die chemische und die thermische. Eine Kombination dieser Ansätze bietet das Potenzial, die Prozesszeiten des Entbinderns relativ kurz zu gestalten, ohne dabei Qualitätseinbußen zu erleiden. Auch in [52] ist dieser kombinierte, mehrstufige Entbinderprozess beschrieben: Zuerst wird chemisch entbindert. Dadurch wird ein Großteil des Binders aus dem Bauteil entfernt und eine Offenporigkeit des Bauteils stellt sich ein. Im Nachgang wird das Bauteil wärmebehandelt. In diesem Zuge werden diese Reste des Binders durch die thermische Behandlung gasförmig. Der restliche Binder verlässt das Bauteil, das nach der Entbinderung *Braunteil* oder *Bräunling* genannt wird.

Dieses Braunteil wird gesintert, um die mechanischen Eigenschaften des Werkstückes einzustellen. Der Sinterprozess wird durch die Erhöhung der Temperatur angestoßen. Ein beispielhafter Temperaturverlauf für einen Entbinder- und Sinterprozess ist in **Abbildung 2.2** zu sehen. Der Prozess beginnt damit, dass das Bauteil von Raumtemperatur auf die erforderliche Entbinderungstemperatur aufgeheizt wird. Dieses Temperaturniveau wird so lange gehalten, bis der Prozess der Entbinderung abgeschlossen ist. Darauf folgend wird das Bauteil auf Sintertemperatur erwärmt. Dieses Temperaturniveau wird entsprechend den Anforderungen an den Prozess gehalten. Es folgt die Abkühlung des Bauteils.



Abbildung 2.2: Zeit-Temperatur-Verlauf für einen Entbinder-Sinter-Process [17]

Ist der Sintervorgang abgeschlossen, muss das Bauteil den Anforderungen entsprechend nachbearbeitet werden. Dies kann beispielsweise aufgrund von Funktionsflächen nötig sein, deren Maßtoleranzen und Oberflächengüten durch den beschriebenen Prozess nicht erreicht werden. Eine zusammenfassende Übersicht über den Prozess des Metallspritzgusses ist in **Abbildung 2.3** abgebildet.

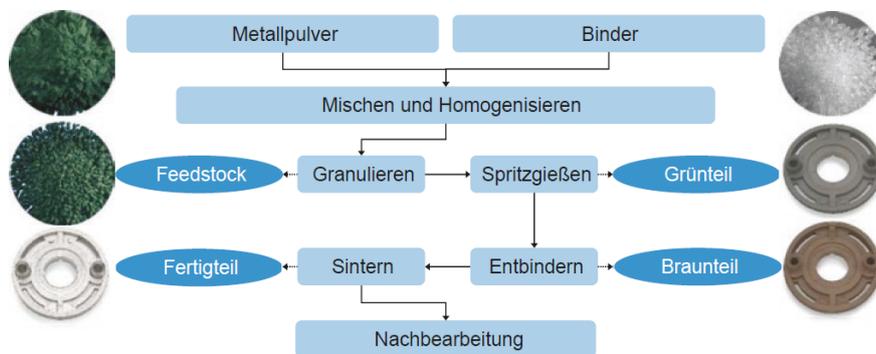


Abbildung 2.3: Ablauf des MIM-Prozesses in Anlehnung an [52]

## 2.3 Additive Fertigung

Diese Arbeit befasst sich mit den Möglichkeiten und Grenzen spezifischer Verfahren der Additiven Fertigung, auch *Additive Manufacturing (AM)* genannt. Verfahren aus diesem Bereich sind

im Vergleich zu anderen industriell genutzten Fertigungsverfahren relativ jung. Als erstes AM-Verfahren wurde 1984 die Stereolithografie patentiert [57].

Der Grundgedanke hinter der AM war die Reduzierung der Entwicklungszeit. Durch kurze Prozesszeiten sollte die Herstellung von Prototypen beschleunigt werden. Aus diesem Grund war der Begriff *Rapid Prototyping (RP)* lange ein Synonym für AM. Seit ihrer Einführung hat sich das Feld der AM-Verfahren jedoch stark weiterentwickelt. Es existieren mehrere Technologien innerhalb dieses Feldes, die auf unterschiedlichen Wirkprinzipien basieren und unterschiedliche Möglichkeiten sowie Verfahrensgrenzen besitzen. Neben der Anwendung von AM im Rahmen von RP sind die Anwendungen im Rahmen des *Rapid Tooling (RT)* sowie des *Rapid Manufacturing (RM)* relevant. Im Rahmen von RT werden (formgebende) Werkzeuge additiv gefertigt, während im Rahmen von RM Einbauteile additiv gefertigt werden. Allen AM-Verfahren ist gemein, dass die Bauteile in aufeinander aufbauenden Schichten hergestellt werden. Durch die dynamische Entwicklung der AM-Technologien und deren Anwendungen im industriellen Umfeld herrscht teilweise Unklarheit über die Begriffe aus diesem Bereich und deren Nutzung. Um kommunikative Probleme zu vermeiden, sind grundlegende Begrifflichkeiten aus dem AM-Kontext in [86] definiert. [57, 50]

Umgangssprachlich gilt *3D-Druck* als Synonym für AM. Im weiten Feld der AM-Technologien ist der 3D-Druck jedoch nur als ein Teilbereich der Additiven Fertigung zu sehen. Dieser Teilbereich besteht aus dem sogenannten *Binder Jetting (BJ)*. Es ist jedoch geläufig, Maschinen aus dem Kontext der AM als (3D-)Drucker zu bezeichnen.

Der generelle Ablauf von AM-Prozessen lässt sich nach [40] unabhängig von der Technologie in acht Schritte unterteilen:

1. Modellierung des Bauteils
2. Konvertierung
3. Datentransfer und Aufbereitung der Randbedingungen
4. Konfiguration der Fertigung
5. Fertigung des Bauteils
6. Entnahme des Bauteils
7. Nachbearbeitung des Bauteils
8. Anwendung

Für den AM-Prozess ist es wichtig, dass die Geometrie des zu fertigenden Bauteils komplett vorliegt. Das bedeutet, dass die Oberfläche des Bauteils vollständig modelliert sein muss. Ob dies durch ein Volumenmodell oder ein Oberflächenmodell abgebildet wird, ist hierbei nicht relevant. Dieses Modell wird dann in ein Format übersetzt, dass von AM-Maschinen verarbeitet werden

kann. Als gängiges Format ist hier das STL-Format zu nennen. Bei dieser Formulierung wird die Bauteiloberfläche aus einer Kombination aus Dreiecken und deren Normalenvektoren dargestellt [39]. Diese Darstellung bietet einige Vorteile, wie zum Beispiel die Möglichkeit, Fehler in der Bauteilgeometrie beziehungsweise -oberfläche effizient zu korrigieren.

Der nächste Prozessschritt wird in [40] explizit *Datentransfer an die Maschine* genannt. An der Maschine soll die Datei genutzt werden, um die tatsächliche Größe des Bauteils sowie die Position und Orientierung des Bauteils im Arbeitsraum der Maschine festzulegen. Der Stand der Technik ist jedoch, diese Arbeiten Maschinen-extern an einem PC-Arbeitsplatz durchzuführen. Dafür wird *Slicer*-Software genutzt, in der das STL-Modell weiterverarbeitet und die Prozessparameter definiert werden.

Bei der Konfiguration wird das Bauteil entsprechend der gewählten Schichtdicke in die einzelnen Schichten "zerschnitten". Auch geometrieunabhängige Parameter, wie zum Beispiel die Druckgeschwindigkeit oder die Extrusionstemperatur, werden hier festgelegt. In diesem Prozessschritt wird aus dem Modell des Bauteils und den gewählten Parametern der Fertigung ein Fertigungsprogramm erzeugt. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil dieses Codes sind die Verfahrensparameter der Düse. Die Struktur dieses Programms gleicht der eines klassischen CNC-Codes und wird entsprechend auch *G-Code* genannt.

Im nächsten Schritt erfolgt die tatsächliche Fertigung durch die Maschine. Dieser Vorgang findet automatisiert auf Basis des vorher generierten G-Codes statt.

Ist das Bauteil gefertigt, muss es aus der Maschine entfernt werden.

In der Regel erfolgt dann als nächster Schritt eine Nachbearbeitung des Bauteils, die je nach Anforderung und Technologie vergleichsweise aufwendig sein kann. Eine Reinigung des Bauteils, eine thermische Nachbehandlung des Bauteils oder aber die zerspanende Endbearbeitung sind alles mögliche Prozesse, die unter die Kategorie der Nachbearbeitung fallen.

Als letzter Prozessschritt ist in [40] die Anwendung des Bauteils aufgeführt.

### 2.3.1 Sinterbasierte additive Prozessrouten

Als sinterbasierte additive Prozessrouten werden Fertigungsprozesse bezeichnet, in denen Grünteile additiv gefertigt und anschließend pulvermetallurgisch nachbehandelt werden. Die folgenden genannten Prozessrouten sind Bestandteil des SIGNAL-Projektes.

Eine Prozessroute innerhalb der sinterbasierten additiven Fertigung ist das sogenannte *Gelcasting (GC)*. In diesem Verfahren wird ein Metallpulver-Binder-Gemisch (Suspension) durch Wärme einbringung verflüssigt und in eine Form gegossen. Das Material erstarrt anschließend zum Grünling. Die Vorteile dieses Verfahrens sind die gute Bearbeitbarkeit des Grünlings sowie die

prinzipiell niedrigen Anforderungen an die Gussform. Zu den additiven Prozessrouten wird das Verfahren gezählt, da die Gussform durch AM-Verfahren wie dem FFF erzeugt werden kann. [70, 71]

Ein weiteres suspensionsbasierte Verfahren ist das *Moldjet (MJ)*-Verfahren. Der Begriff ist geschützt und eingetragener Markenname des Unternehmens *Tritone*, welches die Technologie entwickelt hat. Das Unternehmen bewirbt das Verfahren damit, dass es auf eine qualitativ hochwertige Fertigung von Metall- und Keramikbauteilen mit hoher Produktivität ausgelegt ist. Der Fertigungsprozess besteht aus der additiven Fertigung einer Polymer-Form, in die dann eine Metallpaste gefüllt wird. Im ersten Schritt einer Schicht wird die Bauteilform, also das Negativ, durch das Auftragen des erhitzten Polymers erzeugt. Dann wird die erzeugte Schicht geglättet. Anschließend wird die Metallpaste gleichmäßig in die Form gefüllt. Es folgt ein Vorgang zur Trocknung und Härtung der eingefüllten Paste. Diese Prozessschritte werden für jede Bauteilschicht wiederholt. Ist die Bauteilgeometrie erzeugt, kann die Polymerform durch Ausschmelzen entfernt werden und es bleibt nur der Grünling. [5, 85, 70]

Das *BJ* gehört zu den sinterbasierten AM-Prozessrouten, in denen pulverförmiger Feedstock verarbeitet wird. Das Material befindet sich in der entsprechenden Maschine in einem Pulverbett. Um aus dem Pulver einen Festkörper zu erzeugen, wird es schichtweise mit einem Binder in Tröpfchenform bestrahlt. Diese Bestrahlung erfolgt zielgerichtet nach dem Prinzip des 2D-Druckens. Wurde die Bauteilgeometrie in allen Schichten durch den Binder abgebildet, kann der Grünling dem Pulverbett entnommen und weiterverarbeitet werden. Das Verfahren wurde in den frühen 90er-Jahren am *Massachusetts Institute of Technology* entwickelt. [40]

Ein weiteres pulverbasiertes Verfahren ist das *Cold Metal Fusion (CMF)*. Die Rahmenbedingungen des CMF gleichen denen des *Selektives Lasersintern (SLS)*, nur das anstelle eines reinen Kunststoff-Pulvers ein pulverförmiger Feedstock genutzt wird. Die Binderanteile des Pulvers werden während der Fertigung schichtweise aufgeschmolzen, um den Grünling zu erzeugen. [75] Es existieren zudem extrusionsbasierte Prozessrouten. Im Kontext dieser Arbeit sind die Verfahren *Fused Filament Fabrication (FFF)* und *Fused Granular Fabrication (FGF)* relevant. Das FFF wird auch als Strangablegeverfahren bezeichnet und ist vermutlich das Verfahren, welches nicht-industrielle Anwendungen wie den privaten Hausgebrauch dominiert. Ein Grund hierfür ist die kostengünstige Zugänglichkeit der entsprechenden Maschinen. Das FGF ist ein relativ junges Verfahren und basiert auf dem Prinzip des Spritzgießens. Beide extrusionsbasierte Verfahren werden in den kommenden Abschnitten genauer betrachtet.

### 2.3.2 Fused Filament Fabrication

Das FFF-Verfahren basiert nach [26] auf dem Prinzip der Materialextrusion und wurde in den 1980er-Jahren entwickelt. Eingeführt wurde diese Technologie unter dem geschützten Markennamen *Fused Deposition Modeling (FDM)*. Die Rechte für diese Bezeichnung gehören nach wie vor dem Unternehmen *Stratasys, Ltd.*, welches im AM-Bereich sowohl Hard- als auch Software-Lösungen entwickelt und vertreibt. Der Erfinder des FDM-Verfahrens, Scott Crump, ist Mitgründer von *Stratasys*. Ein weiteres Synonym für FFF und FDM ist die Bezeichnung *Fused Lamination Manufacturing (FLM)*. [11, 16, 86, 62]

Wie oben beschrieben, gibt es verschiedene Phasen innerhalb der Bauteilfertigung. Diese Phasen lassen sich grob in Pre-, In- und Post-Prozess einteilen. Das Vorgehen innerhalb des Pre-Prozesses, das in Abschnitt 2.3 beschrieben ist, trifft genau so für die Technologie des FFF zu. Während des In-Prozesses, also der tatsächlichen Fertigung des Bauteils, wird das Baumaterial durch die Maschine aufgeschmolzen und schichtweise aufgetragen. Für diesen Prozess liegt der Werkstoff als sogenanntes *Filament*, also in Drahtform, vor. Dieses Filament bestand in der ursprünglichen Entwicklung aus Polymeren. Während des Fertigungsprozesses wird das Filament, in **Abbildung 2.4** mit der 7 gekennzeichnet, durch die beheizte Düse (s. Kennzeichnung 1 in der Abbildung) dem Arbeitsraum der Maschine zugeführt. Das Filament wird durch die Bewegung des sogenannten Extruders transportiert. Ein Extruder besteht in der Regel aus zwei Rollen, die das Material durch einen Spalt einziehen und den Düsen zuführen. Dort wird es dann in der jeweiligen Ebene in Linienform aufgetragen, um so das gewünschte Bauteil zu formen (s. Kennzeichnung 3 in der Abbildung). Da die Bauplatte und die Bauplatzform (s. Kennzeichnung 5 und 6) lediglich eine horizontale Ebene abbilden, ist je nach Kontur des Bauteils die Nutzung von sogenannten Stützstrukturen (s. Kennzeichnung 4) nötig. Das Verfahren kann als 2,5D-Verfahren bezeichnet werden. Die konturgebende Düse verfährt während der Materialextrusion in der horizontalen Ebene (X-Y-Ebene). Ist die jeweilige Bauteilschicht gefertigt, wird die Bauplatzform entsprechend der Schichthöhe abgesenkt. Dies entspricht einer Bewegung auf der z-Achse, bei der kein Material extrudiert wird. Nach dem Verfahren in z-Richtung beginnt die Fertigung der nächsten Bauteilschicht. [11, 16, 86, 62]

Im Post-Prozess, also nach der Fertigung, muss das Bauteil aus der Maschine entfernt werden. Hierfür ist die oben genannte Bauplatte wichtig. Oftmals besteht sie aus Kunststoff und wird an die Bauplatzform angesaugt. Das Material wird direkt auf die Bauplatte aufgeschmolzen. So wird Zusammenhalt zwischen dem Bauteil und der Bauplatte geschaffen, der für das Endprodukt nicht zielführend, für den Prozessablauf jedoch notwendig ist. Ist die Fertigung abgeschlossen,

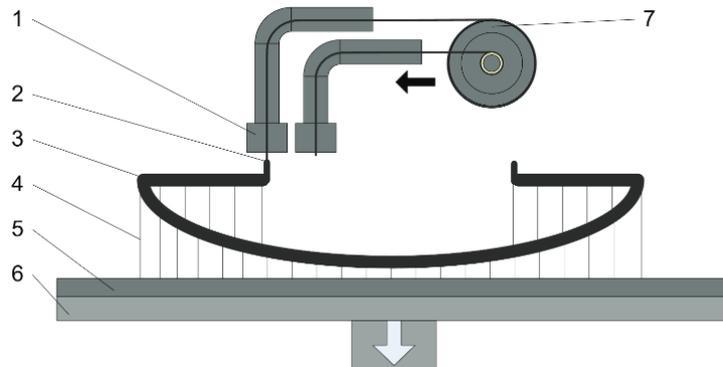


Abbildung 2.4: Prinzip des FFF [86]

kann das erzeugte Bauteil inklusive der Bauplatte aus der Maschine entfernt werden. Eine Entfernung von der Bauplatte ist für den FFF-Prozess dann in der Regel relativ einfach möglich. Anschließend ist es nötig, die Stützstrukturen zu entfernen. Dies geschieht entweder mechanisch oder aber chemisch, zum Beispiel durch den Einsatz von Lauge. Die Lauge löst dann das Stützmaterial auf, während das eigentliche Material des Bauteils nicht angegriffen wird. [57] Je nach Bauart der Maschine können innerhalb eines Baujobs mehrere verschiedene Materialien aufgetragen werden. Dies wird durch den Einsatz multipler Düsen realisiert.

Für den FFF-Prozess gibt es diverse Prozessparameter, die die Effizienz der Fertigung sowie die Qualität des Bauteils beeinflussen. Diese Prozessparameter sind entweder qualitativer oder quantitativer Natur. Die wichtigsten Parameter, angelehnt an [13, 14, 19], sind in **Tabelle 2.1** aufgelistet.

Tabelle 2.1: Ausgewählte Prozessparameter beim FFF

Parameter	Beschreibung
Spurabstand	Abstand zwischen den abgelegten Materialsträngen. Der Wert für den Spurabstand kann positiv, negativ oder gleich Null sein. Bei einem positiven Abstandswert berühren sich die Spuren nicht. Bei einem negativen Abstandswert überlappen sich die Spuren.
Aufbaurichtung	Beschreibt die Orientierung des Werkstückes in Bezug auf die x-, y- und z-Achse der Maschine, für die die Bauteilbelastung berücksichtigt werden sollte.
Extrusionstemperatur	Temperatur, auf die das Material während des Fertigungsvorganges erhitzt wird.

Tabelle 2.1 – fortgesetzt

Parameter	Beschreibung
Fülldichte	Es wird das von der Bauteil-Oberfläche eingeschlossene Volumen betrachtet. Die Fülldichte ist der Anteil des eingeschlossenen Volumens, an dem Material vorhanden ist, am gesamten eingeschlossenen Volumen.
Füllmuster	Das Muster, mit dem die Füllung des Bauteils realisiert wird (engl.: <i>Infill pattern</i> ). Es gibt verschiedene Muster, die in diesem Kontext standardmäßig verwendet werden. Dieser Parameter ist qualitativ.
Schichtdicke	Die Höhe der jeweils gelegten Materialbahn. Sämtliche in dieser Ebene gelegten Bahnen ergeben die Schicht. In der Regel ist die Schichtdicke geringer als der Düsendurchmesser.
Strangbreite	Die Strangbreite lässt sich für das Verfahren direkt einstellen und sollte mindestens dem Düsendurchmesser entsprechen. Der Parameter hängt neben dem Düsendurchmesser von dem Materialdurchfluss sowie der Druckgeschwindigkeit ab.
Druckgeschwindigkeit	Die Geschwindigkeit mit der sich der Druckkopf während des Extrusionsvorgangs in der x-y-Ebene bewegt. Eine höhere Druckgeschwindigkeit reduziert die Prozesszeit, wirkt sich in der Regel aber negativ auf die Genauigkeit der Extrusionsvorgänge aus.
Druckbetttemperatur	Die Temperatur der Bauplattform. Dieser Prozessparameter lässt sich in der Regel auch bei Maschinen aus dem niederen Preissegment einstellen.
Bauraumtemperatur	Die Temperatur des Bauraumes. Die Einstellung dieses Parameters erfordert, dass der Bauraum gekapselt ist. Auch wenn ein gekapselter Bauraum vorliegen sollte, ist eine Beheizung oftmals lediglich passiv durch das Druckbett gegeben.
Orientierungswinkel	Der Winkel der abgelegten Stränge zur x-Achse auf der x-y-Ebene.

Die Schichtdicke, die einer der in Tabelle 2.1 aufgeführten Prozessparameter ist, wirkt sich sowohl auf die Prozesszeit der Fertigung als auch auf die Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit des Bauteils aus. In **Abbildung 2.5** ist ein Bauteil in dreifacher Ausführung zu sehen. Diese Abbildung dient in [83] dazu, die Auswirkung der Schichtdicke auf das Ergebnis der Fertigung

beispielhaft zu visualisieren. Für jede dieser Ausführungen wurde eine andere Schichtdicke umgesetzt. In der Abbildung sind neben den Werten für die Schichtdicken auch die Prozesszeiten für das jeweilige Bauteil zu sehen. Es ist erkennbar, dass die Druckzeit mit abnehmender Schichtdicke näherungsweise proportional zunimmt, sofern keine anderen Prozessparameter variiert werden. Es ist außerdem erkennbar, dass sich die Oberflächenqualität des Bauteils mit abnehmender Schichtdicke verbessert. Die Bauteilgeometrie wird feiner aufgelöst.



Abbildung 2.5: Auswirkung der Schichtdicke [83]

In der Matrix in **Abbildung 2.6** sind beispielhaft verschiedene Füllmuster mit jeweils verschiedenen Ausprägungen der Fülldichte abgebildet. Beide Parameter haben einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils (vgl. z.B. [15, 46]). Zudem hängt das Gewicht des Bauteils zum großen Anteil von der Fülldichte ab.

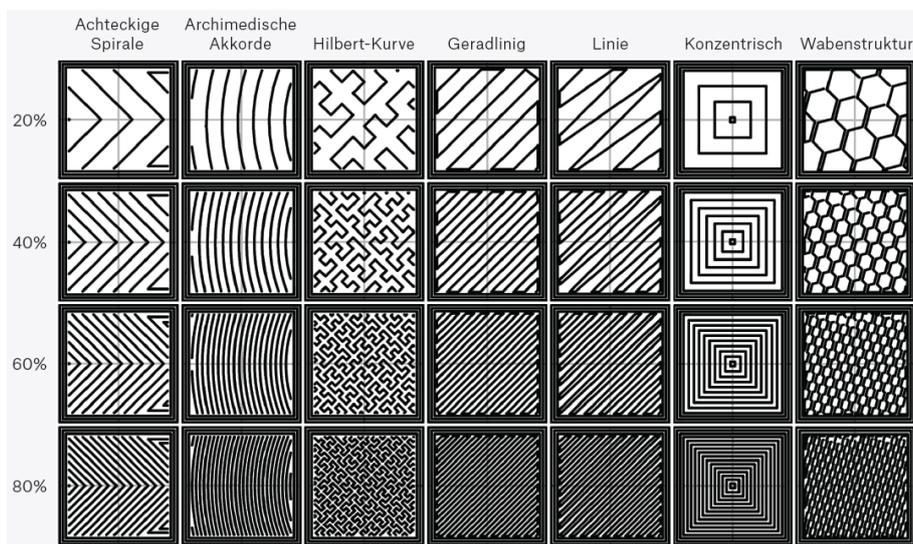


Abbildung 2.6: Verschiedene Füllmuster mit verschiedenen Fülldichten [83]

Für das FFF-Verfahren im Kontext der sinterbasierten Prozessrouten werden Metall-Polymer-Verbunde als Filament verarbeitet. In einer solchen Werkstoffzusammensetzung dient der Polymer-Anteil des Filaments als Binder. Dieser Binder wird während des Prozesses aufgeschmolzen und die Formgebung mittels FFF erst ermöglicht. Das so gefertigte Bauteil ist ein Grünling, dessen Festigkeit durch den Binderanteil des Filaments gegeben ist. Dieser Grünling muss dann im Nachgang noch dem Entbinderungs- und Sinterprozess unterzogen werden. Anschließend bleibt der metallene Anteil des Ausgangsmaterials, aus dem dann das Fertigteil besteht.

### 2.3.3 Fused Granular Fabrication

Das FGF-Verfahren ist wie das FFF ein extrusionsbasiertes Verfahren. Es wird auch als *Composite Extrusion Modeling (CEM)*, *Fused Feedstock Deposition (FFD)* oder *Pellet Extrusion Modeling (PEM)* bezeichnet. Einer der grundsätzlichen Unterschiede zwischen FGF und FFF besteht aus der Form, in der die verarbeiteten Materialien in den Prozess eingespeist werden. Während beim FFF Filament verwendet wird, liegt das Material beim FGF in Form des klassischen MIM-Feedstocks vor. Dieser Feedstock wird auch als Spritzgussgranulat oder Pellets bezeichnet und muss in der Regel keine Modifikation erfahren, um direkt im FGF verarbeitet zu werden. Diese Granulate werden erhitzt und im geschmolzenem Zustand schichtweise mit einer Düse aufgetragen. Das FGF ist noch relativ jung. So ist das unter der Bezeichnung CEM eingeführte Prinzip im Kontext des Metallspritzgusses entstanden. Diese Technologie und ihre Anwendung wurde 2016 von Forschenden der Universität Rostock vorgestellt. Im Jahr 2017 folgte die Anmeldung eines Patents für einen Extruder dieser Technologie. [30, 40, 59, 69]

In **Abbildung 2.7** sind der Extruder eines FGF-Druckers sowie der prinzipielle Fertigungsvorgang dargestellt. Der Extruder besitzt einen Speicher für das zu verarbeitende Granulat. Durch die Schwerkraft gelangt das Granulat in die Schnecke, die das Material aus der Düse drückt. Während das Material durch die Schnecke transportiert wird, wird es erhitzt. Die Kunststoffanteile des Granulats schmelzen und das Material kann aufgetragen werden. Für den Bau von Supportstrukturen gibt es während des Verfahrens verschiedene Möglichkeiten. So können diese Supportstrukturen aus verarbeitetem Granulat oder auch aus Filament erzeugt werden. Wichtig ist, dass die Nutzung von Supportstrukturen analog zum FFF ein wesentlicher Bestandteil dieses Verfahrens ist.

Der prinzipielle Ablauf des FGF entspricht dem des FFF. Der Prozess lässt sich auch hier in Pre-, In- und Post-Prozess einteilen. Inhaltlich gleichen die Phasen den Phasen des FFF-Prozesses. Das Ergebnis des FGF-Drucks ist ein Grünling, der im Anschluss entbindert und gesintert werden muss.

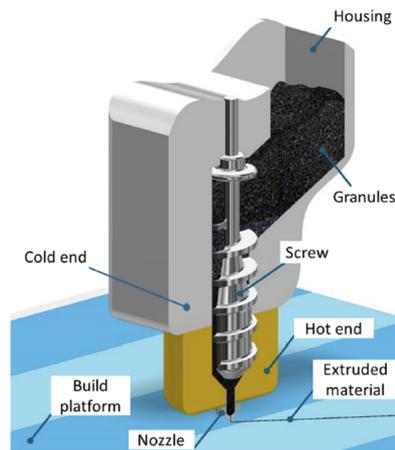


Abbildung 2.7: Prinzip des FGF [69]

Ein großes Potenzial der FGF-Technologie sind die für den Fertigungsprozess verfügbaren Werkstoffe. Wie oben erwähnt ist aufgrund des Prozessablaufs keine Modifikation von Standard-Spritzgusswerkstoffen notwendig. So führt *Pollen AM*, ein französischer Hersteller von FGF-Maschinen, auf seiner Webseite beispielhaft auf, dass derselbe Werkstoff für einen FFF-Prozess 2,58 Mal so viel kostet, wie für einen FGF-Prozess [66]. Nach [4] lassen sich die Kosten für Verbrauchsmaterialien durch die Nutzung von MIM-Feedstocks gegenüber filamentbasierten Prozessen um den Faktor 10 verringern.

### 2.4 Konstruktionsregeln

Ein Schwerpunkt des SIGNAL-Projektes ist die Optimierung und anschließende Fertigung bestehender Bauteile. Ein wesentlicher Optimierungsaspekt der Bauteile ist der Leichtbau. Für diese Optimierung aber auch die Umsetzung von Bauteilen generell sind die grundlegenden Hinweise der Bauteilgestaltung anzuwenden. Dies gilt für alle Fertigungsverfahren. Diese Hinweise folgen einer Hierarchie und sind in **Abbildung 2.8** abgebildet. Die *Grundregeln* des Konstruierens sind die Minimalanforderung an jede Konstruktion und lauten: einfach, eindeutig und sicher. Die Grundregeln gelten allgemein und sind auf alle Problemstellungen übertragbar (s. **Abbildung 2.8**). Aus ihnen lässt sich keine Gestalt ableiten, da sie wenig konkret sind, aber für die Prüfung von Konstruktionen in der Konzeptphase sind sie durchaus anwendbar. Die *Prinzipien* der Gestaltung stellen einen konkreteren Ansatz für die Auslegung von Konstruktionen dar. Dafür sind sie nicht so allgemein übertragbar wie die Grundregeln. Die Prinzipien bilden Strategien ab, mit denen spezifische Zielsetzungen im Konstruktionsprozess erfüllt werden sollen.

Diese spezifischen Zielsetzungen hängen von den Anforderungen des Bauteils ab. Aus diesen Prinzipien können in der Regel immer noch keine konkreten Geometrien abgeleitet werden. Die Ableitung und Überprüfung von konkreten Geometrien ist durch *Richtlinien* der Konstruktion, auch *Konstruktionsregeln* genannt, möglich. Diese Konstruktionsregeln sind nur unter spezifischen Rahmenbedingungen anwendbar, besitzen also eine geringe Übertragbarkeit. Außerdem stehen sie immer in einem spezifischen Kontext und beziehen sich nicht auf die Konstruktion im Allgemeinen. Im Kontext der Konstruktionsregeln hat sich der Begriff des *Design for X (DfX)* etabliert. Damit wird das Design, also die Konstruktion, aus einer spezifischen Perspektive heraus betrachtet. Für diese Arbeit hervorzuheben sind die Formulierungen *Design for Manufacturing (DfM)* sowie *Design for Additive Manufacturing (DfAM)*. Auf beide Begriffe wird in den nächsten beiden Abschnitten näher eingegangen. [10, 35]

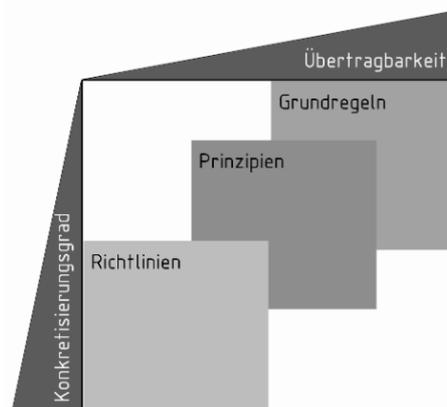


Abbildung 2.8: Hinweise zur Bauteilgestaltung [35]

### 2.4.1 Fertigungsgerechtes Konstruieren

Das fertigungsgerechte Konstruieren beziehungsweise die fertigungsgerechte Gestaltung entspricht dem oben genannten Design for Manufacturing. Es geht um die detaillierte Umsetzung von Bauteilgeometrien, die die Fertigung eines Bauteils mittels eines spezifischen Verfahrens umsetzbar machen. Andersherum folgen aus dem gewählten Fertigungsverfahren limitierende Anforderungen an die Bauteilgestaltung. Diese Anforderungen lassen sich in fertigungsspezifischen Konstruktionsregeln formulieren.

Eine Betrachtung aller Konstruktionsregeln für die konventionelle Fertigung an dieser Stelle ist nicht zielführend. Durch den Fokus dieser Arbeit auf spezifische Bauteile und AM-Verfahren ist

es sinnvoll, die Konstruktionsregeln für die folgenden Technologien zu betrachten: zerspanende Fertigung (vornehmlich Fräsen), Pulvermetallurgie und Pulverspritzguss.

Nach [37] gelten für die zerspanende Fertigung die folgenden allgemeinen Regeln für die Bauteilgestaltung:

- Der Grundkörper sollte geometrisch einfach sein
- Das abzutragende Volumen (Zerspanvolumen) ist gering zu halten
- Die Möglichkeiten zur Bauteileinspannung müssen berücksichtigt werden
- Das Teil soll mit möglichst wenig Umspannvorgängen zu fertigen sein (optimal: 0)
- Die ebenen Bearbeitungsflächen sollten parallel oder senkrecht zur Fläche der Aufspannung liegen
- Die Zugänglichkeit der zu bearbeitenden Flächen ist notwendig
- Werkzeugausläufe müssen berücksichtigt werden
- Die Verfahren Drehen und Bohren sind den Verfahren Fräsen und Hobeln vorzuziehen
- Anforderungen an Oberflächen und Toleranzen sind sinnvoll und so grob wie möglich zu formulieren

Für pulvermetallurgisch hergestellte Bauteile, deren Formgebung mittels Matrizenpressen erfolgt, gibt es nach [37] die folgenden gestalterischen Einschränkungen:

- Das Bauteil sollte keine schräglaufenden Kanten besitzen
- Das Bauteil sollte keine scharfen Kanten, sondern Fasen besitzen
- Hinterschnitte sind zu vermeiden
- Bohrungen mit  $d < 2$  mm sind nicht angemessen fertigbar und sollten im Nachgang spanend erzeugt werden
- Sehr unterschiedliche Querschnitte sind zu vermeiden
- Kontinuierliche Querschnittsübergänge sind zu vermeiden, Kegel- und Kugelformen sollten durch zylindrische Formen ersetzt werden

Für den Pulverspritzguss gibt es ebenfalls spezifische Einschränkungen bei der Bauteilgestaltung. Neben einem empfohlenen Spektrum für das Gewicht des Bauteils ist in [32] auch ein empfohlenes Spektrum für die Bauteilgröße angegeben. Die beiden gerade genannten Dimensionen beziehen sich jedoch nicht auf die tatsächliche Herstellbarkeit der Bauteile. Hintergrund der beiden Punkte ist der ökonomisch sinnvolle Einsatz des MIM-Prozesses. Es gibt für das Verfahren des Metallspritzgusses jedoch auch Gestaltungsrichtlinien, die denen aus Abschnitt 2.1 teilweise ähneln. So sind scharfe Kanten zu vermeiden und durch Rundungen zu ersetzen. Dadurch lassen

sich Spannungsspitzen später im Bauteil sowie turbulente Strömungen während des Fertigungsprozesses vermeiden. Die Wanddicke des Bauteils sollte so homogen wie möglich sein. Um dies zu erreichen ist das sogenannte *coring* eine gängige Methode. Hierbei werden Materialaussparungen am Bauteil eingebracht. Um trotz dieser Aussparungen die mechanischen Anforderungen erfüllen zu können, kann das Werkstück mit verstärkenden Rippenstrukturen versehen werden. Diese Rippenstrukturen sollten wieder über die dem restlichen Bauteil entsprechende Dicke verfügen. Generell ist die Empfehlung, dass Bohrungen eine maximale Tiefe besitzen sollten, die dem Fünffachen ihres Durchmessers entspricht. Wenn bei einem Bauteil unterschiedliche Wanddicken nicht zu vermeiden sind, sollte der Übergang zwischen diesen Abschnitten kontinuierlich gestaltet sein. Auch dieser Punkt hat die sonst auftretenden Spannungsspitzen und die potenziell während der Fertigung auftretenden turbulenten Strömungen als Hintergrund. Der große Vorteil des Metallspritzgusses gegenüber den rein pulvermetallurgischen Fertigungsprozessen ist die Möglichkeit, auch komplexe Geometrien umsetzen zu können. Das Verfahren ist speziell für filigrane Bauteile in hoher Stückzahl geeignet. [32, 52]

### 2.4.2 Konstruktionsregeln für die Additive Fertigung

Das fertigungsgerechte Konstruieren im Kontext der Additiven Fertigung entspricht dem oben genannten DfAM. Die Konstruktionsregeln werden in diesem Kontext auch *Design Principles* genannt. Diese Konstruktionsregeln basieren oftmals auf dem Erfahrungswissen aus der praktischen Anwendung, wie in [57] beschrieben ist. Aufgrund der Vielzahl der AM-Verfahren sowie ihrer stetigen Weiterentwicklung gibt es nicht *die* Konstruktionsregeln, die für alle AM-Prozesse und Bauteilanwendungen gültig sind. Die Entstehung der Design Principles geschieht mit Blick auf ein spezifisches Verfahren sowie oftmals einem konkreten Anwendungsbereich der Bauteile. Untersuchungen hierzu finden in der Wirtschaft wie auch in der Wissenschaft statt.

Im Folgenden wird auf einschlägige Literatur eingegangen, die sich spezifisch mit der Erarbeitung oder Darstellung von Konstruktionsregeln befasst. Dabei werden auch ausgewählte Werke, die nicht im Kontext der extrusionsbasierten Verfahren verfasst wurden, mit entsprechender Begründung erwähnt.

Eine populäre grundständige Arbeit ist die Masterarbeit von Schäfer aus dem Jahre 2008 [79]. Sie trägt den Titel *Design Guidelines for Rapid Prototyping - Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien für ein fertigungsgerechtes Gestalten anhand des Fused Deposition Modeling*. Das Ergebnis dieser Arbeit ist eine Sammlung von Konstruktionsregeln, die auf dem FFF-Verfahren basieren und für die Verarbeitung des Werkstoffs ABS Anwendung finden. Die Konstruktionsregeln betreffen die Gestaltung von Bauteilen bezüglich ihrer Funktionsfähigkeit, ihrer Oberflä-

chengüte sowie der Ausprägung von Geometrien (zum Beispiel Wanddicken und Bohrungen). Eine beispielhafter Auszug aus den Ergebnissen ist in **Abbildung 2.9** abgebildet. Die Ergebnisse enthalten, soweit möglich, quantitative Aussagen.

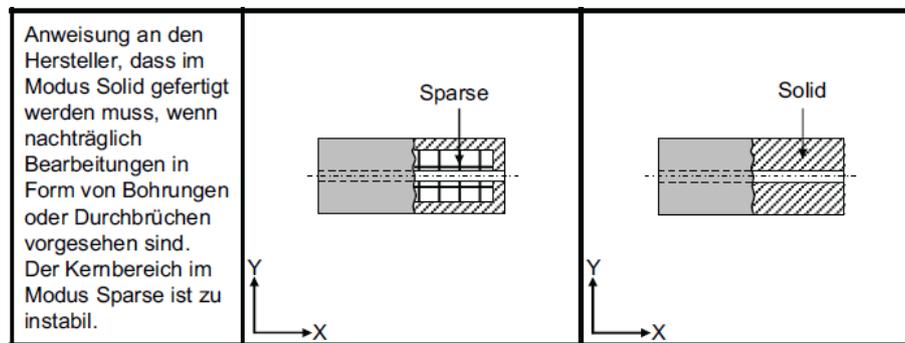


Abbildung 2.9: Beispielhafte Konstruktionsregel aus [79]

In [11], veröffentlicht im Jahre 2013, wird die Änderung der Rahmenbedingungen der Konstruktion erläutert, die sich mit der Einführung von AM-Prozessen ergibt. Es wird weiterhin durch die Themen geführt, die bei der Konstruktion von AM-Bauteilen zu Schwierigkeiten führen können. Dies betrifft sowohl die Bauteilstrategie im übergeordneten Sinne als auch die Gestaltung von detaillierten Geometrien. Auf die Geometrien wird jeweils erst generell eingegangen. Anschließend werden quantitative Aussagen anhand eines Szenarios getätigt. Die Szenarios entstammen dem Kunststoff-Pulverbett-Kontext.

Die 2015 veröffentlichte Arbeit von Adam befasst sich verfahrenübergreifend mit der Herleitung von Konstruktionsregeln [2]. Für insgesamt drei Verfahren (zwei pulverbettbasierte und ein extrusionsbasiertes) werden quantitative Richtlinien für die Bauteilgestaltung hergeleitet. Dabei folgen die Richtlinien einer hierarchischen Systematik, die sich in drei Stufen aufgliedert. Die übergeordnete Klasse entspricht der Art des Bauteilfeatures, von denen drei definiert sind (*Basiselemente*, *Elementübergänge* und *aggregierte Strukturen*). In der untergeordneten Klasse ist das jeweilige Bauteilfeature spezifiziert (z.B. *nicht gekrümmtes* Basiselement). In der letzten Stufe der Richtlinien werden die einzelnen Attribute inklusive der empfohlenen Ausprägungen konkret benannt, sofern dies möglich ist (z.B. die *Dicke* eines nicht gekrümmten Basiselements). Eine Übersicht sämtlicher untersuchter Attribute ist **Tabelle 2.2** zu entnehmen.

Tabelle 2.2: Faktoren und deren Beschaffenheit nach [2]

<b>Übergeordnete Klasse</b>	<b>Untergeordnete Klasse</b>	<b>Eigenschaft</b>
Basiselemente	nicht gekrümmt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dicke</li> <li>• Länge</li> <li>• Breite</li> <li>• Orientierung</li> <li>• Position</li> <li>• Richtung</li> </ul>
	einfach gekrümmt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Außenradius</li> <li>• Innenradius</li> <li>• Innenradius ohne Stützstrukturen</li> <li>• Länge zu Außenradius</li> <li>• Länge zu Innenradius</li> <li>• Orientierung</li> <li>• Position</li> </ul>
	doppelt gekrümmt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Außenradius</li> <li>• Innenradius</li> <li>• Position</li> </ul>
Elementübergänge	stoffschlüssig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übergangswinkel</li> <li>• Dicke</li> <li>• Kanten</li> <li>• Ecken</li> </ul>
	stofflos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spalthöhe</li> <li>• Spalllänge</li> <li>• Spaltbreite</li> </ul>
Aggregierte Strukturen	Inseln	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Länge</li> <li>• Abstand</li> </ul>
	Überhänge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Länge</li> </ul>
	Materialanhäufung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Querschnittsfläche</li> </ul>
	Materialengstelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Querschnittsfläche</li> </ul>
	Fundamente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stabilität</li> </ul>
	Bauteiloberflächen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberflächenwinkel</li> <li>• Stützhöhe</li> <li>• Rauheit</li> </ul>

In **Abbildung 2.10** ist zudem ein Auszug aus den hergeleiteten Konstruktionsregeln abgebildet. In der Abbildung sind zwei Regeln zu der Gestaltung “nicht gekrümmter Elemente” (Grundkörper) sowie der Attribute “Wanddicke” und “Orientierung” zu sehen. Es folgt die Angabe der Gültigkeit der Regel für die Verfahren. Weiterhin ist die Regel in sprachlicher Form und, wenn möglich, in konkreten Zahlenwerten beschrieben. Eine Visualisierung mit Negativ- und Positivbeispiel ist ebenfalls gegeben.

Basiselemente		Beschreibung	Ungünstig	günstig
Nicht gekrümmte Elemente	Wanddicke	Wanddicken sollten so groß sein, dass jede Schicht aus einer Kontur mit einbeschriebenen Raster gebildet werden kann LS: $s_{NK} > 3 \cdot SV \approx 1,0 \text{ mm}$ LM: $s_{NK} > 6 \cdot SV \approx 0,6 \text{ mm}$ FDM: $s_{NK} > 3 \cdot SV \approx 1,5 \text{ mm}$		
	Orientierung	Nicht gekrümmte Elemente sollten orthogonal zur Bauebene orientiert werden, um möglichst kleine Maßabweichungen in Dickenrichtung zu erzielen		

Abbildung 2.10: Beispielhafte Konstruktionsregel aus [2]

Die Arbeit von *Kranz* aus dem Jahre 2017 befasst sich mit der Vorgehensweise bei der Konstruktion von AM-Leichtbauteilen aus Titan [54]. Das betrachtete Verfahren ist pulverbettbasiert, die generelle Vorgehensweise ist jedoch auch für andere Verfahren anwendbar. Es werden systematisch verschiedene Leichtbaustrukturen in unterschiedlichen Ausprägungen additiv gefertigt und anhand der Ergebnisse Konstruktionsregeln für diesen Anwendungsfall abgeleitet. In [54] schreibt der Autor, dass die Untersuchungen nicht zum Ziel haben, sämtliche Verfahrensgrenzen festzustellen. Vielmehr ist die Arbeit als weiterer Schritt in der Erschließung der Technologie zu sehen. Die Fertigungsergebnisse sollen reproduzierbar sein. Speziell die Konstruktion und Fertigung von Leichtbauteilen soll durch sie gefördert werden.

Die Ergebnisse werden in Form eines Konstruktionskatalogs festgehalten, der aus einzelnen Konstruktionsregeln besteht. Ein Auszug aus diesem Katalog ist in **Abbildung 2.11** zu sehen. Es werden diverse Bauteilmerkmale betrachtet. Bildhaft wird je Merkmal mindestens ein Negativ- und ein Positivbeispiel angegeben. Die Bedeutung dieser Beispiele wird in sprachlicher Form erläutert. Als letzter Punkt jedes Eintrags sind Empfehlungen zur Konstruktion angegeben. [54]

Strukturierung	Nr.	ungünstig	günstig	Erläuterungen und Hinweise	Restriktionen und Empfehlungen
Bauteilgeometrie allgemeine Bauteilgröße	Abmessungen	1		- Bauteilabmessungen dürfen die Bauraumabmessungen nicht überschreiten - Bauteil ggf. drehen / kippen, skalieren oder teilen	- Bauraumgröße ist abhängig vom verwendeten Maschinenkonzept (s. Maschinendokumentation) - max. Bauraumgröße inkl. Substratplatte: x = ca. 800 mm, y = ca. 400 mm, z = ca. 500 mm; (Stand April 2015)
	Integration der Substratplatte	2		- Substratplatte in das Bauteil integrieren - Reduzierung der Herstellungszeit und -kosten möglich - hybrider Fertigungsansatz	
		3		- Radien für die Anbindung an die Bauteilplattform vorsehen - Verhindern des Ablösens der Struktur während der Fertigung und in der Nutzungsphase	- je größer die Anbindungsfläche, desto größer sollte der Radius sein - $r_{min} = 3 \text{ mm}$ (TIAI6V4)
	Höhe	4		- Höhe des Bauteils in Aufbaurichtung sollte einem Vielfachen der Schichtdicke entsprechen - Bauteilhöhe: $H = n \cdot d_s$ - Anzahl der Schichten: $n \in \mathbb{Z}$	- typische Schichtdicke für metallische Werkstoffe: $d_s = 30 - 100 \mu\text{m}$ (TIAI6V4; $d_s = 30 \mu\text{m}$ ) (siehe auch Maschinendokumentation) - siehe auch "Bauteilorientierung - Bauteilhöhe" (Nr. 58)
	Maßgenauigkeit	5		- tatsächliche Bauteilabmaße weichen von der CAD Sollkontur ab	- in der x-y-Ebene: $\Delta_{xy} = + 0,1 \text{ mm}$ - in z-Richtung: $\Delta_z = - 0,1 \text{ mm}$ bis $- 0,2 \text{ mm}$ (bis Bauhöhe $H = 50 \text{ mm}$ ) - Verzugserscheinungen können zu zusätzlichen Bauteil deformationen und Maßabweichungen führen
	Kantenauflösung	6		- Fokussdurchmesser des Lasers ( $d_L$ ) limitiert die Auflösung in der Fertigungsebene - scharfe Ecken u. Kanten können nicht gefertigt werden	- siehe Maschinenspezifikationen - typischer Fokussdurchmesser ca. 70 - 100 $\mu\text{m}$

Hinweis: siehe "Randbedingungen der Richtlinie" (Nr. 67) und "Legende" (Nr. 68) für weitere Informationen

Abbildung 2.11: Auszug aus dem Konstruktionskatalog aus [54]

In der 2019 veröffentlichten Dissertation von *Leutenecker-Twelsiek* geht es um die Verbesserung der Implementierung von AM-Prozessen in bestehende Unternehmensstrukturen und -prozesse [58]. Während ein Fokus auf der Potenzialbewertung von Bauteilen im Kontext der Additiven Fertigung liegt, liegt ein anderer Fokus auf der Erstellung eines Gestaltungsleitfadens für AM-Bauteile. Dieser Gestaltungsleitfaden wurde für die Anwendung in der Industrie entwickelt und führt in verschiedene AM-Verfahren sowie deren Anwendung ein. Es folgen Gestaltungshinweise zu Bauteilgeometrien auf der qualitativen Ebene. Der letzte Teil des Leitfadens besteht aus Hinweisen zur Gestaltung von Geometrien auf der quantitativen Ebene. Es sind die konkreten werkstoffspezifischen Werte für diverse Verfahren angegeben. Diese Angaben stammen aus Untersuchungen aus der Industrie und Wissenschaft. Die Ergebnisse dieser Arbeit beinhalten zudem den Großteil des Kapitels zur Bauteilgestaltung in [47].

Ebenfalls in 2019 veröffentlicht wurde [20]. In diesem umfassenden Werk wird auch in die Möglichkeiten der AM sowie in die verschiedenen Verfahrensabläufe eingeführt. Es wird Bezug genommen auf die Gestaltungsprinzipien der jeweiligen Technologien wie zum Beispiel der Materialextrusion von Polymeren. Nach der Einführung in die generellen verfahrensspezifischen Gestaltungsaspekte folgt die Beschreibung konkreter Konstruktionsregeln mit quantitativen Aussagen, sofern möglich. Es werden generelle industriell gültige Wertebereiche für Parameter wie Schichtdicken und Toleranzen genannt. Auch wird auf Parameter, deren Wertebereiche nicht ge-

nerell anwendbar sind, eingegangen. Es ist beschrieben, wie sich diese Parameter auf die Bauteilfertigung auswirken können und wie sie zu untersuchen sind.

### 2.5 Potenziale der Additiven Fertigung

Die additive Fertigung besitzt, wenn sie richtig eingesetzt wird, Vorteile gegenüber den konventionellen Fertigungsverfahren. Diese Vorteile bieten Potenziale für diverse Anwendungen. In den folgenden Bereichen besitzt AM wohl die größten Potenziale:

- **Leichtbau:** Nach [39, 58, 77] ist die Fertigung von Leichtbaukomponenten ein Potenzial der additiven Fertigung. Das liegt an der durch AM umsetzbaren komplexen Gestaltung von Bauteilen, die voll auf die Anwendung und Anforderungen der Bauteile abgestimmt werden kann. AM-Bauteile im Kontext des Leichtbaus sind oftmals topologieoptimiert und sparen so Gewicht ein. Auch die Möglichkeit, mit Gitterstrukturen im Material zu arbeiten, spart Gewicht ein und wäre mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht realisierbar. Die Herstellung solcher optimierten Bauteile mittels AM ist dazu potenziell effizienter als die konventionelle Herstellung, sowohl was die Materialkosten als auch die Fertigungszeit angeht [77].
- **Komplexität:** Die Möglichkeiten der Produktgestaltung in der additiven Fertigung sind vielfältiger als in der konventionellen Fertigung. Bionische Strukturen, implementierte Hinterschnitte oder andere Bauteilfeatures die beispielsweise zerspanend nicht oder nur mit viel Aufwand zu fertigen sind, können mittels AM mit keinem bis geringem Mehraufwand umgesetzt werden. [39, 58]
- **Losgröße:** Durch die Flexibilität der Verfahren kann die AM-Fertigung von Produkten mit Losgrößen ab der Stückzahl 1 wirtschaftlich sinnvoll sein. Dieses Potenzialfeld wird in [39, 58, 77] genannt und liegt zum Beispiel im Sondermaschinenbau oder in Bereichen mit hochindividuellen Kundenanforderungen.
- **Funktionsintegration:** In [39, 58, 77] ist die Funktionsintegration als Potenzial genannt. Durch AM-Technologien können Bauteile innerhalb eines Fertigungsprozesses mit speziellen Features versehen werden, deren Fertigung auf konventionelle Weise nicht möglich wäre. So können diese Bauteile mehr Funktionen übernehmen und Baugruppen ersetzen. Dadurch ergeben sich einige Potenziale wie Kosten- oder Platzersparnis.
- **Performancesteigerung:** In [58, 77] wird die Performancesteigerung als Potenzial genannt. Damit ist die “gesteigerte Effizienz im Produkteinsatz” [77] gemeint. Bauteile mit

Performancesteigerung sind also besser für Ihren Zweck geeignet. Als Beispiel sei ein Wärmetauscher genannt, dessen Wärmewiderstand mittels AM minimiert wurde [82].

Die aufgeführten Punkte führen noch zu weiteren Vorteilen gegenüber der konventionellen Fertigung. So ist in [39] zusätzlich die Ressourcenschonung aufgeführt, die sich aus der Möglichkeit der direkten Fertigung topologieoptimierter Bauteile ergibt. Durch eine mögliche wirtschaftlich sinnvolle Fertigung ab Losgröße 1 ist die Personalisierung von Produkten, die heute immer wichtiger wird, niedrigschwelliger umzusetzen.

Im Mobilitätssektor ist der Leichtbau eine wichtige Komponente. Durch eine Gewichtsreduzierung der Komponenten lässt sich die Mobilität effizienter betreiben. Dies spart Kosten und senkt den CO<sub>2</sub>-Verbrauch. Im Kontext des Leichtbaus gibt es verschiedene Begrifflichkeiten, die in [48] erläutert werden. Die Überbegriffe sind *Leichtbaustrategie*, *Leichtbauprinzip* und *Leichtbauweise*. Diese Begriffe überschneiden sich teilweise. So ist die Leichtbauweise ein Leichtbauprinzip. Verschiedene Leichtbauprinzipien sind Teile von verschiedenen Leichtbaustrategien. [48] Eine Leichtbaustrategie bezeichnet die Methode, mit der man Gewichtseinsparung betreiben möchte. Es geht hier nicht um die konkrete Umsetzung einer konstruktiven Lösung, sondern um die Perspektive auf das Problem. Die verschiedenen Leichtbaustrategien sind in **Tabelle 2.3** aufgeführt. [48]

Tabelle 2.3: Leichtbaustrategien

<b>Strategie</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
Stoffleichtbau	Der Austausch des ursprünglichen Werkstoffes durch einen Werkstoff mit geringerem Gewicht.
Fertigungsleichtbau	Die Gewichtseinsparung durch Änderung der Fertigungsstrategie, z.B. Löten statt Nieten.
Formleichtbau	Die Gewichtseinsparung durch die Optimierung der Topologie des Bauteils. Das Material des Bauteils ist Beanspruchungsgerecht verteilt.
Konzeptleichtbau	Die Festlegung einer konstruktiven Lösung auf Basis von sowohl Gewicht als auch Funktion. Hier werden verschiedene Bauweisen berücksichtigt.
Bedingungsleichtbau	Die Berücksichtigung äußerer Einflüsse auf die Bauteilanwendung. Durch geänderte Rahmenbedingungen kann das Bauteil ggf. anders ausgelegt und so Gewicht eingespart werden.

Mit Leichtbauweisen sind konkrete konstruktive Strategien gemeint, mit denen Problemstellungen aus dem Leichtbau gelöst werden sollen. Beispielhaft sei hier die Differenzialbauweise ge-

nannt, bei der ein Bauteil aus mehreren Unter-Bauteilen zusammengesetzt wird. Jedes dieser Unter-Bauteile ist auf eine spezielle Anforderung des Bauteils ausgelegt. So ist die Ausführung eines Bauteils effizient möglich. Diesem Ansatz steht die Integralbauweise entgegen. Der Ansatz dieser Bauweise ist es, möglichst viele Funktionen mit möglichst wenig Bauteilen zu erfüllen. Auch die Verarbeitung von und Konstruktion mit Faserverbundwerkstoffen werden zu den Leichtbauweisen gezählt. [48]

Bei Leichtbauprinzipien geht es nicht nur um die Gewichtsreduzierung an sich, sondern ebenso um die Effizienzsteigerung von Bauteilen. Als Ziel in diesem Kontext ist zum Beispiel die dynamische Sicherheit eines Bauteils zu nennen. [48]

Oben ist beschrieben, dass AM-Verfahren die Fertigung komplexer Geometrien kostengünstig ermöglichen. Es lassen sich auch Geometrien fertigen, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht umzusetzen wären. Letzteres bietet das Potenzial, effektiv Formleichtbau zu betreiben. Topologieoptimierte Bauteile, deren Materialverteilung auf die jeweilige Anwendung und ihre Belastung angepasst wird, sind in der Regel anders gestaltet als konventionell hergestellten Bauteile. Das liegt daran, dass die Materialverteilung den Lastpfaden folgt. Daraus resultieren oft Geometrien, die zum Beispiel durch die Zerspanung nicht zu realisieren wären.

Zudem ist die zerspanende Herstellung von Komponenten aus Hochleistungswerkstoffen wie Titan aufwendig. [58]

Der Vorteil der AM-Verfahren gegenüber dem klassischen MIM-Verfahren ist die Effizienz bei kleineren Losgrößen. Das liegt daran, dass für die AM der für geringe Losgrößen unwirtschaftliche Werkzeugbau entfällt. Beim Gelcasting ist der Bau einer Form zwar notwendig, jedoch sind die mechanischen Anforderungen an diese im Vergleich zum MIM-Prozess niedrig [70]. Die sinnvolle Nutzung eines Fertigungsverfahrens hängt maßgeblich von der Komplexität der zu fertigenden Bauteile sowie deren Losgröße ab. In [52] wird diese Abhängigkeit grafisch dargestellt (s. **Abbildung 2.12**).

Es drängt sich ein passender Anwendungsbereich für die sinterbasierten AM-Verfahren auf. Die Fertigung niedriger Stückzahlen von Bauteilen mit mittlerer bis hoher Komplexität. Aufgrund der angedachten Topologieoptimierung der Bauteile wird sich das Spektrum der Komplexität tendenziell in Richtung "Hoch" verschieben. In [6] wird eine Bewertung der Anwendungsbereiche je nach AM-Technologie vorgenommen. Diese Bewertung wird analog zu **Abbildung 2.12** visualisiert und ist in **Abbildung 2.13** zu sehen.

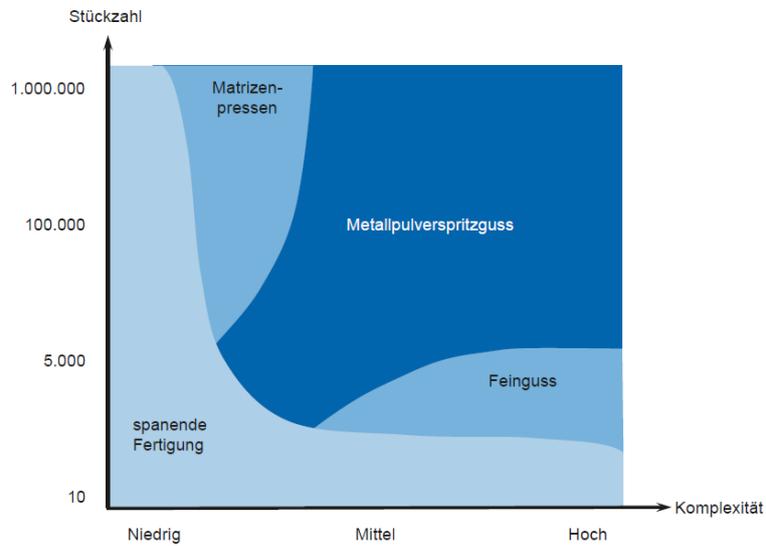


Abbildung 2.12: Anwendungsbereiche der konventionellen Fertigungsverfahren [52]

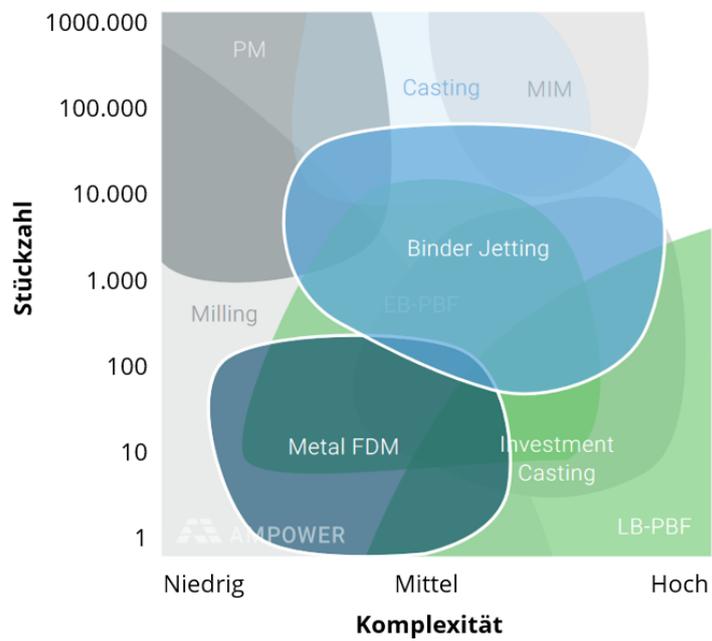


Abbildung 2.13: Potenzialträchtige Anwendungsbereiche der AM nach [6]

## 2.6 Identifikation potenzieller Bauteile

Die strategische Identifikation von Bauteilen, deren Fertigung mittels AM-Verfahren Vorteile birgt, ist ein Kernthema diverser Untersuchungen im Kontext der AM. In [47] wird ein Prozess der Identifikation vorgestellt, der aus zwei Phasen besteht. Die erste Prozessphase besteht aus dem Sammeln potenzieller Bauteile auf Basis der Potenzialbereiche, die in Abschnitt 2.5 vorgestellt werden. In der zweiten Phase des Identifikationsprozesses werden die ausgewählten Bauteile dann auf ihre Herstellbarkeit sowie ihren konkreten Nutzen in der Anwendung beurteilt. Laut [47] ist dieser zweiphasige Prozess wichtig, um "gute, aber ungewöhnliche Ideen nicht frühzeitig auszusortieren."

Die gerade beschriebenen Prozessstufen wurden in [58] ausgearbeitet. Das zum Prozess dazugehörige Bewertungsschema stammt ebenfalls aus dieser Quelle. In der ersten Prozessphase werden Daten der potenziellen AM-Bauteile (z.B. Abmaße, Volumen, Stückzahlen) gesammelt. Es wird das Optimierungspotenzial des Bauteils durch AM bewertet. Die Bewertung erfolgt für die nach [47] und [58] relevantesten Potenzialbereiche: Funktionsintegration, Leichtbau, Individualisierung und Performancesteigerung. Da der Bewertungsprozess für die Standardisierung in Unternehmen geeignet sein soll, wurde ein Template ausgearbeitet.

Die zweite Prozessphase dient der detaillierten Bewertung der potenziellen Bauteile. In den Quellen wird diese Phase auch als *Expertenbewertung* bezeichnet. Hierfür werden fünf Bewertungskriterien eingeführt, die jeweils mit 0 bis 5 Punkten bewertet werden. Ein Bewertungskriterium ist die technische Realisierbarkeit. Für dieses Kriterium sind die Einschränkungen des Verfahrens mit Blick auf die Geometrie und das Material zu berücksichtigen. Das zweite Kriterium ist der Aufwand des Post Processing. Hier wird die Nachbearbeitung, die durch Bauteilanforderungen an Toleranzen und Oberflächengüten notwendig ist, bewertet. Ein weiteres Kriterium ist der Kundennutzen. Häufig geht es hierbei um die Performancesteigerung des Bauteils. Die letzte Kategorie ist der OEM-Nutzen. [58] meint damit den direkten Nutzen und Berücksichtigung der Aspekte, "welche die Supply Chain beeinflussen." Als Beispiele sind die Verringerung der Bauteilanzahl oder bessere Verfügbarkeiten genannt. Die Bewertungskriterien sind mit sämtlichen Möglichkeiten zur Bewertung und den dazugehörigen Ausprägungen in **Tabelle 2.4** aufgeführt. Stehen die Bewertungen für die einzelnen Kriterien fest, ist die Gesamtpunktzahl zu berechnen. Bei dieser Berechnung fließt die jeweilige Gewichtung der Kriterien mit ein. Dies erfolgt mithilfe des Gewichtungsfaktors  $F_i$ . In der Berechnung nach

$$GP = \sum_{n=1}^4 (F_i \cdot BK_i) + F_5 \cdot BK_3 \cdot BK_4 \quad (2.4)$$

wird auch eine mögliche negative Auswirkung der Bauteilfertigung auf die Kriterien *Kundennutzen* und *OEM-Nutzen* berücksichtigt. Eine negative Auswirkung ist gegeben, wenn diese Kriterien eine Bewertung von "0" erhalten. Durch den letzten Term in der Formel soll sichergestellt sein, dass sich der Mehrwert der Lösung in der Gesamtpunktzahl ausdrückt. Durch diesen Term kann die Bauteilbewertung im Falle einer negativen Bewertung von BK<sub>3</sub> oder BK<sub>4</sub> nur eine annehmbare Gesamtpunktzahl erreichen, wenn die anderen Kriterien sehr gut bewertet werden. [58]

Tabelle 2.4: Bewertungskriterien für die Expertenbewertung [58]

<b>Bewertung</b>	<b>Technische Realisierbarkeit (BK<sub>1</sub>)</b>	<b>Post Processing Aufwand (BK<sub>2</sub>)</b>	<b>Kundennutzen (BK<sub>3</sub>)</b>	<b>OEM-Nutzen (BK<sub>4</sub>)</b>
0	Nicht realisierbar	Unmöglich	Nachteile	Komplexere Supply Chain
1	Technologieentwicklung auf Konzeptebene	Aufwendige Nachbearbeitung (z.B. 5-Achs-Fräsen von Freiformoberflächen)	Kein zusätzlicher Nutzen	Kein Einfluss auf die Supply Chain
2	Technologie unter Laborbedingungen realisiert	Intensive Nachbearbeitung: mehrere subtraktive Bearbeitungsschritte (z.B. Anschlüsse)	Geringe Wahrscheinlichkeit für zusätzlichen Kundennutzen	Geringe Einzelverbesserung der Supply Chain
3	Anlagentechnik vorhanden und qualifiziert, keine geeigneten Werkstoffe	Einzelne subtraktive Bearbeitung (z.B. Gewinde, Planfräsen)	Mittlere Wahrscheinlichkeit für zusätzlichen Kundennutzen	Grosse Einzelverbesserung der Supply Chain
4	Anlagentechnik vorhanden und qualifiziert, geeignete Werkstoffe nicht zertifiziert	Batch post-processing (z.B. Trowalisieren)	Hohe Wahrscheinlichkeit für zusätzlichen Kundennutzen	Geringe Mehrfachverbesserung der Supply Chain

Tabelle 2.4 – fortgesetzt

Bewertung	Technische Realisierbarkeit (BK <sub>1</sub> )	Post Processing Aufwand (BK <sub>2</sub> )	Kundennutzen (BK <sub>3</sub> )	OEM-Nutzen (BK <sub>4</sub> )
5	Anlagentechnik und Werkstoffe kommerziell verfügbar	Keine besondere Nachbearbeitung	Gesteigerter Kundennutzen sicher	Grosse Mehrfachverbesserung der Supply Chain

In [77] wird das grundlegende Prinzip einer expertenbasierten Potenzialbewertung im Kontext des Leichtbaus kritisiert. Mängel einer solchen Methode sind die subjektiven Perspektiven auf die Potenzialbewertungen, die sich ebenfalls auf die Priorisierung der Bewertungskriterien niederschlagen. Die Bewertungen, die auf Analogien zu bekannten Bauteilen beruhen, lassen keine konkreten quantitativen Aussagen über die Gewichtseinsparung des bewerteten Bauteils zu. Als weiterer Mangel wird benannt, dass der Erfahrungsschatz von bewertenden Personen begrenzt ist. Außerdem können in einer expertenbasierten Methode die oftmals vorliegenden komplexen Randbedingungen nicht berücksichtigt werden. [77]

## 2.7 Statistische Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung, im Englischen *Design of Experiments (DoE)* genannt, ist eine Methode, mit der das Verhalten von Systemen effizient untersucht werden kann. Diese Untersuchungen sind datenbasiert, wobei die Daten im technischen Kontext in der Regel aus praktischen Versuchen stammen. Effizienz bedeutet hier, dass die Anzahl der erforderlichen Versuche auf ein Minimum reduziert werden kann und die Ergebnisse der Versuche trotzdem statistisch abgesichert sind. Die Anwendung der Methode soll so den Aufwand hinter physischen Versuchsreihen minimieren und zugleich einen gesicherten Umgang mit der oftmals vorhandenen Streuung realer Systeme ermöglichen. Aus den in den Versuchen erzielten Ergebnissen wird ein auf Statistik basierendes mathematisches Modell abgeleitet, welches das Systemverhalten näherungsweise abbildet. [49, 80]

Einer der großen Vorteile der DoE ist laut [80] die Tatsache, dass die Methode weltweit standardisiert eingesetzt wird. Das trifft neben dem methodischen Ablauf an sich auch auf das Vokabular im DoE-Kontext zu. Die folgenden Begriffe sind von zentraler Bedeutung für die Anwendung der Methode. Die Definitionen entstammen [49] und [80]:

- **Systemgrenzen:** Wie oben beschrieben ist ein System der Untersuchungsgegenstand innerhalb der DoE. Dieses System wird durch seine eindeutigen Grenzen definiert. An den Grenzen des Systems liegen Ziel- und Einflussgrößen an.
- **Zielgrößen:** Zielgrößen sind Ergebnisse eines Versuchs. Durch sie wird die “Leistung” eines Systems ausgedrückt. Sie sind also der System-Output.
- **Einflussgrößen:** Einflussgrößen nehmen potenziell Einfluss auf die Ausprägung von Zielgrößen. Es gibt die sogenannten Steuergrößen und die sogenannten Störgrößen. Während sich Steuergrößen festlegen lassen und so aktiver Bestandteil von Untersuchungen sein können, lassen sich Störgrößen nicht festlegen.
- **Faktoren:** Die im Versuch zu untersuchenden beziehungsweise systematisch einzustellenden Einflussgrößen stellen die Faktoren dar.
- **Faktorstufen:** Die Untersuchungen der Faktoren geschieht durch die Variation der Werte dieser Faktoren. Die jeweilig festgelegten Werte oder Ausprägungen, die die Faktoren annehmen, werden Faktorstufen genannt.

Die oben erwähnten mathematischen Modelle beschreiben das Verhalten von Zielgrößen in Abhängigkeit von Einflussgrößen quantitativ. Die Basis für solche Modelle bildet die Regressionsanalyse. Es werden explizit Einflussgrößen und nicht nur Faktoren erwähnt, da auch nicht direkt eingestellte, aber beobachtete Einflussgrößen und ihre Effekte ausgewertet werden können. Bei der Regressionsanalyse wird ein mathematisches Modell vorgegeben, dessen Parameter dann bestmöglich auf die gesammelten Versuchsdaten angepasst werden. Das bestmögliche Modell wird erzielt, indem der Modellfehler, also die Abweichung zwischen dem Modell und den Versuchsdaten, minimiert wird. [49]

In [49] wird das Vorgehen anhand der einfachen linearen Regression erklärt. Wenn die Zielgröße  $y$  linear abhängig von der Einflussgröße  $x$  ist, dann gilt

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_i + \varepsilon_i. \quad (2.5)$$

Das  $\varepsilon_i$  entspricht hier dem zufälligen Fehler, der an der Stelle  $i$  gemacht wird. Diese Darstellung entspricht dem exakten Modell. Da eine Ermittlung des exakten Modells inklusive Fehlerterm so in Versuchen nicht möglich ist, wird mit sogenannten Schätzwerten gearbeitet. Durch die Einführung der Schätzwerte ergibt sich die Gleichung

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 \cdot x_i. \quad (2.6)$$

Die Parameter für das bestmögliche Modell bezüglich der ermittelten Messwerte ergibt sich durch

$$\sum_{i=0}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \textit{Minimum}, \quad (2.7)$$

wobei  $N$  die Anzahl der Messwerte darstellt, die in die Modellbildung einfließen. Es gibt eine Vielzahl von mathematischen Funktionen, die für die Modellbildung genutzt werden können. Durch die Wahl der Funktion variieren die Anforderungen an die Anzahl der Messwerte. Generell sollte die gewählte Funktion möglichst das reale Systemverhalten abbilden. Um dies im Vorfeld von Versuchen korrekt beurteilen zu können, ist oftmals Erfahrung notwendig. Da reale Systeme in den seltensten Fällen exakt durch ideale mathematische Funktionen abgebildet werden können, wird es bei aufgestellten Modellen zu Abweichungen zwischen der aufgestellten Funktion und den aufgenommen Messwerten kommen. Aus diesem Grund entsprechen die Modelle Ausgleichsfunktionen. [49]

Es gibt verschiedene statistische Werkzeuge, mit denen das erarbeitete Modell zu bewerten ist. Eine Größe ist das sogenannte Bestimmtheitsmaß  $r^2$ , das den Quotienten der Fehlerquadrate der Regression sowie der Fehlerquadrate insgesamt darstellt. Über das Bestimmtheitsmaß lässt sich ermitteln, welcher Anteil der Abweichungen von Modell zu Messwerten durch die Ausgleichsfunktion zustande kommt und welcher Anteil der Abweichungen auf Streuungen innerhalb der Messwerte basiert. Ein weiterer Aspekt bei der Modellbewertung ist der Korrelationskoeffizient. Durch ihn wird ausgedrückt, inwieweit ein linearer Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielgrößen besteht. Auch die direkte Auswertung der Residuen, also der Abweichungen zwischen Modell und Messwerten an den konkreten Stellen, ist ein sinnvolles Vorgehen. Neben der grafischen Auswertung bietet sich eine Betrachtung der Verteilung der Residuen an. Durch die Analyse der Residuen können Trends in den Daten und lokale Effekte identifiziert werden. Wird die Varianz in den Versuchsdaten betrachtet, können so Konfidenz-Intervalle für das mathematische Modell abgeleitet werden. Neben den gerade genannten gibt es viele weitere Aspekte, die einschlägiger Literatur entnommen werden können. Die hier beschriebenen Möglichkeiten zur Modellbewertung sollen nur als beispielhafter Beleg dafür dienen, dass es bei der statistischen Versuchsplanung nicht lediglich um die Versuchsplanung, sondern auch um die sinnvolle systematische Auswertung der aufgenommenen Daten geht. [49]

Für das Ermitteln der relevanten Messwerte müssen Versuche durchgeführt werden. Die Planung der Versuche ist ein wesentlicher Bestandteil der DoE und umfasst sowohl die Festlegung der Faktorstufen sowie deren Kombinationen als auch die Anzahl der Versuche insgesamt. Einen Einfluss auf die Versuchsplanung haben das Ziel der Untersuchungen, die Anzahl der Faktoren, die Anzahl der Faktorstufen, das mathematische Modell zur Systembeschreibung und die

erforderliche Genauigkeit der Auswertungen. Der vollfaktorielle Versuchsplan stellt vermutlich den am weitesten verbreiteten Versuchsplan dar. Bei seiner Anwendung werden alle Faktorstufen kombiniert untersucht. Das hat den Vorteil, dass die Effekte aller Faktoren voneinander getrennt untersucht werden können. Bei einer zu großen Anzahl an Faktoren beansprucht diese Art von Versuchsplan allerdings viele Ressourcen, da sich die Anzahl der durchzuführenden Versuche beziehungsweise die Anzahl der Faktorstufenkombinationen nach

$$m = n^p \quad (2.8)$$

berechnet. Hier entspricht  $n$  der Anzahl der zu untersuchenden Stufen und  $p$  der Anzahl der Faktoren. Es ist erkennbar, dass die Anzahl der Faktorstufenkombinationen mit steigender Anzahl der Faktoren stark ansteigt. Selbst bei zwei Stufen je Faktor existieren für die vollfaktorielle Untersuchung von vier Faktoren nach Gleichung 2.8

$$m = 2^4 = 16$$

Faktorstufenkombinationen. Um Effekte wie die Streuung der Messwerte zu berücksichtigen, sind in der Regel mehr Versuche als Faktorstufenkombinationen durchzuführen. Die Empfehlung für die Anzahl der Einzelversuche lautet

$$N = 60 \cdot \left( \frac{\sigma}{\Delta\mu} \right)^2 \quad (2.9)$$

Hierbei entspricht  $\sigma$  der Streuung innerhalb der Messwerte, ausgedrückt durch die Standardabweichung. Der Wert  $\Delta\mu$  steht für den kleinsten, technologisch relevanten Effekt, der durch die Versuche analysierbar sein soll. Als Beispiel sei hier die Untersuchung der Gründichte genannt, deren Messergebnisse bis auf eine spezifische Unsicherheit festgestellt werden sollen. Durch Gleichung 2.8 und Gleichung 2.9 wird ersichtlich, dass ein vermeintlich kleiner Versuchsraum schnell ein hohes Volumen annehmen kann, wenn er vollfaktoriell untersucht wird. Es gibt weitere Arten von Versuchsplänen, die sich die statistischen Zusammenhänge zu Nutzen und die gesamten Untersuchungen effizient durchführbar machen. Diese weiteren Arten von Versuchsplänen sind im konkreten Anwendungsfall einschlägiger Literatur zu entnehmen. [49]

## 3 Bauteilkategorisierung und -strategie

In diesem Kapitel wird ein Ansatz für die anwendungsbezogene Bauteilkategorisierung hergeleitet. Diese so entstehenden Bauteilkategorien beruhen auf Anforderungen, die für Bauteile gelten, sowie auf Eigenschaften der Bauteile. Auf der Basis dieser Kategorien wird die Bauteilstrategie formuliert. Bei dieser Strategie geht es um die Identifikation von Bauteilen, für die eine Fertigung mittels der im SIGNAL-Projekt vertretenen Technologien sinnvoll ist. Die Bauteilstrategie wird in einem sinnvollen Maße für die im SIGNAL-Projekt vertretenen Mobilitätsbranchen formuliert, wobei der Fokus auf dem Luftfahrt-Sektor liegt.

In dem SIGNAL-Projekt wird die Bauteilstrategie Anwendung finden, um geeignete Demonstrator-Bauteile zu identifizieren. Hierbei sollen die Eigenschaften der verschiedenen Technologien sichtbar gemacht werden. Aus diesem Grund werden die Technologien nach der Formulierung der Bauteilstrategie gegenübergestellt. Anschließend wird ein Spektrum von Bauteileigenschaften ermittelt, welches die Demonstratoren innerhalb des Projektes abbilden sollten.

Es folgt ein abschließendes Unterkapitel, in welchem das Vorgehen innerhalb der Bauteilstrategie zusammenfassend betrachtet wird.

### 3.1 Besonderheiten der verschiedenen Branchen

Die Anforderungen an Bauteile und die dazugehörigen Zulassungsprozesse sind je nach Branche verschiedenartig ausgeprägt und dokumentiert. Die folgenden Abschnitte sollen in die verschiedenen Rahmenbedingungen einführen. Die Rahmenbedingungen bilden die Basis für die branchenabhängige Bauteilstrategie.

#### 3.1.1 Besonderheiten des Luftfahrt-Sektors

Bei der Definition der Anforderungen innerhalb der Luftfahrt beeinflusst die Art des Flugzeugs die zutreffenden Regelwerke. Für durchschnittliche Passagierflugzeuge gibt es den Standard CS-25, welcher der "Airworthiness code" für "large aeroplanes" ist und von der *European Union*

Aviation Safety Agency (EASA) herausgegeben wird [34]. Die CS-25 umfasst inklusive der Anforderungen an die Nachweise, *Acceptable Means of Compliance (AMC)* genannt, ca. 1400 Seiten. An dieser Stelle sollen deshalb nicht alle Inhalte betrachtet und bewertet werden. Vielmehr geht es darum, aufzuzeigen, welche Arten von Anforderungen dem Regelwerk entstammen, welche dieser Anforderungsarten im Kontext dieser Arbeit besonders relevant sind und wie die entsprechenden Nachweise für die Erfüllung der Anforderungen zu gestalten sind.

In dem Code ist festgehalten, wie die Lufttüchtigkeit eines Flugzeuges definiert ist und wie sie nachgewiesen werden kann. Diese Angaben erstrecken sich von den Flugbedingungen und dadurch wirkenden Kräften, über die Anforderungen an die Bauteilauslegung und sicherheitsrelevantes Equipment, bis zu den erlaubten Verformungen und Schadenstoleranzen. In dem Regelwerk wird definiert, welche mechanischen Komponenten eines Flugzeuges durch Versagen zu einem Absturz des Flugzeuges (“catastrophic failure”) führen können. Diese Komponenten werden in [34] als Struktur (“structure”) bezeichnet. Eine gängige Bezeichnung ist nach [74] *Primärstruktur*. Demgegenüber stehen mechanische Komponenten, deren Ausfall nicht zu einem Absturz führen könnte. Diese Komponenten werden nach [74] als *Sekundärstruktur* bezeichnet. In [34] wird die Primärstruktur detaillierter betrachtet und Bauteile definiert, die “empfindlich sind für Ermüdungsrisse, die zu einem katastrophalen Ausfall des Flugzeugs führen können.” [34, S. 267] Diese Bauteile werden in der Norm als *fatigue critical structure (FCS)* bezeichnet. Übergeordnet werden Komponenten, die zur Primärstruktur gehören, in dem Regelwerk als *principal structure element (PSE)* bezeichnet. [34]

Für mechanische Bauteile gibt es diverse Anforderungen an die Auslegung. Im Kontext der Last gilt es, einen Sicherheitsfaktor von 1,5 für die definierte Grenzlast zu berücksichtigen, um Komponenten der Struktur zu dimensionieren. Ebenso ist das vorgegebene Verhalten der Strukturen sowohl unter dieser Grenzlast wie auch unter der Bruchlast zu berücksichtigen. Dieses Verhalten ist zudem für sämtliche kritische Landungsbedingungen nachzuweisen. Auch die Anforderungen der Schadenstoleranz an die Struktur sind für verschiedene zutreffende Lastkollektive definiert. Neben der CS-25 gibt es weitere Standards, die die Anforderungen an Luftfahrzeuge und ihre Komponenten regeln. Einer dieser Standards ist die DO-160, in der die Testvorgänge für Luftfahrzeug-Equipment unter verschiedenen Gesichtspunkten definiert sind. Dieses Regelwerk beschränkt sich nicht auf eine spezielle Luftfahrzeug-Kategorie, sondern beinhaltet Vorgaben für Applikationen in kleinen und großen Flugzeugen sowie Helikoptern. [67]

Der Fokus der praktischen Implementierung der sinterbasierten Prozessrouten liegt auf Leichtbau-Komponenten aus der Luftfahrt. Hierfür sollen die Rahmenbedingungen betrachtet werden, die für ein fertiges Unternehmen im Luftfahrt-Sektor gelten. Die DIN EN ISO 9001 bildet nicht umfänglich die Anforderungen der Luftfahrtindustrie ab, weswegen die Europäische Norm 9100 als

das grundlegend geltende Qualitätsregelwerk in Europa entwickelt wurde [23]. Es gibt entsprechende analoge Qualitätsregelwerke für die anderen Teile der Welt. Durch eine internationale Vereinbarung ist die Austauschbarkeit dieser Qualitätsregelwerke untereinander gegeben. Die behördliche Zulassung von Luftfahrtbetrieben ist in Deutschland durch die EASA geregelt. Herstellungsbetriebe, die nach Part 21/G der EASA genehmigt sind, dürfen luftfahrttechnische Produkte fertigen und die Konformität dieser Produkte nach EASA bescheinigen [45]. Dabei ist das Regelwerk Part 21/G ein Teil des Part 21, der sich wiederum mit der “Durchführungsbestimmung Erstmalige Lufttüchtigkeit” befasst [45]. Ist das Unternehmen nicht nur ein Herstellungsbetrieb von Luftfahrt-Komponenten sondern auch ein Instandhaltungsbetrieb, muss für diesen Bereich eine behördliche Zulassung nach Part 145 der EASA vorliegen [33].

Gerade im Kontext der zuliefernden Unternehmen sind außerdem die jeweiligen internen Regelwerke und Standards der zu beliefernden OEMs relevant. Die möglichen Strategien für AM-Bauteile ergeben sich für einen Luftfahrt-Zulieferer aus den Rahmenbedingungen, die unter anderem innerhalb der Aufträge dieser OEMs gesetzt werden. Bauteile werden prinzipiell unterschieden zwischen Zeichnungsteilen und Normbauteilen. Zeichnungsteile sind nur für einen speziellen Flugzeugtyp zugelassen, während Normbauteile für verschiedene Flugzeugtypen verwendbar sind. Neben dieser Unterscheidung, die sich speziell auf die Zulassung der Bauteile auswirkt, bestehen weitere Unterschiede mit Blick auf die möglichen verschiedenen Szenarien für die Entwicklung von Komponenten. Ein mögliches Extrem ist, dass die volle Entwicklungsverantwortung für das Bauteil beim Zulieferer liegt. Das bedeutet, dass der Zulieferer vom OEM lediglich abstrakte Anforderungen erhält, die das zu entwickelnde Bauteil erfüllen muss. Diese Anforderungen beinhalten zum Beispiel notwendige statische und dynamische Eigenschaften des Bauteils sowie die Anzahl der anzunehmenden Lastzyklen. Das gegensätzliche Extrem hierzu ist, dass der Zulieferer auf Bestellung die reine Auftragsfertigung übernimmt. Das hat zur Folge, dass die Bauteilgestalt, der Werkstoff, das Herstellungsverfahren und weitere Bedingungen durch dem OEM festgelegt sind. Szenarien, die sich zwischen diesen beiden Extremen verorten lassen, gehören ebenfalls zur Realität. Als Beispiel sei ein Szenario genannt, bei dem das Halbzeug für das herzustellende Bauteil durch einen OEM-internen Standard vorgegeben ist. Ist dieses Halbzeug ein Rundmaterial, hat dies implizit zur Folge, dass sich dieses Bauteil nicht mittels AM umsetzen lässt. Ein anderes Beispiel ist die vorgegebene Prozessspezifikation seitens des OEMs, durch die die Möglichkeiten der Fertigung eingeschränkt werden. [41]

Mit Blick auf die gesamte Fertigungs-Prozesskette ist es wichtig, dass alle Beteiligten die Anforderungen an Luftfahrt-Betriebe (s.o.) erfüllen. Dies trifft auch auf vermeintlich indirekt Beteiligte, wie zum Beispiel den Hersteller eines Umformwerkzeuges, welches für die Fertigung von Luftfahrt-Bauteilen genutzt wird, zu. Die Strategie eines Luftfahrt-Zulieferers im Kontext

der AM zielt vor allem in Richtung der Gewichtseinsparung. Eine wirtschaftlichere Verbesserung der Fertigung durch AM ist ebenso anzustreben. Die bloße Fertigung von Ersatzteilen birgt voraussichtlich vor allem langfristig weitere Potenziale für die AM. [41]

#### 3.1.2 Besonderheiten des Bahn-Sektors

Für Schienenfahrzeuge gibt es diverse geltende Normen und Standards. Analog zu der Luftfahrt gibt es Bauteile und Strukturen von Schienenfahrzeugen, deren Versagen potenziell zu einem katastrophalen Ausfall des Fahrzeugs führen kann. Eine relativ große Kategorie dieser Strukturen sind die Bestandteile des Wagenkastens, welcher die “tragende Hauptstruktur oberhalb der Fahrwerke” [21, S. 6] darstellt. Die Anforderungen an die Festigkeit und Auslegung dieser Wagenkästen ist in verschiedenen veröffentlichten Normen wie [21] geregelt. Außerdem sind mechanischen Anforderungen an die *Befestigung der Ausrüstungsgegenstände* festgehalten. Diese Befestigung meint auch “alle dazugehörigen lokalen Tragstrukturen oder Rahmen, welche die Ausrüstungsgegenstände mit dem Wagenkasten verbinden” [21, S. 7]. Als Beispiel für so eine Befestigung sei die Kupplung eines Wagenkastens genannt. In der Norm wird angemerkt, dass Ausrüstungs- und Montageteile nicht als Bestandteile des Wagenkastens gezählt werden, deren Befestigungselemente allerdings schon. Die Anforderungen sind in Form eines Abnahmeprogramms zusammengefasst. Durch dieses Programm soll die “geforderte Lebensdauer unter normalen Betriebsbedingungen” [21, S. 29] erreicht werden und die Struktur des Wagenkastens den maximalen Lasten, unter Berücksichtigung der Betriebsanforderungen, standhalten. Der Umfang des Abnahmeprogramms hängt davon ab, ob der Wagenkasten eine Neukonstruktion oder eine Weiterentwicklung einer bestehenden Konstruktion ist. [21]

Ein weiteres Beispiel für solche kritischen Komponenten sind die Drehgestelle und die dazugehörigen Rahmen. In [22] werden die Festlegungsverfahren für die Festigkeitsanforderungen an solche Drehgestellrahmen definiert. Nach der Norm ist der Drehgestellrahmen ein “tragendes Bauteil, im Allgemeinen zwischen Primär- und Sekundärfederung angeordnet” [22, S. 6]. Neben Normen für den Umgang mit solchen kritischen Strukturen gibt es viele weitere Normen, die sich zum Beispiel mit Anforderungen an Festigkeitsnachweise generell, Anforderungen an Schweißteile oder mit dem systematischen Aufbau eines Schienenfahrzeugs im Kontext der Funktionsgruppen befassen.

Die durch die gerade erwähnten Normen entstehenden Anforderungskategorien werden in einem Dokument des Unternehmens *Deutsche Bahn AG (DB)* erkennbar: der *Liste güteprüfpflichtiger Produkte (LGP)*. Der Zweck dieses DB-internen, aber öffentlich zugänglichen Standards ist die Beschreibung von “qualitätssichernden Maßnahmen, die bei der Beschaffung von Schienenfahr-

zeugen und Schienenfahrzeugteilen [...] mindestens durchzuführen und nachzuweisen sind.” [18, S. 2] In diesem Standard werden die Anforderungen an Prozesse und Bauteile konkretisiert. Es erfolgt eine Einstufung von Komponenten in sogenannte Prüfklassen, welche von der Beschaffenheit der jeweiligen Komponente mit Blick auf die Komplexität und die Prüfbarkeit abhängt. Die erste Klasse (*PK1*) bedeutet für den Bauteile-Hersteller, dass eine *Qualitätsunabhängige Lieferantenüberwachung (QLÜ)* stattfinden, eine Erstmusterprüfung durchgeführt werden und ein Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach DIN EN 10204 ausgestellt werden muss. Für ein Bauteil der zweiten Klasse (*PK2*) entfällt die QLÜ. Gehört das Bauteil zur dritten Prüfklasse (*PK3*), ist nur noch ein Abnahmeprüfzeugnis fällig. Weiterhin gibt es Komponenten, die keiner Prüfklasse zugeordnet sind. Für diese Komponenten bestehen keine weiteren Anforderungen an Qualitätssicherungsmaßnahmen. Die eigentliche Liste der güteprüfungspflichtigen Produkte besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil listet komplette Schienenfahrzeuge sowie dazugehörige Aktionen und Prozesse auf. Diese Aktionen und Prozesse dienen der Qualitätssicherung. Deren spezifische Anforderungen sind in der LGP definiert. [18]

Im zweiten Teil der Liste sind Schienenfahrzeugteile aufgeführt. Die Auflistung erfolgt hierarchisch nach dem Top-Down-Prinzip auf verschiedenen Strukturebenen. Das erste Fahrzeugteil ist der *Fahrzeugkasten*, welcher insgesamt 228 Einträge in der Liste umfasst. Dabei sind Komponenten aufgeführt, die bis auf die fünfte Strukturebene zurückzuführen sind. Insgesamt gibt es in der Liste neun Fahrzeugteile der ersten Strukturebene. Alle weiteren aufgeführten Fahrzeugteile ordnen sich nach der Logik der Liste also in die folgenden Fahrzeugteile ein:

- Fahrzeugkasten
- Fahrwerk / Laufwerk / Drehgestell
- Energieversorgung
- Antriebssystem
- Bremssystem
- Hilfs- und Nebenbetriebeversorgung
- Innenraum
- Zentrale Steuerung und Kommunikation
- Betriebsleittechnik

Anhand der Prüfklassen der Bauteile und den damit verbundenen Qualitätssicherungsmaßnahmen lassen sich die Komponenten im Kontext der Nachweisführung kategorisieren. Diese Nachweisführung ist bei der Bahn ein wichtiger Aspekt für die Strategie der Ersatzteile und die so entstehenden Make-or-Buy-Entscheidungen [78].

Neben den Anforderungen an die Auslegung von Bauteilen, die für kritische Komponenten unter anderem durch die oben genannten Normen definiert werden, bestehen weitere Anforderungen. Es gilt grundlegend, dass zuliefernde Fertigungsbetriebe die Anforderungen aus der ISO 9001 [24] erfüllen müssen. Für die Fertigung von AM-Bauteilen, müssen die entsprechenden Prozesse des fertigen Unternehmens zudem nach der DIN EN ISO 52920 [28] qualifiziert sein. Die Anforderungen dieses Standards betreffen die gesamte Prozesskette der Produktentstehung, von dem Umgang mit Daten, über die Qualifizierung der Mitarbeitenden, bis hin zur Infrastruktur der Fertigungsstätte. Ist ein Prozess entsprechend [28] qualifiziert, sind seine Prozessparameter in der Regel fixiert. Dafür entfällt die Notwendigkeit von zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen wie dem *casting factor* aus dem Luftfahrt-Bereich.

Die DB ist als assoziierter Partner in das SIGNAL-Projekt eingebunden. Die DB verwendet AM im Sinne der verschiedenen *Rapid-Methoden*: für Endbauteile (RM), für Werkzeuge (RT) und für den Prototypenbau (RP). Neben dem Betrieb von Schienenfahrzeugen fungiert das Unternehmen vor allem als Instandhalter dieser Fahrzeuge und nicht als Entwickler. Die Rahmenbedingungen, unter denen die Bauteilfertigung generell und die Fertigung von AM-Bauteilen im Speziellen stattfinden, weichen dadurch stark von denen eines selbst entwickelnden Unternehmens ab. Es werden Ersatzteile für bereits bestehende Komponenten produziert. Diese Komponenten werden in der Regel nicht mittels AM gefertigt, ihre Gestaltung ist also nicht auf diese Verfahrensart ausgelegt. Die Gestalt dieser Bauteile ist veränderbar. Bei DB gilt in diesem Kontext die Faustregel "Form, Fit and Function". Das bedeutet, dass die produzierten Ersatzteile die Gestalt des zu ersetzenden Teils besitzen müssen, dass sich die Einbausituation des Bauteils nicht verändert und dass das Ersatzteil dieselben Funktionen wie das zu ersetzende Bauteil erfüllen muss. Ist dies der Fall, kann sowohl das Fertigungsverfahren als auch der Werkstoff gegenüber dem zu ersetzenden Bauteil abweichen. Der Prozess des Ersatzteil-Einbaus erfolgt im Rahmen einer sogenannten *instandhaltungstechnischen Maßnahme*. Aus diesem Grund ist auch die Fahrzeugzulassung nicht von diesem Vorgang betroffen. Aus den Rahmenbedingungen ergibt sich die Strategie für den Einsatz von AM bei der DB. Die Auswahl potenzieller AM-Bauteile bei der Bahn läuft zum Teil nachfragebasiert. Auf die Nachfrage folgt eine Überprüfung des Bauteils auf technische, rechtliche und wirtschaftliche Eignung durch das AM-Competence Center der DB. Neben dem gerade beschriebenen Vorgehen werden Bauteile zudem strategisch für die Fertigung via AM ausgewählt. Hierfür wird sich an Bauteilen orientiert, die relativ klein sind, aus Kunststoff bestehen und keine tragende Funktion besitzen. Dies sind Bauteile, die keine Prüfklasse innerhalb der LGP besitzen. Es gibt aber auch für diese Bauteilauswahl einschränkende Faktoren, wie den Brandschutz oder die mögliche Farbgebung der Bauteile. Eine weitere Strategie der Auswahl potenzieller AM-Bauteile beruht auf dem wirtschaftlichen Zusammenspiel von Bauteil- und La-

gerhaltungskosten sowie Lieferzeiten. So sind Bauteile, die relativ teuer sind und selten gebraucht werden potenziell interessant, wenn diese noch dazu lange Lieferzeiten besitzen. Ein bewährtes Vorgehen für diese Teile, die ursprünglich oftmals mittels Guss-Verfahren hergestellt werden, ist die indirekte AM. Ein gängiger Weg ist die Herstellung einer verlorenen Gussform aus Sand mittels Binder Jetting. Der Guss-Vorgang wird extern durchgeführt, wodurch kein Mehraufwand bezüglich der Nachweisführung des Bauteils für die DB entsteht. [78]

Anhand der Rahmenbedingungen und der daraus entwickelten Strategien der DB wird ersichtlich, dass die Berechtigung der AM in diesem Kontext durch rein wirtschaftliche Faktoren gegeben ist. Eine Performancesteigerung oder Gewichtseinsparung der Bauteile sind keine Argumente für AM.

#### 3.1.3 Besonderheiten des Automotive-Sektors

Ähnlich zum Sektor der Luftfahrt ist für den Automotive-Sektor nicht nur die ISO 9001 als übergeordnetes Qualitätsregelwerk relevant. Im Gegensatz zur Luftfahrt ist jedoch nicht die Austauschbarkeit geltender regionaler Standards gegeben. Vielmehr wurde durch die *International Automotive Task Force (IATF)* der globale Standard *IATF 16949* [1] eingeführt. Die IATF ist ein Verband, bei dem viele der größten Automobilhersteller Mitglieder sind. Die Einführung von [1] beruht auf den speziellen Anforderungen der Industrie, in der viele Unternehmen interkontinental agieren. Zielsetzung der Einführung war es, inhaltlich redundante Zertifizierungsprozesse zu vermeiden. Der Standard fungiert als Ergänzung zur ISO 9001 und befasst sich mit der Einführung und Unterhaltung von Qualitätssystemen in allen Bereichen der Automobilindustrie. [73] Es besteht eine Vielzahl weiterer Standards für sämtliche Bereiche des Automotive-Sektors. So gibt beispielsweise der *Verband der Automobilindustrie (VDA)* spezielle Regelwerke heraus. Auch existieren zulassungsrelevante Normen wie [25], die sich nicht exklusiv auf den Automotive-Sektor beziehen. In diesem Regelwerk werden die Anforderungen an Labore und Prüfstände definiert, die z.B. für die Bauteilabnahme benötigt werden.

Generell gilt für den Automotive-Sektor, dass die Details der Zulassung in OEM-internen Normen und Standards geregelt werden. Eine Einsicht in diese Regelwerke ist nicht ohne weiteres möglich, da in ihnen viel Expertise des jeweiligen OEMs gebündelt ist, die von Externen wirtschaftlich verwertbar wäre. [44]

Die Zulassung von Bauteilen ist unter anderem über die genutzten Fertigungsverfahren und deren Erzeugnisse geregelt. Bei der Auslegung eines Bauteils werden die anliegenden Lastkollektive sowie die Bauteilgeometrie betrachtet. Darauf aufbauend werden die Lebensdauer und das bruchmechanische Verhalten dieses Bauteils analysiert. Die Basis für diese Analyse bilden die

Eigenschaften des verwendeten Werkstoffs. Diese zuvor ermittelten Werkstoffeigenschaften beziehen sich dabei immer auf eine spezifische Fertigungsmethode oder eine spezifische Abfolge an Fertigungsmethoden, mit denen dieser Werkstoff verarbeitet wurde. Die Zulassung eines Werkstoffs erfolgt immer in Kombination mit den verwendeten Fertigungsverfahren. [36]

Dieser Freigabeprozess erfolgt in drei Phasen (*Prinzip-tauglichkeit*, *Konzept-tauglichkeit* und *Serientauglichkeit*) und kann bis zu drei Jahre dauern. Für den Abschluss einer jeweiligen Zulassungsphase müssen die Ergebnisse statistisch abgesichert vorliegen. Die Anforderungen an diese statistische Absicherung steigen mit dem Fortschreiten der Zulassungsphasen. Die Vorgaben für den Freigabeprozess sind OEM-intern definiert und nicht öffentlich verfügbar. Als generelle Kriterien für die Freigabe sind jedoch die folgenden Aspekte zu nennen:

- Mögliche Verarbeitung mittels Fügetechnik
- Oberflächeneigenschaften des Werkstoffs
- Korrosionsverhalten des Werkstoffs
- Verschleißverhalten
- Festigkeit
- Steifigkeit
- Verhalten im Kontext von Crashes
- Akustisches Verhalten
- Umformbarkeit

Sofern einer der aufgeführten Aspekte mit Blick auf die Anwendung für einen Werkstoff nicht relevant ist, kann er für die anwendungsbezogene Freigabe vernachlässigt werden. Als Beispiel sei hier die Freigabe eines Gusswerkstoffs genannt, dessen Umformbarkeit im Freigabeprozess nicht berücksichtigt wird. [44]

Die verschiedenen Tauglichkeiten eines Werkstoffs wirken sich auf seine Einsatzmöglichkeiten aus. Um Potenziale verschiedener Werkstoffe und Verfahren zu identifizieren, ist eine Definition dieser Tauglichkeiten hilfreich. Die Prinzip-tauglichkeit ist gegeben, wenn die Umsetzung grundlegend gewährleistet ist. Dabei werden nicht die realen Einsatzbedingungen eines Fahrzeuges und seine Lebensdauer berücksichtigt. Nach [65] werden bei der Konzeptentwicklung alle wertschöpfenden Bereiche aktiv beteiligt. Ein wesentlicher Aspekt der Konzeptentwicklung ist die Entwicklung eines Technikmodells. In diesem Modell sollen sämtliche Anforderungen der mechanischen Ebene an das Konzept einfließen. Es ist auch als virtuelles mechanisches Gesamtfahrzeug zu sehen. Dieses Modell bildet die Grundlage für die Konstruktionssystematik und die Berechnung der einzelnen Komponenten. Ein reales, fahrbares Fahrzeug ist ein Werkzeug, um einen Konzeptentwurf abzusichern. So bildet dieses Fahrzeug auch die Grundlage für Kalkulationen und Machbarkeitsüberprüfungen. Die Serienentwicklung eines Fahrzeuges umfasst neben

der Konkretisierung von Geometrien auch vielerlei praktische Tests, die das Verhalten des fertigen Fahrzeuges untersuchen. Es ist in der Regel so, dass im Rahmen der Konzeptentwicklung bereits ein Portfolio an möglichen standardisierten (freigegebenen) Fertigungsverfahren aufgestellt wurde. Für die Umsetzung in der Serienentwicklung gilt es dann die entsprechenden Verfahren auf Basis der Serien-Konstruktionen auszuwählen und zu erproben. [65, 60]

Für die Zulassung von AM-Bauteilen gelten dieselben Anforderungen wie für die restlichen Verfahren. Ist eine Werkstoff-Verfahrens-Kombination für die Serienfertigung freigegeben, kann sie in diesem Kontext verwendet werden. Die Vorteile der AM werden nach [44] jedoch überwiegend nicht in der Serienfertigung ausgereizt. In der Konzeptphase wird AM für den Prototypenbau von Komponenten genutzt, um die Fertigungszeiten relativ gering zu halten. Dadurch verringern sich die Produktentwicklungszeiten insgesamt und somit ebenfalls die Time-to-Market. Die Individualisierung von Interieur und Exterieur ist ebenfalls ein Bereich, in dem AM innerhalb des Automotive-Sektors wirken kann. Analog zum Luftfahrt- und Bahn-Bereich ist die langfristige Ersatzteilversorgung ein Feld mit Potenzial für AM. Dieses Vorgehen ist, in Abhängigkeit der Bauteile, heute schon Realität in der Branche. Ein weiterer strategisch relevanter Bereich ist die Kleinserie. Auch in diesem Bereich ist die Stückzahl der Teile der Faktor, der den wirtschaftlichen Einsatz von AM bedingt. [44]

## 3.2 Identifikation relevanter Anforderungen

Nach [10] lassen sich Anforderungen kategorisch abbilden. **Tabelle 3.1** zeigt die entsprechenden Kategorien, die im Buch in Form einer Checkliste aufgeführt sind. In der originalen Checkliste ist noch eine weitere Ebene mit konkreteren Anforderungen vorhanden, die hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gezeigt wird. Im Kontext dieser Arbeit sind nicht alle in der Liste aufgeführten Kategorien, die häufig Bauteil-Anforderungen sind, relevant.

Tabelle 3.1: Anforderungskategorien nach [10]

Übergeordnete Kategorie	Untergeordnete Kategorie
Organisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planung</li> <li>• Nachhaltigkeit</li> <li>• Markt</li> </ul>
Konzept	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stoff</li> <li>• Energie</li> <li>• Signal</li> <li>• Geometrie</li> <li>• Mechanik</li> <li>• Elektrik/Elektronik</li> <li>• Software</li> <li>• Sicherheit</li> <li>• Ergonomie</li> <li>• Industrial Design</li> </ul>
Produktlebensphasen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einkauf</li> <li>• Fertigung</li> <li>• Kontrolle</li> <li>• Montage</li> <li>• Instandhaltung</li> <li>• Recycling</li> <li>• Transport</li> <li>• Gebrauch</li> </ul>

Aus der übergeordneten Kategorie *Organisation* gibt es Punkte, die für den Business Case der AM-Bauteile relevant sind. Dazu gehören unter anderem die Amortisation, der Liefertermin oder das Unternehmens-Know-how [10]. In der Unterkategorie *Planung* werden unter anderem die Herstellkosten und Anforderungen an Lieferzeiten des Bauteils betrachtet. Unter der Unterkategorie *Nachhaltigkeit* wird die Betrachtung der Öko-Bilanz und der Energieeffizienz vorgenommen. Die beiden gerade beschriebenen Kategorien sind relevante Faktoren für die Kategorisierung der Bauteile.

Die potenziell umzusetzenden Bauteile sind mechanische Komponenten. Dadurch entfallen innerhalb der Kategorie *Konzept* die Kategorien *Signal*, *Elektrik/Elektronik*, *Software* und *Ergonomie*. Es ist prinzipiell möglich, dass Anforderungen an das *Industrial Design* von mechanischen

Bauteilen bestehen. Im SIGNAL-Projekt ist dies jedoch nicht gegeben. Die Kategorie *Energie* ist für die weitere Betrachtung ebenfalls nicht zu berücksichtigen. Auch wenn die Bauteile durch mechanische Lasten und daraus entstehende Verformungen Energie aufnehmen, ist dies lediglich eine implizite Anforderung. Anforderungen an den Wirkungsgrad o.ä. sind in diesem Kontext nicht sinnvoll.

Als potenzielles Kriterium für die Bauteilstrategie ist der Aspekt *Recycling* nicht geeignet, da die Zielsetzung der Nachhaltigkeit des Projektes auf den ressourcenschonenden Prozessrouten sowie der Gewichtseinsparung liegt. Auch die Kategorie *Transport* ist nicht näher zu betrachten, da die Geometrien der modifizierten Bauteile durch den Bauraum der AM-Anlagen begrenzt sind. Da es um bestehende Bauteile geht, die mittels AM gefertigt werden sollen, besteht die entsprechende Infrastruktur für den Transport der Bauteile bereits. Dadurch ergeben sich aller Voraussicht nach keine besonderen Anforderungen an den Transport. Der Aspekt der *Sicherheit* wäre nur mit seinen einzelnen Merkmalen wie z.B. Betriebssicherheit und Arbeitssicherheit keine Kategorie, die ausschlaggebend für die anwendungsbezogene Kategorisierung von Bauteilen ist. Da die Risikobeurteilung der Bauteil-Anwendung jedoch wesentlich im Kontext dieser Arbeit ist, ist die übergeordnete Kategorie der *Sicherheit* zu berücksichtigen. Die Kategorie *Einkauf* entfällt ebenfalls aus der Betrachtung, da es explizit um Bauteile aus der eigenen Fertigung geht. Dass sich im Kontext der *Montage* spezifische Anforderungen abbilden, die für eine Kategorisierung geeignet sind, ist nicht abzusehen. Aus dem gerade Beschriebenen ergibt sich die **Tabelle 3.2**. Hier sind die als relevant betrachteten Kategorien aufgeführt.

Tabelle 3.2: Relevante Anforderungskategorien in Anlehnung an [10]

Übergeordnete Kategorie	Untergeordnete Kategorie
Konzept	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stoff</li> <li>• Geometrie</li> <li>• Mechanik</li> <li>• Sicherheit</li> </ul>
Produktlebensphasen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fertigung</li> <li>• Kontrolle</li> <li>• Instandhaltung</li> <li>• Gebrauch</li> </ul>
Organisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planung</li> <li>• Nachhaltigkeit</li> </ul>

Im Folgenden werden die aufgelisteten Kategorien und die in ihnen enthaltenen Anforderungs-Aspekte der Reihenfolge nach betrachtet. Die Kategorie *Stoff* berücksichtigt die chemischen Eigenschaften (z.B. Giftigkeit) und die physikalischen Eigenschaften (z.B. Wärmeleitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit, Entflammbarkeit) der verwendeten Werkstoffe des betrachteten Produkts. Für diese Aspekte gibt es je nach Anwendung Anforderungen an Bauteile, die erfüllt sein müssen. Diese Aspekte ergeben sich aus teils sehr speziellen Anwendungsfällen. Da diese Anwendungsfälle in ihrer Gänze nicht bekannt sind, werden die Anforderungen an die chemischen und physikalischen Eigenschaften an die Bauteile für die Kategorisierung erst einmal vernachlässigt. Die mechanischen Anforderungen an die Werkstoffe sind jedoch von höchster Relevanz. Diese spiegeln sich in dem Anforderungs-Aspekt des bisher für das Bauteil genutzten Werkstoffes wider.

In der Kategorie *Geometrie* wird der Anforderungs-Aspekt der Bauteil-Abmaße betrachtet. Dieser ist nicht direkt zur späteren Bewertung einzelner Bauteile geeignet, allerdings sind die maximal fertigmöglichen Abmaße durch die Bauräume der genutzten Maschinen limitiert. Nach [10] ist der Kategorie *Geometrie* ebenfalls die Anforderung an die Anzahl der zu fertigenden Bauteile zugeordnet. Diese Anforderung ist für die Bauteilkategorisierung wesentlich. Ein Aspekt, der sich aus den Anwendungen für diese Kategorie ergibt, ist die Gestaltungsfreiheit. Im Kontext der Bauteilstrategie ist dieser Aspekt ebenfalls wichtig.

Für die Kategorie *Mechanik* sind Anforderungen an das Bauteilgewicht sowie die zu ertragenden Lasten relevant. Nach [77] sind die Potenziale, die mit der generativen Fertigung eines Bauteils einhergehen, hoch, wenn dieses Bauteil eine hohe Belastung erfährt. Mit Blick auf das Potenzial der Bauteile für eine Herstellung mittels AM ist nicht nur das Gewicht relevant, sondern ebenfalls das Bauteilvolumen. Neben der Kategorisierung der Last insgesamt, sind die Anforderungen an Steifigkeit und Schadenstoleranz wesentlich für die Bauteilstrategie.

Ein Aspekt der Kategorie *Fertigung* ist die größte fertigmögliche Bauteil-Abmessung. Dieser Aspekt wird so bereits in der Kategorie *Geometrie* berücksichtigt (s.o.). Ein anderer Aspekt ist das bisher bevorzugte Fertigungsverfahren, welches dem derzeitigen Herstellungsverfahren des Bauteils entspricht. Ebenfalls der der Kategorie *Fertigung* zugeordnet ist der Aspekt der Bauteiltoleranzen.

Die Kategorie *Sicherheit* findet, wie oben beschrieben, durch den Punkt der Risikobewertung der Bauteil-Anwendung Berücksichtigung innerhalb der Bauteilkategorisierung.

Aus der Kategorie *Instandhaltung* werden die Aspekte der Wartungsfreiheit, des Wartungsaufwandes und der Instandsetzung für die Bauteilstrategie berücksichtigt.

In der Kategorie *Gebrauch* ist der Aspekt der Bauteil-Anwendung (z.B. Prototyp, Vorrichtungsbau) relevant. Es gibt weitere Aspekte dieser Kategorie, die für die Kategorisierung und somit später die Bauteilstrategie von Relevanz sein könnten. So ist der Aspekt der Struktur zu nennen.

Es geht bei diesem Aspekt darum, ob das Bauteil seinen eigentlichen Zweck als einzelne Komponente oder in einer Baugruppe erfüllt. Werden Baugruppen betrachtet, kann die Funktionsintegration dieser Baugruppen innerhalb eines Bauteils ein relevantes Kriterium für die Fertigung mittels AM sein. Der Einsatzort des Bauteils und die damit einhergehenden Witterungsbedingungen sind ebenfalls potenziell relevant. Da die Werkstoff-Eigenschaften wie oben beschrieben im Detail nicht bekannt sind, entfällt eine praxisgerechte Kategorisierung und somit die Berücksichtigung an dieser Stelle. In der praktischen Umsetzung der Bauteilstrategie ist dieser Aspekt jedoch zu beleuchten.

Die Kategorie *Planung* findet durch die Herstellkosten, dem Aspekt der bestehenden Supply Chain sowie den Liefer- bzw. Herstellzeiten Berücksichtigung.

Als letzte Kategorie wird die *Nachhaltigkeit* und mit ihr die Aspekte der Öko-Bilanz sowie der Energieeffizienz berücksichtigt. Eine Auswahl der Bauteile soll jedoch nicht direkt basierend auf den Nachhaltigkeits-Aspekten erfolgen. Vielmehr soll die Betrachtung der Nachhaltigkeit durch Fallstudien realer Bauteile auf Basis verschiedener Aspekte erfolgen.

## 3.3 Bauteilstrategien

Im Folgenden sollen die Ansätze für die Bauteilstrategien der jeweiligen Mobilitätssektoren hergeleitet werden. Dies geschieht auf Basis der oben beschriebenen Aspekte der Bauteil-Anforderungen. Aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen gestaltet sich die Bauteilstrategie für die jeweiligen Branchen unterschiedlich. Aufgrund der Rahmenbedingungen des SIGNAL-Projektes liegt der Fokus auf dem Luftfahrt-Sektor.

### 3.3.1 Bauteilstrategie für den Luftfahrt-Sektor

Im Rahmen der Bauteilstrategie sollen die Bauteile mit dem größten Potenzial für die Fertigung durch die ausgewählten Prozessrouten identifiziert werden. Dieses Potenzial wird durch die Methode der Nutzwertanalyse, wie sie in [10] beschrieben ist, über ein relativ breites Kriterien-Spektrum abgebildet. Es gibt jedoch Bauteile, die bereits vor der eigentlichen Bewertung ausscheiden. Diese Bauteile besitzen mindestens eine der folgenden Eigenschaften, die in diesem Kontext auch als Ausschluss-Kriterien zu verstehen sind:

- Das Fertigungsverfahren für das Bauteil ist (extern) festgelegt und ist nicht AM.
- Der Werkstoff für das Bauteil ist (extern) festgelegt und entspricht nicht dem Werkstoff-Profil des SIGNAL-Feedstocks.

- Das Bauteil passt mit seinen Abmaßen nicht in den Bauraum einer der im Projekt genutzten Maschinen.

Während der letzte Punkt offensichtlich ist, sind die beiden erstgenannten Eigenschaften speziell im Kontext der Luftfahrt-Zulieferbranche relevant. Ist der Zulieferer lediglich Auftragsfertiger eines Produktes und besitzt keine Entwicklungsverantwortung, können diese Punkte zutreffen. Das grundlegende Screening des Bauteil-Portfolios sollte auf Basis dieser Aspekte vorgenommen werden. Ein weiteres potenzielles Ausschluss-Kriterium könnte aus den Anforderungen an die chemischen und physikalischen Eigenschaften entstehen. Hierfür sollten in Abstimmung mit dem produzierenden Unternehmen die Werkstoffeigenschaften betrachtet und daraus entstehende Einschränkungen abgeleitet werden.

Für die Bewertung mittels einer Nutzwertanalyse ist es notwendig, Bewertungskriterien aufzustellen. Hierfür gibt es diverse Ansätze, die je nach Anforderungen und Rahmenbedingungen mit Vor- und Nachteilen behaftet sind [10]. Im Rahmen dieser Arbeit wird sich für eine Durchführung der Nutzwertanalyse auf Basis von Zielsystemen entschieden. In solchen Zielsystemen werden Ziele, sofern möglich und sinnvoll, hierarchisch in Teilziele aufgegliedert. So nimmt die Komplexität der Ziele bzw. deren Formulierung mit fortschreitender Aufgliederung ab. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Zielstufen. Durch diese Aufgliederung der Ziele wird die Bewertung vereinfacht, da die Ziele innerhalb ihrer Systeme und Stufen relativ zueinander gewichtet werden. Aus diesen relativen Gewichtungen ergibt sich die Gesamtgewichtung. Es wird zwischen Knoten- und Stufengewichtungen unterschieden. Die Knotengewichtungen  $g_k$  entsprechen der relativen Gewichtung eines Teilziels bezogen auf sein übergeordnetes Ziel. Die Stufengewichtungen  $g_s$  entsprechen der Gesamtgewichtung dieses Teilziels bezogen auf alle Zielsysteme. Nach

$$g_{s,i} = g_{k,i} \cdot g_{s,i-1} \quad (3.1)$$

lässt sich die Stufengewichtung für ein Teilziel der Stufe  $i$  berechnen. Diese Berechnung wird iterativ für alle Teilziele auf allen Zielstufen durchgeführt. [10]

Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Gewichtungsmethode verwendet, da der Gewichtungsprozess so transparent und systematisch dargestellt werden kann. Dies wird als wichtig angesehen, da die Gewichtung nicht durch ein Expertengremium, sondern eine Einzelperson durchgeführt wird. Zudem sind die so erstellten Zielsysteme modular aufgebaut und können dadurch in der praktischen Anwendung mit geringem Aufwand angepasst bzw. erweitert werden. Speziell mit Blick auf die weitere Bearbeitung dieses Themenkomplexes nach der Fertigstellung dieser Arbeit ist es von Vorteil, eine relativ einfache Modifizierung der Bewertungskriterien vornehmen zu können.

Die Bewertungsstruktur besteht aus vier übergeordneten Zielen, welche alle gleich gewichtet sind. Für sämtliche Zielsysteme sind die Gewichtungen mit einer Reduzierung auf zwei Dezimalstellen gerundet aufgeführt. Für die jeweiligen Zielebenen wurde der tatsächliche Wert auf zwei Dezimalstellen gerundet. Das erste Ziel ist das *Leichtbau-Potenzial*. Dieses lässt sich wiederum in die Ziele *Leichtbau-Potenzial durch AM* und *Leichtbau-Potenzial durch Werkstoff* unterteilen. Diese bestehen wieder aus mehreren Teilzielen, welche die finale Zielebene darstellen. In **Abbildung 3.1** ist das System inklusive seiner Knoten und Stufengewichtungen dargestellt. Wie abgebildet ist das Teilziel  $Z_{1.1.1}$  (Gestaltungsfreiheit) mit 9 % Anteil an der Gesamtbewertung das Teilziel mit der höchsten Gewichtung innerhalb dieses Zielsystems. Die hohe Gewichtung für  $Z_{1.1.1}$  ist darin begründet, dass die Stärken der AM erst durch DfAM voll genutzt werden können und mit topologieoptimierten Bauteilen das Potenzial zur Gewichtseinsparung am größten ist.  $Z_{1.2.1}$  ist mit 5 % insgesamt gewichtet, da der Einsatz von hochfesten Leichtbaumaterialien wie Titan viel Potenzial bietet. Sofern jedoch bereits Titan eingesetzt wird, entfällt das Potenzial des Stoffleichtbaus für dieses Bauteil.

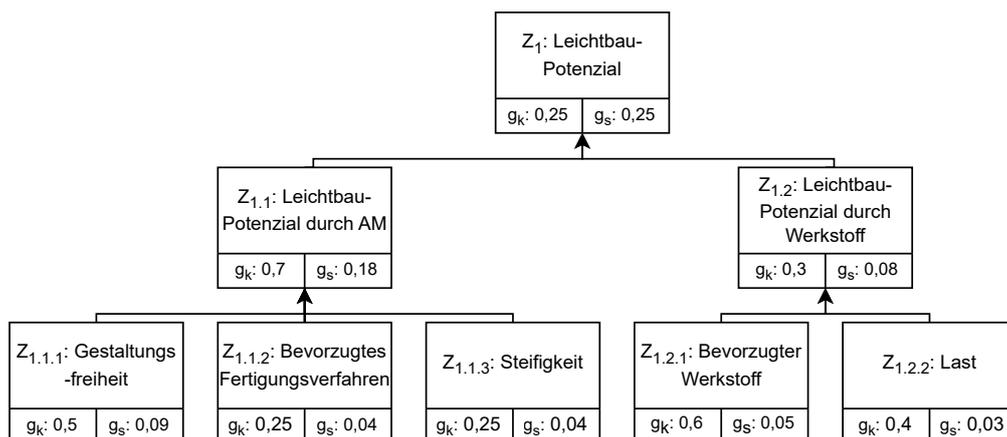


Abbildung 3.1: Luftfahrt-Zielsystem 1: Leichtbau-Potenzial

Das zweite Ziel sind die *Einsatzbedingungen*. Dieses lässt sich wiederum in die Ziele *Sicherheitsaspekte* und *Anwendungsart* unterteilen. Das Ziel *Sicherheitsaspekte* besteht aus den Teilzielen *Risikobewertung* und *Schadenstoleranz*. Diese Ziele besitzen eine relativ hohe Gewichtung (s. **Abbildung 3.2**). Neben der Tatsache, dass diese Teilziele einen großen Einfluss auf die Anforderungen des Bauteils besitzen, werden durch sie die Anforderungen an Wartungsfreiheit, den Wartungsaufwand und die Instandsetzung implizit berücksichtigt. In der Praxis korrelieren die Risikobewertung und die Anforderungen an die Schadenstoleranz stark. Um einem

Szenario vorzubeugen, in denen das Risiko für die Bauteil-Anwendung hoch, die Forderungen an die Schadenstoleranz aber nicht extrem sind, besteht die Betrachtung in Form dieser beiden Teilziele. Ein Beispiel für so ein Szenario wäre eine Komponente der Primärstruktur, deren Schadenstoleranz-Anforderungen durch mehrfach vorhandene Lastpfade abgeschwächt sind. Das Teilziel  $Z_{2,2}$  (Anwendungs-Kategorie) ist mit 10 % Anteil an der Gesamtbewertung ebenfalls hoch gewichtet. Hier wird bewertet, ob das Bauteil für den Vorrichtungsbau, den Prototypenbau oder als Einbauteil eingesetzt wird. Die hohe Gewichtung kommt durch die erwarteten Auswirkungen der Umstellung der Bauteil-Fertigung auf AM zustande. Ein Einbauteil im Kontext des Gewichts und der Wirtschaftlichkeit zu optimieren, hat umfassendere Auswirkungen auf die Produkt- und Produktionsstruktur als der Bau eines Prototypen.

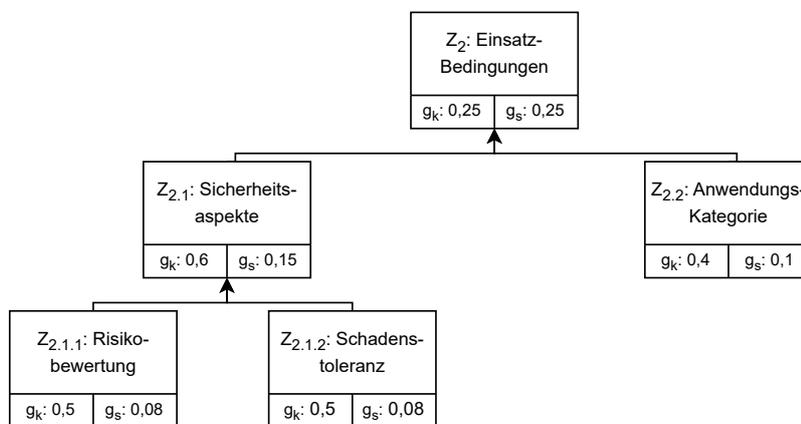


Abbildung 3.2: Luftfahrt-Zielsystem 2: Einsatzbedingungen

In **Abbildung 3.3** ist das Zielsystem für das Ziel *AM-Potenzial* abgebildet. Die Teilziele innerhalb dieses Systems sind alle gleichermaßen gewichtet und bilden klassische Kriterien für die Bewertung des AM-Potenzials eines Bauteils ab. Das Teilziel  $Z_{3,2}$  (Gewicht) ist in seiner Formulierung auf die praktische Bauteilbewertung ausgelegt. Da voraussichtlich Bauteile verschiedener Werkstoffe und somit verschiedener Werkstoff-Dichten verglichen werden, wäre die Betrachtung des Bauteil-Volumens sinnvoll. Ob das Bauteil-Volumen in der der Bauteil-Datenbank direkt einsehbar ist, ist jedoch derzeit nicht bekannt. Ein Umweg über das Bauteilgewicht in Kombination mit der Werkstoff-Dichte ist denkbar. An dieser Stelle soll die Bezeichnung des Teilziels als Gewicht ausreichend sein. Ob die Komplexität des Bauteils der Datenbank direkt zu entnehmen ist, ist ebenfalls derzeit nicht bekannt. Dieses Kriterium ist dennoch relevant und muss im Zweifel in der praktischen Anwendung der Bewertung als nachgelagertes Kriterium fungieren, das in einem finalen Bewertungsschritt betrachtet wird.

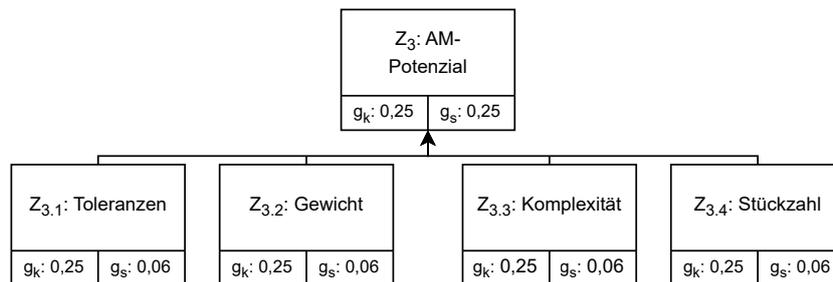


Abbildung 3.3: Luftfahrt-Zielsystem 3: AM-Potenzial

Das vierte übergeordnete Ziel ist die *Wirtschaftlichkeit* und setzt sich aus den Teilzielen  $Z_{4,1}$  (Bauteilkosten) sowie  $Z_{4,2}$  (Bereitstellungskosten) zusammen. Das zweite Teilziel lässt sich wiederum in zwei Teilziele aufteilen (s. **Abbildung 3.4**). Hierbei wiegt das Kriterium der Lieferzeiten bzw. Fertigungszeiten ebenso viel wie das der Supply Chain. Auch das Teilziel  $Z_{4,1}$  ließe sich je nach Datenlage weiter aufgliedern (z.B. in Materialkosten und Werkzeugkosten). Da die Datenlage nicht bekannt ist, wird diese Aufgliederung nicht durchgeführt. Für das praktische Screening in der Bauteil-Datenbank ist zu erwarten, dass das Kriterium der Bauteilkosten einfacher einzusehen ist, als die in der Abbildung ausgegrauten Unterpunkte.

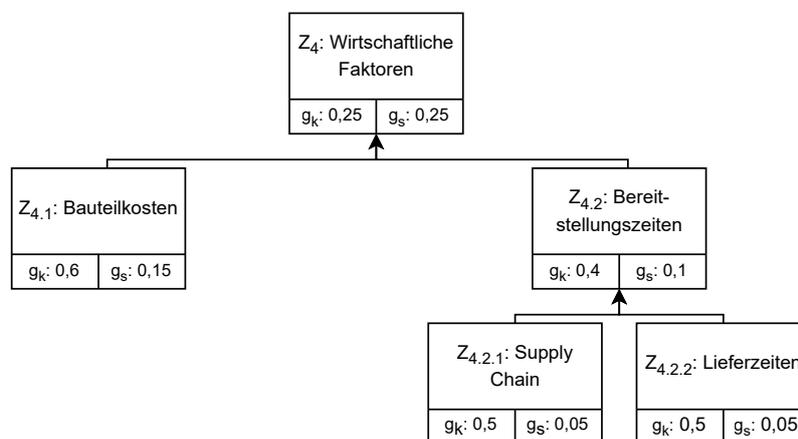


Abbildung 3.4: Luftfahrt-Zielsystem 4: Wirtschaftlichkeit

Die Bewertung der Bauteile beruht auf den gerade beschriebenen Teilzielen und ihren Gewichtungen. Um zu so einer Bewertung zu gelangen, müssen die Ausprägungen der Teilziele für jedes Bauteil bewertet werden. Hierfür werden nach [10] für jedes Kriterium Maßzahlen genutzt, die ganze Werte im Spektrum von 0 bis 10 annehmen können. Die Maßzahlen werden mit der jeweiligen Gewichtung des Teilziels multipliziert und die so entstehenden Produkte schließlich addiert. Diese Summe entspricht der Gesamtbewertung des Bauteils. [10]

Für die Vergabe der Maßzahlen der einzelnen Teilziele ist es notwendig, dass den Maßzahlen jeweils die Kriterien bzw. die möglichen Ausprägungen der Teilziele zugeordnet werden. Da in dem Kontext dieser Arbeit je nach Bereich nur qualitative Eigenschaften der Bauteile bekannt sind, beschränkt sich das Spektrum für die Maßzahlen auf drei, in speziellen Fällen auf zwei Stufen. Für die praktische Durchführung der Bewertung ist die Definition und Erweiterung dieser Stufen, wenn möglich und sinnvoll, in kleineren quantitativ formulierten Ausprägungen vorzunehmen.

In **Tabelle 3.3** sind die gerade beschriebenen Maßzahlen für jeweilige Teilziel-Ausprägungen aufgeführt. Die Bewertungen, die nicht offensichtlich sind, werden folgend erläutert. Das Teilziel  $Z_{1.1.2}$  wird in den Ausprägungen *Umformung*, *Zerspanung* und *Guss* betrachtet. Hierbei ist die Ausprägung *Guss* mit der Maßzahl  $m_{1.1.2} = 10$  am besten bewertet, da Guss-Verfahren relativ komplexe Geometrien abbilden können und der *casting-factor* aus [34] bei der Auslegung der Gussteile bereits berücksichtigt wurde. So müssen für die Auslegung des Bauteils für AM keine zusätzlichen Sicherheiten berücksichtigt werden. Die Ausprägung *Zerspanung* ist aus diesem Grund mit der Maßzahl  $m_{1.1.2} = 5$  mäßig bewertet. Durch die Möglichkeit der Umgestaltung eines Zerspanungs-Bauteils ist diese Ausprägung immer noch höher bewertet als die Ausprägung *Umformung*. Bauteile mit dieser Ausprägung besitzen mit der Maßzahl  $m_{1.1.2} = 0$  die niedrigste Bewertung dieses Teilziels.

Die Maßzahlen für Teilziel  $Z_{1.1.3}$  und Teilziel  $Z_{1.2.2}$  hängen von den mechanischen Anforderungen an das Bauteil ab. Der Grund für die Bewertung, höhere Anforderungen führen zu einer höheren Maßzahl, liegt an der Optimierungsnotwendigkeit des Bauteils. Für ein Bauteil, welches keiner hohen Last ausgesetzt ist und welches keine hohen Anforderungen an die Steifigkeit erfüllen muss, ist es schwierig, die Fertigung via AM lohnenswert zu machen. Dieser Umstand wiegt bei Bauteilen aus hochfesten Werkstoffen noch einmal schwerer.

Im Teilziel  $Z_{2.1.1}$  wird die Risikobewertung auf Basis der Flugzeugkomponenten-Kategorie in [34] durchgeführt. Komponenten der Primärstruktur erhalten somit die niedrigste Maßzahl für dieses Teilziel. Dies ist in den deutlich erhöhten Anforderungen an diese Komponenten begründet. Zudem ist eine Verwendung gesinterter Teile für die kritischsten Komponenten unüblich.

Das Teilziel  $Z_{2.1.2}$  entstammt demselben Ziel wie das eben beschriebene Teilziel. Die Bewertung dieser Teilziele korreliert, wie oben beschrieben, stark. Dass hohe Anforderungen an die

Schadenstoleranz negativ bewertet werden, liegt an der für AM prädestinierten Integralbauweise. Nach [74] besitzt die Integralbauweise negative Auswirkungen auf die Bruchmechanik von Komponenten.

Der Hintergrund der Maßzahlen für Teilziel  $Z_{2,2}$  sind die erwarteten Auswirkungen der Bauteil-Optimierung via AM. Diese werden für den Prototypenbau durch die verringerte Produktentwicklungszeit höher als für den Vorrichtungsbau eingeschätzt.

Das Teilziel  $Z_{3,1}$  betrachtet die Anforderungen an die Toleranzen des Bauteils. Die Wertebereiche orientieren sich an [51]. Für dieses Teilziel bleibt vor der Durchführung der Bewertung zu klären, wie genau die Bewertung erfolgen soll. Ob nur das strengste Maß, ein gewisser Prozentsatz an Maßen, oder ein anderer Wert betrachtet wird, sei an dieser Stelle offen gelassen.

Für das Teilziel  $Z_{3,2}$  orientieren sich die Werte an bisher mit dem Moldjet-Verfahren gefertigten Komponenten, die in [70] betrachtet wurden. Dieser Aspekt deckt jedoch nur den Ist-Zustand ab. Wenn Bauteile aus verschiedenen Materialien betrachtet werden und so ein relativ hohes Gewichtseinsparungs-Potenzial vorhanden ist, wird dies an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Für das Teilziel  $Z_{3,4}$  orientieren sich die Werte an Abbildung 2.12 und [6].

Tabelle 3.3: Ausprägungen hinter den Maßzahlen für die Nutzwertanalyse

Ziel	Teilziel	ID	Kriterium für $m_i =$		
			0	5	10
Leichtbau-Potenzial	Gestaltungsfreiheit	$Z_{1.1.1}$	Keine Gestaltungsfreiheit	Gestaltungsfreiheit ist mit großem Aufwand verbunden	Volle Gestaltungsfreiheit
	Bevorzugtes Fertigungsverfahren	$Z_{1.1.2}$	Umformung	Zerspanung	Guss
	Steifigkeit	$Z_{1.1.3}$	Niedrige Anforderungen an Steifigkeit		Niedrige Anforderungen an Steifigkeit
	Bevorzugter Werkstoff	$Z_{1.2.1}$	">Titan"	"Titan"	"Aluminium"
	Last	$Z_{1.2.2}$	Niedrige Last		Hohe Last
Einsatzbedingungen	Risikobewertung	$Z_{2.1.1}$	Versagen führt zu katastrophalem Ausfall des Fahrzeugs; führt potenziell zu multiplen Toden	Versagen führt nicht zu katastrophalem Ausfall des Fahrzeugs; führt potenziell zu individuellem Tod	Versagen führt nicht zu katastrophalem Ausfall des Fahrzeugs; führt nicht potenziell zu individuellem Tod
	Schadenstoleranz	$Z_{2.1.2}$	Hohe Anforderungen an Schadenstoleranz	Niedrige Anforderungen an Schadenstoleranz	Keine Anforderungen an Schadenstoleranz
	Anwendungsart	$Z_{2.2}$	Vorrichtungsbau	Prototypenbau	Einbauteil
AM-Potenzial	Toleranzen	$Z_{3.1}$	IT1-IT4 (Schleifen)	IT5-IT9 (Drehen, Fräsen, Tiefziehen)	>IT9 (Giessen, Gesenkformen)
	Gewicht/Volumen	$Z_{3.2}$	>5 kg	2 kg	<0,1 kg
	Komplexität	$Z_{3.3}$	Geringe Komplexität		Hohe Komplexität
	Stückzahl	$Z_{3.4}$	>1000	100	1

### 3 Bauteilkategorisierung und -strategie

Tabelle 3.3 – fortgesetzt

Ziel	Teilziel	ID	Kriterium für $m_i =$		
			0	5	10
Wirtschaftliche Faktoren	Bauteilkosten	Z <sub>4.1</sub>	Niedrige Kosten		Hohe Kosten
	Supply Chain	Z <sub>4.2.1</sub>	Schlanke Supply Chain vorhanden	Kleinteilige Supply Chain vorhanden	Keine Supply Chain vorhanden
	Herstellungs-/Lieferzeiten	Z <sub>4.2.2</sub>	Kurze Zeit bis Bauteil-Verfügbarkeit		Lange Zeit bis Bauteil-Verfügbarkeit

In **Abbildung 3.5** ist die durchgeführte Nutzwertanalyse für ein fiktives Bauteil mit idealem Profil abgebildet. Für dieses ideal bewertete Bauteil wird ein Nutzwert von 10 erreicht.

Im Gegensatz zum Vorgehen in [58] oder [77] ist diese Nutzwertanalyse nicht zur Anwendung an konkreten einzelnen Bauteilen gedacht. Sie ist mehr als ein Satz von Filtern zu nutzen, der schrittweise auf das Bauteil-Portfolio angewandt werden kann. Die Gewichtungen dienen hier als Hinweis darauf, welche Filter höher priorisiert sind als andere. Es ist Anzumerken, dass sich einige Kategorien bzw. Anforderungen inhaltlich mit den Bewertungskriterien aus [58] überschneiden. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bauteilstrategie versucht jedoch, die Bauteileigenschaften kleinteiliger und in einem Format, welches zur direkten Auswertung des Bauteil-Portfolios nutzbar ist, zu betrachten.

ID	Bewertungskriterien		Ideale Variante		
	Benennung	Gewichtung	Ausprägung	Maßzahl	Wertungszahl
Z <sub>1.1.1</sub>	Gestaltungsfreiheit	0,09	Volle Gestaltungsfreiheit	10	0,9
Z <sub>1.1.2</sub>	Bevorzugtes Fertigungsverfahren	0,04	Guss	10	0,4
Z <sub>1.1.3</sub>	Steifigkeit	0,04	Hohe Anforderungen an Steifigkeit	10	0,4
Z <sub>1.2.1</sub>	Bevorzugter Werkstoff	0,05	Aluminium	10	0,5
Z <sub>1.2.2</sub>	Last	0,03	Hohe Anforderungen an Last	10	0,3
Z <sub>2.1.1</sub>	Risikobewertung	0,08	Versagen führt <u>nicht</u> zu katastrophalem Ausfall des Fahrzeugs; führt <u>nicht</u> potenziell zu individuellem Tod	10	0,8
Z <sub>2.1.2</sub>	Schadenstoleranz	0,08	Keine Anforderungen an Schadenstoleranz	10	0,8
Z <sub>2.2</sub>	Anwendungskategorie	0,1	Einbauteil	10	1
Z <sub>3.1</sub>	Toleranzen	0,06	>IT9 (Giessen, Gesenkformen)	10	0,6
Z <sub>3.2</sub>	Gewicht	0,06	<0,1 kg	10	0,6
Z <sub>3.3</sub>	Komplexität	0,06	Hohe Komplexität	10	0,6
Z <sub>3.4</sub>	Stückzahl	0,06	1	10	0,6
Z <sub>4.1</sub>	Bauteilkosten	0,15	Hohe Kosten	10	1,5
Z <sub>4.2.1</sub>	Supply Chain	0,05	Keine Supply Chain vorhanden	10	0,5
Z <sub>4.2.2</sub>	Herstellungs-/Lieferzeiten	0,05	Lange Zeit bis Bauteil-Verfügbarkeit	10	0,5
<b>Summe Gewichtungen</b>		<b>1</b>	<b>Idealer Nutzwert</b>		<b>10</b>

Abbildung 3.5: Durchgeführte Nutzwertanalyse mit idealem Ergebnis

Es ist an dieser Stelle nicht sinnvoll, alle potenziell denkbaren Bauteil-Profile zu in dieser Analyse zu betrachten. Zwei beispielhafte Szenarien sollen jedoch diskutiert werden, um die Auswirkungen der einzelnen Teilzieleerreichung zu verdeutlichen.

Im ersten Szenario liegt die Entwicklungsverantwortung beim fertigenden Unternehmen. Damit ist die volle Gestaltungsfreiheit gegeben. Bisher wird das Bauteil mittels Guss aus Aluminium gefertigt. Die Last- und Steifigkeits-Anforderungen an das Bauteil sind hoch. Das Bauteil ist Teil der Flugzeugsekundärstruktur mit mäßigen Anforderungen an die Schadenstoleranz. Es ist ein Einbauteil mit Geometrien, die Toleranzen der Klasse IT6 unterliegen. Das Bauteil besitzt ein Gewicht von 2 kg und wird als mäßig Komplex bewertet. Die Anzahl der Bauteile ist mit 100 Stück vorgesehen, es ist teuer und es besteht eine Supply Chain für das Teil. Die Zeit bis zur Bauteilverfügbarkeit ist lang. Das Ergebnis der Nutzwertanalyse für dieses Bauteil ist in **Abbildung 3.6** zu sehen. Mit etwa 78 % des erreichbaren Nutzwertes wird das Potenzial für die AM-Umsetzung dieses Bauteils als vielversprechend bewertet.

ID	Bewertungskriterien		Variante 1		
	Benennung	Gewichtung	Ausprägung	Maßzahl	Wertungszahl
Z <sub>1.1.1</sub>	Gestaltungsfreiheit	0,09	Volle Gestaltungsfreiheit	10	0,9
Z <sub>1.1.2</sub>	Bevorzugtes Fertigungsverfahren	0,04	Guss	10	0,4
Z <sub>1.1.3</sub>	Steifigkeit	0,04	Hohe Anforderungen an Steifigkeit	10	0,4
Z <sub>1.2.1</sub>	Bevorzugter Werkstoff	0,05	Aluminium	10	0,5
Z <sub>1.2.2</sub>	Last	0,03	Hohe Anforderungen an Last	10	0,3
Z <sub>2.1.1</sub>	Risikobewertung	0,08	Versagen führt nicht zu katastrophalem Ausfall des Fahrzeugs; führt potenziell zu individuellem Tod	5	0,4
Z <sub>2.1.2</sub>	Schadenstoleranz	0,08	Niedrige Anforderungen an Schadenstoleranz	5	0,4
Z <sub>2.2</sub>	Anwendungskategorie	0,1	Einbauteil	10	1
Z <sub>3.1</sub>	Toleranzen	0,06	IT5-IT9 (Drehen, Fräsen, Tiefziehen)	5	0,3
Z <sub>3.2</sub>	Gewicht	0,06	2 kg	5	0,3
Z <sub>3.3</sub>	Komplexität	0,06	Mäßige Komplexität	5	0,3
Z <sub>3.4</sub>	Stückzahl	0,06	100	5	0,3
Z <sub>4.1</sub>	Bauteilkosten	0,15	Hohe Kosten	10	1,5
Z <sub>4.2.1</sub>	Supply Chain	0,05	Kleinteilige Supply Chain vorhanden	5	0,25
Z <sub>4.2.2</sub>	Herstellungs-/ Lieferzeiten	0,05	Lange Zeit bis Bauteil-Verfügbarkeit	10	0,5
<b>Summe Gewichtungen</b>		<b>1</b>	<b>Nutzwert</b>	<b>7,75</b>	

Abbildung 3.6: Erste beispielhaft durchgeführte Nutzwertanalyse

Im zweiten Szenario liegt die Entwicklungsverantwortung nicht allein beim fertigenden Unternehmen. Potenziell ist das Unternehmen auch nicht der Single-Source-Lieferant des Bauteils. Damit wäre eine Neugestaltung des Bauteils zwar nicht ausgeschlossen, aber mit erheblichem Aufwand verbunden. In diesem Szenario wird das Bauteil mittels Zerspanung aus Titan gefertigt. Die Last- und Steifigkeits-Anforderungen an das Bauteil sind hoch. Das Bauteil ist Teil der Flugzeugsekundärstruktur mit mäßigen Anforderungen an die Schadenstoleranz. Es ist ein

Einbauteil mit Geometrien, die Toleranzen der Klasse IT6 unterliegen. Das Bauteil besitzt ein Gewicht von 2 kg und wird als mäßig komplex bewertet. Die Anzahl der Bauteile ist mit >1000 Stück eingeplant, es ist günstig und es besteht eine Supply Chain für das Teil. Die Zeit bis zur Bauteilverfügbarkeit ist kurz. Das Ergebnis der Nutzwertanalyse für dieses Bauteil ist in **Abbildung 3.7** zu sehen. Mit 43 % des erreichbaren Nutzwertes wird das Potenzial dieses Szenarios als gering bewertet.

ID	Bewertungskriterien		Variante 2		
	Benennung	Gewichtung	Ausprägung	Maßzahl	Wertungszahl
Z <sub>1.1.1</sub>	Gestaltungsfreiheit	0,09	Gestaltungsfreiheit ist mit großem Aufwand verbunden	5	0,45
Z <sub>1.1.2</sub>	Bevorzugtes Fertigungsverfahren	0,04	Zerspanung	5	0,2
Z <sub>1.1.3</sub>	Steifigkeit	0,04	Hohe Anforderungen an Steifigkeit	10	0,4
Z <sub>1.2.1</sub>	Bevorzugter Werkstoff	0,05	Titan	5	0,25
Z <sub>1.2.2</sub>	Last	0,03	Hohe Anforderungen an Last	10	0,3
Z <sub>2.1.1</sub>	Risikobewertung	0,08	Versagen führt <u>nicht</u> zu katastrophalem Ausfall des Fahrzeugs; führt potenziell zu einzeltem Tod	5	0,4
Z <sub>2.1.2</sub>	Schadentoleranz	0,08	Niedrige Anforderungen an Schadentoleranz	5	0,4
Z <sub>2.2</sub>	Anwendungskategorie	0,1	Einbauteil	10	1
Z <sub>3.1</sub>	Toleranzen	0,06	IT5-IT9 (Drehen, Fräsen, Tiefziehen)	5	0,3
Z <sub>3.2</sub>	Gewicht	0,06	2 kg	5	0,3
Z <sub>3.3</sub>	Komplexität	0,06	Mäßige Komplexität	5	0,3
Z <sub>3.4</sub>	Stückzahl	0,06	>1000	0	0
Z <sub>4.1</sub>	Bauteilkosten	0,15	Niedrige Kosten	0	0
Z <sub>4.2.1</sub>	Supply Chain	0,05	Schlanke Supply Chain vorhanden	0	0
Z <sub>4.2.2</sub>	Herstellungs-/ Lieferzeiten	0,05	Kurze Zeit bis Bauteil-Verfügbarkeit	0	0
<b>Summe Gewichtungen</b>		<b>1</b>	<b>Nutzwert</b>		<b>4,3</b>

Abbildung 3.7: Zweite beispielhaft durchgeführte Nutzwertanalyse

### 3.3.2 Bauteilstrategie für den Bahn-Sektor

Analog zur Bauteilstrategie des Luftfahrt-Sektors ist es notwendig, die Zielsysteme für den Bahn-Sektor aufzustellen. Die vier übergeordneten Ziele sind in diesem Fall nicht gleich gewichtet. Für das *Leichtbau-Potenzial* ist hier lediglich eine Gewichtung von 0,1, also 10 % der Gesamtbewertung, vorgesehen (s. **Abbildung 3.8**). Das Teilziel *Leichtbau-Potenzial durch AM* entfällt für den Bahn-Sektor, da eine Bauteil-Neugestaltung nicht vorgesehen ist. Die Struktur für das Teilziel *Leichtbau-Potenzial durch Werkstoff* bleibt bestehen, genau wie die finale Stufengewichtungen. Wie anhand der Gewichtungen zu erkennen ist, geht das Teilziel Z<sub>1.2.1</sub> nicht gleichermaßen in die Gesamtbewertung mit ein, wie das Teilziel Z<sub>1.2.2</sub>. Das liegt daran, dass die DB die Sicherheiten

der Bauteile vor allem über einen Werkstoff-Austausch modifiziert [78]. Wurde für das Bauteil bisher bereits so ein Hochleistungswerkstoff genutzt, entfällt diese Möglichkeit.

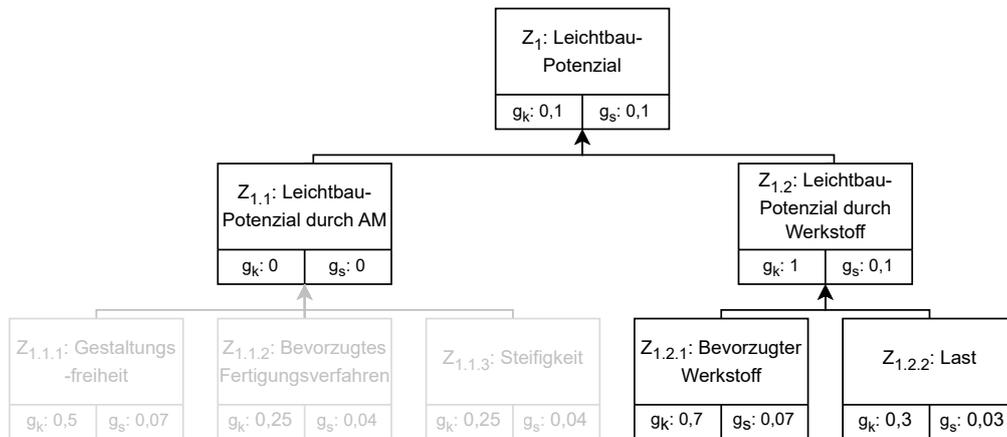


Abbildung 3.8: Bahn-Zielsystem 1: Leichtbau-Potenzial

Auch das Zielsystem für das Ziel *Einsatzbedingungen* ändert sich im Vergleich zum Luftfahrt-Sektor. Die Gewichtung für dieses übergeordnete Ziel beläuft sich für den Bahn-Sektor auf 0,2. Davon nimmt das Teilziel *Sicherheitsaspekte* einen Anteil von 0,7 ein, während das Teilziel *Anwendungs-Kategorie* einen Anteil von 0,3 einnimmt. Das Teilziel  $Z_{2.1.2}$  entfällt, da die Anforderungen an die Schadenstoleranz durch das Original-Bauteil sowie die Prozessqualifizierung abgedeckt werden. Dadurch erhält das Teilziel *Risikobewertung* einen Anteil von 14 % an der Gesamtbewertung. Dieser relativ hohe Anteil spiegelt die Prüfklassen und die damit einhergehenden Anforderungen aus der LGP wider. Das Teilziel  $Z_{2.1.2}$ , die *Anwendungs-Kategorie*, erhält mit einem Anteil von 6 % an der Gesamtbewertung eine moderate Gewichtung (s. **Abbildung 3.9**).

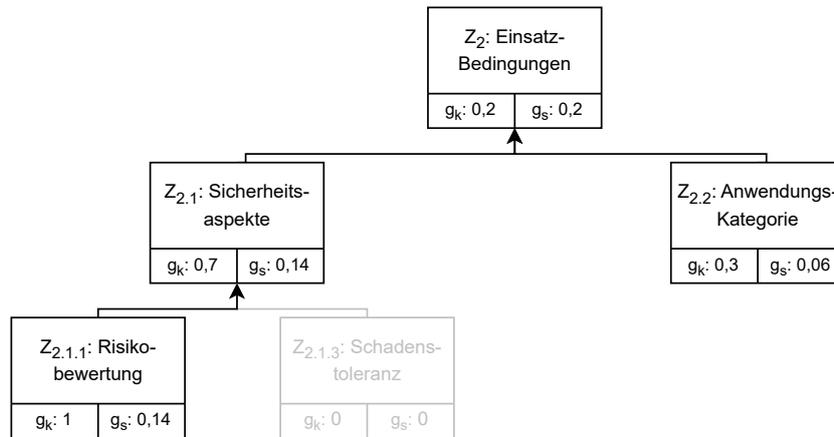


Abbildung 3.9: Bahn-Zielsystem 2: Einsatzbedingungen

In **Abbildung 3.10** ist das Zielsystem für das Ziel *AM-Potenzial* abgebildet. Die Teilziele innerhalb dieses Systems erhalten im Gegensatz zum Luftfahrt-Sektor unterschiedliche Gewichtungen. Am höchsten gewichtet ist das Teilziel  $Z_{3.4}$ , die *Stückzahl*. Es geht zu 11 % in die Gesamtbewertung ein, was in der derzeitigen strategischen Ausrichtung der DB begründet ist. Die übrigen drei Teilziele gehen zu jeweils 3 % in die Gesamtbewertung mit ein. Diese Teilziele bilden durch diese niedrige Gewichtung nicht die Basis für die Auswahl potenzieller AM-Bauteile. Vielmehr ist zu erwarten, dass sie in der finalen Phase der Bauteil-Auswahl relevant sind. Die Schwierigkeit der Bewertung der Komplexität bleibt für den Bahn-Sektor analog zum Luftfahrt-Sektor bestehen.

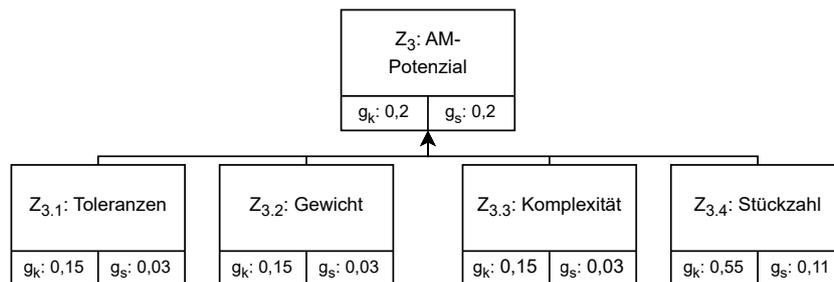


Abbildung 3.10: Bahn-Zielsystem 3: AM-Potenzial

Das vierte übergeordnete Ziel, die *Wirtschaftlichkeit*, setzt sich auch für den Bahn-Sektor aus den Teilzielen  $Z_{4,1}$  (Bauteilkosten) sowie  $Z_{4,2}$  (Bereitstellungskosten) zusammen. Da das übergeordnete Ziel alleine 50 % der Gesamtbewertung ausmacht, sind die Teilziele ebenfalls entsprechend höher gewichtet als im Luftfahrt-Sektor. Die Knotengewichtungen der Teilziele sind ebenfalls anders gestaltet als für den Luftfahrt-Sektor. Das liegt vor allem am Kontext der Ersatzteilversorgung. In diesem Kontext ist das Teilziel *Supply Chain* deutlich relevanter als im Kontext einer Zulieferer-Strategie. Die detaillierten Gewichtungen sind in **Abbildung 3.11** abgebildet.

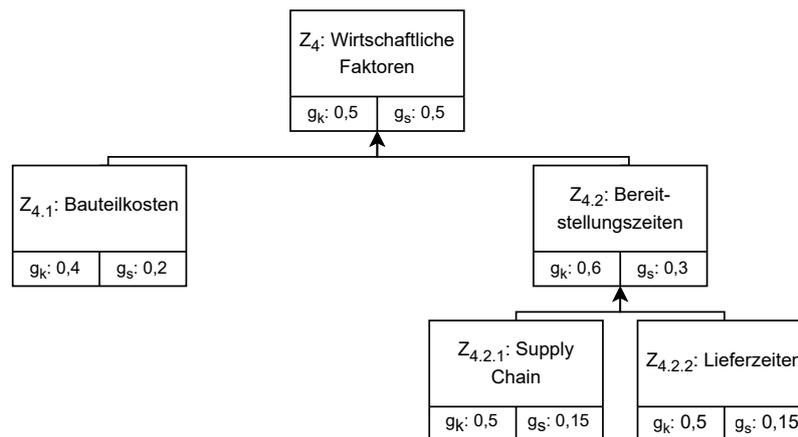


Abbildung 3.11: Bahn-Zielsystem 4: Wirtschaftlichkeit

Um eine systematische Bewertung der Bauteile durchführen zu können, müssen für die jeweiligen Teilziele Ausprägungen definiert und entsprechende Maßzahlen zugeordnet werden (vgl. Tabelle 3.3). Anschließend ist die Nutzwertanalyse als systematischer Filter für das Bauteil-Portfolio zu nutzen.

### 3.3.3 Bauteilstrategie für den Automotive-Sektor

Während der Analyse der Besonderheiten des Automotive-Sektors ist deutlich geworden, dass die formalen Anforderungen an Bauteile sowie der Business Case hinter diesen Bauteilen nicht ohne Industrie-interne Expertise bewertet werden können. Aus diesem Grund soll hier lediglich ein Ansatz in Form einer Kurzzusammenfassung eines abgeschlossenen Projektes geliefert werden. Im Projekt *StaVari*, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), ging es um “die Entwicklung einer durchgängigen Prozesskette für die additive Fertigung von komplexen, variantenreichen und hochfunktionalen Produkten aus innovativen Stahlwerkstoff-

fen” [29]. Im Kontext des Projektes sollten Automobil-Leichtbauteile wirtschaftlich mittels AM umgesetzt werden. Dafür wurde ein Screening durchgeführt, um Bauteile mit einem für diesen Anwendungsfall hohen Potenzial zu identifizieren. Das Screening ist in mehreren Phasen geschehen. In der ersten Phase wurde explizit nach den Hauptabmessungen der Bauteile, nach dem Bauteilgewicht und -volumen, sowie den Bauteiloberflächen gefiltert. In der nächsten Phase wurde eine generische Stückliste erstellt, die Materialkosten, Herstellungskosten und Werkzeugkosten aufführt. So wurden verschiedene Bauteile identifiziert, für die zudem eine Ausführung in verschiedenen Varianten sinnvoll war. Die Varianten sind durch die unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Fahrzeugtypen und damit einhergehende Belastungen) begründet. Es folgte die Entwicklung, Fertigung und umfangreiche Testung einiger Demonstratoren. Für diese Demonstratoren wurden dann die Kosten mit denen der herkömmlichen Fertigung verglichen. Hierbei erfolgte die Betrachtung der Demonstratoren in Kategorien, die durch die zu fertigende Stückzahl definiert waren. Als ein Ergebnis des Projektes wurde festgestellt, dass eine Fertigung mittels AM in Kleinserien direkt wirtschaftlich lohnend sein kann. Zudem ließ sich das Bauteilgewicht reduzieren, wobei die Reduktion abhängig von der Komponenten-Variante war. [43]

Aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen von StaVari- und SIGNAL-Projekt wäre das Vorgehen nicht direkt übertragbar. Die Herangehensweise des StaVari-Projektes dient für den Kontext des SIGNAL-Projektes jedoch als Fallstudie. Dass Bauteile systematisch auf Basis ihrer Eigenschaften kategorisiert und schließlich bewertet werden, war ein zentraler Bestandteil des durchgeführten Projektes.

## 3.4 Aspekte der relevanten Technologien

Im Folgenden werden die Technologien, die Gegenstand des SIGNAL-Projekts sind, gegenübergestellt. Diese Gegenüberstellung beruht auf einer Literaturrecherche sowie Experteninterviews und hat zum Ziel, die Technologien möglichst konkret zu vergleichen. So werden Verfahrens-Aspekte identifiziert, die sich auf ihre Erzeugnisse und somit ihre Eignung in Abhängigkeit der Bauteil-Anforderungen auswirken. Die herausgearbeiteten Aspekte lauten wie folgt:

- Mechanische Eigenschaften der Grünteile
- Auflösung
- Sinterdichte
- Oberflächengüte
- Gestaltung von Bauteilkanten
- Produktivität

Die mechanischen Eigenschaften des Grünlings sind für die Handhabung innerhalb von Folgeprozessen relevant. Dies meint ebenso die Möglichkeiten der zerspanenden Bearbeitung im Grün-Zustand. Für diesen Verfahrens-Aspekt gibt es je nach Verfahren kaum veröffentlichte Referenzen. Die vorhandenen Referenzen sind in der Regel zudem nicht direkt vergleichbar, da unterschiedliche Werkstoffe oder Eigenschaften untersucht werden. Aufgrund der Interviews [70, 75] ist davon auszugehen, dass die verschiedenen Verfahren Grünlinge mit unterschiedlich ausgeprägten mechanischen Eigenschaften produzieren. Als mechanische Eigenschaften seien hier explizit die Zug- und Biegefestigkeit sowie die Härte der Grünteile genannt. Für Produkte der Verfahren Gelcasting und Moldjet soll die Grünfestigkeit nach [70] hoch sein. Konkrete Prüfergebnisse liegen hier noch nicht vor. In Voruntersuchungen wurden jedoch bereits Grünteile zerspanend bearbeitet und so filigrane Geometrien erzeugt: gefräste Zapfen mit einem Durchmesser von  $<0,4$  mm bei einer Höhe von 2 mm. Für den Cold Metal Fusion-Prozess wird die Grünfestigkeit nach [75] im Vergleich zum Binder Jetting als höher eingeschätzt. Erfahrungen mit den extrusionbasierten Prozessen liegen nicht vor. Aufgrund der wenigen veröffentlichten Untersuchungen zu Grünteil-Eigenschaften, die noch dazu für verschiedene Werkstoffe durchgeführt wurden, wird eine Bewertung des FFF und des FGF nicht durchgeführt.

Die Auflösung wirkt sich auf die umsetzbaren Bauteil-Geometrien aus. Für diesen Aspekt lassen sich mehr konkrete Informationen finden. Als Referenz für den Wert des FFF-Verfahrens dient [2]. In den hier formulierten Konstruktionsregeln wird für die Dicke eines nicht gekrümmten Elements ein Wert von  $\geq 1,5$  mm genannt. Es wird außerdem die Regel ausgeführt, dass alle Kanten Radien besitzen sollten. Für Außenradien sollte der Wert  $>1,5$  mm sein, für Innenradien  $>0,3$  mm. Solche Angaben sind für das FGF-Verfahren nicht bekannt. Dieser Aspekt wird für die suspensionsbasierten Verfahren auf Basis der Angaben aus [70] höher bewertet. Das Moldjet wird mit einer Auflösung von bis zu 0,2 mm durchgeführt. Dies ist prinzipiell auch mit dem Gelcasting-Verfahren zu erreichen, hier kommt es jedoch auf die Auflösung der verwendeten Form an. Wird die Form für das Gelcasting mittels FFF hergestellt, ist die Auflösung des FFF die limitierende Größe. Nach [61] ist mit dem Binder Jetting ebenfalls eine Auflösung von 0,2 mm zu erzielen. In [6] wird für das Binder Jetting ebenso die Aussage getroffen, dass das Verfahren für Konturen mit einer Dicke von  $\geq 0,5$  mm geeignet ist. Für das Cold Metal Fusion gibt es keinen öffentlich dokumentierten Kennwert, weswegen eine Abschätzung auf Basis von [2] durchgeführt wird. Analog zum FFF ist hier für die Gestaltung von SLS-Bauteilkanten empfohlen, dass diese mit Radien versehen werden. Der Wert für diese Radien sollte  $>0,6$  mm für Außen- und  $>0,8$  mm für Innenradien betragen. Für die Gestaltung von nicht gekrümmten Elementen ist ein Wert von  $\geq 1$  mm für deren Dicke vorgegeben. Aus den gerade beschriebenen Informationen folgt für das Gelcasting, das Moldjet-Verfahren sowie das Binder Jetting die Bewertung einer hohen Auflösung. Für das Cold Metal Fusion wird eine mittlere erzielbare Auflösung vermutet,

während die Auflösung des FFF und des FGF als relativ gering bewertet werden.

Basierend auf Untersuchungen liegt die erzielbare Sinterdichte für alle Technologien auf demselben Niveau. Laut [6, 70] liegt die mögliche relative Dichte für alle betrachteten Verfahren bei 99%. Aus diesem Grund entfällt der Aspekt der Sinterdichte aus dem Bewertungsschema.

Kennwerte für die Oberflächengüte liegen für einige der Verfahren vor. Neben Anforderungen an die Oberflächengüte selbst betrifft dieser Aspekt ebenfalls die Betriebsfestigkeit des Bauteils. Für das FFF ist in [2] ein erzielbarer  $R_z$ -Wert von 25-150  $\mu\text{m}$ , in [38] ein erzielbarer  $R_a$ -Wert von 15-28  $\mu\text{m}$  und in [6] ein erzielbarer  $R_a$ -Wert von 5-18  $\mu\text{m}$  angegeben. Die Diskrepanz der  $R_a$ -Werte kann an Prozessparametern sowie verarbeiteten Werkstoffen liegen. Da in [6] das sinterbasierte FFF betrachtet wird, ist der Wert von größerer Relevanz für den hier angestellten Vergleich. Für das FGF werden in [69] ein Wertebereich von 18-30  $\mu\text{m}$  für  $R_z$  und ein Wertebereich von 2,5-3  $\mu\text{m}$  für  $R_a$  angegeben. Mittels Binder Jetting lassen sich laut [6]  $R_a$ -Werte von 4-8  $\mu\text{m}$  erzielen. Die in die Bewertung eingehenden Werte für das CMF basieren auf den Werten des SLS-Verfahrens aus [2], welche mit einem  $R_z$ -Wert von 75-150  $\mu\text{m}$  angegeben sind. Für die suspensionsbasierten Verfahren Gelcasting und Moldjet liegen keine konkreten Werte vor. Aus [70] sowie Sichtproben wird vermutet, dass die Oberflächengüte als hoch eingeschätzt werden kann. Da das Gelcasting an dieser Stelle im Kontext der AM betrachtet wird, muss jedoch in Betracht gezogen werden, dass die Oberflächengüte des Verfahrens von der verwendeten Form abhängt. Wird diese Form beispielsweise mit FFF hergestellt, so wird die erzielbare Oberflächengüte auf die des FFF begrenzt.

Für den Aspekt der Kantengestaltung wurden einige Referenzen bereits im Kontext der Auflösung genutzt. Für das FFF und das CMF (bzw. SLS) wurde beschrieben, dass die Kanten mit Radien versehen sein sollten. Dass Bauteile des CMF keine ausgeprägten Kanten besitzen sollten, wird auch in [75] bestätigt. Im Kontext des FGF-Verfahrens existieren keine Quellen in diese Richtung. Da das Verfahren extrusionbasiert ist, wird vermutet, dass Kanten von FGF-Bauteilen ebenfalls mit Radien versehen sein sollten. Für das Binder Jetting sind nach [75] Bauteilkanten ebenfalls zu vermeiden. In [70] erfolgt die Information, dass mit den suspensionsbasierten Verfahren ausgeprägte Kanten durchaus fertigbar sind. Es wird allerdings angemerkt, dass die Entformung von GC-Bauteilen potenziell zu Lasten dieser Kanten gehen kann. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass der Prozessschritt nach der Grünteil-Erzeugung, also der Sintervorgang, der kritische Schritt für Bauteilkanten ist. Dies gilt für alle beschriebenen sinterbasierten Prozesse. Es kommt hinzu, dass Leichtbau den Kontext des SIGNAL-Projektes darstellt. Da es in diesem Kontext prinzipiell um hoch belastete Komponenten geht, ist eine kantige Gestaltung dieser Komponenten aufgrund von Spannungsspitzen nicht empfehlenswert. Die beiden letztgenannten Punkte führen dazu, dass der Aspekt der Kantengestaltung nicht in das Bewertungsschema eingeht.

Ein Aspekt, der weniger mit der Bauteilgestaltung als mit der Wertschöpfung der jeweiligen Technologie zu tun hat, ist die Produktivität der Verfahren. Da dieser Aspekt eine weitere Dimension mit einem großen Spektrum für die Auswahl der Demonstrator-Bauteile eröffnet, soll er an dieser Stelle mit einfließen. Als Kenngröße für die Produktivität wird die erzielbare Aufbaurrate (engl.: deposition rate) der Verfahren für die Herstellung von Grünteilen betrachtet. Im Kontext des sinterbasierten FFF wird in [8] ein Wertebereich von 4-30  $cm^3/h$  und in [6] ein Wertebereich von 3 - 35  $cm^3/h$  genannt. Für das FGF gibt es solche Angaben bisher nicht. Das Moldjet-Verfahren bietet laut [70] Aufbauraten von 1000 - 1600  $cm^3/h$ , während das CMF-Verfahren mit der im Projekt genutzten Maschine eine Aufbaurrate von 500  $cm^3/h$  zu erzielen ist [31]. Für das Binder Jetting sind laut [40] Aufbauraten von 160 - 3600  $cm^3/h$  möglich, nach [6] liegen die Aufbauraten im Bereich von 6 - 180  $cm^3/h$ . Für das Gelcasting ist kein konkreter Wertebereich angegeben, laut [70] ist das Einfüllen der Suspension wenig zeitaufwendig und Wertebereiche wie 1000  $cm^3/s$  denkbar. Der Zeitaufwand für die Grünteil-Herstellung insgesamt hängt jedoch maßgeblich von der Verfügbarkeit der Form ab. Ist die verwendete Form eine Dauerform, lassen sich Aufbauraten in der gerade genannten Größenordnung erzielen. Wenn die verwendete Form jedoch eine verlorene Form ist, die mittels AM hergestellt wird, hängt die Produktivität des Verfahrens von der Produktivität des Verfahrens ab, mit dem die Form hergestellt wird. Für die Bewertung dieses Aspekts folgt, dass für das FGF und das GC keine Aussage getroffen werden kann. Die Bewertung der anderen Verfahren lautet in aufsteigender Reihenfolge: FFF, Binder Jetting, Cold Metal Fusion und Moldjet.

Die gerade beschriebenen Bewertungen sind zusammenfassend in **Tabelle 3.4** aufgeführt. Je höher der Füllgrad des Kreises ist, desto höher ist die Bewertung des jeweiligen Aspekts. Aspekte, die aufgrund fehlender Informationen oder nicht gegebener Eindeutigkeit nicht bewertet werden können, sind mit einem “\*” versehen.

Tabelle 3.4: Aspekte der relevanten Technologien

	FFF	FGF	Gel-casting	Moldjet	BJ	CMF
Grünteil-Eigenschaften	*	*	●	●	◐	◑
Auflösung	◐	◑	◑	●	●	◑
Oberflächengüte	◑	●	*	●	◑	◑
Produktivität	◐	*	*	●	◑	◑

Anhand der Bewertungsmatrix wird deutlich, dass sich die Verfahren mit Blick auf die umsetzbaren Bauteilgeometrien unterscheiden. Die Auswahl mehrerer Demonstrator-Bauteile mit unterschiedlichen geometrischen Ausprägungen scheint deshalb sinnvoll. Auf diesem Wege können durch Qualitätsuntersuchungen an den Bauteilen die jeweiligen Aspekte der Technologien direkt verglichen werden. Dieses Vorgehen ist ebenso direkt für die im Projekt anstehende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nützlich, da so eine breite Auswertung im Rahmen der verschiedenen Fallstudien ermöglicht wird. Dementsprechend sollte das Spektrum der möglichen Bauteilgröße ausgenutzt werden.

Aus den Aspekten des Vergleichs lassen sich Bauteil-Merkmale ableiten, die sich in unterschiedlichen Ausprägungen in den Demonstratoren wiederfinden sollten. Diese Merkmale sind in **Abbildung 3.12** in einem Spinnen-Diagramm aufgeführt.

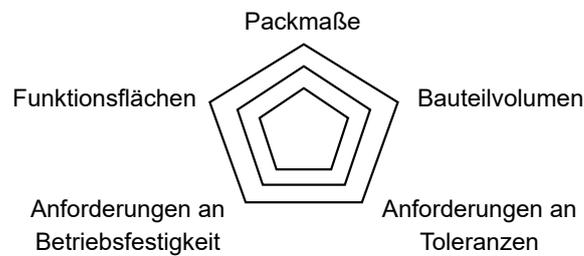


Abbildung 3.12: Abzudeckendes Spektrum der Demonstratoren

Mit den Merkmalen *Packmaße* und *Bauteilvolumen* wird der Technologie-Aspekt der Produktivität untersucht.

Über das Merkmal *Funktionsflächen* sollen mehrere Aspekte betrachtet werden. Es können Aspekte wie die Auflösung und die Oberflächengüte der Verfahren anhand der Demonstratoren untersucht werden. Außerdem kann so der Aspekt der Grünteil-Eigenschaften anhand seiner Bedeutung für die gesamte Prozesskette untersucht werden. Die Funktionsflächen sollten über die zerspanende Bearbeitung am Grünteil und am Sinterteil gefertigt werden, um die Zielerreichung sowie den damit verbundenen Aufwand konkret zu machen.

Durch das Merkmal *Anforderungen an Betriebsfestigkeit* wird der Aspekt der Oberflächengüte berücksichtigt. Es ist zudem geboten, die Eignung der Verfahren in Abhängigkeit der Anforderungen an die Betriebsfestigkeit in Fallstudien zu untersuchen, um grundlegende Erfahrungen in diesem Kontext aufzubauen.

Das Merkmal *Anforderungen an Toleranzen* dient dazu, dass die Auflösung der Verfahren sichtbar gemacht wird. Außerdem können durch dieses Merkmal die verschiedenen Bearbeitungswege, Grünteil- oder Sinterteil-Bearbeitung, untersucht und direkt miteinander verglichen werden. Die Untersuchungen der Merkmale sowie die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen alle der Validierung und Weiterentwicklung der Bauteilstrategie. Durch die Betrachtung an realen Bauteilen sind die Ergebnisse konkret und direkt vergleichbar.

Es gibt weitere Aspekte der Verfahren, die nicht direkt die Erzeugnisse betreffen, sondern strategischer bzw. wirtschaftlicher Natur sind. Es geht um Kostenfaktoren für die Fertigung, die im Rahmen der Prozesskette entstehen.

Neben der Produktivität gibt es weitere Aspekte, in denen sich die Verfahren unterscheiden, die jedoch die umsetzbare Bauteilgeometrie betreffen. Diese Aspekte lauten:

- Verbreitung der Technologie
- Kosten der Technologie
- Sicherheitsanforderungen für die Technologien

Diese Punkte werden in einem separaten Arbeitspaket betrachtet. Sie besitzen keine konkrete Auswirkung auf die Auswahl der Demonstratoren.

## 3.5 Anwendung der Bauteilstrategie

Im Folgenden wird das Vorgehen für die Anwendung der Bauteilstrategie beschrieben. In **Abbildung 3.13** sind die einzelnen Schritte der Methode abgebildet.

Der Ablauf beginnt grundsätzlich mit dem Filtern des Bauteil-Portfolios nach den für die Branche jeweils definierten Ausschluss-Kriterien. Für den Kontext der Luftfahrt-Bauteile sind diese Ausschlusskriterien spezifische Vorgaben für das Fertigungsverfahren, den Werkstoff sowie die Abmaße der Bauteile.

Im nächsten Schritt gilt es, die Bewertungskriterien zu konkretisieren bzw. quantifizieren, für die dies noch nicht geschehen ist. Durch die vorherige Filterung nach Ausschluss-Kriterien ergibt sich der anzusetzende Wertebereich aus den verbleibenden Einträgen des Bauteil-Portfolios. Aus diesem Wertebereich müssen dann die Maßzahlen für die Bewertung abgeleitet werden. Beispielhaft sei hier das Kriterium der Steifigkeit genannt, für das als Ausprägungen bisher nur die beiden qualitativen Werte "Niedrige Anforderungen an Steifigkeit" und "Hohe Anforderungen an Steifigkeit" festgehalten wurden.

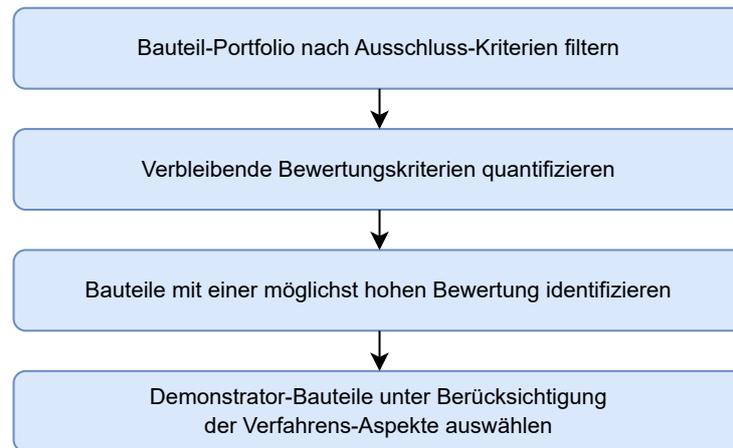


Abbildung 3.13: Ablauf der Bauteilkategorisierung

Im nächsten Schritt kommt es zum eigentlichen Screening der Bauteile, das in Form eines schrittweisen Filterns anhand der Kriterien aus der Nutzwertanalyse stattfindet. Als Werte bzw. Ausprägungen für diese Filterung sind die Bauteil-Ausprägungen mit den höchsten Maßzahlen anzusetzen. Die Reihenfolge für die jeweiligen Filter-Vorgänge soll sich dabei an zwei Aspekten orientieren. Als ein Aspekt ist hier die Realisierbarkeit der Filterung anhand des jeweiligen Kriteriums zu nennen. Das Gewicht des Bauteils ist voraussichtlich explizit in der Bauteil-Datenbank hinterlegt. Die Komplexität eines Bauteils ist voraussichtlich nicht in einer oberflächlichen Recherche einsehbar. Der zweite Aspekt betrifft die Gewichtung der Bewertungskriterien. Im Sinne der Findung einer möglichst guten Lösung, sollten Kriterien mit einer hohen Gewichtung für die Filterung priorisiert werden. Dabei sind zudem in der Praxis vorkommende Wechselwirkungen zwischen Kriterien für die Priorisierung zu berücksichtigen. Ebenso können weitere Kriterien für die Bewertung eingeführt oder aber nicht relevante Kriterien aus der Betrachtung entfernt werden. Dies würde die Gewichtungen einzelner Kriterien beeinflussen, die Methode im Ganzen bliebe trotzdem bestehen.

Im letzten Schritt geht es um die Auswahl konkreter Bauteile als Demonstratoren für ein Demonstrator-Portfolio des SIGNAL-Projektes. Für dieses Demonstrator-Portfolio ist anzustreben, dass die Bauteileigenschaften aus dem in Abschnitt 3.4 beschriebenen Spektrum vertreten sind.

Mit Blick auf die hier beschriebene Methodik ist zu bedenken, dass die formulierte Bauteilstrategie inklusive der Kategorisierung eine Basis für das Vorgehen im Projekt ist. Dieser Ansatz sollte vor der Implementierung mittels Expertenwissen validiert werden. Bisher basieren die beschriebenen Zielsysteme inklusive der Gewichtungen auf einer überwiegend theoretischen Grundlage.

Außerdem zu beachten ist, dass einige bestehende praxisrelevante Bauteilkriterien (z.B. Entflammbarkeit) bisher nicht in die Bewertung eingeflossen sind. Auch hier wird Erfahrungswissen benötigt, um Kriterien, die voraussichtlich Ausschluss-Kriterien sind, aufstellen zu können.

Für die finale Auswahl von Bauteilen aus diesem Portfolio empfiehlt es sich, weitere Methoden heranzuziehen, die die Potenziale der Bauteile möglichst konkret aufzeigen. Es sei in diesem Zusammenhang auf [77] verwiesen, in dem eine Methode hergeleitet wird, um das Potenzial von Leichtbauteilen vor der Optimierung zu bewerten. Hierbei wird nicht nur die Wirtschaftlichkeit der Fertigung betrachtet, sondern ebenfalls die Gewichtsersparnis. Diese Gewichtsersparnis wird in ihren finanziellen Mehrwert übersetzt.

## 4 Methodik zur Entwicklung von Prozessparametern

Die nachfolgenden Abschnitte behandeln die Entwicklung von Prozessparametern im Kontext der AM. Es erfolgt eine Analyse und Gegenüberstellung ausgewählter bisheriger Arbeiten aus dem Feld der AM generell, sowie der extrusionsbasierten AM im Speziellen. Als Kriterium für die Auswahl der Referenzen zählt vordergründig die Darstellung des methodischen Vorgehens für die Ermittlung der Prozessparameter. Aus diesem Grund werden ebenfalls Referenzen betrachtet, die nicht die extrusionsbasierten Prozesse im Fokus haben. Auf die Analyse folgt die Herleitung eines methodischen Vorgehens für die Entwicklung der Prozessparameter für extrusionbasierte Prozesse im Kontext der sinterbasierten AM.

### 4.1 Gegenüberstellung bisheriger Arbeiten

In der Dissertation von *Ahlers* aus dem Jahre 2020 geht es um die Parameter- und Prozessoptimierung für ein pulverbettbasiertes Verfahren [3]. Die Untersuchungen der gerade genannten Arbeit haben das übergeordnete Ziel, die Aufbaurate innerhalb des Fertigungsprozesses zu erhöhen. Der Fertigungsprozess soll also produktiver gestaltet werden. Ein hierfür geeignetes Fenster von Prozessparametern wird schrittweise identifiziert und optimiert.

In [12] wird ein neuartiges Verfahren entwickelt, das der Additiven Fertigung zugeordnet wird. Das Verfahren basiert auf dem Materialauftrag und ist vergleichbar mit Verfahren der Materialextrusion. Ein Zwischenergebnis ist eine Vorgehensweise zur Festlegung der Prozessparameter. Es wird die Fertigung einer eindimensionalen Geometrie untersucht.

In [64] wird die Technologie des drucklosen Sinterns von Kupfer untersucht. Der Werkstoff wird mittels Suspensionsgießverfahren verarbeitet. In diesem Kontext werden Grün- und Sinterdichte in Abhängigkeit verschiedener Prozessgrößen betrachtet.

[38] behandelt die Optimierung der Prozessparameter für das FFF auf Basis statistischer Modelle. Hierfür wird erst ein grundlegendes Modell für den Fertigungsprozess hergeleitet, in dem

die Einfluss- und Zielgrößen des Prozesses definiert werden. Die entwickelten Modelle werden anhand verschiedener Probekörper validiert.

In der Arbeit von *Kloke* werden umfassende Untersuchungen bezüglich des Werkstoffs, der Prozessparameter sowie der Bauteileigenschaften im Kontext des FFF durchgeführt [53]. Im Fokus der Dissertation liegt die Verarbeitung eines Luft- und Raumfahrt-Materials. Die Untersuchungen betrachten die Eigenschaften des unverarbeiteten Werkstoffs sowie die mechanischen Eigenschaften des verarbeiteten Werkstoffes nach genormten Prüfungen.

Grundlegende Untersuchungen zu Prozessparametern werden auch in [62] durchgeführt. Als Zielgrößen sind hier die Rauheit und die Härte definiert. Mittels der *Analysis of Variance (ANOVA)* wird festgestellt, dass die Faktoren keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Härte des Probekörpers besitzen.

Eine Optimierung der Prozessparameter für die Fertigung einer speziellen Geometrie wird in [56] durchgeführt. In den Untersuchungen wird mit der statistischen Versuchsplanung zur Festlegung der Werte der Einflussgrößen gearbeitet. Die Einflüsse der Einflussgrößen werden unter anderem mit der ANOVA geprüft.

In einem Paper aus 2022 untersucht eine Gruppe der Universität Rostock FGF-Prozessparameter für die Verarbeitung einer Stahllegierung [69]. Die Untersuchungen finden in zwei Phasen statt. Die Optimierung der Parameter wird mit einem sogenannten *Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA)* durchgeführt. Die gefertigten Bauteile werden mittels verschiedener Messverfahren untersucht.

Die Methoden hinter den gerade beschriebenen Untersuchungen sind in **Tabelle 4.1** als eine chronologische Abfolge der Schritte der Untersuchungen zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Übersicht verschiedener Methoden zu Parameteruntersuchungen

Referenz	Kontext	Methodik
Ahlers [3]	Prozess-optimierung (LBF)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Festlegung von Einfluss- und Zielgrößen</li> <li>2. Grundlegende Untersuchungen an 1D-Geometrie (vollfaktoriell)</li> <li>3. Eingrenzung des Parameterfensters durch die Identifikation harter Verfahrensgrenzen</li> <li>4. Erweiterung der Faktoren und Zielgrößen, da Faktorstufen durch Ergebnisse aus 3. reduziert werden</li> <li>5. Untersuchungen an 2D-Geometrie (vollfaktoriell)</li> <li>6. Eingrenzung des Parameterfensters</li> <li>7. Festlegung der neuen Zielgröße</li> <li>8. Erstellen eines Versuchsplanes nach DoE</li> <li>9. Untersuchungen an 3D-Geometrie</li> </ol>

Tabelle 4.1 – fortgesetzt

Referenz	Kontext	Methodik
Ahlers [3]	Prozess-optimierung (LBF)	10. Auswertung der Einflüsse der Prozessparameter auf die Porosität und mechanischen Eigenschaften der Proben 11. Weitere Untersuchungen eines Folgeprozesses (HIP)
Brillinger [12]	Technologieentwicklung (n/A)	1. Materialauswahl 2. Definition des Verfahrens 3. Herstellung der verarbeitenden Maschine 4. Untersuchungen der Prozessparameter 5. Definition von Einflussgrößen 6. Definition von Zielgrößen 7. Untersuchungen an 1D-Geometrie 8. Analyse von Korrelationen zwischen Einflussgrößen 9. Einführung einer Methode zur Festlegung der Prozessparameter
Ott [64]	Prozess-optimierung (Gel Casting)	1. Definition von Einfluss- und Zielgrößen 2. Iterative Untersuchungen zu jeweils einer Zielgröße 3. Herleitung eines Modells zur Prozessberurteilung
Fuhrmann [38]	Prozess-optimierung (FFF)	1. Definition von Ziel- und Einflussgrößen 2. Erstellung des Versuchplanes nach DoE für empirische Modellbildung (Black Box) 3. Untersuchungen an 3D-Probekörper 4. Analytisch-physikalische Modellbildung (White Box) 5. Vergleich der beiden Modelle anhand der Versuchsergebnisse 6. Überprüfung der Transferierbarkeit der Modelle anhand weiterer Untersuchungen an anderen Prüfkörpern 7. Kombination von Black und White Box-Ansatz (Grey Box) 8. Implementierung der Modelle in User Interface
Kloke [53]	Prozess-optimierung (FFF)	1. Untersuchungen des Materials (prozessunabhängig) 2. Untersuchungen für verschiedene Prozessparameter als Einflussgrößen für mechanische Bauteileigenschaften 3. Untersuchungen von Bauteileigenschaften unter dem Einfluss prozessexterner Faktoren (Einsatzbedingungen) 4. Definition verschiedener Prüfkörper für Prozessuntersuchungen; Einfluss- und Zielgrößen des Prozesses werden berücksichtigt 5. Untersuchungen von Einflüssen verschiedener Prozessparameter 6. Untersuchungen des Verfahrens im Kontext des Leichtbaus

Tabelle 4.1 – fortgesetzt

Referenz	Kontext	Methodik
Mwema et al. [62]	Prozess- optimierung (FFF)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Definition von Ziel- und Einflussgröße</li> <li>2. Definition des Versuchsplanes (vollfaktoriell)</li> <li>3. Festlegung der optimalen Prozessparameter</li> <li>4. Untersuchungen an 3D-Geometrie</li> <li>5. Untersuchung von Optimierungsmethoden</li> <li>6. Untersuchung des tatsächlichen Einflusses der Faktoren mittels ANOVA</li> </ol>
Kuo et al. [56]	Prozess- optimierung (FFF)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Definition der Zielgröße (Geometrie)</li> <li>2. Definition der Einflussgrößen</li> <li>3. Untersuchungen lokaler Minima jeder Einflussgröße</li> <li>4. Einbindung der lokalen Minima in einen dreistufigen Versuchsplan</li> <li>5. Parameteroptimierung bzgl. der Zielgröße</li> </ol>
Riaz et al. [69]	Prozess- optimierung (FGF)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Definition der Zielgrößen (Gründichte und Oberflächenrauheit)</li> <li>2. Definition der Faktoren</li> <li>3. Aufstellung eines Versuchsplanes mit zwei Phasen</li> <li>4. Untersuchungen der ersten Phase</li> <li>5. Bestimmung des lokalen Optimums der ersten Phase</li> <li>6. Untersuchungen der zweiten Phase unter Berücksichtigung der ersten Phase</li> <li>7. Bestimmung des Optimums der zweiten Phase</li> </ol>

In diesen Referenzen gibt es, trotz teils unterschiedlicher Technologien und Zielsetzungen, Gemeinsamkeiten. Diese sind teils methodischer, teils fachlicher Natur. Allen Untersuchungen ist gemein, dass erst die Definition der Zielsetzung erfolgt und daraufhin das eigentliche Vorgehen definiert wird. Dieses Vorgehen ist im Kontext des wissenschaftlichen Arbeitens vorauszusetzen und findet an dieser Stelle der Form halber Erwähnung. Analog dazu lässt sich über die konkreten Untersuchungen von Prozessparametern und deren Einflüssen festhalten, dass für die Planung der Versuche in jeder Referenz erst die Faktoren und Zielgrößen der Systeme definiert werden. Im Kontext der Prozessuntersuchungen sind die Faktoren ein Teil der AM-Prozessgrößen. Die Zielgrößen lassen sich in zwei Kategorien einteilen: Prozessdaten, wie z.B. Prozesszeit und Energieverbrauch, und Bauteileigenschaften, wie z.B. Oberflächengüte und Festigkeit.

In mehreren Referenzen werden sowohl qualitative als auch quantitative Untersuchungen durchgeführt. Bei den qualitativen Untersuchungen handelt es sich in der Regel um grundlegende

Zusammenhänge. Es geht um die Fertigbarkeit von simplen Geometrien. Die Untersuchungen im Kontext des FFF beziehen den Einfluss der Positionierung im Bauraum an dieser Stelle mit ein. Im Kontext der quantitativen Untersuchungen steht die Optimierung der funktionierenden Prozesse im Fokus. Auch hier werden simple Geometrien gefertigt, welche im Kontext ihrer mechanischen oder geometrischen Eigenschaften untersucht werden.

In jeder der Referenzen werden Prüfkörper für die durchzuführenden Untersuchungen definiert. Die Gestaltung der Prüfkörper hängt von den Zielgrößen der Untersuchung ab. Je nach Untersuchungsgegenstand werden Prüfkörper für die Untersuchungen mehrerer geometrischer Zielgrößen verwendet. Dies trifft besonders auf Untersuchungen bezüglich der Maßhaltigkeit zu. Diese Untersuchungen finden an simplen Geometrien wie Würfeln, Quadern oder Kugel-Abschnitten statt. Die Prüfkörper für Untersuchungen der mechanischen Bauteileigenschaften entsprechen den Vorgaben für die genormten Prüfungen ebendieser Eigenschaften. So ist eine direkte Vergleichbarkeit mit anderen Fertigungsverfahren ebenso gegeben, wie die Vergleichbarkeit von Proben derselben Technologie unter Variation der Prozessparameter.

In einer Referenz, die dem Bereich der pulverbettbasierten AM zuzuordnen ist, werden Prozessparameter iterativ untersucht. Die dabei verwendeten Prüfkörper werden über die Iterationen von 1D- zu 2D- zu 3D-Geometrien weiterentwickelt. Die Untersuchungen von 1D-Geometrien sind aufgrund des untersuchten neuen Materials notwendig. Ein solches Vorgehen ist für extrusionbasierte AM-Prozesse nicht gängig und auch nicht sinnvoll. Die Abhängigkeit der 1D-Geometrien von Prozessparametern ist im Wesentlichen bekannt und eher Bestandteil der Inbetriebnahme eines 3D-Druckers. Die Untersuchungen der Prozesse werden in den Referenzen aus dem FFF-Kontext standardmäßig an 3D-Geometrien durchgeführt. Das ist aufgrund der betrachteten Zielgrößen notwendig. So sind relevante mechanische Eigenschaften an 3D-Geometrien zu prüfen. Die Prozessstabilität in Abhängigkeit der Aufbaurichtung des Bauteils zu untersuchen, wie es in einigen der Referenzen getan wird, kann ebenso nur durch die Fertigung von 3D-Geometrien erfolgen. Dasselbe trifft auf Untersuchungen der Materialdichte des Bauteils zu.

In einigen der Referenzen wird mit der Methode der statistischen Versuchsplanung gearbeitet. Gerade die Betrachtung vieler Einfluss- und Zielgrößen hat die Anwendung dieser Methode zur Folge. Weniger umfassende Untersuchungen oder die Untersuchungen einzelner Teilbereiche werden mit einer klassischen vollfaktoriellen Versuchsplanung durchgeführt. In drei der Referenzen wird die Versuchsplanung und -durchführung in mehreren Phasen vorgenommen. Hierbei steht der Versuchsplan einer jeden Phase für sich allein, wobei die Ergebnisse der Versuche in die Versuchsplanung der nächsten Phase mit eingehen. Dieses Vorgehen bietet sich bei Technologien beziehungsweise Konstellationen an, über die bisher noch keine tiefgreifenden Erkenntnisse

vorliegen. So wird ein Grundverständnis der Zusammenhänge aufgebaut. Das Risiko bei einem solchen Vorgehen ist, dass die optimierten Ergebnisse einer Versuchsphase formal lokale Optima sind. Durch die teilweise fixierten Einflussgrößen können potenziell vorhandene Wechselwirkungen zwischen den Parametern nicht untersucht werden.

In **Tabelle 4.2** sind in der linken Spalte Zielgrößen aufgeführt, die in den Referenzen untersucht wurden. Der Literaturverweis hinter den Zielgrößen gibt an, in welcher Referenz die jeweilige Größe untersucht wurde. In der rechten Spalte der Tabelle befinden sich die Faktoren, die im Zusammenhang mit der jeweiligen Zielgröße untersucht wurden. Auch hier wird auf die jeweiligen Referenzen verwiesen.

Tabelle 4.2: Untersuchte Zielgrößen in Abhängigkeit der Einflussgrößen

Zielgröße	Faktoren
Maßhaltigkeit (X-Y) [38, 53]	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Schichtdicke [38]</li> <li>· Fülldichte [38]</li> <li>· Druckgeschwindigkeit [38]</li> <li>· Düsentemperatur [38, 50]</li> <li>· Plattformtemperatur [38]</li> <li>· Bauraumtemperatur [50]</li> </ul>
Maßhaltigkeit (Z) [38, 53]	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Schichtdicke [38]</li> <li>· Fülldichte [38]</li> <li>· Druckgeschwindigkeit [38]</li> <li>· Düsentemperatur [38, 50]</li> <li>· Plattformtemperatur [38]</li> <li>· Bauraumtemperatur [50]</li> </ul>
Maßhaltigkeit (Runde Geom.) [38, 56]	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Schichtdicke [38]</li> <li>· Fülldichte [38]</li> <li>· Druckgeschwindigkeit [38, 56]</li> <li>· Düsentemperatur [38, 56]</li> <li>· Plattformtemperatur [38]</li> <li>· Bauteilkühlung [56]</li> </ul>

Tabelle 4.2 – fortgesetzt

<b>Zielgröße</b>	<b>Einflussgrößen</b>
Oberflächenrauheit [38, 53, 62]	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Schichtdicke [38, 62]</li> <li>· Fülldicke [38]</li> <li>· Druckgeschwindigkeit [38]</li> <li>· Düsentemperatur [38, 53]</li> <li>· Plattformtemperatur [38]</li> <li>· Bauraumtemperatur [50]</li> <li>· Aufbaurichtung [62]</li> </ul>
Zugfestigkeit [53]	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Aufbaurichtung [53]</li> <li>· Füllmuster [53]</li> <li>· Spurbstand [53]</li> <li>· Strangbreite [53]</li> <li>· Bindenähte [53]</li> </ul>
Biegefestigkeit [53]	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Aufbaurichtung [53]</li> <li>· Füllmuster [53]</li> <li>· Spurbstand [53]</li> <li>· Strangbreite [53]</li> <li>· Bindenähte [53]</li> </ul>
Bauteildichte [53]	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Düsentemperatur [50]</li> <li>· Bauraumtemperatur [50]</li> </ul>
Bindenahtdicke [53]	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Düsentemperatur [50]</li> <li>· Bauraumtemperatur [50]</li> </ul>
Prozesszeit [38]	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Schichtdicke [38]</li> <li>· Fülldicke [38]</li> <li>· Druckgeschwindigkeit [38]</li> <li>· Düsentemperatur [38]</li> <li>· Plattformtemperatur [38]</li> </ul>
Energieverbrauch [38]	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Schichtdicke [38]</li> <li>· Fülldicke [38]</li> <li>· Druckgeschwindigkeit [38]</li> <li>· Düsentemperatur [38]</li> <li>· Plattformtemperatur [38]</li> </ul>

## 4.2 Herleitung der Methodik

In diesem Abschnitt werden die Erkenntnisse aus dem vorherigen Abschnitt genutzt, um eine Methodik für die Prozessuntersuchungen der in SIGNAL angesiedelten AM-Prozesse zu entwickeln. Hierfür wird beginnend die Zielsetzung für die Anwendung dieser Methode definiert. Der Einsatzbereich der potenziell zu fertigenden Bauteile ist der Mobilitätssektor. In allen in Kapitel 3 betrachteten Bereichen wird die Zulassung der Bauteile, zumindest zum Teil, über die Zulassung der zu verwendenden Werkstoffe und der dazugehörigen Fertigungsverfahren geregelt. Damit die Zulassung des Verfahrens erfolgen kann, muss die Prozessstabilität statistisch nachgewiesen sein. Daraus folgt, dass durch die Methode die Rahmenbedingungen für die Prozessstabilität, also die notwendigen Prozessparameter, definiert werden müssen. Außerdem müssen die Untersuchungen in so einem Maße erfolgen, dass unvermeidbare Prozess-Unsicherheiten in einem hinreichenden Maße identifiziert werden. Die beiden gerade beschriebenen Ziele sind mit Blick auf die Anforderungen an die Methode als *Muss*-Kriterien zu sehen.

Als *Kann*-Kriterium für die Methoden-Anforderungen ist die Effizienz des Fertigungsprozesses zu sehen. Da es bei dem SIGNAL-Projekt neben der Einsparung von Emissionen auch um die wirtschaftliche Effizienzsteigerung geht, ist der Prozessablauf optional hinsichtlich solcher wirtschaftlicher Kriterien zu optimieren. Solche Kriterien sind zum Beispiel die Minimierung der Prozesszeiten und des Materialeinsatzes.

Ebenfalls als *Kann*-Kriterium ist die Erprobung der Technologie generell zu sehen. Damit ist gemeint, dass im besten Fall nicht nur die optimalen Prozessparameter bekannt sind, sondern auch die Verfahrensgrenzen. Auch wenn der FFF-Prozess bereits oft Gegenstand von Untersuchungen war, so ist der Prozess mit neuartigen Feedstocks im Kontext der sinterbasierten Fertigung noch relativ jung. Dies trifft speziell auf die Verarbeitung von Aluminium-Feedstocks zu, die bisher noch nicht etabliert ist. Unabhängig vom verarbeiteten Werkstoff ist der FGF-Prozess noch weniger erforscht als der FFF-Prozess. Eine Untersuchung der generellen Verfahrensgrenzen ist hier potenziell über das SIGNAL-Projekt hinaus von Interesse.

Die Entwicklung der Technologie und somit die Identifikation der anzuwendenden Prozessparameter muss vollständig durch physische Versuche geschehen. Dies liegt zum einen daran, dass die Technologie nicht so weit durchdrungen ist, dass ihre Entwicklung durch Simulationen unterstützt werden könnte. Vor allem sind diese physischen Versuche jedoch notwendig, weil sie für eine Zulassung des Fertigungsverfahrens für die relevanten industriellen Anwendungen Voraussetzung sind. Die Methode hinter diesen Versuchen besteht grundlegend aus sechs Schritten, die so auch in den oben beschriebenen Referenzen durchgeführt wurden:

1. Definition der Zielgrößen
2. Definition der relevanten Einflussgrößen
3. Festlegung der Versuchsmethode
4. Aufstellung des Versuchsplanes entsprechend der Versuchsmethode
5. Durchführung der Versuche nach Versuchsplan
6. Auswertung der Versuche

Je nach Art der untersuchten Prozesse sowie der Zielsetzung der Untersuchungen ist bei der Anwendung der Methode phasenweise ein iteratives Vorgehen nötig. Im Folgenden wird die Methode für den sinterbasierten FFF-Prozess soweit konkretisiert, dass sie im weiteren Verlauf der Arbeit mit der Methode zur Herleitung von Konstruktionsregeln synchronisiert werden kann.

Die Zielgrößen leiten sich aus der Anforderung an die Methode ab. Diese Anforderungen müssen im Kontext des Systems der Prozessroute betrachtet werden. Im Kontext dieser Ausarbeitung ergibt eine Betrachtung von zwei verschiedenen Systemen Sinn. Eines dieser Systeme ist in dem Prozessablaufdiagramm in **Abbildung 4.1** dargestellt und führt die einzelnen Komponenten des Fertigungsprozesses auf. AM-, Entbinderungs- und Sinterprozess stehen jeweils für sich allein. Klassische isolierte AM-Prozessuntersuchungen, wie sie auch in vielen der Referenzen durchgeführt werden, finden aus dieser Perspektive heraus statt. Das ist mit Blick auf die etablierten Prozessrouten der AM, die üblicherweise keine Sinterprozesse beinhalten, sinnvoll. Es wird untersucht, welche Prozessparameter einen Einfluss auf das Erzeugnis der reinen AM haben. Im Kontext des SIGNAL-Projektes ist dieses Erzeugnis immer ein Grünling.

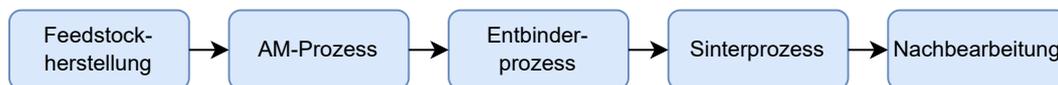


Abbildung 4.1: Definition des Systems der Prozessroute (System 1)

Eine weitere System-Definition ist in dem Prozessablaufdiagramm in **Abbildung 4.2** abgebildet. Die einzelnen Schritte des Fertigungsprozesses sind hier zu einem Prozessschritt zusammengefasst. Mit dieser Perspektive wird nicht der Einfluss der Prozessparameter auf das direkte Erzeugnis der AM betrachtet, sondern der Einfluss der Parameter auf das fertige Bauteil nach dem Sintervorgang. Für die Definition der Zielgrößen der Untersuchungen insgesamt werden nun der AM-Prozess aus System 1 und der Fertigungsprozess aus System 2 freigeschnitten. Die Anforderungen an die Methodik werden dann in diesem Kontext betrachtet.



Abbildung 4.2: Definition des Systems der Prozessroute (System 2)

Aus dem *Muss*-Kriterium der Prozessstabilität folgt, dass die Herstellung von Bauteilen und ihren Eigenschaften reproduzierbar sein muss. Die relevantesten Bauteileigenschaften, die durch den Fertigungsprozess geschaffen werden, sind die geometrischen Eigenschaften. Es geht um die Maßhaltigkeit und gegebenenfalls die Oberflächenbeschaffenheit. Da die zu untersuchenden Fertigungsverfahren aus dem Bereich der generativen Fertigung stammen, besitzen diese Verfahren relativ starke Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs. Das liegt daran, dass Werkstoff-Zusammenhalt im Zuge der Fertigung erst geschaffen wird. Die konkreten mechanischen Eigenschaften sind über genormte Tests zu bestimmen, korrelieren aber erfahrungsgemäß stark mit der erzielten relativen Werkstoffdichte (vgl. z.B. [64]). Im Kontext sinterbasierter Prozessrouten muss zwischen der Sinterdichte (Dichte des Bauteils nach dem Sintervorgang) und der Gründichte (Dichte des Bauteils vor dem Entbinder- und Sinterprozess) unterschieden werden. Erfahrungsgemäß korrelieren auch Sinter- und Gründichte stark. Die mechanischen Eigenschaften der Grünteile wirken sich auf die Möglichkeiten der Grünteil-Bearbeitung aus. Der Aspekt der Grünfestigkeit ist für die Anforderungen an die darauffolgenden (Transport-)Prozesse von Relevanz. Bauteile mit einer entsprechenden Grünfestigkeit eignen sich besser für zerspannende Prozesse, für die das zu bearbeitende Bauteil eingespannt wird und den Zerspankräften standhalten muss. Es ist außerdem zu untersuchen, ob die detaillierte Herstellung von streng tolerierten Funktionsflächen vor dem Entbinderungs- und Sinterprozess sinnvoll ist. Das hängt vor allem von der Homogenität der Sinter-Schrumpfungen ab. Falls die Schrumpfungen homogener Natur sind, birgt die Grünbearbeitung von Werkstoffen wie Titan wirtschaftliches Potenzial. Die zerspannende Bearbeitung solcher Materialien im gesinterten Zustand ist zeit- und verschleißintensiv [51]. Bei der zerspannenden Bearbeitung von Grünteilen wird der auftretende Verschleiß durch die geringeren Zerspankräfte reduziert [51, 72]. Zudem sind höhere Schnittgeschwindigkeiten bei der Grünbearbeitung notwendig, was zu verminderten Prozesszeiten führt [72]. Nach [51] hängt die Zerspanbarkeit zudem von der Härte des Werkstoffs ab. Die Bauteileigenschaften insgesamt lassen sich unterteilen in solche, die direkt nach dem AM-Prozess zu betrachten sind (Gründichte, Grünfestigkeit, Grünhärte) und solche, die erst am Ende der gesamten Prozessroute zu betrachten sind (Sinterdichte, mechanische Eigenschaften). Es gilt, beide Kategorien bei den Prozessuntersuchungen zu berücksichtigen. Ein mehrstufiges Vorgehen bei der Versuchsplanung,

wie es auch in einigen der Referenzen durchgeführt wird, scheint sinnvoll zu sein.

Aus dem ersten beschriebenen *Kann*-Kriterium folgt, dass der Prozess hinsichtlich seiner Wirtschaftlichkeit untersucht und optimiert werden soll. In diesem Kontext ist die Untersuchung der Prozesszeit wesentlich. Die Materialeffizienz wird hauptsächlich durch die Gestaltung der Bauteile beeinflusst. Sie als Zielgröße für Untersuchungen der Prozessparameter zu definieren, ist nicht sinnvoll.

Das *Kann*-Kriterium der Erprobung der Verfahrensgrenzen beeinflusst im Wesentlichen die Faktoren, nicht die Zielgrößen. Werden Verfahrensgrenzen bei den Versuchen erreicht oder übertreten, kann sich jedoch das Format der Zielgrößen ändern. So können aus quantitativen Werten qualitative Werte entstehen.

Bei der Betrachtung der Zielgrößen ist zwischen den Zielgrößen des reinen AM-Prozesses und den Zielgrößen der gesamten Prozessroute zu unterscheiden. Diese Unterscheidung liegt der Betrachtung der beiden verschiedenen Systeme zugrunde. Aus dem gerade Beschriebenen werden die Zielgrößen abgeleitet, die in **Tabelle 4.3** aufgeführt sind.

Tabelle 4.3: Zu untersuchende Zielgrößen der jeweiligen Teilprozesse

(Teil-)System	Zielgrößen
AM-Prozess	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Grün-)Maßhaltigkeit in der X-Y-Ebene</li> <li>• (Grün-)Maßhaltigkeit in Z-Richtung</li> <li>• Gründichte</li> <li>• Grünfestigkeit</li> <li>• Grünhärte</li> <li>• (AM-)Prozesszeit</li> </ul>
Fertigungsprozess	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sinterdichte</li> <li>• Sinter-Schrumpfung in der X-Y-Ebene</li> <li>• Sinter-Schrumpfung in Z-Richtung</li> <li>• Festigkeit</li> <li>• E-Modul</li> <li>• Bruchdehnung</li> <li>• Biegesteifigkeit</li> </ul>

Die Maßhaltigkeit ist indirekt über die Abweichung von Soll- und Ist-Geometrie der Proben zu prüfen. Ein weiterer Aspekt, der Beachtung finden muss, ist die Homogenität der Sinter-Schrumpfungen.

Im nächsten Schritt der Methode geht es um die Definition der Einflussgrößen. Hierfür ist wieder die Betrachtung der Prozessroute in zwei Systemen (s. Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2) geeignet. Aus dem ersten System geht als Ergebnis des AM-Prozesses der Grünling hervor. Die Qualität des Grünlings fasst die definierten Zielgrößen für den AM-Prozess innerhalb dieses Systems zusammen. Die verschiedenen Ursachen, die sich potenziell auf die Qualität des FFF-Grünlings auswirken, sind in dem Ishikawa-Diagramm in **Abbildung 4.3** dargestellt. Die Ursachen stellen mögliche Einflussgrößen für die Untersuchungen dar.

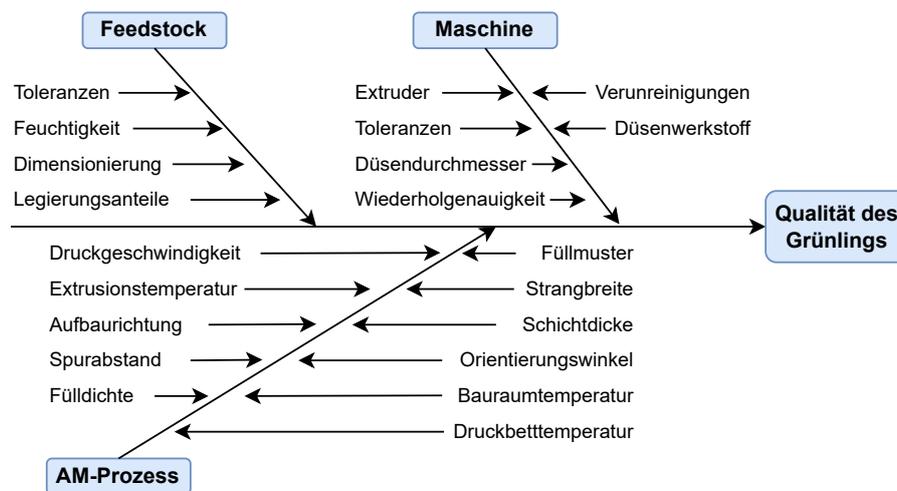


Abbildung 4.3: Ishikawa-Diagramm für die Qualität des FFF-Grünlings

Die Feedstock-Parameter haben zwar einen Einfluss auf die Qualität des Grünlings, sie werden allerdings nicht im Rahmen der AM-Prozessentwicklung untersucht. Da auch der Feedstock im Rahmen des SIGNAL-Projektes entwickelt werden soll, werden sich potenziell auch diese Parameter auf die tatsächliche Versuchsplanung auswirken. Einige der Einflüsse aus der Kategorie *Maschine* sind auch als Prozessparameter zu interpretieren. Das prominenteste Beispiel an dieser Stelle ist der Düsendurchmesser, der als Faktor grundlegend mituntersucht werden sollte. Aus der Kategorie *Prozessparameter* sind 11 Einflussgrößen aufgeführt. Im SIGNAL-Projekt werden grundlegende Untersuchungen durchgeführt, was zu einer Vielzahl an Faktoren führt. Allerdings sind zwei der Einflussgrößen niedriger zu priorisieren: Füllmuster und Fülldichte. Das Füllmuster und die Fülldichte sind durch den Anwendungsfall der Bauteile implizit vorgegeben. Die Bauteile sollen homogen und möglichst dicht gefüllt sein, um zulassungsfähige Eigenschaften

zu erhalten. Werden die zwei genannten Parameter nicht für die Untersuchungen berücksichtigt, bleiben damit insgesamt zehn zu untersuchende Einflussgrößen aus der Betrachtung des ersten Systems.

Aus dem zweiten System geht als Ergebnis des gesamten Fertigungsprozesses das Sintererteil hervor. Die verschiedenen Ursachen, die sich potenziell auf die Qualität des FFF-Sintererteils auswirken, sind in dem Ishikawa-Diagramm in **Abbildung 4.4** dargestellt. In diesem Diagramm sind über die Kategorie *Qualität des Grünlings* implizit bereits die Einflussgrößen aus **Abbildung 4.3** aufgeführt. Die Kategorie *Feedstock* mit der Einflussgröße *Legierungsanteile* ist hier noch einmal explizit aufgeführt, da sie nicht nur im Kontext der Grünteilqualität einen Einfluss besitzt. Sie beeinflusst ebenfalls die notwendigen Entbinder- und Sintervorgänge und somit auch die Qualität des Sintererteils. Die gerade erwähnten Teilprozesse *Entbinderung* und *Sintern* der Fertigung sind die weiteren Kategorien, die in dem Diagramm abgebildet sind.

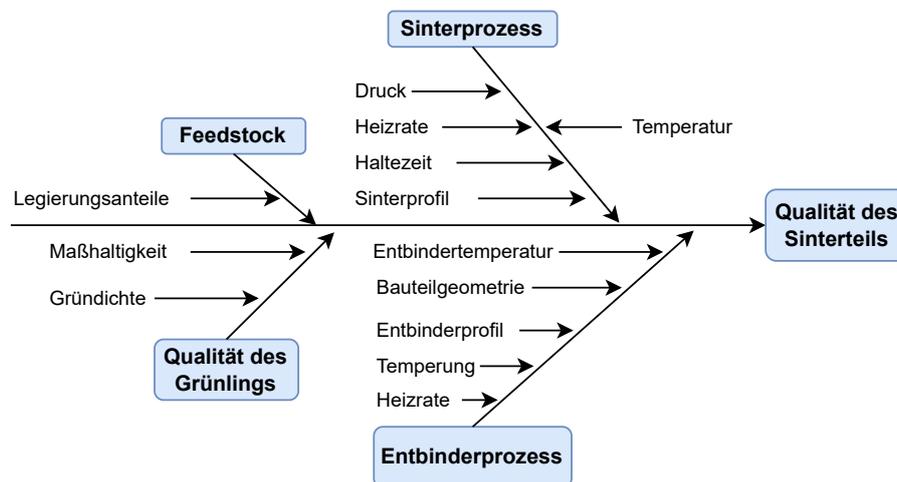


Abbildung 4.4: Ishikawa-Diagramm für die Qualität des FFF-Sintererteils

Aus der Betrachtung dieses System ergeben sich für die Untersuchungen der AM-Prozessparameter direkt keine weiteren Einflussgrößen. Im Kontext des SIGNAL-Projektes muss hier wieder berücksichtigt werden, dass zusätzlich zu den AM-Prozessen sowohl die zu verarbeitenden Legierungen als auch die Entbinderungs- und Sintervorgänge mitentwickelt werden. Diese Entwicklungsarbeiten liegen nicht im Bereich der AM-Prozessparameter, zugleich müssen sie potenziell bei der Erstellung des Versuchsplans berücksichtigt werden. Das liegt daran, dass es für die Un-

tersuchungen des Sinterverhaltens Proben bedarf, die aus dem realen AM-Prozess stammen. Aus dem gerade Beschriebenen werden die folgenden Einflussgrößen als Faktoren für die Untersuchungen der Prozessparameter abgeleitet:

- Düsendurchmesser
- Extrusionstemperatur
- Druckgeschwindigkeit
- Spurabstand
- Strangbreite
- Schichtdicke
- Orientierungswinkel
- Bauraumtemperatur
- Druckbetttemperatur
- Aufbaurichtung

Es folgt der dritte Schritt der Methode: Die Festlegung der Versuchsmethode. Aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen bzw. Faktoren sind die Untersuchungen mittels statistischer Versuchsplanung durchzuführen. Vor detaillierten Untersuchungen bezüglich quantitativer Zielgrößen sollten grundlegende Untersuchungen erfolgen, um den Versuchsraum sinnvoll zu begrenzen. Es sollten dann grundlegende Untersuchungen mittels des sogenannten Screenings erfolgen. Hier wird das Systemverhalten unter Berücksichtigung aller Faktoren betrachtet, um die Effekte der einzelnen Einflussgrößen zu identifizieren. Dafür werden je Faktor zwei Stufen betrachtet. Die Betrachtung von Faktoren, für die im Screening vernachlässigbare Effekte festgestellt werden, kann in folgenden ausführlicheren Untersuchungen entfallen. So wird der Versuchsaufwand in sinnvollem Maße reduziert.

Wie oben erwähnt, hängt die Anzahl der durchzuführenden Versuche potenziell auch davon ab, inwieweit die Proben aus den Untersuchungen des AM-Prozesses auch für die Entwicklung der vor- und nachgelagerten Prozesse benötigt werden. Wird das Verfahren zum Beispiel mit Blick auf verschiedene Legierungszusammensetzungen untersucht, sollte dies qualitativ geschehen. Die jeweilige Legierung stellt also eine Klasse dar. So ist keine Interpolation zwischen den Werten der Legierungsbestandteile möglich. Dadurch erhöht sich die Anzahl der Versuche, aber die Datenlage und somit die statistische Absicherung der Versuche wird verbessert.

Als vierter Schritt der Methode steht die konkrete Aufstellung des Versuchsplanes an. Das wird an dieser Stelle nicht durchgeführt. Es sollen aber die Anforderungen an die Gestaltung des Versuchsplanes genannt werden, die sich aus den bisher betrachteten Methodenschritten ableiten lassen. Wie beschrieben, müssen externe Faktoren potenziell bei der Planung berücksichtigt werden.

Außerdem werden im Rahmen der Auswertung mindestens drei Versuchspläne berücksichtigt werden. Diese Versuchspläne haben verschiedene Motivation: Voruntersuchungen zur Identifizierung der Verfahrensgrenzen, Screening-Untersuchungen zur Identifizierung signifikanter Einflussgrößen sowie detaillierte Untersuchungen zur Verfahrensoptimierung. Damit die Methode der statistischen Versuchsplanung möglichst effektiv genutzt wird, sollten die Faktorstufen möglichst an den Rändern des Versuchsraumes liegen. Dafür müssen die Verfahrensgrenzen bei der Versuchsplanung bekannt sein. In der Praxis ist dies oftmals durch Erfahrungswerte möglich, im Kontext des SIGNAL-Projektes liegen diese Erfahrungswerte aufgrund der Rahmenbedingungen zu großen Teilen nicht vor. Um dies zu kompensieren, müssen Voruntersuchungen stattfinden. Sinnvoll scheint eine Auswertung dieser Voruntersuchungen in qualitativer Form.

Der Umgang mit Einfluss- und Zielgrößen hängt vom jeweiligen Versuchsplan ab. Bei den Voruntersuchungen sollten die Faktoren untersucht werden, von denen die notwendige Prozessstabilität abhängt. Um diese zu identifizieren, können die oben genannten Referenzen als Ansatzpunkte genutzt werden.

Die Durchführung sowie die Auswertung der Versuche werden an dieser Stelle nicht behandelt. Wie oben beschrieben, ist das Vorgehen innerhalb der Untersuchungen iterativ. Bei weiteren Erkenntnissen im Laufe der Versuche kann die notwendige Überarbeitung der bereits vorhandenen Versuchspläne oder die Einführung weiterer Versuchsphasen notwendig sein. Eine Anforderung an die Auswertung sollte sein, dass die gewonnenen Erkenntnisse statistisch abgesichert sind. Im Kontext der Screening-Versuche ist eine Betrachtung mittels ANOVA ein sinnvolles Vorgehen, um die einzelnen Effekte der Faktoren mit relativ hoher statistischer Sicherheit zu bewerten. In **Tabelle 4.4** sind die wesentlichen Punkte der einzelnen Prozessschritte zusammenfassend abgebildet.

Die Zielgrößen sind für das FFF und das FGF dieselben. Die festgelegten Faktoren, die in der Tabelle aufgeführt sind, beziehen sich auf das FFF. Für die Faktoren des FGF-Verfahrens sei als Ansatz auf [69] verwiesen, in dem vier Faktoren untersucht werden. Generell sind für das FGF, analog zum FFF, im Rahmen des Screenings möglichst alle Einflussgrößen zu betrachten, um die jeweiligen Effekte zu identifizieren. Diese umfassenden Untersuchungen sind aufgrund der Neuheit des Verfahrens für das FGF potenziell von größerer Relevanz als für das FFF.

Tabelle 4.4: Zusammenfassung der Methodik

Schritt	Zu beachten im Kontext des SIGNAL-Projektes
Definition der Zielgrößen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Festgelegte Zielgrößen:               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ (Grün)-Maßhaltigkeit in der X-Y-Ebene</li> <li>◦ (Grün)-Maßhaltigkeit in Z-Richtung</li> <li>◦ Gründichte</li> <li>◦ Grünfestigkeit</li> <li>◦ Grünhärte</li> <li>◦ (AM-)Prozesszeit</li> <li>◦ Sinterdichte</li> <li>◦ Sinter-Schrumpfung in der X-Y-Ebene</li> <li>◦ Sinter-Schrumpfung in Z-Richtung</li> <li>◦ Festigkeit</li> <li>◦ E-Modul</li> <li>◦ Bruchdehnung</li> <li>◦ Biegesteifigkeit</li> </ul> </li> </ul>
Definition der relevanten Einflussgrößen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Festgelegte Faktoren aus dem AM-Prozess:               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Düsendurchmesser</li> <li>◦ Extrusionstemperatur</li> <li>◦ Druckgeschwindigkeit</li> <li>◦ Spurabstand</li> <li>◦ Strangbreite</li> <li>◦ Schichtdicke</li> <li>◦ Orientierungswinkel</li> <li>◦ Bauraumtemperatur</li> <li>◦ Druckbetttemperatur</li> <li>◦ Aufbaurichtung</li> </ul> </li> </ul>

Tabelle 4.4 – fortgesetzt

Schritt	Zu beachten im Kontext des SIGNAL-Projektes
Festlegung der Versuchsmethode	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anwendung von DoE sinnvoll</li> <li>• Untersuchungen finden in mehreren Phasen statt:               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Grundlegende Phase zur Definition sinnvoller Versuchsraum-Grenzen</li> <li>◦ Screening-Phase zur Identifikation der relevantesten Faktoren</li> <li>◦ Detaillierte Untersuchungen der relevantesten Faktoren</li> </ul> </li> <li>• Die Zahl der Faktoren innerhalb der Versuche variiert je nach Phase</li> <li>• Externe Faktoren, wie z.B. Legierungszusammensetzung, sind in den Prozessuntersuchungen als qualitative Faktoren zu betrachten</li> </ul>
Aufstellung des Versuchsplanes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ränder des Versuchsraumes sollten an den Verfahrensgrenzen liegen</li> <li>• Verfahrensgrenzen müssen aufgrund mangelnder Erfahrung durch Voruntersuchungen identifiziert werden</li> <li>• Versuchsplanung muss ggf. aufgrund potenzieller weiterer Erkenntnisse angepasst werden</li> </ul>
Durchführung der Versuche	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchführung der Versuche findet iterativ statt</li> <li>• Erkenntnisgewinne aus den Versuchen wirken sich potenziell direkt auf die Durchführung bzw. Versuchsplanung aus</li> </ul>
Auswertung der Versuche	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Richtet sich an der Versuchsplanung aus</li> <li>• Erkenntnisse sollen so weit wie möglich statistisch abgesichert sein</li> <li>• Die Auswertung der Phasen beeinflusst potenziell die weitere Versuchsplanung iterativ</li> </ul>

## 5 Methodik zur Entwicklung von Konstruktionsregeln

Die nachfolgenden Abschnitte behandeln die Entwicklung von Konstruktionsregeln im Kontext der AM. Es erfolgt eine Analyse und Gegenüberstellung ausgewählter bisheriger Arbeiten aus dem Feld der AM generell sowie der extrusionsbasierten AM im Speziellen. Als Kriterium für die Auswahl der Referenzen zählt vordergründig die Darstellung des methodischen Vorgehens für die Entwicklung von Konstruktionsregeln. Aus diesem Grund werden ebenfalls Referenzen betrachtet, die nicht die extrusionsbasierten Prozesse im Fokus haben. Auf die Analyse folgt die Herleitung eines methodischen Vorgehens für die Entwicklung der Konstruktionsregeln für extrusionbasierte Prozesse im Kontext der sinterbasierten AM.

### 5.1 Gegenüberstellung bisheriger Arbeiten

In der Masterthesis von *Schäfer* werden Konstruktionsregeln für Kunststoffbauteile hergeleitet, die mittels FFF hergestellt werden [79]. Innerhalb dieser Referenz erfolgt die Gestaltung sowie die Strukturierung eines Konstruktionskatalogs. Anschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen, die Konstruktionsregeln für das Kunststoff-FFF, in diesen Konstruktionskatalog eingearbeitet. [79]

*Thomas* erarbeitet in [84] Konstruktionsregeln für das SLM-Verfahren. Diese Konstruktionsregeln sollen visueller Natur und in der Praxis anwendbar sein. Die Erfüllung dieser beiden Anforderungen wird im Rahmen von Experteninterviews verifiziert. Zum Ende der Arbeit werden Empfehlungen für weitere Untersuchungen formuliert. [84]

Die Arbeit von *Kranz* befasst sich mit der Herleitung von Konstruktionsregeln sowie deren systematischen Anwendung im Kontext der laserbasierten Additiven Fertigung von Leichtbauteilen aus TiAl6V4 [54]. Ein Fokus dieser Konstruktionsregeln liegt auf der Fertigbarkeit von klassischen Leichtbauelementen. Aufbauend auf den gerade beschriebenen Untersuchungen wird ein Konstruktionskatalog abgeleitet, anhand dessen eine Methodik zur Bauteilgestaltung entwickelt

wird. Im letzten Abschnitt der Ausarbeitung wird diese Methodik für ein Demonstratorbauteil durchgeführt. [54]

In der Dissertation von Adam wird eine verfahrensübergreifende Methode zur Entwicklung von Konstruktionsregeln hergeleitet und angewandt [2]. Die Untersuchungen finden für die Verfahren FFF, SLS und SLM anhand entwickelter Standard-Elemente statt. Im Rahmen einer Fallstudie werden die Konstruktionsregeln erprobt. [2]

Einen umfassenden Anwendungsleitfaden für AM-Konstruktionen gibt Leutenecker-Twelsiek in [58]. Es wird ein Transfermodell entwickelt, um die Anwendbarkeit existierender Konstruktionsregeln zu verbessern. Außerdem wird eine Methode entwickelt, die für die Serienproduktion geeignete AM-Bauteile identifizieren soll. Es folgt ein hierarchischer Leitfaden für die Gestaltung von AM-Bauteilen. Die Daten des Leitfadens stützen sich auf eine breite Literaturrecherche [58]. Die Methoden der beschriebenen Untersuchungen sind in **Tabelle 5.1** als eine chronologische Abfolge der Schritte der Untersuchungen zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Übersicht verschiedener Methoden zur Herleitung von Konstruktionsregeln

Referenz	Kontext	Methodik
Schäfer [79]	Erarbeitung von Konstruktionsregeln (FFF)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Klärung des Bedarfs nach Konstruktionsregeln</li> <li>2. Definition der Anforderungen an die Konstruktionsregeln</li> <li>3. Untersuchungen zu Geometrien und Maßhaltigkeit generell</li> <li>4. Gestaltung der Struktur eines Konstruktionsregel-Katalogs</li> <li>5. Systematische Einarbeitung der Versuchsergebnisse in den Katalog</li> </ol>
Thomas [84]	Erarbeitung von Konstruktionsregeln (SLM)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Definition von Anforderungen an Konstruktionsregeln</li> <li>2. Ableitung der Anforderungen an die Testmethoden</li> <li>3. Probeuntersuchungen zur Auswahl der besten Auswertemethoden</li> <li>4. Iterative Untersuchungen verschiedener geometrischer Eigenschaften</li> <li>5. Ableitung der Konstruktionsregeln aus den Ergebnissen</li> <li>6. Verifizierung der erarbeiteten Konstruktionsregeln durch Experteninterviews</li> </ol>

Tabelle 5.1 – fortgesetzt

Referenz	Kontext	Methodik
Kranz [54]	Erarbeitung von Konstruktions- regeln (LBM)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Definition der Anforderungen an Konstruktionsregeln</li> <li>2. Untersuchungen zu Geometrien und Maßhaltigkeit generell</li> <li>3. Untersuchungen zu speziellen Leichtbaustrukturen</li> <li>4. Erstellung der Struktur des Konstruktionskatalogs</li> <li>5. Ableitung des Konstruktionskatalogs aus den Versuchsergebnissen</li> <li>6. Definition von Anforderungen an eine Methodik zur Bauteilgestaltung</li> <li>7. Entwicklung einer Methodik zur Bauteilgestaltung</li> <li>8. Integration der Konstruktionsregeln in die Methodik</li> <li>9. Anwendung der Methodik an einem Demonstratorbauteil</li> </ol>
Adam [2]	Erarbeitung einer Methodik für Konstruk- tionsregeln (FFF, SLS, SLM)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Definition der Anforderungen an die Methode</li> <li>2. Systematische Definition von zu untersuchenden Zielgrößen</li> <li>3. Erarbeitung von Prüfkörpern für die Methode</li> <li>4. Untersuchungen der Zielgrößen anhand der gefertigten Prüfkörper</li> <li>5. Ableitung der Konstruktionsregeln auf Basis der Untersuchungen</li> <li>6. Anwendung der Konstruktionsregeln anhand eines Demonstratorbauteils</li> <li>7. Reflexion der Ergebnisse</li> </ol>
Leutenecker- Twelsiek [58]	AM-Transfer in die Praxis (FFF, SLS, SLM)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Analyse des Transfers von Wissenschaft zu Praxis</li> <li>2. Entwicklung eines Transfermodells</li> <li>3. Entwicklung einer Methode zur Identifikation potenzieller AM-Bauteile</li> <li>4. Aufsetzung eines hierarchisch aufgebauten Konstruktionskatalogs</li> <li>5. Praktische Anwendung des Konstruktionskatalogs</li> </ol>

In den gerade beschriebenen Referenzen gibt es, trotz teils unterschiedlicher Technologien und Zielsetzungen, Gemeinsamkeiten. In jeder der Referenzen wird mit physischen Prüfkörpern gearbeitet. Die Konstruktionsregeln aus dem in [58] erstellten Katalog stammen zwar hauptsächlich aus anderen Arbeiten, basieren aber ebenso auf den Untersuchungen physischer Prüfkörper. Zudem wird in der Referenz eine knappe Fallstudie mit Blick auf die Entwicklung von Konstrukti-

onsregeln für sehr spezifische Anwendungen durchgeführt. Auch innerhalb dieser Fallstudie wird mit Prüfkörpern gearbeitet.

In den meisten Arbeiten wird zu Beginn der Ist-Stand bezüglich Konstruktionsregeln aufgenommen und der Bedarf nach diesen Regeln, beziehungsweise deren Erweiterung, untersucht [79, 84, 2, 54]. Jüngere Arbeiten machen deutlich, dass nicht nur der Bedarf nach Konstruktionsregeln selbst besteht. Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Forschungsarbeiten ist der Umgang mit Konstruktionsregeln in der Praxis. Die Arbeit von Leutenecker-Twelsiek [58] befasst sich mit der praktischen Anwendung eines erstellten Konstruktionskatalogs. In [55] befasst sich der Autor mit der Entwicklung einer praktisch anwendbaren Konstruktionsmethode für AM-Bauteile. Die Methode beinhaltet unter anderem den Umgang mit bestehenden Konstruktionsregeln. In [68] wird die Einbindung bestehender Konstruktionsregeln in die automatisierte Optimierung von AM-Bauteilen betrachtet. In diesem Kontext werden Anforderungen an Konstruktionsregeln erkenntlich, die zum Zeitpunkt ihres Entstehens nicht definiert waren.

In allen Referenzen werden quantitative Größen untersucht und auf qualitativer Basis ausgewertet. Aus den Ergebnissen dieser Auswertung werden qualitative und quantitative Vorgaben als Konstruktionsregeln formuliert. Die qualitativen Vorgaben finden sich zum Beispiel als Empfehlungen für die Bauteilorientierung oder die Gestalt wieder. Als nächste Stufe innerhalb der Konstruktionsregeln werden quantitative Angaben gemacht. Diese beziehen sich auf die Dimensionierung oder konkrete Gestaltung spezifischer Geometrien. Diese Gestaltung der Konstruktionsregeln wird in allen aufgeführten Referenzen, mit Ausnahme von [84], durchgeführt.

Bei der Durchführung der Untersuchungen wird in den meisten Referenzen ebenfalls die eben beschriebene Hierarchie eingehalten. Es werden erst allgemeine Aspekte wie die Maßhaltigkeit und die Oberflächenrauheit unter Berücksichtigung der Bauteilorientierung an simplen Geometrien untersucht. Es folgen dann Untersuchungen zu speziellen Geometrien und ihren Ausprägungen. In [54] werden Geometrien von Strukturen aus dem Kontext des Leichtbaus untersucht. Dieses Vorgehen wird in [58] für spezielle Anwendungsfälle empfohlen. Eine andere Vorgehensweise wird in [2] verfolgt. Es werden Standardelemente definiert, aus deren Kombination sich andere Strukturen erzeugen lassen. So erfolgen die Untersuchungen erst an diesen Elementen, die teilweise deutlich spezieller sind, als die grundlegenden Probekörper in den anderen Referenzen. Durch dieses Vorgehen sollen möglichst viele Geometrien unabhängig von ihrem Anwendungszweck untersucht werden.

Die beschriebenen hierarchischen Vorgehensweisen sind für alle Fertigungsverfahren sinnvoll und speziell für die Fertigungsverfahren erforderlich, die noch nicht hinreichend genau erforscht sind. In [54] wird dieser Aspekt im Kontext der Fertigungsherausforderungen analysiert. Die Ent-

wicklung von Konstruktionsregeln ist in solchen Kontexten auch die Erprobung der Technologie an sich: es geht um die robuste Fertigung simpler Geometrien und um grundlegende Vorgänge wie das Schrumpfverhalten.

Sowohl in [79] als auch in [54] wird ein Konstruktionskatalog aufgestellt. Die Kataloge befassen sich mit allgemeinen Empfehlungen für die Gestaltung von AM-Bauteilen bezogen auf die jeweiligen Verfahren. Diese betreffen unter anderem die Orientierung der Bauteile, das Zusammenspiel von Schichtdicke und Bauteilgeometrie oder die Gestaltung von Bauteilecken und -kanten. Im Sinne des in Abschnitt 2.4 beschriebenen Konzeptes nach [35] wären diese Konstruktionsregeln als *Prinzipien* für die Bauteilgestaltung zu sehen. Diese Prinzipien gehen nicht zwingend mit konkreten Größen für die jeweiligen Bauteilfeatures einher. Wo solche Größen jedoch notwendig und allgemein sinnvoll sind, werden sie sowohl in [79] als auch in [54] angegeben. Nach der Definition aus [35] enthalten diese Prinzipien somit *Richtlinien*.

Viele der in [79, 54] primär in Form von Prinzipien behandelten Aspekte werden ebenfalls in [2] untersucht. Die Erkenntnisse werden jedoch nicht in Form eines Konstruktionskataloges, in dem die Hierarchie von Prinzipien zu Richtlinien abgebildet ist, gesammelt. Vielmehr werden die Ergebnisse in einer Sammlung von Richtlinien festgehalten. Dies hat im Vergleich zu den Ergebnis-Darstellungen in Konstruktionskatalogen den Nachteil, dass die Informationen für die klassische Anwendung in der Konstruktion aufbereitet werden müssen. Es ist nicht intuitiv möglich, allgemeine Empfehlungen für die Bauteilgestaltung in der AM aufzugreifen. Der Vorteil an dieser Art der Aufbereitung ist die vergleichsweise gute Möglichkeit der Implementierung dieser Richtlinien in Algorithmen zur Topologieoptimierung, wie in [68] geschehen. Dies ist in der mathematischen Formulierung der untersuchten Strukturen und Richtlinien begründet. In [68] ist jedoch auch festgehalten, dass eine automatisierte Implementierung von Konstruktionsregeln in der Praxis schwierig ist. Dies liegt an der Beschaffenheit von generativ gestalteten Bauteilgeometrien.

In den Referenzen werden konkrete Werte für die Gestaltung von Geometrien angestrebt. Unter anderem werden die folgenden geometrischen Ausprägungen dabei untersucht:

- Minimale Wanddicke in der x-y-Ebene
- Minimale Wanddicke in z-Richtung
- Minimaler Radius von Zylindern
- Maßhaltigkeit von Außenkontur über die Konturlänge
- Minimaler Freiwinkel
- Minimale Spaltbreite
- Minimaler Bohrungsdurchmesser in der x-y-Ebene

- Minimaler Bohrungsdurchmesser in z-Richtung
- Minimale Ausprägungen von Bauteilkanten
- Maximale Überhanglänge
- Minimale erzeugte Fläche innerhalb einer Schicht

## 5.2 Herleitung der Methodik

Analog zu Abschnitt 4.2 wird die Zielsetzung für die zu entwickelnde Methodik definiert. Durch die Anwendung der Methode soll die Definition von Konstruktionsregeln für den Kontext der sinterbasierten AM ermöglicht werden. Werden diese erarbeiteten Konstruktionsregeln bei der Bauteilgestaltung berücksichtigt, entspricht die Ist-Geometrie gefertigter Bauteile hinreichend genau einer im Vorfeld definierten Soll-Geometrie. Daraus folgt, dass die Konstruktionsregeln alle Einflüsse, die während der Fertigung auf die geometrischen Eigenschaften des Bauteils wirken, berücksichtigen müssen. Als Muss-Kriterium ergibt sich daraus die Anforderung, dass die Anwendung der Konstruktionsregeln die Fertigbarkeit der Grünteile gewährleistet. Gelingt die Fertigung der Grünteile nicht in einem ausreichenden Maße, sind die Folgeprozesse hinfällig. Zudem müssen die Konstruktionsregeln die Folgeprozesse (Entbinderung und Sintern) betrachten, um die korrekte Gestaltung der Grünteile zu ermöglichen. Da Wechselwirkungen zwischen den geometrischen Features sowie dem Sinterverhalten der Bauteile nicht auszuschließen sind, müssen auch diese Zusammenhänge in den Konstruktionsregeln abgebildet werden. Eine weitere Anforderung ist die Anwendbarkeit der Konstruktionsregeln im Rahmen der automatisierten Topologieoptimierung.

Die Methode umfasst insgesamt sieben Schritte:

1. Definition der Zielgrößen
2. Definition der relevanten Einflussgrößen (Faktoren)
3. Festlegung der Versuchsmethode
4. Aufstellung des Versuchsplanes entsprechend der Versuchsmethode
5. Durchführung der Versuche nach Versuchsplan
6. Auswertung der Versuche
7. Formulierung der Ergebnisse in Konstruktionsregeln

Im Rahmen der Methodik soll erarbeitet werden, wie Bauteilfeatures gestaltet werden müssen, damit sie im gefertigten Zustand hinreichend genau dem Soll-Bauteil entsprechen. In diesem Kontext müssen zwei Fertigungsstadien berücksichtigt werden: der Grünling, der mittels AM gefertigt wird, sowie das Sinterteil. Konstruktionsregeln sind in der Regel qualitativ formuliert.

Es werden idealerweise Bauteil-Attribute und ihre Ausprägung angegeben, deren Fertigung ein "Gut"-Ergebnis liefert. Diese Ausprägung ist dann als Grenze im Sinne eines Minimal- oder Maximalwertes formuliert. Die Zielgröße innerhalb der Methode ist implizit die Fertigbarkeit der untersuchten Geometrien. Explizit bilden, je nach Art der untersuchten Geometrie, sowohl Maßabweichungen als auch Formabweichungen die Zielgrößen. Die Sinterschrumpfung ist ebenfalls eine zu betrachtende Zielgröße.

Analog zu der in Kapitel 4 hergeleiteten Methode gilt, dass die Zielgrößen aus dem Kontext der AM sowie aus dem Kontext des Sinterns zu berücksichtigen sind.

Die Einflussgrößen bzw. Faktoren entsprechen den Ausprägungen der Bauteil-Attribute. Für systematische Untersuchungen ergibt die Betrachtungsweise nach Adam in [2] Sinn, die in Tabelle 2.2 aufgeführt ist. Die in [2] gemachte hierarchische Betrachtung (von Elementgruppe über den Elementtyp zu den jeweiligen Attributen) sollte für die Untersuchung der Einflussgrößen angewandt werden. Dabei sind die Elementgruppe und der Elementtyp qualitative Einflussgrößen. Diese qualitativen Einflussgrößen bilden Klassen in zwei Stufen. Diese Klassen sind jeweils in Kombination mit den quantitativen Einflussgrößen, den Attributen, zu untersuchen.

Im Kontext des Projektes sind die Konstruktionsregeln nicht nur zu erarbeiten, sondern bereits weitestgehend automatisiert im Rahmen der Topologieoptimierung anzuwenden. In [68] werden die Möglichkeiten für so ein Vorgehen anhand der in [2] entwickelten Konstruktionsregeln untersucht. Eine Erkenntnis dieser Untersuchungen ist, dass eine trennscharfe Betrachtung der Basiselemente wenig Sinn ergibt. Das liegt an den typischerweise durch die Topologieoptimierung entstehenden Geometrien, die durch ihre Beschaffenheit keine Einteilung in Standardelemente zulassen. Weiterführend werden die Konstruktionsregeln im Kontext ihrer automatisierten Prüfbarkeit analysiert. Zudem werden sie im Kontext der Topologieoptimierung priorisiert. Durch die Priorisierung und Feststellung der Prüfbarkeit der Konstruktionsregeln entfallen neun der 31 in [2] erarbeiteten Regeln für die Implementierung in den Optimierungsprozess. Für grundlegende Versuche im Kontext des SIGNAL-Projektes scheint es jedoch sinnvoll, sämtliche Konstruktionsregeln auf ihre Gültigkeit zu untersuchen. Dies liegt an der breiten Datengrundlage, die durch [2] vorhanden ist. Außerdem ist die automatisierte Implementierung der Konstruktionsregeln lediglich ein Aspekt aus diesem Kontext.

Weiter gilt es, die Einflüsse des Sinterprozesses bei der Definition der Faktoren zu berücksichtigen. Ansätze für die Definition solcher Faktoren können [7] entnommen werden, in der einige Einflussgrößen qualitativ aufgeführt sind. Neben der Bauteil-Orientierung während des Sinterprozesses werden die Auflagefläche sowie Elemente zur Bauteil-Versteifung qualitativ betrachtet.

Es folgt die Festlegung der Versuchsmethode. In den Referenzen wird die Fertigbarkeit anhand von Prüfkörpern untersucht. Dabei werden an einem Prüfkörper in der Regel verschiedene Ausprägungen eines geometrischen Attributes betrachtet. Auch wenn der Versuchsaufwand im Sinne weniger zu fertigender Prüfkörper sich durch die Anwendung von DoE nicht merklich reduzieren sollte, ermöglicht die Methode eine detailliertere Auswertung der Versuchsdaten sowie der systemischen Zusammenhänge. Durch die Kombination von Ergebnissen vorher durchgeführter Untersuchungen wie [2] und der statistischen Versuchsplanung kann der Versuchsaufwand im Sinne geringerer Prozesszeiten und eines geringeren Materialaufwands reduziert werden. Bei der Festlegung der Faktorstufen können die bereits vorhandenen Erfahrungen einbezogen und so der Versuchsumfang reduziert werden.

Der detaillierte Versuchsplan wird an dieser Stelle nicht aufgestellt. Grundlegend soll sich der Versuchsplan für die Grünteil-Fertigung an bereits durchgeführten Untersuchungen im Kontext der Konstruktionsregeln orientieren. Die Definition der Faktoren beruht auf [2], weshalb die dort erzielten Ergebnisse als Grenzwert für die Fertigbarkeit des Grünteils angenommen werden. Durch die Nutzung der Ergebnisse kann die Anzahl der Faktorstufen im Vergleich zu grundlegenden Untersuchungen aus [2] reduziert werden.

Die Erzeugnisse der AM-Untersuchungen können als Basis für die Untersuchungen des Sinterverhaltens verwendet werden. Damit würden für AM-Untersuchungen ausgelegte Prüfkörper gesintert, um erste Erkenntnisse zu gewinnen. Auch die grundlegenden Untersuchungen des Sinterverhaltens sollten mittels verschiedener Faktorstufen erfolgen. Durch diese Faktorstufen ist es notwendig, die jeweilig untersuchten Prüfkörper mehrfach zu fertigen. Diese Notwendigkeit ermöglicht eine bessere statistische Absicherung für die AM-Untersuchungen.

Die Durchführung und Auswertung der Versuche wird hier nicht näher beschrieben. Die Anforderungen an diese beiden Schritte sind analog zu dem in Abschnitt 4.2 beschriebenen Vorgehen. Auf die Formulierung der Ergebnisse in Form von Konstruktionsregeln soll allerdings eingegangen werden. Um eine manuelle Anwendung der Konstruktionsregeln zu ermöglichen, ist eine Ausformulierung der Ergebnisse in Form von Prinzipien sowie Regeln für die Gestaltung analog zu [3] und [79] empfehlenswert. Im Kontext der Sinterprozesse werden mindestens Gestaltungsprinzipien wie beispielsweise in [7] formuliert werden müssen. Anzustreben sind hierfür jedoch ebenfalls Konstruktionsregeln mit quantitativen Werten.

Die Formulierung der Ergebnisse sollen wieder der Logik von ungünstiger Bauteilgestaltung zu günstiger Bauteilgestaltung folgen. Um das Verständnis der gesamten Prozesskette zu fördern und die Versuchsergebnisse möglichst umfassend abzubilden, empfiehlt sich eine Darstellung nach der Logik “ungünstig für den AM-Prozess” über “günstig für den AM-Prozess” zu “günstig für den Gesamtprozess”. Hierbei sollten die Vorgaben möglichst mit konkreten Werten für die

Restriktionen erfolgen. Mit Blick auf die automatisierte Berücksichtigung der Konstruktionsregeln ist die Stufe “günstig für den AM-Prozess” zu vernachlässigen. Dies aber nur unter der Bedingung, dass quantitative Werte für den Gesamtprozess vorhanden sind. In **Tabelle 5.2** sind die wesentlichen Punkte der einzelnen Prozessschritte zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 5.2: Zusammenfassung der Methodik

Schritt	Zu beachten im Kontext des SIGNAL-Projektes
Definition der Zielgrößen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Festgelegte Zielgrößen:               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ (Grün-)Maßhaltigkeiten der untersuchten Attribute</li> <li>◦ (Grün-)Formabweichungen der untersuchten Attribute</li> <li>◦ Gründichte</li> <li>◦ Sinterdichte</li> <li>◦ Sinter-Schrumpfung in der X-Y-Ebene</li> <li>◦ Sinter-Schrumpfung in Z-Richtung</li> </ul> </li> </ul>
Definition der relevanten Einflussgrößen (Faktoren)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Festgelegte Faktoren sind die in Tabelle 2.2 aufgeführten Größen</li> <li>• Weitere Faktoren aus dem Kontext des Sinterns:               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Bauteilorientierung beim Sintervorgang</li> <li>◦ Bauteilposition im Sinterofen</li> <li>◦ Auflageflächen des Bauteils während des Sinterns</li> <li>◦ Versteifungselemente am Bauteil</li> </ul> </li> <li>• Die Klassen der Elemente nach [2] sind als qualitative Faktoren zu berücksichtigen</li> <li>• Praxisrelevante Priorisierung nach [68] berücksichtigen</li> </ul>
Festlegung der Versuchsmethode	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anwendung von DoE sinnvoll</li> <li>• Durch Ansetzen bei Ergebnissen aus vorangegangenen Arbeiten wie [2] kann der Zeit- und Materialaufwand durch DoE initial reduziert werden</li> </ul>

Tabelle 5.2 – fortgesetzt

Schritt	Zu beachten im Kontext des SIGNAL-Projektes
Aufstellung des Versuchsplanes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Versuchsplanung muss die Anforderungen aus vorherigem Schritt erfüllen</li> <li>• Ergebnisse aus [2] sollten als Basis für die Versuchsplanung gewählt werden</li> <li>• Erzeugnisse aus den Untersuchungen der Grünteilfertigung können als Basis für Untersuchungen des grundlegenden Sinterverhaltens verwendet werden:               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Gefertigte Grünteile werden in unterschiedlichen Faktorstufen (z.B. Orientierung, Platzierung) weiterverarbeitet</li> <li>◦ Für die Umsetzung mit verschiedenen Faktorstufen müssen Proben mehrfach vorliegen</li> <li>◦ Die Mehrfach-Fertigung gleicher Proben erhöht die statistische Absicherung für die Ergebnisse der Grünteil-Fertigung</li> </ul> </li> </ul>
Durchführung der Versuche	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchführung der Versuche findet iterativ statt</li> <li>• Erkenntnisgewinne aus den Versuchen wirken sich potenziell direkt auf die Durchführung bzw. Versuchsplanung aus</li> </ul>
Auswertung der Versuche	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Richtet sich an der Versuchsplanung aus</li> <li>• Erkenntnisse sollen so weit wie möglich statistisch abgesichert sein</li> <li>• Die Auswertung der Phasen beeinflusst potenziell die weitere Versuchsplanung iterativ</li> </ul>
Formulierung der Konstruktionsregeln	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Darstellung der Konstruktionsregeln in einem Konstruktionskatalog für die manuelle Anwendung und das Stärken des Verständnisses sinnvoll</li> <li>• Die Formulierung der Konstruktionsregeln sollte der Logik “Ungünstig für AM-Prozess” über “Günstig für AM-Prozess” zu “Günstig für Gesamtprozess” folgen</li> <li>• Für die automatisierte Umsetzung der Regeln ist die Kategorie “Günstig für Gesamtprozess” relevant</li> <li>• Die Konstruktionsregeln sollten quantitativ formuliert sein</li> </ul>

## 6 Methodik zur simultanen Entwicklung von Prozessparametern und Konstruktionsregeln

Bisher befassen sich Untersuchungen vornehmlich entweder mit der Entwicklung von AM-Prozessparametern oder mit der Entwicklung von Konstruktionsregeln. Eine simultane Vorgehensweise ist bisher nicht bekannt, weshalb in diesem Abschnitt ein geeigneter Ansatz hierfür erarbeitet wird. Für diese Erarbeitung werden die Erkenntnisse der beiden vorherigen Kapitel genutzt

Die abstrakten Vorgehensweisen aus den beiden vorherigen Kapiteln sind für die Untersuchungen im Kontext der sinterbasierten AM anwendbar. Formal können die Methodenschritte *Definition der Zielgrößen* und *Festlegung der Versuchsmethode* an dieser Stelle entfallen, da die Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln direkt verwertbar sind. Aufgrund der Rahmenbedingungen ist die statistische Versuchsplanung die Versuchsmethode der Wahl. Die Definition des konkreten Versuchsplans hängt vom Kontext der Untersuchungen ab. Zwischen den Untersuchungen der Prozessparameter und Konstruktionsregeln gibt es zudem Wechselwirkungen. Aus diesem Grund lautet der methodische Ablauf für die Untersuchungen auf der höchsten Abstraktionsebene wie folgt:

1. Definition der Faktoren
2. Aufstellung des Versuchsplanes entsprechend der Versuchsmethode
3. Durchführung der Versuche nach Versuchsplan
4. Auswertung der Versuche

Für jeden der Methodenschritte ist zu berücksichtigen, dass sowohl Grün- als auch Sinterteile Gegenstand der Untersuchungen sind. Wegen der breit gesteckten Untersuchungsziele, findet dieser Ablauf mehrfach Anwendung. Aufgrund der Rahmenbedingungen werden vier Versuchsbereiche identifiziert. Diese Bereiche werden nachfolgend beschrieben.

Der erste Bereich sind die **Grundlegenden Untersuchungen**. Diese Untersuchungen haben zum Ziel, grundlegende Zusammenhänge zu betrachten. Diese grundlegenden Zusammenhänge beinhalten die Einflüsse der jeweiligen Prozessparameter auf die Bauteilqualität. Mit Bauteilqualität

sind hier zum einen die Grünteil-Eigenschaften *Maßhaltigkeit* und *Gründichte* gemeint. Zum anderen geht es um die Eigenschaften des Sinterteils: *Sinterschrumpfungen* und *Sinterdichte*. Diese Zielgrößen sind nicht nur für die Entwicklung der Technologie direkt interessant, sondern bilden ebenfalls die Basis für die Konstruktionsregeln. Der Logik von [35] folgend, sind die Erkenntnisse als *Prinzipien* der Gestaltung zu formulieren.

In den grundlegenden Untersuchungen sind möglichst viele Einflussgrößen als Faktoren zu definieren. Aufgrund der vielen Faktoren ist ein Screening-Plan mit zwei Faktorstufen zu verwenden. Durch die Auswertung dieser Versuche ist herauszuarbeiten, welche Effekte die einzelnen Faktoren auf die Zielgrößen besitzen. Durch die Anwendung der ANOVA werden die Einzeleffekte auf einer zusätzlichen Ebene statistisch abgesichert.

Der nächste Versuchsbereich sind die **Untersuchungen spezifischer Geometrien**. Die Ergebnisse der vorherigen Untersuchungen bilden hierfür die Basis. Es sollen die Effekte der vorher identifizierten relevanten Prozessparameter im Detail untersucht werden. Dies ist anhand von Probekörpern mit spezifischen geometrischen Attributen durchzuführen. Diese spezifischen Attribute basieren auf den Zielgrößen, die für die Entwicklung der Konstruktionsregeln relevant sind. Es empfiehlt sich zu Beginn, die in [2] aufgestellten Konstruktionsregeln zu validieren. Neben den relevanten AM-Prozessparametern als Faktoren sind ebenfalls die Faktoren für den Sinterprozess bei der Versuchsplanung zu berücksichtigen. Damit sind nicht nur die Ausprägungen der Sinterprofile, sondern ebenfalls qualitative Faktoren wie die Bauteil-Orientierung oder aber die Stütz-Situation während des Sinterns gemeint. Aufbauend auf den gemachten Erkenntnissen sind dann möglichst konkrete Konstruktionsregeln zu formulieren.

Im nächsten Bereich geht es um die **Untersuchungen zu mechanischen Eigenschaften**. Hierfür sind genormte Proben zu fertigen und zu untersuchen. Neben der Festigkeit von Grün- und Sinterteilen ist die jeweilige Härte ebenfalls eine relevante Zielgröße. Auch wenn grundständige Werkstoffkennwerte voraussichtlich bekannt sind, ist der Einfluss der Prozessparameter auf diese Werte zu untersuchen. Dies ist mit den in Kapitel 3 festgestellten Zulassungsvoraussetzungen für AM-Verfahren begründet.

Im letzten Versuchsbereich werden **Konstruktionsregeln im Kontext von Sinter-Bauteilen** betrachtet. Durch den Anwendungskontext dieser Konstruktionsregeln ist der Kontext ein anderer als für die Untersuchungen spezifischer Geometrien. Grundlegende Konstruktionsregeln und Gestaltungsprinzipien für Sinterteile werden durch vorherige Untersuchungen ermittelt. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Anwendung dieser Gestaltungsprinzipien auf konkrete Bauteile aus aggregierten Strukturen nicht für den *first-time-right*-Ansatz genügt. Quantitative Vorgaben an die Bauteilgestaltung sind in diesem Kontext nicht der Stand der Technik. Um trotzdem Kon-

struktionsregeln in möglichst quantitativ beschaffener Form zu entwickeln, wird ein Vorgehen vorgeschlagen, dass auf Fallstudien in Form von Design-Exploration sowie Simulationen beruht.

Den Beginn der Untersuchungen bildet die Auswahl realer Bauteile, die auf ihre Anwendung hin optimiert werden sollen. Auf Basis der Bauteilanforderungen wie z.B. Design-Space, Non-Design-Space und vorhandene Lastfälle werden topologieoptimierte Bauteile generativ konstruiert. Hierbei sollen verschiedene Bauteildesigns mit unterschiedlichen geometrischen Ausprägungen generiert werden. Für die ausgewählten Bauteilvarianten sind anschließend Sintersimulationen durchzuführen. Best practice im Kontext der sinterbasierten AM ist die Gestaltung von Bauteilen in einer Art, dass der entstehende Sinterverzug, also anisotropes Schrumpfverhalten, minimal ist. Das Optimierungsziel für diese Bauteile ist dementsprechend der minimale Sinterverzug. Da dieses Optimierungsziel nicht explizit in der Topologieoptimierung berücksichtigt werden kann, lautet der vorgeschlagene Ansatz, Bauteilmerkmale zu identifizieren, die stark mit der Sinterschrumpfung korrelieren. Diese Merkmalsextraktion, wie sie in datenbasierten Disziplinen wie dem Maschinellen Lernen gebräuchlich ist, soll im Rahmen der Interpretation der Sintersimulationen durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Interpretation sollen verwendet werden, um die Fallstudien iterativ zu erweitern. So sind neue generativ erzeugte Bauteilgeometrien zu erzeugen, die weitere Anforderungen in Form der identifizierten Merkmale erfüllen. Diese Merkmale sind nach hinreichender Prüfung als Konstruktionsregeln zu formulieren.

Der iterative Charakter ist keine Eigenheit des letzten Versuchsbereichs, sondern trifft auf alle vier beschriebenen Bereiche zu. Diese Erwartung besteht aufgrund der Neuheit der Technologien, durch die sich eine abschließende initiale Versuchsplanung schwierig gestaltet. Die während der Versuche gewonnenen Erkenntnisse sollen iterativ in die Planung und Durchführung der Versuche einfließen.

Der gerade beschriebene methodische Ablauf ist in **Abbildung 6.1** abgebildet. In der Abbildung sind teilweise zeitliche Überschneidungen der Untersuchungen vorhanden. Der abgebildete Ablauf entspricht einer Empfehlung. Je nach Bereich ist die Parallelisierung der Untersuchungen möglich. Die grundlegenden Untersuchungen sollten vor den Untersuchungen an spezifischen Geometrien und den Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften durchgeführt werden, um den Versuchsraum zu definieren und den Versuchsaufwand auf das Minimum zu beschränken. Mit den Untersuchungen der Konstruktionsregeln für Sinterteile kann jedoch begonnen werden, sobald die relevanten grundlegenden Werkstoffkennwerte bekannt sind. Das ist mit dem simulationsbasierten Ablauf begründet.

## 6 Methodik zur simultanen Entwicklung von Prozessparametern und Konstruktionsregeln

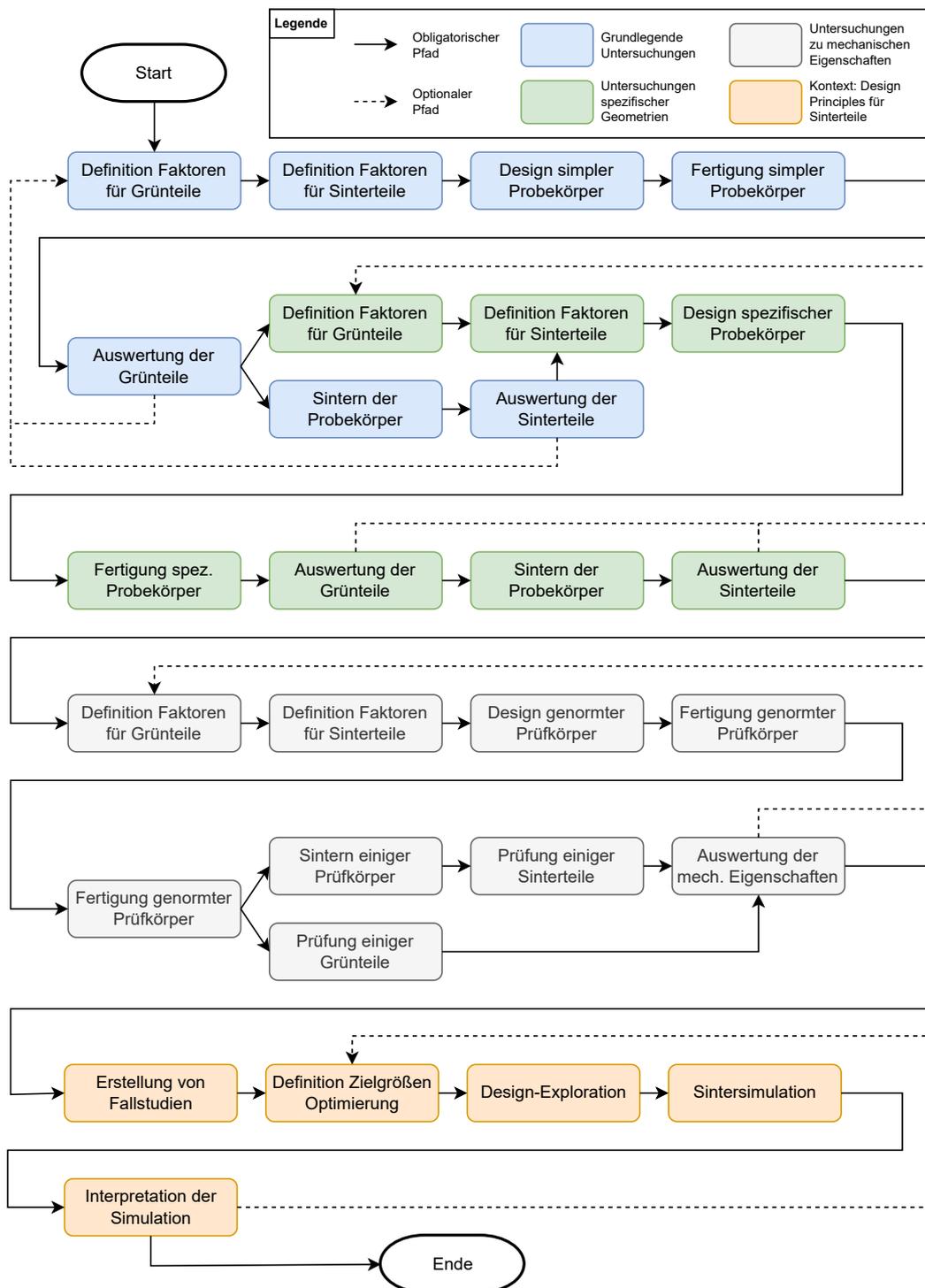


Abbildung 6.1: Methodisches Vorgehen zur simultanen Entwicklung von Prozessparametern und Konstruktionsregeln



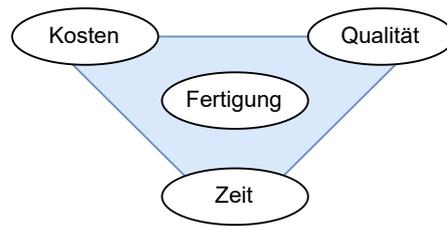


Abbildung 6.3: Zieldreieck der Produktion in Anlehnung an [42]

Die anforderungsbasierte Formulierung von Konstruktionsregeln beruht auf der Struktur, die in **Abbildung 6.4** abgebildet ist. Im Gegensatz zur konventionellen Struktur wird ebenfalls der Einfluss der Prozessparameter auf die Konstruktionsregeln berücksichtigt. In der Abbildung ist dies exemplarisch durch die drei Prozessparameter-Faktorstufen dargestellt. Zusätzlich werden die erzielten Zielgrößen nicht qualitativ in zwei Kategorien ausgewertet. Vielmehr wird die Einschätzung, ob ein Parametersatz fertigungsgerecht ist, in Abhängigkeit zu der Anwendung des Bauteils und den sich daraus ergebenden Rahmenbedingungen gesetzt.

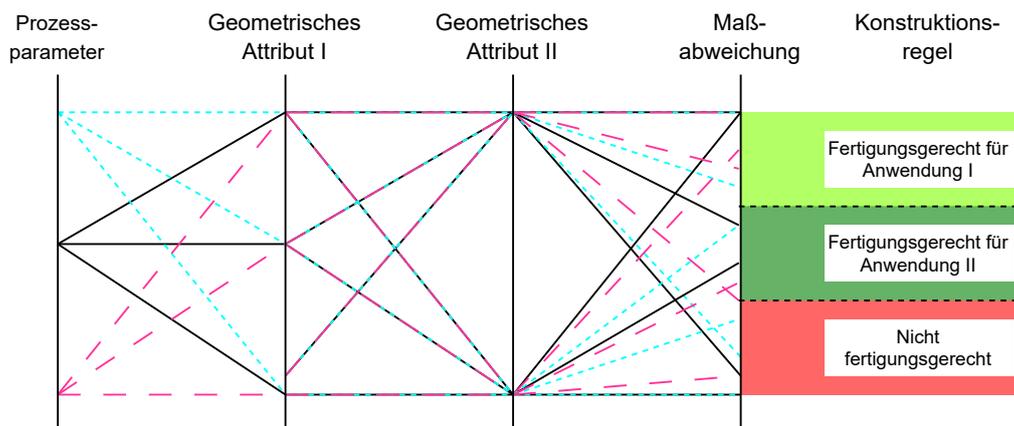


Abbildung 6.4: Exemplarische Struktur für anforderungsbasierte Konstruktionsregeln

## 7 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurden zwei Themenkomplexe behandelt.

Im ersten Komplex wurde ein systematisches Vorgehen für die sinnvolle Auswahl potenzieller AM-Bauteile im Kontext des SIGNAL-Projektes entwickelt. Dabei basiert dieses Vorgehen auf der Kategorisierung von Bauteilen und deren Eigenschaften. Hierfür wurden die verschiedenen im SIGNAL-Projekt vertretenen Mobilitätsbranchen betrachtet. Neben den theoretisch erarbeiteten Kriterien für die Bauteilkategorisierung wurden, unter Zuhilfenahme von Experten-Interviews, zusätzliche praxisrelevante Kriterien in Form von Bauteilanforderungen der jeweiligen Branche identifiziert. Diese Erkenntnisse wurden genutzt, um eine systematische Priorisierung der Anforderungen durchzuführen. Die Priorisierung bildet die Grundlage für die Bewertung von Bauteileigenschaften im Rahmen einer Nutzwertanalyse. Hierbei dient die Nutzwertanalyse nicht der Betrachtung konkreter Bauteile. Die Analyse dient in ihrer Anwendung als systematischer Filter, der auf das Bauteil-Portfolio angewandt werden kann. So werden Bauteile identifiziert, für die eine Fertigung mittels der im SIGNAL-Projekt betrachteten Technologien potenzialträchtig ist. Die Kriterien und die entsprechend zu verteilenden Maßzahlen dieser Nutzwertanalyse wurden für den Luftfahrt- und den Bahn-Sektor aufgestellt. Für den Automotive-Sektor wurde keine Nutzwertanalyse aufgestellt, sondern eine in der Praxis durchgeführte Nutzwertanalyse reflektiert. Es wurden weiter die im SIGNAL-Projekt betrachteten Technologien (BJ, CMF, FFF, FGF, GC, MJ) soweit möglich gegenübergestellt. So wurde ein Spektrum von Bauteilmerkmalen ermittelt, welches in Form von Demonstrator-Bauteilen untersucht werden sollte. In den nächsten Schritten sollte die erarbeitete Methode mit Expertise aus der Industrie validiert und weiterentwickelt werden, bevor sie zur Anwendung kommt. Hierfür sollte betrachtet werden, ob es weitere relevante Bauteilmerkmale bzw. -anforderungen gibt. Ebenso sollten die Gewichtungen der einzelnen Kriterien anhand der in der Praxis vorhandenen Umstände reflektiert werden. Nach diesem Validierungsschritt sollte die Bauteilstrategie zeitnah bis zur Auswahl konkreter Demonstrator-Bauteile umgesetzt werden.

Im weiteren Verlauf des Projektes sollten Erkenntnisse aus der Technologieentwicklung sowie der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in die Überarbeitung der Bauteilstrategie eingehen. Durch eine solche Rückkopplung ist zu erwarten, dass sich die Wirksamkeit der Methode erhöht und ihre

praktische Anwendbarkeit generell zunimmt.

Die Erkenntnisse aus der Umsetzung der Bauteilstrategie des Luftfahrt-Sektors sollten auf die Bauteilstrategien der anderen Mobilitätssektoren transferiert werden. Neben der Überarbeitung der Merkmals- und Anforderungskategorien der Bauteile ist der Transfer vor allem auf die Gewichtungen der Kriterien anzuwenden. Durch diesen Transfer auf die weiteren Branchen wird ebenfalls eine Reflexion des generellen Ansatzes, also der kategorischen Betrachtung von Bauteilen, ermöglicht. Diese Reflexion sollte zu gegebener Zeit durchgeführt werden, um den konkreten Mehrwert einer branchenübergreifenden Herangehensweise zu identifizieren.

Der zweite Themenkomplex dieser Arbeit befasst sich mit der methodischen Entwicklung von Prozessparametern sowie der Entwicklung von Konstruktionsregeln im Kontext der extrusionsbasierten AM. Hier wurde eine Recherche über bisherige Untersuchungen zu Prozessparametern durchgeführt. Nach der Analyse der Ergebnisse dieser Recherche wurde eine Methode für Untersuchungen der extrusionbasierten AM in diesem Kontext abgeleitet. Dasselbe Vorgehen ist für Untersuchungen im Kontext der Entwicklung von Konstruktionsregeln durchgeführt worden. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um ein methodisches Vorgehen zur simultanen Entwicklung von Prozessparametern und Konstruktionsregeln zu entwickeln. Dabei trägt die entwickelte Methode dem umfassenden Versuchsumfang aufgrund des Umgangs mit wenig erforschten Technologien sowie der Kombination von AM- und Sinterprozessen Rechnung. Dabei berücksichtigt die entwickelte Methode den umfassenden Versuchsumfang, der in der Neuheit der Technologien, aber auch in sämtlichen Teilprozessen begründet ist. Die erarbeitete Methode besteht aus vier Phasen, für die in dieser Arbeit eine zeitliche Abfolge festgelegt wurde. Diese zeitliche Abfolge ist eine Empfehlung, jedoch können die Phasen, mit Ausnahme der ersten Phase, ebenfalls simultan erfolgen.

Die nächsten Schritte sollten aus der Durchführung der grundlegenden Untersuchungen bestehen. Da hier als Faktoren lediglich Parameter der AM und des Sinterprozesses eingehen, können simultan die Probekörper für den nächsten Untersuchungsabschnitt konstruiert werden.

Neben den in dieser Arbeit näher betrachteten extrusionsbasierten Technologien sind die anderen, im Projekt betrachteten, sinterbasierten Prozessrouten für den weiteren Projektverlauf ebenso relevant. Für diese Technologien können die Untersuchungen analog zu der hier entwickelten Methodik erfolgen. Vorher müssen jedoch die jeweiligen Einflussgrößen identifiziert werden.

Um das Konzept der anforderungsbasierten Konstruktionsregeln umzusetzen, sollten verschiedene Bauteil-Anwendungen identifiziert und durch sie entstehende Anforderungen abgeleitet werden. Die im Rahmen der Bauteilstrategie gewonnenen Erkenntnisse sollten als Grundlage hierfür dienen.

# Literaturverzeichnis

- [1] INTERNATIONAL AUTOMOTIVE TASK FORCE: *IATF 16949: Automotive Quality Management Systems*. 2016
- [2] ADAM, G. A. O.: *Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling*, Universität Paderborn, Dissertation, 2015
- [3] AHLERS, D.: *Parameter- und Prozessoptimierung für den additiven Fertigungsprozess im Pulverbett am Beispiel der Legierung Ti6Al4V*, Universität Paderborn, Dissertation, 2020
- [4] AIM3D GMBH: *AIM3D: Materialextrusion*. <https://www.aim3d.de/prozesse/materialextrusion>. – Aufgerufen: 2023-03-12
- [5] ALPHACAM GMBH: *MoldJet®-Technologie*. <https://www.alphacam.de/metall-3d-drucker/moldjet-3d-drucker/moldjet-technologie>. – Aufgerufen: 2022-11-18
- [6] AMPOWER GMBH CO. KG: Metal Additive Manufacturing with sinter-based technologies. In: *AMPOWER Insights* 3 (2018)
- [7] AMPOWER GMBH CO. KG: Design guideline for sinter-based Additive Manufacturing. In: *AMPOWER Insights* 8 (2022)
- [8] ANDERSEN, O. ; STUDNITZKY, Th. ; HEIN, S. ; RIECKER, S. ; QUADBECK, P. ; PETZOLDT, F. ; KIEBACK, B.: *Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 34 Pulvermetallurgie - Neue Herausforderungen und neue Wege*. Kap. Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der nicht-strahlbasierten additiven Fertigungsverfahren - New Developments in the Field of Non-beam Based Methods of Additive Manufacturing, S. 255–280, 11 2018. – ISBN 978-3-946537-54-0
- [9] BEISS, P.: *Pulvermetallurgische Fertigungsverfahren*. Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-642-32032-3

- [10] BENDER, B. ; GERICKE, K. ; PAHL, G. ; BEITZ, W.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Springer Vieweg, 2021. – ISBN 978-3-662-57303-7
- [11] BREUNINGER, J. ; BECKER, R. ; WOLF, A. ; ROMMEL, S. ; VERL, A.: *Generative Fertigung mit Kunststoffen - Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern*. Springer Berlin, Heidelberg, 2013. – ISBN 978-3-642-24325-7
- [12] BRILLINGER, M.: *3D-Druck von Natriumacetat-Trihydrat als Ergebnis eines konsequenten Entwicklungsprozesses*, Technische Universität Graz, Dissertation, 2018
- [13] BUTZKE, Jens: *Verfahrenstechnische Weiterentwicklung des Fused Layer Manufacturing zur Reduzierung der Anisotropie im Bauteil*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2018
- [14] BÄHR, F.: *Methode zur modellierungsbasierten, präventiven Qualitätssicherung im Material Extrusion Verfahren*, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering der Universität Stuttgart, Dissertation, 2020
- [15] CAMINERO, M. A. ; ROMERO, A. ; CHACÓN, J. M. ; NÚÑEZ, P. J. ; GARCÍA-PLAZA, E. ; RODRÍGUEZ, G. P.: Additive manufacturing of 316L stainless-steel structures using fused filament fabrication technology: mechanical and geometric properties. In: *Rapid Prototyping Journal* 27 (2021), Nr. 3. – ISSN 1355-2546
- [16] DAVE, H. K. ; DAVIM, J. P.: *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*. Springer Cham, 2021. – ISBN 978-3-030-68024-4
- [17] DESKTOP METAL, INC.: *Thermal Debinding and Sintering 101*. <https://www.desktopmetal.com/resources/sintering-101>. – Aufgerufen: 2022-11-12
- [18] DEUTSCHE BAHN AG: *Qualitätssicherung für Schienenfahrzeuge und Schienenfahrzeugteile in der Beschaffung (Liste güteprüfpflichtige Produkte Schienenfahrzeuge)*. Deutsche Bahn, 2016
- [19] DEY, A. ; YODO, N.: A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 3 (2019), Nr. 3. – ISSN 2504-4494
- [20] DIEGEL, O. ; NORDIN, A. ; MOTTE, D.: *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Springer Singapore, 2019. – ISBN 978-981-13-8281-9

- [21] DIN-NORMENAUSSCHUSS FAHRWEG UND SCHIENENFAHRZEUGE (FSF): *DIN EN 12663-1 - Bahnanwendungen – Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen - Teil 1: Lokomotiven und Personenzüge (und alternatives Verfahren für Güterwagen)*. Beuth Verlag, 2015
- [22] DIN-NORMENAUSSCHUSS FAHRWEG UND SCHIENENFAHRZEUGE (FSF): *DIN EN 13749 - Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle - Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen*. Beuth Verlag, 2021
- [23] DIN-NORMENAUSSCHUSS LUFT- UND RAUMFAHRT (NL): *DIN EN 9100 - Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung*. Beuth Verlag, 2018
- [24] DIN-NORMENAUSSCHUSS QUALITÄTSMANAGEMENT, STATISTIK UND ZERTIFIZIERUNGSGRUNDLAGEN (NQSZ) : *DIN EN ISO 9001 - Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen*. Beuth Verlag, 2015
- [25] DIN-NORMENAUSSCHUSS QUALITÄTSMANAGEMENT, STATISTIK UND ZERTIFIZIERUNGSGRUNDLAGEN (NQSZ): *DIN EN ISO/IEC 17025 - Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien*. Beuth Verlag, 2018
- [26] DIN-NORMENAUSSCHUSS WERKSTOFFTECHNOLOGIE (NWT): *DIN EN ISO/ASTM 52900 - Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie*. Beuth Verlag, 2014
- [27] DIN-NORMENAUSSCHUSS WERKSTOFFTECHNOLOGIE (NWT): *DIN EN ISO 3252 - Pulvermetallurgie - Begriffe*. Beuth Verlag, 2019
- [28] DIN-NORMENAUSSCHUSS WERKSTOFFTECHNOLOGIE (NWT): *DIN EN ISO/ASTM 52920 - Additive Fertigung – Qualifikationsprinzipien – Anforderungen an Standorte für industrielle additive Fertigung*. Beuth Verlag, 2021
- [29] EDAG ENGINEERING GMBH.: *StaVari - Additive Fertigungsprozesse für komplexe Produkte in variantenintensiver und hochfunktionaler Stahlbauweise*. <https://www.stavari.de/index.html>. – Aufgerufen: 2023-03-14
- [30] EICKHOFF, R. ; ANTUSCH, S. ; BAUMGÄRTNER, S. ; NÖTZEL, D. ; HANEMANN, T.: Feedstock Development for Material Extrusion-Based Printing of Ti6Al4V Parts. In: *Materials* 15 (2022), Nr. 18. – ISSN 1996-1944
- [31] EOS GMBH: *SLS Printer FORMIGA P 110 FDR*. <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/eos-polymer-systems/formiga-p-110-fdr>. – Aufgerufen: 2023-02-18

- [32] EUROPEAN POWDER METALLURGY ASSOCIATION: *Introduction to Metal Injection Moulding Technology*. 2018
- [33] EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY: *Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Annex II (PART-145) to Regulation (EU) No 1321/2014*. 2015
- [34] EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY: *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes (CS-25) - Amendment 27*. 2021
- [35] FREUND, T.: *Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in technischen Systemen*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2018
- [36] FRIEDRICH, H. E.: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. 2017. – ISBN 978-3-658-12295-9
- [37] FRITZ, A. F.: *Fertigungstechnik*. Springer Vieweg, 2018. – ISBN 978-3-662-56535-3
- [38] FUHRMANN, M. H.: *Qualitätsorientierte modellbasierte Prozessparameteroptimierung für das Fused Deposition Modeling*, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Dissertation, 2018
- [39] GEBHARDT, A. ; KESSLER, J. ; SCHWARZ, A.: *Produktgestaltung für die additive Fertigung*. Carl Hanser Verlag, 2019. – ISBN 978-3-446-46133-8
- [40] GIBSON, I. ; ROSEN, D. ; STUCKER, B. ; KHORASANI, M.: *Additive Manufacturing Technologies*. Springer Cham, 2021. – ISBN 978-3-030-56127-7
- [41] GRUNERT, S.: *Interview zur Bauteilkategorisierung und -strategie bei der SACS Aerospace GmbH*. Persönliches Gespräch am 15.02.2023, 10:00-11:30 Uhr
- [42] HEHENBERGER, P.: *Computerunterstützte Produktion: eine kompakte Einführung*. Springer Vieweg, 2020
- [43] HILLEBRECHT, M.: *Additive Fertigung von Karosseriebauteilen in hochfesten Stählen für Prototypen und Kleinserien*. – URL <https://vimeo.com/user88657532/download/772089797/003d95ec60>. – Zugriffsdatum: 2023-03-13
- [44] HILLEBRECHT, M. ; DOERING, Th.: *Interview zur Bauteilkategorisierung und -strategie bei der EDAG Engineering Group AG*. Persönliches Gespräch am 27.02.2023, 10:00-11:00 Uhr

- [45] HINSCH, M.: *Der EASA Part 21/G (Herstellung): Die Herstellung im europäischen Luftrecht für behördlich genehmigte Betriebe und deren Zulieferer*. 2022. – ISBN 978-3-662-66097-3
- [46] HMEIDAT, N. S. ; BROWN, B. ; JIA, X. ; VERMAAK, N. ; COMPTON, B.: Effects of infill patterns on the strength and stiffness of 3D printed topologically optimized geometries. In: *Rapid Prototyping Journal* 27 (2021), Nr. 8. – ISSN 1355-2546
- [47] KLAHN, C. ; MEBOLDT, M. ; LEUTENECKER, B. ; FONTANA, F.: *Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung*. 2018. – ISBN 978-3-8343-3395-7
- [48] KLEIN, B. ; GÄNSICKE, T.: *Leichtbau-Konstruktion: Dimensionierung, Strukturen, Werkstoffe und Gestaltung*. Springer Vieweg, 2019. – ISBN 978-3-658-26846-6
- [49] KLEPPMANN, W.: *Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren*. 2016. – ISBN 978-3-446-44716-5
- [50] KLOCKE, F.: *Fertigungsverfahren 5: Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing*. Springer Vieweg, 2015. – ISBN 978-3-540-69512-7
- [51] KLOCKE, F.: *Fertigungsverfahren 1: Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide*. Springer Vieweg, 2018. – ISBN 978-3-662-54207-1
- [52] KLOCKE, F.: *Fertigungsverfahren 5: Gießen und Pulvermetallurgie*. Springer Vieweg, 2018. – ISBN 978-3-662-54728-1
- [53] KLOKE, A.: *Untersuchung der Werkstoff-, Prozess- und Bauteileigenschaften beim Fused Deposition Modeling Verfahren*, Universität Paderborn, Dissertation, 2015
- [54] KRANZ, J.: *Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen*. Springer Vieweg, 2017. – zugleich Dissertation Technische Universität Hamburg 2017. – ISBN 978-3-662-55339-8
- [55] KUMKE, M.: *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. Springer, 2018. – zugleich Dissertation Technische Universität Braunschweig 2018. – ISBN 978-3-658-22208-6
- [56] KUO, C.-C. ; TASI, Q.-Z. ; XIE, B.-X. ; HUANG, J.-M. ; QIU, S.-X.: Improving the quality of a circular cooling channel fabrication by fused filament fabrication using Taguchi methods. 120 (2022), Nr. 5-6, S. 3353–3364. – ISSN 1433-3015
- [57] LACHMAYER, R ; LIPPERT, R.: *Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung*. Springer Berlin Heidelberg, 2020. – ISBN 978-3-662-59789-7

- [58] LEUTENECKER-TWELSIEK, B.: *Additive Fertigung in der industriellen Serienproduktion: Bauteilidentifikation und Gestaltung*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 2019
- [59] LIEBERWIRTH, C. ; SARHAN, M. ; SEITZ, H.: Mechanical Properties of Stainless-Steel Structures Fabricated by Composite Extrusion Modelling. In: *Metals* 8 (2018), Nr. 2. – ISSN 2075-4701
- [60] MOHRDIECK, C.: *Themendossier "Energie für die Zukunft"*. Universität Ulm, 2019
- [61] MOSTAFAEI, A. ; ELLIOTT, A. M. ; BARNES, J. E. ; LI, F. ; TAN, W. ; CRAMER, C. L. ; NANDWANNA, P. ; CHMIELUS, M.: Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. In: *Progress in Materials Science* 119 (2021), S. 100707. – ISSN 0079-6425
- [62] MWEMA, F. M. ; AKINLABI, E. T.: *Fused Deposition Modelling: Strategies for Quality Enhancement*. Springer Cham, 2020. – ISBN 978-3-030-48259-6
- [63] MÜLLER, T.: *Steigerung der Präzision im Mikro-Pulverspritzgießen*, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg in Breisgau, Dissertation, 2016
- [64] OTT, J.: *Druckloses Sintern von Cu für Hochleistungsanwendungen*, Universität des Saarlandes, Dissertation, 2021
- [65] PISCHINGER, S. ; SEIFFERT, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 2021. – ISBN 978-3-658-25557-2
- [66] POLLEN AM INC.: *Metal Alloys - FFF vs PAM*. [https://www.pollen.am/use\\_cases\\_metal\\_alloys\\_fff\\_vs\\_pam/](https://www.pollen.am/use_cases_metal_alloys_fff_vs_pam/). – Aufgerufen: 2022-11-09
- [67] RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICS, INC.: *RTCA DO-160G for Airborne Equipment | DO-160*. <https://do160.org/rtca-do-160g/>. – Aufgerufen: 2023-03-07
- [68] REIHER, T.: *Intelligente Optimierung von Produktgeometrien für die additive Fertigung*, Universität Paderborn, Dissertation, 2018
- [69] RIAZ, A. ; TÖLLNER, P. ; AHREND, A. ; SPRINGER, A. ; MILKEREIT, B. ; SEITZ, H.: Optimization of composite extrusion modeling process parameters for 3D printing of low-alloy steel AISI 8740 using metal injection moulding feedstock. In: *Materials Design* 219 (2022). – ISSN 0264-1275
- [70] RIECKER, S.: *Interview zu den Verfahren MoldJet und Gel Casting*. Persönliches Gespräch am 06.02.2023, 14:30-15:30 Uhr

- [71] RIECKER, S. ; STUDNITZKY, T. ; ANDERSEN, O. ; WEISSGAERBER, Th.: Metal part manufacturing by a combination of Fused Filament Fabrication and Gel Casting, 10 2021
- [72] ROBERT-PERRON, E. ; BLAIS, C. ; PELLETIER, S. ; THOMAS, Y.: Machinability of Green Powder Metallurgy Components: Part I. Characterization of the Influence of Tool Wear. In: *Metallurgical and Materials Transactions A* 38 (2007), S. 1330–1336
- [73] ROSAK-SZYROCKA, J.: Automotive Standard ISO/TS 16949 as a Quality Determinant. In: *Production Engineering Archives* 10 (2016), Nr. 1, S. 25–28
- [74] ROSSOW, C.-C. ; WOLF, K. ; HORST, P.: *Handbuch der Luftfahrzeugtechnik*. 2014. – ISBN 978-3-446-43604-6
- [75] SCHAPER, J.: *Interview zu dem Verfahren Cold Metal Fusion*. Persönliches Gespräch am 10.02.2023, 13:00-13:30 Uhr
- [76] SCHATT, W.: *Sintervorgänge: Grundlagen*. VDI-Verlag, 1992. – ISBN 3-540-63356-1
- [77] SCHMIDT, T.: *Potentialbewertung generativer Fertigungsverfahren für Leichtbauteile*. Springer Vieweg, 2016. – zugleich Dissertation Technische Universität Hamburg 2015. – ISBN 978-3-662-52996-6
- [78] SCHNEEVOGT, H.: *Interview zu Additive Manufacturing bei der Deutsche Bahn AG*. Persönliches Gespräch am 23.02.2023, 10:00-11:00 Uhr
- [79] SCHÄFER, R.: *Design Guidelines for Rapid Prototyping - Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien für ein fertigungsgerechtes Gestalten anhand des Fused Deposition Modeling*, Hochschule Bremen, Diplomarbeit, 2008
- [80] SIEBERTZ, K. ; BEBBER, D. van ; HOCHKIRCHEN, Th.: *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*. 2010. – ISBN 978-3-642-05493-8
- [81] STATISTA GMBH: Statista Dossier: Additive Fertigung. 2022. – Forschungsbericht
- [82] STRUVE, A.: *Generatives Design zur Optimierung additiv gefertigter Kühlkörper*. Springer Vieweg, 2021. – zugleich Dissertation Technische Universität Hamburg 2021. – ISBN 978-3-662-63071-6
- [83] STŘÍTESKÝ, O. ; PRŮŠA, J. ; BACH, M.: *Grundlagen des 3D-Drucks mit Josef Prusa*. Prusa Research a.s., 2020
- [84] THOMAS, D.: *The Development of Design Rules for Selective Laser Melting*, University of Wales Institute, Cardiff, Dissertation, 2019

- [85] TRITONE TECHNOLOGIES LTD.: *MoldJet® Technology*. <https://tritoneam.com/moldjet-technology/>. – Aufgerufen: 2022-11-18
- [86] VDI-GESELLSCHAFT PRODUKTION UND LOGISTIK: *VDI 3405 - Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. Beuth Verlag, 2014
- [87] ÇETINEL, A. F.: *Oberflächendefektausheilung und Festigkeitssteigerung von niederdruck-spritzgegossenen Mikrobiegebalken aus Zirkoniumdioxid*, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg in Breisgau, Dissertation, 2012

# Anhang

# A Freigegebene Notizen aus persönlichen Gesprächen

## A.1 Notizen aus dem Gespräch mit S. Grunert

Interview wurde geführt mit:

Steffen Grunert

SACS Aerospace GmbH

Robert-Bosch-Straße 15

72186 Empfingen

### **Notizen:**

Auf der Basis welcher Normen und Standards wird die Zulassung geregelt?

- ISO 9001 bildet nicht umfänglich die Anforderungen an Luftfahrtindustrie ab
- Deshalb gibt es den europäischen Standard EN 9100 für die Luftfahrt sowie internationale Pen-dants dazu
- In der IAQG (Internationale Vereinbarung im QM-Kontext) ist die Austauschbarkeit der Nor-men definiert
- Behördliche Zulassung des Betriebs folgt der EASA Part21G (Herstellungsbetriebe) und der EASE Part145 (Instandhaltungsbetriebe)
- es gibt neben den offiziellen Regelwerken viele OEM-eigene Standards
- DO-160 ist eines der großen Regelwerke

Erfolgt eine Kategorisierung von Bauteilen auf der Basis von verschiedenen Kriterien? (Beispiele für solche Kriterien: mechanische Last, Materialanforderungen, Lebensdauer, Versagensmecha-nismen, Zulassungsprozess)

- Bei Zeichnungsteilen erfolgt die erste Kategorisierung bzgl. der zulässigen Fertigungsprozesse ggfs. schon durch Anforderungen an das jeweilige Halbzeug (z.B. Rundteil nach ABS..)
- durch Prozessspezifikation werden ebenfalls ggfs. Zulässige Fertigungsprozesse festgelegt

- wenn Änderungen eingeführt werden, muss in Abstimmung mit dem Kunden ein Qualifikationsprogramm durchgeführt werden; der Impuls ist hier das Interesse des Kunden

Wie sieht der Zulassungsprozess für Bauteile generell aus?

- Je nach Art der Bauteile unterschiedlich

- Es gibt verschiedene Arten von Bauteilen: Zeichnungsteile (Bauteile, die nur für einen Flugzeugtyp zugelassen sind) sowie Normbauteile (Bauteile, die nicht nur auf einen speziellen Flugzeugtypen zugelassen sind)

- Der Umgang mit Zeichnungsteilen besitzt unterschiedliche Ausprägungen

- Ein Beispiel: Die Entwicklungsverantwortung für das Zeichnungsteil liegt bei OEM, Bauteil wird nach Zeichnung ausgeschrieben; für A380 sind Verbindungselemente mit Schweißanteil herzustellen, durch die Folgeprozesse ergeben sich für den Hersteller keine konkreteren Anforderungen außer der Geometrie; die Folgeprozesse und die darin enthaltenen Prüfungen werden durch den OEM übernommen

- beginnt mit Erstmuster-Prüfbericht (Anforderung gilt für alle Bauteile unabhängig vom Kontext)

- Ein anderes Szenario für die Fertigung eines Zeichnungsteils (quasi „eine Ebene darüber“): Es sind Anforderungen an statische und Dynamische Eigenschaften, Anforderungen an die Lebensdauer/Anzahl der Lastzyklen definiert; die Definition dieser Anforderungen erfolgt durch OEM, Verweis auf relevante Normen erfolgt ebenfalls seitens OEM

- bei Airbus sind die referenzierten Normen Airbus-Standards; dort sind Prüfungen definiert (diese Definition ist nicht auf dieses Bauteil begrenzt, sondern gilt für den generellen Anwendungsfall)

- Für den Umgang mit Normbauteile gilt: DU160 regelt die generellen Anforderungen an Produkte die in fliegendes Gerät eingebaut werden, es werden Testabläufe ebenso wie die Bewertung/Akzeptanzkriterien dieser Tests beschrieben

- DO-160 Standardwerk im Luftfahrtbereich für die Qualifikation von Produkten, die in fliegendes Gerät verbaut werden

- Herstellungsunternehmen müssen ein Testprogramm für Produkt definieren, dieses Programm wird mit dem Kunden und seinen Anforderungen abgeglichen

- Anforderungen an Bauteile werden generell durch Standards definiert, sind aber teilweise verhandelbar; dafür wird ein realistischer, erfahrener Blick auf die Betriebssituation geworfen; als Beispiel dient hier der Umgang mit Anforderungen an Lebensdauer und Belastungen; solche Anforderungen werden potenziell auch durch das Zusammenspiel von mehreren Bauteilen in Baugruppen beeinflusst

- Aufteilung der Qualifikation auf verschiedene Akteure im Herstellungsprozess ist auch möglich; dies hängt u.a. von der Entwicklungsverantwortung für die Bauteile bzw. Baugruppen ab

Welche Eigenheiten besitzt der Zulassungsprozess für AM-Bauteile?

- Bisher wird bei SCS AM zur Verarbeitung von Kunststoffen betrieben
- Der Anwendungszweck sind hier vor allem das Rapid Prototyping für funktionsfähige Prototypen sowie die Fertigung von Bauteilen für Testvorrichtungen
- es bestehen wohl keine speziellen Anforderungen bzgl. der Qualifizierung von Fertigungsprozessen, ausschlaggebend sind vordergründig die Anforderungen an das Endprodukt
- für jedes Bauteil erfolgen Einzeltestungen mit Berichten, diese werden zu einem Gesamtbericht zusammengefasst

Gibt es eine Strategie für die Auswahl von Bauteilen, die (neuerdings) mittels AM gefertigt werden sollen?

- bestehende Bauteile umkonstruieren und mittels AM fertigen, um wirtschaftlicher zu fertigen sowie Gewicht einzusparen
- bereits Kontakt zu Element22 GmbH in Kiel; Die Topologie eines Bauteils wurde optimiert und das Bauteil AM-gerecht gestaltet; dieses Bauteil war nicht nur wirtschaftlicher in der Herstellung, sondern brachte ebenfalls eine Gewichtsersparnis ein (nur noch ca. 30 % des ursprünglichen Gewichts)
- wichtig bei neuen Bauteil-Konstruktionen und den dazugehörigen Fertigungsprozessen und Werkzeugbauten (z.B. für Umformwerkzeuge) ist die Zulassung aller involvierten Hersteller
- Ein hohes vermutetes Potenzial für die Einführung von AM-Bauteilen liegt in Single Source Programmen (es gibt nur einen Zulieferer für dieses Bauteil); dadurch sind die Möglichkeiten für eine Neukonstruktion bzw. die Einführung eines neuen Fertigungsverfahrens für das betroffene Bauteil seitens des Zulieferers größer
- Anwendungsbeispiele aus dem Gusssegment sind direkt vorstellbar; der Eindruck entsteht vor allem durch bessere erzielbare Auflösung der AM-Verfahren gegenüber den Guss-Verfahren
- Der Ersatzteilbereich scheint großes Potenzial zu besitzen; die Handhabung potenziell zu überholender Bauteile wird teilweise über „prüfende“ Prozesse abgewickelt (d.h. das betroffene Bauteile teilweise auch ausgebaut, geprüft und anschließend wieder verbaut werden können); trotzdem wird das Ersatzteil-Marktsegment immer größer; in der Beschaffung von Ersatzteilen gehen Flugzeuggbetreiber generell, wenn möglich, direkt über die Zulieferer und nicht über OEM

## A.2 Notizen aus dem Gespräch mit H. Schneevogt

Interview wurde geführt mit:

Helge Schneevogt

Deutsche Bahn AG

Potsdamer Platz 2

10785 Berlin

### **Notizen:**

Erfolgt eine Kategorisierung von Bauteilen auf der Basis von verschiedenen Kriterien? (Beispiele für solche Kriterien: mechanische Last, Materialanforderungen, Lebensdauer, Versagensmechanismen, Zulassungsprozess)

- Im Kontext der AM gibt es die folgenden Bauteilkategorien: Endbauteile (wird als Original-Bauteil) verwendet und fest eingebaut), Tooling, Prototypen
- Endbauteile werden als Originalbauteile verwendet und fest in Schienenfahrzeuge verbaut
- An Endbauteile gelten die höchsten Anforderungen; sie müssen in einer zertifizierte AM-Fertigungsstätte hergestellt werden
- die Zertifizierung für AM-Herstellung erfolgt nach ISO ASTM 52920 (bisher nicht formal veröffentlicht, besitzt Vor-Norm-Status), vorher galt DIN Spec 17071; insgesamt umfangreiches Prüf- und Qualifizierungsprogramm
- Bauteile sollen durch Qualifizierung Originalteil-Qualität erreichen
- bei allen Endbauteilen wird eine Erstmuster-Prüfung durchgeführt; die Anforderungen an Erstmuster-Prüfungen sind via öffentlicher Literatur definiert (Stichwort: „Erstmuster-Prüfung Deutsche Bahn“)
- Endbauteile sind nicht via Desktop-3D-Druckern zu fertigen, sondern industrielle Maschinen (interne Regelung); Beurteilung der Maschinenart erfolgt durch interne Abteilung
- für das Tooling gelten wenig Anforderungen, die einfache Sichtprüfung wird jedoch immer durchgeführt; es gelten zudem die folgenden internen Vorgaben:
  - es werden keine Werkzeuge zum Spannen via AM gefertigt (Hintergrund: Unfallvermeidung)
  - es werden keine Mess- und Prüfmittel via AM gefertigt, (Hintergrund: notwendig Präzision)
  - bei den beiden gerade beschriebenen Anwendungen kann es Ausnahmen geben; die Prüfung hierfür erfolgt jedoch individuell von Seiten des Competence Centers
- für Prototypen gelten Anforderungen analog zum Tooling: eine einfache Sichtprüfung wird immer durchgeführt; die Maßhaltigkeit ist wichtig, da Prototypen oftmals Einbaumuster sind
- für Bauteile allgemein gilt die Liste Güteprüfungspflichtiger Produkte (LGP) der DB; dieses Doku-

ment ist öffentlich zugänglich und definiert Anforderungen anhand von Bauteilkategorien allgemein

Wie sieht der Zulassungsprozess für Bauteile generell aus?

- der Einbau von Endbauteilen erfolgt i.d.R. im Rahmen einer Instandhaltungsmaßnahme; das bedeutet, dass die Bauteile 1-zu-1 ersetzt werden („Form“, „Fit“ und „Function“ der Bauteile müssen gleich bleiben)
- ist eine 1-zu-1-Ersetzung gegeben, kann sowohl Fertigungsverfahren als auch Material geändert werden
- die Bauteile müssen sich immer im „zeichnungsgerechten Zustand“ bewegen; eine Modifikation der Bauteilgestaltung ist nicht zulässig
- DB ist Fahrzeuginstandhalter, nicht Fahrzeughersteller; klassischerweise werden Ersatzteile nach SAP-Nummer beim Lieferanten geordert
- der Impuls für Eigenfertigung bei DB ist i.d.R. die Abweichung zwischen geregelten Ersatzteillieferungsperioden und Lebensdauer der Fahrzeuge; d.h. Ersatzteilversorgung ist nicht bis an das Fahrzeug-Lebensende vertraglich geregelt
- der Nachbau der Ersatzteile erfolgt entweder nach Zeichnung (wenn vorhanden) oder im Extremfall mittels Reverse Engineering
- weil die Ersetzung von Bauteilen im Rahmen einer instandhaltungstechnischen Maßnahme geschieht, bleibt die Fahrzeugzulassung i.d.R. unberührt
- bei der Überschreitung gewisser Schwellen muss eine Fahrzeugänderung durchgeführt werden; bei Fahrzeugänderung ist nicht die Zulassung des Fahrzeugs an sich betroffen, die Änderung kann je nach Fall trotzdem genehmigungspflichtig werden
- bei einer Fahrzeugänderung muss Risikobeurteilung durchgeführt werden (Stichwort hier „CMM-RA“)
- Fahrzeugänderungen liegen in verschiedenen Kategorien (A-D) vor
- Bei Endbauteilen, die nicht für Schienenfahrzeuge sind, genügt im Prinzip die Erstmuster-Prüfung
- für verschiedene Bereiche (z.B. Fahrzeug, Infrastruktur) gibt es jeweilige Verantwortliche; für Schienenfahrzeuge ECM („Entities in Charge of Maintenance“) -> Personen, die zum Fahrzeughalter gehören
- wesentliche Funktion ist ECM2; ECM2 besitzt Bauteil-Verantwortung und ist immer persönlich haftbar für Änderungen oder instandhaltungstechnische Maßnahmen generell
- ähnliche Verantwortungen existieren auch bei Infrastruktur und Anlagen
- die Anforderungen nach LGP gelten

Auf der Basis welcher Normen und Standards wird die Zulassung geregelt?

- ISO 9001
- AM: ISO ASTM 52920
- LGP der DB
- Verschweißte AM-Bauteile: DVS MERKBLATT 1624

Welche Eigenheiten besitzt der Zulassungsprozess für AM-Bauteile?

- wenige allgemeine Standards
- viele individuelle Normen im Kontext der AM; im Eisenbahnbereich ist noch keine etabliert
- wichtiges Kriterium der AM-Verfahren ist, dass die Bauteileigenschaften werden erst während des Drucks definiert werden
- AM-Qualifizierung der Zulieferer muss gegeben sein; Zulassung ist u.a. über die ISO 5229 geregelt
- eine Bedingung an die Qualifizierung ist, dass das Fertigungsverfahren erprobt ist und die Prozessparameter für dieses Verfahren fixiert sind; die Erzeugnisse des Verfahrens mit fixierten Prozessparametern müssen hinreichend sein
- die Qualifikation betrifft nicht nur den Bauprozess, sondern die Prozesskette als Ganzes (z.B. Qualifikation der Mitarbeiter, Aufstellungsbedingungen der Maschine, Rohmaterial-Management)
- die Bauteil-Sicherheiten vor allem über die Materialauswahl und nicht über die Dimensionen realisiert (Stichwort: Instandhaltungsmaßnahme)

Gibt es eine Strategie für die Auswahl von Bauteilen, die (neuerdings) mittels AM gefertigt werden sollen?

(Damit ist nicht (nur) die Auswahl auf Basis des AM-Potenzials gemeint.)

- Ersatzteilversorgung bei auslaufenden Verträgen (s.o.)
- die Auswahl potenzieller AM-Bauteile läuft nachfragebasiert; darauf folgt dann ggf. eine Machbarkeits-Überprüfung durch das Competence Center, die auf technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Kriterien basiert
- eine strategische Bauteilauswahl gibt es ebenfalls; hier werden erst einmal „low hanging fruits“ anvisiert; das sind in diesem Kontext kleine Kunststoff-Bauteile, die nicht tragend sind; hier ist das wesentliche einschränkende Kriterium der Brandschutz; Aspekte wie z.B. Farbgebung und Oberflächenbeschaffenheiten sind in der Detailarbeit noch zu berücksichtigen
- Bauteile, die als „Langsam-Dreher“ (Bauteile, die selten aus dem Lager abgerufen werden) definiert sind und mit hohen Wiederbeschaffungszeiten einhergehen, sind ebenfalls im strategischen Fokus; solche Bauteile erhalten oftmals durch Werkzeuge ihre Form (z.B. Spritguss-Bauteile oder Strangpress-Profile)
- ein weiterer Aspekt der berücksichtigt wird, sind die Kosten dieser Bauteile; teure Bauteile sor-

gen für eine hohe Kapitalbindung, was strategisch nicht gewollt ist

- praktisches Beispiel: häufig werden Gussbauteile mithilfe von AM gefertigt; ein wesentlicher Grund hierfür ist die lange Wiederbeschaffungsdauer

- ein weiterer Grund sind die hohen Herstellungskosten bei pulverbettbasierten Verfahren; hier kommt noch die Nachweisführung hinzu

- eine strategische Ausrichtung ist hier die Nutzung der indirekten AM (Rapid Casting); die Gussform wird mittels AM hergestellt, der Gießprozess selbst bleibt bei der jeweiligen Gießerei; dadurch ändert sich an der Nachweisführung für das Bauteil nichts, da es Originalmaterial und Originalverfahren des Bauteils bleiben

- so bleibt der Prozess der Nachweisführung beim Bauteil-Hersteller

### **A.3 Notizen aus dem Gespräch mit M. Hillebrecht und Th. Doering**

Interview wurde geführt mit:

Dr.-Ing. Martin Hillebrecht  
EDAG ENGINEERING GmbH  
Reesbergstraße 1  
36039 Fulda

und

Thomas Doering  
EDAG ENGINEERING GmbH  
Reesbergstraße 1  
36039 Fulda

#### **Notizen:**

Erfolgt eine Kategorisierung von Bauteilen auf der Basis von verschiedenen Kriterien?  
(Beispiele für solche Kriterien: mechanische Last, Materialanforderungen, Lebensdauer, Versagensmechanismen, Zulassungsprozess)

- prinzipiell gibt es keine scharfen Kriterien, die für eine Kategorisierung angewandt werden
- sicherheitsrelevante Bauteile (z.B. Halter für Sitze) sind prinzipiell keine Sinterteile; bei einem OEM wurde das jedoch schon gemacht über die Prozesskette sintern, HIPen und tempern

Wie sieht der Zulassungsprozess für Bauteile generell aus?

- Die Bauteile sind zugelassen, wenn das jeweilige Erzeugnis eines Fertigungsverfahrens zugelassen ist
- die Zulassung geht also über die Werkstoffe, deren Freigabeprozess in drei Phasen erfolgt: Prinzipieltauglichkeit, Konzepttauglichkeit und Serientauglichkeit
- Dieser Freigabeprozess kann bis zu 3 Jahren dauern; die Ergebnisse für die jeweilige Zulassungsphase müssen statistisch abgesichert sein -> mit steigender Tauglichkeit steigt auch die Anforderung an die statistische Absicherung
- Anforderungen des Freigabeprozesses sind nicht öffentlich dokumentiert sondern (im Gegenteil) geheimes Know How der Hersteller und OEMs
- die Aspekte, unter denen die Werkstoffe für die Freigabe untersucht werden, lauten: Material, Fügetechnik, Oberflächeneigenschaften, Korrosion, Verschleiß, Festigkeit, Steifigkeit, Crash,

Akustik, Umformung

- die Aspekte sind gültig je nachdem wie der Werkstoff weiterverarbeitet werden soll; Beispiel: Für Gusswerkstoffe wird nicht die Umformbarkeit als wichtiges Kriterium herangezogen
- der Aspekt der Füge-technik ist für den Bereich Automotive sehr relevant

Auf der Basis welcher Normen und Standards wird die Zulassung geregelt?

- es gelten Hersteller-interne Standards, die intern verschieden benannt sind - Sicherheitsrelevanten Teile ergeben sich implizit aus den Anforderungen an Bauteile; die Art und Größe der jeweils definierten Lasten sind ein Indiz für solche Bauteile
- Es gibt keine allgemeingültige Kategorisierung von Bauteilen nach ihren Sicherheitsstufen
- eine Möglichkeit der Recherche hierzu wäre der ADAC

Welche Eigenheiten besitzt der Zulassungsprozess für AM-Bauteile?

- die Zulassung läuft über die Materialqualifizierung (s.o.)
- Eigenheiten der AM-Verfahren werden so entsprechend berücksichtigt, da die Werkstoffeigenschaften während der Fertigung entstehen

Gibt es eine Strategie für die Auswahl von Bauteilen, die (neuerdings) mittels AM gefertigt werden sollen?

(Damit ist nicht (nur) die Auswahl auf Basis des AM-Potenzials gemeint.)

- ursprünglich wurde AM genutzt um kleine Kunststoffbauteile wie Regler und Schalter zu fertigen
- der Prototypenbau ist ein großes Thema
- durch Reduzierung der Entwicklungszeit wird der AM-Business Case generiert
- mit Blick auf die Werkstoffqualifizierung wäre der Prototypenbau der Konzepttauglichkeit zuzuordnen
- auch die Individualisierung von In- und Exterieur gehört zu potenziellen Einsatzbereichen der AM
- langfristig ist die AM für die Verfügbarkeit von Ersatzteilen relevant; je nach Bauteil ist dieses Vorgehen schon heute Realität

Wie verhält es sich mit der Entwicklungsverantwortung von Komponenten?

- die Geschäftsmodelle von EDAG lassen sich in verschiedene Bereiche je nach Grad der Komplexität und der Verantwortungsübernahme aufteilen
- der Bereich mit relativ niedriger Komplexität und relativ niedriger Verantwortungsübernahme ist die Engineering Dienstleistung
- hier wird auf relativ spezifischen Auftrag ein Bauteil/eine Baugruppe mit den entsprechenden Nachweisen entwickelt

- der Bereich mit relativ hoher Komplexität und relativ niedriger Verantwortungsübernahme ist das Business Development Consulting
- die hier behandelten Inhalte sind komplex (z.B. Definition des Geschäftsmodells von Start-Ups), die Verantwortung für EDAG ist jedoch relativ gering, da das Unternehmen hier nur beratend tätig ist
- der Bereich mit relativ niedriger Komplexität und relativ hoher Verantwortungsübernahme ist die Entwicklung von Modulen inkl. ihrer Funktionen
- der Kundenauftrag besteht teilweise nur aus einer groben Skizze des gewünschten Moduls, die Randbedingungen müssen von EDAG selbst geklärt werden
- der Bereich mit relativ hoher Komplexität und relativ hoher Verantwortungsübernahme ist die Gesamtfahrzeugentwicklung
- dieser Bereich macht etwa 50 % des Umsatzes aus

## **A.4 Notizen aus dem Gespräch mit S. Riecker**

Interview wurde geführt mit:

Dr.-Ing. Sebastian Riecker

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung

Winterbergstraße 28

01277 Dresden

### **Notizen zum MoldJet-Verfahren:**

Rahmenbedingungen:

- Schichthöhe 25-200 Mikrometer

Stärken:

- auch kantige Innenprofile/Profile mit Hinterschnitten ohne Probleme bzgl. Supportmaterial fertigbar
- Korrektur einer fehlerhaften Schicht durch zwischengeschalteten Analyseschritt möglich -> verhindert Gesamtausschuss
- durch schichtweises Verfahren nahezu keine Gestaltungseinschränkungen bei der Grünteilherzeugung -> beim Sintern bestehen die bekannten Problematiken
- homogene Pulver-Verteilung (wegen der Paste)
- hohe Grünfestigkeit

Herausforderungen:

- durch potenzielle Optimierungsvorgänge im Analyseschritt wird Ausschuss-Material generiert (Paste und Form)
- Rissbildung beim Entformen potenziell möglich

Bisher gefertigte Bauteile:

- Auflösung bis zu 200 Mikrometer
- größtes bisher gefertigtes Bauteil besitzt einen Durchmesser von ca. 30cm und 4,6kg Gewicht nach Sintervorgang
- Bauteilerange geht von relativ großen bis relativ kleinen Bauteilen
- Teile mit komplexen Innenstrukturen wurden ebenfalls bereits gefertigt

### **Notizen zum Gel Casting:**

Rahmenbedingungen:

- Know How liegt in der Suspension, nicht in der Technologie an sich

**Stärken:**

- Formherstellung kann durch nahezu beliebige Verfahren geschehen
- Giessen bei 50°C sorgt für niedrige Anforderungen an die Form
- hohe Grünfestigkeit
- gute Möglichkeiten zur Strukturierung der Oberfläche
- homogene Pulver-Verteilung (wegen der Paste)

**Herausforderungen:**

- Arbeit mit verlorenen Formen
- es bestehen die Herausforderungen des Schwerkraftgießens wie z.B. Gaseinflüsse

**Bisher gefertigte Bauteile:**

- Bauteile mit Wanddicken von 0,3mm bis 40mm wurden gefertigt
- Bauteile mit inneren Kanälen von >1mm wurden gefertigt
- Grünteile mit Gewicht >2000g wurden gefertigt

## A.5 Notizen aus dem Gespräch mit J. Schaper

Interview wurde geführt mit:

Dr.-Ing. Johannes Schaper  
Element22 GmbH  
Wischhofstr. 1-3, Geb. 13  
24148 Kiel

### Notizen zum Cold Metal Fusion:

Rahmenbedingungen:

- für Serienfertigung ist für das Verfahren sinnvoll
- größere Teile sinnvoll
- EOS 110 als Drucker, 0,1 Schichtstärke, 55W Laser
- Entpulverung geschieht grob via Druckluft und detailliert mittels Wasserstrahl (bei ca. 10bar)
- je nach Packung im Drucker unterscheiden sich Kosten deutlich (bis zu Faktor 3 für Kosten/Volumen)

Stärken des Verfahrens:

- keine Supports bei Grünteilfertigung benötigt (vgl. SLS)
- Grünteilfestigkeit » BJ
- kürzere Prozesszeiten als SLM
- Innere Strukturen mit Einschränkungen (s.u.) gut fertigbar

Herausforderungen des Verfahrens:

- Herausforderungen bei der Pulverentfernung sind ähnlicher Natur wie beim SLS
- die Anforderungen für die Pulverentfernung sind aufgrund der Grünlings-Eigenschaften strenger als beim SLS (für Ausblasen des Pulvers sind Ein- und Auslass nötig, um Teil nicht zu „sprengen“)
- Innere Kanäle können nicht zu dünn/zu lang werden, das Pulver muss entfernbar sein
- für „zu kleine“ Bauteile ist die Auflösung zu gering

Erfahrungen mit Konstruktionsregeln:

- Wanddicken <1mm nicht fertigbar
- Limitation durch chemische Entbinderung (mit Lösemittel) -> bis 10mm ist noch wirtschaftlich, danach Entbinderungszeiten zu lang
- Gewinde in z-Richtung druckbar, Mindestgröße M4 (auch ohne Nachschneiden möglich)

Bisher gefertigte Bauteile (alle aus Titan):

- größtes Teil > 1kg
- kleinste Größe „Fingernagelgröße“
- Beispielbauteil mit M33-Gewinde wurde schon gedruckt

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

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

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

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden. Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: \_\_\_\_\_

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

dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Thema:

### **Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur simultanen Herleitung von Prozessparametern und Konstruktionsregeln im Kontext der sinterbasierten Additiven Fertigung**

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

\_\_\_\_\_  
Ort

\_\_\_\_\_  
Datum

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