

Restriktionsgerechtes Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile für das Selektive Laserstrahlschmelzen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von
René Bastian Lippert, M. Eng.

2018

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor

Tag der Promotion: 12. März 2018

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau (IPeG) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (LUH) entstanden.

Besonders möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer für die durchweg professionelle Betreuung sowie für die wertvolle fachliche aber auch persönliche Unterstützung während meiner Zeit am Institut bedanken.

Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor für die Übernahme des Korreferats und die spannenden fachlichen Dialoge. Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier danke ich zudem für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein herzlicher Dank gilt außerdem meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut, die mich während meines Promotionsvorhabens begleitet und unterstützt haben. Ein besonderer Dank geht dabei an meine Bürokollegen Florian Johannknecht, Philipp Robert Gottwald sowie Georg Leuteritz für die fachliche aber auch freundschaftliche Zusammenarbeit. Weiterhin bedanke ich mich bei Gorden Reh für die tatkräftige Unterstützung sowie bei Gerolf Kloppenburg und Alexander Wolf für die stets anregenden Diskussionen.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Lena Theveßen für den Rückhalt und die Unterstützung in den letzten Jahren, was zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen und mich stets motiviert hat. Schließlich bedanke ich mich bei meinen Eltern Barbara und Thomas Lippert für die Sicherheit und Unterstützung in jeder Situation.

René Bastian Lippert

Hannover, im März 2018

Kurzfassung

Die nachhaltige Verwendung von zunehmend knapper werdenden Ressourcen sowie ein effizienter Einsatz von Produkten im Lebenszyklus fordern die Gewichtsoptimierung von Strukturbauteilen. Ein Ansatz stellt die Verwendung des Selektiven Laserstrahlschmelzens dar, indem komplizierte Bauteile mit hoher Materialausnutzung gefertigt werden können. Somit kann die Materialverteilung von Strukturbauteilen präzise an die während des Lebenszyklus auftretenden Lasten angepasst werden.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode zur Gewichtsoptimierung von Strukturbauteilen für das Selektive Laserstrahlschmelzen vorgestellt, welche die Verwendung von kraftflussangepassten Strukturen ermöglicht. Vor diesem Hintergrund werden ein systematisches Vorgehen beschrieben, relevante Rechnerwerkzeuge bereitgestellt sowie Gestaltungsrichtlinien für Selektives Laserstrahlschmelzen für die Fertigung von inneren Strukturen spezifiziert.

Als Grundlage für die erarbeitete Methode werden Anwendungen für innere Strukturen untersucht. Dabei werden die Bewertung zur Erfüllung einer mechanischen Aufgabe sowie die Herstellbarkeit im Selektiven Laserstrahlschmelzen diskutiert. Die Methode wird auf einen Demonstrator angewandt. Dafür werden angepasste Bauteilgeometrien gestaltet und durch den Einsatz von Rechnerwerkzeugen simuliert. Die aufgebauten Modelle werden im Selektiven Laserstrahlschmelzen aus AlSi10Mg gefertigt und anschließend erprobt. Neben dem Vergleich der Modelle untereinander erfolgt die Validierung der durchgeführten Simulationen.

Die in der vorliegenden Arbeit erarbeiteten Ergebnisse werden hinsichtlich deren Praxisrelevanz diskutiert. Dazu wird der Optimierungsverlauf bei der Verwendung innerer Strukturen analysiert. Es erfolgt die Beschreibung notwendiger Maßnahmen zur Anwendung der Methode. Abschließend werden entscheidende Einflussfaktoren von inneren Strukturen im Gestaltungsprozess zusammengefasst.

Schlagwörter: Gestaltung für Additive Fertigung, Innere Strukturen, Selektives Laserstrahlschmelzen

Abstract

Title: Restriction specific design of weight-optimized structural components for selective laser melting

The sustainable use of increasingly scarce resources as well as an efficient application of products during their life cycle require a weight optimization of structural components. One approach is the application of selective laser melting, so that complicated components can be produced with high material utilization. Consequently, the material distribution of structural components can be precisely adapted to the loading conditions that occur during product life cycle.

In the present work, a method to optimize the weight of structural components for selective laser melting is presented, which describes the application of force flow adapted structures. In particular, a systematic procedure is described, relevant computer-aided tools are defined and design guidelines for selective laser melting are specified to manufacture internal structures.

As a basis for the developed method, application areas for internal structures are examined. Therefore, the evaluation to fulfill a mechanical task as well as the manufacturability using selective laser melting are discussed. Following, the method is applied to a demonstrator, where adapted model geometries are designed and simulated by computer-aided tools. The models are manufactured from AlSi10Mg using selective laser melting and tested afterwards. In addition to the comparison between the models, the simulations are also validated by the experiments.

At the end, the elaborated results are discussed. Against the background, the optimization process using internal structures is analyzed and necessary steps for the application of the method are described. Additionally, key influence factors of internal structures in the design process are summarized.

Keywords: Design for Additive Manufacturing, Lattice structures, Selective Laser Melting

Inhaltverzeichnis

Kurzfassung	V
Abstract.....	VII
Abkürzungen und Formelzeichen	XI
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	7
2.1 Additive Fertigung.....	8
2.2 Selektives Laserstrahlschmelzen.....	14
2.3 Gestalten von Strukturbauteilen	23
2.3.1 Konstruktion und Optimierung.....	25
2.3.2 Leichtbaukonstruktionen	30
2.3.3 Restriktionsgerechtes Gestalten	33
2.4 Gestalten für Selektives Laserstrahlschmelzen	35
2.4.1 Gestaltungsziele	36
2.4.2 Gestaltungsrichtlinien.....	38
2.4.3 Methoden und Werkzeuge	41
2.5 Innere Strukturen.....	45
3 Problemanalyse.....	49
4 Methode zur Gewichtsoptimierung durch innere Strukturen	59
4.1 Systematisches Vorgehen	59
4.2 Rechnerwerkzeuge	63
4.3 Gestaltungsrichtlinien für innere Strukturen.....	68
5 Anwendungen innerer Strukturen	75
5.1 Simulation innerer Strukturen	75
5.2 Fertigungseinflüsse.....	80

6	Gewichtsoptimierung eines Demonstrators	83
6.1	Klären der Anforderungen.....	83
6.2	Optimierung des bestehenden Wirkraums.....	88
6.3	Optimierung des erweiterten Wirkraums	96
6.4	Zusammenfassung	105
7	Validierung des Demonstrators.....	109
7.1	Randbedingungen	109
7.2	Prototypen-Fertigung	110
7.3	Erprobung	112
7.3.1	Voruntersuchungen.....	112
7.3.2	Statische Versuche	118
8	Praxisrelevanz der Ergebnisse	125
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	137
	Quellen- und Literaturverzeichnis	141
	Verwendete Normen und Richtlinien.....	161
	Anhang.....	163
A	Betreute studentische Arbeiten	164
B	Eigene Patente und herausgegebene Bücher.....	166
C	Gestaltungsrichtlinien für SLM.....	167
D	Mechanische Eigenschaften innerer Strukturen	175
E	Maße einer Tretkurbel nach DIN 345/ ISO 6695	179
F	Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Zugproben	180
G	Gemessene und simulierte Biegelinien der Biegeproben.....	181
H	Gemessene Biegelinien der Tretkurbeln	184
I	Gemessene und simulierte Biegelinien der Tretkurbeln	187
J	Lebenslauf.....	189

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AF	Additive Fertigung (engl. additive manufacturing, auch generative Fertigung)
AR	Additive Repair
DfAM	Gestaltung für Additive Fertigung (engl. Design for Additive Manufacturing)
DfMA	Design for Manufacturing and Assembly
DfX	Design for Excellence
DM	Direct Manufacturing
FEM	Finite-Element-Methode
HGZ	Hochgeschwindigkeitszerspanung (engl. high speed cutting, HSC)
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
SLM	Selektives Laserstrahlschmelzen (engl. selective laser melting)
STL	Standard Triangulation Language

Lateinische Notation

A	Querschnittsfläche	mm^2
A_B	Bruchdehnung	%
a	Aufmaß	mm
b_{\min}	Minimale Spaltbreite	mm
b_{\max}	Maximale Spaltbreite	mm
D	Downskin-Fläche	mm^2
E	Elastizitätsmodul	kN/mm^2
e_1	Breite eines Strukturelements	mm

e_2	Höhe eines Strukturelements	mm
F_{\max}	Maximale Last	N
F_{DIN}	In der Norm vorgesehene Last	N
$F_{\text{Prüf}}$	Prüflast	N
ΔF	Schrittweite zur Erhöhung der Last	N
G	Schubmodul	kN/mm ²
h	Schichtdicke	μm
h_s	Hatch-Abstand	μm
I	Flächenträgheitsmoment	mm ⁴
L	Länge	mm
l_c	Ausgangslänge	mm
l_0	Messlänge	mm
l_f	Überhang	mm
M_b	Biegemoment	Nm
M_t	Torsionsmoment	Nm
m	Gewicht	g
n	Anzahl der Reinigungsöffnungen	-
R_e	Streckgrenze	N/mm ²
R_m	Zugfestigkeit	N/mm ²
$R_{p0,2}$	Dehngrenze	N/mm ²
r	Radius	mm
s_{\min}	Minimale Wandstärke	mm
s_{\max}	Maximale Wandstärke	mm
T	Temperatur	°C
T_s	Schmelztemperatur eines Materials	°C
ΔT	Temperaturdifferenz	°C
U	Upskin-Fläche	mm ²
u	Verschiebung	mm

u_{\max}	Maximale Verschiebung	mm
u_{Messung}	Gemessene Verschiebung	mm
u_{Drehung}	Verschiebung durch eine Drehung	mm
u_{Zeiger}	Verschiebung des Messzeigers	mm
V	Volumen	mm ³
v_s	Scangeschwindigkeit im Pulverbett	mm/s
W	Widerstandsmoment	mm ³
w	Durchbiegung	mm
$\varnothing_{\text{Laser}}$	Laserdurchmesser im Schmelzpunkt	μm
\varnothing_{Ist}	Tatsächlich aufgeschmolzener Durchmesser	μm

Griechische Notationen

α_i	Drehwinkel	°
β	Aufbauwinkel	°
γ	Upskin-Winkel	°
δ	Downskin-Winkel	°
ε	Dehnung	%
θ	Lasereintrittswinkel	°
λ	Wellenlänge	μm
μ	Haftreibungszahl	-
ν	Querkontraktionszahl	-
ρ	Materialdichte	kg/m ³
σ	Spannung	N/mm ²
σ'	Von Mises Vergleichsspannung	N/mm ²
σ'_{\max}	Maximale von Mises Vergleichsspannung	N/mm ²
σ_{Zul}	Zulässige Spannung	N/mm ²
ψ	Fehler durch Geometrieabweichung	μm

1 Einleitung

Die additive Fertigung (engl. additive manufacturing, auch generative Fertigung oder ugs. 3D-Druck) beschreibt eine Vielzahl verschiedener Anwendungen. Vom „3D-Druck“ von Textilien und Organen bis hin zu Lebensmitteln wird der Begriff weitreichend eingesetzt [Gart14]. Die relevanteste Anwendung besteht jedoch im industriellen Kontext [Wohl17]. Die Gemeinsamkeit der einzelnen Technologien ist dabei der schichtweise Aufbau eines physischen Objektes durch eine Maschine. Im Jahre 1981 wurde die Funktionsweise der additiven Fertigung erstmals in einem wissenschaftlichen Beitrag erwähnt [Koda81]. Bereits drei Jahre später meldete Charles W. Hull das erste Patent für die Stereolithografie an [US4575330, DE171069]. Seither wird eine Vielzahl von Erwartungen mit der additiven Fertigung assoziiert. Neben der schnellen Materialisierung von virtuellen Modellen, dem nachhaltigen Umgang mit zunehmend knapper werdenden Ressourcen oder der kundenindividuellen Bauteilanpassung wird meist die hohe Gestaltungsfreiheit als entscheidender Mehrwert gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren genannt [Gebh13].

Die additive Fertigung wird zur Herstellung von Prototypen sowie von Werkzeugen eingesetzt [Gebh13, Gibs15, VDI3405]. Als weiterer Einsatzbereich erlangt die Herstellung, Nachbearbeitung und direkte Nutzung von additiv gefertigten Bauteilen für Endprodukte zunehmend an Bedeutung [Fast12, Gart14, VDI3405]. Bedingt durch die guten mechanischen Eigenschaften der Bauteile erfährt dafür besonders Selektives Laserstrahlschmelzen von metallischen Pulvern eine rasante Entwicklung [Euro14, Popr15]. Durch die einhergehende Verbesserung der Prozess- und Materialeigenschaften kann Selektives Laserstrahlschmelzen vermehrt als Substitution sowie als Ergänzung zu konventionellen Fertigungsverfahren eingesetzt werden [Lach16a].

Bezogen auf die hohe Gestaltungsfreiheit, die Selektives Laserstrahlschmelzen ermöglicht, ist eine wirtschaftliche und technisch sinnvolle Anwendung besonders bei komplizierten Bauteilen gegeben, vergleiche Abbildung 1.1. So können z.B. Hohlräume oder Freiformflächen wirtschaftlich hergestellt werden, welche konventionell nicht oder nur mit hohem Aufwand umsetzbar sind [Hagu03, Hagl15].

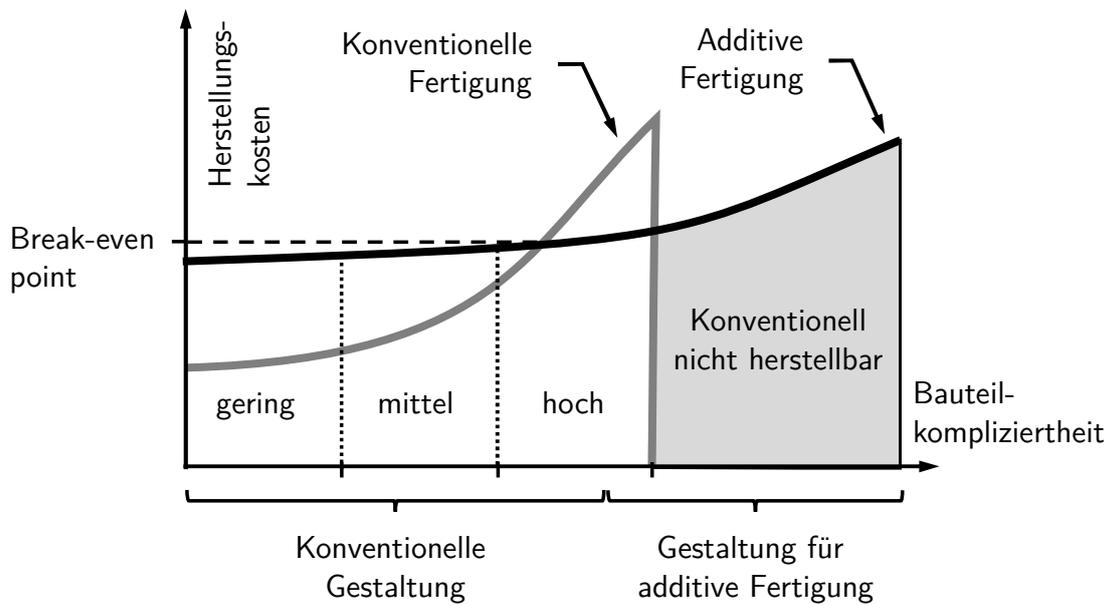


Abbildung 1.1: Einfluss der Bauteilkompliziertheit auf die Herstellungskosten nach [Merk12]

Die Gestaltungsfreiheit ermöglicht die Umsetzung gewichtsoptimierter Bauteile, welche ressourcenschonend hergestellt werden können und effizient im Produktlebenszyklus agieren [Emme11, Ohls15]. Ein maßgebender Erfolgsfaktor ist der Einsatz von komplizierten Strukturen (engl. Lattice Structures, z.B. Gitternetze oder Fachwerkstrukturen) in Strukturbauteilen [Teuf12]. Im Vergleich zu soliden Volumenkörpern kann dadurch eine hohe Bauteilsteifigkeit bei geringerem Materialeinsatz erzielt werden. Weitere Vorteile bei der Verwendung von inneren Strukturen sind:

- Redundanz für unsichere Belastungen
- Gewichtsreduktion bei vordefinierter Bauteilhülle
- Verknüpfung mechanischer und thermischer Eigenschaften
- Dämpfungseigenschaften im Bauteil

Vor diesem Hintergrund fokussiert die vorliegende Arbeit das restriktionsgerechte Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile für Selektives Laserstrahlschmelzen durch den Einsatz von inneren Strukturen. Dabei werden aufgrund der geringen Materialdichte und simultan guter Festigkeitseigenschaften Aluminiumlegierungen betrachtet [Kamm11, Klei11]. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Materialien oder andere additive Fertigungsverfahren ist aufgrund der allgemeinen Formulierung mitunter möglich.

Problemstellung

Zunächst ist bekannt, dass die Herstellung von inneren Strukturen mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur mit hohem Aufwand möglich ist [Klein11, Schu12]. Folglich ist der Einsatz von inneren Strukturen in Strukturbauteilen nur partiell untersucht. Beispiele hierfür sind Sandwichstrukturen, welche aus mehreren gefügten Schichten bestehen, oder geschäumte Materialien, deren Struktur jedoch zufällig entsteht und welche folglich nicht an Belastungsfälle angepasst werden können [Stoe05, Kopp09].

Selektives Laserstrahlschmelzen ermöglicht durch den schichtweisen Aufbau die Fertigung von mathematisch definierten Strukturen in einem Bauteil. Dabei weichen die Möglichkeiten und Charakteristiken des Verfahrens und der resultierenden Bauteile von konventionellen Verfahren ab [Gebh13, Gibs15]. Beispiele sind die Möglichkeit zur Herstellung von Kavitäten oder die Anisotropie der hergestellten Bauteile. Bei der Gestaltung von inneren Strukturen ist es folglich unabdingbar, diese Eigenschaften zu kennen und zu berücksichtigen [Lipp17b].

Weiterhin ist bekannt, dass Selektives Laserstrahlschmelzen eine junge Technologie ist, welche allmählich in industrielle Anwendungen vordringt und somit im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren einen geringen Marktanteil aufweist [Gart14]. Somit ist es nachvollziehbar, dass Konstrukteure Bauteile konventionell gestalten. Zur Realisierung eines Mehrwerts ist es jedoch ungenügend, ein bestehendes Bauteil ohne konstruktive Anpassung additiv herzustellen. Um den Erfüllungsgrad maßgeblich zu steigern, muss ein Bauteil konsequent an die Möglichkeiten und Herausforderungen der Technologie angepasst werden [Lach17a].

Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Bauteilgeometrie grundsätzlich durch Fertigungsrestriktionen limitiert wird [Feld13]. Analog zu konventionellen Verfahren, wie z.B. dem Gießen oder Fräsen, ist auch beim Gestalten für Selektives Laserstrahlschmelzen die Berücksichtigung etwaiger Restriktionen notwendig [Gebh13, VDI3405]. Bei der Gestaltung von inneren Strukturen ist es folglich herausfordernd, die Fertigungsrestriktionen für Selektives Laserstrahlschmelzen frühzeitig zu berücksichtigen, ohne die Gestaltungsmöglichkeiten einzugrenzen.

Auf Bauteilebene ist eine zusätzliche Herausforderung die Integration von belastungsoptimierten Strukturen zur Reduzierung des Gewichts bei gleichbleibenden mechanischen Eigenschaften. Beispielsweise ist eine signifikante Erhöhung der Beanspruchungen zu vermeiden, um die Lebenserwartung des Bauteils nicht zu beeinflussen [Smit13]. Die Auswirkung auf die Spannungsverteilung durch Kerbwirkungen ist in Relation zur Gewichtsreduktion abzuschätzen. Die Einbringung innerer Strukturen ist zudem stark bauteilspezifisch [Lipp17d].

Wissenschaftliche Fragestellung

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht insbesondere die wissenschaftliche Fragestellung, wie das Vorgehen zum Gestalten eines gewichtsoptimierten Bauteils beschaffen sein muss, um innere Strukturen für spezifische mechanische Randbedingungen einzusetzen.

Im Speziellen soll erforscht werden, welche Arbeitsschritte zum Einbringen innerer Strukturen in Strukturbauteile notwendig sind und welche Rechnerwerkzeuge zum Gestalten eingesetzt werden können. Dafür sollen Strukturen aus biologischen Vorbildern untersucht und zur Erfüllung einer mechanischen Aufgabe sowie zur Fertigung im Selektiven Laserstrahlschmelzen bewertet werden. Weiterhin sollen Restriktionen aus dem Fertigungsprozess identifiziert werden, welche die Gestaltung von Strukturen limitieren. Abschließend soll eine Abschätzung der Gewichtsersparnis durch innere Strukturen im Vergleich zu konventionell gefertigten Bauteilen erfolgen.

Aufbau der Arbeit

Die Untersuchung der wissenschaftlichen Fragestellung gliedert sich in Anlehnung an *Blessing et al.* in die Problemanalyse sowie in eine deskriptive und präskriptive Studie [Bles09]. Nach der Definition der Forschungslücke folgt die Ableitung des Forschungsbedarfs und damit einhergehend die Spezifikation einer geeigneten Methode sowie die Beschreibung dieser. Es folgt die Anwendung der beschriebenen Methode sowie die Evaluation der Ergebnisse in Hinblick auf die aufgezeigte Forschungslücke sowie die daraus abgeleiteten Anforderungen.

In Kapitel 2 werden dafür Grundlagen der additiven Fertigung dargestellt und Selektives Laserstrahlschmelzen in den Prozesskontext eingeordnet. Darauf aufbauend werden verfahrensspezifische Charakteristiken beschrieben und für Aluminiumlegierungen spezifiziert. Weiterhin werden die Grundlagen zum Gestalten von Strukturbauteilen, mit Fokus auf Leichtbaukonstruktionen, dargestellt. Im Stand der Forschung werden die aufgezeigten Grundlagen für Selektives Laserstrahlschmelzen konkretisiert. Schwerpunkt ist die Darstellung von Gestaltungsmethoden und -werkzeugen sowie von Gestaltungsrichtlinien. Abschließend werden innere Strukturen im Kontext mechanischer Eigenschaften diskutiert.

In Kapitel 3 erfolgt die Problemanalyse, indem der Stand der Forschung reflektiert wird. Dabei werden die maßgebenden Herausforderungen zum restriktionsgerechten Gestalten innerer Strukturen hervorgehoben. Ferner werden Anforderungen an eine Methode zur Gewichtsoptimierung von Strukturbauteilen durch innere Strukturen abgeleitet.

In Kapitel 4 erfolgt die Beschreibung der in dieser Arbeit entwickelten Methode zur Gewichtsoptimierung von Strukturbauteilen durch innere Strukturen. Es wird ein systematisches Vorgehen zur Überführung einer mechanischen Aufgabe in eine neue Bauteilgeometrie erläutert. Relevante Gestaltungswerkzeuge werden ferner zum Einsatz entlang des Vorgehens spezifiziert. Abschließend werden bestehende Gestaltungsrichtlinien hinsichtlich deren Gemeinsamkeiten untersucht, gruppiert und für den konkreten Anwendungsfall adaptiert. Zudem werden die Gestaltungsrichtlinien den Arbeitsschritten zugeordnet.

In Kapitel 5 werden Anwendungen innerer Strukturen untersucht. Nach der Selektion geeigneter Strukturen erfolgt die Simulation virtueller Prüfkörper zur Bestimmung der mechanischen Anwendungen. In einem Konstruktionskatalog werden die Ergebnisse zusammengefasst. Abschließend werden Fertigungseinflüsse auf die mechanische Eignung diskutiert.

In Kapitel 6 wird die Gewichtsoptimierung eines Demonstrators beschrieben. Ausgehend von einem konventionell gefertigten Modell erfolgt die konstruktive Anpassung entsprechend der beschriebenen Methode. Dafür werden das Ausgangsmodell untersucht und Anforderungen an neue Bauteilgeometrien abgeleitet. Auf Basis der Anforderungen wird ein Modell mit inneren Strukturen im bestehenden Wirkraum modelliert. Darüber hinaus wird ein Modell aufgebaut, bei welchem lediglich die Schnittstellen dem Ausgangsmodell entsprechen. Abschließend werden die Optimierungsverläufe zusammengefasst und die virtuellen Modelle verglichen.

In Kapitel 7 werden die Modelle validiert. Nach der Definition der Randbedingungen folgt die Beschreibung der Prototypen-Fertigung und -Erprobung. Im Zuge dessen werden Voruntersuchungen an genormten Proben beschrieben. Ziel ist die Validierung und Modifizierung der Simulationsmodelle. Die Erkenntnisse fließen in die Prototypen-Erprobung ein. Dabei werden die Prototypen sowohl untereinander als auch hinsichtlich der virtuellen Modelle verglichen.

In Kapitel 8 erfolgt die Diskussion zur Übertragbarkeit der Ergebnisse sowie der Praxisrelevanz. Anhand des Optimierungsverlaufs werden die Eigenschaften der angepassten Demonstratoren zusammengefasst. Darauf aufbauend werden die Anwendbarkeit der Methode untersucht und Handlungsempfehlungen zur Implementierung dieser gegeben. Nach dem Abgleich hinsichtlich der gestellten Anforderungen erfolgt abschließend die Zusammenfassung relevanter Einflussfaktoren bei der Gestaltung von inneren Strukturen.

In Kapitel 9 erfolgt die Zusammenfassung der Arbeit. Ferner wird ein Ausblick auf weitere Handlungsfelder gegeben. Der Aufbau der vorliegenden Arbeit ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

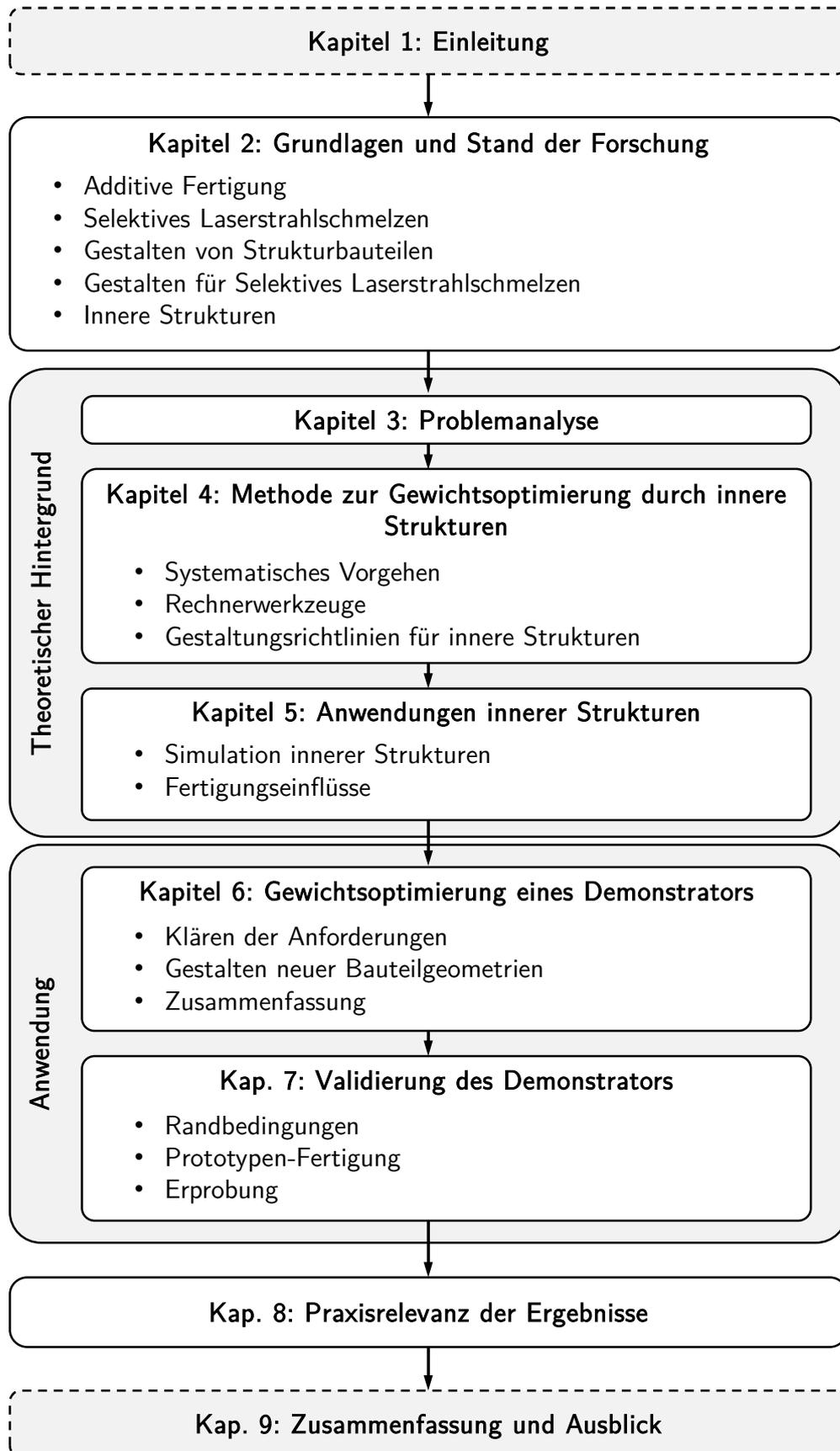


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Im Folgenden werden die Grundlagen sowie der Stand der Forschung für die vorliegende Arbeit beschrieben. Dazu werden additive Fertigungsverfahren, prozessspezifische Charakteristiken des Selektiven Laserstrahlschmelzens und Aspekte der restriktionsgerechten Gestaltung von Strukturbauteilen dargestellt. Darüber hinaus wird der Stand der Forschung bezüglich Gestaltungsrichtlinien sowie Gestaltungsmethoden und -werkzeugen für Selektives Laserstrahlschmelzen gezeigt.

In Abschnitt 2.1 wird additive Fertigung definiert und in den Kontext der Fertigungsverfahren nach *DIN 8580* eingeordnet [DIN8580]. Die Ausprägungen, Anwendungen und unterschiedlichen Verfahren werden dargestellt und anhand einer allgemeinen Prozesskette beschrieben.

In Abschnitt 2.2 erfolgt die Eingrenzung auf Selektives Laserstrahlschmelzen. Neben der Prozessbeschreibung werden verfahrensspezifische Charakteristiken diskutiert, welche eine Auswirkung auf die Bauteilqualität haben und beim Gestalten zu berücksichtigen sind. Bezogen auf das Material *AlSi10Mg* werden die Materialeigenschaften charakterisiert, welche in der vorliegenden Arbeit bei der Gestaltung und Dimensionierung sowie der Validierung der Demonstratoren herangezogen werden.

In Abschnitt 2.3 erfolgt die Einordnung des Gestaltens in die methodische Produktentwicklung. Darauf aufbauend werden Gestaltungsgrundlagen für Strukturbauteile beschrieben. Dabei werden generelle Konstruktionsansätze zur restriktionsgerechten Gestaltung dargestellt und für Selektives Laserstrahlschmelzen spezifiziert.

In Abschnitt 2.4 wird der Stand der Forschung bezüglich Gestaltungsrichtlinien, -methoden und -werkzeugen für Selektives Laserstrahlschmelzen diskutiert. Durch die Beschreibung der Limitationen bestehender Arbeiten wird weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt, welcher in der Problemanalyse in Kapitel 3 aufgegriffen wird.

In Abschnitt 2.5 erfolgt abschließend die Beschreibung innerer Strukturen. Dafür werden für die vorliegende Arbeit relevante Strukturen diskutiert und deren Funktionsweise und Anwendungen beschrieben.

2.1 Additive Fertigung

Additive Fertigungsverfahren stehen als Oberbegriff für eine Vielzahl verschiedener Verfahren, bei denen ein Werkstück element- oder schichtweise aufgebaut wird [ASTM15, VDI3405]. Die additive Fertigung definiert ferner die Anwendung eines additiven Fertigungsverfahrens [VDI3405]. Bei dem werkzeuglosen Schichtaufbau werden in x - und y -Richtung Schichten maschinell generiert. In z -Richtung werden die einzelnen Schichten zu einem dreidimensionalen Bauteil verbunden. Es entsteht eine (Near-) Net-Shape Geometrie, welche nur marginal von der Endkontur eines Bauteils abweicht [Gebh13, Gibs15].

Im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren, also der subtraktiven und formativen Fertigung, ermöglichen additive Fertigungsverfahren geänderte Gestaltungsmöglichkeiten. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, sind konventionelle Fertigungsverfahren durch das abbildende Werkzeug limitiert, sodass die Gestaltung komplizierter Geometrien limitiert ist. Dagegen ermöglichen additive Fertigungsverfahren die Herstellung von Freiformflächen und Hinterschnitten.

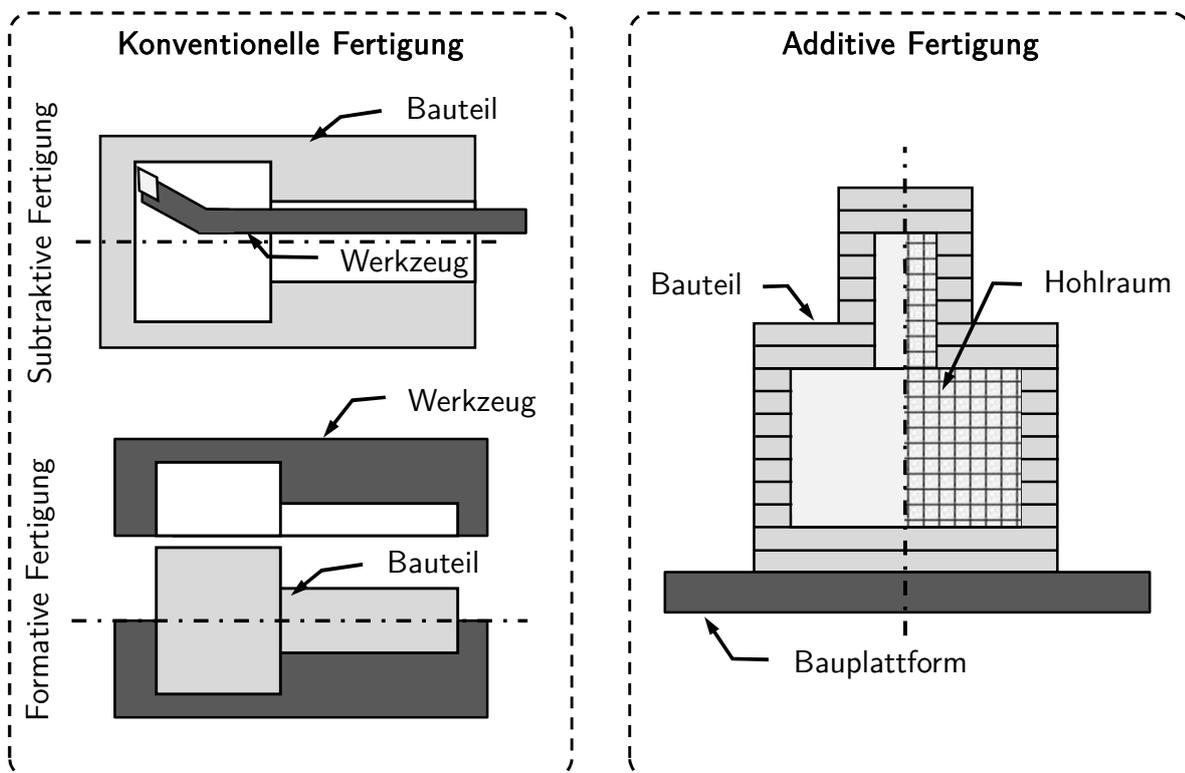


Abbildung 2.1: Abgrenzung zwischen subtraktiver, formativer und additiver Fertigung

Die additive Fertigung wird in Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Direct Manufacturing unterschieden [Fast12, VDI3405]. Dabei beinhaltet das Rapid Prototyping die „*additive Herstellung von Bauteilen mit eingeschränkter Funktionalität, bei denen jedoch spezifische Merkmale ausreichend gut ausgeprägt sind*“ [VDI3405, S. 4]. Das Rapid Tooling ist die „*Anwendung der additiven Methoden und Verfahren auf den Bau von Endprodukten, die als Werkzeuge, Formen oder Formeinsätzen verwendet werden*“ [VDI3405, S. 4]. Unter Direct Manufacturing wird die „*additive Herstellung von Endprodukten*“ [VDI3405, S. 4] verstanden. Zudem wird die additive Fertigung als materialauftragender Prozess zur Reparatur verschlissener Bauteile im Additive Repair beschrieben [Lach16c]. Abbildung 2.2 zeigt die zeitliche Einordnung der Anwendungen im Kontext des Produktentstehungsprozesses [Lach16b].

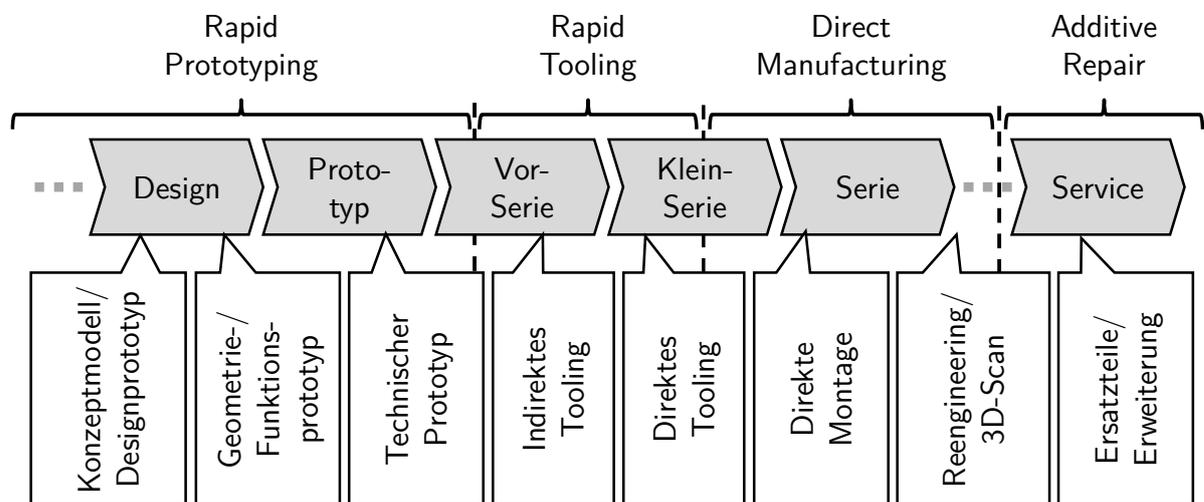


Abbildung 2.2: Additive Fertigung im Produktentstehungsprozess [Lach16b]

Rapid Prototyping wird vermehrt in frühen Entwicklungsphasen eingesetzt. Die Herstellung von Konzeptmodellen, Designprototypen, Geometrie- und Funktionsprototypen sowie technischen Prototypen ermöglicht es, entwicklungsrelevante Informationen durch physische Modelle frühzeitig zu erlangen [Gebh13, Gibs15].

An die frühen Entwicklungsphasen anknüpfend, wird Rapid Tooling zur Vorbereitung der Serienproduktion oder zur Herstellung von Null-Serien eingesetzt. Hierbei kommen das indirekte Tooling zur Herstellung von verlorenen Modellen sowie das direkte Tooling zur Herstellung von Werkzeugformen zum Einsatz [Gebh13, Gibs15].

Für die Herstellung von Bauteilen mit Fertigteilqualität wird das Direct Manufacturing als Ergänzung sowie Substitution von konventionellen Fertigungsverfahren eingesetzt. Nach der Herstellung einer Near-Net-Shape Geometrie und der entsprechenden Nachbearbeitung werden diese montiert oder direkt verwendet [Gebh13, Gibs15]. Herausfordernd sind oftmals die Nachbearbeitung sowie die Qualitätssicherung der Materialeigenschaften.

Während des Lebenszyklus eines Produkts kann Additive Repair zur Instandhaltung und Reparatur von verschlissenen Bauteilen eingesetzt werden. Anwendung findet das Additive Repair während der Nutzungsphase und ist somit der Produktentwicklung nachgelagert [Zgha16].

Übersicht der additiven Fertigungsverfahren

Additive Fertigungsverfahren unterscheiden sich in einigen Aspekten, wie beispielsweise dem Prozessaufbau oder dem physikalischen Wirkprinzip. Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, kann zur Differenzierung ein Konstruktionskatalog verwendet werden. Konstruktionskataloge werden zum methodischen Konstruieren eingesetzt und ermöglichen die weitestgehend vollständige Darstellung von Informationen. Dabei wird ein Gliederungs-, Haupt- und Zugriffsteil beschrieben [Roth00]. Im Gliederungsteil erfolgt die grundsätzliche Unterteilung der additiven Fertigungsverfahren nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials [VDI3405]. Als weitere Gliederungsebene wird die Beschaffenheit der Materialien unterschieden. So kann beispielsweise ein festes Ausgangsmaterial als Pulver oder Filament vorliegen. In der dritten Gliederungsebene wird der zugehörige Bindemechanismus differenziert. Im Hauptteil des Konstruktionskataloges sind die additiven Fertigungsverfahren aufgeführt. Weiterhin zeigt der Zugriffsteil die charakteristischen Merkmale zur Auswahl eines additiven Fertigungsverfahrens. So unterscheiden sich diese beispielsweise in der Genauigkeiten, der Oberflächenrauheit, den Materialien oder der Notwendigkeit für Stützstrukturen [Gebh13, VDI3405].

Das Selektive Laserstrahlschmelzen, welches in der vorliegenden Arbeit untersucht wird, ist ein pulverbettbasiertes Verfahren [VDI3405]. Durch Aufschmelzen eines festen Ausgangsmaterials, welches in Pulverform vorliegt, wird die Bauteilgeometrie erzeugt. Im Selektiven Laserstrahlschmelzen können beispielsweise Stahl, Aluminium-, Titan- oder Nickellegierungen verarbeitet werden. Anwendung findet Selektives Laserstrahlschmelzen im Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Additive Repair sowie zunehmend im Direct Manufacturing [Lach16b].

Gliederungsteil			Hauptteil	Zugriffsteil					
Aggregatzustand	Beschaffenheit	Bindungsmechanismus	Verfahren	Kunststoff	Metall	Schichtdicke h in μm	Stützstruktur	Einsatz	Baugeschw. v_s in mm/h
Fest	Pulver	Schmelzen	Lasersintern	x		< 10		RP, RT, DM	10 - 35
			Laserstrahlschmelzen		x	10-100	x	RP, RT, DM	7 - 35
			Elektronenstrahlschmelzen		x	10-100	x	RP, DM	0,5 - 80
			Pulverauftragsschweißen		x			RR	
		Binder	3-D Drucken	x	x	> 100		RP,RT	Bauteilabhängig
		Filament	Schmelzen	Fused Layer Modeling	x		10-100	x	RP
			Multi-Jet Modelling	x		10-100	x	RP, RT, DM	Bauteilabhängig
	Folie	Kleben	Layer Laminated Manufacturing	x	x	10-100	x	RP	2 - 12
Flüssig	Flüssigkeit	UV	Stereolithografie	x		< 10	x	RP, RT	
			Poly-Jet Modeling	x		10-100	x	RP	8 - 12
			Digital Light Processing	x		10-100	x	RP, RT, DM	5 - 40

Abbildung 2.3: Konstruktionskatalog additiver Fertigungsverfahren [Lach17]

Prozesskette

Bei allen additiven Fertigungsverfahren sind vorgelagerte Pre-Prozesse sowie nachgelagerte Post-Prozesse notwendig [VDI3405]. Diese stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit dem eigentlichen In-Prozess. Beginnend bei der Modellierung einer CAD-Geometrie zeigt Abbildung 2.4 die notwendigen Prozessschritte bis hin zur Aufbereitung und Reinigung des Bauteils.

Im Pre-Prozess wird ein virtuelles Modell für den Fertigungsprozess vorbereitet. Ziel ist der Aufbau eines geschlossenen Volumenmodells. Punkt-, Linien-, Flächen- sowie lückenhafte Volumenmodelle können im In-Prozess nicht verarbeitet werden [Gebh13].

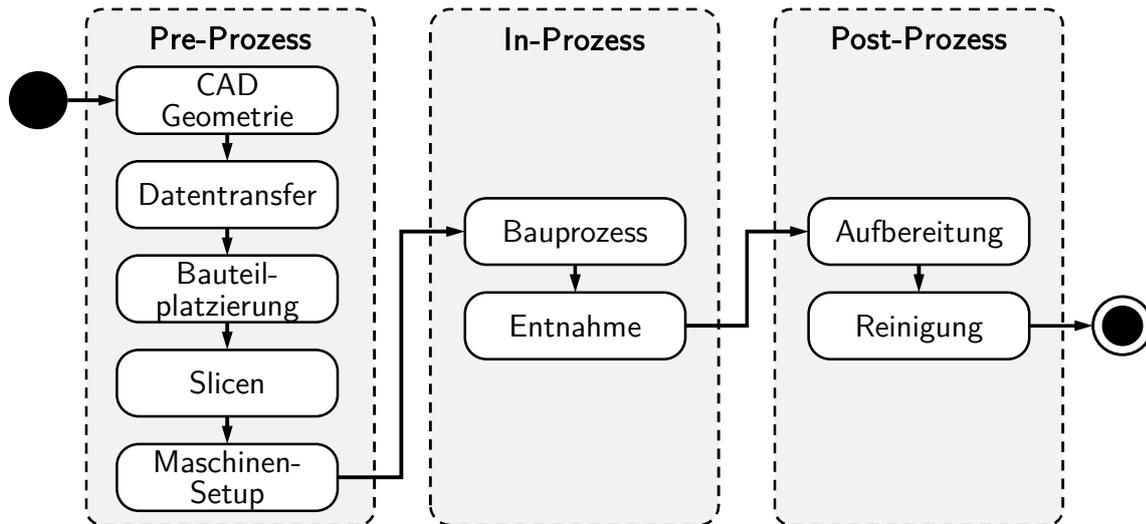


Abbildung 2.4: Prozesskette der additiven Fertigung

Die fehlerfreie CAD-Geometrie wird in ein neutrales Datenformat konvertiert. Dabei wird hauptsächlich das Standard Triangulation Language (STL) Format verwendet. Die Oberfläche der CAD-Geometrie wird dabei durch Triangulation mittels Dreiecksflächen approximiert. Im Datei-Code werden die Koordinaten der Eckpunkte eines Dreiecks sowie dessen Flächennormale im Binär- oder ASCII-Quellcode hinterlegt [Gebh13, Grae16]. Das STL-Format wird aufgrund der geringen Kompliziertheit und der resultierenden geringen Datenmengen industriell eingesetzt [Grae16]. Nachteilig ist, dass keine Zusatzinformationen, wie Materialdaten oder Identifikationsmerkmale, gespeichert werden können. Auch die begrenzten Möglichkeiten zur Nachbearbeitung und Reparatur der Daten ist ein Nachteil. Die Approximation mittels Dreiecksflächen führt ferner zu Geometrieabweichungen, welche nach der Fertigung in Form von Tessellierungsfehlern erkennbar sind [Wart10].

Im nächsten Schritt werden die STL-Dateien an Aufbereitungsprogramme übertragen. Es folgt die Platzierung im Bauraum, welche sich aus der Orientierung, Positionierung und Anordnung zusammensetzt und einen maßgebenden Einfluss auf die spätere Oberflächenqualität hat. Basierend auf der Platzierung werden Stützstrukturen erzeugt. Im nächsten Schritt wird die dreidimensionale Geometrie in sog. Slices zerschnitten, welche im späteren Fertigungsprozess die Schichtdicke abbilden. Als abschließender Schritt erfolgt das Maschinen-Setup, also die Festlegung der Maschinenparameter für den Bauprozess. Für Selektives Laserstrahlschmelzen kann beispielsweise die Laser-Scangeschwindigkeit oder Schichtdicke eingestellt werden. Daraufhin berechnet die Software fehlende Parameter, wie beispielsweise die Laserintensität [Krut98, Gibs15].

Der In-Prozess beschreibt die Materialisierung des Modells und ist stark verfahrensabhängig. Eingangsgrößen sind das geslicte Volumenmodell sowie die definierten Maschinenparameter. Im Bauprozess wird das Bauteil in x - und y -Richtung entsprechend der Konturdaten einer Schicht aufgebaut. Anschließend erfolgt die Absenkung der Bauplatzform in negativer z -Richtung oder das Anheben des Druckkopfes in positiver z -Richtung um eine Schichtdicke. Die Schichtgenerierung läuft iterativ ab, bis das gesamte Bauteil gefertigt ist. Die Funktionsweise des Bauprozesses ist vom Bindemechanismus des gewählten additiven Fertigungsverfahrens abhängig. Zusätzlich kann eine vorgelagerte Vorheizphase oder das Einstellen einer Schutzgasatmosphäre notwendig sein. Die Einflüsse auf den In-Prozess haben eine Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften der resultierenden Bauteile [Wong12, Kirc10]. Abschließend wird das Bauteil aus der Prozesskammer entnommen [Gebh13, VDI3405]. Der Ablauf des In-Prozesses ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

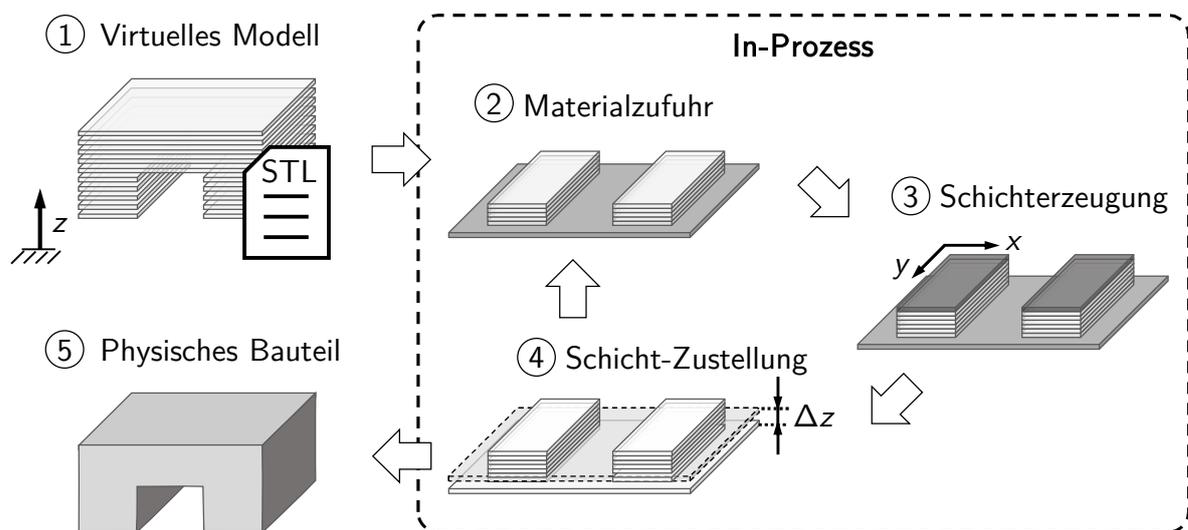


Abbildung 2.5: Ablauf des In-Prozesses

Im Post-Prozess erfolgt die Aufbereitung und Reinigung des Bauteils. Dabei wird überschüssiges Material entfernt und – soweit möglich – dem Bauprozess zurückgeführt. Weiterhin werden Stützstrukturen vom Bauteil getrennt sowie entsorgt. Dem Post-Prozess nachgelagert erfolgt die mechanische Aufbereitung relevanter Flächen. Abhängig vom gewählten additiven Fertigungsverfahren kann das Bauteil weiterhin wärmebehandelt werden, um innere Spannungen zu minimieren und das Material zu homogenisieren. Weiterhin ist eine chemische oder optische Nachbearbeitung möglich [Gebh13, Fraz14, VDI3405].

2.2 Selektives Laserstrahlschmelzen

Selektives Laserstrahlschmelzen ist definiert als kurzzeitiges, thermisches Aktivieren einzelner Bereiche in einem Pulverbett durch einen Laserstrahl [Mein99, VDI3405]. Dabei wird das Material zur Generierung eines Bauteils mit hoher Materialdichte bis zu $\rho \approx 100\%$ vollständig aufgeschmolzen [Gebh13]. Es entsteht eine homogene Masse durch die Überführung des Materials in die flüssige Phase bei $T > T_s$ [Gibs15]. Ausgangsmaterialien sind Metalle, welche als Pulver oder Granulate im Pulverbett angeordnet sind. Aufgrund des vollständigen Aufschmelzens des Pulvers sind die hergestellten Bauteile thermisch sowie mechanisch entsprechend hoch belastbar.

Prozessaufbau

Aus dem Pulvervorratsbehälter bringt der Beschichter eine definierte Schichtdicke auf die Bauplattform auf, dargestellt in Abbildung 2.6. Überschüssiges Material wird im Überlaufbehälter aufgefangen. Die auf der Bauplattform entstandene Pulverschicht wird als Pulverbett bezeichnet. Durch einen Laserstrahl, welcher über einen x-y-Scanner gesteuert wird, erfolgt das selektive Aufschmelzen gemäß der Schichtkontur. Nach vollständiger Belichtung der Kontur wird die Bauplattform in negativer z-Richtung um eine Schichtdicke abgesenkt. Der Pulvervorratsbehälter verfährt simultan in positiver z-Richtung, sodass der Beschichter eine neue Schicht im Pulverbett aufbringen kann [VDI3405].

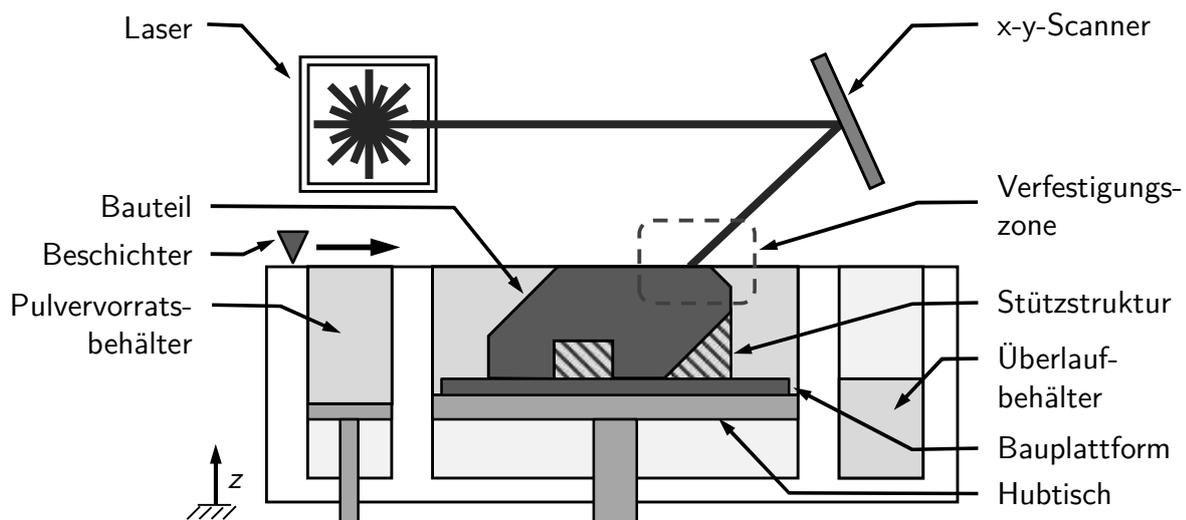


Abbildung 2.6: Aufbau einer Selektiven Laserstrahlschmelzanlage nach [VDI3405]

Zur Spannungsreduktion wird die Bauplattform beim Selektiven Laserstrahlschmelzen meist erwärmt. Hingegen wird der Bauraum in der Regel nicht erhitzt. Eine Ausnahme sind Aluminiumlegierungen aufgrund der geringen Schmelztemperatur, da die Erhitzung des Bauraums einen deutlichen Einfluss auf den notwendigen Laserenergieeintrag hat. Weiterhin wird der Bauraum mit einem Schutzgas geflutet, um die Oxidation des Metalls zu unterbinden. In Abhängigkeit des zu verarbeitenden Pulvers werden hierzu Stickstoff (z.B. bei Stählen) oder Argon (z.B. bei Aluminiumlegierungen) verwendet. Abbildung 2.7 zeigt den Vorgang in der Verfestigungszone [Gu12, VDI3405].

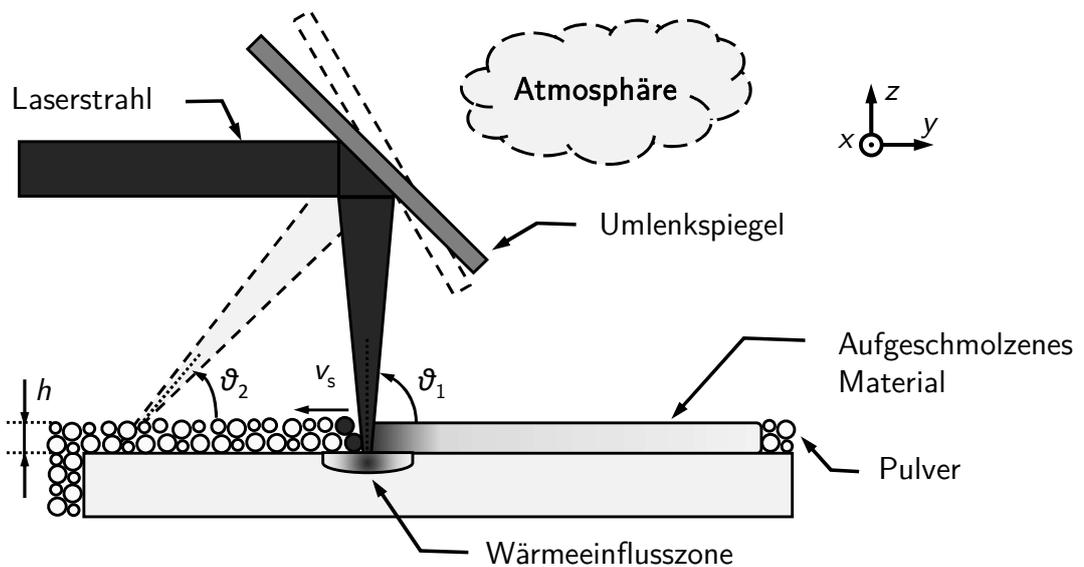


Abbildung 2.7: Vorgang in der Verfestigungszone

Verfahrensspezifische Charakteristiken

Die Bauteilqualität wird beim Selektiven Laserstrahlschmelzen von den Material-, Maschinen- und Prozessparametern beeinflusst. Die folgende Darstellung verfahrensspezifischer Charakteristiken zeigt Restriktionen, welche bereits bei der Bauteilgestaltung berücksichtigt werden sollten.

Im Selektiven Laserstrahlschmelzen wird eine Geometrie durch einzelne Schichten an die Soll-Geometrie des virtuellen Modells approximiert. Bei einer geringen Schichtdicke h ist eine exakte Abbildung möglich. Bei zunehmender Schichtdicke h sinkt die Abbildungsgenauigkeit. Dieser sogenannte Treppenstufeneffekt ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Zur Steigerung der Oberflächenqualität eines Bauteils ist eine geringe Schichtdicke h zu wählen. Hingegen führt die Reduzierung der Schichtdicke h zu einer erhöhten Fertigungszeit [Gu12, Brem11, Buch13].

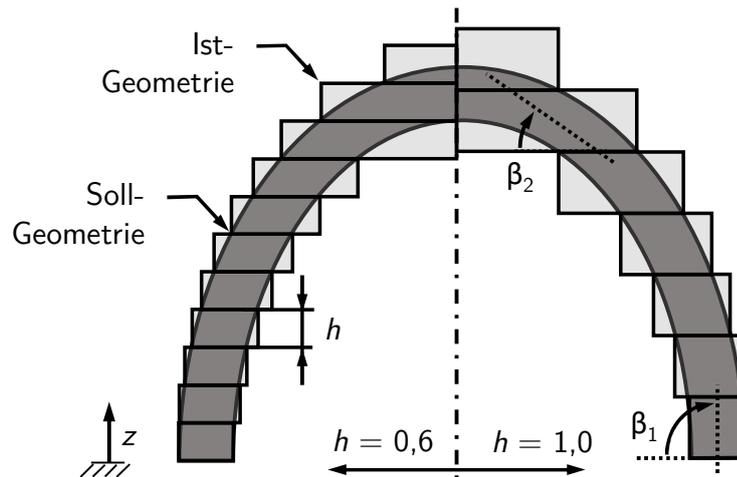
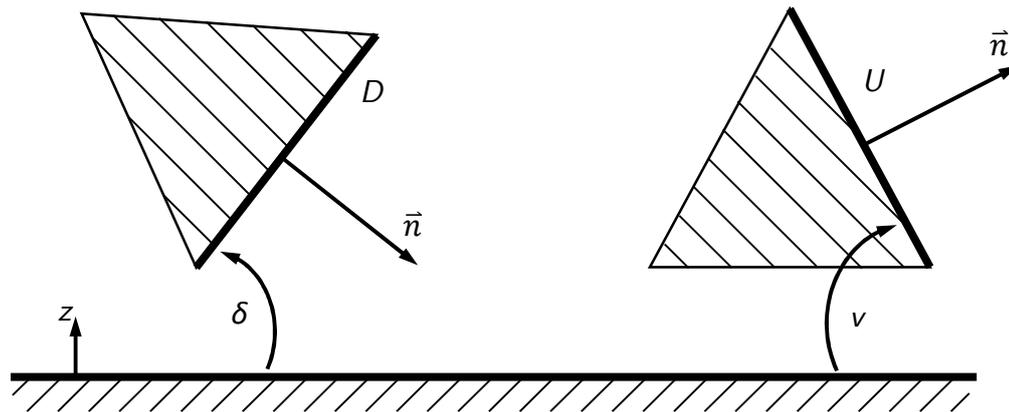


Abbildung 2.8: Zusammenhang zwischen Treppenstufeneffekt und Schichtdicke

Der Treppenstufeneffekt tritt ausgeprägt bei Oberflächen mit flachem Aufbauwinkel β in Bezug zur Bauplattform auf. Relevante Grenzwerte lassen sich anhand der Downskin-Fläche D , der Upskin-Flächen U , dem Downskin-Winkel δ und dem Upskin-Winkel γ definieren. Wie in Abbildung 2.9 dargestellt, weist jede Außenfläche einer Geometrie einen Normalenvektor \vec{n} auf. Hierbei wird unterschieden, ob der Normalenvektor \vec{n} in positive (Upskin-Flächen U) oder in negative z -Richtung (Downskin-Flächen D) zeigt. Verläuft der Normalenvektor \vec{n} parallel zur Bauplattform, steht die Bezugsfläche im rechten Winkel. Die Oberflächenrauheit einer Downskin-Fläche D bzw. einer Upskin-Fläche U steigt bei abnehmendem Downskin-Winkel δ bzw. Upskin-Winkel γ . Zur Verbesserung der Oberflächenqualität ist somit bei der Bauteilplatzierung darauf zu achten, dass relevante Oberflächen mit einem Down- bzw. Upskin-Winkel $\delta \cap \gamma = 0^\circ \cap 90^\circ$ zur Bauplattform vorgesehen werden [Atze12, Buch13].

Analog zu den meisten additiven Fertigungsverfahren sind beim Selektiven Laserstrahlschmelzen Stützstrukturen notwendig. Diese dienen zur Abstützung von Geometrien während des Bauprozesses. Der Verzicht auf Stützstrukturen kann zu Fehlstellen infolge einer Höhendifferenzen Δz führen, welche auf die gesteigerte Dichte des aufgeschmolzenen Materials im Vergleich zum darunterliegenden Pulver zurückzuführen ist, siehe Abbildung 2.10. Die Notwendigkeit für Stützstrukturen ist durch den Downskin-Winkel δ definiert. Unterschreitet dieser einen verfahrensspezifischen Grenzwert, ist eine Stützstruktur notwendig. Wie in Abbildung 2.10 dargestellt wird zwischen drei unterschiedlichen Ausprägungen für die geometrische Notwendigkeit von Stützstrukturen unterschieden. Unterschreitet der Downskin-Winkel δ den verfahrensspezifischen Grenzwert, entsteht ein Überhang. Dieser muss in der Regel mit einer Stützstruktur versehen werden [Buch13, Shah13].



Bezeichnung	Beschreibung
Downskin-Fläche D	(Teil-) Fläche, deren Normalvektor \vec{n} in Bezug auf die z-Baurichtung negativ ist.
Downskin-Winkel δ	Winkel zwischen der Bauplattform und einer Downskin-Fläche, der Werte zwischen 0° (parallel zur Bauplattform) und 90° (senkrecht zur Bauplattform) annehmen kann.
Upskin-Fläche U	(Teil-) Fläche, deren Normalvektor \vec{n} in Bezug auf die z-Baurichtung positiv ist.
Upskin-Winkel ν	Winkel zwischen der Bauplattform und einer Upskin-Fläche, der Werte zwischen 0° (parallel zur Bauplattform) und 90° (senkrecht zur Bauplattform) annehmen kann.

Abbildung 2.9: Up- und Downskin-Flächen und -Winkel nach [VDI3405]

Eine Ausnahme sind kleine Überhänge, welche ohne entsprechende Maßnahmen erzeugt werden können. Ein Sonderfall sind Ceilings, welche einen Überhang beschreiben, der zu beiden Seiten mit einer Geometrie verbunden ist. Generell muss dabei der überstehende Bereich mit einer Stützstruktur versehen werden. Auch hier stellen kleine Überhänge die Ausnahme dar. Der dritte und gleichfalls kritischste Fall sind Inseln. Im Gegensatz zu Überhängen und Ceilings sind diese in der aktuellen Schicht nicht mit weiteren Geometrien verbunden. Ein Absinken der Geometrien in negative z-Richtung kann nur durch Stützstrukturen vorgebeugt werden [Emme14, Krut98].

Weiterhin dienen Stützstrukturen beim Selektiven Laserstrahlschmelzen als stoffschlüssige Verbindung zur Bauplattform, damit die Position des generierten Bauteils im Bauraum nicht durch den Beschichter beeinflusst wird [ASTM52910].

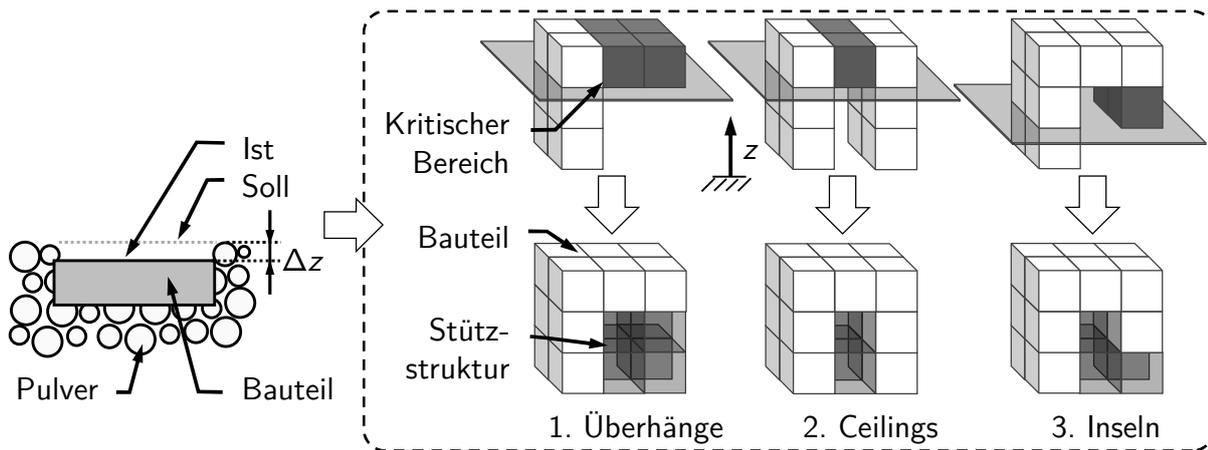


Abbildung 2.10: Stützstrukturen bei Überhängen, Ceilings und Inseln

Neben den geometrischen Notwendigkeiten werden Stützstrukturen zur Wärmeleitung eingesetzt. Besonders in Bauteilbereichen mit hohem Materialvolumen besteht eine erhöhte Neigung zur Spannungsinduzierung durch den lokalen Wärmeeintrag. Da die Wärme im Bauteil nicht über das angrenzende Pulverbett abgeführt werden kann, entsteht Bauteilverzug [Buch13, Mich14].

Beim Selektiven Laserstrahlschmelzen werden die aufgeschmolzenen Materialbahnen nebeneinander positioniert, siehe Abbildung 2.11. Ziel ist die Erzeugung homogener Materialvolumina, sodass die Schichtstruktur einen möglichst geringen Einfluss auf die Bauteileigenschaften hat [Thij10]. Werden die Bahnen im späteren Bauteil in z -Richtung belastet, ist die Adhäsion in diesen Bereichen von besonderer Relevanz. Eine zu geringe Haftung führt zum Bauteilversagen. Für den Kraftfluss besser geeignet ist es, wenn der Kraftvektor in x - oder y -Richtung angreift. Dabei wird das Material entlang einer aufgetragenen Schicht beansprucht, sodass die Kohäsion des Materials den ausschlaggebenden Faktor darstellt [Sehr09]. Zur Vermeidung von frühzeitigem Bauteilversagen sind die anisotropen Materialeigenschaften bei der Auslegung eines Bauteils zu berücksichtigen [Nien13].

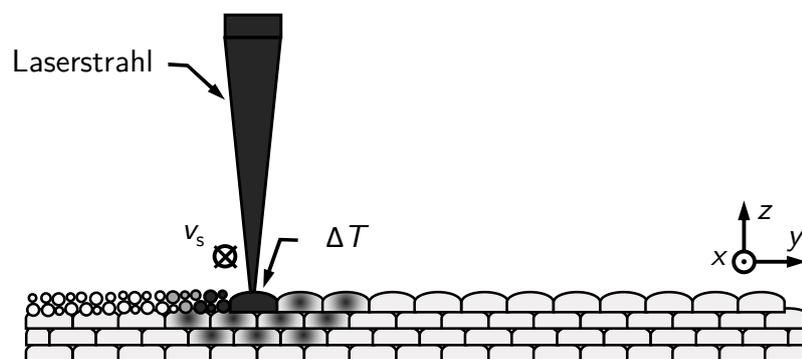


Abbildung 2.11: Vorgang des Schichtaufbaus und resultierende Materialstruktur

Wie in Abbildung 2.11 dargestellt, bewirkt der Laserstrahl eine Temperaturdifferenz ΔT zum Aufschmelzen des Materials im Pulverbett. Entsprechend Gleichung 2.1 ergibt sich die Temperaturdifferenz, welche durch die Laserleistung und die Scangeschwindigkeit eingestellt werden kann, aus der Schmelztemperatur des Materials und der Bauraumtemperatur [Robe09].

$$\Delta T = T_S - T_{Bauraum} \quad 2.1$$

Weiterhin resultiert eine Wärmeeinflusszone durch den Wärmeeintrag im Laserfokus, sodass das angrenzende Materialpulver thermisch belastet wird. Dadurch kann der aufgeschmolzene Bereich vom Laserdurchmesser abweichen [Krut07], wodurch eine Geometrieabweichung $\varnothing_{Ist} > \varnothing_{Laser}$ aufgrund der partiell aufgeschmolzenen Pulverkörner entsteht, siehe Abbildung 2.12. Ein Voxel¹ weicht demzufolge vom theoretischen Wert ab. Die Geometrieabweichung wirkt sich entsprechend auf einen Pfad aus, sodass letztendlich die Ist-Geometrie des Bauteils von der Soll-Geometrie abweicht. Die Zielsetzung liegt in der Angleichung der Durchmesser $\varnothing_{Laser} \triangleq \varnothing_{Ist}$, indem die Größe der Pulverkörner verringert wird. Die Optimierung der Korngrößen ist jedoch durch die Rieselfähigkeit des Materials sowie durch das Herstellungsverfahren des Pulvers physikalisch limitiert [Gath16].

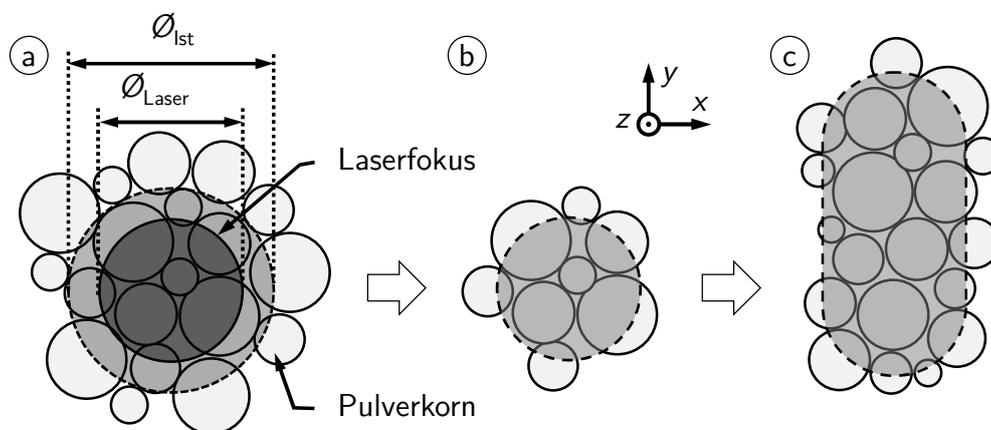


Abbildung 2.12: Wärmeeinflusszone des Schmelzbades a) Laserstrahl b) Voxel c) Pfad

Die geometrische Abweichung ist in den Up- und Downskin-Flächen in Form einer erhöhten Oberflächenrauheit zu erkennen. Eine Verbesserung der Bauteiloberflächen wird durch die Belichtungsstrategie ermöglicht. Wie in Abbildung 2.13 dargestellt, können die Up- und Downskin-Flächen mit spezifischen Maschinenparametern nachbelichtet werden.

¹ Ein Voxel ist ein bei der Aufbringung von Material kleinstes, realisierbares Volumenelement [Krut98].

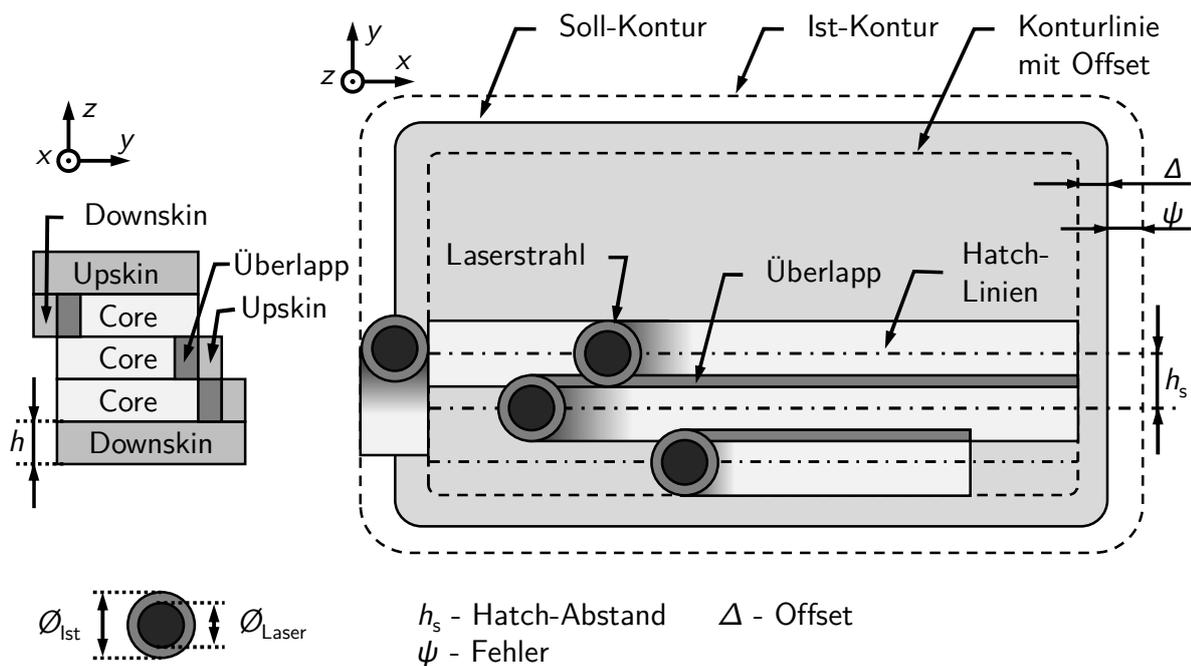


Abbildung 2.13: Geometrische Abweichungen im In-Prozess nach [Manf14]

Weiterhin zeigt Abbildung 2.13 den notwendigen Überlapp zur stoffschlüssigen Verbindung der Materialbahnen, die Abweichungen der Belichtungsstrategie zur Ist-Kontur sowie den notwendigen Offset der Konturlinie [Manf14].

Neben den geometrischen Abweichungen existieren Umsetzungsfehler beim Selektiven Laserstrahlschmelzen, die nicht durch die Belichtungsstrategie beeinflusst werden können. Wie in Abbildung 2.14 dargestellt, kann besonders die Fertigung von Ecken sowie von dünnwandigen Geometrien kritisch sein. Durch die Form des Laserstrahls können spitze Winkel in einer Ebene nicht abgebildet werden. Demzufolge entstehen ausgelassene Bereiche, die in einer geometrischen Abweichung resultieren [Kadd10].

Ist eine Wandstärke s kleiner als der Laserdurchmesser \varnothing_{Ist} kann dieser Bereich nicht belichtet werden. Alternativ kann der Laser den Steg entsprechend des tatsächlichen Laserdurchmessers \varnothing_{Ist} aufschmelzen. Das Ergebnis ist ein zu breiter Steg, der die minimal herstellbare Stegdicke in z -Richtung definiert [Kadd10].

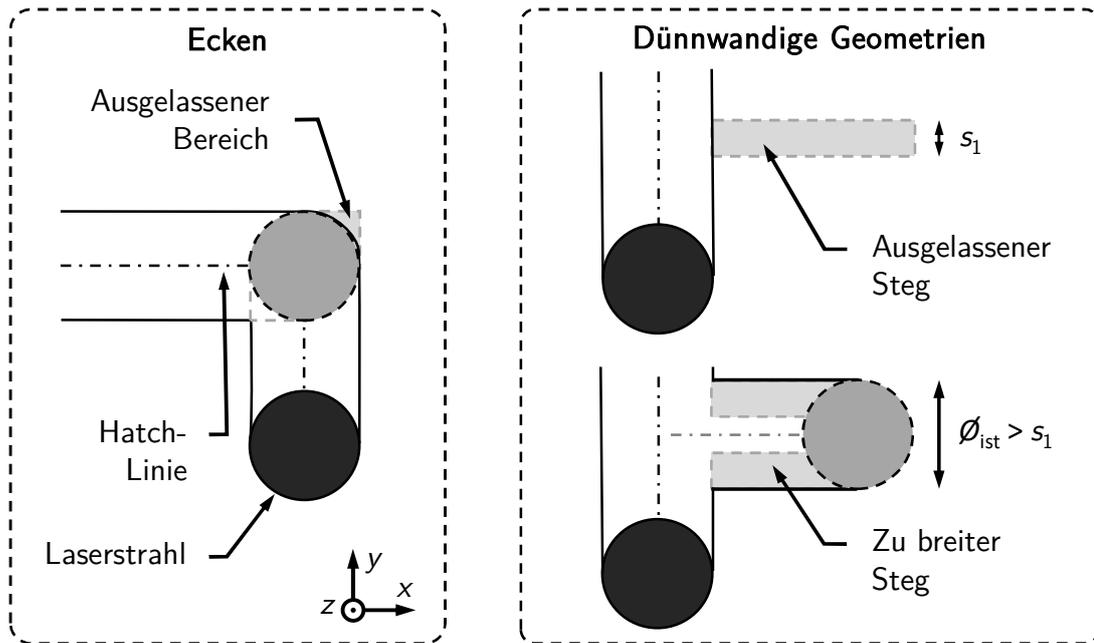


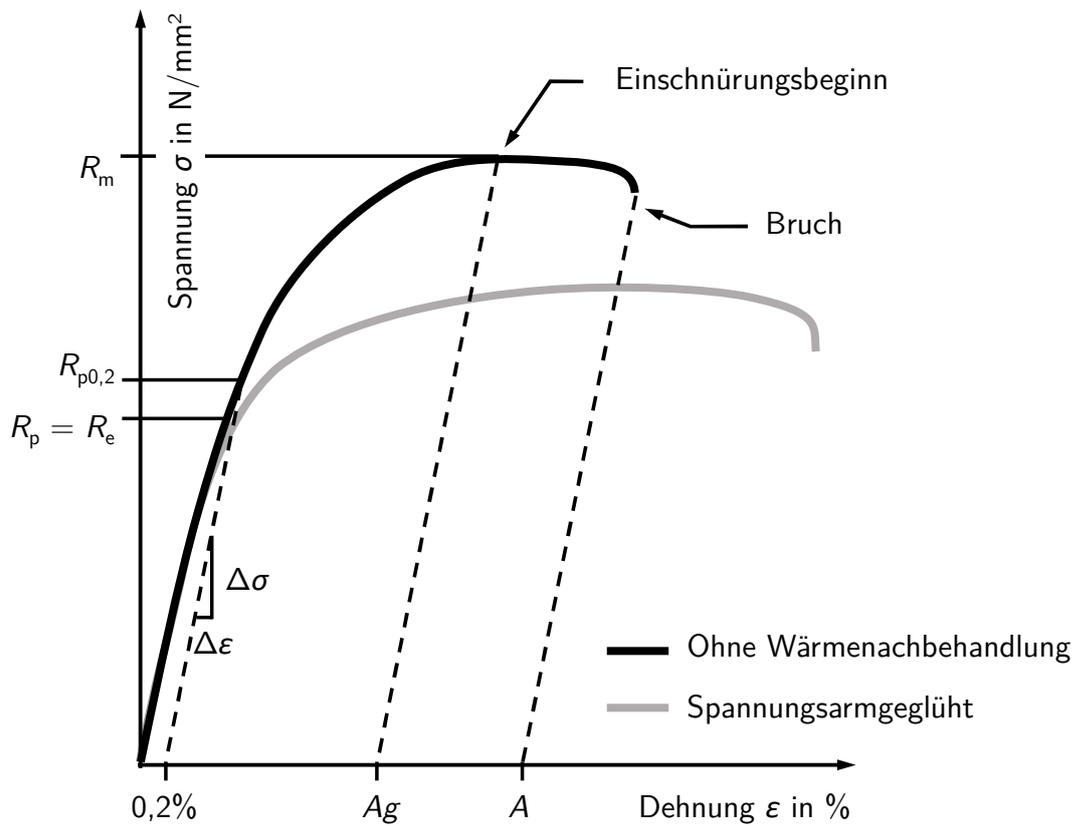
Abbildung 2.14: Umsetzungsfehler durch den Laserstrahl im In-Prozess nach [Kadd10]

Materialien

Als Ausgangsmaterial können beim Selektiven Laserstrahlschmelzen prinzipiell alle Metalle mit einer Schweißneigung eingesetzt werden [Popo16]. Voraussetzung ist die Möglichkeit der Pulverisierung eines Materials. Neben der Herstellung durch Wasserverdüstung werden Pulver überwiegend unter Schutzgasatmosphäre gasverdüst, da eine geringere Porosität erzielt und die Oxidmenge auf der Partikeloberfläche reduziert werden kann. So können z.B. Stähle, Titan-, Nickel- oder Aluminiumlegierungen verarbeitet werden [Matt16].

Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen beziehen sich auf die Aluminiumlegierungen AlSi10Mg, welche als Standardlegierung erforscht ist und im Schmelzprozess kontrolliert verarbeitet werden kann. Aufgrund des Festigkeits-Dichte-Verhältnisses ist der Einsatz von Aluminium als Konstruktions- und Leichtbaumaterial sinnvoll [Antr11].

In Abbildung 2.15 sind die mechanischen Eigenschaften von AlSi10Mg und ein qualitatives Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Dabei werden die Eigenschaften des Pulvers nach dem Bauprozess sowie nach einer Wärmebehandlung dargestellt. Weiterhin werden die mechanischen Eigenschaften einer AlSi10Mg-Gusslegierung aufgeführt.



	Symbol	Einheit	Pulver —	Pulver —	Sandguss (T6)
Dichte	ρ	g/cm ³	2,68	2,68	2,68
E-Modul (xy)	E_{xy}	kN/mm ²	75 ± 10	70 ± 10	74
E-Modul (z)	E_z	kN/mm ²	70 ± 10	60 ± 10	74
Zugfestigkeit (xy)	$R_{m\ xy}$	N/mm ²	460 ± 20	345 ± 10	220
Zugfestigkeit (z)	$R_{m\ z}$	N/mm ²	460 ± 20	350 ± 10	220
Dehngrenze (xy)	$R_{p0,2\ xy}$	N/mm ²	270 ± 10	230 ± 15	180
Dehngrenze (z)	$R_{p0,2\ z}$	N/mm ²	240 ± 10	230 ± 15	180
Bruchdehnung (xy)	A	%	9 ± 2	12 ± 2	1
Bruchdehnung (z)	A	%	6 ± 2	11 ± 2	1

Abbildung 2.15: Qualitatives Spannungs-Dehnungs-Diagramm und Materialdaten von AISi10Mg [Mach92, Zins13, Eos14, Kris14, Oste14]

Auffällig ist, dass die Materialeigenschaften bei Pulverlegierungen mit Toleranzbereichen angegeben werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die mechanisch technologischen Eigenschaften des Bauteils sowohl von der Materialcharge als auch vom Prozess beeinflusst werden [Gebh13].

Aus Abbildung 2.15 wird deutlich, dass die mechanischen Eigenschaften des verarbeiteten Pulvers richtungsabhängig sind. Dieses anisotrope Verhalten ist auf die Schichtstruktur zurückzuführen [Sehr09]. Bei einer Belastung parallel zur Baurichtung z erfolgt die Reduzierung der Festigkeitswerte. Zur Homogenisierung der Materialeigenschaften kann eine Wärmebehandlung durchgeführt werden [Bran11]. Konventionell gegossene Bauteile aus AlSi10Mg werden meistens in einem T6-Zyklus (bestehend aus Lösungsglühen, Abschrecken und Warmauslagern) wärmebehandelt [DIN515]. Aufgrund des schnellen Aufschmelzens und Wiedererstarrens resultiert beim Selektiven Laserstrahlschmelzen bereits ein Gefüge mit entsprechenden mechanischen Eigenschaften ähnlich dem T6-Zustand gegossener Bauteile [Eos14]. Vor diesem Hintergrund werden laserstrahlgeschmolzene Bauteile für zwei Stunden bei 300 °C spannungsarmgeglüht [Eos14]. Es wird deutlich, dass die Materialeigenschaften nach einer Wärmebehandlung gering von denen einer Gusslegierung abweichen.

Neben einer Wärmebehandlung können zur Verbesserung der Bauteileigenschaften mechanische, chemische oder optische Prozesse nachgelagert werden. Neben konventionellen, spanenden Nachbearbeitungsprozessen kann z.B. Hot Isostatic Pressing (HIP) zur Reduzierung der Porosität eingesetzt werden, indem das Bauteil unter hohem Druck Wärme ausgesetzt wird [Das98]. Ein weiteres Verfahren ist das Strahlverfestigen (Shot Peening), das zur Reduzierung der Oberflächenrauheit R_z um einen Faktor von ca. 5 eingesetzt wird [Kris14].

2.3 Gestalten von Strukturbauteilen

In der methodischen Produktentwicklung nach *VDI-Richtlinie 2221* ist die Aufgabe des Gestaltens die Festlegung des Gesamtentwurfes eines Produkts. Das Gestalten findet dabei in der Konzeptphase statt, in welcher prinzipielle Lösungen in modulare Strukturen gegliedert werden. Neben dem Definieren und Detaillieren der Bauteilgestalt, ist dabei deren Validierung durch Berechnung und Simulation maßgebend [VDI2221].

Die Gestalt eines technischen Gebildes ist abhängig vom Zweck und den zugrundeliegenden Bedingungen sowie den Gestaltungsmöglichkeiten für den Entwickler und ergibt sich aus der Festlegung von gestaltbeschreibenden Parametern [Koll98]. *Jung* beschreibt die Einteilung eines technischen Produkts in dessen Geometrie und Material [Jung89]. *Koller* spezifiziert die Geometrie durch die Anzahl, Längenabstände, Winkelabstände, Reihenfolge, Verbindungsstruktur sowie Form von Teiloberflächen [Koll98]. Auch *Roth* beschreibt die Gestaltparameter eines technischen Produkts und gliedert die Geometrie in Größe/ Abmessung, Form, Anzahl und Topologie [Roth00]. *Rodenacker* beschreibt eine ähnliche Unterteilung der Gestalt durch Art, Form, Lage, Größe und Anzahl und bezieht sich dabei auf die Wirkflächen eines Bauteils [Rode91]. Das Gestalten von technischen Produkten ist folglich definiert als Gesamtheit aller Tätigkeiten, mit denen die Gestalt von Produkten bestimmt wird, d.h. mit denen die Gestaltparameter festgelegt werden. Wie in Abbildung 2.16 dargestellt, setzen sich die festzulegenden Gestaltparameter durch die Geometrie sowie das Material und die Oberfläche eines Bauteils zusammen. Die Geometrie spezifiziert wiederum die Topologie, Form, Größe und Anzahl sowie die Toleranzen eines Bauteils [Roth00].

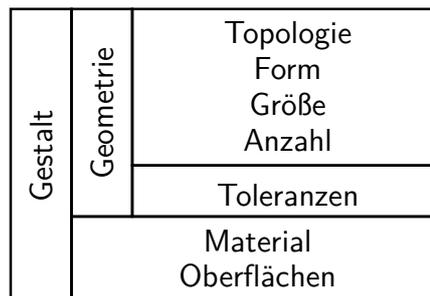


Abbildung 2.16: Gestaltparameter nach [Roth00]

Zur Festlegung der Produktgestalt anhand der Gestaltparameter beschreibt die *VDI-Richtlinie 2223* relevante Arbeitsabschnitte und -schritte [VDI2223]. Wie aus Abbildung 2.17 hervorgeht, ist das generelle Vorgehen durch eine zunehmende Präzisierung der Bauteilgestalt charakterisiert. Zur Überführung der prinzipiellen Lösungen in einen maßstäblichen Gesamtentwurf werden gestaltbeeinflussende Anforderungen und Bedingungen spezifiziert. Nach der Erstellung und Auswahl eines Vorentwurfes folgt die Detaillierung des gesamten Produkts. Hierbei erfolgt die Dimensionierung und Auslegung sowie die Festlegung der finalen Bauteilgestalt.

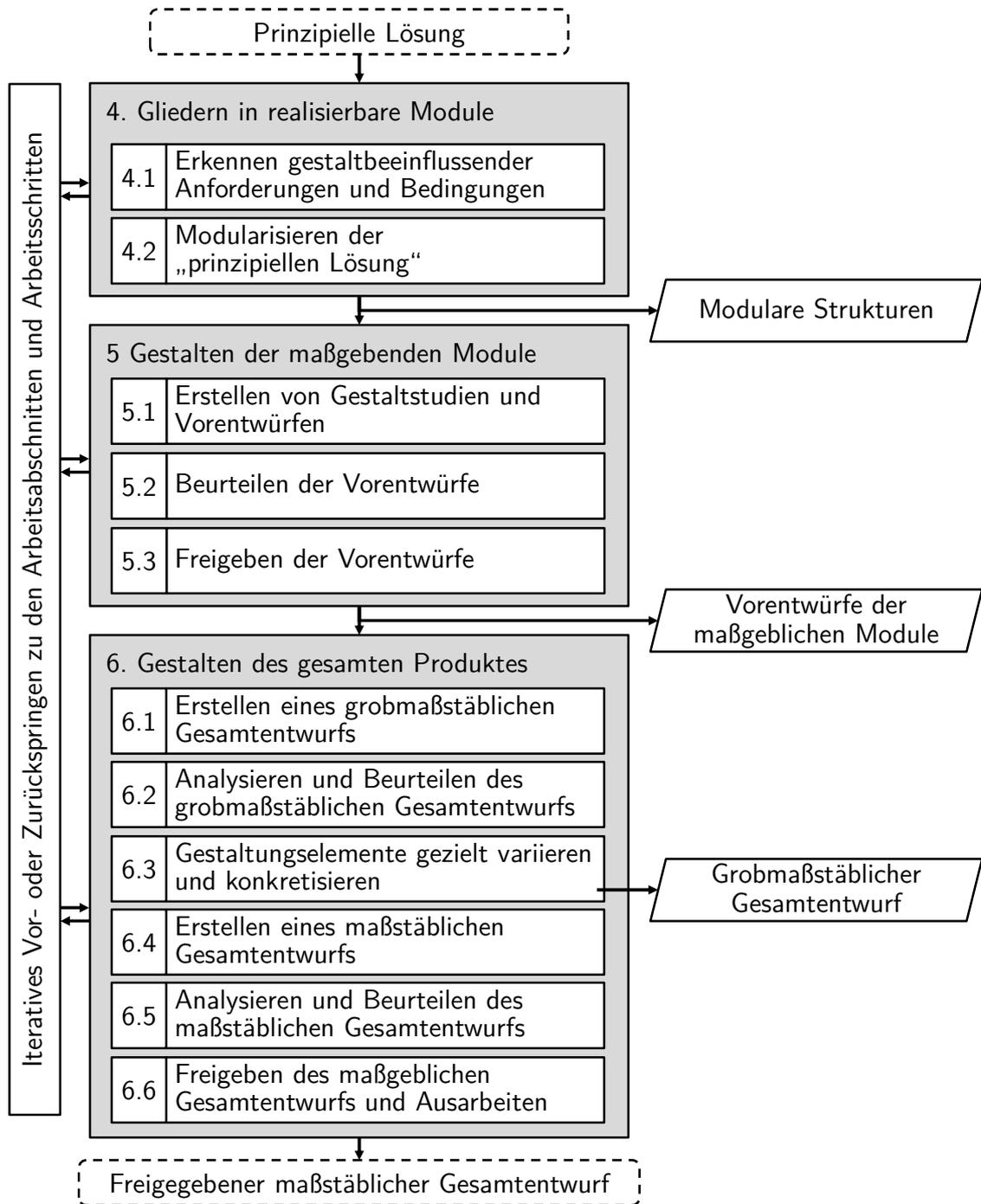


Abbildung 2.17: Generelles Vorgehen beim Gestalten nach [VDI2223]

2.3.1 Konstruktion und Optimierung

Die wesentliche Aufgabe von Strukturbauteilen (auch Strukturkomponenten) es ist, mechanische Energie aufzunehmen und weiterzuleiten [Scha11]. Die Gestalt eines Strukturbauteils ist durch die Orientierung und Größe der wirkenden Lasten geprägt. Die Krafteinleitung und -aufnahme erfolgt an den Wirkflächen eines Bauteils, welche durch Bauraumrestriktionen und

Schnittstellen definiert und vorgegeben sind. Wirkräume dienen der Verbindung der Wirkflächen zur beanspruchungsgerechten Weiterleitung mechanischer Energie. Variierende Orientierungen und Größen der wirkenden Kräfte führen zu unterschiedlichen Beanspruchungen, was wiederum unterschiedliche Gestaltungen erfordert [Roth00, Scha11, Feld13]. *Sauthoff* beschreibt ein Reifegradmodell und zeigt dabei den Einfluss einer Änderung von Lastfällen auf die Gestalt von Strukturbauteilen [Saut17].

Die auf ein Bauteil einwirkenden Lasten bewirken Schnittgrößen (Längs- und Querkräfte, Biege- und Drehmomente), welche Beanspruchungen des Bauteils hervorrufen. Die Beanspruchung ist definiert durch Normalspannungen (Zug- und Druckspannungen) und Schubspannungen (Scher- und Torsionsspannungen). Diese führen wiederum zu elastischen und plastischen Verformungen des Bauteils [Feld13]. Die Wirkräume von Strukturbauteilen sind nach dem Prinzip der Kraftleitung zu gestalten. Für eine beanspruchungsgerechte Auslegung wird dazu der Kraftfluss sinnbildlich als Leitung von Kräften, Biege- und Drehmomenten beschrieben. Die frühzeitige Abschätzung des Kraftflusses kann zur Verbesserung der Gestaltfestigkeit führen. Zum Verständnis des tatsächlichen Bauteilverhaltens muss neben der Betrachtung der Festigkeit das Verformungsverhalten analysiert werden. Das Prinzip der Kraftleitung gliedert sich in die folgenden Aspekte [Feld13, VDI2221]:

- **Prinzip der gleichen Gestaltfestigkeit:** Anstreben einer über die vorgesehene Betriebszeit überall gleich hohe Ausnutzung der Bauteilfestigkeit mittels geeigneter Wahl von Material und Form. Starke Kraftflussumlenkungen oder Änderungen der Kraftflussdichte führen zu einer ungleichmäßigen Beanspruchungsverteilung mit hohen Spannungsspitzen und sind demzufolge zu vermeiden [Thum44].
- **Prinzip der direkten und kurzen Kraftleitung:** Gestalten der Wirkräume zur Erzielung einer möglichst kleinen Verformung. Werden Wirkräume nicht entlang des Kraftflusses gestaltet, muss zusätzliches Material zur Erreichung der gleichen Verformung eingesetzt werden [Leye63].
- **Prinzip der abgestimmten Verformung:** Gestalten zur gleichgerichteten Verformung von Bauteilen bei einer möglichst kleinen Relativverformung unter den einwirkenden Lasten. Das Prinzip bezieht sich überwiegend auf Baugruppen und Verbindungen [Matt63].
- **Prinzip des Kraftausgleichs:** Unterscheiden zwischen funktionsbedingten Hauptkräften und begleitenden Nebengrößen. Funktionsbedingte Hauptkräfte (Kräfte und Momente) dienen maßgeblich der Erfüllung der Hauptfunktion. Begleitende Nebengrößen sind entstehende Kräfte und Momente, die unterstützend wirken oder zwangsläufig begleitend

auftreten. Diese sollten am Entstehungsort ausgeglichen werden, um einer Überdimensionierung des Bauteils entgegenzuwirken. Zur Bewältigung werden hauptsächlich symmetrische Anordnungen und Ausgleichselemente angewandt [Pahl67].

Im Sinne des Prinzips der Kraftleitung lassen sich Aussagen über die bevorzugte Gestalt eines Strukturbauteils in Abhängigkeit der einwirkenden Lasten ableiten. Dabei orientiert sich die Bauteilgestaltung an den durch die wirkenden Lasten verursachten Beanspruchungen [Hoen10]. Beispielsweise werden Biege- oder Torsionsbeanspruchungen in massiven Querschnitten vermieden, da keine gänzliche Materialausnutzung erfolgt und das Bauteil somit überdimensioniert ist. Stattdessen wird auf eine belastbare Randschicht und einen gelochten Kern zurückgegriffen [Klei11]. Zur Auslegung eines Strukturbauteils ist die Betrachtung der lokalen Festigkeit sowie der Verformung auf Basis der Steifigkeit als globale Bauteileigenschaft notwendig. Dabei sind sowohl statische als auch zeitlich variierende Belastungen zu berücksichtigen. Diese mechanischen Eigenschaften sind folgend definiert.

- **Steifigkeit:** Der Widerstand eines Bauteils gegenüber elastischer Verformung wird als Steifigkeit bezeichnet [Skol14]. Dabei sind das elastische Verhalten des verwendeten Materials sowie die Bauteilgeometrie maßgebend. Liegt eine definierte Belastungsart, wie Zug, Druck, Biegung oder Torsion vor, wird die Steifigkeit nur bezüglich der vorherrschenden Belastungsrichtung ermittelt. Folglich ist z.B. die Biegesteifigkeit relevant. Bei ruhenden Belastungen ist die statische Steifigkeit zu prüfen. Variieren jedoch die Belastungen über die Zeit, wird das Bauteil zum Schwingen angeregt und die dynamische Steifigkeit ist ausschlaggebend. Diese bezeichnet die Änderung der Steifigkeit in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz [Heiß17, Kutt15].
- **Verformung:** Das Einwirken von Kräften und Momenten auf mechanische Strukturen führt auf Basis der Steifigkeit zu einer bestimmten Verformung. In Abhängigkeit der Größe, Richtung und Orientierung der Kräfte und Momente wird die Verformung an jedem Punkt der Struktur beeinflusst. Im Unterschied zur Steifigkeit, die bei unterschiedlichen Belastungen gleich bleibt, hängt die Verformung vom jeweiligen Lastfall ab [Scha11].
- **Festigkeit:** Die aus der einwirkenden Last resultierende Verformung führt zu einer Beanspruchung in Form einer Spannungsverteilung, welche unter bestimmten Voraussetzungen zum Versagen des Bauteils führen kann. Die Spannungsverteilung wird von den Gestaltparametern unterschiedlich stark beeinflusst. Entsprechend entstehen Spannungskonzentrationen in lokalen Bereichen durch starke Kraftumlenkung, z.B. durch Kerbwirkung. Um eine Aussage über die Festigkeit zu erhalten, werden die Beanspruchungen im Bauteil mit den Materialgrenzwerten Zugfestigkeit, Fließgrenze, Dauer- und Betriebsfestigkeit usw. unter Beachtung von Kerbwirkung, Oberflächen- und Größeneinfluss nach Festigkeitshypothesen verglichen [Scha11, Feld13].

Strukturoptimierung

Die Strukturoptimierung ermöglicht die Anpassung der Materialverteilung eines Bauteils an dessen inneren Kraftfluss und dient als Entwicklungswerkzeug zum Lösen technischer Problemformulierungen mit unterschiedlichen Zielfunktionen. Diese Zielfunktionen können mit Hilfe eines Optimierungsansatzes minimiert oder maximiert werden. Bei der Optimierung von Strukturbauteilen kommen in der Praxis meistens die folgenden Zielfunktionen zur Anwendung: Minimierung des Gewichts, Maximierung der Steifigkeit, Minimierung der Verformung, Maximierung der Eigenfrequenz oder Maximierung der Lebensdauer [Schu05, Ottn09, Wart13]. In der Strukturoptimierung werden die vom Optimierer veränderbaren Größen häufig als Designvariablen definiert.

Bezogen auf das Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile bestehen unterschiedliche Klassifizierungen der Strukturoptimierungsprobleme. Wie in Abbildung 2.18 dargestellt, werden diese nach der Art der Entwurfsvariablen unterschieden, welche die anzuwendende Lösungsstrategie vorgeben [Schm63]. Neben der grundsätzlichen Entscheidung über die Bauweise oder das verwendete Material, kann die Topologieoptimierung, Formoptimierung oder Dimensionierung eines Bauteils herangezogen werden [Schu05]. Bei der Dimensionierung werden als Entwurfsvariablen Wanddicken und Querschnittsgrößen behandelt. Bei der Formoptimierung beschreiben die Entwurfsvariablen die Form des Bauteilrandes, also die Bauteilhülle, sodass die Geometrie des Bauteils durchaus verändert werden kann. Das Einbringen neuer Strukturelemente, wie Hohlräume oder Streben, ist ausgeschlossen. Mit dem größten Änderungsumfang beschreiben die Entwurfsvariablen bei der Topologieoptimierung die Lage und Anordnung von Strukturelementen [Schu05].

Zur Ausnutzung der Gestaltungsmöglichkeiten des Selektiven Laserstrahlschmelzens bietet besonders die Topologieoptimierung großes Potential, da kraftflussangepasste Geometrien resultieren, die aufgrund des hohen Freiformanteils konventionell schwierig herzustellen sind [Schu05]. Als rechnerunterstütztes Berechnungsverfahren ermöglicht die Topologieoptimierung die Beschreibung einer günstigen Grundgestalt (Topologie) für mechanisch belastete Bauteile. Ein Bauraum stellt als Eingangsgröße den maximal zur Verfügung stehenden Raum für das zu entwickelnde Bauteil dar. Im Ergebnis der Topologieoptimierung wird beschrieben, welche Bereiche im Bauraum mit Material belegt werden sollten. Die zugrunde liegende Bestimmung der Beanspruchungsverteilung im Bauraum wird üblicherweise mit der Finite-Element-Methode durchgeführt [Bend04].

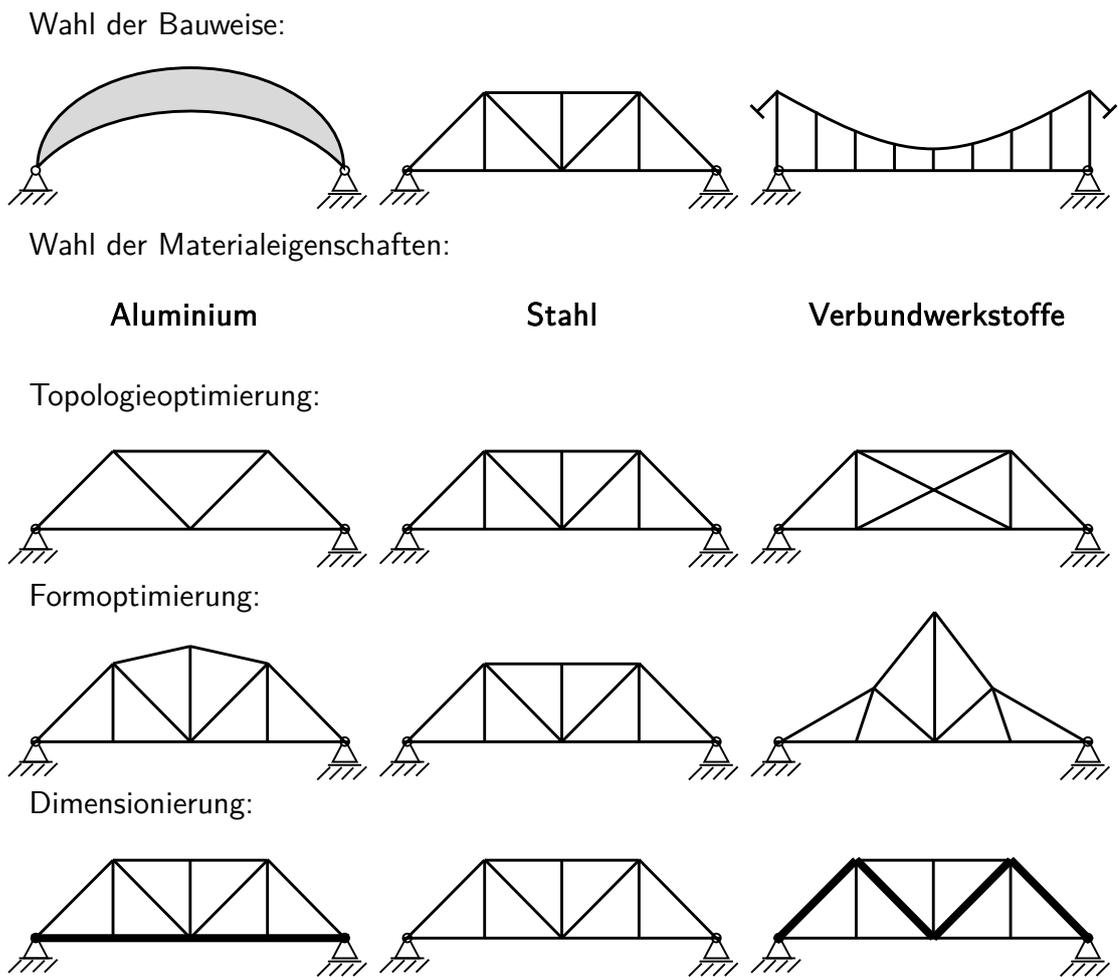


Abbildung 2.18: Klassifizierung von Strukturoptimierungsproblemen nach [Schu05]

Die Ergebnisse der Topologieoptimierung müssen aufbereitet werden, weshalb explizit von einem Designvorschlag gesprochen wird. Im Sinne einer effizienten Produktentwicklung ist dabei die Berücksichtigung unterschiedlicher Restriktionen für den Erfolg der Optimierungsmethode von hoher Relevanz. Hinsichtlich einer wirtschaftlichen Entwicklung ist beispielsweise die Einbeziehung von Fertigungsrestriktionen, wie die Entformbarkeit bei Gussbauteilen, notwendig. Die Umsetzung etwaiger Anforderungen gestaltet sich unterschiedlich schwer, da eine mathematische Formulierung der Restriktion notwendig ist. Beispielsweise kann die Symmetrie eines Bauteils mathematisch einfach ausgedrückt werden. Hingegen muss die Anforderung für eine fertigungsgerechte Gestalt durch einzelne Attribute, wie z.B. Wandstärken oder Hinterschnitte, angenähert werden [Ott09].

Durch die Festlegung einer Synthese aus verschiedenen Anforderungen resultiert meist eine Abweichung zum ermittelten Vorschlag, sodass gewisse Einbußen akzeptiert werden müssen [Ott09]. Bei der Verwendung des Selektiven Laserstrahlschmelzens können die Limitationen aus dem Fertigungsverfahren reduziert werden, sodass die finale Geometrie näher an den Designvorschlag angepasst werden kann.

In Bezug auf innere Strukturen ermöglicht die Topologieoptimierung die Charakterisierung poröser Materialien, indem jedem finiten Element eine Dichte zugewiesen wird. Durch die Entscheidung über die Notwendigkeit für jedes Element kann vom Optimierer eine stochastische Struktur ausgegeben werden, welche eine Dichteverteilung des Bauteils auf makroskopischer Ebene darstellt. Innere Strukturen können folglich als Skala der Topologieoptimierung betrachtet werden, bei der ein makroskopisch inhomogenes Material beschrieben wird.

2.3.2 Leichtbaukonstruktionen

Zielsetzung der Leichtbaukonstruktion ist die Erfüllung extremer Bedingungen mit möglichst einfachen Mitteln. Dabei soll das Eigengewicht unter Berücksichtigung ausreichender Steifigkeit, Stabilität und gegebenenfalls gutmütigem Schwingungsverhalten minimiert werden. Hieraus leiten sich Fragestellungen bezüglich der Krafteinleitung, Verbindungstechnik, Spannungsverteilung, Lebensdauer, etc. ab [Klei11].

Leichtbaukonstruktionen orientieren sich oftmals an Analogien aus der Natur. Grund hierfür sind Prinzipien, welche während der Evolution von Lebewesen und Pflanzen auftreten. Biologische Gebilde entstehen stets mit möglichst geringster Energie, sind massearm sowie langlebig [Meng60, Klei11]. Das Axiom der gleichmäßigen Oberflächenspannung in der Natur beschreibt das Grundprinzip, die körpereigene Masse vorrangig dort anwachsen zu lassen, wo die größte Belastung auftritt. Materialabnahme findet dagegen in Bereichen mit geringer Belastung statt. So treten Bauprinzipien vielfach als dünnwandige, profilierte Stabprofile, geschlossene Rohre oder gefächerte, verrippte und gelochte Flächentragwerke auf [Wied84].

In Anlehnung an beanspruchungsgerechtes Konstruieren nach *Jorden* und den allgemeinen Gestaltungsprinzipien (siehe Abschnitt 2.3.1) definiert *Klein* acht Regeln für ein abgestimmtes, leichtbaugerechtes Konstruieren [Scha63, Jord86, Pahl07, Klei11]. Die in Tabelle 2.1 dargestellten Regeln sind allgemeingültig und unabhängig vom Fertigungsverfahren bei Leichtbaukonstruktionen anwendbar.

Tabelle 2.1: Regeln für ein abgestimmtes, leichtbaugerechtes Konstruieren nach [Klei11]

#	Beschreibung
1.	Direkte Krafteinleitung und Kraftausgleich: Einleiten der Kräfte in die Hauptträgerstruktur. Umleitungen und Umlenkungen führen zur Überdimensionierung und der Erhöhung des Eigengewichts.
2.	Realisierung möglichst großer Flächenträgheits- bzw. Widerstandsmomente: Umsetzung großer Flächenträgheitsmomente bei möglichst kleiner Fläche für biege-, torsions- und knickgefährdete Bauteile.
3.	Feingliederung von Strukturen: Versteifung von Flächentragwerken bei kleiner Querschnittsfläche durch eine aufgelockerte Bauweise.
4.	Nutzung von natürlicher Stützwirkung durch Krümmung: Biege-, Knick- und Beul-Steifigkeit von geraden Scheiben und Platten kann durch Vorkrümmung um ein Vielfaches erhöht werden.
5.	Gezielte Versteifung von Konstruktionen in den Hauptbelastungsrichtungen: Einbringen von Ortho- oder Anisotropie kann die Steifigkeit eines Bauteils in bestimmten Vorzugsrichtungen anheben.
6.	Bevorzugen des integrativen Prinzips: Verwenden von so wenigen Einzelteilen wie möglich.
7.	Einbringen von Hohlräumen: Einbringen von „Erleichterungslöchern“ in gering belastete Zonen zur Reduzierung des Eigengewichts bei gleicher Steifigkeit.
8.	Absolute Ausnutzung einer Konstruktion: In Frage stellen überzogener Sicherheitsbegriffe unter Voraussetzung der Kenntnis über exakte Kräfte, Materialverhalten, genauer Berechnungsmethoden und optimierter Geometrien.

Klein beschreibt weiterhin eine Vorgehensweise für leichtbaugerechtes Konstruieren durch das systematische Einbeziehen der acht Regeln. Wie in Abbildung 2.19 dargestellt, unterscheidet er die Arbeitsschritte Klären der Randbedingungen, Konzeptfindung, Umsetzen in Entwürfen und Ausarbeiten von Fertigungsunterlagen [Klei11]. Dabei definiert *Klein* die Eingangsgrößen

und Ergebnisse eines Arbeitsschrittes. Die systematische Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens orientiert sich an den zentralen Bestandteilen der Entwurfsphase des allgemeinen Entwicklungsprozesses nach *VDI-Richtlinie 2221* sowie dem generellen Vorgehen beim Gestalten nach *VDI-Richtlinie 2223* [VDI2221, VDI2223]. Weiterhin dient eine nachgelagerte Prototypen-Fertigung und -Erprobung der Bauteiloptimierung.

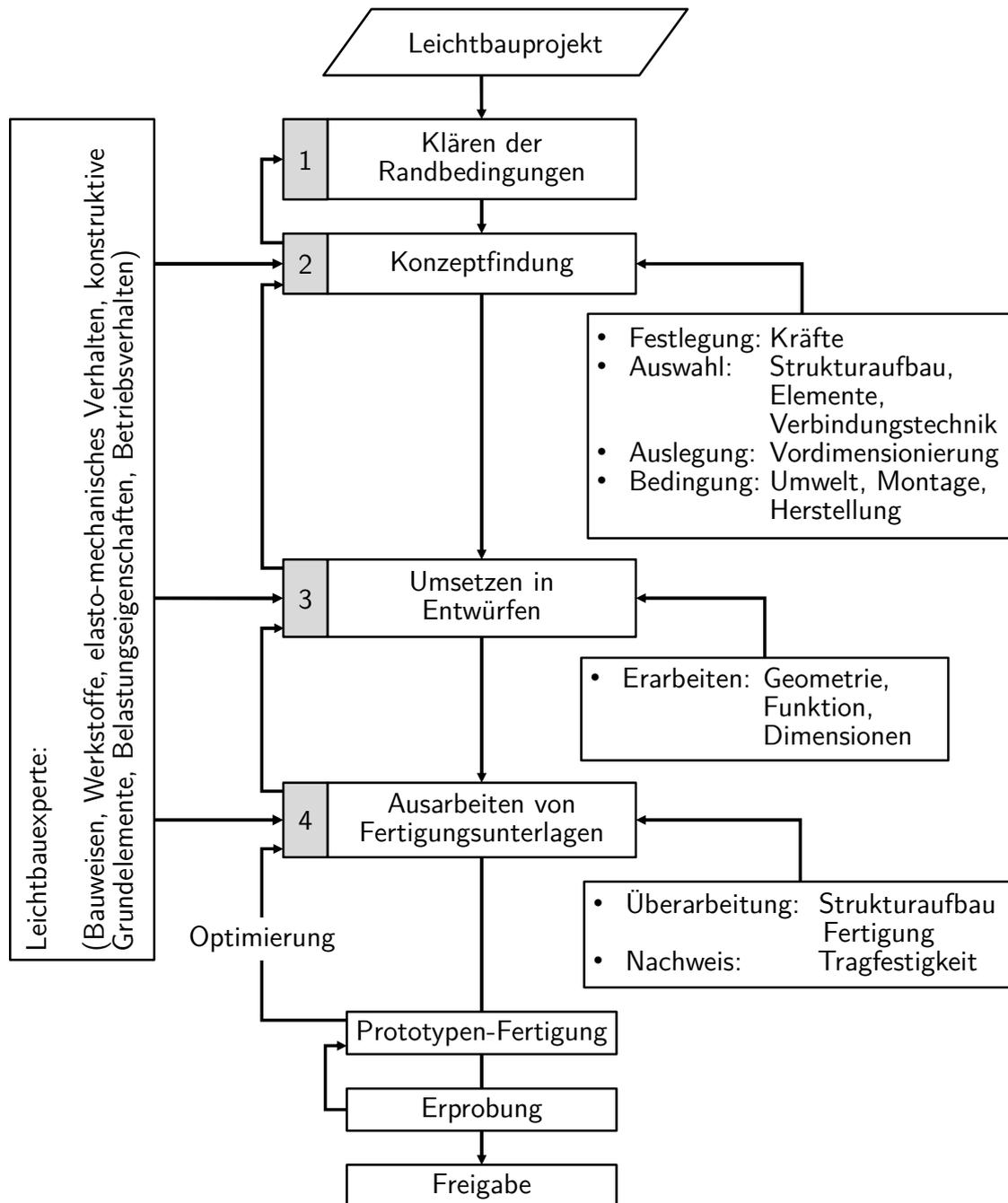


Abbildung 2.19: Systematische Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach [Klei11]

Das systematische Vorgehen des leichtbaugerechten Konstruierens nach *Klein* zielt explizit auf Strukturbauteile ab, indem Validierungsaspekte, wie z.B. Festigkeitsnachweise, adressiert werden. Analog zu jeglicher technischen Aufgabenstellung ist die Zielsetzung der Leichtbaukonstruktion eine vorgegebene Funktionserfüllung. Hingegen ist die stärkste Nebenbedingung die Umsetzung eines Gewichtsminimums, welches durch weitere Bedingungen, z.B. Sicherheit, Zuverlässigkeit, Herstellbarkeit oder Montierbarkeit, eingeschränkt wird. Durch die Fokussierung der Leichtbauaufgabe differenziert *Klein* die systematische Vorgehensweise vom generellen Vorgehen beim Gestalten nach *VDI-Richtlinie 2223*.

2.3.3 Restriktionsgerechtes Gestalten

Die restriktionsgerechte Gestaltung eines technischen Produkts impliziert, dass eine Vielzahl gestellter Anforderungen erfüllt und diese in entsprechende Produkteigenschaften umgesetzt werden [Koll94]. Die gestellten Anforderungen setzen sich aus marktbedingten, umwelt- und gesellschaftsbedingten, entstehungs- und nutzungsbedingten sowie eigenstörungsbedingten Einflussfaktoren zusammen [Koll94]. Zur Überführung dieser Anforderungen in einen Produktentwurf sind Grundsätze beim Entwerfen eines technischen Produkts zu berücksichtigen [Conr13]. Diese Grundsätze dienen der Unterstützung des Konstrukteurs, um bereits in frühen Entwicklungsphasen den Restriktionen aus dem Lebenszyklus zu entsprechen [VDI2223]. Wie in Abbildung 2.20 dargestellt, sind diese Grundsätze vom Allgemeinen ins Spezifische anzuwenden. Im Folgenden sind die Grundsätze definiert.

- **Allgemeine Konstruktionsgrundsätze:** Beschreiben branchen- und fachgebietsspezifische Erfahrungen, wie beispielsweise aus der Automobil-, Luftfahrt- oder Medizinbranche. Diese Grundsätze sind meist in Form von Anforderungskatalogen dargelegt [Conr13].
- **Gestaltungsregeln:** Beschreiben den grundsätzlichen Aufbau des Entwurfs. So ist der Gestaltungsprozess auf eine einfache, eindeutige und sichere Lösung auszurichten [Roth00].
- **Gestaltungsprinzipien:** Dienen zur zweckmäßigen Gestaltung von Konstruktionen. Gestaltungsprinzipien sind nur unter bestimmten Voraussetzungen zweckmäßig und nicht immer total anwendbar. Beim Aufbau eines Gesamtentwurfs ist zwischen den einzelnen konkurrierenden Gesichtspunkten abzuwägen und eine entsprechende Auswahl zu treffen [Beit97, Pahl07]. Wichtige Prinzipien sind das Prinzip der Kraftleitung, das Prinzip der Aufgabenteilung, das Prinzip der Selbsthilfe, das Prinzip der Stabilität und Bistabilität oder das Prinzip der fehlerarmen Gestaltung [Beit97].

- **Gestaltungsrichtlinien:** Decken Restriktionen aus Lebenszyklusphasen ab, indem einzuhaltende Grenzwerte für den Entwurfsprozess definiert werden. So kann der Entwurf z.B. fertigungs-, prüf-, sicherheits-, korrosions-, festigkeits-, montage-, ergonomie- oder recyclinggerecht aufgebaut werden. Zielsetzung ist eine möglichst breite Abdeckung vieler Lebenszyklusphasen. Dabei sind Gestaltungsrichtlinien stark von den individuellen Anforderungen der Aufgabe abhängig und können nicht einheitlich und generalisiert für alle Entwicklungen herangezogen werden [Feld13, Fran16].

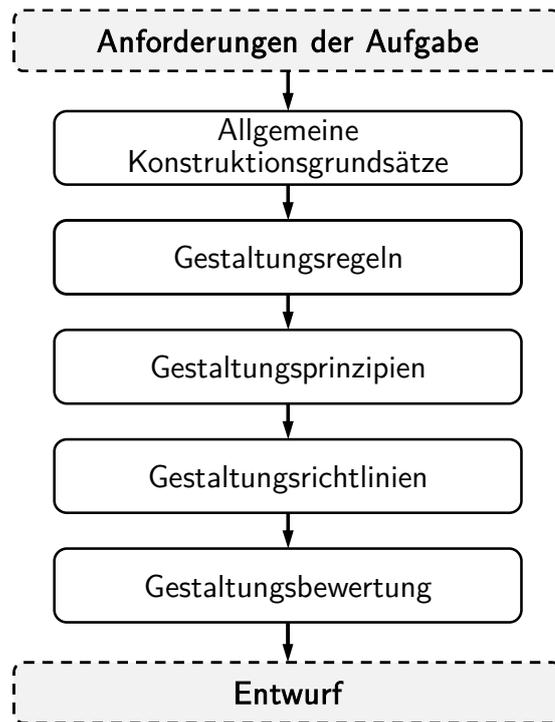


Abbildung 2.20: Grundsätze des Entwerfens nach [Conr13]

International wird Design for Excellence (DfX) als Synonym für Gestaltungsrichtlinien eingesetzt [Feld13]. In der methodischen Produktentwicklung hat sich das DfX-Konzept etabliert, um spezifische Aspekte aus dem Produktlebenszyklus bereits in frühen Entwicklungsphasen zu berücksichtigen [Hepp13]. Dieser Konstruktionsansatz dient zur Steigerung der Kundenzufriedenheit, indem die Bauteilqualität erhöht und Lebenszykluskosten reduziert werden sollen [Bral95]. Das X steht für eine beliebige Phase im Produktlebenszyklus, wie beispielsweise der Herstellung, Montage, Nutzung oder dem Recycling, sodass zahlreiche Zielsetzungen adressiert werden können [Bral98, Moll98].

1958 wurde der erste DfX-Ansatz mit Ausrichtung auf die Herstellung von Produkten beschrieben. Dabei wurde die Relevanz von Fertigungswissen bei der Produktgestaltung adressiert [Bolz58]. In den 1960er Jahren wurde DfX erstmals durch die Kombination mehrerer Produktlebensphasen charakterisiert. Es erfolgte eine strukturierte Aufarbeitung des Design

for Manufacturing and Assembly [Boot96, Boot02]. Davon abgeleitete Ansätze, wie beispielsweise Design for Usability (DfU) für eine benutzerfreundliche und intuitive Konstruktion oder Design for Costs (DfC) zur kostengerechten Konstruktion, sind weiterhin beschrieben [Huan96, Gram13]. Exemplarisch ist beim Design for Recycling (DfR) auf die Verwendung von umweltfreundlichen Materialien, der Trennbarkeit von hybriden Materialien oder der Einhaltung von gesetzlichen Regularien (z.B. Restriction of Hazardous Substances) zu achten. Da Produkte die Anforderungen des Marktes, der Gesetzgebung und des Unternehmens erfüllen sollen, ist die Umsetzung einer maximalen Anzahl von simultanen Zielsetzungen anzustreben. Die Herausforderungen bei der Erfüllung des sogenannten Design for multi-X ist es, zentrale und indirekte Wechselwirkungen zwischen den Richtlinien zu identifizieren [Baue06], denn verschiedene Richtlinien beeinflussen teilweise gleiche Produkteigenschaften. Zudem können Wechselwirkungen zwischen Lebenszyklusphasen auftreten, wenn eine DfX-Richtlinie mehrere Phasen adressiert [Hepp13].

2.4 Gestalten für Selektives Laserstrahlschmelzen

Zur Ausnutzung der Freiheitsgrade des Selektiven Laserstrahlschmelzens ist – analog zu konventionellen Fertigungsverfahren – eine auf das Fertigungsverfahren angepasste Bauteilgestaltung notwendig. Vor diesem Hintergrund ist es nachvollziehbar, dass die Fertigung eines konventionell gestalteten Bauteils im Selektiven Laserstrahlschmelzen oftmals keinen Mehrwert bringt. Auch die Anpassung einer bestehenden Konstruktion durch die Anwendung von Fertigungsrestriktionen schöpft das Gestaltungspotential nicht aus. Vielmehr müssen neue Gestaltungsmethoden eng verzahnt mit den geänderten Fertigungsrestriktionen Anwendung finden [Lach17].

Thomas quantifiziert diese Aussage und schätzt, dass 90 % aller Bauteile aus ökonomischer Sicht nicht für das Selektive Laserstrahlschmelzen geeignet sind. Für die restlichen 10 % beschreibt er weiterhin, dass Selektives Laserstrahlschmelzen meistens nur zufällig wirtschaftlich eingesetzt werden kann. Oftmals erfolgt die unveränderte Fertigung komplizierter Bauteile im Selektiven Laserstrahlschmelzen, die bislang mit hohem Aufwand konventionell hergestellt wurden [Thom09].

2.4.1 Gestaltungsziele

Selektives Laserstrahlschmelzen findet dort Einsatz, wo konventionelle Fertigungsverfahren an technische und wirtschaftliche Grenzen stoßen [Fast12]. In einer Vielzahl von Arbeiten wird dieser Mehrwert untersucht. Dabei werden Aspekte, wie z.B. die Schaffung neuer Geschäftsmodelle, die Kostenreduktion bei zunehmender Bauteilkompliziertheit oder die Ressourcenersparnis, adressiert [Pets14, Wagn17, Feld17, Lach15a]. *Buchmayr et al.* beschreiben eine Zusammenfassung der Stärken, Schwächen, Chancen und Herausforderungen des Selektiven Laserstrahlschmelzens [Buch14]. In weiteren Arbeiten werden einzelne Gestaltungspotentiale charakterisiert, um Hilfsmittel für Konstrukteure bereitzustellen [Lach15b].

Hague et al. beschreiben erstmals die Auswirkungen der additiven Fertigung auf die Produktgestaltung. Die Gestaltpotentiale werden hinsichtlich einer besserer Produktperformance, der Kostenreduktion durch substituierte Montageschritte oder der Umsetzung innovativer Designelemente beschrieben [Hagu03, Hagu04].

Becker et al. beschreiben eine Liste genereller Gestaltungsvorschläge und beziehen sich auf das Potential der Funktionsintegration und Bauteilzusammenführung [Beck05]. Auch *Burton* zielt auf die Bauteilzusammenführung durch die additive Fertigung und beschreibt ein Hilfsmittel zum Wissenstransfer für Konstrukteure [Burt05].

Weitere Arbeiten zeigen die Gestaltungspotentiale der additiven Fertigung anhand konkreter Fallstudien. *Eyers und Dotchev* beschreiben das Beispiel der Produktindividualisierung von Medizinprodukten durch Mass Customization [Eyer10]. Auch *Petrovic et al.* beschreiben eine Fallstudie zur Ausnutzung der Gestaltungsfreiheiten additiver Fertigung. Dabei wird das Gestaltungsziel von integrierten Kühlkanälen untersucht [Petr11].

Bin Maidin et al. beschreiben eine umfassende Datenbank mit Gestaltungselementen, um Konstrukteuren Vorschläge während der Bauteilgestaltung aufzuzeigen [Bin12]. *Dobrovski et al.* greifen diese Idee auf und zeigen ein Konzept für eine gemeinschaftlich editierbare Wissensdatenbank, analog zu einem Wiki-System [Doub12].

Die wissenschaftlichen Arbeiten zeigen, dass wiederholt gleiche oder ähnliche Gestaltungspotentiale in Bezug zum Selektiven Laserstrahlschmelzen diskutiert werden. Wie in Tabelle 2.2 dargestellt, können diese anhand von acht Gestaltungszielen zusammengefasst werden [Lipp16a, Lipp16c]. Um einen technisch sinnvollen und wirtschaftlichen Einsatz des Selektiven Laserstrahlschmelzens sicherzustellen, ist die Erfüllung mehrerer Gestaltungsziele anzustreben.

Tabelle 2.2: Gestaltungsziele für Selektives Laserstrahlschmelzen

#	Gestaltungsziel	Beschreibung
1.	Materialersparnis	Reduzierung des Materialeinsatzes sowie Ressourceneinsparung durch Erhöhung der Materialausnutzung.
2.	Funktionsintegration	Umsetzung einer möglichst großen Anzahl technischer Funktionen durch einen minimalen Einsatz an Bauteilen.
3.	Dünnwandigkeit	Einsatz von dünnwandigen und filigranen Geometrien zur Reduzierung des Gewichts bei konstanten Rahmenbedingungen.
4.	Kraftflussanpassung	Materialanordnung entsprechend der Beanspruchungen zur Gewichtsreduktion oder Verbesserung der mechanischen Bauteileigenschaften.
5.	Integrierte Kanäle	Verwendung von innenliegenden Kanälen für die Erfüllung spezifischer Anwendungen, wie die Durchströmung mit Flüssigkeiten oder die Integration von Kabelführung.
6.	Mass Customization	Adaption eines Bauteils an spezifische Kundenanforderungen durch individuelle Lösungen oder der Einbeziehung des Kunden in den Produktentwicklungsprozess.
7.	Design	Umsetzung von Freiformflächen sowie Erhöhung der Ergonomie und Nutzbarkeit eines Bauteils.
8.	Net-Shape Geometrien	Umsetzung von vordefinierten, komplizierten Fertigteilflächen auf Basis von Simulationsergebnissen, wie z.B. strömungsoptimierte Flächen oder Lichtverteilungen.

Weiterhin kann die umfassende Erfüllung eines Attributes ein Alleinstellungsmerkmal des Selektiven Laserstrahlschmelzens darstellen. Für das Beispiel von integrierten Kanäle wird deutlich, dass besonders Geometrien zur konturnahen Kühlung nur additiv gefertigt werden können, da subtraktive und formative Verfahren nicht die notwendige Gestaltungsfreiheit ermöglichen. Die konsequente Optimierung integrierter Kühlkanäle fordert somit oftmals die Fertigung durch Selektives Laserstrahlschmelzen.

2.4.2 Gestaltungsrichtlinien

Fertigungsspezifische Gestaltungsrichtlinien, wie im Folgenden für Selektives Laserstrahlschmelzen dargestellt, beschreiben notwendige Maßnahmen im Gestaltungsprozess, um die Herstellbarkeit von Bauteilen sicherzustellen [Bors07]. Ziel ist die Kompensation der Schwächen des Fertigungsverfahrens durch eine entsprechende Bauteilgestaltung [Feld13]. Dazu sind Material- und Prozessrestriktionen zu analysieren und in Form von Gestaltungsrichtlinien aufzubereiten, welche anschließend im Gestaltungsprozess eingesetzt werden. Damit das zu fertigende Bauteil die Teilprozesse der Fertigung ohne Qualitätsverluste durchlaufen kann, müssen verfahrensspezifischen Charakteristiken bereits in frühen Entwicklungsphasen bekannt sein [Koll94]. Für eine möglichst umfassende Abdeckung sind Charakteristiken aller Teilprozesse des Pre-, In- und Post-Prozesses zu betrachten [Roth00]. Exemplarisch muss für die Nachbearbeitung eines laserstrahlgeschmolzenen Bauteils berücksichtigt werden, welche Produkteigenschaften direkt erzielt werden können und welche eine weitere Bearbeitung, z.B. Spanen, voraussetzen. Auch vorangegangene Fertigungsverfahren haben einen Einfluss auf die Ausprägung von Gestaltungsrichtlinien. Am Beispiel der Pulverbeschaffenheit zeigen gas- und wasserverdünnte Materialien unterschiedliche Auswirkungen auf das Oxidationsverhalten im In-Prozess [Matt16].

Die Erarbeitung von Gestaltungsrichtlinien basiert meist auf empirischen Untersuchungen und statistischer Auswertung der Versuchsreihen. Ziel ist die Verallgemeinerung möglichst konkreter Minimal- und Maximalwerte zur Anpassung der Gestaltparameter. Da die Generalisierung durch eine mathematische Beschreibung teilweise nicht möglich ist, werden ebenfalls Beispiele für gute und schlechte Umsetzungen zur Übertragung auf individuelle Problemstellungen beschrieben [Thom09, Feld13]. Die gesammelten Informationen werden meist in tabellarischer Form, beispielsweise durch den Einsatz von Checklisten oder Katalogen, dargestellt [Bors07]. Untersuchungen zeigen, dass die Darstellung einen maßgebenden Einfluss auf die Nutzbarkeit für Konstrukteure hat [Thom09].

Im Zuge dessen befassen sich wissenschaftliche Arbeiten mit der Bereitstellung von Gestaltungsrichtlinien für Rapid Prototyping und Rapid Tooling oder beschreiben verfahrensspezifische Restriktionen und deren Konsequenzen für die Konstruktion von Bauteilen mit additiven Fertigungsverfahren [Tren00, Zaeh06, Hoch08]. Weiterhin bestehen Ansätze zur Erarbeitung von Gestaltungsrichtlinien am Beispiel konkreter additiver Fertigungsverfahren, wie z.B. dem

Fused Deposition Modeling [Grze09, Thom09]. Neben der Erarbeitung von Richtlinien befassen sich weitere Arbeiten mit der Informationsaufbereitung und -darstellung [Kumk16].

Auch für Selektives Laserstrahlschmelzen werden Gestaltungsrichtlinien partiell untersucht [Wart10, Vayr12]. Diese reichen von generellen Handlungsempfehlungen, welche bei allen additiven Fertigungsverfahren eingesetzt werden können, bis hin zu maschinen- und material-spezifischen Richtlinien.

Zimmer und Adam beschreiben den Aufbau von Richtlinien anhand der Modellierung, Herstellung und Untersuchung von geometrischen Grundkörpern [Zimm11a]. Die Grundlage bilden Standardelemente, die von einfachen Geometrien (z.B. Wände oder Zylinder) über aggregierte Strukturen bis zu zusammengesetzten Baugruppen reichen [Zimm11b]. Nach einer Qualitätsprüfung, beispielsweise hinsichtlich der Maß- oder Rundheitsabweichung, werden Gestaltungsrichtlinien abgeleitet. In Konstruktionskatalogen werden die aufgestellten Gestaltungsrichtlinien für Fused Deposition Modeling, Selektives Lasersintern und Selektives Laserstrahlschmelzen spezifiziert [Adam14].

Der *Verein Deutscher Ingenieure* definiert Konstruktionsempfehlungen mit geeigneten bzw. ungeeigneten Gestaltungsmöglichkeiten für Selektives Laserstrahlschmelzen. Das Regelwerk zeigt restriktionsgerechte Bauteilgestaltungen unter Ausnutzung der verfahrensspezifischen Vorteile, wie beispielsweise zur Gestaltung von innenliegenden Fluidkanälen unter Berücksichtigung der Bauteilorientierung. Anstelle konkreter Zahlenwerte zeigt die Richtlinie Ansätze zur Übertragung auf individuelle Problemstellungen. Ein Beispiel ist die Gestaltung von Kühlkanälen auf Basis der Konstruktion einer Kanalplatte [VDI3405-3].

Emmelmann beschreibt Designrichtlinien für die laseradditive Fertigung, wie beispielsweise zur optimalen Orientierung von Bohrungen im Bauraum zur Erhöhung der Maßhaltigkeit. Diese werden in einem Richtlinienkatalog zusammengefasst, in welchem die Designrichtlinien strukturiert sowie anhand von Piktogrammen erläutert werden [Emme14]. Weiterhin werden die Designrichtlinien für die Titanlegierung TiAl6V4 zur Herstellung von Leichtbaugeometrien konkretisiert [Kran15].

Witt beschreibt Gestaltungsrichtlinien in Bezug auf spezifische Materialien. Anhand von Selektivem Lasersintern werden die Abhängigkeiten der Prozessparameter und der Bauteileigenschaften untersucht und in Konstruktionsregeln zusammengefasst [Wegn12a, Wegn12b]. Auch *Gerber et al.* untersuchen die Restriktionen des Selektiven Lasersinterns hinsichtlich geometrischen Merkmalen [Gerb08].

Neben materialspezifischen Untersuchungen sind weiterhin maschinenspezifische Gestaltungsrichtlinien vorhanden. Die *EOS GmbH* zeigt beispielsweise Basis Designrichtlinien für Selektives Lasersintern im Umgang mit dem eigenen Produktsortiment [Eos17].

Abbildung 2.21 zeigt eine Literaturübersicht von Gestaltungsrichtlinien für pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren und ordnet diese anhand der diskutierten Kriterien ein.

	Metall	Kunststoff	Maschinenspezifisch	Konkrete Werte	Beispiele für gute/ schlechte Umsetzung
x – Erfüllung eines Kriteriums (x) – Teilweise Erfüllung eines Kriteriums					
Gerber und Barnard (2008)		x	x	x	
Hochschule Bremen (2008)		x	x		x
Thomas (2009)	x		x	x	(x)
Gresiak et al. (2009)		x			x
Wartzack et al. (2010)		x			x
Wegner und Witt (2012)		x		x	
Vayre et al. (2012)	(x)	(x)			(x)
Empa (2012)	x		(x)	(x)	x
Seepersat et al. (2014)		x	x	x	
Adam und Zimmer (2014)	x	x		x	
Emmelmann und Kranz (2015)	x		(x)	(x)	x
VDI 3405 (2015)	x	x			x
Crucible Design (2015)	x		x	(x)	x
EOS GmbH (2017)		x	x	x	x

Abbildung 2.21: Literaturübersicht von Gestaltungsrichtlinien für pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren

Die dargestellte Literatur ist eine Auswahl der meist zitierten Arbeiten im Bereich des restriktionsgerechten Gestaltens für Selektives Laserstrahlschmelzen. Dabei ist hervorzuheben, dass die Arbeiten auf unterschiedlichen Materialien basieren, welche wiederum auf unterschiedlichen Anlagen verarbeitet wurden.

Die Literaturübersicht zeigt, dass bei maschinenspezifischen Arbeiten konkrete Werte angegeben werden können. Werden Gestaltungsrichtlinien maschinenübergreifend dargestellt, ist fast ausschließlich die Darstellung von guten bzw. schlechten Umsetzungsbeispielen möglich. Einzig durch die detaillierte Angabe des Maschinen-Setups können maschinenübergreifende Gestaltungsrichtlinien angegeben werden. Dennoch entstehen im Ergebnis Wertebereiche der einzelnen Attribute, welche für die konkrete Anwendung angepasst werden müssen.

2.4.3 Methoden und Werkzeuge

Seit der Etablierung von additiven Fertigungsverfahren im industriellen Kontext ist die Relevanz von Gestaltungshilfsmitteln gestiegen [Wats16]. Verglichen mit der Herstellung von Mustern und Prototypen, bei welchen Gestaltungsansätze anderer Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen, fordert die zunehmende Bedeutung des Direct Manufacturing gänzlich neue Ansätze.

Im Folgenden werden Gestaltungsmethoden und -werkzeuge für Selektives Laserstrahlschmelzen vorgestellt. Entsprechend der Definition von *Lindemann* werden dabei Vorgehensmodelle, Methoden und Werkzeuge unterschieden [Lind09]. Vorgehensmodelle bilden relevante Elemente einer Handlungsfolge ab, die zum Planen und Kontrollieren von Prozessen dienen können. Methoden kennzeichnen ein planmäßiges, regelbasiertes Vorgehen, das Tätigkeiten vorgibt, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Methodik beschreibt das Zusammenwirken verschiedener Einzelmethoden. Werkzeuge unterstützen die Anwendung von Methoden und die Erstellung von Modellen [Lind09]. Basierend auf den Gestaltungszielen aus Abschnitt 2.4.1 werden Methoden zur Produktgestaltung dargestellt, die der Überführung einer Aufgabe in einen Bauteilentwurf dienen. Ferner werden Rechnerwerkzeuge zum Gestalten von gewichtsoptimierten Strukturbauteilen diskutiert.

Methoden

Tuck et al. beschreiben eine Methode zur Individualisierung von Produkten aus der Luft- und Raumfahrt. Durch den Einsatz von 3D-Scannern, dem Reverse Engineering und der additiven Fertigung wird am Beispiel von Flugzeugsitzen die Methode validiert [Tuck08].

Rodrigue und Rivette beschreiben einen Prozess zur Bauteilzusammenlegung unter Berücksichtigung verschiedener Möglichkeiten der Funktionsoptimierung [Rodr10]. Auch *Yang und Zhao* beschreiben einen Gestaltungsprozess. Betrachtet werden die Funktionsintegration und Strukturoptimierung auf Basis eines konventionellen Ausgangsmodells [Yang15].

Anstelle der Verwendung konventioneller Ausgangsmodelle, zeigen *Ponche et al.* eine Methode zur Gestaltung eines Bauteils auf Basis funktionaler Anforderungen und Prozessrestriktionen [Ponc12]. Darauf aufbauend beschreiben *Vayre et al.* und *Ponche et al.* eine dreigeteilte Methode zur Bauteiloptimierung durch Prozesssimulation. Dabei werden die Aspekte der Funktionsoptimierung, der Bauteilorientierung und der Pfadoptimierung berücksichtigt [Vayr12, Ponc14].

Basierend auf der simultanen Anwendung von konventionellen DFA und DFM Methoden beschreiben *Boyard et al.* eine Methode zur abstrakten Formulierung von funktionalen Anforderungen zum Loslösen der Bauteilgestaltung von konventionellen Fertigungsverfahren [Boya13].

Ko et al. beschreiben das Customized Design for Additive Manufacturing (CDFAM) zur formalen Darstellung von Gestaltungswissen. Durch die Finite State Automata Methode wird das Wissen formalisiert, um die Zusammenhänge zwischen Einschränkungen, Benutzerwünschen und -fähigkeiten sowie den benutzerdefinierten Funktionen des Produkts zu identifizieren [Ko15]. *Gruber et al.* formalisieren das Gestaltungswissen durch einen methodischen Unterstützungsansatz und spezialisieren diesen hinsichtlich der Topologieoptimierung als Ideeninspirator [Grub13].

Kumke et al. beschreiben ein methodisches Rahmenwerk auf Basis der *VDI-Richtlinie 2221* zur Gestaltung für die additive Fertigung. Dabei werden alle Entwicklungsphasen vom Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten durch geeignete Werkzeuge ergänzt. Dadurch wird das Loslösen von konventionellen Bauteilgestaltungen bereits in frühen Entwicklungsphasen adressiert [Kumk16, Kumk17].

Rias et al. beschreiben das Creative-DfAM, welches die frühen Entwicklungsphasen abdeckt. Dabei werden innovative Umsetzungen von Funktionen sowie die Rekonfiguration und Umsetzung unterschieden. Creative-DfAM beschreibt die Arbeitsschritte zur Exploration einer Vielzahl möglicher Ideen sowie die anschließende Eingrenzung zur Erzielung eines Produktkonzeptes [Rias16].

Rechnerwerkzeuge

Rechnerwerkzeuge dienen der Lösung spezifischer Problemstellungen durch gestaltbeeinflussende Maßnahmen [Webe11]. Ein oft adressiertes Werkzeug für additive Fertigungsverfahren ist die Topologieoptimierung. Durch die Anpassung der Materialverteilung an den Kraftfluss, entstehen Freiformgeometrien, welche konventionell oftmals nicht oder nur mit hohem Aufwand herstellbar sind.

An einem Fallbeispiel beschreiben *Watts und Hague* den Einsatz der Topologieoptimierung zur Nutzung der Gestaltungsfreiheit von additiven Fertigungsverfahren [Watt06]. Auch *Brüggemann et al.* beschreiben eine Fallstudie zur Topologieoptimierung mittels der Interpretation der Optimierungsergebnisse am Beispiel von Fahrradtretkurbelsystemen [Brue17]. *Brackett et al.* beschreiben die Chancen der Topologieoptimierung für die additive Fertigung. Zentrale Fragestellungen sind die Quantifizierung des erreichbaren Mehrwerts sowie die Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen während der Optimierung [Brac11].

Leary et al. beschreibt die Verknüpfung von Gestaltungsrichtlinien und der Topologieoptimierung. Am Beispiel eines zweidimensionalen Biegebalkens wird die Modifizierung der Optimierung zur Vermeidung von Stützstrukturen in Verbindung mit einer optimaler Bauteilorientierung und maximaler Gewichtsreduktion dargestellt [Lear14]. *Li et al.* beschreiben ähnliche Untersuchungen zur Vermeidung von Stützstrukturen bei der Topologieoptimierung [Li16].

Emmelmann und Kranz beschreiben einen Prozess in Anlehnung an die *VDI-Richtlinie 2221* zur Einbeziehung der Topologieoptimierung in den Gestaltungsprozess für bionische Leichtbau-Konstruktionen. Der rechnerunterstützten Optimierung ist eine Interpretationsphase nachgelagert, in welcher die Ergebnisse der Topologieoptimierung anhand von Bionik-Elementen nachempfunden werden [Emme11, Emme14b].

Mit einem ähnlichen Ansatz wie die Topologieoptimierung erlangen innere Strukturen zunehmend an Bedeutung [Merk15]. In Anlehnung an biologische Vorbilder der Natur, wie beispielsweise Knochenstrukturen oder Wachstumsregeln von Bäumen, ist die Zielsetzung der Aufbau einer leichten aber hochfesten Struktur. Die Materialverteilung ist dabei entsprechend der Bauteilbeanspruchungen vorzunehmen [Gand16]. So beschreiben *Brackett et al.* die Notwendigkeit für unterschiedliche Dichtebereiche einer Topologieoptimierung durch Gitterstrukturen oder Multimaterialsysteme [Brac11].

Reinhart und Teufelhart zeigen die Unterschiede der Topologieoptimierung und periodisch angeordneten Gitterstrukturen auf und vergleichen angepasste Geometrien eines Biegebalkens hinsichtlich Gewicht und Biegesteifigkeit [Rein11]. *Gaisbauer et al.* beschreiben die Einsatzpotentiale von Strukturen und gehen auf deren Variationsmöglichkeiten ein [Gais13].

Hao et al. sowie *Yan et al.* beschreiben Werkzeuge zur Generierung von periodisch angeordneten Gitterstrukturen auf Basis von bildbasierten Algorithmen sowie die Herausforderungen bei der Herstellung im Selektiven Laserstrahlschmelzen [Hao11]. Dabei wird die Fertigung der Strukturen evaluiert sowie eine anknüpfende Metallographie der hergestellten Elemente durchgeführt. Ziel ist die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften sowie der Dichte des Materials in Abhängigkeit der Baurichtung [Yan12]. *Smith et al.* fokussieren sich ebenfalls auf die Untersuchung durch die Aneinanderreihung von Strukturelementen. Mit Hilfe der Finite-Element-Methode werden unterschiedliche Strukturen hinsichtlich isolierter Belastungszustände simuliert, um ein Bauteilversagen zu prognostizieren [Smi13]. *Shen et al.* führen physische Untersuchungen von isolierten Belastungszuständen auf Gitterstrukturen durch [Shen12].

Emmelmann et al. zeigen Untersuchungen zur Richtungsabhängigkeit und kraftflussangepassten Orientierung von inneren Strukturen, welche im Selektiven Laserstrahlschmelzen hergestellt werden. Neben der Untersuchung von mechanischen Eigenschaften wird der Einsatz von inneren Strukturen für eine gezielte Deformation verwendet [Rehm06, Rehm09]. Weiterhin beschreiben *Emmelmann et al.* die Potentiale zur Integration von inneren Strukturen im Kontext komplizierter Geometrien bzw. Bauteile. Anhand eines Prozesses wird die Integration von Strukturoptimierungswerkzeugen bei der Gestaltung von fertigungsgerechten Bauteilen für die Luftfahrtindustrie beschrieben. Als weiteres Werkzeug beinhaltet der Gestaltungsprozess die Implementierung von potentiellen bionischen Leichtbaustrukturen, welche nach einer Topologieoptimierung herangezogen werden können. Im Ergebnis werden Handlungsempfehlungen für die Nutzung bestimmter Strukturen in Anlehnung an vordefinierte Einsatzbereiche beschrieben [Emm11].

Stoffregen et al. beschreiben den Aufbau von porösen Bauteilen im Selektiven Laserstrahlschmelzen. Dabei erfolgt der Vergleich von geometrisch modellierten Gitterstrukturen und poröser Materialeigenschaften durch Parametervariation [Stof11]. Weiterhin wird die Optimierung der Prozessparameter, wie z.B. der Laserenergieeintrag oder das Laser-Offset, zur verbesserten Herstellung von Gitterstrukturen beschrieben [Abel15].

Ullah et al. beschreiben Untersuchungen von Fachwerkstrukturen für Sandwichbauteile, hergestellt aus einer Titanlegierung im Selektiven Laserstrahlschmelzen. Neben Handlungsempfehlungen zur Vermeidung von Stützstrukturen werden physische Versuchen mit den Simulationsmodellen verglichen [Ulla14].

Reinhart und Teufelhart untersuchen Fachwerkstrukturen und deren Anpassung an den Kraftfluss, sodass ausschließlich Zug- und Druckbeanspruchungen resultieren. Verallgemeinert werden mathematische Modelle zur Anordnung der Stege entlang des Kraftflusses definiert. Vor diesem Hintergrund erfolgt ein Vergleich gegenüber periodisch angeordneten Strukturen [Rein11, Rein13]. Darauf aufbauend beschreiben *Reinhart et al.* die Auslegung von Gitter- und Wabenstrukturen für die additive Fertigung. Dabei ist der Verlauf der Gitterstrukturen an den Kraftfluss im Bauteil angepasst und der Materialfüllgrad entsprechend der auftretenden Belastungen optimiert. Weiterhin wird ein Werkzeug zur Anpassung von Wabenstrukturen an beliebige Freiformflächen sowie deren Spannungen erforscht [Riss13].

Ferner sind Softwarelösungen für partielle Anwendungen kommerziell erhältlich. Bereits Programme zum Slicen von STL-Dateien ermöglichen es, solide Geometrien durch Infill-Strukturen zu ersetzen. Zielsetzung ist die Reduzierung von Fertigungszeiten. Auch im professionellen Bereich existieren kommerzielle Softwarelösungen. Beispielsweise stellt das Leichtbaumodul von *Materialise 3-matic* ein Modellierungswerkzeug bereit, welches die automatische Erzeugung von inneren Strukturen in einem vordefinierten Bereich ermöglicht. Auch *Netfabb* von *Autodesk* oder *Discovery* von *Ansys* ermöglichen die Erzeugung von inneren Strukturen. Die kommerziell erhältlichen Softwarelösungen dienen hauptsächlich der Modellierung von Bauteilen. Wechselwirkungen in Hinblick auf das mechanische Bauteilverhalten werden nicht berücksichtigt [Mate17].

2.5 Innere Strukturen

Strukturen werden in der Natur und Technik zur Effizienzsteigerung dort eingesetzt, wo die Erfüllung einer Aufgabe mit minimalem Materialeinsatz notwendig ist [Klei11]. Ein Beispiel ist der Aufbau des menschlichen Knochens. Entsprechend der einwirkenden Lasten erfolgt die Knochenbildung an den beanspruchten Bereichen. An weniger beanspruchten Bereiche findet Knochenresorption statt, sodass poröse oder annähernd hohle Strukturen entstehen. Der Knochenaufbau dient der Zielsetzung, den Energiebedarf des Menschen bei Bewegung des Körpers zu minimieren und simultan die mechanischen Anforderungen zu erfüllen [Curr02, Lieb17]. Eine technische Anwendung sind Fachwerkstrukturen, wie sie beispielsweise im Bauwesen eingesetzt werden, um die Materialanordnung entlang der maßgebenden Lastpfade zu realisieren. Im Ergebnis entstehen Strukturen, welche die mechanische Aufgabe der Stabilität mit minimalem Materialeinsatz erfüllen [Wetz03, Kren13]. Dabei kann eine Fachwerkstruktur un-

terschiedlich kompliziert aufgebaut sein, indem die Anzahl der Fachwerkstreben für ein Element variiert. Im Dreidimensionalen können Fachwerkstrukturen in Anlehnung an kubische Gittersystem in kubisch raumzentriert (krz), kubisch flächenzentriert (kfz) und kubisch primitiv (Gitter) unterschieden werden [Kleb10]. Eine vereinfachte Anwendung von Strukturen auf Bauteilebene sind Sandwichstrukturen, bei denen die Steifigkeit von flächigen Geometrien erhöht wird. Diese finden in vielen Bereichen Anwendung, wie beispielsweise in der Automobilbranche, der Luft- und Raumfahrt sowie in Windenergieanlagen [Kopp09].

Beim Lösen technischer Problemstellungen unter Verwendung einer Struktur kann der Ansatz verfolgt werden, Vorbilder aus der Natur abzubilden [VDI6223-1]. In diesem Zusammenhang ist die sogenannte Bionik definiert als „[...] *Wissenschaft zur Planung und Konstruktion von Systemen, die charakteristische Eigenschaften biologischer Systeme aufweisen*“ [Zerb87, S. 27]. Dabei wird das Ziel verfolgt, durch Abstraktion, Übertragung und Anwendung von Erkenntnissen auf Basis biologischer Vorbilder technische Fragestellungen zu lösen [VDI6223-1]. Die Bionik steht für eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Übertragung von physikalischen Prinzipien sowie zur Nachbildung von integrierten bionischen Produkten [Nach02]. Ein Überblick von Struktur analogien ist anhand von Bionik-Katalogen gegeben, welche Prinzipien der Natur aufzeigen und Handlungsstrategien zur Ableitung dieser in technische Systeme darstellen [Nach97]. Wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit der Materialanordnung für eine Leichtbaugestaltung [ISO18459, Spec04]. Eine Auswahl von inneren Strukturen aus Bionik-Katalogen ist in Abbildung 2.22 dargestellt.

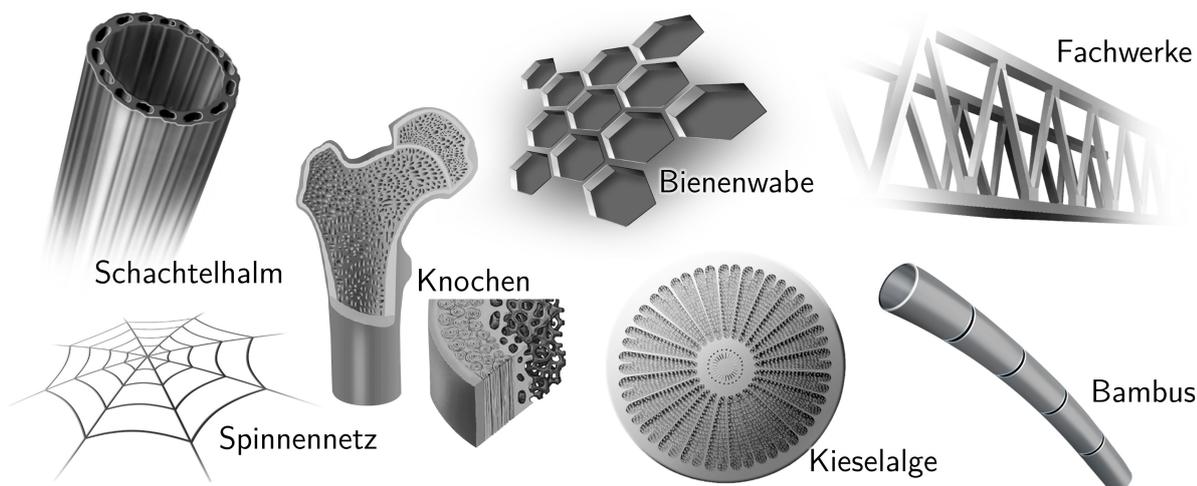


Abbildung 2.22: Exemplarische Strukturen aus biologischen Vorbildern und technologischen Analogien

Innere Strukturen können in vielen Bereichen, z.B. der Akustik oder der Schwingungsdynamik, eingesetzt werden [Banh96; Wadl03]. Für die Anwendung in der Strukturmechanik werden in der Literatur einzelne Fallbeispiele beschrieben [Li03, Jian10, Tahr12]. Meistens ist jedoch das Ziel der Untersuchungen, Wachstumsregeln aufzustellen, welche den grundsätzlichen Aufbau von Strukturen und nicht den globalen Einsatz beschreiben [Matt10, Harz16]. Ein Beispiel sind Wachstumsregeln von Bäumen. *Matthek* beschreibt die Möglichkeiten der Materialanordnung in Analogie von gewachsenen Stammstrukturen [Matt90]. Dabei zeigt er den mathematischen Zusammenhang der Materialanwachsung in Verbindung mit auftretenden Beanspruchungen [Baum90, Harz95].

Die Analyse unterschiedlicher Strukturen zeigt weiterhin, dass diese unterschiedlich aufgebaut sind. So existieren einerseits willkürliche, stochastische Strukturen, welche sich für jede Anwendung gänzlich unterscheiden. Ein Beispiel sind die beschriebenen Knochenstrukturen, welche keine wiederkehrenden Muster zeigen. Andererseits gibt es Strukturen, die sich aus gleichen oder ähnlichen Grundkörpern zusammensetzen. Beispielsweise ist der Aufbau einer Wabenstruktur für unterschiedliche Anwendungen identisch.

Bei der Herstellung von inneren Strukturen stoßen konventionelle Fertigungsverfahren an ihre Grenzen, sodass auf hybride Bauweisen zurückgegriffen wird. Sandwichstrukturen bestehen beispielsweise aus zwei festen Oberflächen und einer leichten Innenschicht, z.B. als Wabenstruktur. Hingegen zeigt die additive Fertigung in diesem Bereich viele Vorteile.

3 Problemanalyse

Die Vielzahl der im Stand der Forschung diskutierten Arbeiten zeigt, dass die Gestaltung von gewichtsoptimierten Strukturbauteilen für Selektives Laserstrahlschmelzen ein aktuelles Thema ist, welches zunehmend an Bedeutung gewinnt. In diesem Zusammenhang beschreibt auch die *European Space Agency*, dass besonders bei der Aluminiumverarbeitung und der Einbringung von inneren Strukturen Forschungsbedarf besteht, um weitere Anwendungen für Selektives Laserstrahlschmelzen zu erschließen und diese durch Standardisierungen voranzutreiben [Euro14]. In Bezug auf die eingangs hergeleitete Fragestellung, wie das Vorgehen zum Gestalten eines gewichtsoptimierten Bauteils beschaffen sein muss, um innere Strukturen für spezifische mechanische Randbedingungen einzusetzen, bestehen dabei unterschiedliche Herausforderungen, welche nur partiell erforscht sind. Diese werden in Bezug auf die dargestellten Forschungsarbeiten folgend diskutiert. Daraus abgeleitet wird spezifiziert, wie eine Methode zum restriktionsgerechten Gestalten von inneren Strukturen beschaffen sein sollte.

Herausforderung 1: *Gestaltungshilfsmittel für innere Strukturen im Direct Manufacturing*

Beim Rapid Prototyping werden die Eigenschaften der Serienprozesse abgebildet, welche vom gewählten Fertigungsverfahren für das Endprodukt abhängen. Die Besonderheiten der additiven Fertigung sind dabei lediglich zur Herstellbarkeit des Prototypens zu berücksichtigen, liegen aber nicht im Fokus der Bauteilauslegung. Zur Anwendungen von inneren Strukturen in Endprodukten sollten jedoch die Vorteile und Herausforderungen des Selektiven Laserstrahlschmelzens herausgearbeitet und systematisch berücksichtigt werden.

Einige Ansätze befassen sich mit der Einbringung von stochastischen Strukturen auf Basis unterschiedlicher Dichtebereiche als Skala der Topologieoptimierung. Herausfordernd ist jedoch, dass die Simulationsergebnisse als Gestaltungsvorschlag dienen, sodass die berechnete Dichte in einem CAD-Modell rekonstruiert werden muss. Folglich kann es zu Abweichungen zwischen simuliertem Ergebnis und CAD-Modell kommen. Die Rekonstruktion eines komplizierten Gestaltungsvorschlages ist zudem mit hohem Aufwand verbunden. Eine der maßge-

benden Herausforderungen liegt ferner in der Herstellung poröser Strukturen, da beim Selektiven Laserstahlschmelzen die Kavitäten geometrisch limitiert sind und von überschüssigem Pulver gereinigt werden müssen.

Abhilfe schafft die direkte Modellierung von inneren Strukturen, welche periodisch aneinander gereiht und elementweise variiert werden. Hierbei entfällt der Schritt zwischen Simulation und Rekonstruktion eines CAD-Modells. Zudem können die einzelnen Strukturelemente dimensioniert und Fertigungsstrategien für jedes Element definiert werden, sodass die Herstellbarkeit für die gesamte Struktur gegeben ist.

Folglich werden innere Strukturen im Rahmen dieser Arbeit als Aneinanderreihung von gleichen oder ähnlichen Gestaltelemente zur Substitution von Solid-Volumenkörpern verstanden, wobei die Materialanordnung auf makroskopischer Ebene variiert wird, ohne die Materialeigenschaften selbst zu beeinflussen [Lipp16b]. Der Zusammenhang von Strukturelement, Strukturzeugung und Dichtevariation ist am Beispiel eines Würfels in Abbildung 3.1 dargestellt.

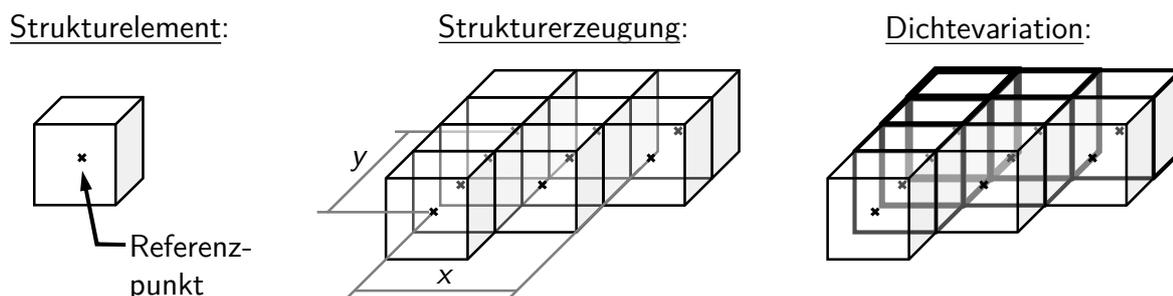


Abbildung 3.1: Strukturzeugung für duplizierte und selbstähnliche Strukturen

Bei der Modellierung von Strukturelementen tritt die Herausforderung auf, einen geeigneten Wirkraum sowie einen Bereich zur Einbringung der inneren Strukturen zu definieren. Wie im Stand der Forschung aufgezeigt, wird partiell die Einbringung von inneren Strukturen in vorhandene Wirkräume beschrieben. Die Wechselbeziehungen bei Änderung der Bauteilhülle werden jedoch nicht ausreichend berücksichtigt. Dabei hat die Materialreduktion meist hohe Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften, sodass eine Änderung der inneren Struktur die Untersuchung des globalen Bauteilverhaltens fordert und umgekehrt. Folglich besteht ein maßgebliches Optimierungsproblem in der Definition eines Wirkraums, ohne die konkrete Struktur und deren Verteilung zu kennen. Vor diesem Hintergrund ist ein systematisches Vorgehen notwendig, welche die notwendigen Arbeitsschritte zur Auswahl und Einbringung von inneren Strukturen unter Festlegung eines Wirkraums aufzeigt.

Herausforderung 2: Belastungsgerechte Zuordnung von Strukturen

Bei der Verwendung innerer Strukturen soll das Material entsprechend der Beanspruchungen angeordnet werden. Am Beispiel eines Biegebalkens ist dieser Ansatz in Abbildung 3.2 dargestellt. Da die Biegesteifigkeit neben der Elastizität maßgeblich von der Bauteilgeometrie abhängt, ist die Querschnittsfläche hinsichtlich eines hohen Randfaserabstands zu optimieren. Entsprechend der Fertigungsmöglichkeiten werden oft Profile verwendet, z.B. IPE-Profile für Biegebelastung. Vor dem Hintergrund der diskutierten Vorteile des Selektiven Laserstrahlschmelzens und unter Beachtung der Regeln für ein abgestimmtes, leichtbaugerechtes Konstruieren nach *Klein* ist es möglich, Material mit erhöhter Entfernung zur neutralen Faser anzuordnen und dieses durch filigrane und dünnwandige Strukturen zu verbinden, sodass ein höherer Randfaserabstand bei gleichbleibendem Flächeninhalt resultiert. Durch Gradienten in der Materialverteilung können die Strukturen zudem lokal dimensioniert werden. Somit kann die Biegesteifigkeit bei gleichen Materialeigenschaften verbessert werden.

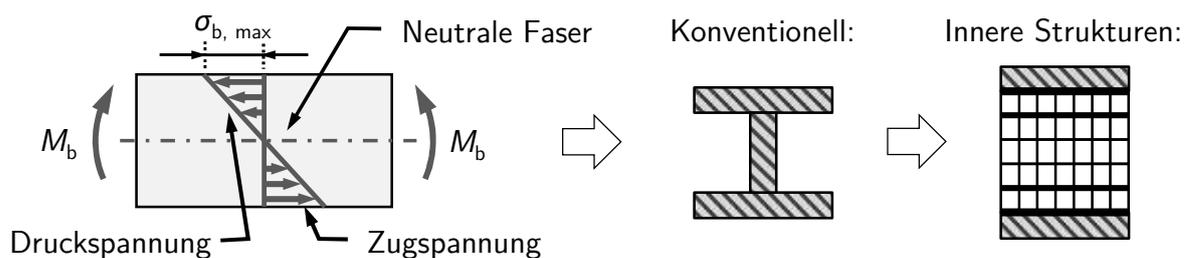


Abbildung 3.2: Anpassung innerer Strukturen an die Beanspruchungen in einem Biegebalken

Wie im Stand der Forschung aufgeführt, werden grundsätzliche Anwendungen unterschiedlicher Strukturen untersucht. Dabei werden Rückschlüsse gezogen, ob eine Struktur beispielsweise in der Mechanik, Akustik oder Medizintechnik Anwendung finden kann. Die umfassende Erarbeitung und Formalisierung von Wissen über mechanische Anwendungen, gerade im Hinblick auf die Fertigung im Selektiven Laserstrahlschmelzen, ist nicht vorhanden. Im Sinne des belastungsgerechten Gestaltens ist jedoch bekannt, dass bereits geringe Gestaltänderungen eine Auswirkung auf die mechanischen Bauteileigenschaften haben. Das Einbringen von Kerben verursacht z.B. lokale Spannungsspitzen, welche letztendlich zum Bauteilversagen führen können. Somit ist darauf zu schließen, dass Strukturen die mechanischen Eigenschaften unterschiedlich stark beeinflussen. Folglich ist zu untersuchen, welche Strukturen für mechanische Anwendungen geeignet sind und wie diese Strukturen beschaffen sein sollten. Zum Umgang mit inneren Strukturen mit vertretbarem Aufwand müssen demnach die mechanischen Anwendungen erforscht und das erlangte Wissen formalisiert werden.

Herausforderung 3: *Handhabung innerer Strukturen in Rechnerwerkzeugen*

Um einen Mehrwert durch Selektiven Laserstrahlschmelzens zu erreichen, werden in einigen Forschungsarbeiten spezifische Gestaltungsaspekte dargestellt. Neben der Fragestellung, was gemacht werden soll, ist dabei vor Allem die Frage nach dem Wie von hoher Relevanz. In Bezug auf Leichtbauanwendungen wird z.B. die Einbeziehung der Topologieoptimierung in den Entwicklungsprozess beschrieben. Einige Arbeiten beschäftigen sich weiterhin mit der Simulation von laserstrahlgeschmolzenen Bauteilen, z.B. unter Berücksichtigung der anisotropen Materialeigenschaften. Hinsichtlich der Konkretisierung auf innere Strukturen sind jedoch wenig spezifische Arbeiten vorhanden, in denen meist empirische Untersuchungen anhand von Fallbeispielen beschrieben werden ohne die Ergebnisse zu generalisieren.

Zur Erzeugung innerer Strukturen ist die Beschreibung eines Strukturelements notwendig, welches aneinander gereiht werden kann. Vor diesem Hintergrund zeigen Ansätze aus der Bionik, dass für Lebewesen bedeutsame Dinge immer Muster aufweisen, die durch ein Mindestmaß an Periodizität und Symmetrien gekennzeichnet sind. Dabei können diese Eigenschaften sowohl exakt als auch ungefähr, also stochastisch, sein [Ebel98]. Strukturen können folglich dahingehend unterschieden werden, gleiche oder variierende Elemente zu kombinieren, sodass exakte oder willkürliche Erscheinungen resultieren. Weiterhin treten Mischformen auf, die beide Aspekte vereinen. Somit wird eine Differenzierung nach duplizierten, selbstähnlichen und stochastischen Strukturen eingeführt. Dabei sind duplizierte Strukturen exakt in der Periodizität sowie der Symmetrie. Bei selbstähnlichen Strukturen setzen sich diese Eigenschaften aus exakten und aus ungefähren Einflüssen zusammen. Das Mindestmaß an Periodizität und Symmetrie ist bei stochastischen Strukturen letztendlich am geringsten. In Abbildung 3.3 werden die drei Differenzierungen anhand der Gestaltparameter definiert. Zudem werden den Gruppierungen exemplarische Strukturen zugeordnet, welche in Abschnitt 2.5 eingeführt wurden, und diese anhand des charakteristischen Aufbaus abstrahiert.

Innere Strukturen können weiterhin zweidimensional, z.B. in Form einer Wabenstruktur, oder dreidimensional, z.B. in Form eines Ikosaeder, dargestellt werden. Zur Anpassung an räumliche Belastungen können zweidimensionale Strukturen zu dreidimensionalen Geometrien extrudiert werden.

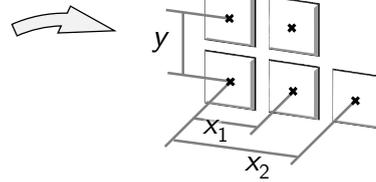
Duplizierte Strukturen: Aneinanderreihung von geometrisch gleichen Elementen durch die Variation der Anzahl und Größe. Beispiele sind:

- Bienenwabe
- Bambus
- Quader
- Fachwerke
- Schachtelhalm



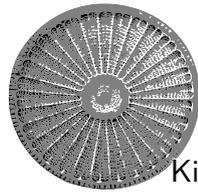
Waben

Abstraktion



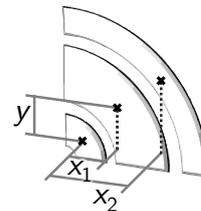
Selbstähnliche Strukturen: Aneinanderreihung von topologisch äquivalenten Elementen unter Variation von Anzahl, Größe und Form. Beispiele sind:

- Spinnennetz
- Kieselalge
- Eisblume
- Romanesco
- Farn (Botanik)



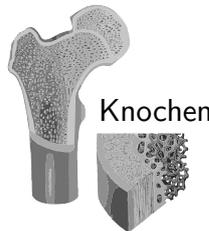
Kieselalge

Abstraktion



Stochastische Strukturen: Aneinanderreihung von topologisch unterschiedlichen Elementen und Variation der Anzahl, Größe, Form und Topologie. Beispiele sind:

- Knochen
- Eierschale
- Blätter (Botanik)



Knochen

Abstraktion

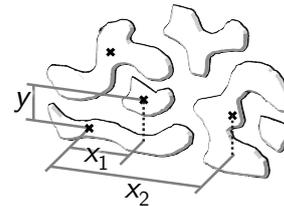


Abbildung 3.3: Klassifizierung von inneren Strukturen

Zur Anpassung der Materialverteilung eines Strukturbauteils an dessen Beanspruchungen ist eine exakte geometrische Beschreibung einer inneren Struktur notwendig, sodass die Strukturelemente gezielt positioniert und dimensioniert werden können. Für einen zweckmäßigen Einsatz von Rechnerwerkzeugen muss demnach die Modellierung und Parametrisierung einer Struktur möglich sein. Beispielsweise können stochastische Strukturen mathematisch nur schwierig beschrieben oder gar parametrisch modelliert werden, da die Verteilung einer Struktur bei Änderung ihrer topologischen Eigenschaften neu definiert werden muss. Eine Aneinanderreihung ist nahezu unmöglich. Hingegen lässt sich die Position von duplizierten Strukturen eindeutig im Raum definieren, sodass eine Parametrisierung gut umsetzbar ist.

Innere Strukturen müssen weiterhin die Abbildung eines Belastungsfalls sowie eine möglichst detaillierte Variation zulassen, um eine exakte Anpassung der Materialverteilung zu ermöglichen. Die vier diskutierten Bewertungskriterien sind im Folgenden zusammengefasst:

- **Modellierung:** Grundsätzliche Eignung zum Aufbau eines CAD Modells.
- **Parametrisierung:** Möglichkeit zur Variation der Gestaltparameter durch mathematische Funktionen.
- **Abbildung:** Darstellung einer Struktur im Zwei- und Dreidimensionalen zur Anpassung an einen räumlichen Spannungszustand.
- **Variation:** Abbildungsgenauigkeit zur exakten Annäherung an die Beanspruchungen im Bauteil.

Zur Eingrenzung geeigneter Strukturen für den beschriebenen Ansatz und folglich zur Spezifikation geeigneter Rechnerwerkzeuge werden die drei vorgestellten Strukturklassen hinsichtlich der diskutierten Kriterien bewertet, dargestellt in Tabelle 3.1. Die größte Eignung zur rechnerunterstützten Handhabung liegt demnach bei duplizierten und teilweise bei selbstähnlichen Strukturen, da diese gut modelliert und zur Umsetzung der Dichteviation ebenfalls parametrisiert werden können. Stochastische Strukturen sind aufgrund der schlechten Modellier- und Parametrisierbarkeit weniger geeignet, obwohl eine hohe Abbildungsgenauigkeit sowie Variation möglich ist. Die Verwendung von stochastischen Strukturen ist demnach durch ein hohes Maß des spezifischen Bauteils geprägt, sodass die Aneinanderreihung von Strukturelementen nicht umgesetzt werden kann. Hierbei sind Ansätze wie z.B. die diskutierte Interpretation der Topologieoptimierung als Dichtebereiche auf Anwendbarkeit zu prüfen. Jedoch können stochastische Strukturen auch abstrahiert durch selbstähnliche oder duplizierte Strukturen dargestellt werden. Dabei belegen besonders die Synergetik und Chaostheorie, dass selbst hochkomplexe Muster meist auf rekursive Bildungsregeln zurückgeführt werden können, sodass der grundsätzliche Aufbau nachempfunden werden kann [Hake82, Küpp96].

Tabelle 3.1: Bewertung der Strukturklassen zur rechnerunterstützten Handhabung

	Modellierung	Parametrisierung	Abbildung	Variation
Dupliziert	x	x	-	-
Selbstähnlich	x	-	-	x
Stochastisch	-	-	x	x

Für duplizierte und teilweise selbstähnliche Strukturen ist es demnach möglich, ein Strukturelement mit einem Referenzpunkt zu definieren. Zur Strukturzeugung können die Elemente aneinander gereiht werden, indem der x -, y - und z - Abstand der Elemente zueinander angegeben wird. So ist jedes Strukturelement eindeutig im Raum definiert. Zur Anpassung der Dichte an die Beanspruchungen kann eine elementweise Dimensionierung erfolgen. Deswegen müssen Anforderungen an Rechnerwerkzeuge zusammengetragen und exemplarische Umsetzungsmöglichkeiten aufgezeigt werden, um eine Evaluierung hinsichtlich der Aneinanderreihung von Strukturelementen durchzuführen.

Herausforderung 4: *Einbeziehung von Gestaltungsrichtlinien*

Fertigungsrestriktionen beeinflussen die Bauteilauslegung und müssen zur Herstellbarkeit zwangsläufig bekannt sein und beachtet werden. Die Auslegung und Simulation von inneren Strukturen ist demnach durch die Sicherstellung der Herstellbarkeit zu ergänzen. Vor diesem Hintergrund untersuchen einige Arbeiten generelle Limitationen unterschiedlicher additiver Fertigungsverfahren. Auch für Selektives Laserstrahlschmelzen bestehen Untersuchungen zur Herstellbarkeit von Bauteilen. Die aufgezeigten Gestaltungsrichtlinien werden dabei allgemein formuliert und decken jegliche Gestaltungsprobleme ab. Neben dem Umgang mit der Vielfalt unterschiedlicher Gestaltungsrichtlinien ist es folglich herausfordernd, die für die konkrete Problemstellung relevanten Richtlinien kurzfristig zu identifizieren. Die Fülle der Informationen ermöglicht derzeit keine spezifische Zuordnung zu unterschiedlichen Gestaltungsproblemen. Hier ist eine Konkretisierung auf Strukturbauteile und innere Strukturen sinnvoll, um die Komplexität beim restriktionsgerechten Gestalten innerer Strukturen einzugrenzen.

Weiterhin ist eine fertigungsgerechte Gestaltung derzeit mit hohem Aufwand verbunden, da sich Gestaltungsrichtlinien teilweise widersprechen oder stark gegenseitig beeinflussen. Ein zweckmäßiger Einsatz basiert folglich auf der Erfahrung des Konstrukteurs beim restriktionsgerechten Gestalten für Selektives Laserstrahlschmelzen. Zur Handhabung ist folglich die Zuordnung der Gestaltungsrichtlinien zu einzelnen Arbeitsschritten anzustreben und für die spezifische Problemstellung zu konkretisieren. Indem vermeidbare Iterationen verhindert werden, kann der Änderungsaufwand reduziert werden. Somit sind Gestaltungsrichtlinien für laserstrahlgeschmolzene innere Strukturen zu spezifizieren und deren Abhängigkeiten zu untersuchen.

Spezifikation zum restriktionsgerechten Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile

Die Problemanalyse hat gezeigt, dass im Umgang mit inneren Strukturen weiterer Handlungsbedarf besteht, welcher in Form von vier maßgebenden Herausforderungen dargestellt wurde. In Bezug auf die gezeigte Forschungslücke wird folgend spezifiziert, wie eine Methode zum restriktionsgerechten Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile für Selektives Laserstrahlschmelzen beschaffen sein sollte, um bestehende Aspekte aufzugreifen und weiterhin auf die dargestellten Herausforderungen einzugehen. Dabei leiten sich die dargestellten Anforderungen unmittelbar aus den diskutierten Herausforderungen ab.

- **Herstellbarkeit und Belastbarkeit sicherstellen:** Grundlegend muss die Reduzierung des Bauteilgewichts bei Erfüllung der mechanischen Anforderungen angestrebt werden. Die Dimensionierung der inneren Strukturen muss dabei stets in Verknüpfung mit der Auslegung zur Herstellbarkeit erfolgen. Folglich muss Wissen über die Anwendungen von inneren Strukturen für verschiedene Belastungsfälle unter Beachtung der Herstellbarkeit formalisiert werden, indem Aspekte zur Auslegung, Simulation, Herstellung und Erprobung kombiniert werden. Zur Umsetzung können beispielsweise Regeln definiert werden, welche die Auswahl einer fertigungsgerechten Struktur in Hinblick auf vordefinierte Lastfälle ermöglichen.
- **Standardisiert vorgehen:** Die Optimierungsergebnisse dürfen nicht zufällig entstehen, sondern müssen strukturiert aufgebaut und erarbeitet werden, um alle Gestaltungsaspekte zu berücksichtigen und Konstrukteure mit unterschiedlichem Wissensstand das Gestalten innerer Strukturen mit vertretbarem Aufwand zu ermöglichen. Der Ablauf zum Gestalten muss demnach nachvollziehbar sein, sodass ein systematisches Vorgehen erarbeitet werden muss, welches die notwendigen Arbeitsschritte definiert. Für ein systematisches Vorgehen müssen grundlegende Erkenntnisse, wie z.B. die Anwendbarkeit von Optimierungsstrategien oder der Umgang mit multikriteriellen Optimierungszielen, durch den Einsatz von Gestaltungshilfsmitteln eindeutig und schnell vermittelt werden können.
- **Entscheidungsgrundlagen aufzeigen:** Zur Reproduzierbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse müssen Entscheidungsgrundlagen aufgezeigt werden. Diese müssen die umfängliche Behandlung der Arbeitsschritte im systematischen Vorgehen sicherstellen und für den Abgleich hinsichtlich der gestellten Anforderungen herangezogen werden können, sodass eine stetige Absicherung des Optimierungsfortschritts erfolgt und getroffene Entscheidungen auf fundierten Informationen basieren. Somit kann entschieden werden, ob ein Arbeitsschritt abgeschlossen ist oder eine Iteration durchgeführt werden sollte.

- **Durchgängigkeit sicherstellen:** Zur Ausnutzung der Gestaltungsfreiheit des Selektiven Laserstrahlschmelzens und zur Sicherstellung der Herstellbarkeit in einem ausreichenden Maße muss eine durchgängige Behandlung und Ausrichtung beim Gestalten auf das Direct Manufacturing erfolgen. Die Gestaltungsmethode muss demnach Handlungsempfehlungen von der Anforderungsdefinition, über die Strukturauswahl und Dimensionierung bis hin zur Bauteilausarbeitung geben und somit alle Arbeitsschritte zur Modellierung und Validierung eines restriktionsgerechten Strukturbauteils abdecken. Zur Sicherstellung einer durchgängigen Bauteiloptimierung müssen weiterhin geeignete Rechnerwerkzeuge spezifiziert und den Arbeitsschritten zugeordnet werden, sodass neben der Vorgabe von Tätigkeiten ebenfalls Umsetzungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Ferner müssen Datenformate festgelegt werden, sodass die virtuellen Modelle verlustfrei über die Schnittstellen zwischen den Rechnerwerkzeugen ausgetauscht werden können.
- **Simulationsmodelle validieren:** Bereits in der Bauteilauslegung muss die Baurichtung und somit das anisotrope Materialverhalten abgebildet werden, um die Anzahl physischer Versuche zu reduzieren und damit einhergehend Entwicklungszeit einzusparen. Zur exakten Berechnung des physischen Bauteilverhaltens durch Simulation müssen folglich validierte Simulationsmodelle erarbeitet werden, welche die Eigenschaften des Selektiven Laserstrahlschmelzens abbilden und besonders für innere Strukturen geeignet sind. Die validierten Simulationsmodelle müssen somit die Auslegung von Leichtbaukonstruktionen mit geringem Sicherheitsfaktor aufgrund der exakten Abbildungsmöglichkeiten realisieren. Anderenfalls können die Unsicherheiten bei der Simulation durch eine entsprechende Anpassung der Sicherheitsfaktoren abgebildet werden, wobei jedoch das Potential einer Leichtbaukonstruktion einbüßt.
- **Modular strukturieren:** Zur Realisierung des standardisierten Vorgehens und zum Aufzeigen der Entscheidungsgrundlagen muss eine modulare Struktur erarbeitet werden, welche inhaltlich zusammenhängende Tätigkeiten bündelt und somit in sich geschlossene Arbeitsschritte definiert. Durch die modulare Struktur können die Arbeitsschritte nach der Bearbeitung bewertet sowie isoliert voneinander betrachtet werden. Um die Komplexität im Umgang mit inneren Strukturen weiter zu reduzieren, können einzelne Arbeitsschritte durch Automatismen verbessert und Schnittstellen zwischen den Arbeitsschritten optimiert werden.

4 Methode zur Gewichtsoptimierung durch innere Strukturen

Im Folgenden wird die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Methode erläutert, welche die Gestaltung von gewichtsoptimierten Strukturbauteilen durch innere Strukturen für Selektives Laserstrahlschmelzen beschreibt.

In Abschnitt 4.1 werden die notwendigen Arbeitsschritte zur Überführung einer Aufgabe in eine neue Bauteilgeometrie mit inneren Strukturen dargelegt. Die Arbeitsschritte werden in den Kontext eines systematischen Vorgehens eingeordnet und ferner konkretisiert.

In Abschnitt 4.2 werden Anforderungen an Rechnerwerkzeuge zum Einsatz im systematischen Vorgehen spezifiziert. Daraus abgeleitet werden Werkzeuge zur Modellierung von Volumenkörpern, zur Berechnung der Beanspruchungen mittels Finite-Element-Methoden sowie zur Identifizierung der topologischen Grundstruktur dargestellt und im systematischen Vorgehen verordnet.

In Abschnitt 4.3 werden abschließend bestehende Gestaltungsrichtlinien hinsichtlich deren Gemeinsamkeiten bewertet, welche zum Gestalten von inneren Strukturen erforderlich sind. Nach der Gruppierung der Gestaltungsrichtlinien erfolgt die Betrachtung ihrer Korrelationen. Ziel ist die Zuordnung der Gestaltungsrichtlinien zu einzelnen Arbeitsschritten.

4.1 Systematisches Vorgehen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde zur Gewichtsoptimierung durch innere Strukturen ein systematisches Vorgehen entwickelt, welches im Folgenden vorgestellt wird. Das Vorgehen dient dem Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile für Selektives Laserstrahlschmelzen. Ziel ist die Überführung einer Aufgabe in die Freigabe einer neuen Bauteilgeometrie, welche die gestellten Anforderungen erfüllt. Dabei werden die Vorteile des Selektiven Laserstrahlschmelzens herausgearbeitet und mittels geeigneter Rechnerwerkzeuge und Methoden bereitgestellt. Diese werden im systematischen Vorgehen durch die Zuordnung von Gestaltungs-

richtlinien zu den unterschiedlichen Arbeitsschritten ergänzt. Unter Berücksichtigung des generellen Vorgehens beim Gestalten nach *VDI-Richtlinie 2223*, der systematischen Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach *Klein* sowie dem reifegradbasierten Entwurfprozess für Strukturkomponenten nach *Sauthoff* werden verfahrensspezifische Arbeitsschritte beschrieben [VDI2223, Klei11, Saut17]. Dafür werden bestehende Gestaltungsmethoden und Hilfsmittel für innere Strukturen adaptiert und zu einem durchgängigen Prozess ergänzt. Diese betreffen insbesondere das belastungsgerechte Gestalten zur Auslegung und Dimensionierung der inneren Strukturen [Leye63, Conr13, Feld13], das fertigungsgerechte Gestalten für Selectives Laserstrahlschmelzen zur Sicherstellung der Herstellbarkeit bereits in frühen Entwicklungsphasen [Zimm11a, VDI3405-3, Emme14] sowie Untersuchungen zur Modellierung und Herstellung von inneren Strukturen [Rehm06, Rein11].

Das systematische Vorgehen ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Am Ende jeder der vier sequentiell angeordneten Arbeitsschritte steht ein Arbeitsergebnis, welches die Eingangsgröße für den darauffolgenden Arbeitsschritt darstellt. Die Bearbeitung eines Arbeitsschrittes sollte nach Abschluss des vorherigen Arbeitsschrittes erfolgen. Trotz des sequentiellen Ablaufes sieht das Vorgehen ein iteratives Zurückspringen zu einem vorgelagerten Arbeitsschritt vor.

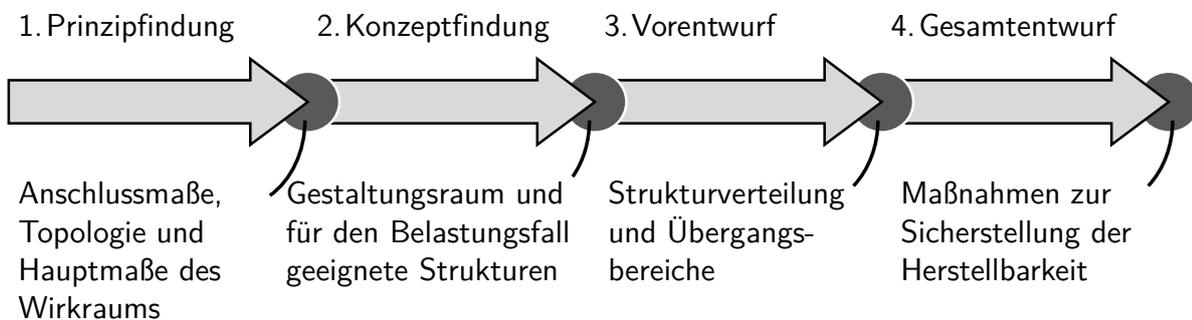


Abbildung 4.1: Systematisches Vorgehen zum restriktionsgerechten Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile

Zu Beginn des systematischen Vorgehens sind gestaltbeeinflussende Anforderungen an die gestellte Aufgabe zu identifizieren. Dafür müssen relevante Informationen aus dem Lebenszyklus zusammengetragen werden. In Anlehnung an *Pahl und Beitz* werden zur Aufgabenklärung die folgenden Hauptmerkmale untersucht: Geometrie, Kinematik, Kräfte, Energie, Stoff, Signal, Sicherheit, Ergonomie, Fertigung, Kontrolle, Montage, Transport, Gebrauch, Instandhaltung, Recycling, Kosten und Termin [Pahl07]. Daraus abgeleitet sind maßgebend Wirkflächen zu identifizieren sowie die Modellfestlegung und -belastung zu definieren.

In der Prinzipfindung werden die Topologie, Anschluss- und Hauptmaße des Wirkraums unter Berücksichtigung der relevanten Wirkflächen festgelegt. Durch die Betrachtung von Fertigungs-, Bauraum- und Nutzungsrestriktionen ist die Eingrenzung des Wirkraums vorgesehen. Somit resultiert ein Modell, welches die maximale Bauteilgröße beschreibt. Das Modell muss weiterhin hinsichtlich der Kraftflüsse abstrahiert werden, um den Wirkraum einzugrenzen.

Ausgehend vom Wirkraum und der Spannungsverteilung wird in der Konzeptfindung ein Gestaltungsraum definiert, um eine innere Struktur einzubringen. Das Modell wird folglich von der Begrenzung durch den Wirkraum nach innen hin aufgebaut. Die Konzeptfindung charakterisiert sich weiterhin durch die Auswahl einer für den relevanten Belastungsfall geeigneten Struktur. Grundlage ist ein Informationsspeicher mit den mechanischen Anwendungen unterschiedlicher Strukturen, welcher in Kapitel 5 beschrieben wird.

Im Vorentwurf werden die ausgewählte innere Struktur und der Gestaltungsraum zusammengeführt. Es folgen die Orientierung der Struktur sowie deren Anpassung an den Belastungsfall. Hierbei wird - entsprechend der Untersuchungen von *Wiedemann* - Material in Bereichen mit hohen Spannungen angeordnet und in Bereichen mit geringen Spannungen reduziert [Wied84]. Als maßgebende Optimierungsstrategien werden dabei die Variation der Dichte und des Gestaltungsraums berücksichtigt, da hierbei eine exakte Anpassung der Materialverteilung möglich ist. Weiterhin werden die Übergangsbereiche zwischen Struktur und soliden Geometrien modelliert, wobei die identifizierten Kraftflüsse aus der Prinzipfindung berücksichtigt werden.

Im Gesamtentwurf werden konstruktive Maßnahmen zur Sicherstellung der Herstellbarkeit getroffen. Dabei wird das Modell hinsichtlich der Gestaltungsrichtlinien validiert und angepasst.

Die Unterteilung in vier Arbeitsschritte basiert auf der Überlegung, dass eine kontinuierliche Validierung des Optimierungsfortschrittes während der Einbringung und Detaillierung innerer Strukturen möglich sein soll. Das Ergebnis kann nach jedem Arbeitsschritt hinsichtlich der Erfüllung der gestellten Anforderungen bewertet werden. Somit kann entschieden werden, ob ein Arbeitsschritt abgeschlossen ist oder eine Iteration durchgeführt werden sollte. Die Einteilung in vier Arbeitsschritte ermöglicht zudem unterschiedliche Herangehensweisen beim Gestalten. Beginnend beim ersten Arbeitsschritt wird unter Berücksichtigung relevanter Wirkflächen ein erweiterter Wirkraum definiert. Ausgehend von der Begrenzung des Wirkraums werden im weiteren Verlauf Strukturen in das Bauteil eingebracht und detailliert.

Im Unterschied dazu ermöglicht die Vierteilung zudem den Startpunkt in den zweiten Arbeitsschritt zu legen: Der Wirkraum entspricht einem Ausgangsmodell und ist folglich festgelegt. Der Fokus liegt somit auf der Einbringung innerer Strukturen in eine vorhandene Bauteilhülle. Der Zusammenhang ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

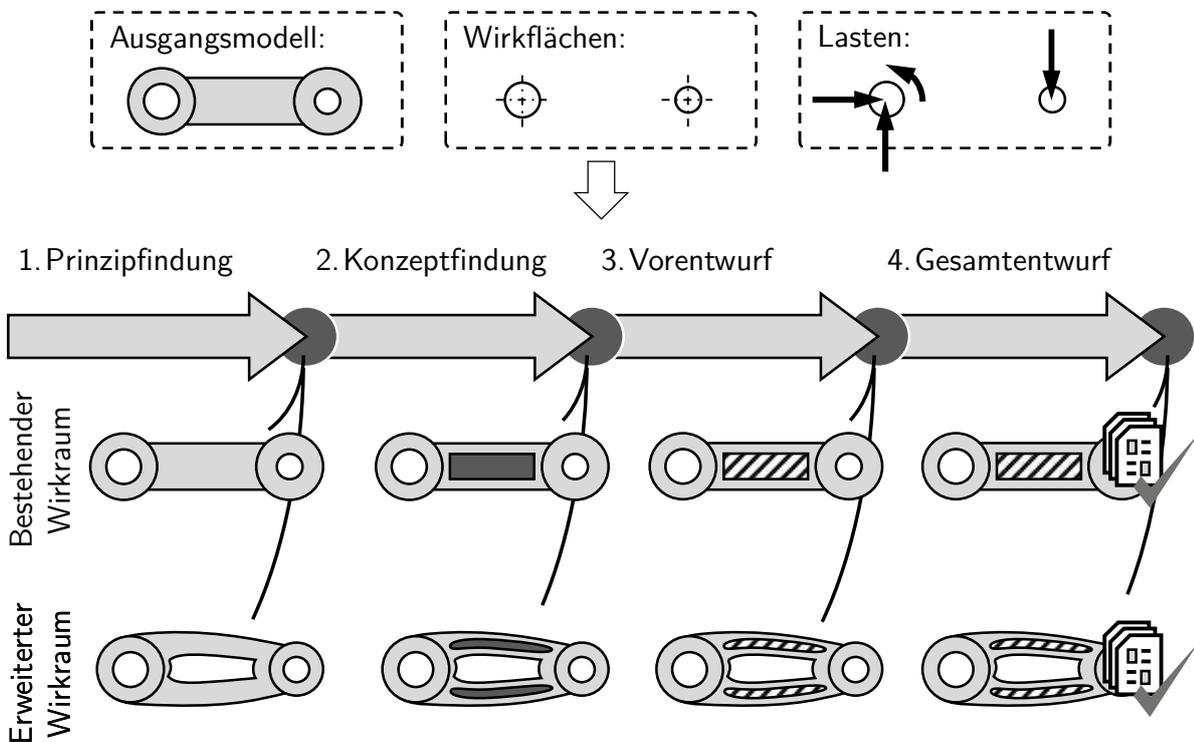


Abbildung 4.2: Anwendung des systematischen Vorgehens

Bei der Überführung der Aufgabe in die Freigabe der neuen Bauteilgeometrie wird ein virtuelles Modell aufgebaut, welches schrittweise detailliert wird. Dabei durchläuft das Modell unterschiedliche Reifegrade als Volumenmodell, welche teilweise durch nicht geometrische Eigenschaften (z.B. Elastizitätsmodul, Dichte, Dehngrenze, etc.) ergänzt werden.

Auf Basis des Ausgangsmodells und unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen erfolgen demnach die Identifizierung relevanter Wirkflächen sowie die Modellfestlegung und -belastung. Zur Prinzipfindung wird anschließend ein Wirkraum bestimmt. Die Definition eines Gestaltungsraums dient der Konzeptfindung. Im Vorentwurf wird die innere Struktur in das Bauteil eingebracht und an die Beanspruchungen angepasst. Im Gesamtentwurf wird abschließend die Herstellbarkeit geprüft. Die relevanten Definitionen sind im Folgenden zusammengefasst und in Abbildung 4.3 schematisch visualisiert.

- **Ausgangsmodell:** Für die Optimierung zugrundeliegendes Modell aus Vollmaterial. Beim Gestalten neuer Bauteilgeometrien ohne Ausgangsmodell können relevante Wirkflächen und der zur Verfügung stehende Bauraum für ein Referenzmodell herangezogen werden.
- **Wirkflächen:** Entsprechen den Konturflächen eines technischen Gegenstands, die für die Wirkung von Funktionsgrößen maßgebend sind. Jede Fläche, an der eine Kraft oder ein Drehmoment wirkt, kann als Wirkfläche dienen [Frei00, Roth00].
- **Wirkraum:** Wirkräume leiten die an Wirkflächen angreifenden Kräfte und Momente an verknüpfte Wirkflächen weiter [Frei00, Roth00].
- **Gestaltungsraum:** Bereich innerhalb des Wirkraums zur Einbringung und Detaillierung einer inneren Struktur.
- **Innere Struktur:** Aneinanderreihung von gleichen oder ähnlichen Strukturelementen zur Substitution von soliden Geometrien mit dem Ziel, die Materialanordnung auf makroskopischer Ebene zu variieren ohne die Materialeigenschaften zu beeinflussen [Lipp16b].

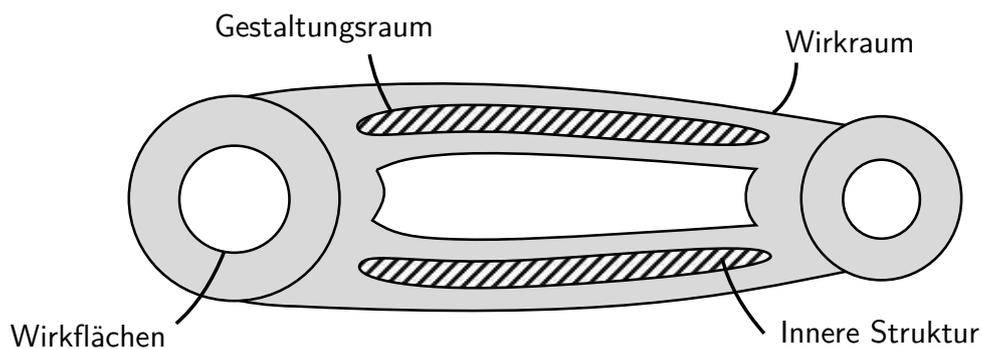


Abbildung 4.3: Wirkflächen, Wirkraum, Gestaltungsraum und innere Struktur

4.2 Rechnerwerkzeuge

Das systematische Vorgehen basiert auf dem Einsatz von Rechnerwerkzeugen. Dabei leiten sich Anforderungen an geeignete Werkzeuge aus den Arbeitsschritten des systematischen Vorgehens ab. Einerseits wird ein Rechnerwerkzeug zur Modellierung von parametrischen Volumenmodellen benötigt, welches die Materialeigenschaften wiedergeben kann, um die Masse sowie die mechanischen Eigenschaften eines virtuellen Modells zu bestimmen. Zur Editierung des virtuellen Modells muss ferner der Aufbau einer Boundary Representation (B-Rep) oder einer Constructive Solid Geometry (CSG) möglich sein. Bei fehlender Parametrik ist eine Änderung des Modells ausgeschlossen, sodass die iterative Anpassung einer inneren Struktur nicht möglich ist.

Andererseits werden geeignete Rechnerwerkzeuge benötigt, um die Beanspruchungen in Bauteilen zu bestimmen und die topologische Grundstruktur zu identifizieren. Auch bei der Berechnung der Beanspruchungen müssen die anisotropen Materialeigenschaften abgebildet werden können. Dazu müssen die Eingabe von richtungsabhängigen Materialdaten sowie eine entsprechend feine Auflösung für die Berechnung möglich sein, um Spannungsspitzen in Folge von starken Kraftumlenkungen abzubilden. Folglich sind eine entsprechend hohe Netzgüte sowie die Möglichkeit zur selektiven Anpassung der Netzdichte notwendig.

Modellieren der Volumenkörper

Bei der Modellierung ist das Ziel der Aufbau von Volumenkörpern, welche im STL-Format in den Bauprozess übergeben werden können. Weiterhin sind die Volumenmodelle Grundlage für alle Optimierungsschritte. Als Rechnerwerkzeug werden CAD (Computer-Aided-Design)-Systeme eingesetzt, da die diskutierten Beschreibungsansätze umgesetzt und die Modelle mit den notwendigen Materialinformationen ergänzt werden können. In der vorliegenden Arbeit wird dazu Autodesk Inventor Professional 2017 verwendet. Dabei wird ein Material mit der Dichte $\rho_{\text{AlSi10Mg}} = 2,67 \text{ g/cm}^3$ für das in der vorliegenden Arbeit verwendete AlSi10Mg-Pulver angelegt. Die Dichte ρ und das Bauteilvolumen V dienen zur Bestimmung des Gewichts m .

Berechnen der Beanspruchungen

Zur Ermittlung der Beanspruchungen für den Festigkeitsnachweis und der Bauteilsteifigkeit infolge Gestalt und elastischer Verformung wird ein Rechnerwerkzeuge benötigt, in welchem die Bauteilfestlegung, die Definition einwirkender Lasten sowie die mathematische Beschreibung der Materialdaten erfolgen können, sodass Rückschlüsse auf das Bauteilverhalten möglich sind. Zur Erfüllung der beschriebenen Kriterien eignet sich besonders die Finite-Element-Methode, da eine näherungsweise Lösung durch endlich kleine Elemente möglich ist, deren physikalisches Verhalten aufgrund ihrer einfachen Geometrie mit bekannten Ansatzfunktionen berechnet werden können.

Eine potentielle Fehlerquelle bei der strukturmechanischen Simulation mittels Finite-Element-Methode sind Vernetzungsfehler. In Hinblick auf die Vernetzung von dünnen, filigranen Strukturen ist eine korrekte Vernetzung zur Berechnung realitätsabbildender Ergebnisse notwendig. Bei einer zu groben Vernetzung in Bereichen von Kanten und Kerben kann es passieren, dass lokale Spannungsspitzen innerhalb eines finiten Elementes liegen und somit nicht dargestellt werden. Eine feine und geglättete Vernetzung oder die Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren ist für innere Strukturen demnach von großer Bedeutung.

Zur Berechnung der Beanspruchungen durch Finite-Element-Methode wird in der vorliegenden Arbeit Ansys Workbench 17.0 verwendet. Im Zuge dessen wird eine Materialdatenbank in einer xml-Datei für die x-, y- und z-Richtung entsprechend der anisotropen Materialeigenschaften für spannungsarmgeglühtes AISi10Mg definiert. Durch die Verwendung der Materialdatenbank kann die Baurichtung während der Simulation berücksichtigt werden. Die Materialdatenbank der Ansys Workbench ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

Eigenschaft	Wert	Einheit
Dichte	2670	kg m ³
<input type="checkbox"/> Orthotrope Elastizität		
E-Modul x-Richtung	7E+10	Pa
E-Modul y-Richtung	7E+10	Pa
E-Modul z-Richtung	6E+10	Pa
Querkontraktionszahl xy	0,33	
Querkontraktionszahl yz	0,33	
Querkontraktionszahl xz	0,33	
Schubmodul xy	2,6315E+10	Pa
Schubmodul yz	2,436E+10	Pa
Schubmodul xz	2,436E+10	Pa
<input type="checkbox"/> Wöhlerlinie über R-Verhältnis	Tabellarisch	
Interpolation	Halblogarithmisch	
Maßstab	1	
Versatz	0	Pa
Zug-Streckgrenze	2,3E+08	Pa
Max. Zugfestigkeit	3,45E+08	Pa

Abbildung 4.4: Materialdatenbank von AISi10Mg in Ansys Workbench 17.0

Für eine korrekte Verwendung der Materialdaten ist darauf zu achten, dass die Koordinatensysteme der Rechnerwerkzeuge für die Modellierung und die Simulation identisch ausgerichtet werden. Ferner muss bei der Modellierung darauf geachtet werden, dass das Koordinatensystem dem Schichtaufbau im In-Prozess entspricht. Ausgehend vom Nullpunkt muss die z-Koordinate in positive Baurichtung zeigen. Eine fehlerhafte Verknüpfung der Koordinatensysteme führt folglich zu falschen Simulationsergebnissen.

Identifizieren der topologischen Grundstruktur

Zum Identifizieren der topologischen Grundstruktur und somit zur Eingrenzung des Wirkraums eines Strukturbauteils kann die Topologieoptimierung eingesetzt werden, da eine optimale Materialverteilung in Abhängigkeit einer Zielfunktion beschrieben wird. Somit können nicht

beanspruchte Bereiche im Bauteil identifiziert und schließlich reduziert werden. Die Zielfunktion ist folglich die Minimierung des Gewichts bei vorgegebenen maximalen Spannungen, welche sich am Ausgangsmodell orientieren oder den Eigenschaften des verwendeten Materials entsprechen. Neben der Betrachtung lokaler Festigkeiten im Bauteil ist die Berücksichtigung der Verformungen in Abhängigkeit der Bauteilgestalt und Materialelastizität unabdingbar. Als Rechnerwerkzeug wird in der vorliegenden Arbeit Ansys Workbench 17.0 eingesetzt. Für die Materialdatenbank werden die Daten für spannungsarmgeglühtes AiSi10Mg aus Abbildung 4.4 verwendet.

Eingliedern der Rechnerwerkzeuge im systematischen Vorgehen

Zur Detaillierung des virtuellen Modells werden somit Rechnerwerkzeuge zum Modellieren von Volumenkörpern, zum Berechnen des mechanischen Verhaltens mittels der Finite-Element-Methode sowie zur Topologieoptimierung auf Basis der Beanspruchungen eingesetzt. Wie in Abbildung 4.5 dargestellt, werden die Rechnerwerkzeuge den Arbeitsschritten zugeordnet.

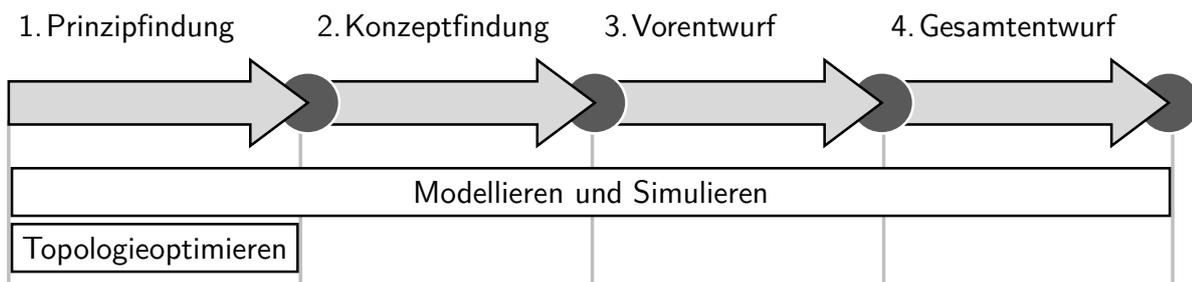


Abbildung 4.5: Eingliederung von Rechnerwerkzeugen im systematischen Vorgehen

Die Topologieoptimierung wird besonders in frühen Arbeitsschritten eingesetzt, um relevante Lastpfade und somit die topologische Grundstruktur zu identifizieren. Mit den Simulationsergebnissen erfolgt die Festlegung des Wirkraums. Die CAD-Modellierung und FEM-Simulation ist entlang des gesamten Vorgehens relevant. Bereits in der Prinzipfindung müssen die Optimierungsergebnisse rekonstruiert und hinsichtlich deren Eigenschaften validiert werden. Die Modellierung und Absicherung der mechanischen Eigenschaften kommt wiederkehrend bis hin zum Gesamtentwurf zum Einsatz. Dabei ist nach jedem Arbeitsschritt eine Bewertung des Optimierungserfolges notwendig, sodass über den Abschluss oder die iterative Überarbeitung des Arbeitsschritts entschieden werden kann. Die Auswertung der Simulation und ferner die Auswahl eines Modells für die weitere Optimierung erfolgt anhand des Spannungs-Gewichts-Verhältnisses. Zur Gegenüberstellung der virtuellen Modelle wird eine Auswahlmatrix zur Bereitstellung von Handlungsstrategien definiert, welche in Abbildung 4.6 dargestellt ist.

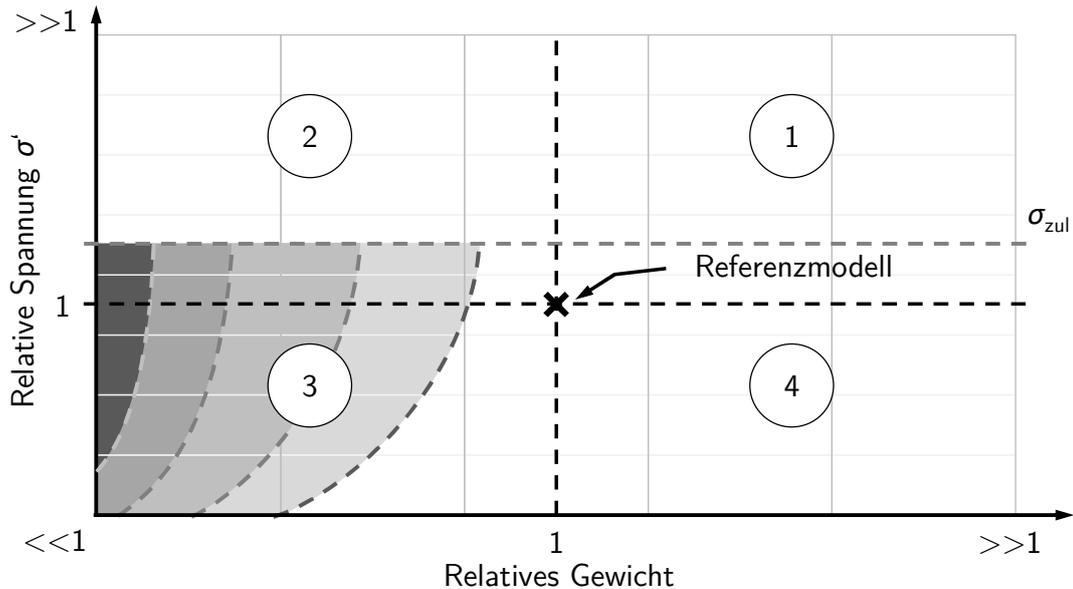


Abbildung 4.6: Auswahlmatrix für virtuelle Strukturbauteile

Basierend auf den Simulationsergebnissen eines Referenzmodells, z.B. das Ausgangsmodell, oder vorgegebenen Zielfunktionen kann das relative Gewicht und die relative Spannung dargestellt werden. Dadurch lassen sich vier Quadranten ableiten, welche Handlungsstrategien zur Optimierung definieren.

- **1. Quadrant:** Eine Optimierung ist mit hohem Aufwand verbunden, da die Spannungen und das Gewicht reduziert werden müssen. Grundlegend ist zu prüfen, ob starke Kraftumlenkungen zu Spannungsspitzen führen. Diese Singularitäten können oft durch Verrundungen reduziert werden. Anderenfalls kann die Dimensionierung zur Spannungsreduktion angepasst werden, was jedoch mit der Erhöhung des Bauteilgewichts verbunden ist.
- **2. Quadrant:** Das Modell erfüllt bereits das Gewichtskriterium, die Spannungen sind jedoch zu hoch. Zur Optimierung sollte geprüft werden, ob starke Kraftumlenkungen zu lokalen Spannungsspitzen führen, sodass die Ergebnisse in den 3. Quadranten verschoben werden. Anderenfalls sollte die Bauteildimensionierung angepasst werden. Neben der Spannungsreduzierung steigt jedoch das relative Gewicht. Eine Optimierung ist folglich bis zu einem relativen Gewicht < 1 sinnvoll.
- **3. Quadrant:** Beide Optimierungskriterien sind bereits erfüllt. Das Bauteil kann dahingehend überprüft werden, das relative Gewicht unter Einhaltung der zulässigen Spannungen weitestgehend zu reduzieren. Nach Erreichen eines Gewichtsoptimums ist weiterhin die Reduzierung der Spannungen zu prüfen.
- **4. Quadrant:** Das Modell erfüllt bereits das Spannungskriterium, das Gewicht ist jedoch zu hoch. Durch die Materialreduktion ist eine Gewichtsoptimierung unter Beachtung der Spannungen zu prüfen. Eine Optimierung ist bis zu einer relativen Spannung ≤ 1 sinnvoll.

4.3 Gestaltungsrichtlinien für innere Strukturen

Gestaltungsrichtlinien beschreiben einzuhaltende Grenzwerte zum Gestalten von virtuellen Modellen. Diese werden in Form von Informationsspeichern, z.B. Checklisten oder Katalogen, dargestellt. Für Selektives Laserstrahlschmelzen existieren unterschiedliche Arten von Gestaltungsrichtlinien, die Gestaltparameter des Bauteils (z.B. Bohrungen oder Wandstärken), das Bauteil im Gesamten (z.B. Positionierung oder Belastbarkeit) oder vor- und nachgelagerten Prozesse (z.B. Datenqualität oder mechanische Nachbearbeitung) betreffen.

Tabelle 4.1 zeigt eine Gliederung von Gestaltungsrichtlinien für Selektives Laserstrahlschmelzen. Der vollständige Richtlinienkatalog ist in Anhang C dargestellt. Es werden günstige und ungünstige Umsetzungen, eine Beschreibung und wenn möglich konkrete Werten angegeben. Zur Strukturierung werden die Richtlinien aus Tabelle 4.1 in 12 Gruppen zusammengefasst.

Wie im Stand der Forschung beschrieben, ist bei der Anwendung von Gestaltungsrichtlinien darauf zu achten, dass sich diese teilweise widersprechen oder stark beeinflussen. Folglich ist es meist nicht möglich, alle Gestaltungsrichtlinien für ein Modell anzuwenden. Vielmehr muss eine Abschätzung von geeigneten Gestaltungsrichtlinien für die individuelle Problemstellung erfolgen. Dabei ist darauf zu achten, dass einige Richtlinien frühzeitig umgesetzt werden sollten, da gegebenenfalls andere Gestaltungsrichtlinien darauf aufbauen. Ein Beispiel ist die Bauteilorientierung. Diese beeinflusst minimale Wandstärken und Lochdurchmesser, da im Bauprozess unterschiedliche Minimalwerte in x - und y - als in z -Richtung umsetzbar sind. Zur Festlegung eines Lochdurchmessers muss demnach die Orientierung des Bauteils bekannt sein.

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die Abhängigkeiten der Gestaltungsrichtlinien zueinander bewertet. Dazu wird ein paarweiser Vergleich durchgeführt. Ziel ist die Identifizierung maßgebender Richtlinien, welche im Gestaltungsprozess frühzeitig festgelegt werden sollten, da weitere Richtlinien darauf aufbauen, welche nur in Abhängigkeit definiert werden können. Tabelle 4.2 zeigt den Paarweisen-Vergleich auf Basis der 12 Gruppierungen. Dabei wird bewertet, ob die Richtliniengruppe aus einer Spalte die Richtliniengruppe aus einer Zeile beeinflusst. Die Hauptdiagonale zeigt den Zusammenhang identischer Richtliniengruppen und wird folglich nicht bewertet. Durch Aufsummieren der Korrelationsbeziehungen werden die Beeinflussungen quantifiziert. Beispielsweise ist erkennbar, dass die Orientierung eines Bauteils nahezu alle Gestaltungsrichtlinien beeinflusst und stark mit den Kriterien der Positionierung und Anordnung in Wechselwirkung steht. Eine hohe Anzahl von Korrelationsbeziehungen ist demnach ein Indikator für eine hohe Priorität im Gestaltungsprozess.

Tabelle 4.1: Gliederung von Gestaltungsrichtlinien für Selektives Laserstrahlschmelzen

#	Gliederung	Richtlinie	#	Gliederung	Richtlinie
1	a) Wände	Wandstärke	17	g) Löcher/ Bohrungen	Durchmesser
2		Neigungswinkel	18		Wandstärke
3	b) Kavitäten	Gestalt	19		Neigungswinkel
4		Reinigungs- öffnungen	20		Spalte
5		Kanäle	21		Aufmaß
6	c) Material- verteilungen	Querschnitts- angleichung	22	h) Nach- bearbeitung	Bohrungen
7	d) Stäbe	Durchmesser	23		Zugänglichkeit
8		Neigungswinkel	24		Einspannung
9	e) Kanten	Abbildungs- genauigkeit	25		Referenzflächen
10		Rundungen	26	i) Orientierung	Belastungs- gerecht
11	f) Stütz- strukturen	Gestalt	27		Knickung
12		Zugänglichkeit	28		Treppenstufen
13		Ellipsen	29		xy Platzierung
14		Überhänge	30	Maßhaltigkeit	
15	Anbindung	31	j) Anordnung	Abstand	
16	Downskin- Winkel			32	Versatz
				33	Schachtelung
34	k) Positio- nierung	Pulvervorrat	l) Größe	Bauraum	
35				36	Schichthöhe
36					

Basierend auf den Korrelationen werden vier chronologische Ordnungen definiert. Dabei werden Richtlinien mit einer stark auswirkenden Beeinflussung (Richtlinie wirkt sich auf andere

Richtlinien aus) und geringer einwirkenden Beeinflussung (Richtlinie wird durch andere Richtlinien limitiert) der 1. Ordnung zugeordnet. Geringe auswirkende und stark einwirkende Beeinflussungen entsprechen der 4. Ordnung. Mischformen sind zwischenliegend eingeordnet. Wie in Abbildung 4.7 dargestellt, werden zur Gliederung die vier Ordnungen Platzieren, Dimensionieren, Reinigen und Abstützen eingeführt. Die Bauteilgröße wird der 1. Ordnung zugeordnet, da die Berücksichtigung der grundsätzlichen Herstellbarkeit in höherer Ordnung nicht zielführend ist. Die dargestellten Nummerierungen zeigen die Zuordnung zu den Gestaltungsrichtlinien im Richtlinienkatalog, siehe Anhang C.

Tabelle 4.2: Korrelationsmatrix der Gliederung von Gestaltungsrichtlinien

Cluster	a) Wände	b) Kavitäten	c) Materialverteilung	d) Stäbe	e) Kanten	f) Stützstruktur	g) Löcher / Bohrungen	h) Nachbearbeitung	i) Orientierung	j) Anordnung	k) Positionierung	l) Größe	Gesamt
Spalte x beeinflusst Zeile y													
a)		X	X	-	-	-	X	X	X	-	-	X	6
b)	-		-	-	-	-	-	-	X	-	-	X	2
c)	X	X		X	-	-	X	-	-	-	-	X	5
d)	-	-	X		-	-	-	X	X	-	-	X	4
e)	-	X	-	-		-	-	X	X	-	-	X	4
f)	X	X	-	X	-		X	X	X	-	-	X	7
g)	-	X	X	-	-	-		X	X	X	-	X	6
h)	X	-	-	-	-	-	X		X	X	-	X	5
i)	-	-	-	-	-	-	-	X		X	X	X	4
j)	-	-	-	-	-	-	-	-	X		X	X	3
k)	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X		X	3
l)	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X		3
Gesamt	4	5	3	2	0	0	4	5	10	5	3	11	

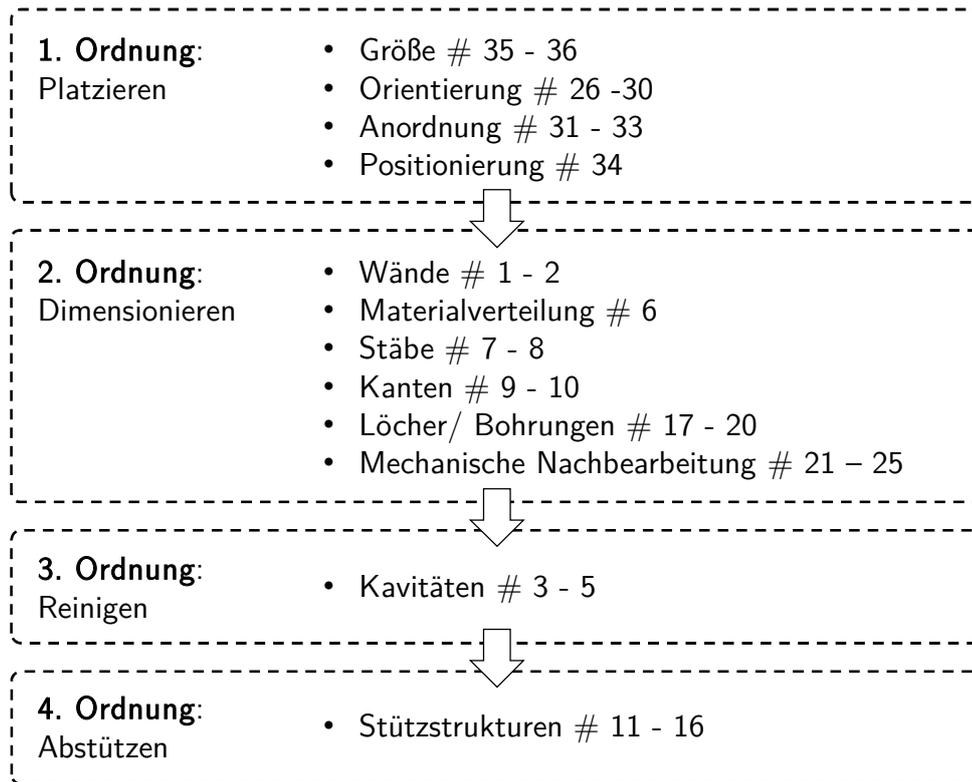


Abbildung 4.7: Chronologische Ordnung für Gestaltungsrichtlinien innerer Strukturen

Durch die Beschreibung der vier Ordnungen ist es möglich, frühzeitig ein Optimierungsziel festzulegen. Bei der Platzierung kann z.B. die Optimierung hinsichtlich minimaler Stützstrukturen, der Fertigungszeit, der Maßhaltigkeit, der Belastbarkeit infolge anisotropem Materialverhalten, der Reduzierung von Nachbearbeitungsaufwand oder der Minimierung der Fehlerwahrscheinlichkeit im Fertigungsprozess verfolgt werden. Dabei wird meist ein multikriterielles Ziel angestrebt. Die Erfüllung aller Kriterien ist in der Regel nicht möglich.

Die chronologische Ordnung ist als sequentielle Abfolge dargestellt, bei welcher die Anwendung der Gestaltungsrichtlinien aufeinander aufbauen. Anhand dieser Struktur wird deutlich, dass Änderungen in höheren Ordnungen mit erhöhtem Änderungsaufwand verbunden sind. Wenn eine Konstruktion z.B. hinsichtlich der Reinigung ausgestaltet ist, die Bauteilorientierung jedoch geändert wird, muss zwangsläufig die Dimensionierung erneut überprüft werden.

Wie im systematischen Vorgehen beschrieben, sind Gestaltungsrichtlinien maßgebend für den Gesamtentwurf zu berücksichtigen. Dabei wird das belastungsoptimierte Modell hinsichtlich der Herstellbarkeit überprüft. Die chronologische Ordnung verdeutlicht jedoch, dass einige Gestaltungsrichtlinien frühzeitiger festgelegt werden sollten, um Iterationen zur Modellanpassung zu vermeiden. Beispielsweise muss ein Bauteil durch die Orientierung und Positionierung an die Größe der Prozesskammer angepasst werden. Auch kann die Bauteilplatzierung eine

Auswirkung auf die Orientierung der inneren Struktur haben. Weiterhin ist bei der Auswahl einer inneren Struktur bereits auf dessen Dimensionierung zu achten. Vor diesem Hintergrund zeigt Abbildung 4.8 die Zuordnung der Gestaltungsrichtlinien zu den Arbeitsschritten im systematischen Vorgehen.

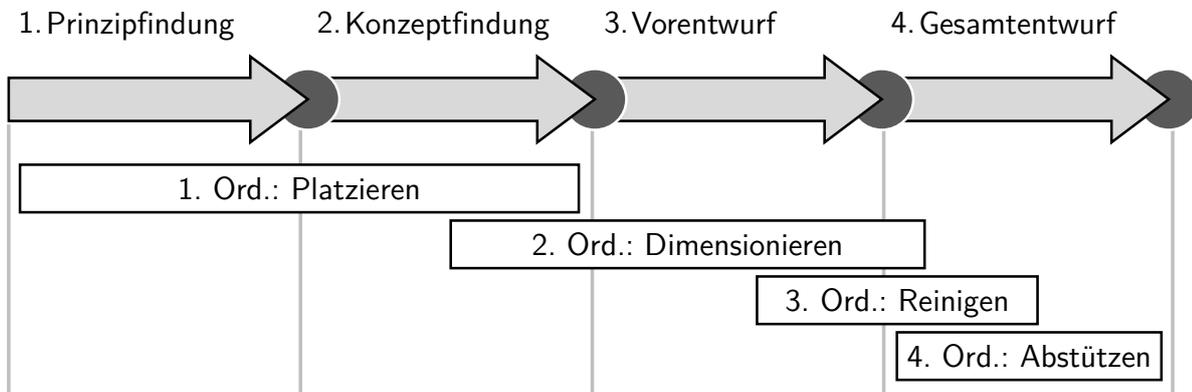


Abbildung 4.8: Eingliederung von Gestaltungsrichtlinien im systematischen Vorgehen

Neben den Wechselwirkungen der Gestaltungsrichtlinien haben die Material- und Prozessparameter aus dem In-Prozess einen Einfluss auf deren Ausprägung. Durch variierende Eigenschaften, wie beispielsweise dem Laserdurchmesser, der Schmelztemperatur des Materials oder der Korngröße des Pulvers, entstehen Wertebereiche für die jeweiligen Restriktionen. Demzufolge muss für die Verwendung von Gestaltungsrichtlinien eine Adaption an das verwendete Parameterset erfolgen. Tabelle 4.3 fasst relevante Einflussfaktoren zusammen.

Tabelle 4.3: Einflussfaktoren auf Gestaltungsrichtlinien

Relevante Einflussfaktoren	
Prozess	Scangeschwindigkeit, Laserdurchmesser, Schutzgas, Bauraumgröße, Schichtdicke, Überlapp
Material	Korngröße, Schmelztemperatur, Feuchtigkeit, Anteil an recyceltem Pulver, Legierungszusammensetzung, Reinheit

Die Bereitstellung von generellen Gestaltungsrichtlinien unter Angabe konkreter Zahlenwerte für Selektives Laserstrahlschmelzen oder gar die additive Fertigung ist folglich nicht möglich, sodass eine Adaption an die gewählten Parameter erfolgen muss. Für die vorliegende Arbeit sind die Gestaltungsrichtlinien für die Verarbeitung von AlSi10Mg auf einer EoSint M280 Anlage (vgl. Abschnitt 7.1) spezifiziert.

In Abbildung 4.9 werden die Gestaltungsrichtlinien der vier diskutierten Ordnungen Platzieren, Dimensionieren, Reinigen und Abstützen unter Angabe minimaler und maximaler Grenzwerte dargestellt.

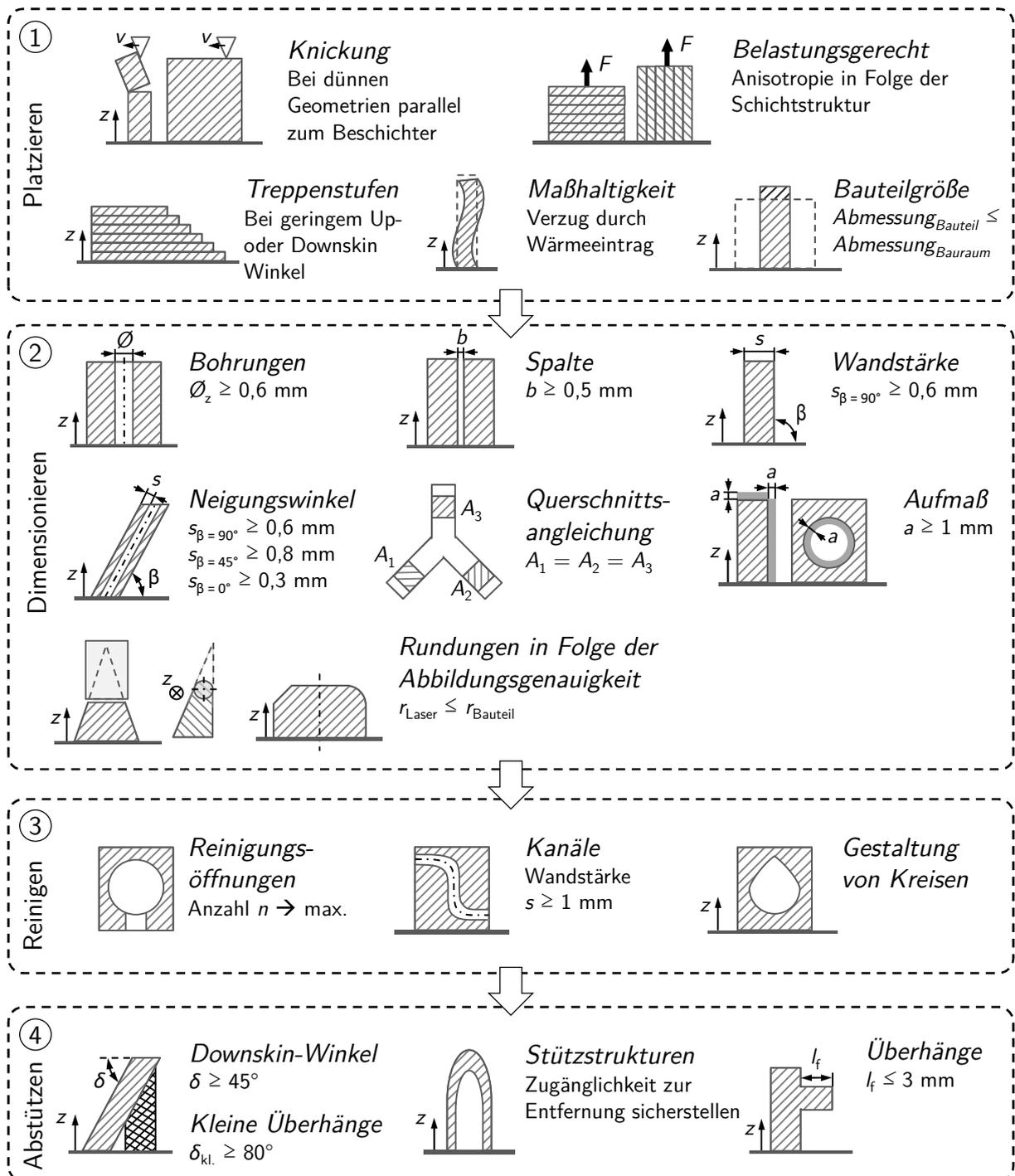


Abbildung 4.9: Gestaltungsrichtlinien für innere Strukturen

5 Anwendungen innerer Strukturen

Zum Gestalten von gewichtsoptimierten Strukturbauteilen durch innere Strukturen müssen grundlegende Informationen über deren mechanische Anwendungen vorliegen. Hierfür werden virtuelle Prüfkörper mit inneren Strukturen hinsichtlich vorherrschender Belastungsfälle untersucht. Dabei kommen die beschriebenen Rechnerwerkzeuge aus Abschnitt 4.2 zum Einsatz.

In Abschnitt 5.1 erfolgt die Simulation innerer Strukturen zur Bestimmung zweckmäßiger Anwendungen. Nach der Analyse virtueller Prüfkörper werden die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Strukturen in einem Konstruktionskatalog zusammengefasst.

In Abschnitt 5.2 werden Fertigungseinflüsse für innere Strukturen beschrieben. Neben der Berücksichtigung von Gestaltungsrichtlinien zur Sicherstellung der Herstellbarkeit sind diese bei der Gestaltung und Auslegung einzubeziehen.

5.1 Simulation innerer Strukturen

Für die Untersuchungen werden Strukturen aus Bionik-Katalogen nach *Nachtigall* und *Speck et al.* ausgewählt, welche den Gruppierungen der duplizierten und selbstähnlichen Strukturen zugeordnet sind [Nach02, Spec04]. Wie in Abbildung 5.1 dargestellt, wird dafür ein Gestaltungsraum in einem virtuellen Prüfkörper definiert, in welchem die inneren Strukturen eingebracht werden.

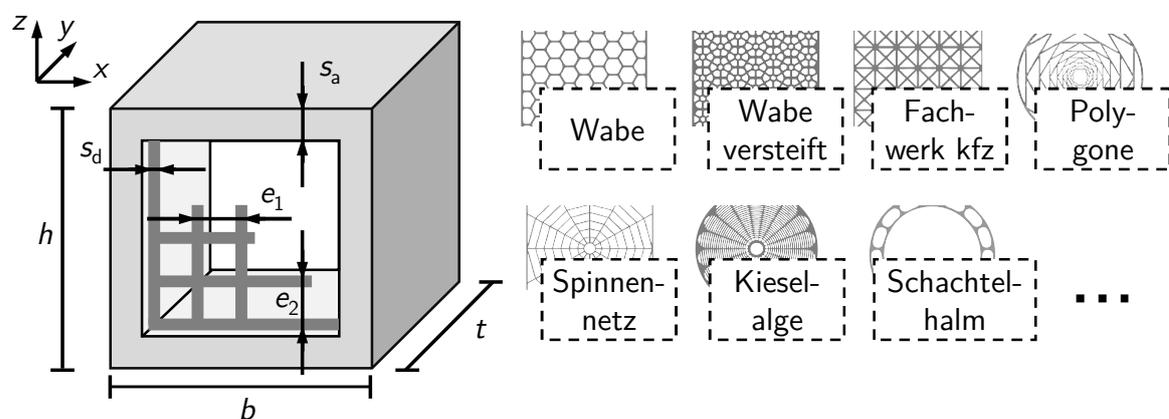
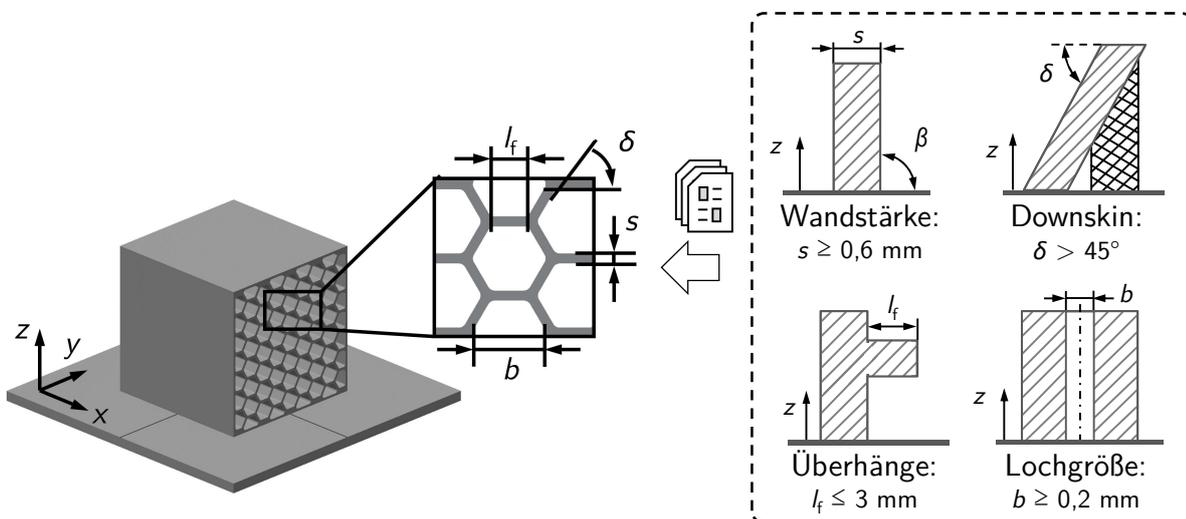


Abbildung 5.1: Virtueller Prüfkörper für innere Strukturen

Dabei werden die inneren Strukturen von vier Seiten mit einer soliden Trennschicht umschlossen, sodass die Pulverentfernung im Post-Prozess möglich ist und eine gleichmäßige Krafteinleitung auf planen Flächen mit identischem Querschnitt erfolgen kann.

Die Prüfkörper haben die Hauptmaße $h = b = t = 30$ mm. Weiterhin werden zylindrische Modelle mit $\varnothing = 30$ mm und $h = 100$ mm aufgebaut, um radial aufgebaute Strukturen zu untersuchen. Die Trennschichten werden entsprechend der Gestaltungsrichtlinien für minimale Wandstärken auf $s_a = 0,6$ mm festgelegt. Die Elementgröße wird mit $e_1 = e_2$ modelliert. Der Parameter s_d definiert den Durchmesser oder die Wandstärke einer Struktur, welche im Rahmen der Untersuchungen variiert werden. Abbildung 5.2 zeigt die verwendeten Parameter sowie die Limitierung anhand der Gestaltungsrichtlinien am Beispiel einer Wabenstruktur. So ist bei der Fertigung einer Wabenstruktur in der dargestellten Orientierung auf maximale Winkel und Überhänge zu achten, damit keine Stützstrukturen benötigt werden. Weiterhin müssen minimale Werte zur Herstellbarkeit von Wänden und Löchern eingehalten werden. Für die Untersuchungen werden weiterhin die Auswirkungen bei Anpassung der Elementgröße $e_1 = e_2$ sowie der Wandstärken und Durchmesser s_d berücksichtigt. Diese werden in drei Dimensionierungen betrachtet, welche als feines, mittleres und grobes Parameterset definiert sind.



	Fein	Mittel	Grob
s_d	0,6 mm	0,8 mm	1 mm
s_a	0,6 mm	0,6 mm	0,6 mm
$e_1 = e_2$	3 mm	4 mm	5 mm
$h = b = t$	30 mm	30 mm	30 mm

Abbildung 5.2: Gestaltungsrichtlinien und Parameter zur Dimensionierung der Prüfkörper

Die virtuellen Prüfkörper werden hinsichtlich verschiedener Belastungen untersucht. Abbildung 5.3 zeigt das Vorgehen bei der Simulation. Als Eingangsgröße wird die Materialdatenbank für AlSi10Mg aus Abschnitt 4.2 eingestellt. Im zweiten Schritt erfolgt der Import der virtuellen Prüfkörper im STL-Format mit feiner Triangulation. Anschließend erfolgt die Vernetzung in der Simulationsumgebung. Dabei werden die Kantenbereiche der inneren Strukturen mit einem höheren Detaillierungsgrad versehen, um Spannungsspitzen in Folge von Kerbwirkung abzubilden. Das vernetzte Modell wird mit einer Last statisch beansprucht. Wie in Abbildung 5.3 dargestellt, werden dabei die Belastungsfälle Druck F_D , Zug F_Z sowie Biegung M_b aufgebracht. Weiterhin erfolgt die richtungsabhängige Untersuchung der Prüfkörper, indem eine Einspannung der xy -Ebene sowie in der yz -Ebene simuliert wird. Die Simulation wird für jede Struktur entsprechend der Parametersets nach Abbildung 5.2 durchgeführt.

Als Ergebnisse werden die maximale von Mises Spannung σ'_{\max} , die Dehnung ε sowie die maximalen Verschiebung u einer inneren Struktur in Abhängigkeit der einwirkenden Last in einem Konstruktionskatalog zusammengefasst. Weiterhin werden das relative Gewicht des Prüfkörpers zum Vollmaterial (Würfels $m = 72$ g, Zylinder $m = 190$ g) sowie die geeignete Einbauform dargestellt, welche in eckig oder rund unterschieden werden kann. Die Ergebnisse werden für jedes Parameterset zusammengetragen, sodass insgesamt drei Konstruktionskataloge aufgebaut werden, welche im Anhang D dargestellt sind.

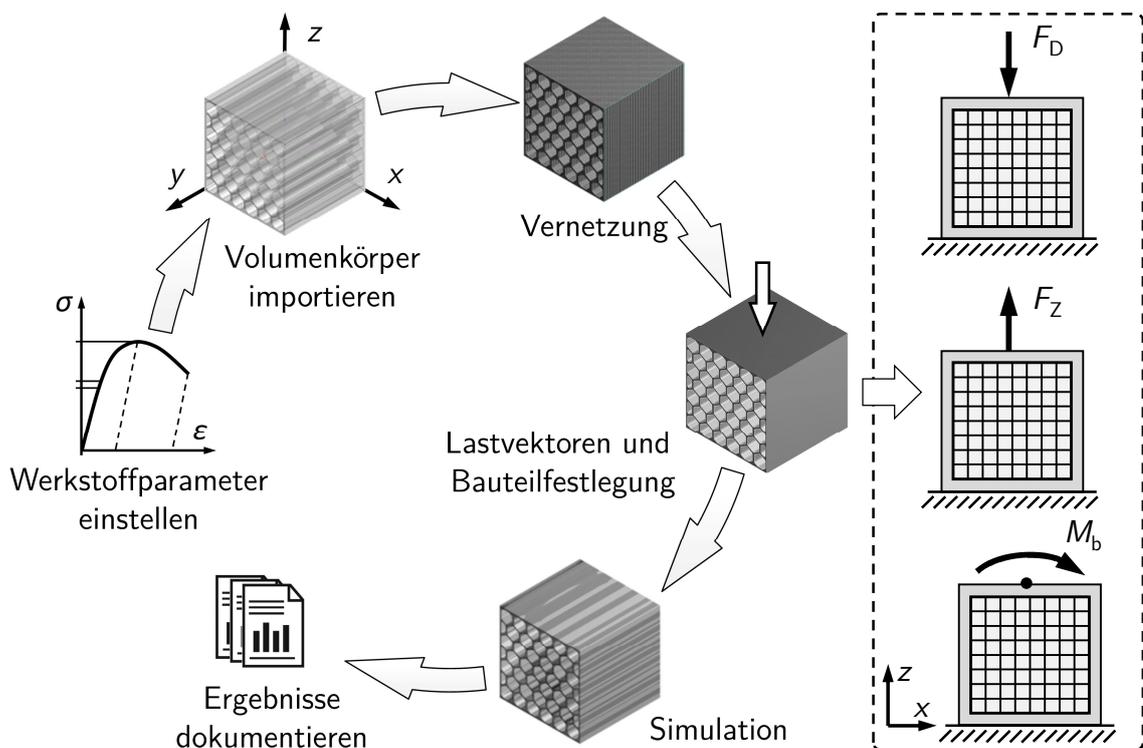


Abbildung 5.3: Vorgehen zur Simulation der Prüfkörper

Abbildung 5.4 zeigt die in der vorliegenden Arbeit untersuchten inneren Strukturen für das feine Parameterset. Der Gliederungsteil des dargestellten Konstruktionskatalogs besteht aus zwei Ebenen. Grundlegend wird entsprechend Abschnitt 2.5 die Eingruppierung nach duplizierten oder selbstähnlichen Strukturen unterschieden. In der zweiten Gliederungsebene wird die Art der Struktur definiert, welche sich in zweidimensional extrudierte oder räumliche Strukturen unterscheiden. Im Hauptteil werden die Strukturen benannt sowie anhand einer Skizze visualisiert. Der Zugriffsteil beschreibt die mechanischen Eigenschaften als auswählerleichternde Merkmale zur Selektion einer Struktur. Somit kann eine Struktur ausgewählt werden, wenn die mechanische Eigenschaft als Zielfunktion vorgegeben ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass die gewählten Parametersets zu unterschiedlichen Gewichten sowie mechanischen Eigenschaften eines Prüfkörpers führen. Dabei kann festgehalten werden, dass bei zunehmender Detaillierung einer Struktur das Gewicht ansteigt. Eine Ausnahme stellt der Schachtelhalm dar, da die Randschicht bei zunehmender Detaillierung dünner wird. Weiterhin kann festgehalten werden, dass die Spannungen, Verformungen sowie Dehnungen bei zunehmendem Gewicht abnehmen. Zur Dimensionierung einer Struktur ist demnach ein Optimierungsziel festzulegen. Soll z.B. das Gewicht reduziert werden, müssen einzuhaltende Spannungen, Verformungen und Dehnungen definiert sein.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, welche Belastungsart und -richtung für die jeweiligen Strukturen zu bevorzugen sind. Folglich ist es möglich eine Aussage über geeignete Belastungen zu treffen, um die maximale Steifigkeit einer Struktur zu nutzen. Weiterhin ist es möglich eine Struktur zu selektieren, wenn die Belastung bekannt ist. Dabei wird deutlich, dass die relativen Unterschiede der mechanischen Eigenschaften einer Struktur für die unterschiedlichen Parametersets korrelieren.

Die Ergebnisse können folglich, wie in Tabelle 5.1. dargestellt, zusammengefasst werden. Dafür wird die Eignung einer Struktur für Biegung, Zug und Druck sowie für das Gewicht als Rangfolge dargestellt. Weiterhin wird die Hauptanwendung jeder Struktur angegeben. Zur Auswahl einer Struktur muss folglich definiert werden, welches Optimierungsziel verfolgt wird. Somit ist zu beurteilen, ob z.B. eine maximale Gewichtsreduktion durchgeführt oder eine maximale Biegesteifigkeit erreicht werden soll.

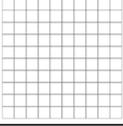
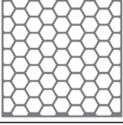
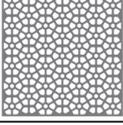
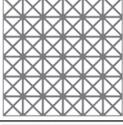
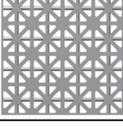
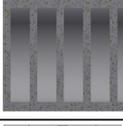
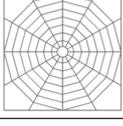
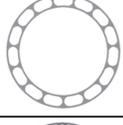
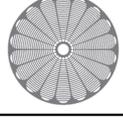
Gliederungsteil		Hauptteil			Zugriffsteil		Eigenschaft (YZ)	
Gruppe	Art	#	Struktur	Bild	rel. Gewicht [%]	Form	VS	GV
							[Mpa]	[µm]
Duplizierte Strukturen	Flächig	1	Streben		28	Eckig	188,28	1050
		2	Quader		31	Eckig	44,26	11,9
		3	Wabe		28	Eckig	21,662	8,2167
		4	Wabe versteift		65	Eckig	9,55	1,898
	Räumlich	5	Fachwerk kfz		19	Eckig	32,335	11,098
		6	Fachwerk krz		42	Eckig	0,023	4,47
		7	Bambus		51	Rund	0,025	171,32
Selbstähnliche Strukturen	Flächig	8	Spinnennetz		20	Eckig	0,4185	24,944
		9	Schachtelhalm		17	Rund	0,0089	574,87
		10	Polygone		34	Rund	0,0061	375,59
		11	Kieselalge		64	Rund	0,0051	235,14

Abbildung 5.4: Konstruktionskatalog mechanischer Eigenschaften innerer Strukturen

Tabelle 5.1: Mechanische Anwendungen für innere Strukturen

Innere Struktur	Rang Biegung	Rang Zug/ Druck	Rang Gewicht	Hauptanwendung
Vollmaterial	-	-	-	-
Streben	10	11	2	Biegung
Quader	7	5	3	Biegung, Druck
Wabe	4	3	8	Biegung, Druck
Wabe versteift	1	1	11	Biegung, Druck
Fachwerk kfz	11	4	1	Biegung
Fachwerk krz	8	2	3	Biegung, Druck
Bambus	2	6	9	Biegung, Torsion
Spinnennetz	9	7	3	Torsion
Schachtelhalm	5	10	6	Torsion, Biegung
Polygone	6	9	7	Biegung
Kieselalge	3	8	10	Biegung, Torsion

5.2 Fertigungseinflüsse

Die mechanische Eignung einer inneren Struktur wird durch Charakteristiken aus dem Fertigungsverfahren beeinflusst. Neben den generellen Eigenschaften des Selektiven Laserstrahlschmelzens, also dem anisotropen Materialverhalten und relevanten Gestaltungsrichtlinien, existieren Einflüsse in Folge der Miniaturisierung und Fertigung dünnwandiger Strukturen, welche folgend dargestellt werden.

Festigkeit infolge von Kerbwirkungen

Ein relevanter Einflussfaktor sind lokale Spannungsspitzen infolge von gesteigerten Kerbwirkungen. Generell müssen bei der Modellierung Radien und Rundungen vorgesehen werden, um starke Kraftumlenkungen vorzubeugen. Ferner muss eine entsprechend feine Vernetzung der Übergangsbereiche in der Simulation realisiert werden, um Spannungserhöhungen in filigranen

Bereichen durch die finiten Elemente zu erfassen. Weiterhin ist die Abbildungsgenauigkeit einer Struktur im Selektiven Laserstrahlschmelzen zu beachten. Bei zunehmender Miniaturisierung von Strukturelementen entstehen filigrane Geometrien, die aufgrund von Fertigungsrestriktionen (z.B. Laserdurchmesser oder Größe der Pulverkörnung) nicht umgesetzt werden können. Folglich entspricht das gefertigte Bauteil nicht dem virtuellen Modell, sodass die Simulationsergebnisse ihre Gültigkeit verlieren. Demnach sind untere Grenzwerte zu beachten.

Bauteilreinigung

Die Umsetzung von inneren Strukturen im Selektiven Laserstrahlschmelzen wird weiterhin durch die Entfernung von überschüssigem Pulver im Post-Prozess limitiert. Geschlossene Kavitäten enthalten nach dem Fertigungsprozess nicht aufgeschmolzenes Material. Eine Gewichtsreduktion des Bauteils kann folglich nur durch Entfernen des Pulvers realisiert werden. Zur Bauteilreinigung sind - entsprechend der Gestaltungsrichtlinien - Reinigungsöffnungen im Modell vorzusehen. Dabei müssen alle Kavitäten durch entsprechende Öffnungen unterbrochen werden. Die Einbringung von Reinigungsöffnungen erfolgt in Abhängigkeit der spezifischen Problemstellung. Grundsätzlich gilt, je mehr Reinigungsöffnungen vorliegen, desto besser kann überschüssiges Material entfernt und das tatsächliche Gewicht an die Berechnung angenähert werden. Gleichzeitig steigt jedoch die Kerbwirkung in der Bauteiloberfläche. Folglich muss eine Abschätzung zwischen Reinigungseignung und Kerbwirkung getroffen werden.

Nachbearbeitung

Laserstrahlgeschmolzene Bauteile unterliegen einem Einfluss aus der Oberflächenrauheit, da diese die mechanischen Eigenschaften, gerade in Hinblick auf dynamische Lasten, beeinflussen kann. Neben thermischen Prozessen werden überwiegend mechanische Prozesse zur nachträglichen Manipulation der Materialeigenschaften eingesetzt. Ferner können optische, z.B. Laserpolieren, oder chemische Prozesse, z.B. Ätzen, nachgelagert sein. Im Vergleich zu soliden Bauteilen kann die Oberflächenrauheit bei inneren Strukturen nur mit hohem Aufwand im Post-Prozess beeinflusst werden, da etwaige Prozesse für Kavitäten nur bedingt einsetzbar sind. Besonders bei starker Miniaturisierung überwiegt der Einfluss der Oberflächenrauheit im Vergleich zur Querschnittsfläche eines Strukturelementes.

6 Gewichtsoptimierung eines Demonstrators

Als Demonstrator wird die Tretkurbel eines Fahrrads untersucht und entsprechend der entwickelten Methode zur Gewichtsoptimierung durch innere Strukturen angepasst.

In Abschnitt 6.1 werden Anforderungen an eine neue Bauteilgeometrie geklärt. Dafür wird ein Ausgangsmodell, welches für das Gießverfahren ausgelegt wurde, untersucht. Es erfolgt die Betrachtung der geometrischen Normungen sowie der Montage- und Nutzungsinformationen. In einer Anforderungsliste werden gestaltungsrelevante Anforderungen zusammengefasst.

In den Abschnitten 6.2 und 6.3 wird das gestalten neuer Bauteilgeometrien unter Berücksichtigung der Anforderungen und Möglichkeiten des Selektiven Laserstrahlschmelzens beschrieben. Die Gestaltung ist in zwei Abschnitte gegliedert. Einerseits erfolgt die Einbringung einer geeigneten inneren Struktur in einen bestehenden Wirkraum, bei welchem die Schnittstellen sowie die Bauteilhülle dem Ausgangsmodell entsprechen. Folglich wird bei der Herangehensweise im systematischen Vorgehen der Startpunkt auf die Konzeptfindung gelegt. Weiterhin wird ein Modell mit erweitertem Wirkraum aufgebaut, bei welchem lediglich die Schnittstellen dem Ausgangsmodell entsprechen. Hierbei erfolgt die ganzheitliche Betrachtung des systematischen Vorgehens, sodass ebenfalls die Prinzipfindung berücksichtigt wird.

In Abschnitt 6.4 werden die Optimierungsergebnisse der beiden Herangehensweisen und somit der neuen Bauteilgeometrien zusammengefasst und denen des Ausgangsmodells gegenübergestellt.

6.1 Klären der Anforderungen

Eine Tretkurbel dient der Kraftweiterleitung der wirkenden Last durch den Benutzer auf die Antriebseinheit. Dabei definieren die Lagerungen für das Pedal und das Tretlager die relevanten Wirkflächen zur Kraftaufnahme. Zur Klärung der Anforderungen wird ein Referenzmodell erstellt. Unter Verwendung von *DIN 345* und *ISO 6695* wird das Ausgangsmodell, wie in Abbildung 6.1 dargestellt, aufgebaut [DIN345, ISO6695]. Eine technische Zeichnung spezifiziert die Gestalt der Tretkurbel, dargestellt in Anhang E.



Abbildung 6.1: Komponentendarstellung der Kurbelgarnitur eines Fahrrads

Eine Tretkurbel ist geometrisch durch drei Haupt- und Anschlussmaße definiert. Die Lagerung des Pedals wird als Durchgangsbohrung mit dem Durchmesser $\varnothing_{\text{Pedal}} = 12,93$ mm ausgeführt. Der Sitz des Tretlagers ist durch einen konischen Vierkant definiert. Die dritte relevante Größe ist der Abstand zwischen den Lagerstellen, welche als gängige Länge $l_0 = 170$ mm aufweist [DIN345, ISO6695]. Eine Tretkurbel ist für Lasten $F_{\text{DIN}} = 1.500$ N ausgelegt [DIN345]. Kritische Lasten können weiterhin vereinzelt bis maximal $F_{\text{max}} = 2.250$ N auftreten [Sull13].

Das virtuelle Ausgangsmodell wird, wie in Abbildung 6.2 schematisch dargestellt, in die Simulationsumgebung importiert. Zur Festlegung des Modells wird das Tretlager als feste Einspannung definiert. Die Lagerstelle der Pedale wird mit dem Lastvektor $F_{\text{max}} = 2.250$ N beaufschlagt, sodass eine Sicherheit für die Auslegung bereits in der Lastannahme berücksichtigt ist. Die Krafteinleitung wird entsprechend einer Bolzenlast am Lagerzapfen definiert, um lokale Spannungsspitzen vorzubeugen. Dabei wird für die weiteren Untersuchungen die Anisotropie des Modells so gewählt, dass die z-Koordinate der Tretkurbel in positive Aufbaurichtung zeigt. Dadurch kann eine minimale Bauhöhe erzielt, die Maßhaltigkeit der Lagerstellen erhöht und der mechanische Nachbearbeitungsaufwand reduziert werden.

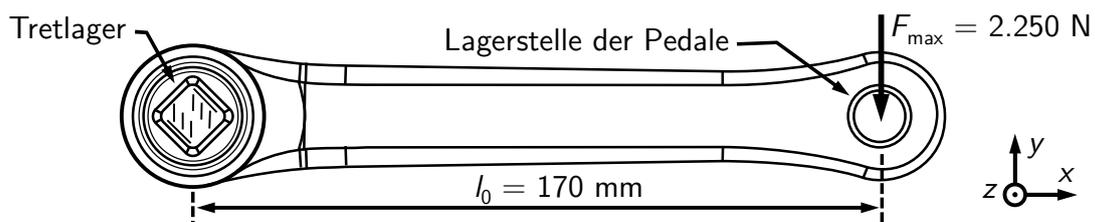


Abbildung 6.2: Randbedingungen zur Simulation des Ausgangsmodells

Zur Identifizierung relevanter Belastungen, welche zur Dimensionierung neuer Bauteilgeometrien ausschlaggebend sind und die maximalen Spannungen hervorrufen, muss die Rotation des Lastvektors F um die Lagerstelle der Pedale berücksichtigt werden. Wie in Abbildung 6.3 dargestellt, kann diese durch den Drehwinkel α_i mit $i = 0$ bis 360° beschrieben werden [Lipp17a]. In der Ausgangslage $\alpha_1 = 0^\circ$ steht die Tretkurbel senkrecht nach oben. Beim Rotieren von $\alpha_{\min} = 0^\circ$ bis $\alpha_{\max} = 360^\circ$ liegen die drei vorherrschenden Belastungen $\alpha_1 \triangleq$ Druck, $\alpha_2 \triangleq$ Biegung und $\alpha_3 \triangleq$ Zug vor. Weiterhin treten Lastkollektive, wie beispielsweise die Überlagerung einer Biege- und Zugbelastung, auf. Als vierter Belastungsfall unterliegt eine Tretkurbel Torsion. Diese resultiert aufgrund des Hebelarms zwischen dem Pedal und dessen Lagerung in der Tretkurbel. Auch der fünfte Belastungsfall resultiert aus diesem Hebelarm, so dass bei einem Drehwinkel von $\alpha_1 = 0^\circ$ und $\alpha_3 = 180^\circ$ eine Biegelast impliziert wird.

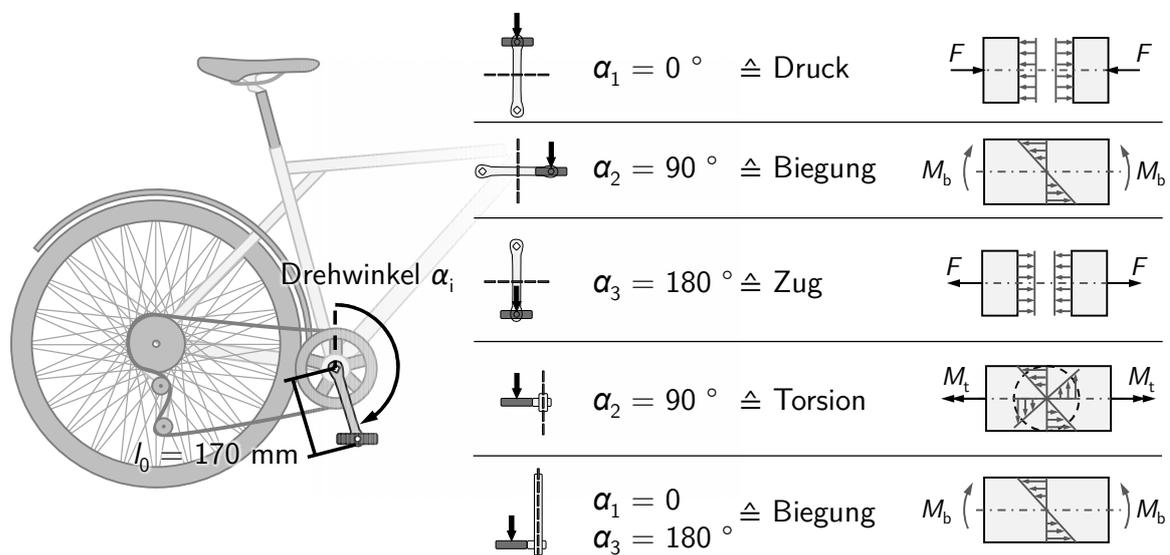


Abbildung 6.3: Mechanische Beanspruchungen einer Tretkurbel

Zur Quantifizierung der Beanspruchungen werden Simulationen des Ausgangsmodells mit einer Schrittweite von 15° durchgeführt. Dabei wird der Drehwinkelbereich von $\alpha_1 = 0^\circ$ bis $\alpha_3 = 180^\circ$ als idealisiertes Modell betrachtet, bei welchem die außermittige Kräfteinleitung und lokale Spannungsspitzen in der Einspannung vernachlässigt werden. Im Drehwinkelbereich

von $\alpha_3 = 180^\circ$ bis $\alpha_{\max} = 360^\circ$ wird die der Tretkurbel gegenüberliegende Pedale belastet. Die auftretenden Spannungen (Spannungshypothese nach von Mises) werden in Abbildung 6.4 in Abhängigkeit vom Drehwinkel α_i dargestellt.

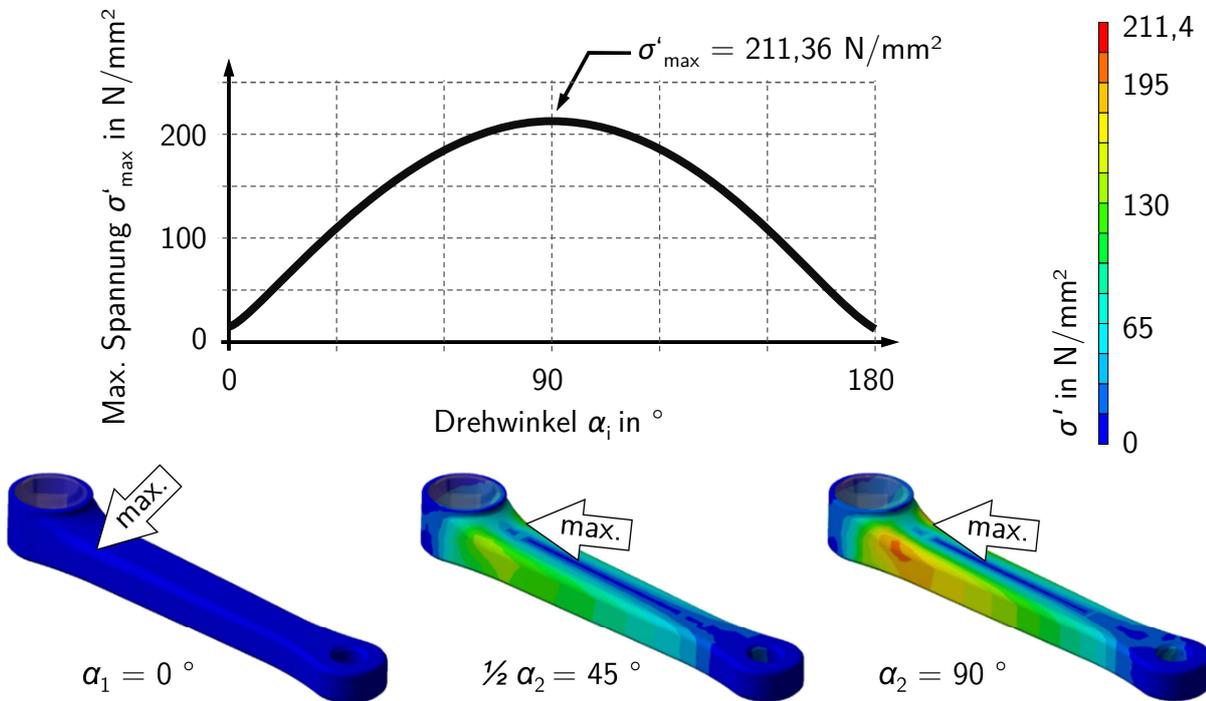


Abbildung 6.4: Spannungen im Ausgangsmodell in Abhängigkeit vom Drehwinkel α_i

Die maximale Spannung $\sigma'_{\max} = 211,36 \text{ N/mm}^2$ tritt bei einem Drehwinkel von $\alpha_2 = 90^\circ$ auf. Hierbei wird das Modell ausschließlich auf Biegung belastet. Lokale Spannungsspitzen in der Einspannung werden nicht betrachtet, da sich die Optimierung auf den Wirkraum zur Verbindung der Lagerstellen bezieht und nicht auf die Verbesserung der Einspannung.

Im Sinne des belastungsgerechten Gestaltens muss die maximale Spannung σ'_{\max} unterhalb der zulässigen Spannung σ_{zul} liegen, welche sich aus dem Festigkeitswerten des Materials ergibt. Zur Bestimmung der zulässigen Spannung σ_{zul} wird ein Sicherheitsfaktor $s = c_b = \alpha_k = 1$ verwendet, da bereits die Last F mit einem Sicherheitswert kalkuliert ist und eine maximale Gewichtsersparnis erzielt werden soll, bei welcher in Anlehnung an *Klein* die absolute Ausnutzung einer Konstruktion angestrebt wird [Klei11]. Wie in Gleichung 6.1 dargestellt, ist für das Gestalten einer neuen Bauteilgeometrie mit inneren Strukturen das Optimierungskriterium eine Gewichtsreduktion unter Einhaltung der zulässigen Spannung $\sigma_{\text{zul}} = 245 \text{ N/mm}^2$.

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{zul}} = \frac{R_{p0,2}}{s + c_b + \alpha_k} = 245 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad 6.1$$

Die Untersuchungen am Ausgangsmodell zeigen Anforderungen an eine neue Bauteilgeometrie, welche in Abbildung 6.5 in einer Anforderungsliste zusammengefasst sind.

		F: Festforderung Z: Zielforderung W: Wunschforderung		Fahrrad-Tretkurbel	
Nr.	Anforderungen	Art	Wert/ Bereich	Var./ Einheit	Quelle/ Verweis
1. Funktionen					
1.1	Aufnehmen und Leiten mechanischer Energie	F	ja	-	-
2. Geometrie					
2.1	Abstand Lagerpunkte	F	170	l_0 in mm	DIN 345
2.2	Lagerstelle Pedal	F	12,93	$\varnothing_{\text{Pedal}}$ in mm	DIN 345
2.3	Lagerstelle Konus	F	$12,73^{+0,020}_{-0,050}$	b_{min} in mm	ISO 669:2015(E)
2.4	Lagerstelle Winkel Konus	F	$4,0^{+0,1}_{-0}$	β in °	ISO 669:2015(E)
3. Kinematik					
3.1	Bewegungsart	F	Gleichförmig	-	DIN345
3.2	Bewegungsrichtung	F	Rotatorisch	-	DIN345
3.3	Max. Drehzahl	Z	1	n in s^{-1}	DIN345
3.4	Drehwinkel	F	360	α in °	DIN345
3.5	Winkelgeschwindigkeit	Z	2π	ω in $\text{rad} \cdot s^{-1}$	$2\pi \cdot n$
4. Kräfte					
4.1	Last	Z	1.500	F in N	DIN 345
4.2	Lastrichtung	F	y - Achse	-	-
4.3	Art der Beanspruchung	F	Biegung	-	-
4.4	Gewicht	Z	< 217	m in g	-
4.5	Verformung	Z	< 4	w in mm	-
4.6	Lasthäufigkeit	Z	> 100.000	z	DIN345
5. Stoff					
5.1	Werkstoff	F	AlSi10Mg	-	-
5.2	Dichte	F	2,68	ρ in g/cm^3	Materialdaten
5.3	E-Modul	Z	60 - 70	E in kN/mm^2	Materialdaten
5.4	Zugfestigkeit	Z	345 - 350	R_m in N/mm^2	Materialdaten
5.5	Dehngrenze Rp0,2	Z	245	$R_{p0,2}$ in N/mm^2	Materialdaten
6. Fertigung					
6.1	Herstellbare Abmessung	F	250 x 250 x 325	$b \times h \times t$ in mm^3	-
6.2	Fertigungsverfahren	F	SLM	-	Gestaltungsrichtlinien
7. Montage					
7.1	Bewegungsfreiheit	F	ja	-	Bediener
8. Gebrauch					
8.1	Einsatzort	F	Fahrrad	-	-
8.2	Temperaturbereich	F	(-) 20 - (+) 40	T in °	DIN345
8.3	Luftfeuchtigkeit	F	50 - 90	rL in %	DIN345

Abbildung 6.5: Anforderungsliste für Tretkurbeln

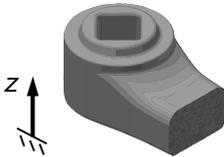
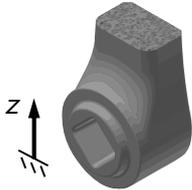
6.2 Optimierung des bestehenden Wirkraums

Ziel ist die Identifizierung eines Bereichs im bestehenden Wirkraum, um dort innere Strukturen einzubringen und somit Gewicht einzusparen. Dabei wird ausschließlich die Materialreduktion untersucht, indem die Bauteilhülle des Ausgangsmodells für die Konzeptfindung herangezogen wird. Die Optimierung durch eine Materialumverteilung und somit die Berücksichtigung einer umfangreichen Prinzipfindung gemäß des ersten Arbeitsschritts im systematischen Vorgehen wird in Abschnitt 6.3 betrachtet. Durch Einbringen innerer Strukturen in den bestehenden Wirkraum wird zunächst eine erhöhte Verformung vermutet, da die Querschnittsfläche bei gleichem Randfaserabstand verkleinert und somit die Steifigkeit beeinflusst wird. Die Beanspruchungen können hingegen durch gezielte Materialreduktion homogenisiert werden.

Prinzipfindung

Aufgrund der Optimierung des bestehenden Wirkraums sind die Topologie, Anschluss- und Hauptmaße vordefiniert. Die Wirkflächen und auch der Wirkraum sind somit festgelegt und entsprechen dem Ausgangsmodell. Vom Wirkraum ausgehend kann das Modell folglich nach innen hin detailliert werden. Grundsätzlich ist zu prüfen, wie die Positionierung, Orientierung und Anordnung im Bauraum erfolgen soll. Tabelle 6.1 zeigt eine Abschätzung der Auswirkungen auf die diskutierten Einflusskriterien in Abschnitt 4.3. Für die Platzierung wird festgelegt, dass eine Optimierung hinsichtlich der Maßhaltigkeit, Fertigungszeit sowie einem minimalen Nachbearbeitungsaufwand erfolgen soll. Die Bewertung zeigt, dass eine liegende Platzierung des Modells, bei welcher die z-Achse in positive Aufbaurichtung zeigt, diese Kriterien erfüllt.

Tabelle 6.1: Platzierung des Modells mit bestehendem Wirkraum

			
Fertigungszeit	X	X	-
Maßhaltigkeit	X	-	-
Belastungsgerecht	X	X	-
Nachbearbeitung	X	-	-
Packungsdichte	-	-	X
Beschädigung	X	X	-
Gesamt	6	3	1

Konzeptfindung

Auf Basis der Anforderungen erfolgt die Festlegung des Gestaltungsraums, welcher das Einbringen einer inneren Struktur zur Gewichthsoptimierung ermöglicht. Entsprechend der Spannungsverteilung im Ausgangsmodell, liegt das Optimierungspotential entlang der neutralen Faser in den weniger belasteten Bereichen, dargestellt in Abbildung 6.6.

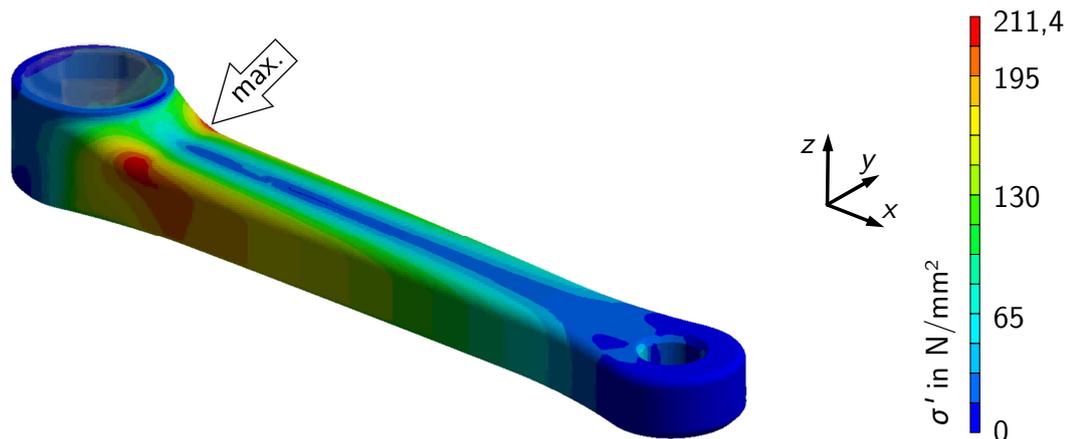


Abbildung 6.6: Spannungsverteilung im bestehenden Wirkraum

Zielsetzung bei der Auslegung eines auf Biegung belasteten Bauteils ist die Anordnung des Materials im Bereich der maximalen Spannungen. Demnach müssen die beiden Außenflächen, welche parallel zur Mittelebene verlaufen, verstärkt werden. Entsprechend der theoretischen Grundlagen in Kapitel 3 erfolgt die Festlegung des Gestaltungsraums gemäß Abbildung 6.7. Neben der Begrenzung durch die beiden Außenflächen mit der Wandstärke $s = 1,75 \text{ mm}$ erfolgt die Limitierung durch die Lagerstellen des Pedals sowie des Tretlagers.

Aus dem beschriebenen Konstruktionskatalog in Kapitel 5 werden für die identifizierte Biegebelastung geeignete Strukturen ausgewählt. Diese sechs Strukturen sind in Abbildung 6.8 dargestellt. Dabei werden die inneren Strukturen mit identischen Elementgrößen $e_1 = e_2$ und Durchmessern oder Wandstärken $s = 0,7 \text{ mm}$ modelliert.

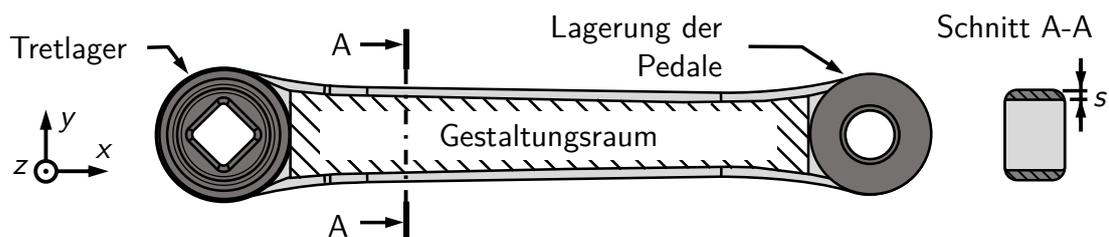


Abbildung 6.7: Gestaltungsraum im bestehenden Wirkraum

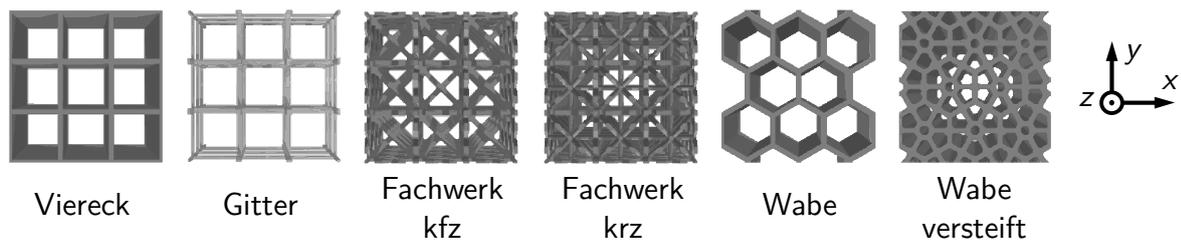


Abbildung 6.8: Belastungsgerechte innere Strukturen für Biegung

Ferner werden unterschiedliche Orientierungen einiger Strukturen untersucht, welche durch den Konstruktionskatalog der mechanischen Eigenschaften empfohlen werden. Dabei wird unter einer vertikalen Orientierung die Ausrichtung der z-Koordinate einer Struktur entsprechend der z-Koordinate der Tretkurbel verstanden. Bei einer horizontalen Orientierung zeigt die z-Koordinate der Struktur in y-Richtung der Tretkurbel.

Die Modelle werden in die Simulationsumgebung importiert und mit identischen Lagerungen und Lasten versehen. Neben der Ermittlung des Gewichts erfolgt die Simulation zur Ermittlung der maximalen Spannungen σ'_{max} sowie der resultierenden Verformung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass keine Anpassung der Geometrie anhand der beschriebenen Parameter erfolgt. Auch sind die Übergangsbereiche einer Struktur zum Grundkörper der Tretkurbel nicht optimiert. Lediglich die Reduzierung von lokalen Spannungsspitzen wurde durchgeführt. Das in Abbildung 6.9 dargestellte Spannungs-Gewichts-Verhältnis zeigt demnach eine Tendenz zur Auswahl einer Struktur.

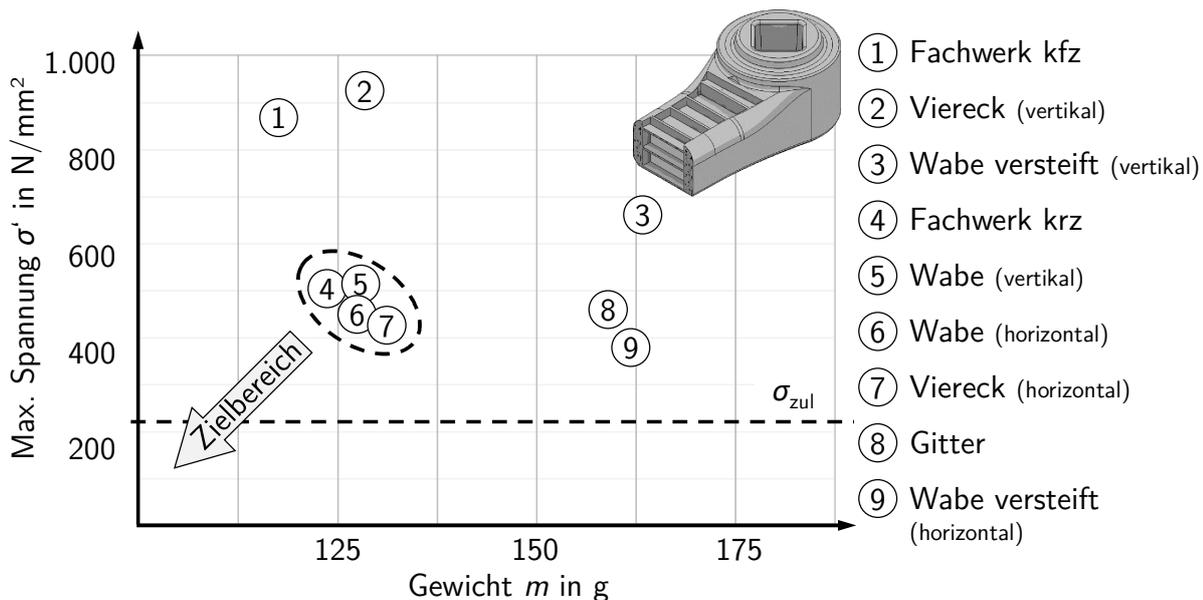


Abbildung 6.9: Spannungs-Gewichts-Verhältnis der Modelle zur Konzeptfindung im bestehenden Wirkraum

Die Simulationsergebnisse bestätigen die diskutierten Grundlagen aus Kapitel 5 und zeigen, dass einige Strukturen (3, 8 und 9) eine geringe Gewichtsreduktion bei steigenden Spannungen über σ_{zul} bewirken. Folglich liegt nur geringes Optimierungspotential vor, sodass diese Strukturen nicht weiter betrachtet werden. Weiterhin existieren Strukturen (1 und 2) mit einer deutlichen Gewichtsreduktion, jedoch gestiegenen Spannungen. Auch diese Strukturen eignen sich nur bedingt zur weiteren Optimierung. Eine Synthese aus Gewichtsoptimierung und maximalen Spannungen stellen die Strukturen 4, 5, 6 und 7 dar. Zwar liegen die Spannungen oberhalb der zulässigen Spannungen $\sigma'_{max} > \sigma_{zul}$, die Betrachtung lokaler Spannungsspitzen sowie die Anpassung der Dimensionierung kann jedoch zur Reduzierung dieser führen. Für die weitere Optimierung wird infolgedessen die innere Struktur des Vierecks (horizontal) verwendet.

Vorentwurf

Für die ausgewählte Struktur werden zwei Optimierungsstrategien zur Reduzierung der maximalen Spannungen σ'_{max} und Homogenisierung der Spannungsverteilung betrachtet. Abbildung 6.10a zeigt die Dichtevariation, indem stufenweise die Elemente in Bereichen mit hohen Spannungen angepasst werden. Es werden Bereiche mit einem Überhang von $a_i = 6$ mm, $a_{ii} = 2,65$ mm und $a_{iii} = 0,975$ mm mit $s = 0,7$ mm modelliert. Eine vierte Verfeinerungsstufe ist bezüglich der Gestaltungsrichtlinie für ein minimales Spaltmaß nicht herstellbar und wird folglich als Vollmaterial umgesetzt. Abbildung 6.10b zeigt die Anpassung des Gestaltungsraums. Durch Variation des Schrägungswinkels β werden die Bereiche mit erhöhten Spannungen iterativ manipuliert.

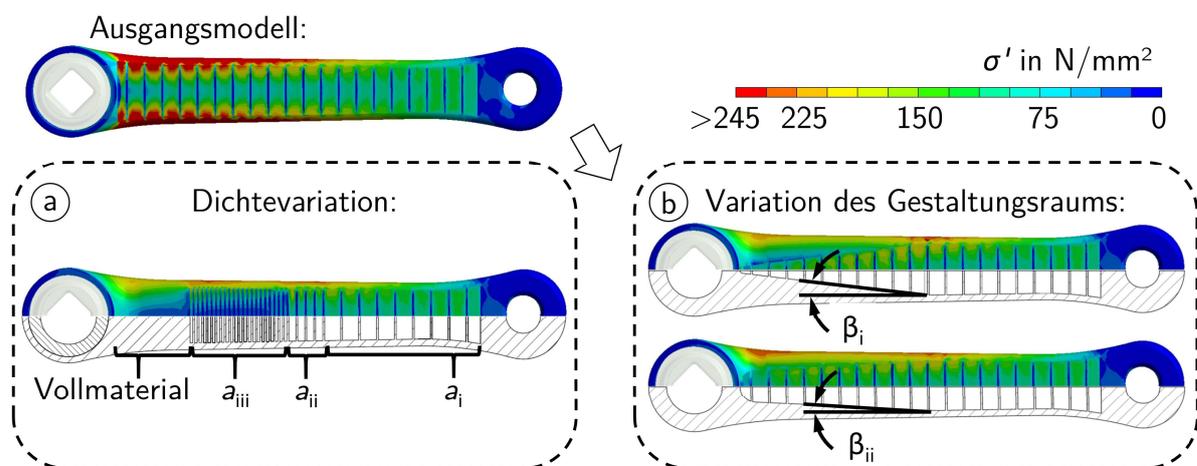


Abbildung 6.10: Modelle zur Festlegung eines Vorentwurfs im bestehenden Wirkraum

Die Ergebnisse bestätigen, dass beide Optimierungsstrategien zur Reduzierung der Spannungsspitzen $\sigma'_{\max} < \sigma_{\text{zul}} = 245 \text{ N/mm}^2$ sowie zur Homogenisierung der Spannungsverteilung führen. Somit kann die Sicherheit gegen Versagen nachgewiesen und die hohe Materialausnutzung für eine weitestgehende Gewichtsersparnis gezeigt werden. Dabei weisen die Modelle folgende Eigenschaften auf:

- Konzeptmodell: $m = 129,8 \text{ g}$; $\sigma'_{\max} = 445,1 \text{ N/mm}^2$
- Dichtevariation: $m = 166,8 \text{ g}$; $\sigma'_{\max} = 236,5 \text{ N/mm}^2$
- Variation des Gestaltungsraum: $m = 143,4 \text{ g}$; $\sigma'_{\max} = 243,8 \text{ N/mm}^2$

Das Spannungs-Gewichts-Verhältnis ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Bei nahezu identischen maximalen Spannungen σ'_{\max} führt die Variation des Gestaltungsraums zu einer höheren Gewichtsersparnis, sodass dieses Modell weiter betrachtet wird.

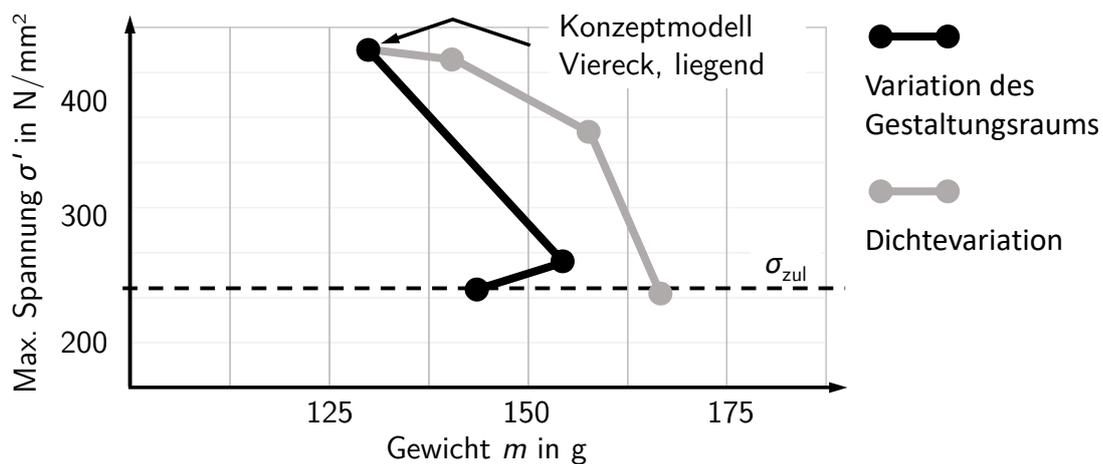


Abbildung 6.11: Spannungs-Gewichts-Verhältnis der Vorentwürfe im bestehenden Wirkraum

Gesamtentwurf

Zur Sicherstellung der Herstellbarkeit muss eine ganzheitliche Betrachtung des Modells durchgeführt werden. Nach der bereits definierten Platzierung im Bauraum und der Auslegung der inneren Struktur erfolgt die Validierung der Dimensionierung, Reinigung und Abstützung anhand der beschriebenen Gestaltungsrichtlinien.

Dimensionieren

Die aus dem Konstruktionskatalog ausgewählte Struktur ist anhand geometrielimittierender Gestaltungsrichtlinien bereits hinsichtlich der Herstellbarkeit dimensioniert. Im nächsten Schritt erfolgt die Dimensionierung weiterer Wandstärken, Bohrungen, Spalte, Rundungen

und Querschnitte. Weiterhin wird ein Aufmaß zur Nachbearbeitung der Lagerstellen im Modell vorgesehen. Da bei der Nachbearbeitung das Aufmaß abgetragen wird, wird dieses jedoch nicht in die Kalkulation des Gewichtes einbezogen.

Reinigen

Es werden Reinigungsöffnungen in das Modell eingebracht, sodass nicht verschmolzenes Pulver im Post-Prozess entfernt werden kann. Da die innenliegenden Vierecke voneinander separiert sind, müssen Reinigungsöffnungen für jedes Segment vorgesehen werden. Wie in Abbildung 6.12 dargestellt, werden die Reinigungsöffnungen an den weniger belasteten Außenflächen angebracht. Dabei wird die Auswirkung einer Gestaltänderung auf die maximalen Spannungen σ'_{\max} untersucht, da starke Kraftumlenkungen resultieren können. Abbildung 6.12a zeigt elliptische Öffnungen, welche entlang der neutralen Faser angebracht sind. Abbildung 6.12b beschreibt einen minimalen Kreisdurchmesser entsprechend der Gestaltungsrichtlinien. Es wird ersichtlich, dass das Einbringen von Reinigungsöffnungen unzureichend ist, da für beide Ansätze erhöhte Spannungen resultieren. Infolgedessen werden die Reinigungsöffnungen dahingehend modifiziert, dass Bereiche mit starken Kraftumlenkungen abgerundet und verdickt werden. Dadurch entsteht eine kraftflussgerechte Verstärkung der Reinigungsöffnungen, sodass eine Reduzierung der maximalen Spannung auf $\sigma'_{\max} = 244,31 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_{\text{zul}} (m = 143,85 \text{ g})$ möglich ist, siehe Abbildung 6.12c. Die maximale Spannung kann dabei von den Kerben, also den Reinigungsöffnungen, verlagert werden.

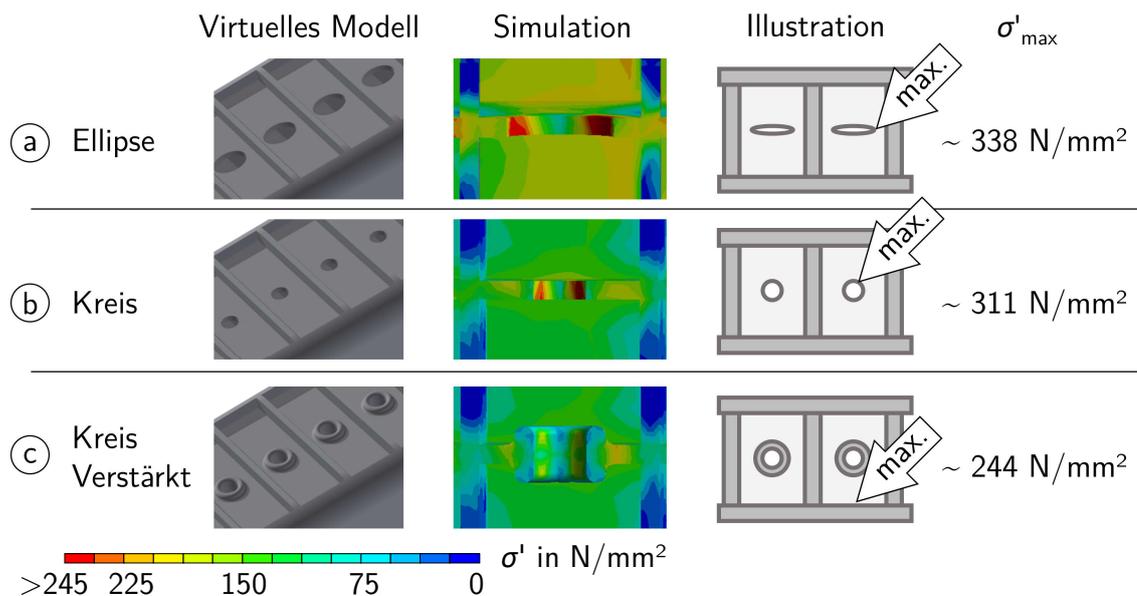


Abbildung 6.12: Reinigungsöffnungen am Gesamtentwurf im bestehenden Wirkraum

Abstützen

Das Modell wird hinsichtlich notwendiger Stützstrukturen analysiert. Dabei werden Gestaltungsrichtlinien zur Vorbeugung von innenliegenden Stützstrukturen betrachtet, da die nachträgliche Entfernung dieser nicht möglich ist. Insbesondere werden der Downskin-Winkel, maximale Überhänge, Ceilings und Inseln berücksichtigt. Entsprechend Abbildung 6.13 ist die eingebrachte Struktur durch die Breite $b = 6$ mm, die Höhe $h = 6$ mm, die Wandstärke $s = 0,7$ mm sowie den Durchmesser der Reinigungslöcher $\varnothing = 2$ mm definiert. Als maximaler Überhang ist die Breite $b = 6$ mm maßgebend, welche als Ceiling durch $b = 2 * l_f$ mit $l_f \leq 3$ mm limitiert ist. In Verbindung mit der geringen Höhe $h = 6$ mm wird ein leichtes Einsinken dieses Bereiches in das nicht verschmolzene Aluminiumpulver während des Bauprozesses vermutet, sodass eine erhöhte Oberflächenrauheit der Downskin-Fläche resultieren wird.

Wie in Abbildung 6.13 dargestellt, entstehen kritische Inseln an den verstärkten Reinigungsöffnungen. Diese sind nicht mit der restlichen Geometrie verbunden, sodass ein Einsinken während des Bauprozesses unvermeidbar ist. Abbildung 6.13a zeigt eine Illustration der Problematik, das virtuelle Modell sowie eine Detaildarstellung des physischen Bauteiles. Dabei konnte bewiesen werden, dass die Reinigungsöffnungen im physischen Bauteil in negativer z-Richtung absinkt, sodass eine undefinierte Geometrie entsteht.

Vor diesem Hintergrund werden drei Abstützungsstrategien formuliert. Abbildung 6.13b beschreibt die Abstützung durch Säulen mit einem minimalen Durchmesser $\varnothing_s = 0,7$ mm, um die Rieselfähigkeit des Pulvers möglichst gering zu beeinflussen. Abbildung 6.13c zeigt Schrägen unterhalb der Reinigungslöcher mit dem Winkel $\delta = 45^\circ$. Diese verlaufen bis zur Außenkante der verstärkten Öffnungen. Abschließend zeigt Abbildung 6.13d den Versatz des Schrägungswinkel $\delta = 45^\circ$ bis zur Innenkante der verstärkten Öffnungen. Die Untersuchung an den physischen Bauteilen zeigt, dass die Säulen im Bauprozess durch den Beschichter beschädigt werden und demnach zur Abstützung untauglich sind. Weiterhin kann nachgewiesen werden, dass durch Stütz-Schrägen die Maßhaltigkeit, insbesondere für den vergrößerten Schrägungswinkel, gesteigert werden kann. Somit wird das Modell mit vergrößertem Schrägungswinkel zur Erstellung des Gesamtentwurfs ausgewählt.

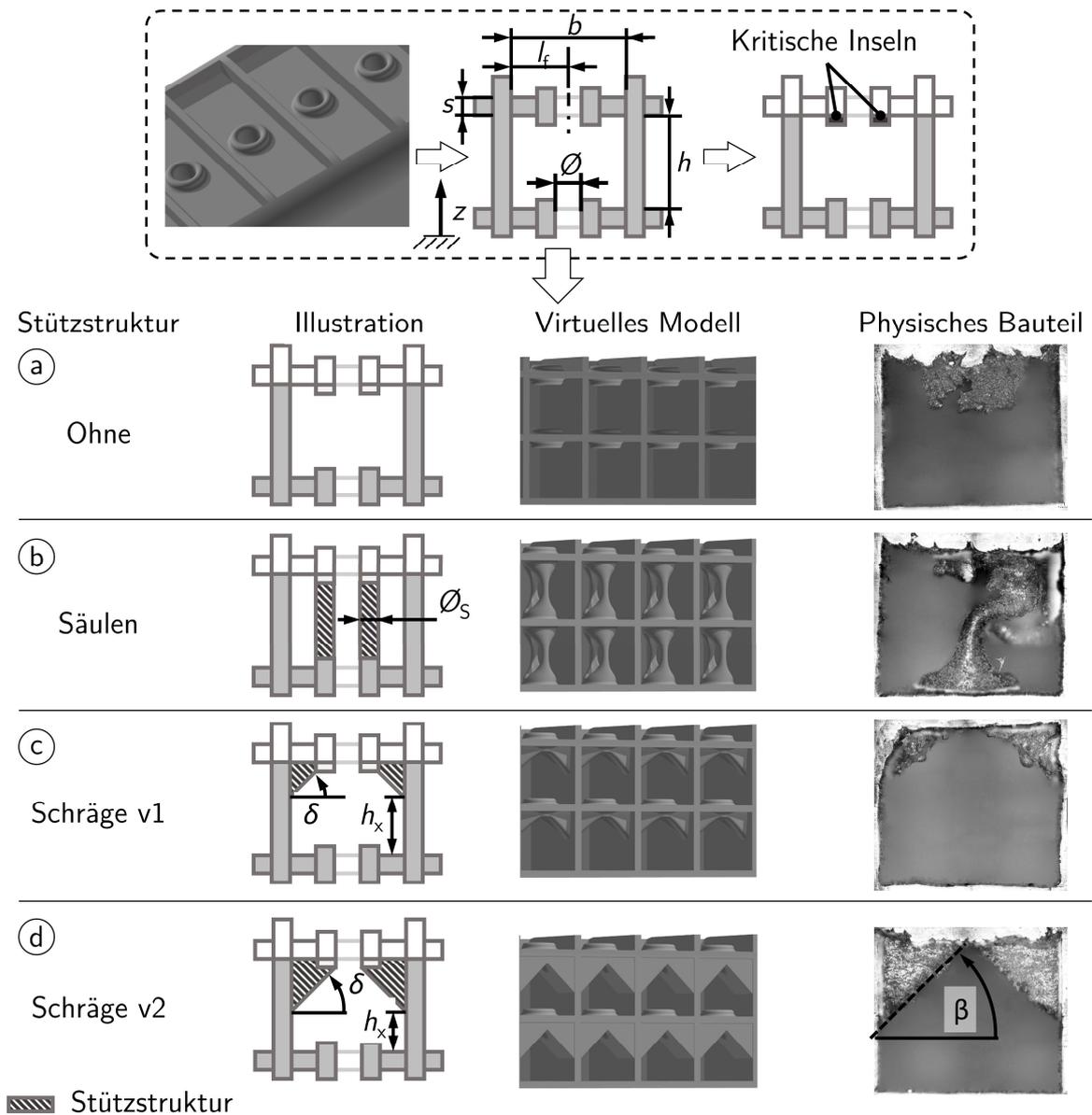


Abbildung 6.13: Abstützungsstrategien am Gesamtentwurf im bestehenden Wirkraum

Abbildung 6.14 fasst die relevanten Gestaltungsrichtlinien für den Gesamtentwurf zusammen. Anhand der Detaildarstellung in der Schnittansicht werden die Limitationen der inneren Struktur dargestellt. Das Modell weist ein Gewicht $m = 148,92 \text{ g}$ und eine Spannung $\sigma'_{\max} = 242,46 \text{ N/mm}^2$ auf. Im Vergleich zum Ausgangsmodell ($m = 217,45 \text{ g}$) kann folglich das Gewicht um ca. 32 % reduziert werden.

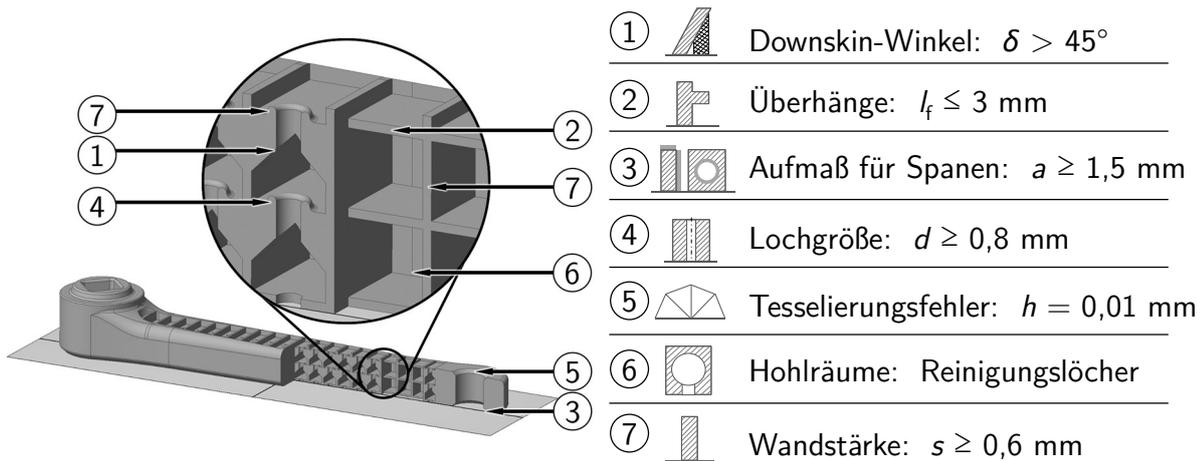


Abbildung 6.14: Gesamtentwurf im bestehenden Wirkraum

6.3 Optimierung des erweiterten Wirkraums

Ziel der Erweiterung des Wirkraums ist es, durch die Einbringung innerer Strukturen Gewicht einzusparen und die Steifigkeit zu verbessern. Ausgehend von den Wirkflächen wird die Materialumverteilung untersucht, indem Querschnitte mit hohem Randfaserabstand durch dünnwandige, filigrane Strukturen verbunden werden. In Bezug auf das systematische Vorgehen erfolgt demnach die Betrachtung einer umfänglichen Prinzipfindung. Durch die Änderung der Bauteilhülle sowie der Einbringung einer inneren Struktur wird zudem die Homogenisierung der Spannungsverteilung beabsichtigt.

Prinzipfindung

Im Unterschied zum bestehenden Wirkraum liegt die Herausforderung bei der Festlegung einer geeigneten Bauteilhülle und somit in der Definition des erweiterten Wirkraums. Auf Basis einer Abschätzung der theoretischen maximalen Abmessungen erfolgt die iterative Eingrenzung durch die Simulations- und Optimierungswerkzeuge.

Die Maße einer Tretkurbel sind durch Fertigungs-, Bauraum- und Nutzungsrestriktionen limitiert. Bei Schräglage des Fahrrads verringert sich der Abstand der kurveninnenliegenden Tretkurbel zum Boden. Die resultierende geometrische Einschränkung ist in Abbildung 6.15a dargestellt. Wie in Abbildung 6.15b gezeigt, limitiert weiterhin die Anatomie der Benutzer die maximalen Abmessungen, da der Unterschenkel bei der Tretbewegung nicht mit der Tretkurbel kollidieren darf. Abbildung 6.15c zeigt zudem die Bauraumrestriktionen. Durch das Tretlager sowie den Fahrradrahmen wird die maximale Höhe der Tretkurbel definiert.

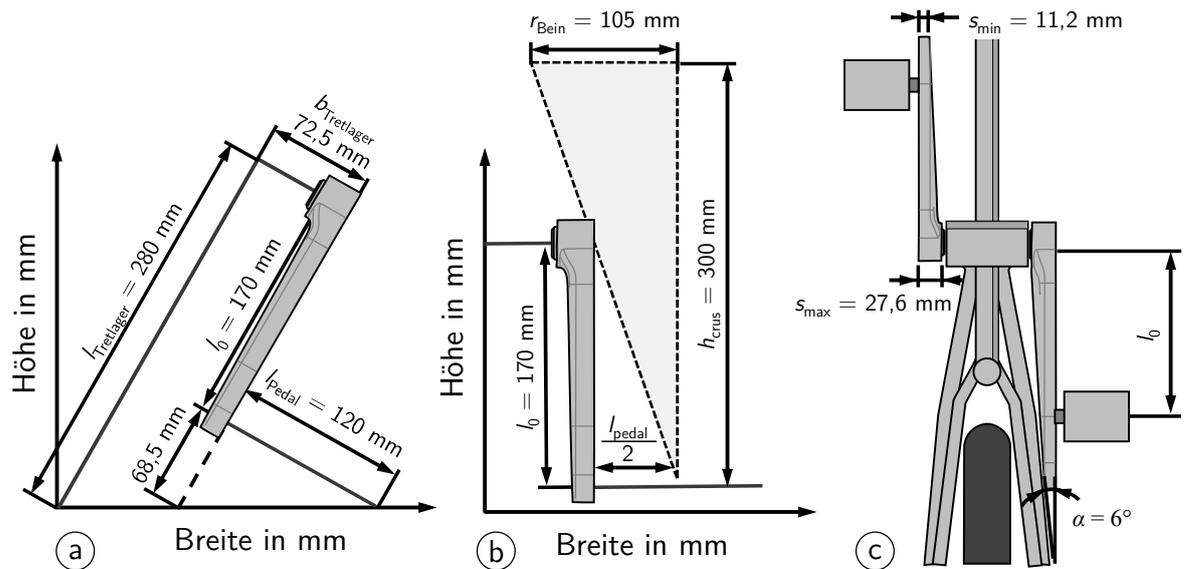


Abbildung 6.15: Restriktionen für die Abmessungen einer Tretkurbeln durch a) Schräglage b) Benutzer c) Bauraum

Neben den Bauraum- und Nutzungsrestriktionen limitiert die Bauraumgröße im Selektiven Laserstrahlschmelzen die theoretischen maximalen Abmessungen. Bei einer liegenden Positionierung des Modells im In-Prozess – analog zum bestehenden Wirkraum – ist die Breite durch die Prozesskammer limitiert. Unter Berücksichtigung der Fertigungs-, Bauraum- und Nutzungsrestriktionen wird das in Abbildung 6.16 dargestellte Modell aufgebaut.

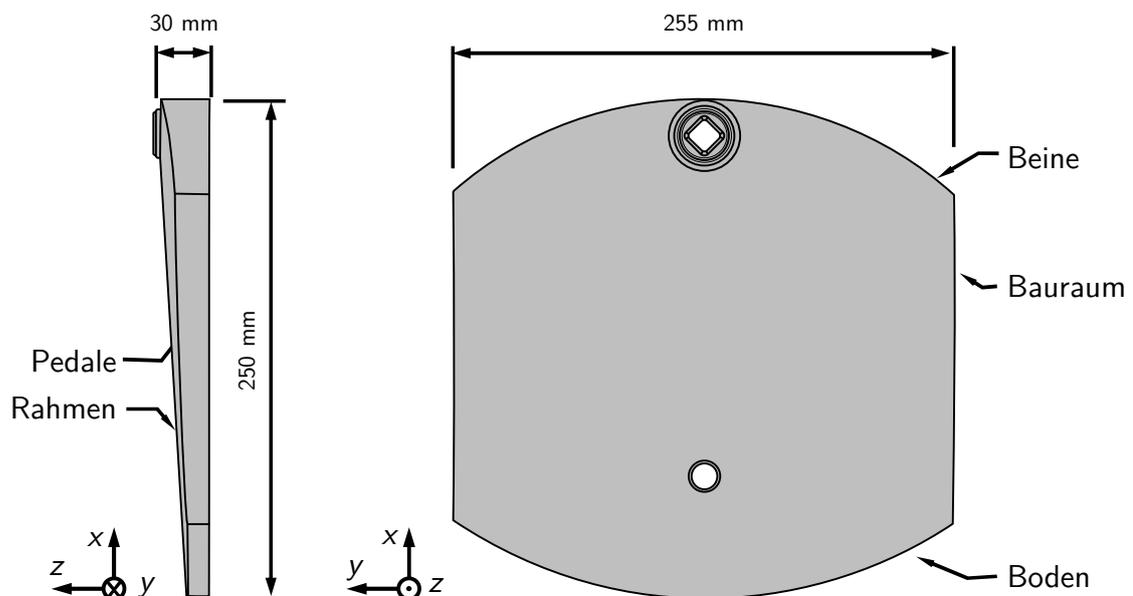


Abbildung 6.16: Theoretische maximale Abmessungen einer Tretkurbel

Zur Festlegung eines Wirkraums erfolgen die Reduktion der Bereiche mit geringen Spannungen und die damit einhergehende Materialanordnung in Bereichen mit hohen Spannungen. Zur Erzeugung eines Gestaltungsvorschlages entsprechend der Beanspruchung und somit zur Identifizierung der topologischen Grundstruktur wird die Topologieoptimierung eingesetzt.

Die Modellfestlegung und -belastung wird analog zu Abschnitt 6.1 durchgeführt. Als Optimierungskriterium wird die Minimierung des Gewichts bei konstanter Spannung verfolgt. Aufgrund der symmetrischen Gestalt und zur Reduzierung des Aufwandes wird die Optimierung ins Zweidimensionale abstrahiert. Die Topologieoptimierung ist dadurch charakterisiert, dass Material reduziert und nicht hinzugefügt wird. Eine alternierende Konvergenz durch die Software ist nicht möglich. Bei der Festlegung eines zu großen Zielwertes kann es folglich dazu kommen, dass Bereiche, die sehr wohl für ausreichende Steifigkeit notwendig sind, im Gestaltungsvorschlag entfernt werden. Vor diesem Hintergrund werden unterschiedliche Zielwerte angesetzt, um eine schrittweise Reduktion der Elemente mit geringen Spannungen abzubilden. Abbildung 6.17a zeigt exemplarisch das Optimierungsergebnis bei einer Reduktion von 50 % der Elemente mit den geringsten Spannungen. Hierbei wird deutlich, dass zum Teil freistehende Geometrien entstehen, welche somit keine Kräfte aufnehmen und leiten können. Folglich kann von einem zu hohen Zielwert ausgegangen werden. Abbildung 6.17b zeigt vor diesem Hintergrund die Überlagerung der Simulationsergebnisse bei einer Reduktion von 25 – 80 % mit einer Schrittweite von 5 %. Die dunkel dargestellten Bereiche visualisieren dementsprechend maßgebende Lastpfade. Helle und transparente Bereiche entsprechen ferner dem Potential zur Materialreduktion. Es ist zu erkennen, dass eine asymmetrische Topologie mit einer Versteifung im Bereich der Einspannung resultiert.

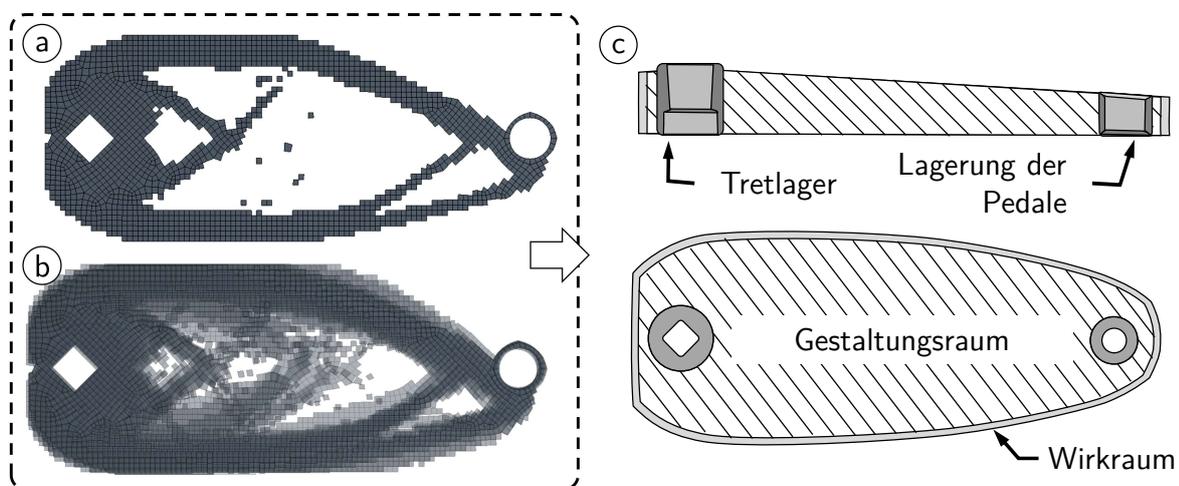


Abbildung 6.17: Erweiterter Wirkraum einer Tretkurbel a) Topologieoptimierung mit 50 % Zielwert b) Überlagerung der Zielwerte c) Festgelegter Wirkraum

Basierend auf der Topologieoptimierung erfolgt die Festlegung des Wirkraums. Abbildung 6.17c zeigt das aufgebaute Modell, welches die Lastpfade einschließt. Zum Suchen von geeigneten Strukturen wird vorerst auf die asymmetrische Topologie verzichtet, damit keine ungünstigen Übergangsbereiche auftreten. Die weitere Anpassung des Wirkraums an die Optimierungsergebnisse wird im späteren Verlauf aufgegriffen.

Konzeptfindung

Ausgehend vom Wirkraum wird das Modell nach innen hin detailliert, indem eine innere Struktur an die Beanspruchungen angepasst wird. Dafür wird die Bauteilhülle mit der Wandstärke $s = 1 \text{ mm}$ modelliert, um einen möglichst großen Gestaltungsraum abzubilden und eine gute Oberflächenrauheit zu erlangen. Ferner werden die Strukturen aus Abbildung 6.8 betrachtet. Die Elementgrößen $e_1 = e_2$ werden mit identischen Maßen sowie die Wandstärken mit $s = 0,7 \text{ mm}$ modelliert.

Die Modelle werden in die Simulationsumgebung importiert und entsprechend der Festlegung und Belastung definiert. Anschließend erfolgt die Bestimmung des Spannungs-Gewichts-Verhältnisses. Auch im erweiterten Wirkraum erfolgt an dieser Stelle keine Anpassung der Geometrie anhand der beschriebenen Parameter sowie der Übergangsbereiche zur Struktur. Wie aus Abbildung 6.18 hervorgeht, zeigt Struktur 6 ein höheres Gewicht im Vergleich zum Ausgangsmodell. Die Strukturen 2, 3, 4 und 5 haben eine hohe Gewichtersparnis, allerdings mit Spannungen $\sigma'_{\max} > \sigma_{\text{zul}}$. Das Modell mit der Scheiben-Struktur weist hingegen eine Synthese zwischen den maximalen Spannungen $\sigma'_{\max} < \sigma_{\text{zul}}$ und dem Gewicht $m_{\text{Prinzip}} < m_{\text{Ausgang}}$ auf und wird folglich weiter betrachtet.

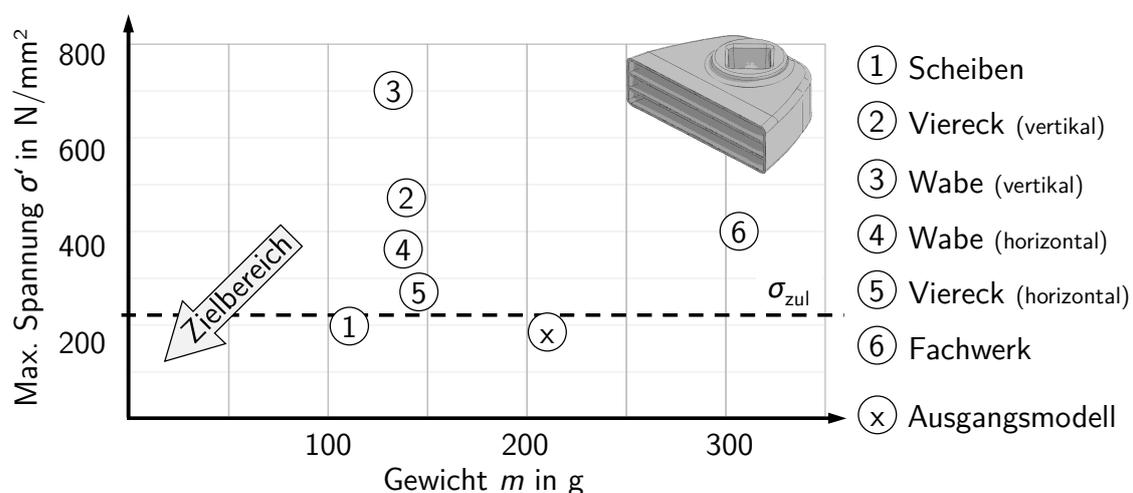


Abbildung 6.18: Spannungs-Gewichts-Verhältnis der Modelle zur Konzeptfindung im erweiterten Wirkraum

Vorentwurf

Zur Reduzierung der maximalen Spannung σ'_{\max} und zur Homogenisierung der Spannungsverteilung wird das Modell an die Ergebnisse der Topologieoptimierung angepasst. Dabei soll die asymmetrische Form zur Homogenisierung der Spannungsverteilung bei simultaner Reduktion des Gesamtgewichts dienen. Zur bestmöglichen Annäherung der Hauptmaße wird ein parametrisches Modell aufgebaut. Durch die Anpassung der x - und y - Koordinaten einer Vielzahl gesetzter Punkte, welche durch Splines verbunden sind, wird die Bauteilhülle iterativ an ein Optimum angenähert. Abbildung 6.19 zeigt das parametrische Modell, welches die Bauteilhülle der Optimierungsergebnisse und eine innere Scheiben-Struktur aufweist.

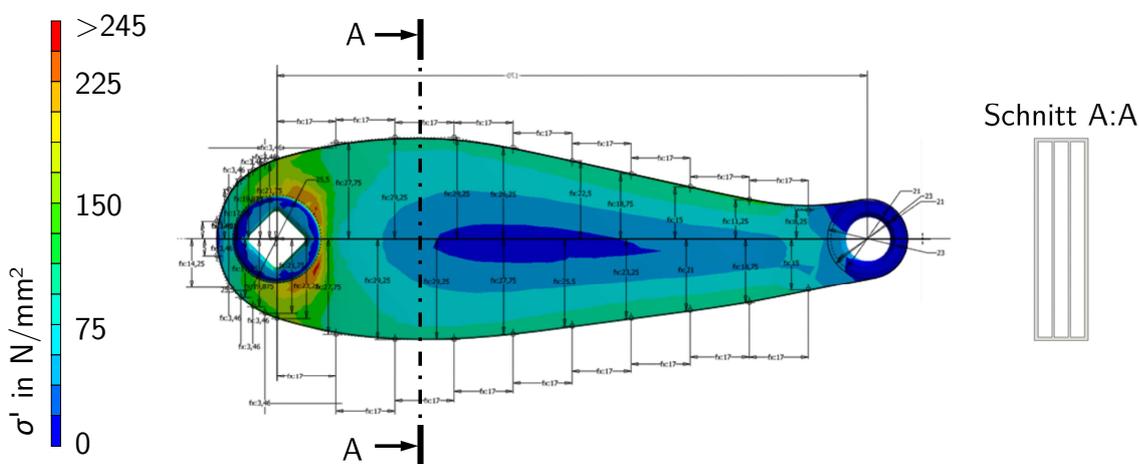


Abbildung 6.19: Spannungsverteilung nach der Konzeptfestlegung im erweiterten Wirkraum

Die Simulationsergebnisse zeigen weiteres Optimierungspotential entlang der neutralen Faser. Hingegen entstehen erhöhte Spannungen nahe der Einspannung. Demzufolge muss die Materialverteilung der inneren Struktur angepasst werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass lokale Gestalt-änderungen zu geänderten Beanspruchungen für das gesamte Modell führen.

Auf Basis des Modells mit konstanter Querschnittsfläche wird sukzessive eine Materialreduktion durchgeführt, dargestellt in Abbildung 6.20. Es kann gezeigt werden, dass eine Aussparung entlang der neutralen Faser die Spannungen in einen kritischen Bereich $\sigma'_{\max} \ll \sigma_{\text{zul}}$ erhöht. Vor diesem Hintergrund werden die Seitenprofile durch eine ebene Platte mit möglichst geringem Querschnitt verbunden, was zu einer erheblichen Verbesserung der Ergebnisse führt. In der nächsten Iteration wird das seitliche Profil als Dreiecksgeometrie angepasst, sodass weniger Material eingesetzt werden muss. Ferner werden durch die 45° -Winkel Stützstrukturen vorgebeugt, was zur Herstellbarkeit beiträgt. In der letzten Gestaltiteration wird die ebene Verbindungsplatte an die Ergebnisse der Topologieoptimierung angepasst.

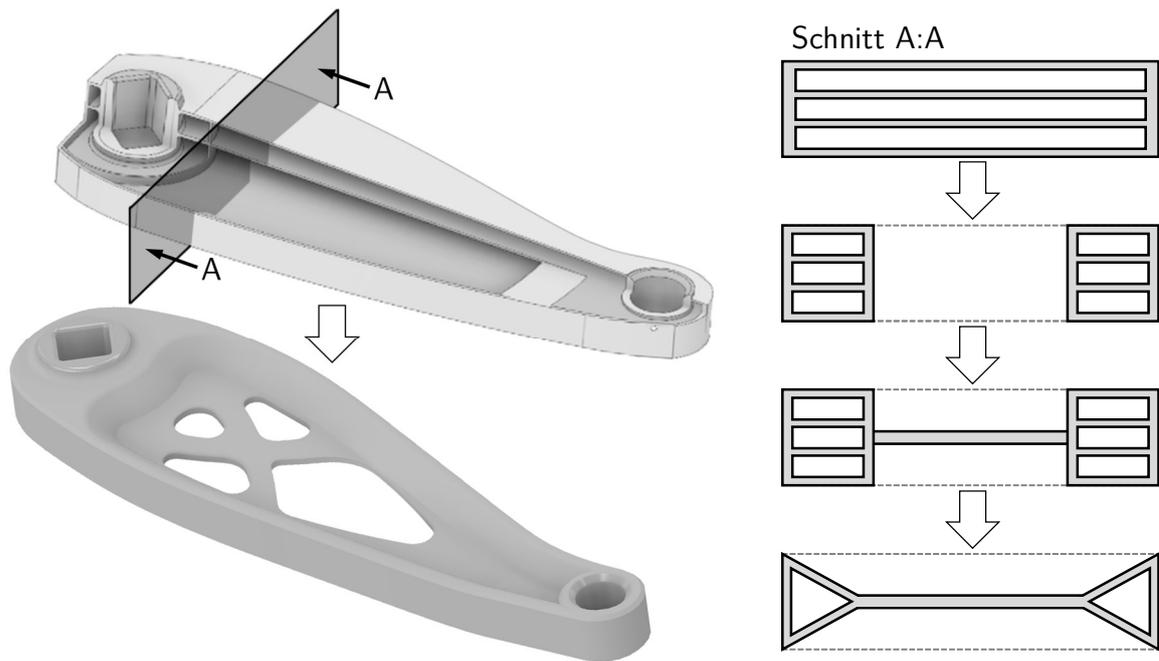


Abbildung 6.20: Optimierung des Querschnitts im erweiterten Wirkraum

Die Gestaltänderung bewirkt die Homogenisierung der Spannungsverteilung. Die maximalen Spannungen $\sigma'_{\max} = 291 \text{ N/mm}^2$ treten jedoch weiterhin im Bereich der Einspannung auf, siehe Abbildung 6.21. Zur Reduzierung der Spannungen wird die Wandstärke im Bereich hoher Spannungen auf $s = 1,2 \text{ mm}$ vergrößert. Zusätzlich erfolgt die Verfeinerung der Elementgröße. Dabei werden Gestaltungsrichtlinien zur Dimensionierung von Wandstärken, Spalten, Bohrungen und Verrundungen berücksichtigt, um Gestaltiterationen zu reduzieren. Abbildung 6.21 zeigt drei Ansätze zur Spannungsoptimierung. Bei der in Abbildung 6.21a gezeigten Optimierungsstrategie werden Zwischenwände mit einem Abstand von $b_{\max} = 6 \text{ mm}$ konzentrisch zur Schnittstelle des Tretlagers modelliert. Abbildung 6.21b zeigt weiterhin eine Optimierungsstrategie, in der eine Zwischenwand eingebracht wird, sodass sich die Überhänge auf maximal $b = 2 * l_f$ mit $l_f = 3 \text{ mm}$ reduzieren. Diese sind schematisch als Kreise dargestellt. In Abbildung 6.21c wird ferner eine Optimierungsstrategie gezeigt, bei welcher die Zwischenwand durch Säulen ersetzt wird. Eine 45° -Schräge am oberen Ende dient der Abstützung. Dabei weisen die Modelle folgende Eigenschaften auf:

- $m = 79,5 \text{ g}$ und $\sigma'_{\max} = 248,9 \text{ N/mm}^2$
- $m = 78,9 \text{ g}$ und $\sigma'_{\max} = 291,3 \text{ N/mm}^2$
- $m = 80,1 \text{ g}$ und $\sigma'_{\max} = 298,3 \text{ N/mm}^2$

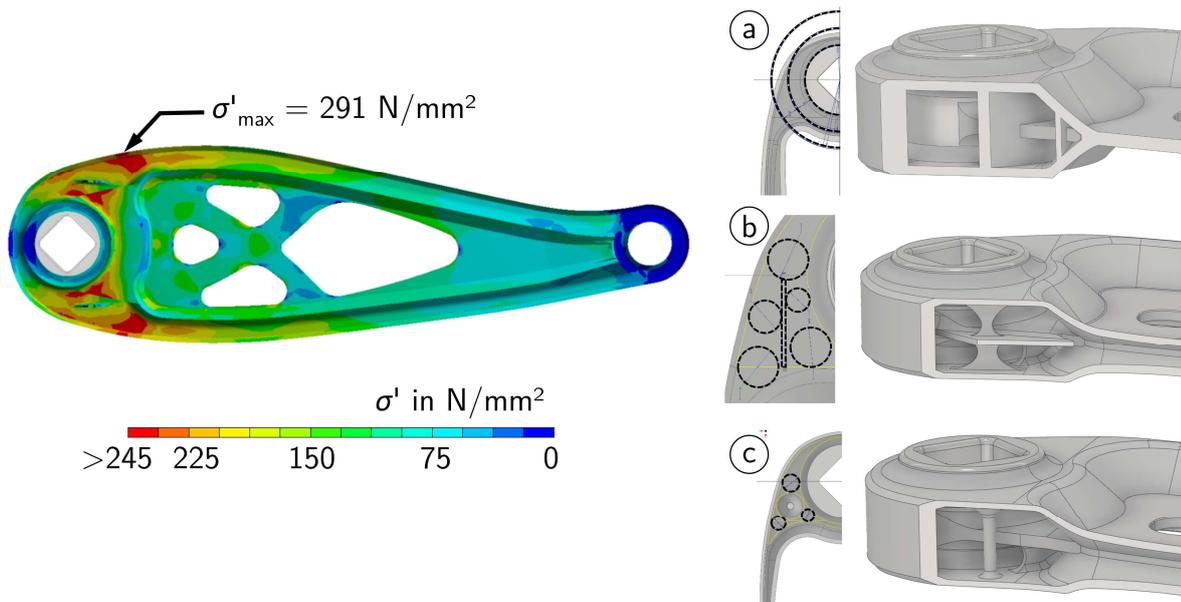


Abbildung 6.21: Optimierung der internen Struktur im erweiterten Wirkraum

Aufgrund des Spannungs-Gewichts-Verhältnisses wird die erste Optimierungsstrategie weiter verfolgt. Spannungsspitzen werden weiterhin durch Verrundungen und Verdicken einzelner Bereiche reduziert. Simultan erfolgt die Materialreduktion spannungsarmer Bereiche. Im Ergebnis entsteht ein dünnwandiger Kern nahe der Einspannung, dargestellt in Abbildung 6.22. Neben der Reduzierung der maximalen Spannungen und der Homogenisierung der Spannungsverteilung ist dieser Bereich nach Gestaltungsrichtlinien zur Dimensionierung aufgebaut.

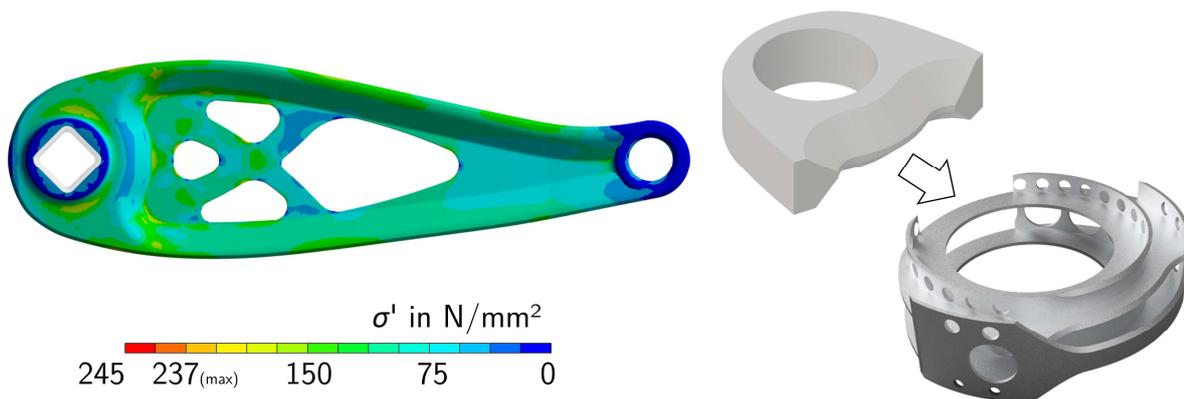


Abbildung 6.22: Vorentwurf im erweiterten Wirkraum

Die Ergebnisse bestätigen, dass die Anpassung der Materialverteilung zu einer Verbesserung des Spannungs-Gewichts-Verhältnisses führt. Abbildung 6.23 zeigt das Verhältnis der Gestaltiterationen zum Aufbau des Vorentwurfs. Ausgehend von der Scheiben-Struktur ($m = 108,3 \text{ g}$ und $\sigma'_{\max} = 214,36 \text{ N/mm}^2$) führt die Optimierung zu einem beanspruchbaren Modell mit einem Gewicht $m = 89,2 \text{ g}$ und einer maximalen Spannung $\sigma'_{\max} = 237 \text{ N/mm}^2$.

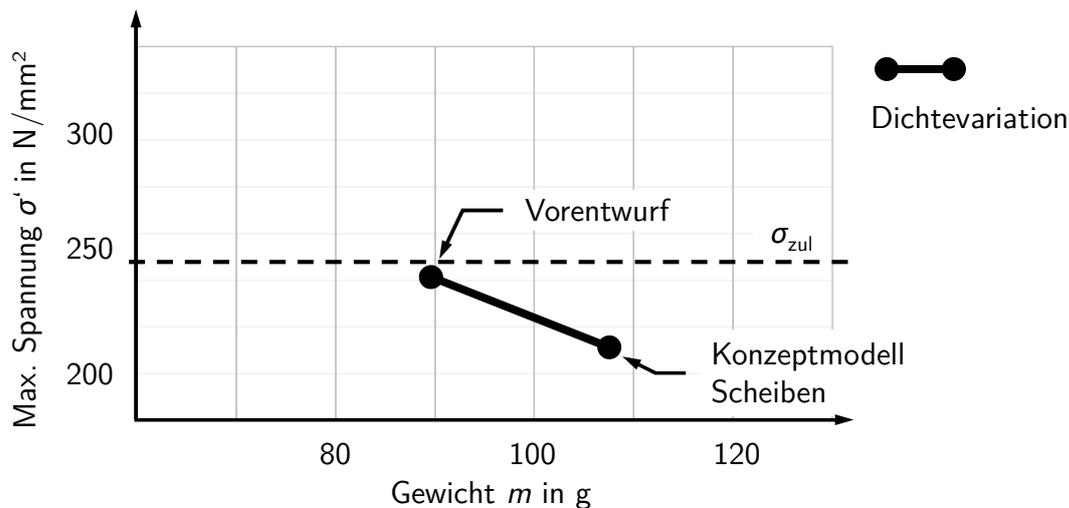


Abbildung 6.23: Spannungs-Gewichts-Verhältnis des Vorentwurfs im erweiterten Wirkraum

Gesamtentwurf

Zur Sicherstellung der Herstellbarkeit des Modells muss eine ganzheitliche Bewertung anhand der Gestaltungsrichtlinien durchgeführt werden. In Ergänzung zu der Platzierung im Bauraum erfolgt die Dimensionierung, Reinigung und Abstützung. Dabei ist hervorzuheben, dass einzelne Bereiche, wie beispielsweise die Wandstärken oder die Struktur nahe der Einspannung, bereits hinsichtlich der Herstellbarkeit überprüft und angepasst sind.

Dimensionieren

Die Dimensionierung der inneren Struktur wird durch die Festlegung von geometrischen Grenzwerten für Wandstärken, Bohrungen, Spalte, Rundungen und Querschnitte ergänzt. Ein Aufmaß zur Nachbearbeitung der Lagerung vom Pedal und Tretlager wird in der Konstruktion vorgesehen, jedoch nicht in die Kalkulation des Gewichtes einbezogen.

Reinigen

Im nächsten Schritt werden Reinigungsöffnungen in das Modell eingebracht, um nicht verschmolzenes Pulver aus den Kavitäten zu entfernen. Da die Kavitäten der Strukturelemente im erweiterten Wirkraum miteinander verbunden sind, kann die Anzahl der Reinigungsöffnungen maßgeblich reduziert werden. Wie in Abbildung 6.24 dargestellt, haben Reinigungsöffnungen unterschiedliche Auswirkungen auf die maximalen Spannungen. Abbildung 6.24a zeigt die Simulationsergebnisse für einen Kreis als Reinigungsöffnung, der auf der Innenseite im Bereich der Krafteinleitung vorgesehen ist. Abbildung 6.24b zeigt Reinigungsöffnungen in der Außenfläche des Profils entsprechend der neutralen Faser. Abbildung 6.24c und Abbildung 6.24d

zeigen weiterhin die Variation der Reinigungsöffnung als Kreis mit auslaufender 45°-Schräge zur besseren Herstellbarkeit sowie als Ellipse. Ausprägungen b und d erfüllen die Spannungsbedingung. Da die Reinigungsöffnungen nicht in kritischen Bereichen eingebracht werden, ist keine Verdickung der Geometrie notwendig. Aufgrund des größeren Öffnungsquerschnitts, der damit einhergehenden verbesserten Eignung zur Pulverentfernung und der besseren Herstellbarkeit wird Ausprägung d zur weiteren Optimierung verwendet ($m = 88,4 \text{ g}$ und $\sigma'_{\max} = 240,4 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{zul}}$).

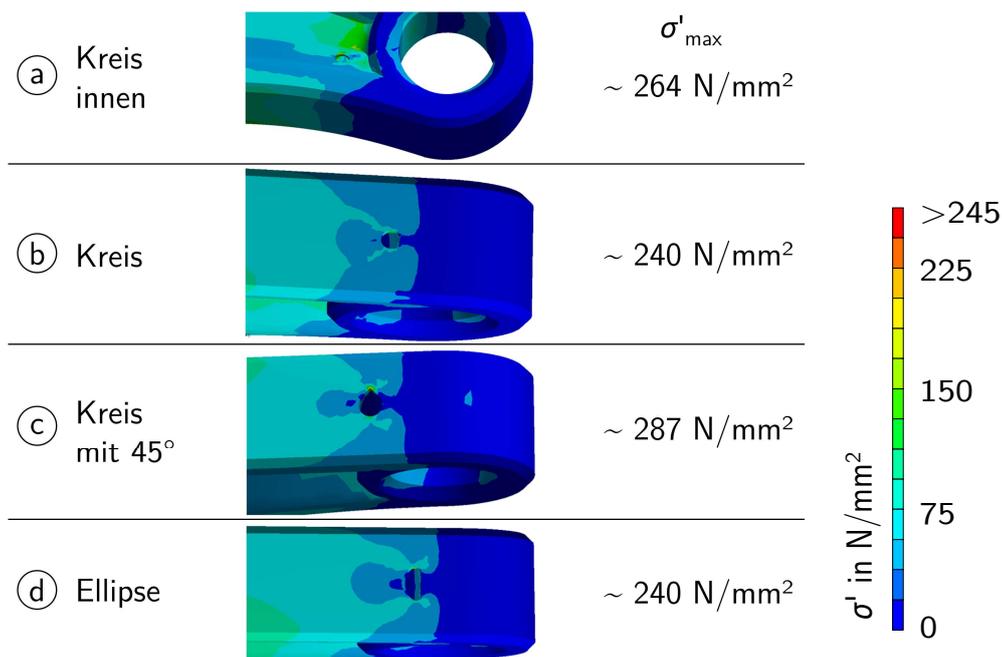


Abbildung 6.24: Reinigungsöffnungen am Gesamtentwurf im erweiterten Wirkraum

Abstützen

Da beim Gestalten zur belastungsgerechten Optimierung maximale Überhänge und Winkel eingehalten wurden, ist das Modell weitestgehend auf die Vermeidung von Stützstrukturen ausgelegt. Die Struktur im Bereich der Einspannung entspricht den Richtlinien für maximale Überhänge. Weiterhin verlaufen die seitlichen Profile im 45°-Winkel zur Bauplattform, sodass keine Stützstrukturen notwendig sind. Die ebene Verbindungsplatte weist zudem keine inneren Strukturen auf. Die auf Grund des Versatzes zur Bauplattform resultierende Höhendifferenz kann mit Stützstrukturen versehen werden, da diese im Post-Prozess aufgrund ihrer Zugänglichkeit mechanisch entfernt werden können.

Das Gestalten zur fertigungsgerechten Optimierung führt zum Gesamtentwurf der Tretkurbel im erweiterten Wirkraum. Abbildung 6.25 fasst die relevanten Gestaltungsrichtlinien zusammen.

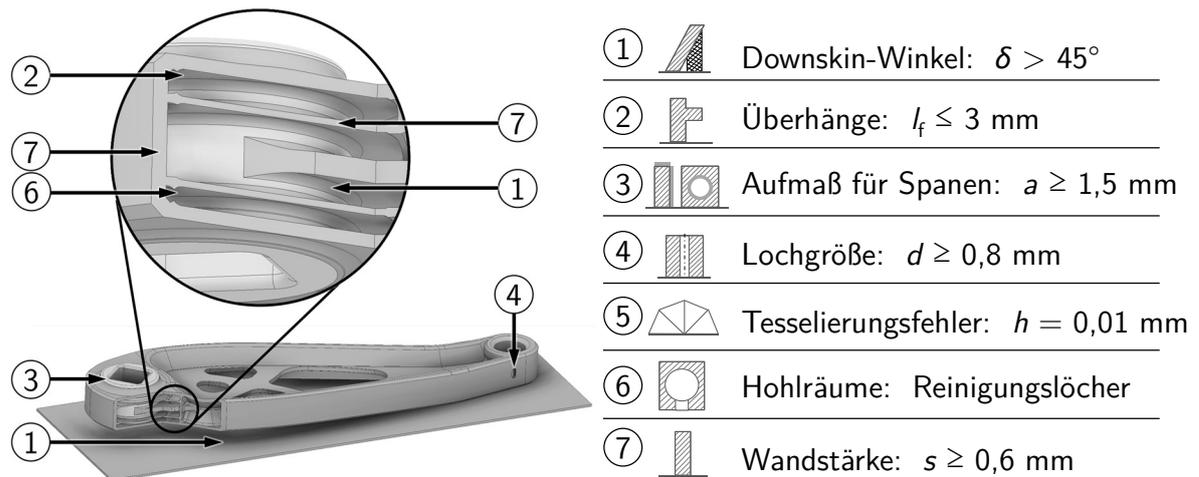


Abbildung 6.25: Gesamtentwurf im erweiterten Wirkraum

Der Gesamtentwurf weist ein Gewicht $m = 88,4 \text{ g}$ sowie eine maximale Spannung $\sigma'_{\max} = 240,4 \text{ N/mm}^2$ auf. Im Vergleich zum Ausgangsmodell ($m = 217,45 \text{ g}$) ermöglicht der Einsatz von inneren Strukturen in einem erweiterten Wirkraum eine Gewichtsreduktion von ca. 59 %.

6.4 Zusammenfassung

Zur Gewichtsreduzierung des Demonstrators wurden zwei Herangehensweisen dargestellt, welche durch das systematische Vorgehen abgebildet werden. Dafür wurden grundlegend die Anforderungen an eine Tretkurbel hinterfragt. Vor diesem Hintergrund wurden innere Strukturen einerseits in den bestehenden Wirkraum eingebracht. Andererseits wurde der Wirkraum des Modells erweitert, dessen Bauteilhülle und Topologie optimiert und eine innere Struktur erst anschließend eingebracht. Bei der Optimierung wurden unterschiedliche Gewichtersparnisse und mechanische Eigenschaften erzielt, welche im Folgenden diskutiert werden. Dabei lässt sich zusammenfassen, dass die Einbringung von inneren Strukturen zu Modellen mit homogenen Spannungsverteilungen führt, welche konventionell nicht herstellbar sind.

Abbildung 6.26 fasst die Ergebnisse der Bauteiloptimierung zusammen. Im Vergleich zum Ausgangsmodell bewirken die inneren Strukturen im bestehenden Wirkraum eine Gewichtsreduktion von ca. 32 %. Im erweiterten Wirkraum kann die Gewichtsreduktion auf 59 % gesteigert werden. Die zulässigen Spannungen von AlSi10Mg werden eingehalten. Die erzielte Gewichtsreduktion ist vor dem Hintergrund zu bewerten, dass das Ausgangsmodell nicht gänzlich für das Gießverfahren optimiert wurde. Neben den bereits diskutierten Spannungen zeigt Abbildung 6.26 die berechnete Durchbiegung w der Modelle bei $F = 2.250 \text{ N}$. Es ist erkennbar,

dass diese für den bestehenden Wirkraum ansteigt. Folglich kann bestätigt werden, dass die ausschließliche Materialreduktion und somit die Verringerung der Querschnittsfläche bei gleichbleibendem Randfaserabstand zur Verringerung der Biegesteifigkeit führt.

Weiterhin kann nachgewiesen werden, dass die Erweiterung des Wirkraums zur Reduzierung der Durchbiegung und zu einer Gewichtsersparnis führt. Dabei wurde die Querschnittsfläche dahingehend angepasst, Material von der neutralen Faser zu entfernen und dünnwandige, filigrane Strukturen als Verbindung einzusetzen. Die Materialumverteilung liefert folglich einen erheblichen Mehrwert verglichen zur alleinigen Materialreduktion. Der entscheidende Vorteil bei der Verwendung innerer Strukturen liegt demnach darin, dass durch die Erweiterung des Wirkraums die mechanischen Eigenschaften verbessert und das Gewicht reduziert werden können. Weiterhin ist erkennbar, dass die Spannungsverteilungen homogenisiert werden konnten. Besonders für den erweiterten Wirkraum liegt eine hohe Materialausnutzung vor.

	Ausgangsmodell	Bestehender Wirkraum	Erweiterter Wirkraum
Gewicht m	217,5 g	148,9 g	88,1 g
Gewichtsreduktion	-	32 %	59 %
Spannung σ'_{\max}	211,4 N/mm ²	242,5 N/mm ²	240,4 N/mm ²
Durchbiegung w_{\max}	2,69 mm	3,68 mm	1,79 mm

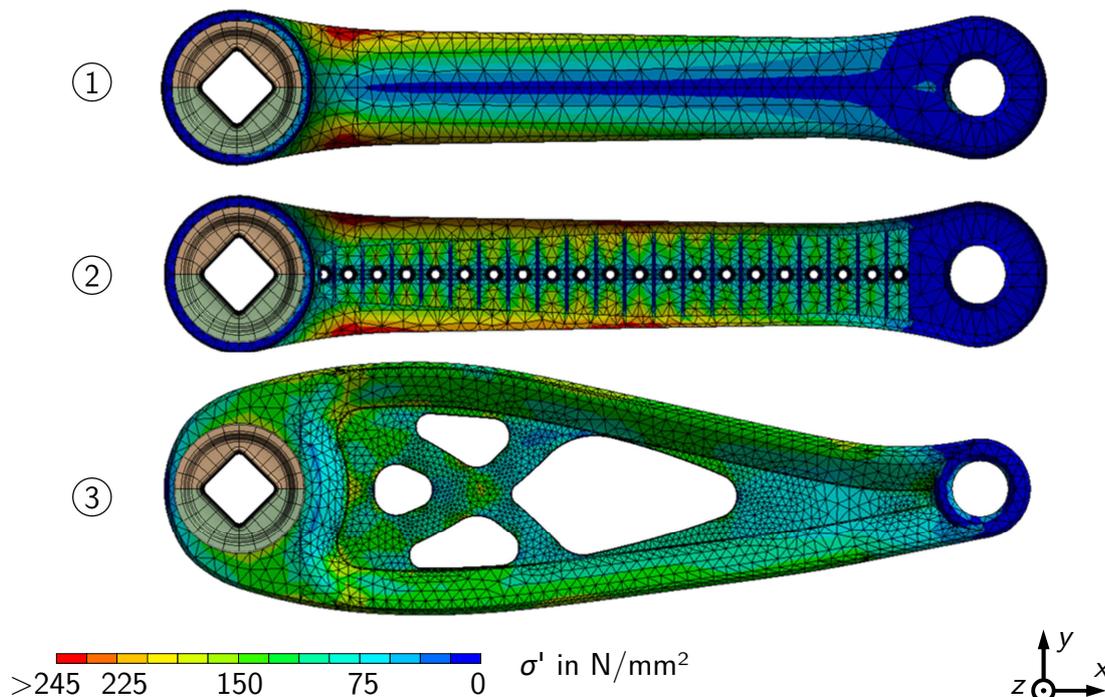


Abbildung 6.26: Optimierungsergebnisse der virtuellen Modelle

In Abbildung 6.27 sind die Biegelinien der Modelle zusammengefasst. Wie auch die Ergebnisse aus Abbildung 6.26 zeigen, kann die Durchbiegung durch die Erweiterung des Wirkraums erheblich reduziert und folglich die Steifigkeit erhöht werden.

Somit lässt sich festhalten, dass bei der Optimierung eines bestehenden Modells zwar eine Gewichtsersparnis möglich ist, diese aber nicht das Optimum darstellt. Der entscheidende Mehrwert besteht darin, ein Modell auf die mechanischen Anforderungen zu abstrahieren und ausgehend von einem erweiterten Wirkraum innere Strukturen einzubringen. Somit ist das Modell dahingehend auszulegen, dass es Selektivem Laserstrahlschmelzen ganzheitlich gerecht wird.

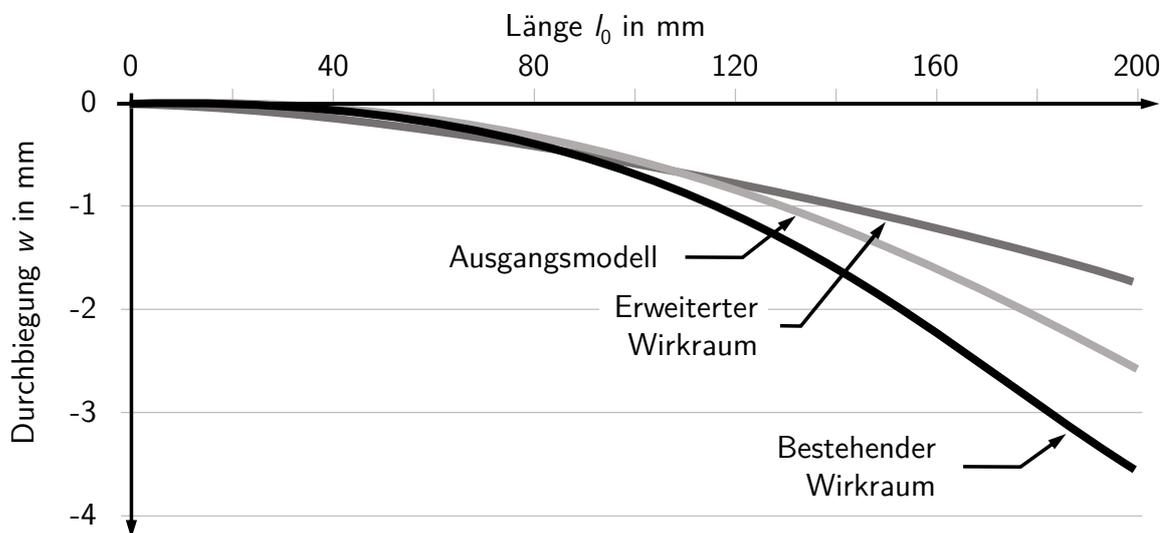


Abbildung 6.27: Biegelinien der virtuellen Modelle bei $F_{\max} = 2.250$ N

7 Validierung des Demonstrators

Im Folgenden werden Prototypen der Demonstratoren, welche entsprechend der Methode zur Gewichtsoptimierung durch innere Strukturen gestaltet wurden, gefertigt und erprobt.

In Abschnitt 7.1 werden die Randbedingungen zur Fertigung beschrieben. Dabei wird auf die verwendete Anlage zum Selektiven Laserstrahlschmelzen, deren spezifischen Eigenschaften sowie auf die verwendeten Prozessparameter eingegangen.

In Abschnitt 7.2 wird die Fertigung der Prototypen beschrieben. Nach der Charakterisierung des In- und Post-Prozesses erfolgt die Beschreibung einer makroskopischen, zerstörungsfreien Untersuchung der Bauteilqualität. Dafür wird das Gewicht der Prototypen dem der virtuellen Modelle gegenübergestellt. Ferner erfolgt die Betrachtung geometrischer Abweichungen, welche eine Schwachstelle für die Erprobung darstellen können.

In Abschnitt 7.3 werden die Prototypen hinsichtlich der relevanten Lastfälle erprobt. Grundlegend werden dafür Voruntersuchungen an Zug- und Biegeproben durchgeführt. Ziel ist die Validierung und Modifizierung der Materialdatenbank entsprechend der spezifischen Eigenschaften, welche sich aus den Randbedingungen des In- und Post-Prozesses ergeben. Vor dem Hintergrund validierter Materialeigenschaften werden die Prototypen auf einem Biegeprüfstand statisch belastet und die Messergebnisse mit denen der Simulation verglichen.

7.1 Randbedingungen

Für die Prototypen-Fertigung wird die Anlage EoSint M280 des Herstellers *EOS GmbH* verwendet. Diese hat einen Bauraum von $250 \times 250 \times 325 \text{ mm}^3$ ($b \times t \times h$). Der eingesetzte Yb-Laser (Ytterbium) hat eine maximale Leistung $P = 400 \text{ W}$ bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1.064 \text{ }\mu\text{m}$. Der Umlenkspiegel ermöglicht Scangeschwindigkeiten bis $v_s = 5.000 \text{ mm/s}$. Für die Verarbeitung von AlSi10Mg wird Argon als Schutzgasatmosphäre verwendet.

Vorversuche haben gezeigt, dass durch die korrekte Einstellung der Prozessparameter Bauteile mit einer Dichte bis nahezu $\rho \approx 100\%$ hergestellt werden können. Die dafür relevanten Prozessparameter liegen qualifiziert für das verwendete Pulvermaterial vor [Eos14]. Tabelle 7.1 zeigt die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Prozessparameter bei einer Schichtdicke $h = 30\ \mu\text{m}$ und einem Hatch-Abstand $h_s = 190\ \mu\text{m}$.

Tabelle 7.1: Prozessparameter zur Prototypen-Fertigung

Parameter	Einheit	Kern	Up- und Downskin	Nachbelichtung der Kontur
Laserleistung	W	370	370	370
Scangeschwindigkeit	mm/s	1300	775	230
Dicke	μm	-	90	60
Offset des Lasers	μm	20	-	-

7.2 Prototypen-Fertigung

Die Modelle (Ausgangsmodell, bestehender Wirkraum und erweiterter Wirkraum) werden entsprechend der Randbedingungen gefertigt. Nach dem Trennen der Prototypen von der Bauplattform werden die Stützstrukturen entfernt.

Weiterhin wird überschüssiges Pulver aus den Kavitäten entfernt. Die Bauteilunterseite wird entsprechend der virtuellen Modelle mittels Hochgeschwindigkeitszerspannung nachbearbeitet, um Rückstände der Stützstrukturen zu reduzieren. Auch die Lagerung der Pedale und des Tretlagers werden entsprechend der virtuellen Modelle aufbereitet. Die Prototypen werden zur Umsetzung der von der *EOS GmbH* angegebenen Materialeigenschaften bei 200°C für 3 Stunden spannungsarmgeglüht. Abschließend erfolgt Sandstrahlen, um die Oberflächenrauheit zu verbessern und das Material im Randbereich zu verfestigen. Abbildung 7.1 zeigt die nachbearbeiteten Prototypen.



Abbildung 7.1: Nachbearbeitete Prototypen

Die Prototypen werden hinsichtlich des Gewichtes untersucht. Ziel ist die Identifizierung möglicher Abweichungen gegenüber den virtuellen Modellen. Abbildung 7.2 stellt das kalkulierte Gewicht der virtuellen Modelle ($m = V * \rho$) dem gemessenen Gewicht der Prototypen gegenüber. Es ist erkennbar, dass das Gewicht des Ausgangsmodells mit dem kalkulierten Gewicht des virtuellen Modells übereinstimmt². Somit kann die angegebenen Materialdichte $\rho = 2,68 \text{ g/cm}^3$ bestätigt werden. Das Modell mit dem bestehenden Wirkraum zeigt eine Gewichtsabweichung von $m_{\text{bestehend}} = 9 \text{ g}$. Auch das Modell mit dem erweiterten Wirkraum hat eine Abweichung von $m_{\text{erweitert}} = 6 \text{ g}$.

Die Gewichtsabweichung zwischen den virtuellen und physischen Modellen beträgt somit ca. 6 %. Hauptursache ist die Ablagerung von überschüssigem Pulver in inneren Kavitäten, welches im Post-Prozess nicht entfernt werden konnte. Auch die nachträgliche Bearbeitung durch Sandstrahlen führt gegebenenfalls zum Rückstand kleiner Partikel in den Kavitäten, was wiederum die Erhöhung des Gewichtes bewirkt. Als weitere Ursache wird vermutet, dass der Effekt der Wärmeeinflusszone (siehe Abbildung 2.12) zum Anschmelzen von Pulverpartikel führt, welche nur partiell in der vorgesehenen Geometrie liegen. Dieser Effekt tritt verstärkt bei einer Erhöhung der Bauteiloberfläche im Vergleich zum Bauteilvolumen auf.

² Das Gewicht wurde für jedes Modell mit jeweils drei Prototypen bestimmt. Im Ergebnis ist der Mittelwert dargestellt. Die Prototypen eines Modells weichen um max. 1 % untereinander ab.

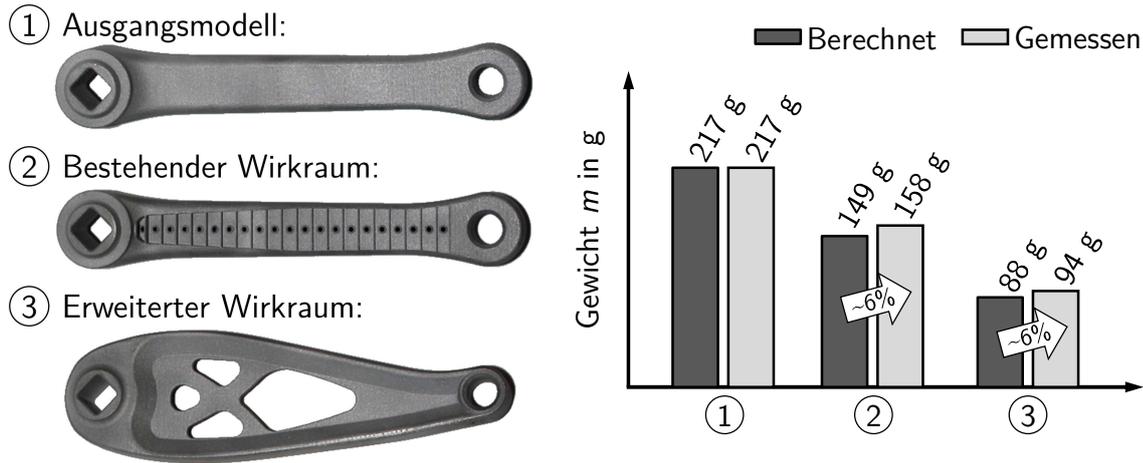


Abbildung 7.2: Gewicht der Prototypen und virtuellen Modelle

7.3 Erprobung

Als Grundlage zur Prototypen-Erprobung werden Voruntersuchungen an genormten Prüfkörpern durchgeführt. Ziel ist die Validierung der Materialdaten sowie die Durchführung entsprechender Modifikationen, da die spezifischen Prozessparameter und die Beschaffenheit des Pulvers einen Einfluss auf die Materialeigenschaften haben. Weiterhin besteht eine hohe Sensibilität der mechanischen Eigenschaften zur Wärmebehandlung [Gebh13].

7.3.1 Voruntersuchungen

Die Voruntersuchungen gliedern sich in zwei Bereiche. Eingangs erfolgt die Untersuchung von Zugproben, um relevante Materialdaten zu ermitteln, diese den Literaturangaben gegenüberzustellen und die Materialdatenbank entsprechend zu modifizieren. Darauf aufbauend werden Biegeproben untersucht. Ziel ist die Validierung des Simulationsmodells mit den ermittelten Materialdaten aus dem Zugversuch, indem der Einfluss der Bauteilgeometrie durch innere Strukturen vernachlässigt wird. Die erlangten Erkenntnisse aus Zug- und Biegeversuch dienen der Interpretation der Prototypen-Erprobung.

Zugversuche

Für die Zugversuche werden Zugproben nach DIN 50125 – B 6 x 30 verwendet [DIN50125]. Dafür werden Near-Net-Shape Geometrien im CAD modelliert, entsprechend der Randbedingungen gefertigt sowie spanend nachbearbeitet. Zur Untersuchung der Anisotropie werden die

Zugproben gemäß Abbildung 7.3 in drei unterschiedlichen Orientierungen im Bauraum platziert. Dabei ist das Achsenkreuz so gelegt, dass die z-Achse der Aufbaurichtung sowie die y-Achse der Beschichtungsrichtung im Bauprozess entsprechen.

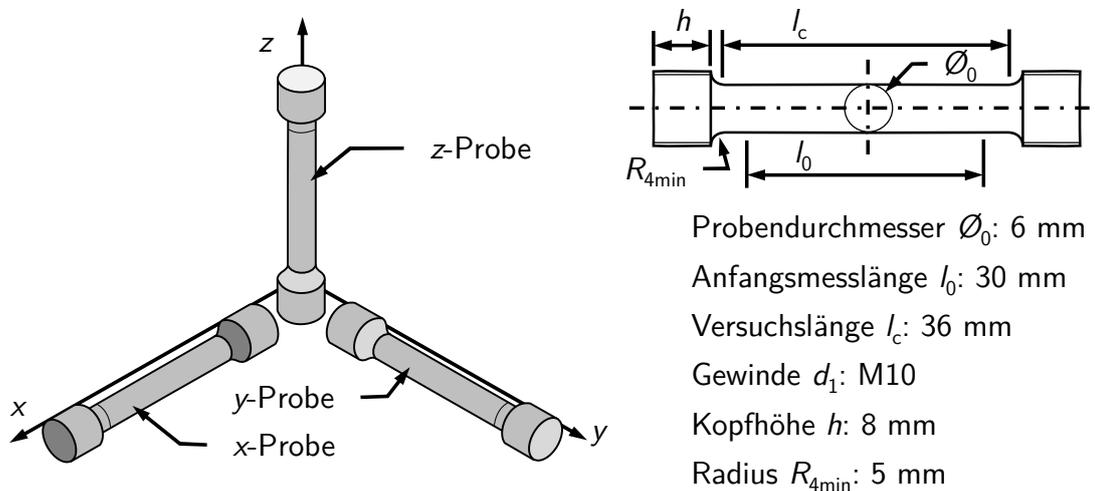


Abbildung 7.3: Orientierung der Zugproben nach DIN 50125 (B6 x 30) im Bauraum

Die Zugproben werden mit einer Losgröße von je drei Stück hergestellt. Weiterhin werden je zwei der Zugproben spannungsarmgeglüht. Abbildung 7.4 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche nach Prüfnorm DIN EN 6892-1 B³ sowie das Spannungs-Dehnungs-Diagramm am Beispiel der x-Zugproben. Die Bestimmung des Schubmoduls G erfolgt nach Gleichung 7.1 mit der Querkontraktionszahl $\nu = 0,3$. Die weiteren Ergebnisse sind im Anhang F dargestellt.

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)} \quad 7.1$$

Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Veränderung der Materialeigenschaften durch Spannungsarmglühen. Dabei wird die Dehngrenze um ca. 20 – 25 % reduziert. Die Bruchdehnung steigt um etwa 70 – 80 % an. Die Untersuchungen zeigen weiterhin, dass die mechanischen Eigenschaften abhängig von der Baurichtungen sind. Dabei sinkt die Bruchdehnung der z-Zugproben im Vergleich zu den x- und y-Zugproben. Auch eine Auswirkung auf das Elastizitätsmodul ist erkennbar.

³ Die Zugversuche wurden vom Institut für Werkstoffkunde der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover durchgeführt.

HT	\varnothing_0 in mm	A_0 in mm ²	$R_{p0,2}$ in N/mm ²	F_{max} in kN	R_m in N/mm ²	A_B in %	E in kN/mm ²	G in kN/mm ²
x -	6,02	28,46	194	9,36	329	9,4	69	27
x	6,01	28,37	151	7,51	265	16,7	61	23
x	6,01	28,37	153	7,58	267	16,9	61	23
y -	5,99	28,18	190	9,15	325	10,1	66	25
x	5,98	28,09	147	7,25	258	18,2	59	23
x	5,99	28,18	145	7,19	255	18,3	59	23
z -	6,00	28,27	194	10,38	367	4,9	64	25
x	6,00	28,27	147	8,09	286	11	63	24
x	6,00	28,27	139	7,58	268	13	63	24

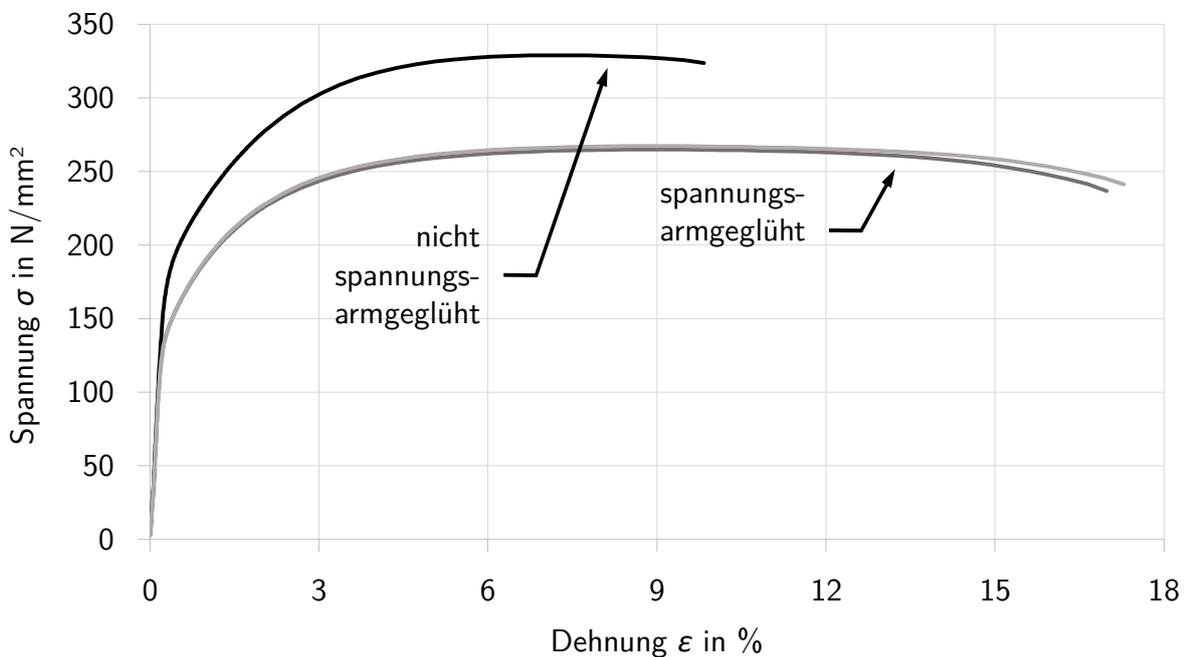


Abbildung 7.4: Ergebnisse der Zugversuche nach Prüfnorm DIN EN 6892-1 B und Spannungs-Dehnungs-Diagramm am Beispiel der x-Zugproben

Ferner ist erkennbar, dass eine Abweichung der experimentell ermittelten Eigenschaften von AlSi10Mg im Vergleich zu den Literaturwerten vorliegt. In Tabelle 7.2 sind die Werte aus der Literatur den ermittelten Werten aus dem Zugversuch gegenübergestellt. Folglich kann bestätigt werden, dass trotz der Verwendung der in der Literatur angegebenen Prozessparameter der spezifische Fertigungsprozess und die Wärmebehandlung eine erhebliche Auswirkung auf die Bauteilqualität hat. In Bezug auf das abweichende Elastizitätsmodul wird eine Auswirkung auf die diskutierte Bauteilsteifigkeit resultieren, da diese maßgebend von der Elastizität eines Materials abhängig ist. Durch die Differenz der Zugfestigkeit und Streckgrenze muss weiterhin die zulässige Spannung und folglich die Sicherheit gegenüber Versagen angepasst werden.

Tabelle 7.2: Mechanischen Eigenschaften von spannungsarmgeglühten AISi10Mg-Zugproben

	Symbol	Einheit	Literatur	Zugversuch
E-Modul (xy)	E_{xy}	kN/mm ²	70 ± 10	60
E-Modul (z)	E_z	kN/mm ²	60 ± 10	65
Zugfestigkeit (xy)	$R_{m\ xy}$	N/mm ²	345 ± 10	260
Zugfestigkeit (z)	$R_{m\ z}$	N/mm ²	350 ± 10	290
Dehngrenze (xy)	$R_{p0,2\ xy}$	N/mm ²	230 ± 15	150
Dehngrenze (z)	$R_{p0,2\ z}$	N/mm ²	230 ± 15	150
Bruchdehnung (xy)	A	%	12 ± 2	17,5
Bruchdehnung (z)	A	%	11 ± 2	9

Biegeversuch

Unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften, welche im Zugversuch ermittelt wurden (siehe Tabelle 7.2), werden Biegeversuche durchgeführt. Dabei wird eine Biegevorrichtung mit zwei Auflagerrollen und einem Biegestempel verwendet [DIN7438]. Ziel ist der Vergleich der Simulationen mit dem physischen Bauteilverhalten und somit die Validierung der Simulationsmodelle.

Für die Biegeversuche werden Biegeproben mit $h \times b \times t = 10 \times 10 \times 100 \text{ mm}^3$ verwendet [DIN7438]. Wie auch bei der Vorgehensweise zur Herstellung der Zugproben, werden Near-Net-Shape Geometrien im CAD modelliert, entsprechend der Randbedingungen gefertigt sowie spanend nachbearbeitet. Zur Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens werden die Biegeproben entsprechend Abbildung 7.5 in drei unterschiedlichen Orientierungen im Bau-raum zu einer Losgröße von je drei Stück gefertigt. Die z-Achse entspricht dabei der Aufbau-richtung sowie die y-Achse der Beschichtungsrichtung im Bauprozess. Abschließend werden alle Biegeproben spannungsarmgeglüht.

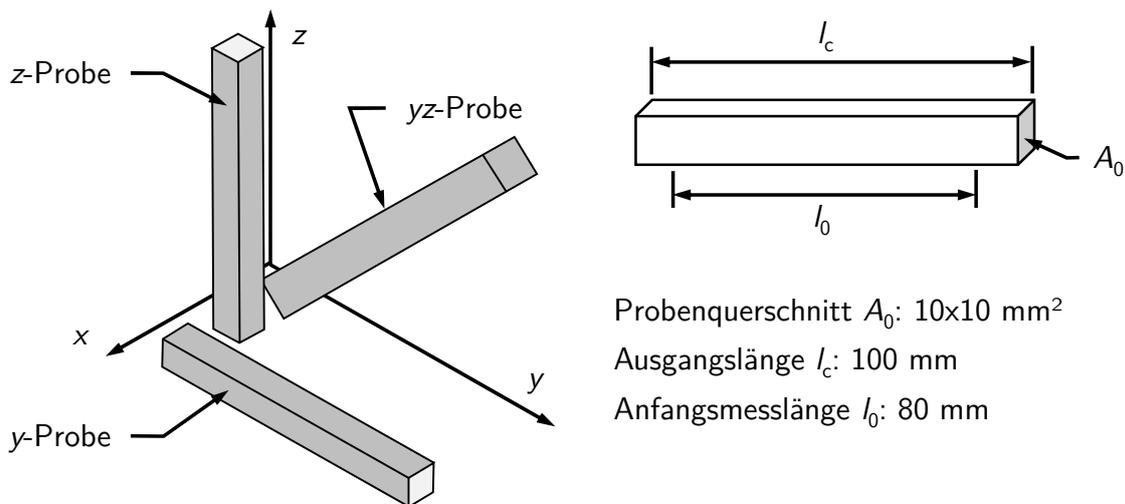


Abbildung 7.5: Orientierung der Biegeproben nach ISO 7438 im Bauraum

Auf einem Prüfstand werden die Biegeproben entsprechend Abbildung 7.6 gelagert sowie mittig bei $l_c/2$ mit der Last F belastet. Als Messwerte werden die Last F und die resultierende Durchbiegung w im Punkt der Krafteinleitung dokumentiert. Zur Ermittlung der Biegelinie werden die Biegeproben weiterhin in Segmente von je 10 mm unterteilt und entsprechend markiert. Durch die Bestimmung der Durchbiegung in den insgesamt acht Messpunkten kann die Biegelinie näherungsweise aufgestellt werden. Bei den Versuchen wird die Last $F_{\text{Prüf}}$ mit $\Delta F = 250 \text{ N}$ bis $F_{\text{max}} = 1.250 \text{ N}$ erhöht. Für jeden Lastfall wird die Biegelinie dokumentiert. Die Last zur Erreichung der maximalen Durchbiegung im elastischen Bereich wird entsprechend Gleichung 7.2 ermittelt.

$$F_{\text{Prüf}} = \frac{\sigma_{\text{zul}} * W_b * 4}{l} \approx 1.250 \text{ N} \quad 7.2$$

$$\text{mit } \sigma_{\text{zul}} = 150 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}; l = l_0 = 80 \text{ mm}; W_b = \frac{h^3}{6} = 166 \text{ mm}^3$$

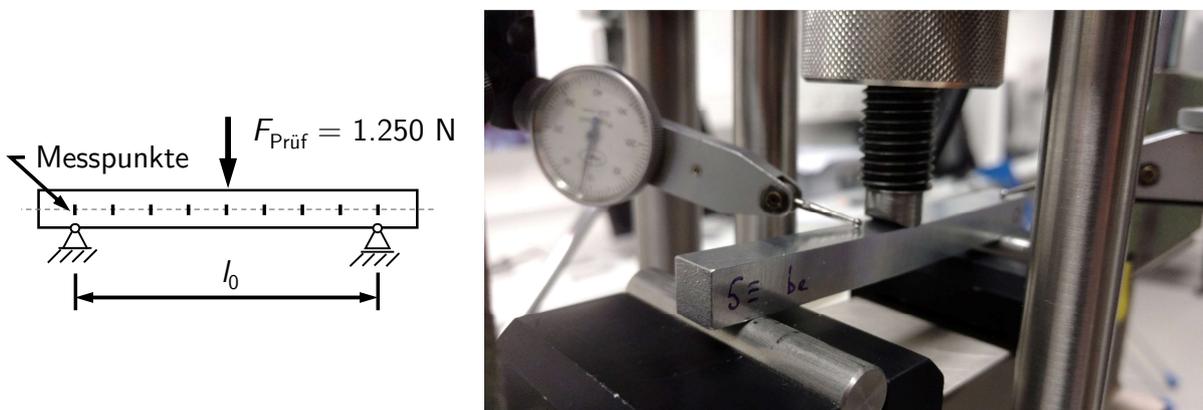


Abbildung 7.6: Prüfaufbau für Biegeproben nach ISO 7438

Neben den Versuchen werden Simulationen entsprechend Abbildung 7.7 durchgeführt. Dabei werden die im Zugversuch ermittelten Materialdaten aus Tabelle 7.2 verwendet. Zur realitätsnahen Abbildung der Versuche werden die Auflager sowie die Krafteinleitung als Zylinder mit Linienkontakt modelliert und mit gehärtetem Stahl als Material versehen.

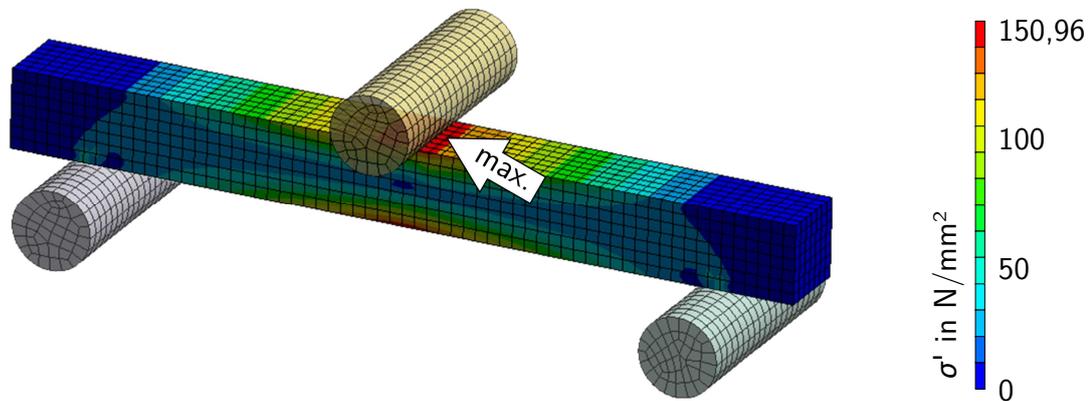


Abbildung 7.7: Randbedingungen zur Simulation der Biegeproben

Auch bei der Simulation werden die Biegelinien der Prüfkörper in Abhängigkeit der Last F berechnet, um diese mit den Messungen abzugleichen. Abbildung 7.8 zeigt die Biegelinie am Beispiel einer y -Biegeprobe. Dargestellt ist die Durchbiegung w in den acht Messpunkten sowie die errechnete Biegelinie bei einer einwirkenden Last $F = 1.228$ N. Dieser Betrag resultiert aus den Versuchen und weicht entsprechend der Einstellungsungenauigkeit von der vorgesehenen Last $F_{\text{Prüf}} = 1.250$ N ab. Die Ergebnisse der y -, z - und yz -Biegeproben sind im Anhang G dargestellt.

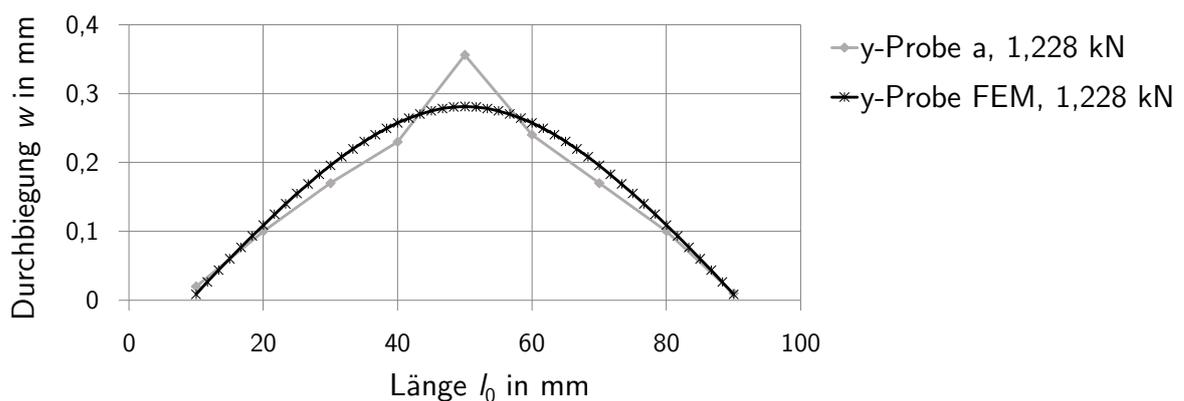


Abbildung 7.8: Durchbiegung der virtuellen und physischen y -Biegeprobe bei $F = 1.228$ N

Die berechneten Werte bilden die gemessenen Werte gut ab. Lediglich der Messpunkt bei $l_c/2 = 50$ mm zeigt eine erhöhte Durchbiegung im Vergleich zur Simulation. Grund dafür ist die Messung über die Krafteinleitung. Im Vergleich zu den restlichen Messpunkten werden

lokale Verformungen in Folge des einwirkenden Biegestempels gemessen. Die weiteren Biegeproben weisen ebenfalls diese Charakteristik auf. Weiterhin wird an den Messwerten die Anisotropie des Materials deutlich. Abbildung 7.9 zeigt die Richtungsabhängigkeit der gemessenen und berechneten Biegelinien.

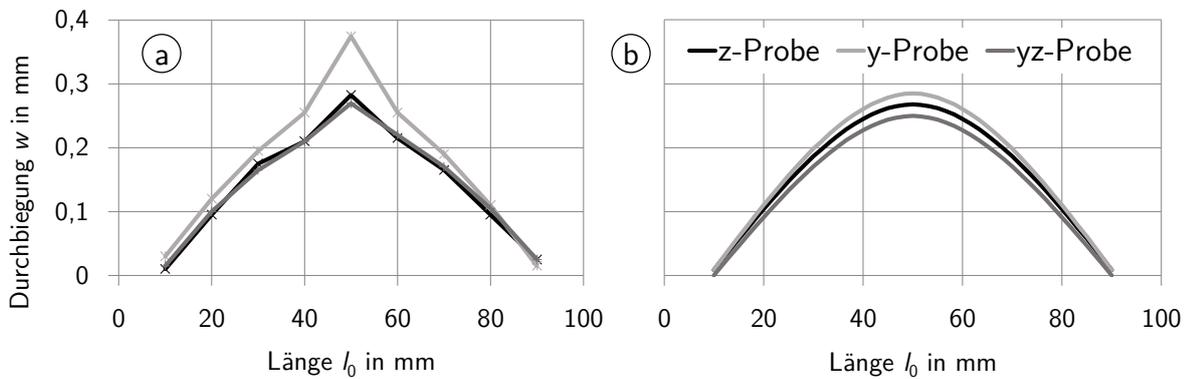


Abbildung 7.9: Durchbiegung der Biegeproben bei $F = 1.250 \text{ N}$ a) Messung b) Simulation

Es ist erkennbar, dass die y -Biegeproben die größte Durchbiegung zeigen. In Hinblick auf die hinterlegten Materialdaten ist diese Reihenfolge plausibel, da die Biegesteifigkeit bei gleichem Querschnitt von der Elastizität des Materials abhängt und das Elastizitätsmodell in x - und y -Richtung am geringsten ist. Auch liegen die Elastizitätsmodule innerhalb des angegebenen Bereichs der Literaturwerte. Dennoch ist zu beachten, dass sich das Verhältnis in x - und y - zur z -Richtung unterscheidet. In der Literatur ist die Elastizität in z -Richtung am geringsten angegeben. Vor dem Hintergrund der diskutierten Abbildungsgenauigkeit wurde die Materialdatenbank für die verwendete Anlage, Materialcharge und Wärmebehandlung verbessert.

7.3.2 Statische Versuche

Die statischen Versuche dienen zum Vergleich der Prototypen sowie zum Abgleich der Messungen und Simulationen. Abweichend von den idealisierten simulierten Werten wird die Betrachtung auf Basis der experimentell ermittelten Materialeigenschaften durchgeführt. Dafür werden die Modelle mit der angepassten Materialdatenbank aus den Vorversuchen simuliert. Zur Erprobung wird ein Prüfstand für statische Biegebelastung aufgebaut. Abbildung 7.10 zeigt eine virtuelle Darstellung des Versuchsaufbaus. Der Prüfkörper wird mit einer Fixierschraube auf die Achse eines Tretlagers montiert, sodass eine Flächenpressung in der Einspannung entsteht. Die Achse wird durch Spannblöcke mit einer Vierkantaufnahme fixiert. Eine Grundplatte aus gehärtetem Stahl dient der Kraftleitung. Der eingespannte Prüfkörper wird über einen Bolzen mit einem Stempel belastet, welcher an einer Linearführung montiert ist.

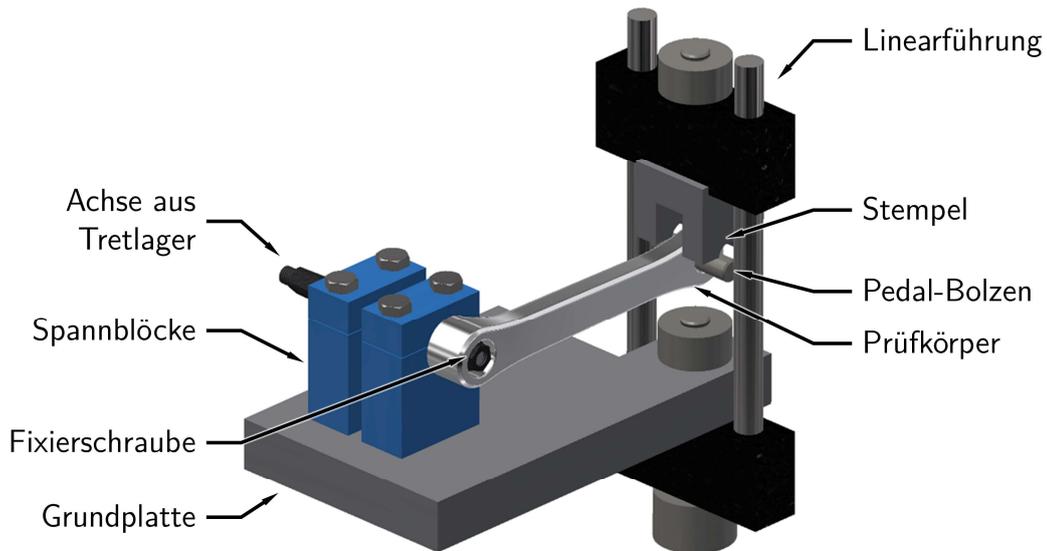


Abbildung 7.10: Virtuelle Darstellung des Versuchsaufbaus für statische Biegebelastung

Der Versuchsablauf sieht die Dokumentation der einwirkenden Last F und der Verschiebung u_{Messung} im Punkt der Krafteinleitung vor. Darüber hinaus wird die Biegelinie auf der Bauteiloberfläche an den Messpunkten $a = 56,5 \text{ mm}$, $b = 113,5 \text{ mm}$ und $c = 170 \text{ mm}$ gemessen. Es werden Biegelinien für Lasten bis $F_{\text{max}} = 1.250 \text{ N}$ mit einer Schrittweite von $\Delta F = 250 \text{ N}$ ermittelt. Die maximale Last ergibt sich aus der zulässigen Spannung $\sigma_{\text{zul}} = 150 \text{ N/mm}^2$, welche in den Voruntersuchungen ermittelt wurde, und weicht aufgrund der Materialcharakteristik gering von der DIN-Prüfung ab. Weiterhin wird der Drehwinkel α_x des Prüfkörpers auf der Achse bestimmt, um die Verschiebung u_{Drehung} infolge einer möglichen Drehung zu identifizieren, siehe Abbildung 7.11. Ausschlaggebend können lokale Verformungen in der Einspannung sein.

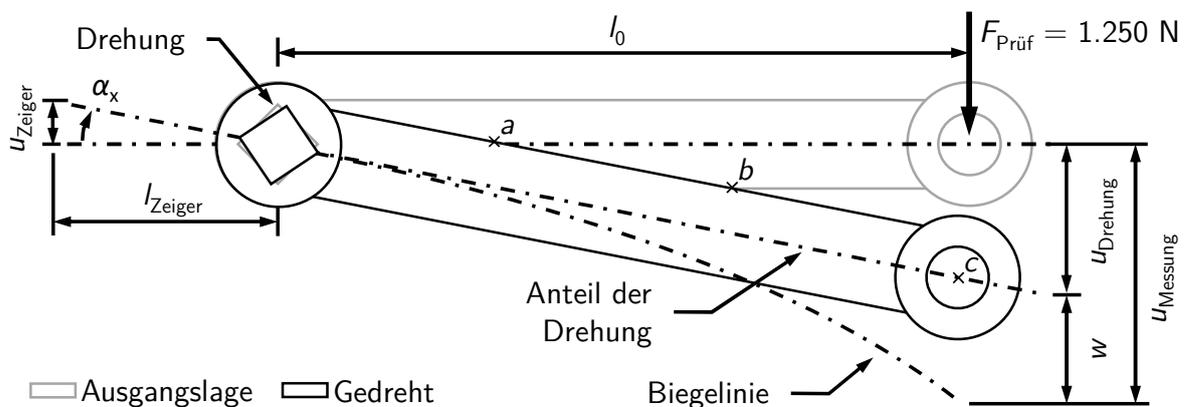


Abbildung 7.11: Ursachen für Messungenauigkeiten bei statischer Biegebelastung

Zur Messung des Drehwinkel α_x wird ein Zeiger am Prüfkörper befestigt. Dieser zeigt die Verschiebung u_{Zeiger} beim Abstand l_{Zeiger} mit einer Messgenauigkeit von 0,05 mm an. Die Zeigerlänge l_{Zeiger} variiert in Abhängigkeit des montierten Prüfkörpers und liegt in einem Bereich zwischen 52 und 54 mm. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 7.12 dokumentiert.

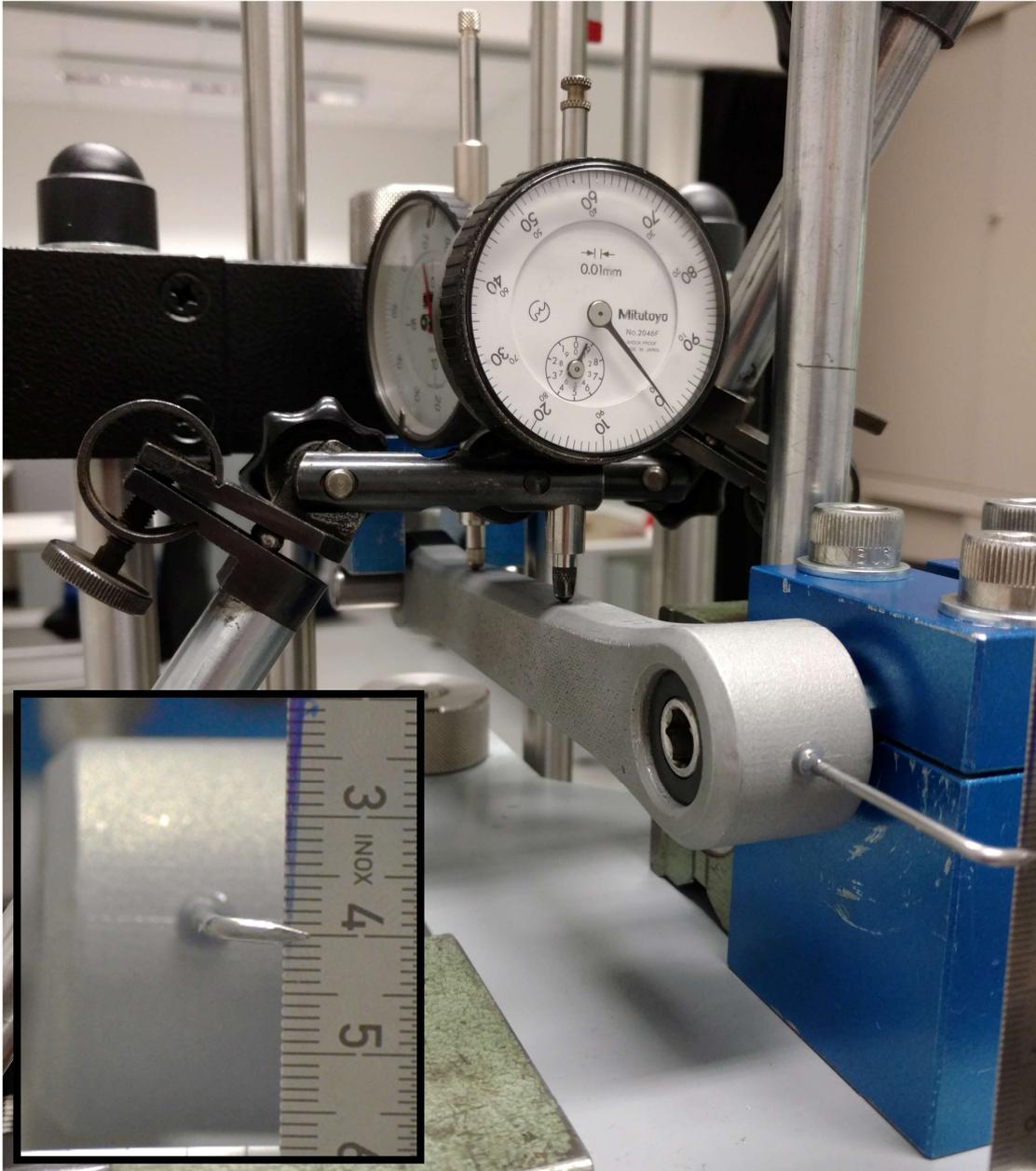


Abbildung 7.12: Versuchsaufbau für statische Biegelast

Am Beispiel des Ausgangsmodells sind die Messwerte in Abbildung 7.13 zusammengefasst. In Abhängigkeit der einwirkenden Last $F_{\text{Prüf}}$ wird die Durchbiegung w_{Biegung} in den Messpunkten a , b und c dargestellt. Die Messwerte zeigen die Durchbiegung des Modells, indem die Verschiebung u_{Drehung} von der gemessenen Verschiebung u_{Messung} subtrahiert ist. Die weiteren Ergebnisse sind in Anhang H beigefügt, bei welchen die Verschiebung und die bereinigte Durchbiegung dargestellt sind.

Last $F_{\text{Prüf}}$	w ($a = 56,5$ mm)	w ($b = 113,5$ mm)	w ($c = 170$ mm)
253 N	0,09 mm	0,22 mm	0,42 mm
512 N	0,11 mm	0,34 mm	0,62 mm
759 N	0,21 mm	0,61 mm	1,08 mm
1006 N	0,26 mm	0,77 mm	1,39 mm
1246 N	0,25 mm	0,82 mm	1,56 mm

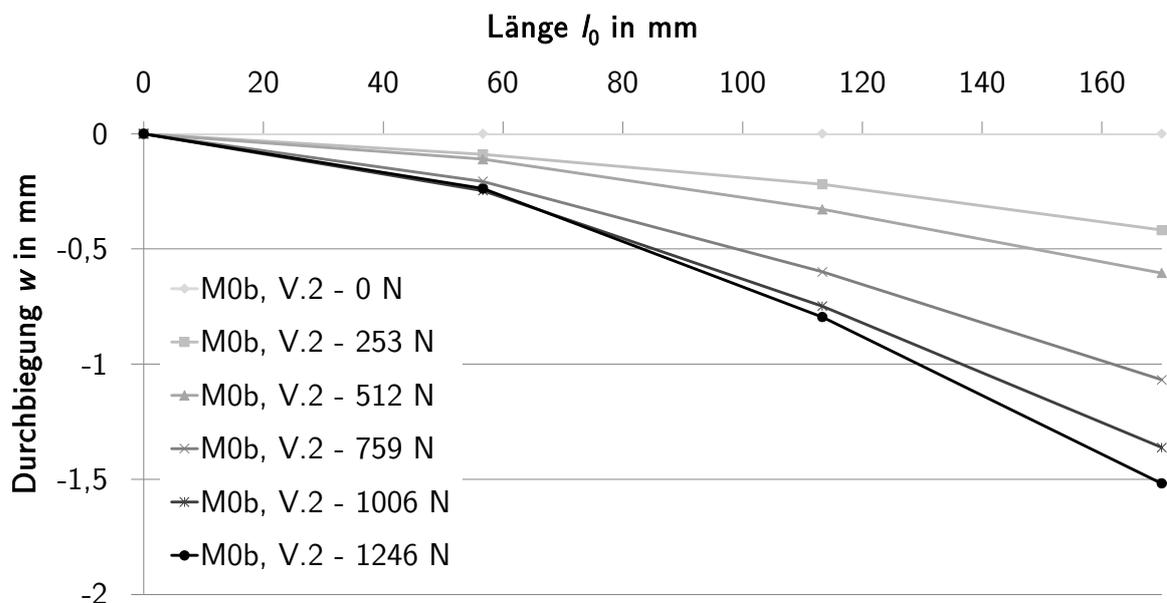


Abbildung 7.13: Durchbiegung des Ausgangsmodells bei zunehmender Last F

Zum Ausgleich möglicher Schwankungen werden zwei Prototypen je Modell geprüft. Weiterhin wird jeder Prototyp zweimal auf dem Prüfstand untersucht, sodass insgesamt vier Messungen pro Modell vorliegen. Aufgrund der Verformung im elastischen Bereich kann von reproduzierbaren Ergebnissen ausgegangen werden.

Die Messungen sollen zum Abgleich mit den Simulationen verwendet werden. Wie in den Voruntersuchungen gezeigt, weichen jedoch die realen von den angenommenen Materialdaten ab, sodass erneute Simulationen unter Verwendung der angepassten Materialdatenbank notwendig sind.

Für die angepassten Simulationen werden die Randbedingungen entsprechend Abbildung 6.2 verwendet, sodass die feste Einspannung der Modelle in der Vierkant-Aufnahme erfolgt. Abbildung 7.14 fasst die Randbedingungen zur Simulation am Beispiel des Ausgangsmodells zusammen und zeigt die simulierte und experimentell ermittelte Durchbiegung w mit Standardabweichung. Die weiteren Ergebnisse sind in Anhang I beigefügt.

Es kann gezeigt werden, dass die Simulation eine hohe Übereinstimmung mit der experimentell ermittelten Durchbiegung w aufweist und innerhalb der Standardabweichung liegt. Die Abbildungsgenauigkeit liegt dabei für alle drei Modelle in einem identischen Bereich. Aufgrund der diskreten Messung wird die Biegelinie approximiert, sodass diese nicht tangential zum Nullpunkt verläuft.

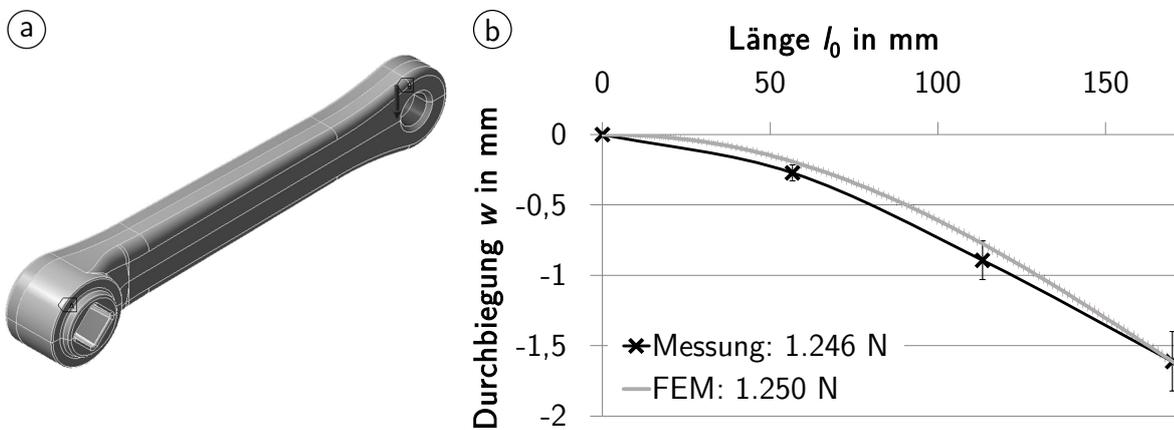


Abbildung 7.14: Durchbiegung des Ausgangsmodells bei $F = 1.250$ N a) Randbedingungen zur Simulation b) Vergleich Messung und Simulation

In Abbildung 7.15 werden die simulierten und experimentell ermittelten Biegelinien für einwirkende Lasten $F_1 = 750$ N und $F_2 = 1.250$ N gegenübergestellt. Die simulierten Biegelinien in Abbildung 7.15a zeigen, dass die relativen Unterschiede trotz abweichender Materialdaten den Voruntersuchungen zur Gewichtsoptimierung der Demonstratoren entsprechen. Die absoluten Werte reduzieren sich entsprechend der angepassten Materialdatenbank. Die Ergebnisse bestätigen somit, dass die Verwendung innerer Strukturen im erweiterten Wirkraum zur höchsten Steifigkeit führt. Das Ausgangsmodell unterliegt in Relation dazu einer höheren Durchbiegung. Das Modell mit inneren Strukturen im bestehenden Wirkraum weist letztendlich die höchste Durchbiegung und folglich die geringste Steifigkeit auf.

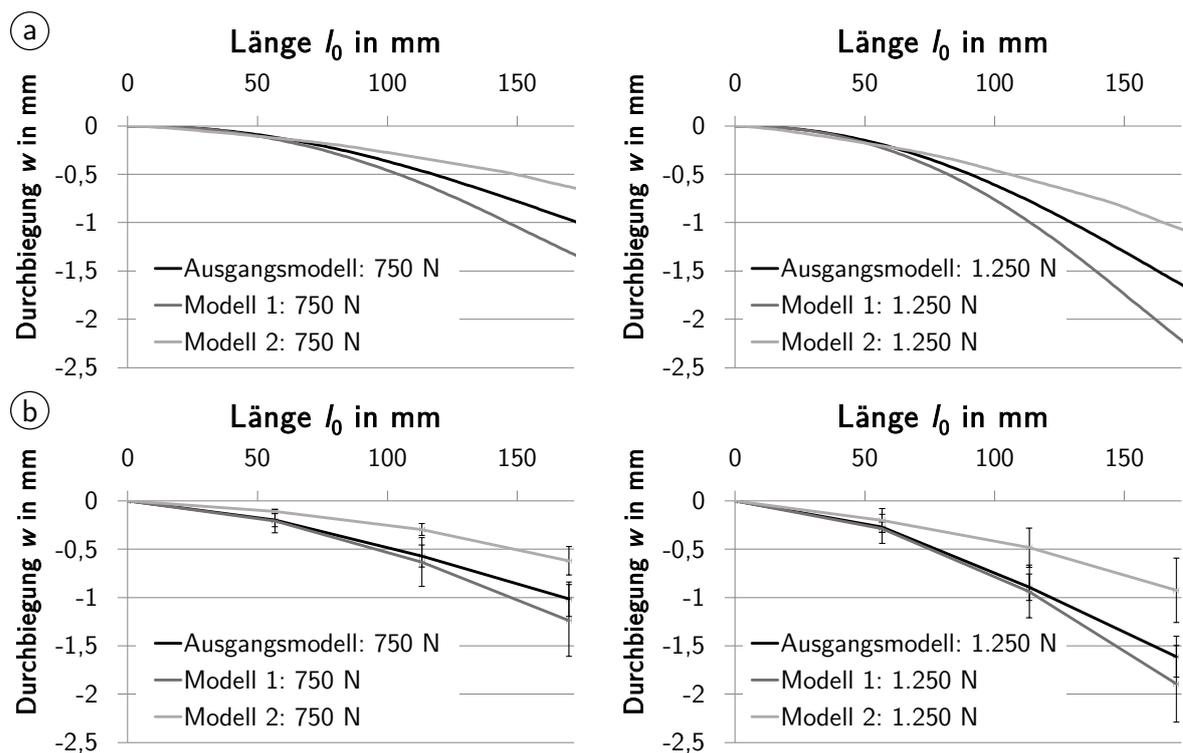


Abbildung 7.15: Durchbiegung der Tretkurbeln a) Simulation b) Messung

In Abbildung 7.15b werden die Biegelinien der Prototypen für $F_1 = 750$ N und $F_2 = 1.250$ N gegenübergestellt. Die Ergebnisse bestätigen auch hierbei, dass der Prototyp mit inneren Strukturen im erweiterten Wirkraum die höchste Steifigkeit aufweist. Ferner zeigt der Prototyp mit inneren Strukturen im bestehenden Wirkraum die höchste Durchbiegung und folglich die geringste Steifigkeit. Das Ausgangsmodell liegt zwischen den beiden Modellen mit inneren Strukturen, sodass die Relation mit der Simulation übereinstimmt. Die Ergebnisse bestätigen weiterhin, dass die experimentell ermittelte Durchbiegung der rechnerunterstützten Berechnung entspricht. Alle Simulationsergebnisse liegen innerhalb der Standardabweichung.

Folglich ist die Vorhersage des physischen Bauteilverhaltens durch die Simulation einer statischen Biegelast gegeben, bei welcher die Anisotropie des Materials berücksichtigt und innere Strukturen abgebildet werden. Nachfolgend werden die Erkenntnisse aus der Prototypen-Erprobung sowie dem Vergleich mit den Simulationen zusammengefasst:

- **Datenerfassung:** Die getroffenen Annahmen zur Gewichtsoptimierung der Demonstratoren konnten größtenteils nachgewiesen werden. Zwar liegt eine Abweichung der Materialdaten zu den Literaturwerten vor, die Relation der Modelle zueinander bleibt jedoch bestehen. Dabei wurde bestätigt, dass die hergestellten Bauteile ein anisotropes Materialverhalten aufweisen. Vor dem Hintergrund der eingangs aufgeführten Literaturuntersuchung hat sich gezeigt, dass eine Schwankung der mechanischen Eigenschaften für

AlSi10Mg in Abhängigkeit der verwendeten Maschine, Materialcharge und Wärmebehandlung bestehen. Folglich ist eine exakte Bestimmung der Materialdaten anzustreben, welche sich auf das eigens verwendete Parameterset beziehen.

- **Simulationsmodelle:** Es wurde nachgewiesen, dass die Anisotropie durch die Simulation abgebildet werden kann. So unterscheiden sich die simulierten Biegelinien in den Voruntersuchungen in Abhängigkeit der Orientierung bei der Materialzuweisung. Vor dem Hintergrund richtungsabhängiger Elastizitätsmodule von laserstrahlgeschmolzenem AlSi10Mg ist die diskutierte Differenzierung der Biegesteifigkeiten plausibel.
- **Abbildungsgenauigkeit:** Der Vergleich aus simulierten und experimentell ermittelten Biegelinien zeigt eine hohe Abbildungsgenauigkeit innerhalb der Standardabweichung. Folglich ist eine Vorhersage von biegebelasteten Bauteilen unter Verwendung der Materialdatenbank gegeben. Dabei werden die Untersuchungen für statische Belastungen für elastisches Materialverhalten durchgeführt.
- **Sensibilität der Messergebnisse:** Abweichungen zwischen den Messungen und Simulationen begründen sich zum Teil aus dem Einfluss des In-Prozesses auf die Bauteilqualität. So können sich beispielsweise die Eigenschaften eines laserstrahlgeschmolzenen Bauteils in Abhängigkeit der Platzierung im Bauraum unterscheiden. Ferner hat die Wärmebehandlung hohe Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften von laserstrahlgeschmolzenem AlSi10Mg, da hierbei die Materialcharakteristiken drastisch beeinflusst werden. In der vorliegenden Arbeit wird als Wärmebehandlung ein Spannungsarmglühen der hergestellten Bauteile betrachtet. Die Untersuchung weiterer Möglichkeiten zur Wärmenachbehandlung für die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften kann an die Untersuchung anknüpfen. Geringe Messungsgenauigkeiten sind weiterhin durch den Versuchsaufbau begründet.
- **Optimierungspotential:** Die eingangs getroffene Annahme, eine Erhöhung der Biegesteifigkeit bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion durch innere Strukturen zu erzielen, kann bestätigt werden. Die maximalen Spannungen im Bauteil bleiben dabei nahezu konstant. Hingegen kann eine Homogenisierung der Spannungsverteilung erzielt werden, sodass eine hohe Materialausnutzung und demnach eine weitestgehende Gewichtsoptimierung nachgewiesen werden kann. Dabei kann die Biegesteifigkeit der Tretkurbel nicht durch die ausschließliche Materialreduktion gesteigert werden. Hingegen ist das Gestalten von dünnwandigen Geometrien mit großem Abstand zur neutralen Faser anzustreben. Ein maßgebliches Optimierungspotential von Strukturbauteilen liegt folglich im Loslösen von bestehenden Wirkräumen und der damit einhergehenden Abstraktion des Bauteils auf relevante Funktionen.

8 Praxisrelevanz der Ergebnisse

Zur Diskussion der Praxisrelevanz wird der Optimierungsverlauf beim Gestalten angepasster Demonstratoren zusammengefasst und hinsichtlich der Übertragbarkeit auf andere Problemstellungen diskutiert. Dafür wird eine Abschätzung des Optimierungspotentials in Abhängigkeit unterschiedlicher Herangehensweisen bei Verwendung der erarbeiteten Methode gegeben. Weiterhin wird die Erfüllung der gestellten Anforderungen bewertet und diese zur Implementierung der Methode konkretisiert. Dabei werden die wesentlichen Herausforderungen bei der Umsetzung der gestellten Anforderungen herausgearbeitet. Abschließend werden Einflussfaktoren im Umgang mit inneren Strukturen definiert, welche die virtuellen als auch physischen Modelle betreffen.

Anhand der Untersuchungen der Demonstratoren wurde nachgewiesen, dass innere Strukturen zur Gewichtsersparnis für Strukturbauteile eingesetzt werden können. Dabei wurde gezeigt, dass ein erheblicher Mehrwert erreicht wird, wenn das Bauteil ganzheitlich für Selektives Laserstrahlschmelzen ausgearbeitet wird. Vor diesem Hintergrund wurde gezeigt, dass die Steifigkeit eines bestehenden Wirkraums durch die Gewichtsoptimierung verringert wird. Die Spannungsverteilung kann jedoch homogenisiert werden, indem eine höhere Materialausnutzung im Vergleich zum Ausgangsmodell vorliegt. Ferner wurde belegt, dass durch die Umverteilung des Materials sowohl das Gewicht reduziert als auch die Steifigkeit erhöht werden können. Auch die Spannungsverteilung kann durch die Materialumverteilung homogenisiert werden. Am Beispiel der Tretkurbel wurde die Querschnittsfläche dahingehend ausgelegt, Material weit von der neutralen Faser zu entfernen, dieses durch filigrane dünnwandige Strukturen zu verbinden und somit die Biegesteifigkeit erheblich zu verbessern. Wie in Abbildung 8.1 dargestellt, konnte so das Gewicht im erweiterten Wirkraum um 59 % reduziert werden. Im bestehenden Wirkraum konnte eine Gewichtsreduktion von 32 % im Vergleich zum Ausgangsmodell umgesetzt werden.

Dabei ist darauf hinzuweisen, dass beim Einsatz von inneren Strukturen eine Gewichtsabweichung der Prototypen zu den virtuellen Modellen resultieren kann. Die Untersuchung der Demonstratoren hat eine Gewichtsabweichung von ca. 6 % ergeben.

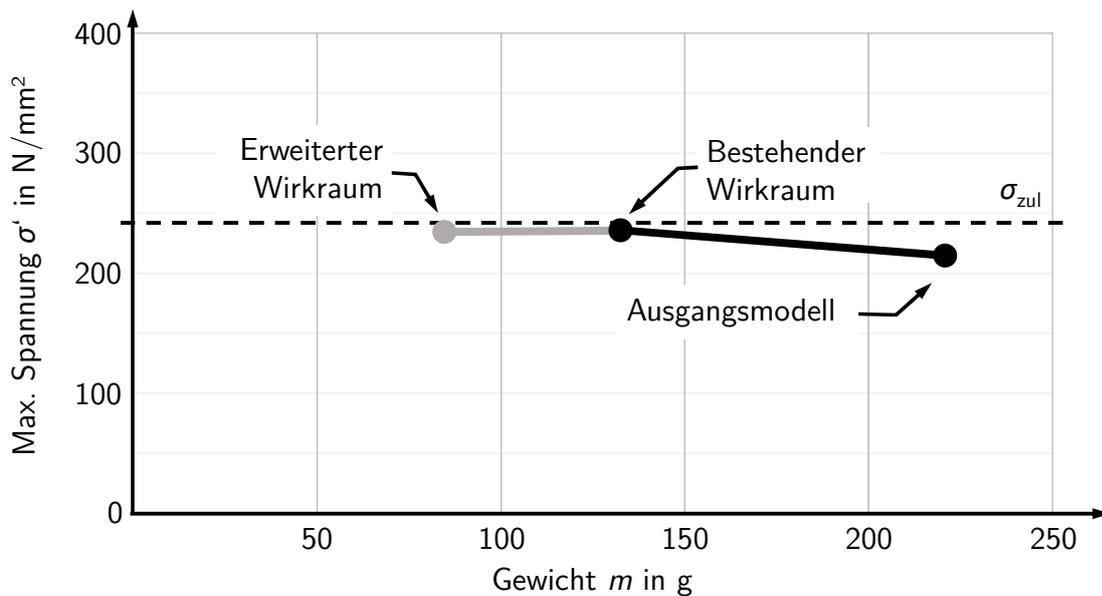


Abbildung 8.1: Optimierungsverlauf beim Gestalten angepasster Demonstratoren

Das Gewichtseinsparungspotential ist stark von der individuellen Problemstellung abhängig. Zur Optimierung eignen sich besonders Strukturbauteile, welche mit Biegung, Torsion oder einem Lastkollektiv belastet werden und folglich keine konstanten Querschnittsflächen benötigen. Grundsätzlich muss dafür der Belastungsfall definiert sein. Mit Kenntnis über die Lastpfade lassen sich angepasste Querschnittsflächen durch Selektives Laserstrahlschmelzen bauteilspezifisch umsetzen.

Anwendung und Potential der Methode

Die diskutierte Methode beschreibt ein systematisches Vorgehen mit vier Arbeitsschritten und die Eingliederung von Rechnerwerkzeugen und Gestaltungsrichtlinien. Dabei erfolgt eine schrittweise Detaillierung des Modells, indem die maximalen Spannungen an die zulässigen Spannungen sowie des Gewichts an ein Optimum angenähert wird. Eine Überprüfung der Verformungen hinsichtlich der gestellten Anforderungen ergänzt die Betrachtung der mechanischen Eigenschaften. Dazu wird in der Prinzipfindung der Wirkraum des Bauteils festgelegt. Bei der Konzeptfindung wird weiterhin ein Gestaltungsraum im Wirkraum definiert, welcher sich zur Einbringung innerer Strukturen eignet. Zudem wird eine belastungsgerechte Struktur ausgewählt. Zur Gestaltung des Vorentwurfs wird die Struktur in den Gestaltungsraum eingebracht und dahingehend ausgelegt, dass die Spannungen unterhalb der zulässigen Grenzwerte liegen und eine homogene Spannungsverteilung vorliegt. Abschließend erfolgt die Validierung des Modells hinsichtlich Gestaltungsrichtlinien zur Erstellung des Gesamtentwurfs.

Um ein Bauteil konsequent für Selektives Laserstrahlschmelzen auszulegen, sollten alle Arbeitsschritte berücksichtigt werden. Dabei wird das Bauteil auf die relevante Funktionen und Wirkflächen abstrahiert und anschließend von diesen Flächen ausgehend nach innen hin aufgebaut. Neben der Absicherung der mechanischen Eigenschaften erfolgt die stetige Validierung der Herstellbarkeit.

Es wurde gezeigt, dass ebenfalls die Optimierung eines bestehenden Modells möglich ist. Dafür kann im systematischen Vorgehen der erste Arbeitsschritt übergangen werden, indem der Wirkraum des Ausgangsmodells übernommen wird. Folglich sinkt der Optimierungsaufwand erheblich. Hingegen wurde nachgewiesen, dass somit das Optimierungspotential nicht ausgeschöpft wird.

Wie im Stand der Forschung diskutiert, ist es weiterhin möglich, ein konventionell gestaltetes Bauteil ausschließlich an die Fertigungsmöglichkeiten des Selektiven Laserstrahlschmelzens anzupassen. Folglich kann im systematischen Vorgehen die Optimierung wahlweise im dritten oder vierten Arbeitsschritt beginnen, sodass die Sicherstellung der Herstellbarkeit des Bauteils im Fokus steht. Somit kann gezielt gesteuert werden, ob eine Spannungsoptimierung durchgeführt oder das konventionell gestaltete Bauteil lediglich zur Herstellbarkeit modifiziert werden soll.

Demzufolge lässt sich zusammenfassen, dass es unterschiedliche Möglichkeiten gibt in das systematische Vorgehen einzusteigen. Die damit einhergehende Optimierung ist folglich mit unterschiedlichem Aufwand, vor allem aber mit unterschiedlichem Optimierungspotential, verbunden. Abbildung 8.2 zeigt den Zusammenhang zwischen Optimierungsaufwand und –potential in Bezug zum gewählten Startpunkt im systematischen Vorgehen.

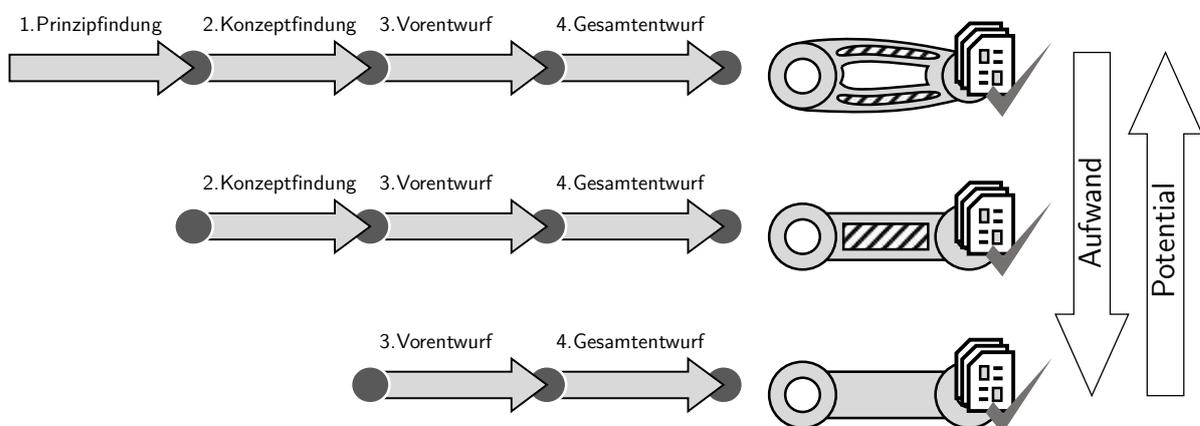


Abbildung 8.2: Optimierungsaufwand und –potential im systematischen Vorgehen

Bei der Anwendung der Methode und dem Durchlaufen des systematischen Vorgehens kann somit das Ausmaß der Optimierung gesteuert werden. Beginnend beim fertigungsgerechten Gestalten, z.B. für den Einsatz als Rapid Prototyping, eignet sich die Methode vor Allem zur durchgängigen Auslegung eines Bauteils für Direct Manufacturing Anwendungen.

Um den maßgebenden Mehrwert des Selektiven Laserstrahlschmelzens herauszuarbeiten und somit extreme Leichtbaukonstruktionen umzusetzen, ist die durchgängige Entwicklung laserstrahlgeschmolzener Bauteile sinnvoll. Somit können Ressourcen eingespart und das Bauteil effizient im Produktlebenszyklus eingesetzt werden. Die rudimentäre Anpassung eines Bauteils schöpft nicht das volle Potential des Selektiven Laserstrahlschmelzens aus. Dadurch ist die Erhöhung des Fertigungsaufwandes und der damit einhergehenden Kosten möglich; folglich kann kein Mehrwert erreicht werden. Der Aufwand zur Anpassung von Strukturbauteilen ist dabei unter ökonomischer Sicht abzuwägen. Bei geringer Losgröße muss folglich abgeschätzt werden, ob die Ersparnis während der Fertigung und des Lebenszyklus den Optimierungsaufwand rechtfertigen.

Umsetzung der gestellten Anforderungen

Im Folgenden wird die Erfüllung der gestellten Anforderungen aus Kapitel 3 an die Methode zur Gewichtsoptimierung diskutiert. Dabei werden die entscheidenden Merkmale hervorgehoben, welche zur Implementierung der beschriebenen Methode notwendig sind. Aus der Betrachtung leiten sich unmittelbar mögliche Arbeitspakete ab, welche an die vorliegende Arbeit anknüpfen können. Diese sind in Kapitel 9 zusammengefasst.

- **Herstellbarkeit sicherstellen:** Zur Sicherstellung der Herstellbarkeit müssen Gestaltungsrichtlinien eingehalten werden. Für die Selektion geeigneter Gestaltungsrichtlinien für innere Strukturen wurde eine Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten untersucht. Weiterhin erfolgte die Anpassung auf die in der vorliegenden Arbeit gewählten Parameter. Zur Adaption der Methode ist folglich die Übertragbarkeit der Gestaltungsrichtlinien auf weitere Materialien zu prüfen. Für die fertigungsgerechte Gestaltung ist eine kontinuierliche Validierung des Modells vorgesehen, indem die Gestaltungsrichtlinien den unterschiedlichen Arbeitsschritten zugeordnet werden. Damit wird gewährleistet, dass auch Konstrukteure mit wenig Erfahrung relevante Richtlinien zum richtigen Zeitpunkt einsetzen. Weiterhin wird somit die negative Beeinflussung der Richtlinien zueinander vorgebeugt. Zur Sicherstellung der Herstellbarkeit ist ferner eine ganzheitliche Validierung des finalen Modells zur Erstellung des Gesamtentwurfs vorgesehen.
- **Belastbarkeit sicherstellen:** Zur Sicherstellung der Belastbarkeit ist im systematischen Vorgehen die Festigkeit gegenüber dem Bauteilversagen zu betrachten. Dafür wurde eine

Auswahlmatrix beschrieben, welche die maximalen Spannungen dem Bauteilgewicht gegenüberstellen und Handlungsstrategien zur Spannungsoptimierung bereitstellt. Parallel wurden die Verformungen im Bauteil diskutiert und Ansatzpunkte zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf individuelle Problemstellungen beschrieben. Neben der statischen Festigkeit und Steifigkeit ist künftig das Versagen gegenüber dynamischen Lasten sicherzustellen.

- **Standardisiert vorgehen:** Für ein standardisiertes Vorgehen sind die vier Arbeitsschritte anzuwenden, welche die diskutierten Optimierungsaufwände und –potentiale ermöglichen. In Abhängigkeit der Zielfunktion können folglich unterschiedliche Herangehensweisen realisiert werden. Hierbei erfolgt die Zuordnung von Rechnerwerkzeugen, also der CAD-Modellierung, FEM-Simulation, Topologieoptimierung oder der Verwendung von Auswahlkatalogen. Somit werden Empfehlungen definiert, welche Aufgaben in einem Arbeitsschritt zu bearbeiten sind und wie diese bewerkstelligt werden können. Weiterhin werden die Gestaltungsrichtlinien den Arbeitsschritten eindeutig zugeordnet, sodass auch hier eine eindeutige Anwendung gegeben ist.
- **Entscheidungsgrundlagen aufzeigen:** Zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sowie zur Anwendbarkeit der Methode durch unerfahrene Konstrukteure sind die definierten Regeln zur Verwendung innerer Strukturen anzuwenden. Dabei wurde ein Konstruktionskatalog erarbeitet, welcher Anwendungen unterschiedlicher Strukturen beschreibt. Folglich kann eine Struktur ausgewählt werden, wenn der Belastungsfall vordefiniert ist. Weiterhin wurden Strategien zur Spannungsreduzierung bei inneren Strukturen diskutiert. Hierbei ist die Übertragbarkeit dieser Herangehensweisen auf ähnliche Problemstellungen zu prüfen. Am Ende jedes Arbeitsschrittes ist die Erfüllung der gestellten Anforderungen zu bewerten. Bei unzureichenden Ergebnisse sind iterative Optimierungsabläufe im systematischen Vorgehen vorzusehen. Erzielt eine innere Struktur nicht das angestrebte Optimierungsziel, ist beispielsweise die Überprüfung weiterer Strukturen notwendig. Zur Minimierung dieses Optimierungsproblems unterstützt die Auswahlmatrix den Entscheidungsprozess, indem die Relation aus Gewichts und Spannungen zugrunde gelegt wird.
- **Durchgängigkeit sicherstellen:** Für die konsistente Auslegung eines Bauteils für das Selektive Laserstrahlschmelzen sollte das systematische Vorgehen ganzheitlich angewandt werden. Dazu müssen grundlegende Anforderungen an das zu optimierende Strukturbauteil zusammengetragen werden. Darauf aufbauend werden relevante Wirkflächen abstrahiert, um die Festlegung eines Wirkraums zu ermöglichen. Ferner wird die schrittweise Einbringung von inneren Strukturen beschrieben, bei welcher sowohl die Möglichkeiten als auch die Limitationen des Selektiven Laserstrahlschmelzens beschrieben werden. Dabei wurde gezeigt, dass die Ausnutzung dieser Möglichkeiten angestrebt werden sollte, um das Optimierungspotential weitestgehend auszuschöpfen.

- **Simulationsmodelle validieren:** Für validierte Simulationsmodelle müssen exakte Daten vom verwendeten Material vorliegen und in die Materialdatenbank eingepflegt werden. Ziel ist die Umsetzung extremer Leichtbaukonstruktionen mit geringem Sicherheitsfaktor, sodass eine hohe Materialausnutzung ohne frühzeitiges Bauteilversagen möglich ist. Die exakte Annahme der Materialdaten verringert demnach Entwicklungsiterationen, indem der Erprobungsaufwand reduziert wird. Anhand der Vorversuche an Zug- und Biegeproben wurden Abweichungen der Materialdaten zu den Literaturwerten nachgewiesen. Hierbei bestehen ein geringer Einfluss durch die gewählten Prozessparameter sowie ein maßgebender Einfluss von der gewählten Wärmebehandlung. Zur Verbesserung der Materialeigenschaften und somit zur Validierung von Simulationsmodellen sind folglich die Auswirkungen der Parameter und Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen. Weiterhin sind Chargeneffekte des Pulvers zu berücksichtigen, da dessen Beschaffenheit Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat. Abhilfe stellt beispielsweise die Fertigung von Probekörpern in jedem Baujob dar, sodass einem Bauteil eindeutige Materialeigenschaften zugewiesen werden kann. Ähnliche Ansätze sind beispielsweise bei der Herstellung gegossener Großbauteile zu finden. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass durch die korrekte Manipulation der Materialdatenbank das Bauteilverhalten für Biegung simuliert werden kann. Zur ganzheitlichen Validierung der Simulationsmodelle können weitere Versuche für Zug, Druck, Torsion sowie Lastkollektive durchgeführt werden. Dabei ist die Betrachtung von dynamischen Lasten anzustreben. Anhand der Durchführung von Lebensdauerprüfungen und der Bestimmung von Wöhlerlinien von laserstrahlgeschmolzenem AlSi10Mg können entsprechende Simulationsmodelle hinterlegt werden
- **Modular strukturieren:** Die inhaltliche Abgrenzung der vier Arbeitsschritte ist vor dem Hintergrund einzuhalten, dass unterschiedliche Herangehensweisen zur Bauteiloptimierung verwendet und der Aufwand durch Automatismen schrittweise reduziert werden können. Für den Gesamtentwurf kann beispielsweise ein Algorithmus das Modell hinsichtlich relevanter Gestaltungsrichtlinien prüfen. Bestehende Software kontrolliert z.B. beim Slicen, ob maximale Überhänge und Downskin-Winkel zur Vermeidung von Stützstrukturen eingehalten werden. Die diskutierten Gestaltungsrichtlinien können dahingehend geprüft werden, diese ebenfalls durch Algorithmen abzufragen, z.B. für die Notwendigkeit von Reinigungsöffnungen oder der Dimensionierung von Wandstärken. Auch die Homogenisierung der Spannungen im Bauteil kann durch Automatismen erfolgen. Durch die elementweise Beschreibung der inneren Strukturen ist die Variation jedes einzelnen Elementes möglich. Durch die Bestimmung der maximalen Spannungen der Elemente kann folglich die Dimensionierung angepasst werden, damit die Spannungen an eine Zielvorgabe (z.B. an die zulässige Spannung) konvergieren. Die Einbringung und Variation einer Struktur ist dabei vor dem Hintergrund limitierender Minimal- und Maximalwerte durchzuführen, welche durch die Gestaltungsrichtlinien definiert sind.

Einflussfaktoren innerer Strukturen

Zur Implementierung der diskutierten Methode und somit zum Gestalten innerer Strukturen werden im Folgenden Einflussfaktoren diskutiert. Dabei sind insbesondere zwei Fragestellungen zu klären, welche über den Erfolg der Optimierung entscheiden. Einerseits ist zu prüfen, ob das Verhalten einer inneren Struktur durch die Simulation abgebildet werden kann. Andererseits muss untersucht werden, ob eine innere Struktur im Selektiven Laserstrahlschmelzen umgesetzt werden kann.

Für die FE-Simulation innerer Strukturen spielt die Auswahl des Elementtyps eine entscheidende Rolle. Zur Reduzierung des Rechenaufwandes kann beispielsweise auf Schalen- oder Balken-Elemente zurückgegriffen werden. Meistens ist jedoch die Verwendung von Volumen-Elementen notwendig, um vor allem starke Kraftumlenkungen in Kantenbereichen und Übergangsbereichen zwischen Strukturen und soliden Geometrien abzubilden. Hierbei kommt es auf die geglättete und feine Vernetzung der Elemente an. Wie in Abbildung 8.3 dargestellt, ist eine entsprechende Vernetzung zur Abbildung lokaler Spannungsspitzen in dünnwandigen Geometrien unumgänglich. Eine zu grobe Vernetzung kann dazu führen, dass lokale Spannungsspitzen innerhalb eines finiten Elements auftreten, sodass diese nicht abgebildet werden. Unter Verwendung einer feinen Vernetzung kann die Bauteilgestalt dahingehend angepasst werden, dass z.B. starke Kraftumlenkungen durch entsprechende Verrundungen geschwächt werden.

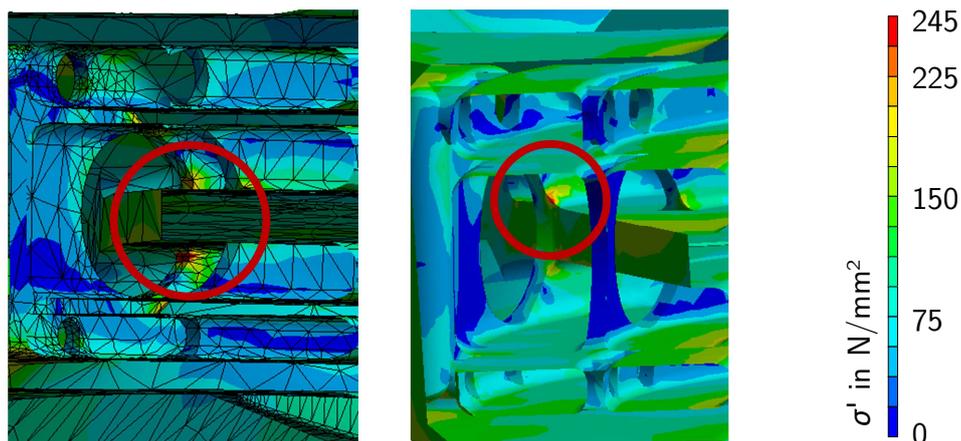


Abbildung 8.3: Vernetzung innerer Strukturen in Kantenbereichen

Zur Quantifizierung dieses Einflusses zeigt Abbildung 8.4 eine Netzstudie, bei welcher der Spannungsverlauf unterschiedlicher Vernetzungsparameter aufgetragen ist. Dabei werden die Spannungen σ' auf der Bauteiloberfläche des Modells mit erweitertem Wirkraum dargestellt.

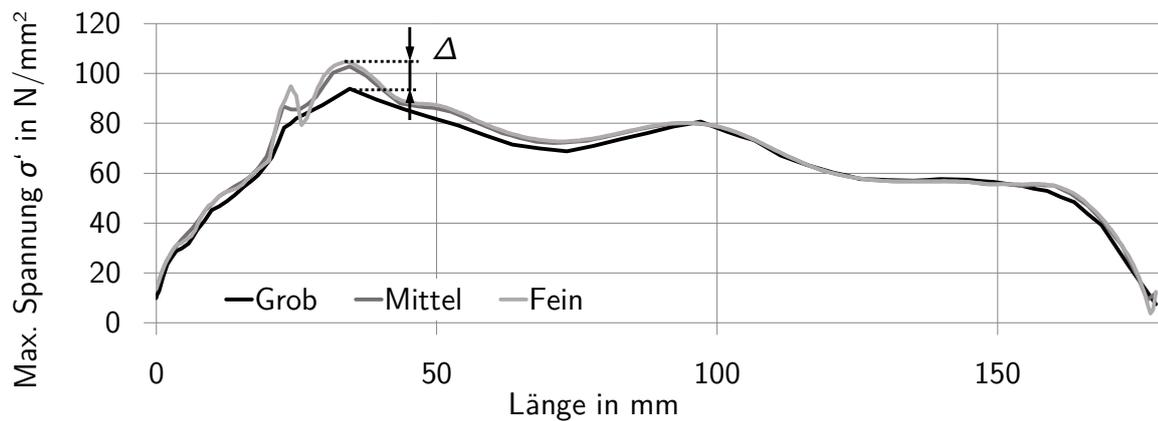


Abbildung 8.4: Einfluss der Vernetzung auf die maximalen Spannungen

Die Ergebnisse bestätigen, dass durch die zunehmende Netzverfeinerung der Spannungsverlauf detaillierter abgebildet werden kann, sodass lokale Spannungsspitzen identifiziert werden können. Eine grobe Vernetzung führt im konkreten Fall zu einer unzureichenden Abbildung der maximalen Spannungen mit einer Abweichung von $\Delta \approx 12,5\%$. Bei der Auslegung von Leichtbaukonstruktionen mit geringer Sicherheit kann diese Abweichung zum frühzeitigen Bauteilversagen führen. Als Gegenmaßnahme ist eine Erhöhung des Sicherheitsfaktors denkbar, sodass jedoch die Gewichtsersparnis relativiert wird. Somit ist bei der Simulation von inneren Strukturen stets die Sensibilität der Netzdetailierung und -glättung zu prüfen.

Die beschriebene Herausforderung führt zur zweiten Fragestellung, ob die innere Struktur im Selektiven Laserstrahlschmelzen umsetzbar ist. Wie gezeigt, kann starken Kraftumlenkungen in filigranen Geometrien durch gezielte Verrundungen entgegengewirkt werden. Dabei können jedoch Geometrien entstehen, welche im Selektiven Laserstrahlschmelzen nicht abgebildet werden können, da z.B. die Auflösungsgenauigkeit unzureichend ist. Folglich kann es dazu kommen, dass das physische vom virtuellen Modell abweicht und somit unvorhergesehene Kerbwirkungen auftreten. Selbiges tritt bei Treppenstufeneffekten auf, wenn der Einfluss der Oberflächenrauheit der eigentlichen Querschnittfläche überwiegt. Hinzu kommt, dass der Treppenstufeneffekt mit konventionellen Rechnerwerkzeugen nur mit hohem Aufwand berücksichtigt werden kann.

Die Überprüfung der Abbildungsgenauigkeit kann nur mit hohem Aufwand durchgeführt werden, da die besagte Problematik in der Struktur auftritt, welche unter Umständen im physischen Modell nicht einsehbar ist. Auch die Nachbearbeitung zur Steigerung der Oberflächenqualität ist nahezu unmöglich. Vor diesem Hintergrund ist es unumgänglich, die diskutierten

Regeln zur Modellierung innerer Strukturen einzuhalten. Somit kann auf bereits erprobte Geometrien zurückgegriffen werden, bei welchen die Belastbarkeit und Herstellbarkeit nachgewiesen wurde. Zur Detaillierung können weiterhin Untersuchungen an skalierten Strukturelementen durchgeführt werden, indem der Kraftfluss an vergrößerten Modellen untersucht und anschließend auf die Problematik skaliert wird. Tabelle 8.1 fasst die maßgebenden Einflussfaktoren der Rechnerwerkzeuge und der Fertigung für innere Strukturen zusammen.

Tabelle 8.1: Einflussfaktoren beim restriktionsgerechten Gestalten innerer Strukturen

Einflussfaktor	Beschreibung
Vernetzung	Innere Strukturen unterliegen aufgrund filigraner Geometrien hohen Beanspruchungen infolge von starken Kraftumlenkungen. Diese können in der Simulation nur dann abgebildet werden, wenn eine entsprechend feine Vernetzung vorliegt. Bei einer zunehmend feineren Vernetzung steigt jedoch der Rechenaufwand, insbesondere für die FE-Simulation fein vernetzter Volumen-Elemente.
Parametrisierbarkeit	Für stochastische Strukturen sinkt die Möglichkeit zur mathematischen Beschreibung und folglich zur Verwendung des erarbeiteten Ansatzes. Für diese Anwendung ist die Beschreibung von Dichtebereichen als Ergebnis einer Topologieoptimierung geeigneter. Jedoch ist es eine große Herausforderung, stochastische Simulationsergebnisse zu rekonstruieren und diese zur Herstellbarkeit im Selektiven Laserstrahlschmelzen anzupassen. Automatismen sind dabei nur begrenzt einsetzbar, sodass die bauteilspezifische Optimierung mit hohem Aufwand verbunden ist. Zur Problemlösung wurde die Aneinanderreihung von Strukturelementen umfassend diskutiert. Ausgehend von einem Referenzpunkt muss eine eindeutige Beschreibung der darauf aufbauenden Strukturelemente möglich sein. Dementsprechend können jedem Strukturelement eindeutige Eigenschaften zugewiesen werden, z.B. die Dimensionierung von Wandstärken unter Einhaltung von Gestaltungsrichtlinien. Zur Verwendung der Methode zum restriktionsgerechten Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile sollten demnach duplizierte oder selbstähnliche Strukturen verwendet werden, da hierbei die diskutierten Vorteile zum Tragen kommen.

Gestalt- änderungen	Die Änderung einer inneren Struktur beeinflusst die globalen Bauteileigenschaften. Der Zusammenhang zwischen Wirkraum, Gestaltungsraum und innerer Struktur muss folglich immer ganzheitlich betrachtet werden. Dabei ist die Festlegung eines erweiterten Wirkraums in frühen Arbeitsschritten eine der wesentlichen Herausforderungen, da nur vages Wissen über die einzubringende Struktur vorhanden ist. Zur systematischen Herangehensweise an dieses Optimierungsproblem ist deshalb die Abstraktion relevanter Lastpfade und somit die Identifizierung der topologischen Grundstruktur vorgesehen. Darauf aufbauend müssen der Wirkraum und der Gestaltungsraum so definiert werden, dass das Modell von diesen Flächen ausgehend nach innen hin aufgebaut werden kann.
Skaleneffekte	Durch die Miniaturisierung von Geometrien steigt der Einfluss der Oberflächenrauheit und des Treppenstufeneffektes im Vergleich zum Querschnitt filigraner Geometrien. Von diesen Kerben ausgehend, entsteht eine erhöhte Gefahr zur Rissbildung und folglich zum Bauteilversagen. Abhilfe schaffen die Optimierung der Schichthöhe und der Parameter im In-Prozess, die Variation der Bauteilplatzierung, die Verdickung gefährdeter Bereiche oder die Verwendung redundanter Strukturen.
Nach- bearbeitung	Durch die Charakteristik einer innenliegenden Struktur ist die mechanische Nachbearbeitung zur Steigerung der Bauteilqualität nahezu unmöglich. Vereinzelt Ansätze wie z.B. das Heiß-Isostatische Pressen (engl. Hot isostatic pressing) ermöglichen eine geringfügige Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Allerdings stoßen auch diese Ansätze bei unzugänglichen Strukturen an ihre Grenzen. Für eine Sicherheit gegenüber Versagen sind die eingeschränkten Möglichkeiten zur Nachbearbeitung somit bereits bei der Gestaltung zu berücksichtigen. Eine erhöhte Oberflächenrauheit, gerade bei filigranen Geometrien, fordert daher die Berücksichtigung eines entsprechenden Sicherheitsfaktors bei der Dimensionierung.

Fertigungszeit	Bei zunehmendem Detaillierungsgrad einer Struktur steigt die Fertigungszeit. Ausschlaggebend ist die gewählte Belichtungsstrategie. Konturen innerhalb einer Schicht werden meistens mit anderen Belichtungsparametern verarbeitet als der Kern. Hierbei belichtet der x-y-Scanner mit einer reduzierten Geschwindigkeit. Gleichzeitig wird der Laser mit höherer Leistung betrieben, sodass eine höhere Energiedichte im Pulverbett resultiert. Die Unterscheidung der Parameter in Kontur und Kern wird zur Glättung der Oberfläche und somit zur Reduzierung der Oberflächenrauheit getroffen. Bei inneren Strukturen steigt das Verhältnis der Oberfläche im Vergleich zum Volumen, sodass der Effekt einer erhöhten Fertigungszeit stärker ins Gewicht fällt.
Abbildungs- genauigkeit	Filigrane Geometrien können unter gewissen Voraussetzungen aufgrund der Fertigungsungenauigkeiten nicht korrekt abgebildet werden. Hierbei bestehend insbesondere die in Abschnitt 2.2 diskutierten Limitationen durch den Laserdurchmesser sowie die Korngröße des verwendeten Pulvers. Bei Abweichungen der gefertigten Ist-Geometrie von der berechneten Soll-Geometrie kann es zu unvorhergesehenen Kraftumlenkungen kommen, sodass das Bauteil frühzeitig versagt.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Vor dem Hintergrund der eingangs definierten Fragestellung, *wie das Vorgehen zum Gestalten eines gewichtsoptimierten Bauteils beschaffen sein muss, um innere Strukturen bei gleichbleibenden mechanischen Randbedingungen einzusetzen*, wurden bestehende Ansätze zur Gestaltung für das Selektive Laserstrahlschmelzen analysiert. Basierend auf dem Stand der Forschung wurden Herausforderungen diskutiert und Anforderungen an eine Gestaltungsmethode für innere Strukturen formuliert. Es hat sich gezeigt, dass ein Gestaltungshilfsmittel für Direct Manufacturing notwendig ist, welches durch die Einbringung innerer Strukturen die Materialverteilung entsprechend der Beanspruchungen unter Beachtung der Herstellbarkeit ermöglicht. Dabei wurden Anforderungen an die Durchgängigkeit und Modularität eines standardisierten Vorgehens deutlich, bei welchem Entscheidungsgrundlagen aufgezeigt werden können. Weiterhin wurde gezeigt, dass die Sicherstellung der Herstellbarkeit und Belastbarkeit eines virtuellen Modells bereits in frühen Entwicklungsphasen gegeben sein muss und folglich validierte Simulationsmodelle notwendig sind. Vor dem Hintergrund der gestellten Anforderungen wurde ein systematisches Vorgehen erarbeitet, welches die rechnerunterstützte Substitution von Wirkräumen durch innere Strukturen ermöglicht. Im Zuge dessen wurden vier Arbeitsschritte beschrieben sowie geeignete Rechnerwerkzeuge und Gestaltungsrichtlinien für innere Strukturen definiert.

Zur Identifizierung der mechanischen Anwendungen von inneren Strukturen wurden Analogien aus biologischen Vorbildern und technischen Anwendungen betrachtet und hinsichtlich der Erfüllung einer mechanischen Aufgabe bei simultaner Reduzierung des Materialeinsatzes bewertet. Grundlegend dafür wurden die inneren Strukturen hinsichtlich der Modellierbarkeit durch Rechnerwerkzeuge sowie der Herstellbarkeit im Selektiven Laserstrahlschmelzen analysiert. Durch die Simulation ausgewählter Strukturen wurde deren Eignung quantifiziert. Die Ergebnisse wurden in einem Konstruktionskatalog zusammengefasst.

Anhand der Tretkurbel eines Fahrrads wurde die Anwendbarkeit der beschriebenen Methode nachgewiesen. Einerseits wurden innere Strukturen in den bestehenden Wirkraum eingebracht, bei welchem die Bauteilhülle vom Ausgangsmodell übernommen wurde. Andererseits wurde

ein erweiterter Wirkraum definiert und durch innere Strukturen substituiert, um eine verbesserte Materialverteilung durch die Möglichkeiten des Selektiven Laserstrahlschmelzens abzubilden. Durch die Gegenüberstellung der virtuellen Modelle wurde das Optimierungspotential gezeigt. Es wurde deutlich, dass die Erweiterung von bestehenden Wirkräumen den Einsatz von inneren Strukturen begünstigt. Im Vergleich zum Ausgangsmodell konnte somit eine Gewichtsreduzierung von ca. 59 % erzielt werden.

Zur Validierung der Simulationsmodelle und der angenommenen Materialdatenbank wurde die Untersuchung von Zug- und Biegeproben dargestellt. Unter Berücksichtigung der dabei erlangten Erkenntnisse wurde die Prototypen-Fertigung und -Erprobung der Tretkurbelmodelle beschrieben. Im Zuge dessen wurde sowohl der Vergleich der Prototypen untereinander sowie der Abgleich der Messungen mit den Simulationen beschrieben. Dabei wurde nachgewiesen, dass die Tretkurbel mit erweitertem Wirkraum die höchste Steifigkeit aufweist. Die Messungen auf einem Prüfstand für statische Biegelast bestätigen dieses Ergebnis.

Auf Basis der rechnerunterstützten und experimentellen Untersuchung der Demonstratoren wurden die Bauteiloptimierung und die Praxisrelevanz der Ergebnisse diskutiert. Dabei wurde der Optimierungsverlauf der angepassten Demonstratoren zusammengefasst. Weiterhin wurden die Anwendbarkeit der Methode und Herangehensweisen zur Optimierung diskutiert. Anhand der Untersuchung der gestellten Anforderungen wurden entscheidende Merkmale zur Implementierung der Methode herausgearbeitet. Abschließend wurden maßgebende Einflussfaktoren beim restriktionsgerechten Gestalten innerer Strukturen zusammengefasst.

Zielerfüllung

Die Methode zur Gewichtsoptimierung durch innere Strukturen ermöglicht die Ausnutzung der Gestaltungsfreiheiten des Selektiven Laserstrahlschmelzens. Die Berücksichtigung von Gestaltungsrichtlinien stellt dabei die Herstellbarkeit des Bauteils sicher. Durch die sukzessive Bereitstellung der Gestaltungsrichtlinien entlang des beschriebenen Vorgehens werden die Gestaltungsmöglichkeiten – und folglich die Kreativität des Konstrukteurs – in frühen Entwicklungsphasen unterstützt. Das systematische Vorgehen beschreibt einen durchgängigen Ablauf, vom Klären der Anforderungen bis hin zur Herstellung und Erprobung einer neuen Bauteilgeometrie. Dabei wird sowohl die Berücksichtigung vorliegender Ausgangsmodelle als auch das Erweitern bestehender Wirkräume unterstützt. Anhand der Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen, wie z.B. der Konstruktionskatalog mechanischer Anwendungen innerer Strukturen oder der Definition von Variationsstrategien, wird ein standardisiertes Vorgehen beschrieben.

Ferner ist dieses modular aufgebaut, sodass einzelne Arbeitsschritte optimiert bzw. automatisiert werden könnten und eine Anwendung für unterschiedliche Gestaltungsprobleme möglich ist. Dadurch kann wiederum das Vorgehen weiter standardisiert werden, was zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse führt.

Abschließend lässt sich festhalten, dass ein maßgebender Erfolgsfaktor zur Gestaltung gewichtsoptimierter Bauteile exakte Simulationen durch validierte Simulationsmodelle sind. Somit kann die Erfüllung anspruchsvoller Bedingungen mit möglichst geringem Materialeinsatz bereits vor der Herstellung prognostiziert werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der spezifische Prozess, die Materialcharge und die Wärmebehandlung einen Einfluss auf die Materialeigenschaften beim Selektiven Laserstrahlschmelzen haben. So konnte gezeigt werden, dass die experimentell ermittelten Werte von den Literaturwerten abweichen. Somit liegt eine große Herausforderung in der Aufstellung validierter Simulationsmodelle. Die Ergebnisse haben weiterhin gezeigt, dass durch eine korrekte Manipulation der Materialdaten die Belastbarkeit des Bauteils bei der Simulation abgebildet werden kann.

Ausblick

Auf Basis der Zielerreichung sowie der diskutierten Umsetzung der gestellten Anforderungen in Kapitel 8 werden im Folgenden Handlungsfelder aufgezeigt, welche an die Thematik der vorliegenden Arbeit anknüpfen.

Auf Bauteilebene kann eine umfängliche Untersuchung von dynamischen Lasten sowie von der Simulation plastischer Verformungen folgen. Um Schwankungen der Materialeigenschaften für statische und dynamische Lasten auszugleichen, kann dabei die Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren erfolgen. Zur Definition entsprechender Werte müssen Versuchsreihen ausgewertet werden, welche eine Verallgemeinerung ermöglichen.

Weiterhin zeigen die Untersuchungen, dass sich die Bauteilreinigung bei zunehmender Komplexiertheit der inneren Strukturen erschwert. Durch Pulverrückstände in Kavitäten steigt das Gewicht. Somit ist ein mögliches Handlungsfeld die Untersuchung von Reinigungsstrategien unter Beachtung der Herstellbarkeit sowie der resultierenden Kerbwirkungen im Modell. Auch das Verschließen der Reinigungsöffnungen nach der Pulverentfernung im Post-Prozess ist von hoher Relevanz, damit keine Fremdkörper in die Kavitäten eindringen können, welche zur Erhöhung des Bauteilgewichts führen.

Zur Verbesserung der Oberflächenrauheit werden laserstrahlgeschmolzene Bauteile oftmals nachbearbeitet. Bei innenliegenden Geometrien, wie es bei inneren Strukturen der Fall ist, können spanende Fertigungsverfahren nicht oder nur mit hohem Aufwand eingesetzt werden, sodass eine Verringerung der Oberflächenrauheit nicht realisierbar ist. Demzufolge können weitere Nachbearbeitungsverfahren, wie z.B. optische, chemische oder thermische Prozesse, auf die Anwendbarkeit geprüft werden. Beispielsweise können optische Verfahren während des Bauprozesses untersucht werden, bei welchen innenliegende Oberflächen durch den vorhandenen Laserstrahl poliert werden.

Aufgrund der Komplexität des fertigungsgerechten Gestaltens für Selektives Laserstrahlschmelzen können weiterhin die mathematischen Zusammenhänge zwischen den diskutierten Gestaltungsrichtlinien und den spezifischen Anlagen- und Pulvereigenschaften sowie der Wärmenachbehandlung untersucht werden. Dadurch können subjektive Einflüsse bei der Auslegung einer Gestaltungsrichtlinie reduziert und folglich eine bessere Anwendbarkeit für Konstrukteure mit geringer Vorkenntnis realisiert werden.

Aufgrund der allgemeinen Formulierung der Methode zur Gewichtsoptimierung ist eine Anwendung für andere Materialien und Maschinen vorgesehen. Dabei ist die Anpassung der Materialdatenbank sowie der Gestaltungsrichtlinien auf die spezifische Problemstellung zu beachten. Ferner sind Strukturbauteile zu identifizieren, welche sich aus Unternehmenssicht für eine Anpassung eignen. Die Auswahl sollte dabei in Abhängigkeit vom Optimierungspotential erfolgen. Zielgrößen sind die Reduzierung des Materialeinsatzes in der Fertigung sowie eine hohe Effizienz im Lebenszyklus. Weiterhin ist das Potential zur Funktions- und Bauteilzusammenlegung bei der Auswahl zu berücksichtigen. In Kombination mit der durchgängigen Implementierung geeigneter Rechnerwerkzeuge kann ein ökonomischer und technischer Mehrwert für die Umsetzung neuer Leichtbaukonzepte durch Selektives Laserstrahlschmelzen resultieren.

Quellen- und Literaturverzeichnis

- [Abel15] Abele, E.; Stoffregen, H.; Klimkeit, K.; Hoche, H. und Oechsner, M.: Optimisation of Process Parameters for Lattice Structures; Rapid Prototyping Journal, Emerald Group Publishing Limited; S. 117 – 127; United Kingdom; 2015; ISSN: 1355-2546
- [Adam14] Adam, G. A. O. und Zimmer, D.: Design for Additive Manufacturing - Element transitions and aggregated structures; CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Volume 7, Issue 1; S. 20 – 28; 2014; DOI: 2013.10.001
- [Antr11] Antrekowitsch, H.; Koch, S.; Paulitsch, H.; Pogatscher, S.; Pucher, P.; Stadler, F. und Wagner, C.: Recycling und Werkstoffentwicklung von Aluminium; Springer Verlag; 2011; ISSN: 0005-8912
- [Atze12] Atzeni, E. und Salmi, A.: Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts; The International Journal of Advanced Manufacturing Technology; Vol. 62, Issue 9-12; S. 1147 – 1155; 2012; ISSN: 0268-3768
- [Banh96] Banhart, J.; Baumeister, J. und Weber, M.: Damping properties of aluminium foams; Materials Science and Engineering: A; Vol. 205, Issues 1-2; S.221 – 228; 1996; ISSN: 0921-5093
- [Baue06] Bauer, S. und Paetzold, K.: Influence of DFX criteria on the design of the product development process; 6th integrated product development workshop; Deutschland Schönebeck/ Magdeburg; 2006
- [Baum90] Baumgartner, A., Harzheim, L. und Mattheck, C.: SKO (Soft Kill Option): The Biological Way to Find an Optimum Structure Topology. International Journal of Fatigue; Vol. 14, Issue 6; S. 387 – 393; 1990; ISSN: 0142-1123
- [Beck05] Becker, R.; Grzesiak, A. und Henning, A.: Rethink assembly design; Assembly Automation, 25 (4), S. 262 – 266; 2005; ISSN: 0144-5154

- [Beit97] Beitz, W. und Grote, K.-H.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer Verlag; Deutschland Berlin; 1997; ISBN: 978-3-540-62467-7
- [Bend04] Bendsøe, M.P. und Sigmund, O.: Topology Optimization - Theory, Methods and Applications; Springer Verlag; Deutschland Berlin Heidelberg; ISBN 978-3-540-42992-0.
- [Bin12] Bin Maidin, S.; Campbell, I. und Pei, E.: Development of a design feature database to support design for additive manufacturing; Assembly Automation, 32 (3); S. 235 – 244; 2012; ISSN: 0144-5154
- [Bles09] Blessing, T.M. und Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology; Springer Verlag, England London; 2009; ISBN: 978-1-848-82586-4
- [Bolz58] Bolz, R. W.: Metals Engineering Processes (ASME Handbook), 1. Auflage; McGraw-Hill Book Company; 1958; ASIN: B000UGBNT6
- [Boot96] Boothroyd, G.: Design for Manufacturing and Assambly: The Boothroyd-Dewhurst Experience; In: Huang, G.Q. (Hg.): Design for X. Concurrent engineering imperatives; Chapman and Hall; London; 1996; ISBN: 978-0-412-78750-8
- [Boot02] Boothroyd, G.; Dewhurst, P. und Knight, W.: Product Design for manufacturing and Assembly: Revised and Expanded, 2. Auflage; I. Marinescu, Ed.; Marcel Dekker Inc.; USA New York; 2002; ISBN: 978-1-420-08927-1
- [Bors07] Borsdorf, R.: Methodischer Ansatz zur Integration von Technologiewissen in den Produktentwicklungsprozess; Dissertation RWTH Aachen; Shaker Verlag; 2007; ISBN: 978-3-832-26396-6
- [Boya13] Boyard, N. et al.: A design methodology for parts using additive manufacturing; In: P.J. Bártolo et al.: High Value Manufacturing. Boca-Raton, FL: CRC Press; S. 399 – 404; 2013; ISBN-13: 978-1-138-00137-4
- [Brac11] Brackett, D.; Ashcroft, I. und Hague, R.: Topology Optimization for Additive Manufacturing; Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium; S. 348 – 362, USA Texas, 2011
- [Bral95] Bralla, J. G.: Design for Excellence; McGraw-Hill; USA New York; 1995; ISBN: 978-0-070-07138-4

-
- [Bral98] Bralla, J. G.: Design for Manufacturing, 2. Auflage; McGraw-Hill; USA New York; 1998; ISBN: 0-07-007139-x
- [Bran11] Brand, E.; Heckenberger, U.; Holzinger, V. und Buchbinder, D.: Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior; Materials and Design 34, S. 159 – 169; 2011; ISSN: 0264-1275
- [Brem11] Bremen, S.; Buchbinder, D.; Meiners, W. und Wissenbach, K.: Mit Selective Laser Melting auf dem Weg zur Serienproduktion? Steigerung der Aufbaurrate durch Einsatz höherer Laserleistungen; Laser Technik Journal; Vol. 8, Issue 6; S. 24 – 28; 2011; ISSN: 1863-9119
- [Brue17] Brüggemann, J.-P.; Risse, L.; Riemer, A.; Reschetnik, W.; Kullmer, G. und Richard, H. A.: Entwicklung von Fahrradretkurbelsystemen mittels additiver Fertigung; In: Richard, H.A.; Schramm, B. und Zipsner, T. (Hrsg.): Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen; 2017; ISBN: 978-3-658-17780-5
- [Buch13] Buchbinder, D. und Poprawe, R.: Selektive Laser Melting von Aluminiumgusslegierungen; Shaker-Verlag Aachen, 2013; ISBN: 978-3-8440-2439-5
- [Buch14] Buchmayr, B. und Panzl, G.: Eine SWOT-Analyse zum Einsatz Additiver Fertigung für metallische Bauteile; BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Vol. 160 (1), S. 15 – 20; Österreich Wien; 2014; ISSN: 0005-8912
- [Burt05] Burton, M. J.: Design for Rapid Manufacturing, Developing an Appropriate Knowledge Transfer Tool for Industrial Designers; Dissertation Loughborough University; 2005
- [Conr13] Conrad, K.-J.: Grundlagen der Konstruktionslehre: Methoden und Beispiele für den Maschinenbau, 6. Auflage; Hansa Verlag; Deutschland München; 2013; ISBN: 978-3-446-43533-9
- [Cruc15] Crucible Design Ltd.: Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS), www.crucibledesign.co.uk/images/uploaded/guides/bs7000-part-2-a-management-guide-download-original.pdf, Zugriff: 13. April 2017
- [Curr02] Curry, J.D.: Bones – structure and mechanics; Princeton University Press; 2002; ISBN: 0-691-09096-3

- [Das98] Das, S.; Beama, J.J.; Wohler, M. und Bourell, D.L.: Direct laser freeform fabrication of high performance metal components; Rapid Prototyping Journal; Vol. 4 Iss: 3; S.112 – 117; 1998; ISSN: 1355-2546
- [Doub12] Doubrovski, E.L.; Verlinden, J.C. und Horvath, I.: First steps towards collaboratively edited design for additive manufacturing knowledge; Solid Freeform Fabrication Symposium; USA Austin Texas; S. 891 – 901; 2012
- [Ebel98] Ebeling, W.; Freund, J. und Schweitzer, F.: Komplexe Strukturen, Entropie und Information; Teubner Verlag; Deutschland Stuttgart; 1998; ISBN: 3-8154-3032-1
- [Emme11] Emmelmann, C.; Sander, P.; Kranz, J. und Wycisk, E.: Laser Additive Manufacturing and Bionics: Redefining Lightweight Design; Physics Procedia 12; S. 364 – 368; 2011; ISSN: 1875-3892
- [Emme14] Emmelmann, C. und Kranz, J.: Grundlegende Gestaltungsrichtlinien für die laseradditive Fertigung; AM Design & Engineering Symposium; Deutschland Frankfurt; 2014
- [Emme14b] Emmelmann, C. und Bromberger, M.: Topologieoptimierung mit laseradditiver Fertigung erschließt Leichtbaupotentiale; Fachbericht Topologieoptimierung, Konstruktion, Nr.6; 2014; ISSN: 0720-5953
- [Eos14] EOS GmbH e-Manufacturing Solutions: EOS Aluminium AlSi10Mg; Deutschland Krailling; 2014.
- [Eos17] EOS GmbH e-Manufacturing Solutions: Additive Fertigung – Basis Designrichtlinien für die Additive Fertigung; www.eos.info/werkstoffe-p/designrichtlinien_additive_fertigung.pdf; Zugriff: 19. Januar 2017
- [Euro14] European Space Agency: Additive Manufacturing: SASAM Standardisation Roadmap; 2014
- [Eyer10] Eyers, D. und Dotchev, k.: Technology review for mass customization using rapid manufacturing; Assembly Automation, 30 (1); S. 39 – 46; 2010; ISSN: 0144-5154

-
- [Fast12] Fastermann, P.: 3D-Druck/ Rapid Prototyping: Eine Zukunftstechnologie kompakt erklärt; Springer Vieweg; Deutschland Düsseldorf; 2012; ISBN: 978-3-642-29224-8
- [Feld13] Feldhusen, J. und Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 8. Auflage; Springer Verlag; 2013; ISBN: 978-3-642-29568-3
- [Feld17] Feldmann, C. und Gorj, A.: Grundlagen zu 3D-Druck, Produktionssystemen und Lean Production; 3D-Druck und Lean Productio, S. 17 – 75; 2017; ISBN: 978-3-658-18407-0
- [Fran16] Franke, T.; Fiebig, S.; Sellschopp, J. und Vietor, T.: Neue Leichtbaupotentiale durch Integration der Herstellrestriktionen in die Topologieoptimierung am Beispiel Gießen; Symposium hybrider Leichtbau 2016, 18 - 19. Mai 2016
- [Fraz14] Frazier, W.E.: Metal Additive Manufacturing: A Review; Journal of Materials Engineering and Performance; Volume 23, Issue 6, S. 1917 – 1928; 2014; ISSN: 1059-9495
- [Frei00] Frei, N.: Programm zur Auslegung mechanischer Wirkketten; 11. Symposium „Design for X“; 12. - 13. Oktober 2000
- [Gais13] Gaisbauer, S. und Stoffregen, H. A.: Advanced Manufacturing of Lightweight Structures; 2nd Joint AdRIA Summer School; At KTH Stockholm; 2013
- [Gand16] Gandhi, U. N.; Gorgularslan, R. M. und Song, Y.: Development of light weight lattice structure using 3D printing; Proceedings of Fraunhofer DDMC; Deutschland Berlin; 2016; ISBN: 978-3-8396-1001-5
- [Gart14] US Marktforschungsunternehmen Gartner: Hype Cycle for emerging technologies maps the journey to digital business 2014; www.gartner.com; Zugriff: 17.06.2016
- [Gath16] Gath, C.; Wudy, K. und Drummer, D. (2016): Thermisches und optisches Verhalten LDS-funktionalisierter Pulver für das Selektive Lasersintern; Proceedings of the 13th Rapid.Tech International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing (Rapid.Tech); Deutschland Erfurt; 2016; ISBN: 978-3-446-45017-2

- [Gebh13] Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren - Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping, Tooling, Produktion; Carl Hanser Verlag; Deutschland München; 2013; ISBN: 978-3-446-43651-0
- [Gerb08] Gerber, G.F. und Barnard, L.J.: Designing for Laser Sintering; Journal of New Generation Science, Vol. 6 (2); S. 47 – 59; 2008; ISSN: 1684-4998
- [Gibs15] Gibson, I.; Rosen D. und Stucker, B.: Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing; Springer Science + Business Media; USA New-York; 2015; ISBN: 978-1-4939-2113-3
- [Grae16] Gräßler, I.; Taplick, P.; Pottebaum, J.; Scholle, P. und Reiher, T.: Data Management for Additive Manufacturing: Survey on Requirements and current state; Proceedings of the 14th International Design Conference (DESIGN); S. 211 – 220; Kroatien Dubrovnik; 2016; ISSN: 1847-9073
- [Gram13] Gramlich, S.: Vom fertigungsgerechten Konstruieren zum produktintegrierenden Entwickeln: Durchgängige Modelle und Methoden im Produktlebenszyklus; VDI Verlag GmbH; 2013; ISBN: 978-3-1834-2301-9
- [Grub13] Gruber, G.; Kestel, P.; Staab, A. und Wartzack, S.: Methodische Unterstützungsansätze für die Entwicklung additiv gefertigter Bauteile; Proceedings of 10th Rapid.Tech International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing (Rapid.Tech); Deutschland Erfurt; 2013; ISBN: 978-3-932875-35-9
- [Grze09] Grzesiak, A. und Becker, R.: Light weight design for additive manufacturing of plastic components in the automation - design rules and industrial test cases; Additive Fertigung - vom Prototyp zur Serie; S. 83 - 96; 2009; ISBN: 978-3-931864-47-7
- [Gu12] GU, D.D.; Meiners, W.; Wissenbach, K. und Poprawe, R.: Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms; International Materials Reviews; Volume 57; Issue 3; S. 133 – 164; 2012; ISSN: 0950-6608
- [Hagu03] Hague, R.; Mansour, S. und Saleg, N.: Design opportunities with rapid manufacturing; Assembly Automation, Vol. 23 (4); S. 346 – 356; 2003; ISSN: 0144-5154

-
- [Hagu04] Hague, R.; Mansour, S. und Saleg, N.: Material and design considerations for rapid manufacturing; International Journal of Production Research, 42 (22); S. 4691 – 4708; 2004; ISSN: 0020-7543
- [Hagl15] Hagl, R.: Das 3D-Druck-Kompodium: Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber, 2. Auflage; Springer Gabler; Deutschland Wiesbaden; 2005; ISBN 978-3-658-07046-5
- [Hake82] Haken, H.: Synergetik; SpringerVerlag; Deutschland Berlin, Heidelberg; 1982; ISBN: 3-540-11050-X
- [Hao11] Hao, L.; Raymont, D.; Yan, C.; Hussein, A. und Young, P.: Design and Additive Manufacturing of Cellular Lattice Structures; The International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (VRAP); Portugal Leiria; 2011; ISBN: 978-0-415-68418-7
- [Harz95] Harzheim, L. und Graf G.: Optimization of Engineering Components with the SKO Method; Proceedings of the Ninth International Conference on Vehicle Structural Mechanics and CAE; S. 235 – 243; Troy Michigan; 1995; ISBN: 978-1-560-91657-4
- [Harz16] Harzheim, L.: Der Natur in die Karten geschaut – Optimierungsverfahren aus dem Bereich der Bionik; in: Tecklenburg, G. (Hrsg.): Karosseriebautage Hamburg 2016; 14. ATZ-Fachtagung; Springer Verlag; S. 3 – 16; 2016; ISBN: 978-3-658-14143-1
- [Hei17] Heiss, B.; Ersoy, B. und Gies, S.: Fahrwerkhandbuch. Grundlagen, Fahrdynamik, Fahrverhalten, Komponenten, Elektronische Systeme, Fahrerassistenz, Autonomes Fahren, Perspektiven; 5. Auflage; Springer Vieweg; Deutschland Berlin u.a.; 2013; ISBN: 978-3-658-15467-7
- [Hepp13] Hepperle, C.: Planung lebenszyklusgerechter Leistungsbündel; Verlag Dr. Hut, TU München, Dissertation; 2013; ISBN: 978-3-843-91000-2
- [Hoch08] Hochschule Bremen: Konstruktionsrichtlinie für ein fertigungsgerechtes Gestalten anhand des Fused Deposition Modeling mit Dimension SST 768; <http://homepages.hs-bremen.de/~dhennigs/SERP%20-%20Downloads/Gestaltungsrichtlinien%20DIMENSION%20768%20SST.pdf>; 2008; Zugriff: 24. März 2017

- [Hoen10] Hoenow, T.: Entwerfen und Gestalten im Maschinenbau, 3. Auflage; Carl Hanser Verlag; Deutschland München; 2010; ISBN: 9-783-446-42214-8
- [Huan96] Huang, G.Q.: Design for X – Concurrent engineering imperatives; Springer-Science + Business Media, B.V.; Niederlande Dordrecht; 1996; ISBN: 978-9-401-05762-2
- [Jian10] Jiang, N.; Wang, H.; Liu, H.; Hu, X. und Li, W.: Application of bionic design in product form design; Proceedings of IEEE 11th International Conference; China Yiwu; 2010; ISBN: 978-1-4244-7973-3
- [Jord86] Jorden, W.: Beanspruchungsgerechtes konstruieren; Vorlesungsmanuskript der GH-Paderborn; 1986
- [Jung89] Jung, A.: Funktionale Gestaltbildung. Gestaltbildende Konstruktionslehre für Vorrichtungen, Geräte, Instrumente und Maschinen, 1. Auflage; Springer Verlag; Deutschland Berlin; 1989; ISBN: 978-3-540-51170-0
- [Kadd10] Kaddar, W.: Die generative Fertigung mittels Laser-Sintern: Scanstrategien, Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen und Thermoplasten und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten optischen Eigenschaften beim LS von Thermoplasten und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten; Dissertation; Deutschland Duisburg Essen; 2010
- [Kamm11] Kammer, C.: Aluminium Taschenbuch; Beuth Verlag; Deutschland Berlin; 2011; ISBN: 978-3-410-22028-2
- [Kirc10] Kirchner, K.; Jäschke, H.; Franke, H.; Vietor, T. und Grote, K.: Mechanisch-technologische Eigenschaften generativ gefertigter Bauteile in Abhängigkeit von der Bauteilorientierung; RTEjournal - Forum für Rapid Technologie, Vol. 7; 2010; URN: urn:nbn:de:0009-2-25776
- [Kleb10] Kleber, W.; Bautsch, H.-J.; Bohm, J. und Klimm, D.: Einführung in die Kristallographie; 19. Auflage; Oldenbourg Wissenschaftsverlag; Deutschland München; 2010; ISBN 978-3-486-59075-3
- [Klei11] Klein, B.: Leichtbaukonstruktion – Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, 9. Auflage; Vieweg Teubner Verlag; 2000; ISBN: 978-3-8348-1604-7

-
- [Ko15] Ko, H.; Moon, S.K. und Hwang, J.: Design for additive manufacturing in customized products; International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 16 (11); S. 2369 – 2375; 2015; ISSN: 2234-7593
- [Koda81] Kodama, H.: Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer; Review of scientific instruments, Vol. 52 (11); S. 1.770 - 1.773; 1981; ISSN: 0034-6748
- [Koll94] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau - Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen; Springer Verlag, Berlin Heidelberg; 1994; ISBN: 978-3-662-08166-2
- [Koll98] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau, 4. Auflage; Springer Verlag; Deutschland Berlin; 1998; ISBN: 978-3-642-80417-5
- [Kopp09] Kopp, G.; Kuppinger, J.; Friedrich, H. E. und Henning, F.: Innovative Sandwichstrukturen für den funktionsintegrierten Leichtbau; Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Volume 111, Issue 4; S. 298 – 305; 2009; ISSN: 0001-2785
- [Kran15] Kranz, J.; Herzog, D. und Emmelmann, C.: Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4; Journal of Laser Applications; 2015; ISSN: 1938-1387
- [Kren13] Krenk, S. und Høgsberg, J.: Statics and Mechanics of Structures; Springer Vieweg; 2013; ISBN: 978-94-007-6112-4
- [Kris14] Krishnan, M.; Atzeni, E.; Canali, R.; Calignano, F.; Manfredi, D.; Paola, E. A. und Iuliano, L.: On the effect of process parameters on properties of AlSi10Mg parts produced by DMLS; Rapid Prototyping Journal, Vol. 20 Issue 6; S. 449 – 458; 2014; ISSN: 1355-2546
- [Krut98] Kruth, J.-P.; Leu, M.C. und Nakagawa, T.: Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping; CIRP Annals; Vol. 47, Issue 2, 1998, S. 525 – 540; ISSN: 0007-8506
- [Krut07] Kruth, J.-P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., und Craeghs, T.: Feedback control of selective laser melting; Proceedings of the 3rd international conference on advanced research in virtual and rapid prototyping; S. 521 – 527; 2007; ISBN: 978-0-415-41602-3

- [Kumk16] Kumke, M.; Watschke, H. und Vietor, T.: A new methodological framework for design for additive manufacturing; Virtual and physical Prototyping, Vol. 11, No. 1; S. 3 – 19; 2016; ISSN: 1745-2759
- [Kumk17] Kumke, M.; Watschke, H.; Hartogh, P.; Bavendiek, A.-K. und Vietor, T.: Methods and tools for identifying and leveraging additive manufacturing design potentials; International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM); Springer Paris; 2017; ISSN: 1955-2513
- [Kutt15] Kuttner, T.: Praxiswissen Schwingungsmesstechnik; 1. Auflage; Springer Verlag; Deutschland Berlin u.a.; 2015; ISBN: 978-3-658-04638-5
- [Küpp96] Küppers, G.: Chaos und Ordnung. Formen der Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft; Reclam; Deutschland Ditzingen; 1996; ISBN: 3-15-009434-8
- [Lach15a] Lachmayer, R.; Gottwald, P. und Lippert, R. B.: Approach for a comparatively evaluation of the sustainability for additive manufactured aluminum components; Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED); Italien Mailand; 2015; ISBN: 978-1-904-67067-4
- [Lach15b] Lachmayer, R.; Gembariski, P.C.; Gottwald, P. und Lippert, R. B.: The Potential of Product Customization using Technologies of Additive Manufacturing; Proceedings of the 8th World Conference on Mass Customization, Personalization and Co-Creation (MCPC); Kanada Montreal; 2015; ISBN: 978-3-319-29056-0
- [Lach16a] Lachmayer, R und Lippert, R.B.: Der Megatrend 3D-Druck - Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung; Newsletter Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP), Ausgabe 1; 2016, ISSN: 1613-5504
- [Lach16b] Lachmayer, R.; Lippert, R.B. und Fahlbusch, T. (Hrsg.): 3D-Druck beleuchtet: Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung; Springer Verlag; Deutschland Hannover; 2016; ISBN: 978-3-662-49055-6
- [Lach16c] Lachmayer, R.; Zghair, Y. A.; Klose, C. und Nürnberger, F.: Introducing Selective Laser Melting to Manufacture Machine Elements; Proceedings of the 14th International Design Conference (DESIGN), S. 831 – 842; Kroatien Dubrovnik; 2016; ISSN: 1847-9073

-
- [Lach17] Lachmayer, R. und Lippert, R.B. (Hrsg.): Additive Manufacturing Quantifiziert: Visionäre Anwendungen und Stand der Technik; Springer Verlag; Deutschland Hannover; 2017; ISBN: 978-3-662-54112-8
- [Lear14] Leary, M.; Merli, L.; Torti, F.; Mazur, M. und Brandt, M.: Optimal topology for additive manufacturing: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures; Journal of Materials and Design, Nr. 63; S. 678 – 690; 2014; ISSN: 0264-1275
- [Leye63] Leyer, A.: Maschinenkonstruktionslehre, Hefte 1 – 7; Birkhäuser-Verlag, Schweiz Basel; 1963 – 1978
- [Li03] Li, C. und Chou, T.-W.: A structural mechanics approach for the analysis of carbon Nanotubes; International Journal of Solids and Structures; Vol. 40; S. 2487 – 2499; 2003; ISSN: 0020-7683
- [Li16] Li, Z.; Zhang, D.Z.; Dong, P. und Kucukkoc, I.: A lightweight and support-free design method for selective laser melting; International Journal of Additive Manufacturing Technologies; Springer Verlag; 2016; DOI: 10.1007/s00170-016-9509-0
- [Lieb17] Wolfram Liebermeister: Die Natur als Ingenieur: Formbildung von Knochen und Bäumen; http://jaguar.biologie.hu-berlin.de/~wolfram/data/knochen_und_baeume.pdf; Zugriff: 01. Oktober 2017
- [Lind09] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden; Springer Verlag; 2009; ISBN: 978-3-642-01422-2
- [Lipp16a] Lippert, R. B. und Lachmayer, R.: Topology Examination for Additive Manufactured Aluminum Components; Proceedings of the 3rd Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC16); Deutschland Berlin; 2016; ISBN: 978-3-839-61001-5
- [Lipp16b] Lippert, R. B. und Lachmayer, R.: Bionic inspired Infill Structures for a Light-Weight Design by using SLM; Proceedings of the 14th International Design Conference (DESIGN); S.331 – 340; Kroatien Dubrovnik; 2016; ISSN: 1847-9073

- [Lipp16c] Lippert, R. B. und Lachmayer R.: Restriktionsgerechte Bauteilgestaltung für das Selektive Laserstrahlschmelzen; Proceedings of the 13th Rapid.Tech International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing (Rapid.Tech); Deutschland Erfurt; 2016; ISBN: 978-3-446-45017-2
- [Lipp17a] Lippert, R. B. und Lachmayer R.: Einflussfaktoren innerer Strukturen im Gestaltungsprozess von Strukturbauteilen für das Selektive Laserstrahlschmelzen; Proceedings of the 14th Rapid.Tech International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing (Rapid.Tech); S. 108 – 121; Deutschland Erfurt; 2017; ISBN: 978-3-446-45459-0
- [Lipp17b] Lippert, R. B. und Lachmayer R.: A design method for restriction oriented lightweight design by using selective laser melting, Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 5: Design for X, Design to X, Kanada Vancouver, 21. - 25. August 2017, ISBN: 978-1-904-67093-3
- [Lipp17d] Lippert, R. B. und Lachmayer R.: A Design Method for SLM-Parts Using Internal Structures in an Extended Design Space, M. Meboldt and C. Klahn (eds.), Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017, Schweiz Zürich, 13. - 15. September 2017, ISBN: 978-3-319-66865-9
- [Manf14] Manfredi, D.; Calignano, F.; Krishnan, M.; Canali, R.; Ambrosio, E. P.; Biamino, S.; Ugues, D.; Pavese, M. und Fino, P.: Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs); Monteiro, W. A.: Light Metal Alloys Applications; 2014; ISBN: 978-9-535-11588-5
- [Mate17] Materialise 3-matic: Easily create 3D printable lattice, porous and conformal structures; www.materialise.com/de/software/3-matic/; Zugriff: 19. Juli 2017
- [Matt63] Matting, A. und Ulmer, K.: Spannungsverteilung in Metallklebverbindungen; VDI-Z Integrierte Produktion 105; S. 1449 – 1457; 1963; ISSN: 0931-864X
- [Matt90] Mattheck, C.: Design and Growth Rule for Biological Structures and their Application in Engineering; Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures; Vol. 13, Issue 5; S. 535 – 550; 1990; ISSN: 1460-2695

-
- [Matt10] Mattheck, C.: Denkwerkzeuge nach der Natur; Karlsruher Institut für Technologie, 1. Auflage; Deutschland Karlsruhe; 2010; ISBN-13: 978-3923704736
- [Matt16] Matthes, S.; Kahlenberg, R.; Staube, C. und Jahn, S.: Untersuchung des Pulvereinflusses auf den SLM Prozess; Proceedings of the 13th Rapid.Tech Conference; Carl Hanser Verlag; S. 134 – 148; Deutschland Erfurt; 2016; ISBN: 978-3-446-45017-2
- [Mach92] Macherauch, E.: Praktikum in Werkstoffkunde; Springer Vieweg; Deutschland Braunschweig; 1992; ISBN: 978-3-663-01089-0
- [Mein99] Meiners, W.: Direktes Selektives LaserSintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe; Shaker Verlag; Deutschland Aachen; 1999; ISBN: 978-3-826-56571-7
- [Meng60] Mengerlinghausen, M.: Das Prinzip des Leichtbaus und seine Bewertung in Natur und Technik; VDI-Z 102 (1960) 13; S. 523 – 527
- [Merk12] Merkt, S.; Hinke, C.; Schleifenbaum, H. und Voswinkel, H.: Geometric complexity analysis in an integrative technology evaluation model (ITEM) for selective laser melting (SLM); South African Journal of Industrial Engineering, 23(2); S. 97 - 105; 2012; ISSN: 2224-7890
- [Merk15] Merkt, S. J.: Qualifizierung von generative gefertigten Gitterstrukturen für maßgeschneiderte Bauteilfunktionen; Shaker Verlag; Dissertation; Deutschland Aachen; 2015
- [Mich14] Michaleris, P.: Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes; Finite Elements in Analysis and Design; Volume 86; S. 51 – 60; 2014; ISSN: 0168-874X
- [Moll98] Molloy, O.; Tilley, S. und Warman, E.A.: Design for Manufacturing and Assembly; Springer Science+Business Media B.V.; Niederlande Dordrecht; 1998; ISBN: 978-1-4615-5785-2
- [Nach97] Nachtigall, W.: Vorbild Natur - Bionik-Design für funktionelles Gestalten; Springer Verlag; Deutschland Berlin/ Heidelberg; 1997; ISBN: 3-540-63245-x

- [Nach02] Nachtigall, W.: Bionik - Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler; Springer Verlag; Deutschland Saarbrücken; 2002; ISBN: 978-3-642-62399-8
- [Nien13] Niendorf, T.; Leuders, S.; Riemer, A.; Richard, H.A.; Tröster, T. und Schwarze, D.: Highly Anisotropic Steel Processed by Selective Laser Melting; Metallurgical and Materials Transactions B; Vol. 44, Issue 4; S. 794 – 796; 2013; ISSN: 1073-5615
- [Ohls15] Ohlsen, J.; Herzog, F.; Raso, S. und Emmelmann, C.: Funktionsintegrierte, bionisch optimierte Fahrzeugleichtbaustruktur in flexibler Fertigung; Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Entwicklung Werkstoffe, Vol. 10; 2015; ISSN: 0001-2785
- [Oste14] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium; Springer Vieweg; Deutschland Berlin; 2014; ISBN: 978-3-662-43807-7
- [Ott09] Ottnad, J.: Topologieoptimierung von Bauteilen in dynamischen und geregelten Systemen; Dissertation; 2009; ISSN: 1615-8113
- [Pahl67] Pahl, G.: Entwurfsingenieur und Konstruktionslehre unterstützen die moderne Konstruktionsarbeit; Konstruktion 19; S. 337 – 344; 1967; ISSN: 0720-5953
- [Pahl07] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J. und Grote, K.-H.: Pahl/ Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung; Springer Verlag; 2007; ISBN: 978-3-540-34061-4
- [Petr11] Petrovic, V. et al.: Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies; International Journal of Production Research, Vol. 49 (4); S. 1061 – 1079; 2011; ISSN: 0020-7543
- [Pets14] Petschow, U.; Ferdinand, J.-P.; Dickel, S.; Fläming, H.; Steinfeld, M. und Worobei, A.: Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit; Schriftenreihe des IÖW 206/14; Deutschland Berlin; 2014; ISBN 978-3-940920-09-6
- [Ponc12] Ponche, R. et al.: A new global approach to design for additive manufacturing; Virtual and Physical Prototyping, Vol. 7 (2); S. 93 – 105; 2012; ISSN: 1745-2759

-
- [Ponc14] Ponche, R. et al.: A novel methodology of design for additive manufacturing applied to additive laser manufacturing process; *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 30 (4); S. 389 – 398; 2014; ISSN: 0736-5845
- [Popo16] Popovich, A. und Sufiiarov, V.: *Metal Powder Additive Manufacturing, New Trends in 3D Printing*; Prof. Igor Shishkovsky (Ed.): InTech; 2016; ISBN: 978-953-51-2479-5
- [Popr15] Poprawe, R. et. al.: *Production Systems: recent Developments in process Development, machine concepts and component Design*; *Advances in production Technology*; Springer Verlag; S. 49 – 65; 2015; ISBN: 978-3-319-12303-5
- [Rein11] Reinhart, G. und Teufelhart, S.: Load-Adapted Design of Generative Manufactured Lattice Structures; *Physics Procedia* 12; S. 385 – 392; 2011; ISSN: 1875-3892
- [Rein13] Reinhart, G. und Teufelhart, S.: Optimization of mechanical loaded lattice structures by orientating their struts along the flux of force; *Procedia CIRP* 12; S. 175 – 180; 2013; ISSN: 2212-8271
- [Rehm06] Rehme, O. und Emmelmann, C.: Rapid manufacturing of lattice structures with Selective Laser Melting; *Proceedings of SPIE*, Vol. 6107 61070K-1; 2006; ISSN: 0277-786X
- [Rehm09] Rehme, O. und Emmelmann, C.: Selective Laser Melting of Honeycombs with Negative Poisson's Ratio; *Journal of Laser Micro/ Nanoengineering*; Vol. 4, Issue 2; 2009; ISSN: 1880-0688
- [Rias16] Rias, A. I.; Bouchard, C.; Segonds, F. und Abed, S.: Design for Additive Manufacturing: A Creative Approach; *Proceedings of International Design Conference (DESIGN)*; Kroatien Dubrovnik; 2016; ISSN: 1847-9073
- [Riss13] Riss, F.; Teufelhart, S. und Reinhart, G.: Auslegung von Gitter- und Wabenstrukturen für die additive Fertigung; *Lightweight design* 6, No.1; S. 24 – 28; 2013; ISSN: 1865-4819
- [Robe09] Roberts, I.A.; Wang, C.J., Esterlein, R.; Stanford, M. und Mynors, D.J.: A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser

melting of metal powders in additive layer manufacturing; International Journal of Machine Tools and Manufacture; Vol. 49, Issues 12–13; S. 916 – 923; 2009

- [Rode91] Rodenacker, W. G.: Methodisches Konstruieren. Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele. 4. Auflage; Springer Verlag; Deutschland Berlin; 1991; ISBN: 978-3-540-53977-3
- [Rodr10] Rodrigue, H. und Rivette, M.: An assembly-level design for additive manufacturing methodology; Proceedings of IDMME – Virtual Concept; Frankreich Bordeaux; 2010
- [Roth00] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 1: Konstruktionslehre, 3. Auflage; Springer Verlag; Deutschland Berlin/ Heidelberg; 2000; ISBN: 978-3-642-17466-7
- [Saut17] Sauthoff, B.: Generative Parametrische Modellierung von Strukturkomponenten für die Technische Vererbung; TEWISS Verlag; Deutschland Garbsen; 2017; ISBN: 978-3-95900-144-1
- [Scha63] Schapitz, E.: Festigkeitslehre für den Leichtbau; VDI-Verlag; Deutschland Düsseldorf; 1963; ASIN: B0000BN7U7
- [Scha11] Scharnowski, E.B.: Gestalt und Deformation: Elementare Tragwerke und Rechengrößen aus Natur, Technik und Design; 2011; ISBN: 978-3-936-22814-4
- [Schm63] Schmit, L.A. und Mallet R.H.: Structural Synthesis and Design Parameters; Journal of the Structural Division; Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 89 (4); S. 269 – 299; 1963
- [Schu12] Schuck, M.: Kombination von Materialleichtbau mit konstruktivem Leichtbau; Lightweight Design, Vol. 5 (2); 2012; ISSN: 1865-4819
- [Schu05] Schuhmacher, A.: Optimierung mechanischer Strukturen - Grundlagen und industrielle Anwendungen; Springer Verlag; Deutschland Berlin; 2005; ISBN: 978-3-540-21887-6
- [Sehr09] Sehrt, J. und Witt, G.: Auswirkung des anisotropen Gefüges strahlgeschmolzener Bauteile auf mechanische Eigenschaftswerte; RTjournal - Forum für Rapid Technologie, Vol. 6.; www.rtejournal.de/ausgabe6/2152; 2009; Zugriff: 20. April 2017

-
- [Shah13] Shahzad, K.; Deckers, J.; Kruth, J.-P. und Vleugels, J.: Additive manufacturing of alumina parts by indirect selective laser sintering and post processing; Journal of Materials Processing Technology; Vol. 213, Issue 9; S. 1484 – 1494; 2013; ISSN: 0924-0136
- [Shen12] Shen, Y.; Cantwell, W. J.; Mindes, R. und Ushijima, K.: The Properties of Lattice Structures Manufactured Using Selective Laser Melting; Advanced Materials Research; S. 386 – 391; 2012; ISSN: 1662-8985
- [Skol14] Skolaut, W.: Maschinenbau. Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor-Studium; 1. Auflage; Springer Verlag; Deutschland Berlin u.a.; 2014; ISBN: 978-3-8274-2554-6
- [Smit13] Smith, M.; Guan, Z. und Cantwell, W.J.: Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique; International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 67; S. 28 – 41; 2013; ISSN: 0020-7403
- [Spec04] Speck, T. und Neinhuis, C.: Bionik, Biomimetik: Ein interdisziplinäres Forschungsgebiet mit Zukunftspotential; Naturwissenschaftliche Rundschau; 57. Jahrgang, Heft 4; 2004; ISSN: 0028–1050
- [Stoe05] Stoebener, K.; Baumeister, J. und Rausch, G.: Aluminiumschäume für die industrielle Produktion, Neues Konzept für die Serienfertigung; ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 107 (1), S. 10 – 15; ISSN: 0001-2785
- [Stof11] Stoffregen, H.; Fischer, J.; Siedelhofer, C. und Abele, E.: Selective Laser Melting of Porous Structures; Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF), USA Austin Texas, S. 680 – 695; 2011
- [Sull13] Sullivan, S. und Chris, H.: Weight Reduction Case Study of a Premium Road Bicycle Crank Arm Set by Implementing Beralcast® 310; Kanada Vancouver; 2013
- [Tahr12] Tahric, A.; Karall, T. und Kurzböck C.: Lastaufnehmende Raumgitterstruktur; Lightweight Design, Vol. 5 (1); S. 36 – 40; 2012; ISSN: 1865-4819
- [Teuf12] Teufelhart, S.: Geometrie- und belastungsgerechte Optimierung von Leichtbaustrukturen für die additive Fertigung; Seminarbericht: Additive Fertigung; 2012

- [Thij10] Thijs, L.; Verhaeghe, F.; Craeghs, T.; Van Humbeeck, J. und Kruth, J.-P.: A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V; *Acta Materialia*; Vol. 58, Issue 9; S. 3303 – 3312; 2010; ISSN: 1359-6454
- [Thom09] Thomas, D.: *The Development of Design Rules for Selective Laser Melting*; University of Wales Institute; Großbritannien Cardiff; 2009
- [Thum44] Thum, A.: *Die Entwicklung von der Lehre der Gestaltfestigkeit*; *VDI-Z Integrierte Produktion* 88; S. 609 – 615; 1944; ISSN: 0931-864X
- [Tren00] Trenke, D.: *Konstruktionsregeln für Rapid Tooling gerechte Gestaltung von Werkzeugen und Prototypen*; Mitteilung aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal; 2000; ISSN 0947-2274
- [Tuck08] Tuck, C. J.: *Rapid manufacturing facilitated customization*; *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 21 (3); S. 245 – 258; 2008; ISSN: 1362-3052
- [Ulla14] Ullah, I.; Elambasseril, J.; Brandt, M. und Feih, S.: *Performance of bio-inspired Kagome truss core structures under compression and shear loading*; *Journal of Composite Structures*, Vol. 118; S. 294 – 302; 2014; ISSN: 0263-8223
- [Vayr12] Vayre, B., et. al.: *Designing for Additive Manufacturing*; 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems; 2012; ISBN: 978-1-62748-512-8
- [Wadl03] Wadley, H.N.G.; Fleck, N.A.; Evans, A.G.: *Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures*; *Composites Science and Technology*; Vol. 63, Issue 16; S. 2331 – 2343; 2003; ISSN: 0266-3538
- [Wagn17] Wagner, C. und Georgiadis, A.: *Kundenintegration durch Additive Fertigung*; *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 112 (5), S. 317 – 321; 2017; ISSN: 0947-0085
- [Wart10] Wartzack, S.; Drummer, D.; Wittmann, S.; Stuppy, J.; Rietzel, D.; Tremmel, S. und Kühnlein, F.: *Besonderheiten bei der Auslegung und Gestaltung laser-gesinterter Bauteile*; *RTEjournal – Forum für Rapid Technologie*, Vol. 7 (1); 2010; ISSN: 1614-0923

-
- [Wart13] Wartzack, S. und Stangl, T.: Integrierte Gestaltoptimierung für die Produktentwicklung; ZWF Jahrgang 108; Carl Hanser Verlag; S. 283 – 284; Deutschland München; 2013; ISSN: 0947-0085
- [Wats16] Watschke, H.; Kumke, M. und Vietor, T.: Design for Additive Manufacturing - Praxisnahe Hilfsmittel zur Identifikation und Nutzung konstruktiver Freiheiten; 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: Traditio et Innovatio - Entwicklung und Konstruktion; Shaker Verlag; Deutschland Rostock 2016; ISBN: 978-3-844-04732-5
- [Watt06] Watts, D. M. und Hague, R. J.: Exploiting the design freedom of RM; Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF); S. 656 – 667; USA Austin Texas; 2006
- [Webe11] Weber, C.: Design Theory and Methodology. Contributions to the Computer Support of Product Development/Design Processes, In: Birkhöfer, H. (Hrsg): The Future of Design Methodology; S. 91 – 104; 2011; ISBN: 978-0-85729-614-6
- [Wegn12a] Wegner, A. und Witt, G.: Konstruktionsregeln für das Laser-Sintern; Journal of Plastics Technology, Carl Hanser Verlag; Vol. 8; 2012; ISSN: 0975-072X
- [Wegn12b] Wegner, A. und Witt, G.: Correlation of Process Parameters and Part Properties in Laser Sintering using Response Surface Modeling; Physics Procedia, Vol. 39, S. 480 – 490; 2012; ISSN: 1875-3892
- [Wetz03] J. Wetzels: Holzfachwerk, Expert-Verlag; S. 19 ff.; 2003; ISBN 3-8169-2243-0
- [Wied84] Wiedemann, J.: Gewichts- und kostenorientierte Zielmodelle; Einsatzkriterien, Konstruktionsprinzipien und Probleme des Leichtbaus; Vortrag Technische Akademie Esslingen; 1984
- [Wohl17] Wohlers Associates: Wohlers Report 2017 - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report; 2017; ISBN: 978-0-991-33323-3
- [Wong12] Wong, K.V. und Hernandez, A.: A Review of Additive Manufacturing; ISRN Mechanical Engineering, Vol 2012, Artikel-Nummer 208760; 2012; DOI: 10.5402/2012/208760

- [Yan12] Yan, C.; Hao, L.; Hussein, A. und Raymont, D.: Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting; International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 62; S. 32 – 38; 2012; ISSN: 0890-6955
- [Yang15] Yang, S. und Zhao, Y.F.: Additive Manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review; International Journal of Advanced Manufacturing technology, Vol. 80 (1); S. 327 – 342; 2015; ISSN: 0268-3768
- [Zaeh06] Zäh, M. F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren; Carl Hanser Verlag; 1. Auflage; Deutschland München; 2006; ISBN: 3-446-22854-3
- [Zerb87] Zerbst, W.E.: Bionik - Biologische Funktionsprinzipien und ihre technischen Anwendungen; Springer Verlag; Deutschland Wiesbaden; 1987; ISBN: 978-3-519-03607-4
- [Zgha16] Zghair, Y. A.: Rapid Repair hochwertiger Investitionsgüter, in: Lachmayer, R.; Lippert, R.B. und Fahlbusch, T. (Hrsg.): 3D-Druck beleuchtet - Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung; Springer Verlag; Deutschland Hannover; 2016; ISBN: 978-3-662-49055-6
- [Zimm11a] Zimmer, D. und Adam, G.: Direct Manufacturing Design Rules; Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping; 2011; ISBN: 978-0-203-18141-6
- [Zimm11b] Zimmer, D. und Adam, G.: Direct Manufacturing Design Rules – Erarbeitung von applikationsunabhängigen Konstruktionsregeln; Proceedings of the 8th Rapid.Tech Conference; Carl Hanser Verlag; Deutschland Erfurt; 2011
- [Zins13] Zinsmann GmbH: Eigenschaften von AISi10Mg Gusslegierung; <http://www.zinsmann.de/images/zinsmann/Eigenschaften239D.pdf>; Zugriff: 19. Januar 2017

Verwendete Normen und Richtlinien

- [ASTM15] Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, American Society for Testing and Materials (ASTM), F2792-12a; 2015; DOI: 10.1520/F2792-12A
- [ASTM52910] Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing, American Society for Testing and Materials (ASTM), ISO / ASTM52910 - 17; 2016; DOI: 10.1520/ISOASTM52910-17
- [DE171069] DE 171069 T1: Stereolithographische Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Gegenständen; Anmeldenummer: DE1985109899; Antragssteller: 3D Systems, Inc.; Erfinder: Charles W. Hull; Eingetragen: 6. Aug. 1985; Veröffentlicht: 7. Nov. 1991
- [DIN345] DIN Taschenbuch 345: Fahrräder Normen; Beuth Verlag, Berlin; 2006; ISBN: 978-3-410-16342-8
- [DIN50125] DIN 50125:2016-12: Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben, Beuth Verlag; 2016
- [DIN515] DIN EN 515:2016-01: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Halbzeug – Bezeichnungen der Werkstoffzustände; Beuth Verlag; 2015
- [DIN7438] DIN EN ISO 7438:2016-07: Metallische Werkstoffe – Biegeversuch; Beuth Verlag; 2016
- [DIN8580] DIN 8580:2003-09: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung; Beuth Verlag; 2003
- [ISO6695] ISO 6695:215(E): Fahrräder – Tretlagerwelle-Tretkurbel, mit Vierkant – Maße für den Zusammenbau
- [ISO18459] DIN ISO 18459: Bionik – Bionische Strukturoptimierung (ISO 18459:2015), DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; 2016

- [VDI2221] VDI Gesellschaft Produktion und Logistik – VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte; VDI Handbuch; Beuth Verlag; Deutschland Berlin; 1993
- [VDI2223] VDI Gesellschaft Produktion und Logistik – VDI 2221: Methodisches Entwerfen technischer Produkte; VDI Handbuch; Beuth Verlag; Deutschland Berlin; 2004
- [VDI3405] VDI Gesellschaft Produktion und Logistik – VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen; VDI Handbuch; Beuth Verlag; Deutschland Berlin; 2014
- [VDI3405-3] VDI Gesellschaft Produktion und Logistik: VDI 3405 Blatt 3: Additive Fertigungsverfahren - Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen; VDI Handbuch; Beuth Verlag; Deutschland Berlin; 2015
- [VDI6223-1] VDI Gesellschaft Produktion und Logistik: VDI 6223 Blatt 1 Bionik - Bionische Materialien, Strukturen und Bauteile; VDI Handbuch; Beuth Verlag; Deutschland Berlin; 2013
- [US4575330] US 4575330 A: Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography; Anmeldenummer: US 06/638,905; Antragssteller: Charles W. Hull; Eingetragen: 8. Aug. 1984; Veröffentlicht: 11. März 1986

Anhang

A Betreute studentische Arbeiten

Name	Art der Arbeit: <i>Titel</i> . Jahr
Beilfuß, Tim	Projektarbeit: <i>Potentialanalyse innerer Strukturen in einem erweiterten Gestaltungsraum für Selektives Laserstrahlschmelzen</i> . 2017
Biermann, Tobias	Projektarbeit: <i>Parametrische Dichteanpassung innerer Strukturen für Selektives Laserstrahlschmelzen</i> . 2017
Dahl, Eibe	Masterarbeit: <i>Ansatz zur Berücksichtigung von Gestaltungsrichtlinien in der SLM-Prozesskette</i> . 2018
Dai, Eduart	Projektarbeit: <i>Entwicklung eines Extruders für das FDM (Fused Deposition Modeling) Verfahren</i> . 2016
Diekmann, Robin	Hilfswissenschaftler: <i>Restriktionsgerechte Gestaltung von CAD Modellen und Prüfstandbetreuung</i> . März 2015 bis Januar 2017
Diekmann, Robin	Bachelorarbeit: <i>Konzeptionierung eines automatischen Prozesskammer- und Bauzylinder-Verschlusses für SLM-Anlagen</i> . 2018
Frick, Hauke	Projektarbeit: <i>Leichtbauweise einer Tretkurbel für das Selektive Laserstrahlschmelzen</i> . 2016
Girnth, Simon	Projektarbeit: <i>Einflussparameter für Gestaltungsrestriktionen im Selektiven Laserstrahlschmelzen</i> . 2017
Kriwall, Mareile	Diplomarbeit: <i>Bewertungsmatrix zur Potentialabschätzung für den Einsatz des Selektiven Laserstrahlschmelzens</i> . 2016
Müller, Jan Felix	Bachelorarbeit: <i>Einsatz von Gestaltungsrichtlinien bei der Topologieoptimierung laserstrahlgeschmolzener Bauteile</i> . 2018
Ritz, Jannes	Hilfswissenschaftler: <i>CAD-Modell Aufbereitung und Rendering, Prüfstandbetreuung</i> . April 2017 bis März 2018
Ritz, Jannes	Projektarbeit: <i>Auslegung kraftflussangepasster Strukturen für laserstrahlgeschmolzene Biegeproben</i> . 2018
Rohling, Markus	Projektarbeit: <i>Validierung einer Simulationsumgebung für das Selektive Laserstrahlschmelzen von AISi10Mg</i> . 2017
Rottmann, Ann-Katrina	Diplomarbeit: <i>Konzeption einer Wendeeinrichtung zur Automatisierung des Produktionsablaufes für Nutschneidemaschinen</i> . 2015

- Schimmelpfennig, Franziska Bachelorarbeit: *Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien zur Pulverentfernung aus laserstrahlgeschmolzenen inneren Strukturen*. 2018
- Schoenemeier, Peter Projektarbeit: *Potentialanalyse von innerer Strukturen für eine kraftflussangepasste Dichteverteilung*. 2017
- Stein, Tobias Projektarbeit: *Fertigungsgerechte Gestaltung eines Radträgers für das Selektive Laserstrahlschmelzen*. 2016
- Shen, Yuexiong Projektarbeit: *Erarbeitung eines Konstruktionskataloges im Bereich der additiven Fertigung*. 2016
- Toppel, Till Kristoph Projektarbeit: *Einsatz von Gestaltungshilfsmitteln für die Entwicklung von Additive Manufacturing Bauteilen*. 2016
-

B Eigene Patente und herausgegebene Bücher

Patente

Kloppenburger, G.; Wolf, A.; Gottwald, P. und Lippert, R. B. (2017): Taschenlampe mit einer Lichtquelle, DE 102015115863.9

Keil, G.; Hahn, C.; Scholz, P.; Krämer, K.; Stuhlmann, C.; Stienen, T. und Lippert R.B. (2017): Method and transport device for converting a first container stream into a second container stream; US Patent 9,682,829

Keil, G.; Hahn, C.; Scholz, P.; Krämer, K.; Stuhlmann, C.; Stienen, T. und Lippert R.B. (2014): Verfahren sowie Transportvorrichtung zum Umformen eines ersten Behälterstroms in einen zweiten Behälterstrom; WO Patent WO 2015007529 A1

Lippert R.B.; Keil, G.; Hahn, C.; Scholz, P.; Krämer, K.; Stuhlmann, C. und Stienen, T. (2013): Verfahren sowie Transportvorrichtung zum Umformen eines ersten Behälterstroms in einen zweiten Behälterstrom; DE Patent DE 102013107565 A1

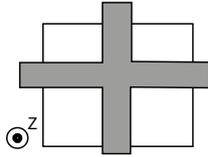
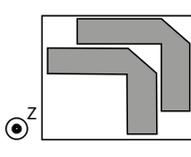
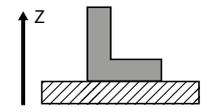
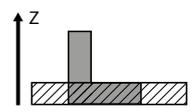
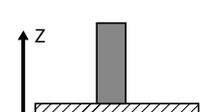
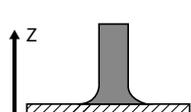
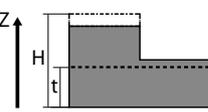
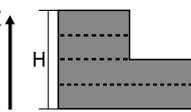
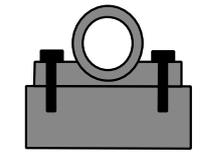
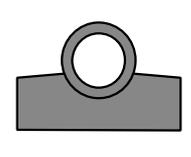
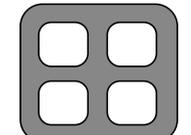
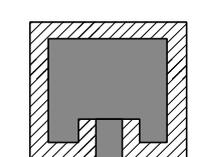
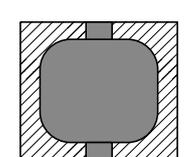
Bücher

Lachmayer, R.; Lippert, R. B. und Kaierle, S. (Hrsg.) (2018): Additive Serienfertigung - Erfolgsfaktoren und Handlungsfelder für die Anwendung, Springer Vieweg Verlag, Berlin Heidelberg, Mai 2018; ISBN: 978-3-662-56462-2

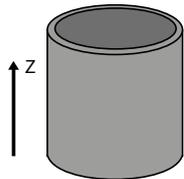
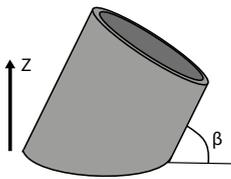
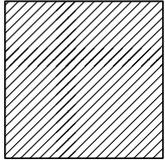
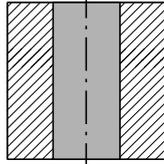
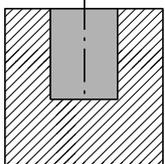
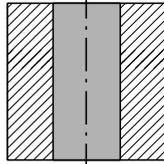
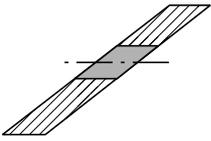
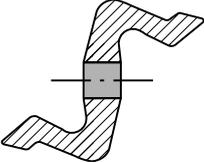
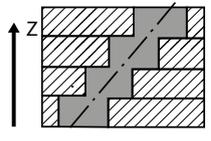
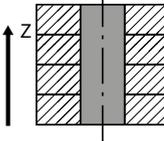
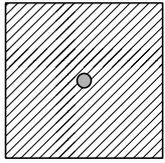
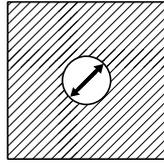
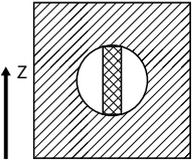
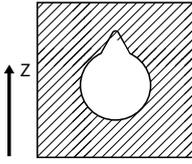
Lachmayer, R. und Lippert, R. B. (Hrsg.) (2017): Additive Manufacturing Quantifiziert - Visionäre Anwendungen und Stand der Technik, Springer Vieweg Verlag, Berlin Heidelberg, Mai 2017; ISBN: 978-3-662-54112-8

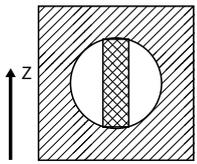
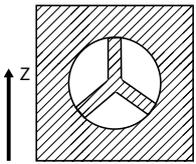
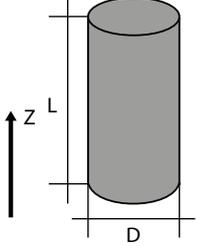
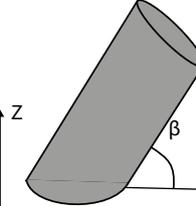
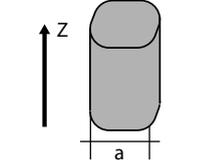
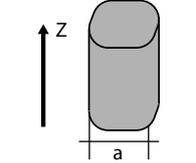
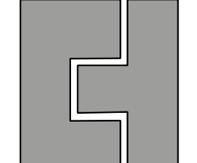
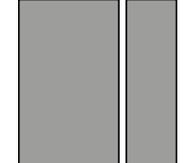
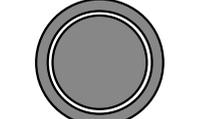
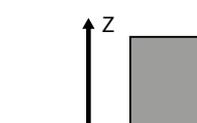
Lachmayer, R.; Lippert; R.B. und Fahlbusch, T. (Hrsg.) (2016): 3D-Druck beleuchtet - Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung, Springer Vieweg Verlag, Berlin Heidelberg, Mai 2016; ISBN: 978-3-662-49055-6

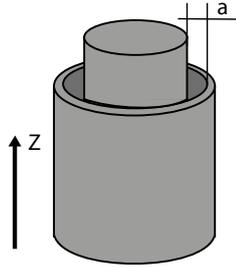
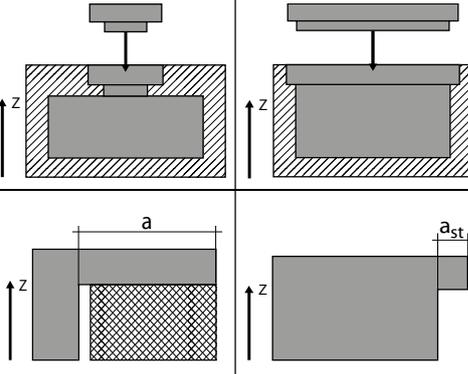
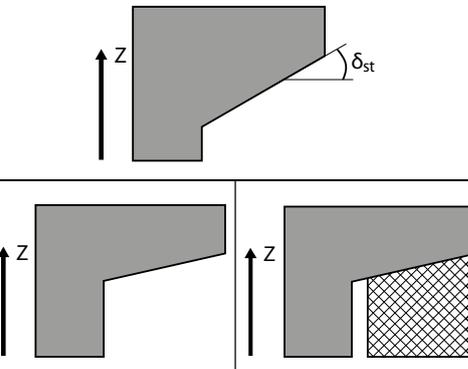
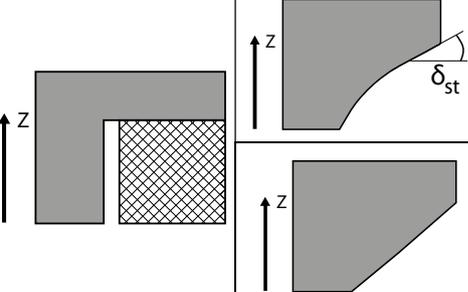
C Gestaltungsrichtlinien für SLM

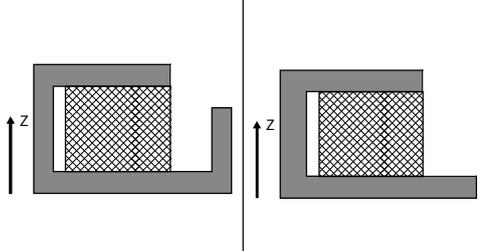
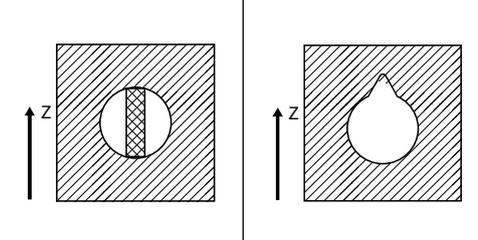
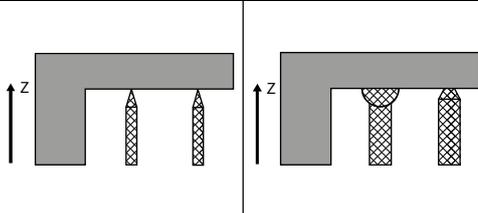
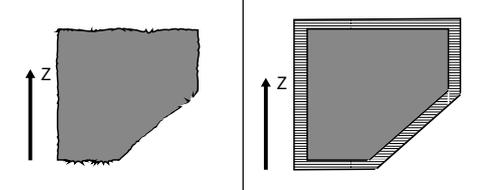
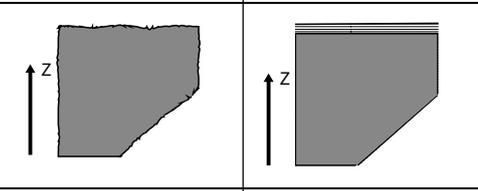
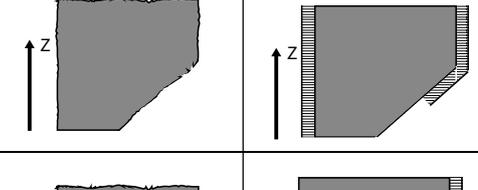
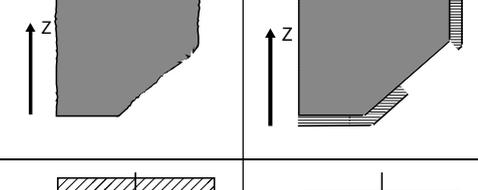
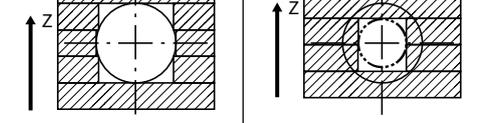
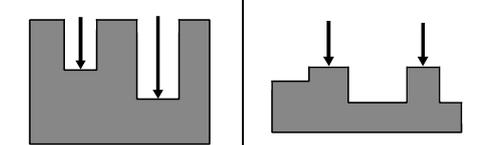
Art		Ungünstig	Günstig	Beschreibung	Werte
1	Generell			Das Bauteil muss kleiner als der Bau- raum sein. Bauteil zum Einpassen dre- hen, oder separieren.	
2	Integrieren der Substratplatte			Integrieren der Sub- stratplatte in das Bauteil für Pulverein- sparung. Ausrunden des Übergangs Auf- bau/Substratplatte wirkt ungewollter Ab- lösung des Aufbaus entgegen.	Ausrundung $r = 3$ bis 5 mm für TiAl6V4 [Kran15]
					
3	Größe Höhe			Die Bauteilhöhe sollte dem Vielfachen der Schichtdicken entsprechen.	$20 < t < 50 \mu\text{m}$ Entspr. dem größten Korn- durchmesser des Pulvers
4	Bauteile Anzahl			Reduktion der Bauteile zur Minimierung des Montageaufwands.	
5	Volumen			Materialeinsparung durch Platzieren von Kavitäten sowie Verminderung ther- moinduzierter Eigenspannungen	
6	Kavitäten Form			Ausrundung von Ecken und Kanten an- streben. Verwinkelte Geometrien und Hinterschnitte vermeiden.	

7	Pulverentfernung			Mindestens eine Öffnung zur Pulverentfernung vorsehen. Bei verwinkelten Kavitäten mehrere Öffnungen vorsehen.	Öffnungsdurchmesser: $D_{min} = 3 - 5 \text{ mm}$ [Kran15]
8	Anhäufungen			Materialanhäufungen zur Verminderung der thermoinduzierten Eigenspannungen vermeiden.	Geschlossene Flächen in der Bauebene: 20 x 20mm [Adam14]
9	Stege			Großflächige horizontale Segmente vermeiden, da schlechte Oberflächen infolge des Downskin-Winkels entstehen.	
10	Strukturen			Inneren Strukturen zur Material- und Gewichtseinsparung vorsehen.	
11	Kanten			Der min. Kantenradius in Baurichtung ist durch den Fokussdurchmesser limitiert.	R_{min} ca. 0,3 - 0,45 mm [Eos14]
12	Ecken			Ecken in Baurichtung abrunden um Verzug infolge thermoinduzierter Spannungen zu vermeiden.	
13	Wände			Min. zul. Wandstärke t_{min} beachten. Dabei auf zul. Neigungswinkel β achten. Versteifung zur Vermeidung von Wellenbildung [EOS, Kran15].	$t_{min} = 0,4 \text{ mm}$ $\beta \geq 30^\circ$ • $H/t \approx 5$ für $H < 5 \text{ mm}$ • $H/t \approx 10$ für $5 \leq H < 10 \text{ mm}$ • $H/t \approx 15$ für $H \geq 10 \text{ mm}$
		Dicke			

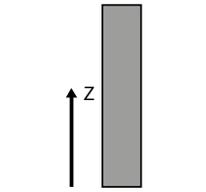
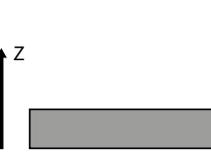
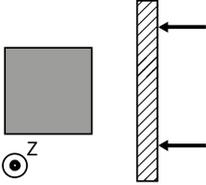
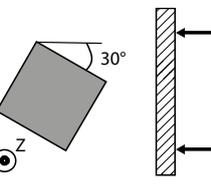
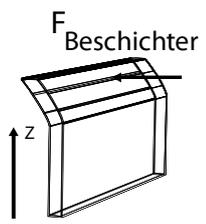
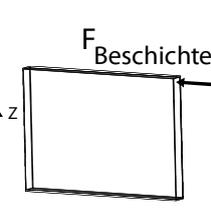
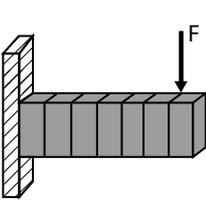
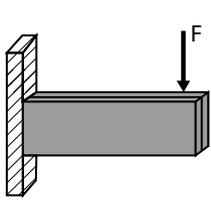
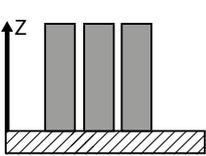
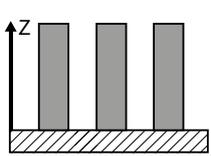
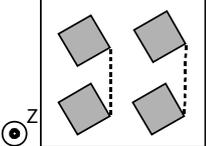
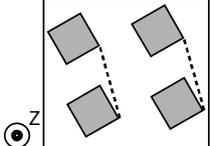
14		Hohlzylinder			Min. zul. Wandstärke (t_{\min}) beachten. Dabei auf zul. Neigungswinkel (β) achten	$t > 0,3 \text{ mm}$ <ul style="list-style-type: none"> • $h_{\max} = 45 \text{ mm}$ für 90° • $h_{\max} = 20 \text{ mm}$ für $60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ [Kran15]
15	Bohrungen	Existenz			Bohrungen zur Materialeinsparung und Reduktion von Bearbeitungsschritten mit fertigen. Zur Nachbearbeitung ist die Erreichbarkeit mit dem Werkzeug sicherzustellen.	
16		Art			Durchgangsbohrungen statt Sacklöcher verwenden.	
17		Bearbeitung			Oberflächen normal zur Werkzeugachse orientieren, um Anschnitt zu erleichtern. Dabei Einspannmöglichkeit vorsehen.	
18		Orientie-			Bohrungsachse zur Minderung des Treppenstufeneffektes in Baurichtung orientieren.	
19		Durchmesser			Unterschreiten des min. zul. Bohrungsdurchmessers führt von Ansinterung an der Bohrungswand.	$D_{\min} = 2 \text{ mm}$ für TiAl6V4 [Kran15] $D_{\min} = 1 \text{ mm}$ für 1.4404 [Thom09]
20	Selbsttragend			Selbsttragende Bohrungen anstelle kreisrunder Bohrungen, wenn Baurichtung in Bohrungsachse.	Stützstrukturen <ul style="list-style-type: none"> • $\varnothing \geq 12 \text{ mm}$ für TiAl6V4 • $\varnothing \geq 10 \text{ mm}$ für 1.4404 [Kran15, Thom09]	

21		Abstützend			Stützmaterialentfernung in Kanälen durch selbsttragende Querschnitte vermeiden, z.B. Ausspitzen des Bohrungsdaches, elliptische Querschnitte	
22		Durchmesser			Beachten von min. Stabdurchmesser und Neigungswinkel.	$D > 0,5 \text{ mm}$ für $\beta = 30 \dots 90^\circ$ und $L = 50 \text{ mm}$ Verhältnis Länge (z)/ Breite (xy): 8:1 [Kran15, Riou15, Cruc15]
23	Zylinder	Ecken			Kanten entsprechend min. Kantenradius abrunden. Vorgegebene Seitenlänge nicht unterschreiten.	$a_{\text{min}} = 2 \text{ mm}$ [Kran15]
24		Hinterschnitte			Lücken zur besseren Pulverentfernung weitestgehend vereinfachen.	
25		Gleiten			Kontaktflächen bei integrierten Führungen möglichst klein halten, sodass weniger Pulveranhaftung entsteht.	
26		Reinigen			Mehrere Aussparungen zur Pulverentfernung vorsehen.	
27	Zwischenräume	Zylind-			Bei großen Lückenbereichen zur einfacheren Pulverentfernung Rillen vorsehen.	
28	Zwischenräume	Abstand		Beachten des min. Lückenabstands.		$a_{\text{min}} = 0,2 \text{ mm}$ [Kran15, Adam14]

29		Gelenke		Lückenabstand für Gelenke nicht unterschreiten, da Pulveradhäsion und Verbindungen der gegenüberliegenden Wände.	Verdrehung ohne Kraftaufwand: <ul style="list-style-type: none"> • $a_{\min} = 0,15 \text{ mm}$ Verdrehung nach Kraftaufwand <ul style="list-style-type: none"> • $a_{\min} = 0,05 \text{ mm}$ [Kran15]
30	Überhänge	Länge		Überhänge vermeiden bzw. Minimieren, dadurch Notwendigkeit von Support minimieren. $a_{\text{st}} = \text{selbsttragende Überhangweite}$	$a_{\text{st}} \leq 0,3 \text{ mm}$ für TiAl6V4 [Kran15] $a_{\text{st}} \leq 0,08 \text{ mm}$ für 1.4404 [Thom09] $a_{\text{st}} \leq 2 \text{ mm}$ für 316L [Adam14]
31		Generell	<ul style="list-style-type: none"> • Der tiefste Punkt in Baurichtung muss immer gestützt werden. • Aussteifung der Stützstruktur bei großflächigen Abstützungen. • Einsparung von Material und Reduktion des Fertigungsaufwandes durch Vermeidung von Stützstrukturen. • Bohrungen als Startpunkt für Drahterosion vorsehen. 		
32		Downskin-Winkel		Stützstrukturen sind oberhalb des kritischen Downskin-Winkels notwendig. Je kleiner die Schichtdicke, desto kleinere Downskin-Winkel sind abbildbar.	<ul style="list-style-type: none"> • $\delta_{\text{Alu}} = 45^\circ$ • $\delta_{\text{Stahl}} = 40^\circ$ • $\delta_{\text{Cr-Ni}} = 30^\circ$ • $\delta_{\text{Titan}} = 30^\circ$ [Cruc15, Thom09]
33	Nachbearbeitung	Stützstrukturen		Vermeidung von Stützstrukturen durch Einhalten der selbsttragenden Überhangweite. Oder durch Einhalten des kritischen Tangentenwinkels, z.B. durch gezieltes Gestalten von Übergängen.	

34	Zugänglichkeit		Zugänglichkeit zum Entfernen von Stützstrukturen vorsehen. Das Stützmaterial kann im Bauteil verbleiben, wenn die Bauteilfunktion nicht eingeschränkt wird.
35	Löcher		Überschreiten des kritischen Downskin-Winkels an der Bohrungsdecke führt zu Verzug dieser in Baurichtung. Ausformen des Bohrungsdeckes oder Aufmaß zur mechanischen Nachbearbeitung.
36	Wärmeleitung		Massive Stützstrukturen für verbesserte Wärmeleitung und Bauteilverankerung. Sollbruchstellen für einfaches Entfernen der Stützstrukturen integrieren.
37	Aufmaß		Nachbearbeitungsaufmaß im CAD Modell vorsehen, dieses ist abhängig von der Oberflächenorientierung zur Baurichtung.
38	Upskin		Maßhaltig ohne Nachbearbeitung, leicht uneben +0,3 mm bis +0,7 mm [Thom09]
39	Sidewall		Maßhaltig und ebene Oberfläche planar auf $\pm 0,05\text{mm}$ +0,12 mm [Thom09]
40	Downskin		Absacken der Downskin-Fläche zwischen Stützstellen der Stützstruktur. +0,8 mm [Thom09]
41	Bohrun-		Kreisrunde Bohrungen mit horizontaler Bohrungssache 0,6 mm Untermaß [EOS]
42	Position		Zu bearbeitende Oberflächen möglichst exponieren und in gleiche Ebene legen.

43	Verfahren	Einspannflächen		Einspann- und Positionierungspunkte vorsehen. Positionierungspunkte in Referenzebenen legen. Referenzebenen sollten sich auf einfache Geometrien beziehen um das Einmessen zu erleichtern.
44		Werkzeug		Zugänglichkeit für das Werkzeug sicherstellen; z.B. Platz für Werkzeugauslauf vorsehen
45		Bearbeitungsebenen		Bearbeitungsebenen möglichst normal zueinander anordnen
46		Oberfläche		Oberflächen mit hoher Genauigkeit müssen nachbearbeitet werden. Aufmaß vorsehen.
47		Optimierungsziele	<ul style="list-style-type: none"> • Optimale Bauteilqualität durch angepasste Bauteilplatzierung • Min. Nachbearbeitung • Min. Verzug • Min. Oberflächenrauheit • Min. Stützstrukturen • Belastungsgerechte Orientierung (Anisotropie) 	
48	Orientierung	Rauheit		Prüfen der Oberflächenorientierung. Oberflächenqualität abhängig vom Neigungswinkel [Thom09, VDI3405, Kran15] <ul style="list-style-type: none"> • Horizontal = Rau (Downskin-Fläche) • Vertikal = Weniger rau
49		Abstützung		Vermeidung von Stützstrukturen durch Bauteilorientierung. Beachtung des kritischen Downskin-Winkels als Indikator für Stützstrukturen.

50	Anordnung	Bauhöhe			Die minimale Bauhöhe führt zur Reduzierung der Bauzeit.
51		Beschichter			Kräfte durch den Beschichter auf Bauteile reduzieren. Ausrichtung: Beschichter zugewandte Flächen ca. 30° eingedreht (Rotation um z-Achse).
52		Dünne Wände			Reibkräfte infolge Beschichtung reduzieren. Querschnittsfläche in Beschichtungsrichtung möglichst minimieren. Filigrane Strukturen sollten nicht gegen die Beschichtungsrichtung steigen.
53		Anisotropie			Geringere mechanische Kennwerte in Baurichtung. Bauteilorientierung entsprechend der zu erwartenden Belastungen. Evtl. Wärmebehandlung zur Homogenisierung.
54		Abstand			Geringer Abstand führt zu thermischer Interaktion zw. Bauteilen und erschwert die Entfernung dieser.
55		Versatz			Bauteile versetzt anordnen. Möglichst gleichbleibende Reibkraft während Beschichtung ermöglichen.

$a = 5 \text{ mm}$
[Kran15]

D Mechanische Eigenschaften innerer Strukturen

Abbildung D.2: Konstruktionskatalog der mechanischen Eigenschaften innerer Strukturen (Fein)

Abbildung D.3: Konstruktionskatalog der mechanischen Eigenschaften innerer Strukturen (Mittel)

Abbildung D.4: Konstruktionskatalog der mechanischen Eigenschaften innerer Strukturen (Grob)

Abbildung D.1: Übersicht der Konstruktionskataloge der mechanischen Eigenschaften innerer Strukturen

Gliederungsteil		Zugriffsteil - Feines Parameternetz																						
Gruppe	Art	Hauptteil			Druck (XY)			Zug (XY)			Biegung (XY)			Druck (YZ)			Zug (YZ)			Biegung (YZ)				
		#	Struktur	Bild	rel. Gewicht [%]	Form	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]
Duplizierte Strukturen	Flächig	1	Streben		28	Ecklig	0,003	1,8854	0,6969	0,0039	1,8854	0,6969	0,229	162,56	1139,5	0,517	367,08	653	0,517	367,08	653	0,2727	188,28	1050
		2	Quader		31	Ecklig	0,0081	16,04	0,2835	0,0081	16,04	0,2835	0,0223	44,26	11,9	0,0081	16,04	0,2835	0,0081	16,04	0,2835	0,0223	44,26	11,9
		3	Wabe		28	Ecklig	0,0083	5,84	1,38	0,0083	5,8448	1,3801	0,0338	23,725	9,1551	0,0091	6,1076	1,3416	0,0091	6,1076	1,3416	0,0308	21,662	8,2167
		4	Wabe versteift		65	Ecklig	0,0104	7,2879	0,455	0,0104	7,2879	0,455	0,0161	11,41	1,937	0,0029	1,991	0,2434	0,0029	1,991	0,2434	0,014	9,55	1,898
Selbstähnliche Strukturen	Flächig	5	Fachwerk kfz		19	Ecklig	0,0457	31,872	2,3258	0,0457	31,872	2,3258	0,0459	32,335	11,098	0,0457	31,872	2,3258	0,0457	31,872	2,3258	0,0459	32,335	11,098
		6	Fachwerk krz		42	Ecklig	0,0062	4,27	0,61	0,0062	4,27	0,61	0,023	12,23	4,47	0,0062	4,27	0,61	0,0062	4,27	0,61	0,023	12,23	4,47
		7	Bambus		51	Rund	0,0037	2,245	1,31	0,012	8,89	32,11	0,11	8,425	171,32	0,0037	2,245	1,31	0,012	8,89	32,11	0,11	8,425	171,32
Selbstähnliche Strukturen	Flächig	8	Spinnennetz		20	Ecklig	0,4114	290,19	323,17	0,4114	290,19	323,17	0,1239	85,685	24,944	0,4114	290,19	323,17	0,4114	290,19	323,17	0,1239	85,685	24,944
		9	Schachtelhalm		17	Rund	0,003	2,13	2,43	0,044	31,809	101,28	0,51	36,589	574,87	0,003	2,13	2,43	0,044	31,809	101,28	0,51	36,589	574,87
		10	Polygone		34	Rund	0,0015	1,156	1,156	0,032	22,98	68,5	0,57	36,861	375,59	0,0015	1,156	1,156	0,032	22,98	68,5	0,57	36,861	375,59
		11	Kieselalge		64	Rund	0,0009	0,64	0,58	0,0239	20,14	0,38	0,24	17,51	235,14	0,0009	0,64	0,58	0,0239	20,14	0,38	0,24	17,51	235,14

Abbildung D.2: Konstruktionskatalog der mech. Eigenschaften innerer Strukturen (Fein)

Gliederungsteil		Zugriffsteil - Mittleres Parameterset																													
Gruppe	Art	Hauptteil					Druck (XY)			Zug (XY)			Biegung (XY)			Druck (YZ)			Zug (YZ)			Biegung (YZ)									
		#	Struktur	Bild	rel. Gewicht [%]	Form	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]							
Duplizierte Strukturen	Flächig	1	Streben		20	Ecklig	0,0057	4,0058	1,573	0,0057	4,0058	1,573	0,3374	239,49	1733,1	0,506	359,14	703	0,506	359,14	703	0,506	359,14	703	0,4263	297,7	1599				
		2	Quader		24	Ecklig	0,0162	11,101	1,135	0,0162	11,101	1,135	0,107	76,224	75	0,0173	12,192	0,9408	12,19	0,099	69,99	75,1	0,099	69,99	75,1	0,099	69,99	75,1			
		3	Wabe		31	Ecklig	0,0109	7,7542	2,02	0,0109	7,7542	2,02	0,0249	17,69	10,902	0,0117	8,3073	2,1303	8,3073	0,0243	17,254	11,452	0,0243	17,254	11,452	0,0243	17,254	11,452			
		4	Wabe versteift		61	Ecklig	0,0025	1,7589	0,312	0,0025	1,7589	0,312	0,0111	7,8942	2,1687	0,004	2,3	0,3163	0,004	2,3	0,0129	9,1272	2,314	0,0129	9,1272	2,314	0,0129	9,1272	2,314		
		5	Fachwerk kfz		13	Ecklig	0,106	73,679	5,8331	0,106	73,679	5,8331	0,0545	38,267	18,02	0,106	73,679	5,8331	0,106	73,679	5,8331	0,0545	38,267	18,02	0,0545	38,267	18,02	0,0545	38,267	18,02	
		6	Fachwerk krz		28	Ecklig	0,017	12,024	1,847	0,017	12,024	1,847	0,038	26,96	9,503	0,017	12,024	1,847	0,017	12,024	1,847	0,038	26,96	9,503	0,017	12,024	1,847	0,038	26,96	9,503	
		7	Bambus		45	Rund	0,0037	2,245	1,31	0,012	8,6	32,49	8,484	172,75	0,0037	2,245	1,31	0,012	8,6	32,49	0,11	8,484	172,75	0,0037	2,245	1,31	0,012	8,6	32,49	172,75	
Selbstähnliche Strukturen	Flächig	8	Spinnennetz		18	Ecklig	0,119	55,203	27,626	0,119	55,203	27,626	0,0919	64,989	23,387	0,119	55,203	27,626	0,119	55,203	27,626	0,119	55,203	27,626	0,0919	64,989	23,387	0,0919	64,989	23,387	
		9	Schachtelhalm		18	Rund	0,0028	1,962	2,26	0,044	31,22	100,38	0,56	40,159	622,95	0,0028	1,962	2,26	0,044	31,22	100,38	0,56	40,159	622,95	0,0028	1,962	2,26	0,044	31,22	100,38	622,95
		10	Polygone		27	Rund	0,0019	1,34	1,46	0,046	32,93	86,18	13,5	91,908	477,77	0,0019	1,34	1,46	0,046	32,93	86,18	13,5	91,908	477,77	0,0019	1,34	1,46	0,046	32,93	86,18	477,77
		11	Kieselalge		60	Rund	0,0009	0,65	0,59	0,0267	18,68	0,4136	0,25	17,826	239,79	0,0009	0,65	0,59	0,0267	18,68	0,25	17,826	239,79	0,0009	0,65	0,59	0,0267	18,68	0,25	17,826	239,79

Abbildung D.3: Konstruktionskatalog der mech. Eigenschaften innerer Strukturen (Mittel)

Gliederungsteil		Zugriffsteil - Grobes Parameterset																						
Gruppe	Art	Hauptteil					Druck (XY)			Zug (XY)			Biegung (XY)			Druck (YZ)			Zug (YZ)			Biegung (YZ)		
		#	Struktur	Bild	rel. Gewicht [%]	Form	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]	EVD [%]	VS [Mpa]	GV [µm]
Duplizierte Strukturen	Flächig	1	Streben		12	Ecklig	0,031	22,12	10,6	0,031	22,12	10,6	0,66	473,25	3674	0,47	337,06	840	0,4751	337,06	840	0,724	513,6	3300
		2	Quader		17	Ecklig	0,0395	21,979	2,8767	0,1321	75,58	239,38	0,0395	21,979	2,8767	0,0395	21,979	2,8767	0,0395	21,979	2,8767	0,1321	75,58	239,38
		3	Wabe		28	Ecklig	0,0155	10,978	2,9218	0,0155	10,978	2,9218	0,0336	23,825	14,27	0,0174	12,301	3,0251	0,0174	12,301	3,0251	0,0285	20,249	14,121
		4	Wabe versteift		56	Ecklig	0,0038	2,6567	0,408	0,0038	2,6567	0,408	0,0115	8,0178	2,7006	0,003	2,126	0,3957	0,003	2,126	0,3957	0,0126	8,7953	2,6965
		5	Fachwerk kfz		7	Ecklig	0,398	276,87	31,81	0,3981	276,87	31,81	0,0963	68,04	962,5	0,398	276,87	31,81	0,398	276,87	31,81	0,0963	68,04	962,5
		6	Fachwerk krz		17	Ecklig	0,0543	37,76	2,554	0,0543	37,76	2,554	0,0633	44,19	22,07	0,0543	37,76	2,554	0,0543	37,76	2,554	0,0633	44,19	22,07
		7	Bambus		38	Rund	0,0037	2,245	1,31	0,012	8,85	32,86	0,11	8,446	174,19	0,0037	2,245	1,31	0,012	8,85	32,86	0,11	8,446	174,19
		8	Spinnennetz		17	Ecklig	0,1296	88,113	49,118	0,1296	88,113	49,118	0,0732	49,925	16,62	0,1296	88,113	49,118	0,1296	88,113	49,118	0,0732	49,925	16,62
		9	Schachtelhalm		20	Rund	0,0024	1,68	1,94	0,038	27,51	388,38	0,64	45,608	623,28	0,0024	1,68	1,94	0,038	27,51	388,38	0,64	45,608	623,28
		10	Polygone		21	Rund	0,0025	1,789	1,93	0,065	39,82	111,25	2,728	321,65	1933,3	0,0025	1,789	1,93	0,065	39,82	111,25	2,728	1933,3	1933,3
		11	Kieselalge		59	Rund	0,0009	0,66	0,6	0,021	14,92	0,4	0,239	16,89	235,88	0,0009	0,66	0,6	0,021	14,92	0,4	0,239	16,89	235,88
Selbstähnliche Strukturen																								

Abbildung D.4: Konstruktionskatalog der mech. Eigenschaften innerer Strukturen (Grob)

E Maße einer Tretkurbel nach DIN 345/ ISO 6695

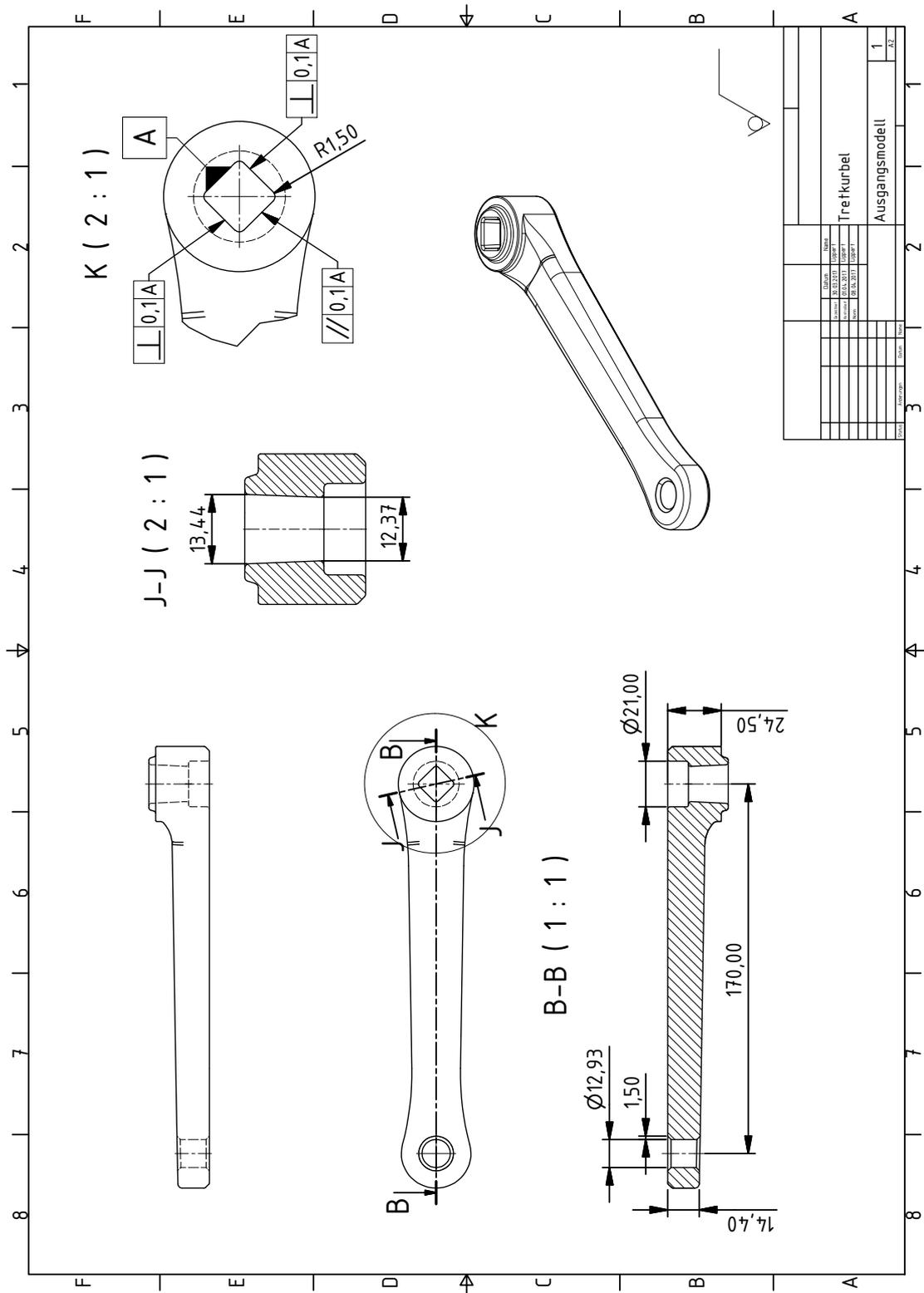


Abbildung E.1: Technische Zeichnung einer Tretkurbel

F Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Zugproben

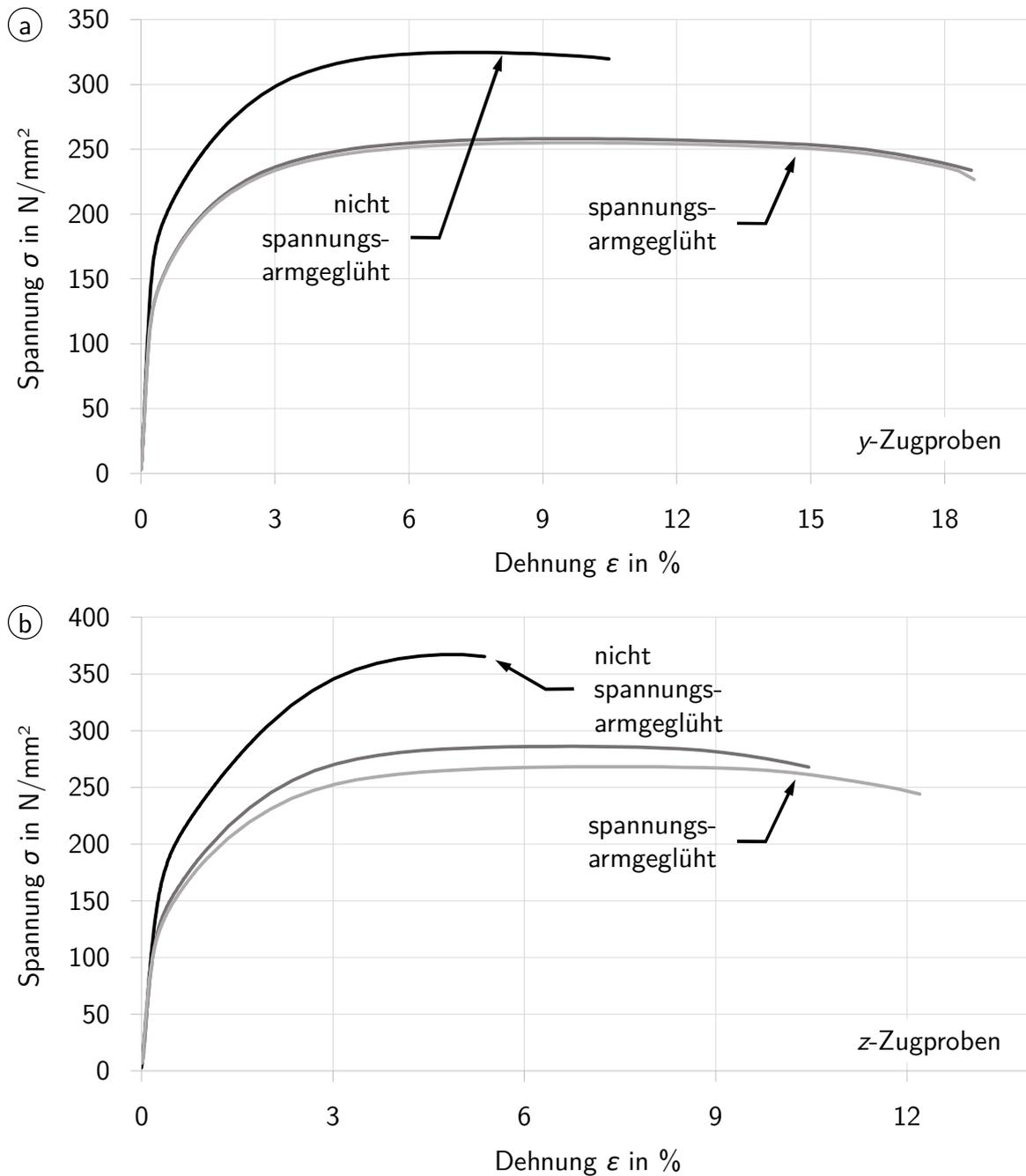


Abbildung F.1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der a) y-Zugproben b) z-Zugproben

G Gemessene und simulierte Biegelinien der Biegeproben

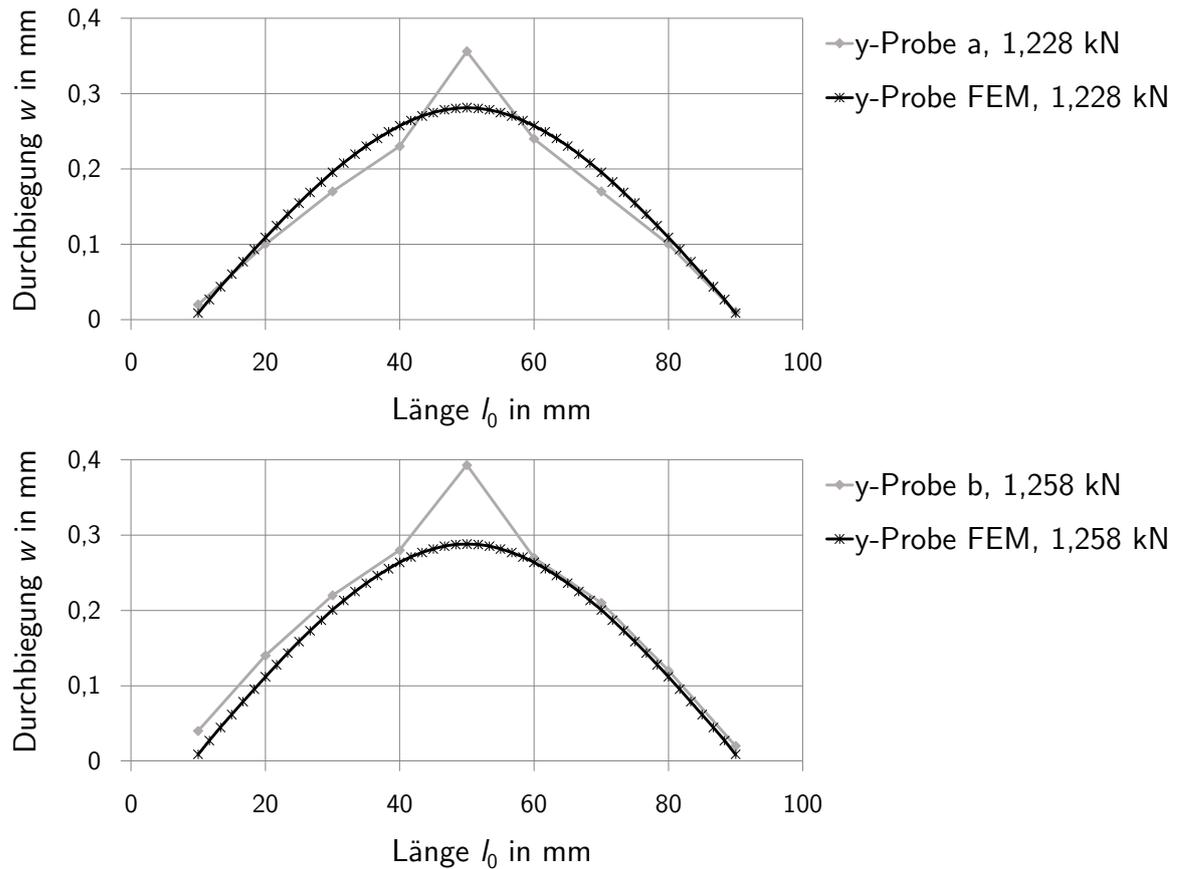


Abbildung G.1: Durchbiegung der virtuellen und physischen y-Biegeproben

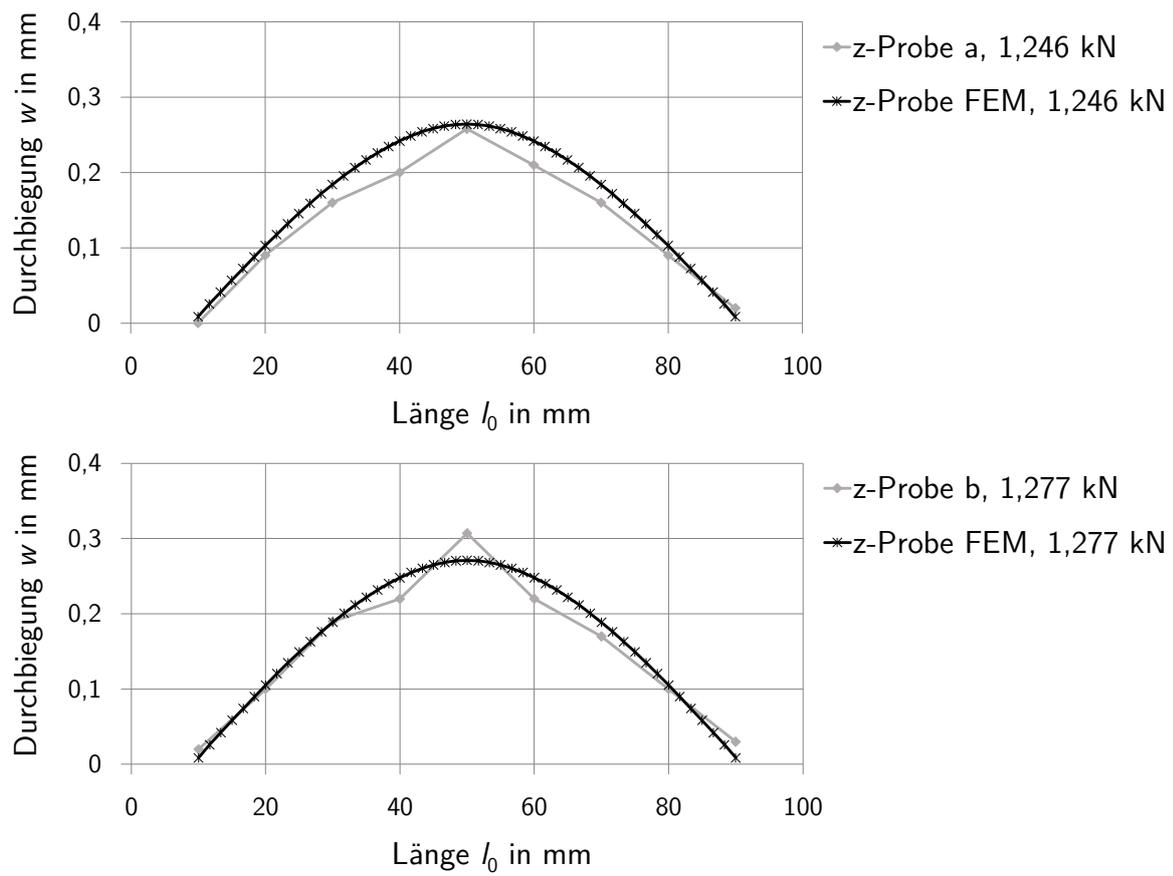


Abbildung G.2: Durchbiegung der virtuellen und physischen z-Biegeproben

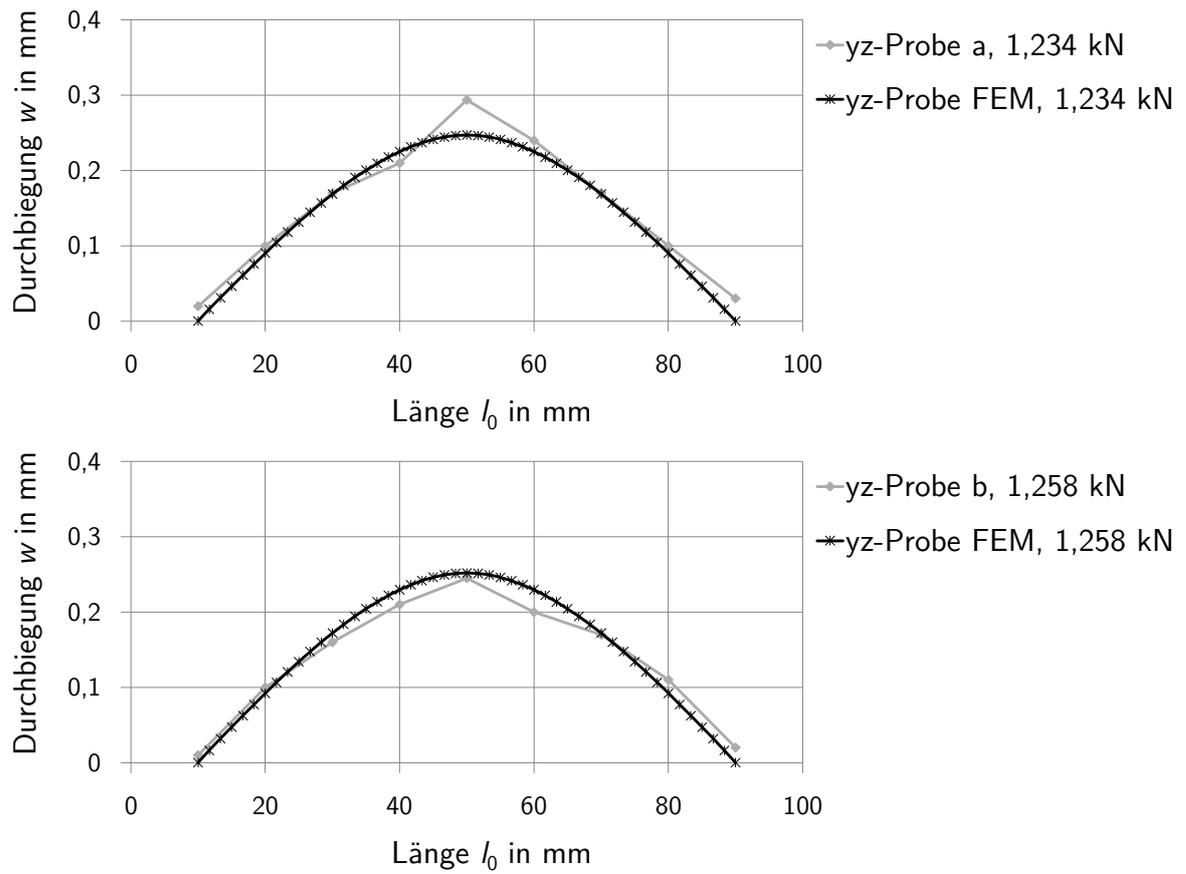


Abbildung G.3: Durchbiegung der virtuellen und physischen yz-Biegeproben

H Gemessene Biegelinien der Tretkurbeln

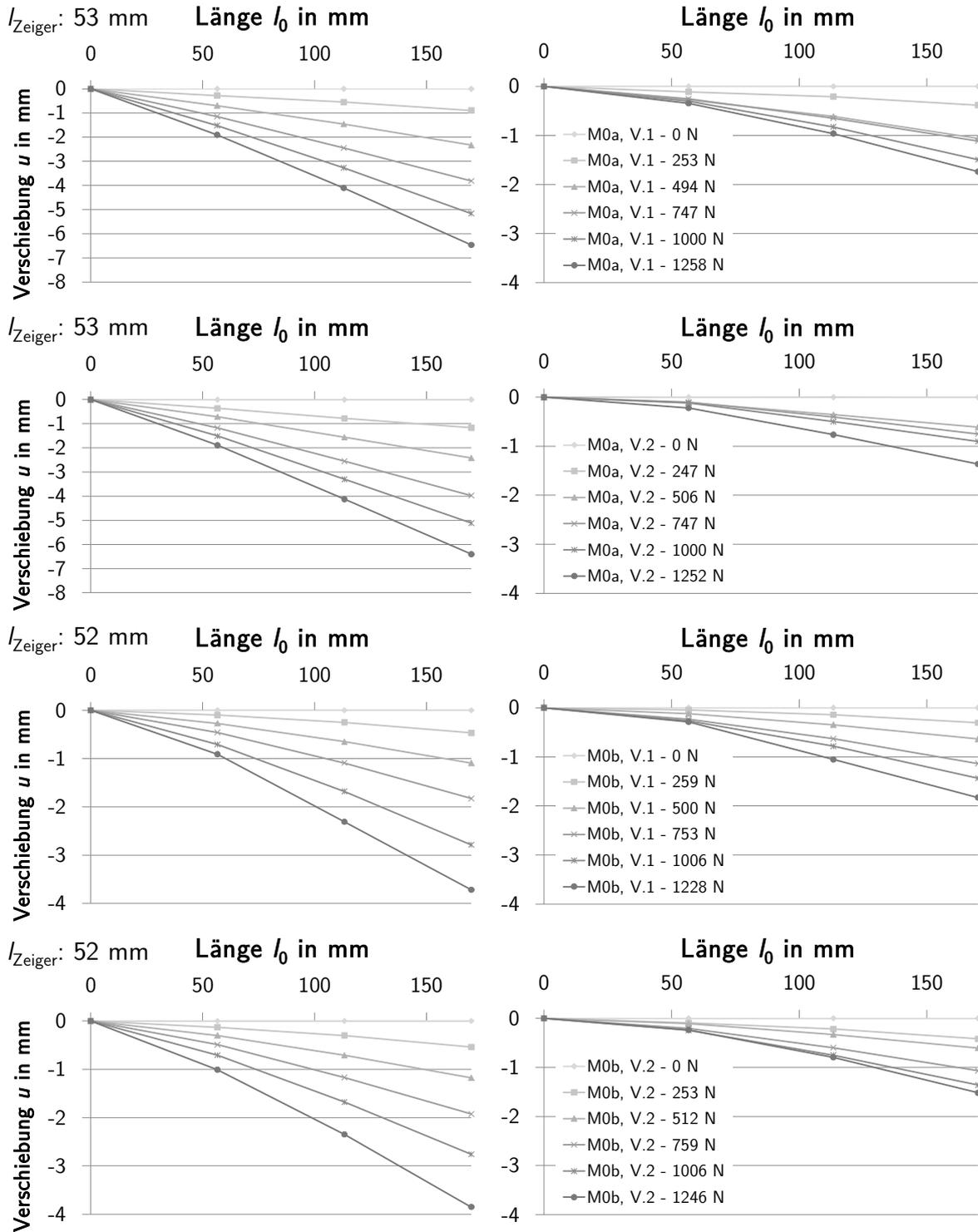


Abbildung H.1: Verschiebung (links) und Durchbiegung (rechts) des Ausgangsmodells

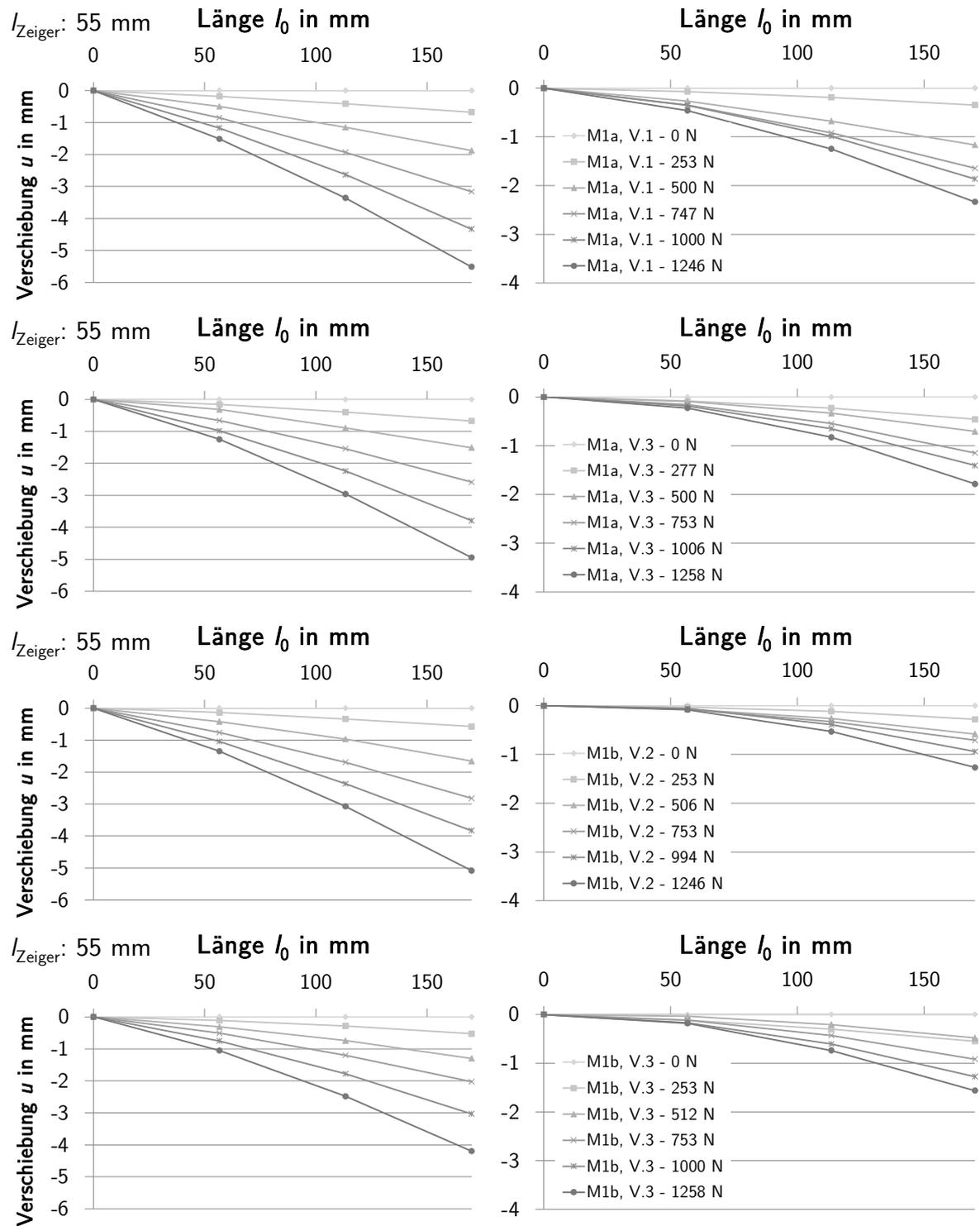


Abbildung H.2: Verschiebung (links) und Durchbiegung (rechts) des Modells im bestehenden Wirkraum

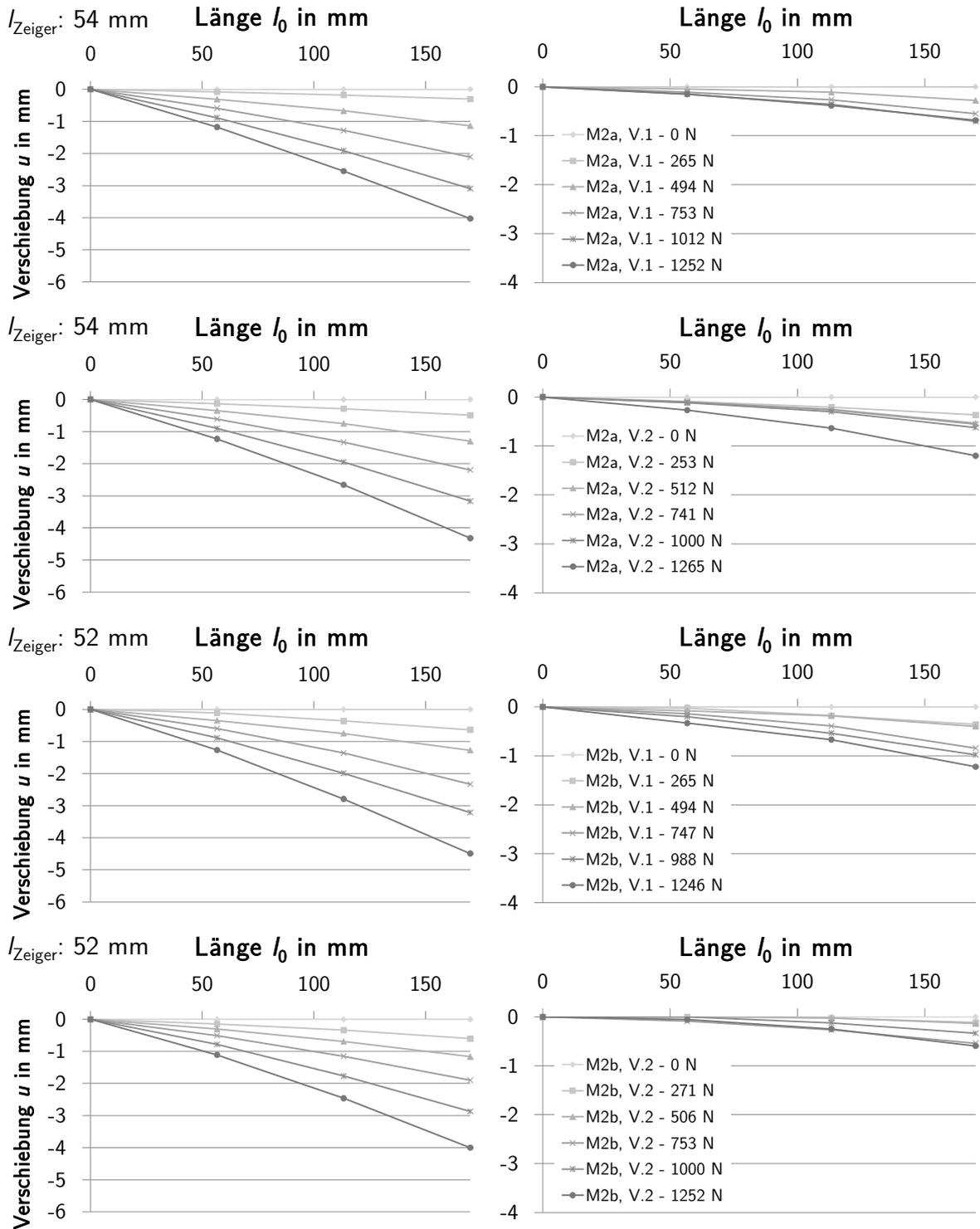


Abbildung H.3: Verschiebung (links) und Durchbiegung (rechts) des Modells im erweiterten Wirkraum

I Gemessene und simulierte Biegelinien der Tretkurbeln

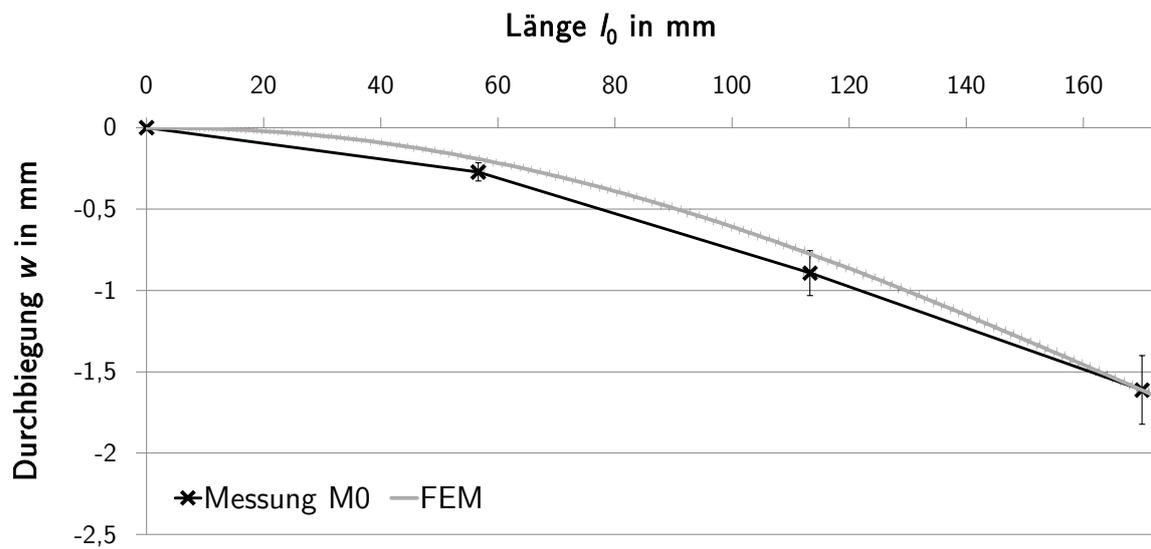


Abbildung I.1: Durchbiegung des virtuellen und physischen Ausgangsmodells

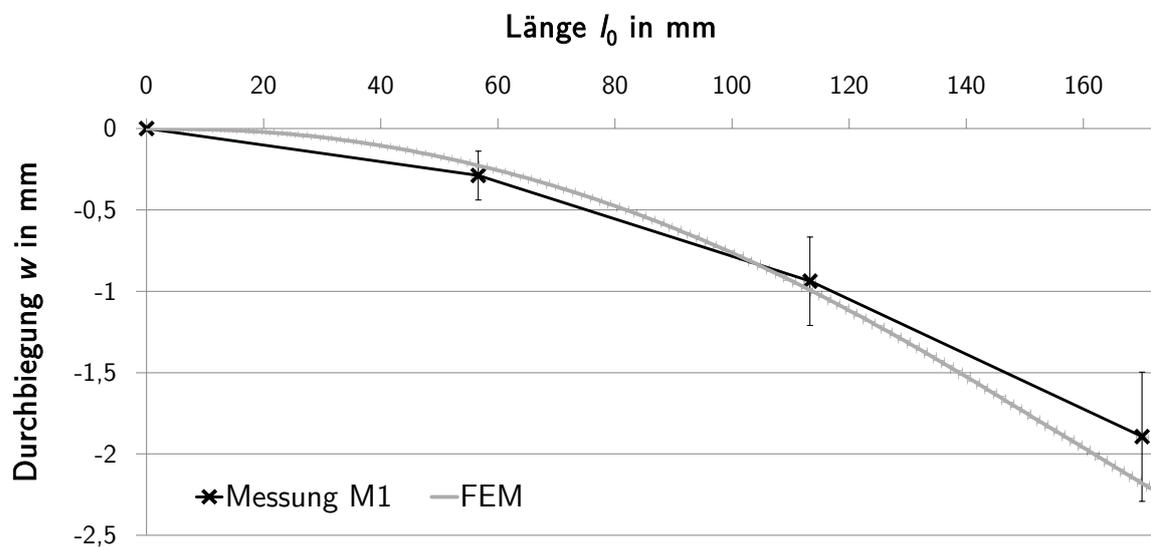


Abbildung I.2: Durchbiegung des virtuellen und physischen Modells im bestehenden Wirkraum

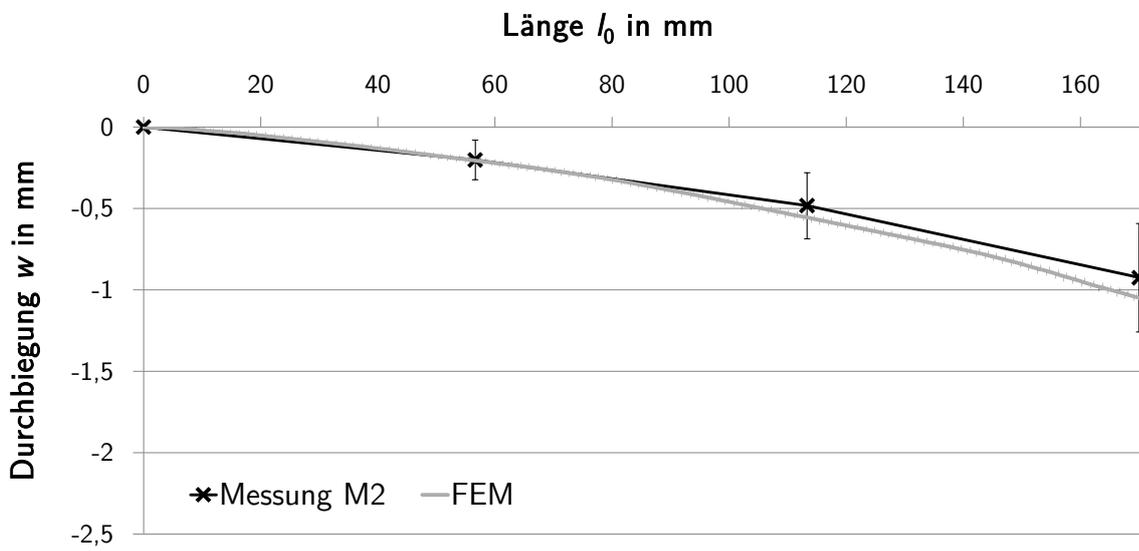


Abbildung I.3: Durchbiegung des virtuellen und physischen Modells im erweiterten Wirkraum

J Lebenslauf

Persönliche Daten	
Name	René Bastian Lippert
Geburtsdatum	03. Februar 1988
Geburtsort	Gießen
Schulbildung	
Bis 2007	Friedrich Feld Schule Gießen Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
Ersatzdienst	
2007 – 2008	Zivildienst: Assistent der kieferorthopädischen Abteilung im Universitätsklinikum Gießen und Marburg
Studium	
2008 – 2011	Fachhochschule Frankfurt am Main Studiengang: Material und Produktentwicklung Abschluss: Bachelor of Engineering, B.Eng. (Note: 1.4)
2011 – 2013	Fachhochschule Aachen Studiengang: Produktentwicklung Abschluss: Master of Engineering, M.Eng. (Note: 1.1)
Berufliche Tätigkeiten	
2011 – 2011	invenio Engineering Solutions, Rüsselsheim Bachelorand
2013 – 2013	KHS GmbH, Kleve Masterand
2014 – 2018	Leibniz Universität Hannover Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Berufliche Zusatzqualifikationen	
In 2014	Ehrenplakette der Fachhochschule Aachen
In 2016	Integrated Product Development International Summer School (ipdISS) 2016, Magdeburg und Malta