

Jan Holoch

Eine Topologieoptimierungsmethode zur Synthese additiv gefertigter, steifigkeits-optimierter Produktdesigns am Beispiel des SLM – Selektives Laserschmelzen

A topology optimization method for the synthesis of additively manufactured, stiffness-optimized product designs exemplified by SLM – Selective Laser Melting

Band 178

Systeme ▪ Methoden ▪ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Jan Holoch

Eine Topologieoptimierungsmethode zur Synthese additiv gefertigter, steifigkeitsoptimierter Produktdesigns am Beispiel des SLM – Selektives Laserschmelzen

A topology optimization method for the synthesis of additively manufactured, stiffness-optimized product designs exemplified by SLM – Selective Laser Melting

Band 178

Herausgeber Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2024
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
 Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

Eine Topologieoptimierungsmethode zur Synthese additiv gefertigter, steifigkeitsoptimierter Produktde- signs am Beispiel des SLM – Selektives Laser- schmelzen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

Jan Holoch, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 13.11.2024
Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer

Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplett Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 178

Die globalen Herausforderungen bezogen auf die Erderwärmung, aber auch die zunehmende Ressourcenknappheit und die Forderung nach Nachhaltigkeit sind wichtige Impulse der Produktentwicklung des 21. Jahrhunderts. Die Reduzierung der Treibhausgase kann nur gelingen, wenn der Verbrauch von fossilen Energieträgern drastisch eingeschränkt wird. Gleichzeitig ist bei dieser Einschränkung zu beachten, dass eine Substitution unbedingt erfolgen muss, da global gesehen die positive Entwicklung der Lebensbedingungen der Weltbevölkerung auch an dem Vorhandensein entsprechender Energie gebunden ist und dieser Bedarf künftig steigen wird. Eine Forderung nach lokaler Emissionsfreiheit, zum Beispiel auf der Ebene eines Staates wie Deutschland, hat allein gesehen nur einen symbolischen Charakter und kann nur einen relativ geringen Beitrag leisten. Gleichzeitig führt aber diese strategische Ausrichtung dazu, dass in der Produktentwicklung sowie in der Technologie und Forschung neue Lösungen erarbeiten werden können, die dann auch global nutzbar sind. Trotz aller Bemühungen wird es sicherlich in den nächsten 30 Jahren nicht gelingen, die fossilen Energieträger gänzlich zu ersetzen. Umso wichtiger ist es, auch sekundäre Effekte zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes zu heben. Ein wichtiges Feld ist in diesem Bereich der Leichtbau. Insbesondere bei allen Maschinen, die ihre Funktionen durch Bewegung erzeugen – und das ist die typische Lösung im Bereich des Maschinen- und Fahrzeugbaus – kann durch eine Reduzierung der bewegten Massen eine beträchtliche Energieeinsparung in den Bewegungsprozessen erreicht werden. Gleichzeitig kann eine geschickt realisierte Leichtbaustrategie auch dazu beitragen, Ressourcen im Sinne von Materialien zu sparen. Bedingung ist dabei, dass der verwendete Fertigungsprozess als Ganzes betrachtet, ebenfalls bezogen auf den CO₂-Fußabdruck, optimiert ist. Hier sind noch viele Forschungsarbeiten zu leisten. Leichtbau kann in unterschiedlicher Art und Weise durchgeführt werden. Die Karlsruher Schule für Produktentwicklung – KaSPro unterscheidet hier nach Systemleichtbau, Form- bzw. Gestalteichtbau und Stoffleichtbau. Insbesondere der Systemleichtbau wird in Zukunft sicher an Bedeutung gewinnen. Ein Beispiel ist hier die Einführung einer virtuellen Crashzone in autonomen Fahrzeugen, die durch entsprechende Automatisierung so gesteuert und geregelt werden kann, dass im Falle eines Unfalls die Zusammenstöße weitestgehend vermieden werden oder die Aufprallenergie reduziert wird. Systemleichtbau meint dann, dass entsprechend die Karosseriestrukturen, dieser Situation angepasst, leichter dimensioniert werden können. Diese Ansätze sind noch ganz in den Anfängen. Die klassischen Leichtbaudisziplinen Struktur und Stoff bzw. Gestalt sind daher von entsprechend hoher Bedeutung.

Im Rahmen seiner Arbeit hat Herr Dr.-Ing. Jan Holoch die Leichtbaupotentiale eines neuen, modernen Fertigungsverfahrens der additiven Fertigung, nämlich dem selektiven Laserschmelzen, für die Nutzung im Gestaltungsprozess untersucht. Er hat durch seine Forschung eine neue Topologieoptimierungsmethode entwickelt, die die Potentiale dieses

Fertigungsverfahrens im Gestaltungsprozess von Bauteilen ausnutzt und dadurch neuartige Leichtbaudesigns ermöglicht. Die Arbeit leistet dabei einen wichtigen wissenschaftlichen Beitrag zur Weiterentwicklung digitaler Methoden zur Gestaltfindung in der Produktentwicklung und gibt gleichzeitig auch Impulse für die Praxis in den Unternehmen.

November, 2024

Albert Albers

Kurzfassung

Leichtbau ist eine Schlüsseltechnologie auf dem Weg zur Klimaneutralität. Um die Potentiale des Leichtbaus zu heben, ist es jedoch erforderlich, dass dieser über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts hinweg integriert wird. Dies beginnt bereits in der Produktentstehung bei der Gestaltung. Dabei gilt es, Produkte zu entwickeln, die eine möglichst effektive Materialausnutzung aufweisen. Im Sinne des Leichtbaus bedeutet dies, dass Material ausschließlich an den Stellen im Produkt eingesetzt wird, an denen es für die Funktionserfüllung unabdingbar ist.

Ein unterstützendes Werkzeug für den Produktentwickler bei der Entwicklung derartiger Produkte stellen die rechnergestützten Optimierungsverfahren dar. Die anhand dieser Optimierungsverfahren abgeleiteten, lastpfadoptimierten Designvorschläge lassen sich allerdings häufig aufgrund deren organischen Strukturen nur bedingt in konventionellen Fertigungsverfahren erzeugen. Abhilfe dafür kann die additive Fertigung schaffen, beispielsweise in Form des Selektiven Laserschmelzens (SLM). Das SLM besitzt aufgrund des diskontinuierlichen, schichtweisen Vorgehens bei der Fertigung eine hohe Gestaltungsfreiheit, wodurch komplexe Strukturen erzeugt werden können. Gleichzeitig sorgt dieses Vorgehen für lokal variierende Materialeigenschaften abhängig von der Produktgestalt, weshalb eine direkte Wechselwirkung zwischen Produkt (Gestalt) und Produktionssystem (SLM) besteht. Diese Wechselwirkung gilt es, bei der Gestaltung zu berücksichtigen, um eine möglichst effektive Materialausnutzung zu erzielen. Um den Produktentwickler respektive das Entwicklungsteam bei der Gestaltungsynthese zu unterstützen, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Optimierungsmethode entwickelt, die die fertigungsbedingten Materialeigenschaften in einer Topologieoptimierung integriert.

Zur Entwicklung dieser Optimierungsmethode wird zunächst eine Systemanalyse durchgeführt, um ein verbessertes Systemverständnis aufzubauen und die im SLM entstehenden Materialeigenschaften zu untersuchen. Aus dieser Systemanalyse geht hervor, dass sich drei Bereiche unterschiedlicher Porosität und somit mechanischer Materialeigenschaften abhängig von der Produktgestalt sowie der Aufbaurichtung bei der Fertigung einstellen. Diese drei Bereiche inklusive deren Materialeigenschaften werden in der entwickelten Topologieoptimierungsmethode iterativ berücksichtigt. Dazu werden in jeder Iteration der Topologieoptimierung die drei Materialbereiche automatisiert auf Basis des aktuellen Zwischenergebnisses abgebildet und der nächsten Iteration bereitgestellt. Aus den damit abgeleiteten Ergebnissen ergibt sich, dass die entwickelte Topologieoptimierungsmethode im Vergleich zu einer standardisierten Topologieoptimierung deutlich variierende Designvorschläge erzeugt, die das verfügbare Material effektiver ausnutzen. Somit stellt die entwickelte Topologieoptimierungsmethode ein unterstützendes Werkzeug für den Produktentwickler dar, besonders in der Gestaltung in frühen Phasen der Produktentstehung.

Abstract

Lightweight design is a key technology towards carbon neutrality. However, in order to leverage the potential of lightweight design, it is necessary to integrate lightweight design throughout the entire life cycle of a product. This already begins in the product development process with the design phase. The aim is to develop products that maximise the effective material utilisation. In terms of lightweight design, a product should therefore only contain material in those areas where it is indispensable for the fulfilment of the product's function.

Computer-aided optimization methods are a supportive tool for the product developer when designing such products. However, the load-compliant design proposals derived on the basis of such optimization methods often can only be generated to a limited extent in conventional manufacturing processes due to their organic structures. Additive manufacturing like Selective Laser Melting (SLM) offers a remedy to this limitation. SLM has a high degree of design freedom due to the discontinuous, layer-by-layer manufacturing process, which allows complex structures to be generated. At the same time, this process results in locally varying material properties depending on the product shape. Therefore, a direct interrelation between product (design) and production (SLM) occurs. This interrelation should be considered during the design phase in order to utilise the material as effectively as possible. In order to support the product developer respectively the development team in the design synthesis, this thesis presents an optimization method to integrate the manufacturing-related material properties in a topology optimization.

The first step to develop this optimization method consists of a system analysis in order to improve the understanding of the system and to investigate the material properties that arise in SLM. This system analysis shows three areas of different porosity and thus mechanical material properties depending on the design of the product and the building direction during manufacturing. These three areas, including their material properties, are considered iteratively in the developed topology optimization method. For this purpose, in each iteration of the topology optimization, the three material areas are mapped automatically on the basis of the current intermediate result and passed on to the next iteration. Based on the results derived this way, in comparison to a standardized topology optimization, the developed topology optimization method generates significantly varying design proposals that utilise the available material in a more effective way. Thus, the developed topology optimization method represents a supportive tool for the product developer, especially in the design phase in the early stages of the product development process.

Danksagung

Die vorliegende Forschungsarbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich auf meinem Weg begleiteten und unterstützten.

Meinen besonderen Dank möchte ich meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für die wissenschaftliche Betreuung dieser Forschungsarbeit sowie die Verantwortung und das Vertrauen, das er mir entgegengebracht hat, aussprechen. Während der Zusammenarbeit, in der er mich nicht nur forderte und förderte, sondern auch entscheidend prägte, hatte er durch fruchtbare Diskussionen und wertvolle Anregungen einen großen Einfluss auf die erzielten Forschungsergebnisse dieser Forschungsarbeit. Das von ihm geschaffene Umfeld am IPEK – Institut für Produktentwicklung hat mein Denken und Handeln maßgeblich beeinflusst und somit einen großen Beitrag zum Erfolg dieser Forschungsarbeit geleistet. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats und die anregenden Gespräche sowie Impulse zur Fertigstellung der Forschungsarbeit bedanken.

Mein Dank gilt auch allen Mitarbeitenden des IPEK – Institut für Produktentwicklung, sowohl im wissenschaftlichen als auch im administrativen Bereich. Insbesondere möchte ich mich bei meinen Kollegen in der Forschungsgruppe CAE/Optimierung für die vielen wissenschaftlichen Diskussionen und Impulse bedanken. Die produktive und freundliche Arbeitsatmosphäre war eine wesentliche Grundlage für meine Forschungsarbeit. Darüber hinaus danke ich den Kollegen des Instituts für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde für die gemeinschaftliche Zusammenarbeit und die gegenseitige Unterstützung im Forschungsprojekt „SLM-Topo“, ohne die diese Forschungsarbeit nicht möglich gewesen wäre. Auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft gilt mein Dank für die erhaltene Förderung. Ich danke auch allen meinen wissenschaftlichen Hilfskräften sowie den Bachelor- und Masterstudierenden für ihre Beiträge. Sie waren eine große Unterstützung bei meiner Forschungsarbeit.

Mein größter Dank geht an meine Familie, die mich zu dem gemacht hat, was ich heute bin. Ich kann meinen Eltern nicht genug für ihre Unterstützung und Ermutigung über all die Jahre beginnend mit meinem Studium am KIT danken. Einen großen Dank möchte ich auch meiner Partnerin Jeannette aussprechen, die mich in allen Phasen dieser Arbeit unermüdlich unterstützt hat und einen großen Beitrag zur Qualität dieser Forschungsarbeit geleistet hat. Ebenso möchte ich mich bei all meinen Freunden für die schönen Momente bedanken, die wir gemeinsam verbracht haben und die für wichtige Pausen während der stressigen Zeit gesorgt haben.

“An investment in knowledge always pays the best interest.”
Benjamin Franklin, 1706-1790

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis.....	xii
Tabellenverzeichnis.....	xix
Abkürzungsverzeichnis.....	xxi
Symbolverzeichnis	xxiii
1 Einleitung	1
1.1 Fokus der Arbeit.....	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen und Stand der Forschung.....	7
2.1 Produktentstehungsprozess	7
2.1.1 iPeM – Integriertes Produktentstehungsmodell.....	7
2.1.2 Beschreibungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung	13
2.1.3 Contact, Channel und Connector Ansatz.....	14
2.2 Leichtbau im Kontext der Produktentstehung	17
2.2.1 Systemleichtbau	18
2.2.2 Formleichtbau.....	21
2.2.3 Stoffleichtbau.....	22
2.3 Additive Fertigung	24
2.3.1 Grundlagen der additiven Fertigung.....	24
2.3.2 Pulverbettbasiertes Fertigungsverfahren – Selektives Laserschmelzen	28
2.3.3 Additive Fertigung als Werkzeug der Produktentwicklung	32
2.4 Rechnergestützte Analyse und Optimierung.....	34
2.4.1 Numerische Verfahren.....	34
2.4.2 Optimierungsverfahren	41
2.4.3 Strukturoptimierung	47
2.4.4 Kopplung von Simulations- und Optimierungsverfahren	56
2.5 Rechnergestützte Gestaltfindung in der additiven Fertigung.....	58
2.6 Fazit	61
3 Zielsetzung und Forschungsvorgehen	63
3.1 Zielsetzung der Arbeit.....	63
3.2 Forschungsvorgehen und -methoden	66

4 TopOpt-Methode unter Berücksichtigung lokal variierender Materialeigenschaften.....	69
4.1 Systemanalyse	70
4.1.1 Konkretisierung des Forschungsbedarfs	70
4.1.2 Anforderungen an die TopOpt-Methode.....	77
4.2 Entwicklung der TopOpt-Methode.....	81
4.2.1 Modellbildung der drei porenbefestigten Bereiche	81
4.2.2 Workflow der TopOpt-Methode	91
4.3 Verifikation und Validierung	101
4.3.1 Verifikation der entwickelten TopOpt-Methode.....	103
4.3.2 Validierung der entwickelten TopOpt-Methode anhand SLM-gefertigter Designvorschläge	129
4.3.3 Analyse des Einsatzspektrums der entwickelten TopOpt-Methode	159
4.4 Fazit.....	171
5 Zusammenfassung und Ausblick	175
5.1 Zusammenfassung	175
5.2 Ausblick	182
Literaturverzeichnis	I

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Aufbau und Kapitelstruktur der vorliegenden Arbeit.....	4
Abbildung 2.1:	Graphische Darstellung des iPeM – Integriertes Produktentstehungsmodell nach Albers, Reiss, Bursac & Richter (2016).....	9
Abbildung 2.2:	Übersicht der Problemlösungsmethode SPALTEN nach Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh (2016)	11
Abbildung 2.3:	Der C&C ² -Ansatz – Modellelemente und Grundhypthesen nach Matthiesen et al. (2018)	15
Abbildung 2.4:	Anwendungsbeispiel des C&C ² -Ansatzes anhand einer Schnellbauschraube nach Matthiesen et al. (2018)	16
Abbildung 2.5:	Schematische Darstellung der Anwendung von Leichtbau im Kontext der Produktentwicklung nach Albers, Holoch, Revfi & Spadinger (2021)	17
Abbildung 2.6:	Ablaufdiagramm des Erweiterten Target Weighing Ansatzes nach Albers, Revfi & Spadinger (2020)	20
Abbildung 2.7:	Beispiele für konstruktive Versteifungen: Sicken, Rippen und Sandwich-Struktur nach Klein (2013).....	21
Abbildung 2.8:	Exemplarisches Ashby-Diagramm zur Werkstoffauswahl anhand der Materialkenngrößen E-Modul und Dichte nach Weißbach, Dahms & Jaroschek (2018)	23
Abbildung 2.9:	Zusammenhang zwischen Fertigungskosten und Bauteilkomplexität der additiven Fertigung nach Lippert (2018) und Merkt, Hinke, Schleifenbaum & Voswinckel (2012)	25
Abbildung 2.10:	Abgrenzung der additiven Fertigung zur subtraktiven und formativen Fertigung nach Lang et al. (2019)	26
Abbildung 2.11:	Exemplarische Darstellung notwendiger Stützstrukturen zur Sicherstellung der Fertigbarkeit nach Jiang, Xu & Stringer (2018).....	27
Abbildung 2.12:	Datenvorbereitung beim SLM: Exemplarische Darstellung des Slicing des 3D-Modells inklusive Bewegungsbahnen des Lasers nach Nisja, Cao & Gao (2021).....	28
Abbildung 2.13:	Schematische Darstellung der SLM-Anlage inklusive dem in Fertigung befindlichen Bauteil nach Lange (2021)	29

Abbildung 2.14:	Drei-Achsen-Modell zur Ableitung unterschiedlicher Fertigungsstrategien nach Conner et al. (2014)	33
Abbildung 2.15:	Diskretisierung eines Haltewinkels nach Okereke & Keates (2018): CAD-Geometrie (links) sowie diskretisierte Geometrie inklusive Knoten und Elemente (rechts).....	35
Abbildung 2.16:	Ansatzfunktion und Elementtyp mit dazugehöriger Knotenanzahl nach Spiess, Oeckerath & Landvogt (2018)	37
Abbildung 2.17:	Level-Set-Darstellung eines sich ausbreitenden Rands nach Gibou et al. (2018).....	39
Abbildung 2.18:	Weighted Element Mapping: Darstellung der Funktionsweise anhand zweier FE-Netze nach Revfi (2022)	40
Abbildung 2.19:	Darstellung der drei Teilbereiche der Strukturoptimierung nach Rieg, Hackenschmidt & Alber-Laukant (2019)	48
Abbildung 2.20:	Graphische Darstellung eines Topologieoptimierungsproblems nach Ibhadode, Zhang, Rahnama, Bonakdar & Toyserkani (2020)	50
Abbildung 2.21:	Beispielhaftes Ergebnis des Optimierungsproblems aus Abbildung 2.20 nach Ibhadode et al. (2020).....	52
Abbildung 2.22:	Parametrische (links) und parameterfreie (rechts) Formoptimierung nach Troll (2015)	54
Abbildung 2.23:	Generische Darstellung des Kopplungsmodells nach Albers, Reichert et al. (2017).....	57
Abbildung 3.1:	Forschungsvorgehen der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an die DRM nach Blessing & Chakrabarti (2009)	67
Abbildung 4.1:	Demonstrator zur Untersuchung der im SLM entstehenden Defekte und deren Verteilung im Bauteil	71
Abbildung 4.2:	Ausschnitt der aus μ CT-Aufnahmen rekonstruierten Mikrostruktur des Demonstrators: Defektfreie Bereiche (helle Regionen) und entstehende Poren (dunkle Regionen)	73
Abbildung 4.3:	Schematische Darstellung der drei porenbehafteten Bereiche entlang der Aufbaurichtung (links) und μ CT- Aufnahme zur Visualisierung der Porositätsverteilung in einer konsolidierten Schicht (rechts) nach Holoch, Lenhardt, Revfi & Albers (2022)	74

Abbildung 4.4:	Analyse der drei porenbehafteten Bereiche mithilfe des C&C ² -Ansatzes	75
Abbildung 4.5:	Demonstrator aus Abbildung 4.1 (links) und 2D-Repräsentation einer konsolidierten Schicht der Schnittebene (rechts).....	82
Abbildung 4.6:	Beispielhafte Unterteilung der abgeleiteten 2D-Bauteilkontur aus Abbildung 4.5 in die drei porenbehafteten Bereiche anhand eines geringen Offsets (links) und großen Offsets (rechts)	83
Abbildung 4.7:	Beispielhafte Darstellung der Auswirkung des Informationsverlusts beim Slicing auf den Aufbau einer Geometrie aus 2D-Repräsentationen: Ursprüngliche Geometrie (links) und inkorrekt aufgebaute Geometrie (rechts).....	85
Abbildung 4.8:	Oberfläche des Demonstrators aus Abbildung 4.1 im STL-Format: Gesamter Demonstrator (links) und Schnittansicht (rechts)	86
Abbildung 4.9:	Offset 1 (links) und Offset 2 (rechts) zur Bestimmung der drei porenbehafteten Bereiche.....	87
Abbildung 4.10:	Schnittdarstellung der Oberflächennetze des Demonstrators und der Offsets (links) sowie der daraus abgeleiteten drei porenbehafteten Bereiche ohne Filterung (rechts)	88
Abbildung 4.11:	Beispielhafte Darstellung der drei porenbehafteten Bereiche inklusive TE-Netz in allen Raumrichtungen vor der Filterung (links) und entlang der Aufbaurichtung nach der Filterung (rechts)	89
Abbildung 4.12:	Aufgrund der Filterung entlang der Aufbaurichtung entstehenden drei porenbehaftete Bereiche: Gesamter Demonstrator (links) und Schnittansicht (rechts)	90
Abbildung 4.13:	Kopplungsmodell der TopOpt-Methode zur Ableitung initialer Designvorschläge für steifigkeitsoptimierte, SLM-gefertigte Bauteile.....	92
Abbildung 4.14:	Exemplarische Darstellung (Schnitt entlang der x-y-Ebene) des initialen FE-Netzes zur Durchführung einer Topologieoptimierung	95
Abbildung 4.15:	Aus Tosca abgeleitetes Zwischenergebnis (Schnitt entlang der x-y-Ebene) einer Topologieoptimierung ohne Glättung.....	97

Abbildung 4.16:	Aus Tosca abgeleitetes Zwischenergebnis (Schnitt entlang der x-y-Ebene) einer Topologieoptimierung mit Glättung	98
Abbildung 4.17:	Exemplarische Darstellung der drei porenbehafteten Bereiche inklusive deren Materialeigenschaften des Zwischenergebnisses (Schnitt entlang der x-y-Ebene).....	98
Abbildung 4.18:	Mapping der drei porenbehafteten Bereiche inklusive deren Materialeigenschaften des Zwischenergebnisses (Schnitt entlang der x-y-Ebene) aus Abbildung 4.17 auf das initiale FE-Netz.....	99
Abbildung 4.19:	Modellaufbau zur Untersuchung der 2D-Optimierungen ohne Filterung entlang der Aufbaurichtung nach Holoch, Lenhardt & Albers (2022a)	104
Abbildung 4.20:	Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 1.1	108
Abbildung 4.21:	Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 1.1	108
Abbildung 4.22:	Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 1.1	109
Abbildung 4.23:	Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 1.1	110
Abbildung 4.24:	Konvergenzverläufe für Optimierungsfall 1.1.....	111
Abbildung 4.25:	Resultierende Designvorschläge inklusive Verteilung der fiktiven Dichten für Optimierungsfall 1.1: Entwickelte TopOpt-Methode (oben) und standardisierte Topologieoptimierung (unten)	112
Abbildung 4.26:	Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 1.2	115
Abbildung 4.27:	Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 1.2	115
Abbildung 4.28:	Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 1.3	117

Abbildung 4.29:	Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive der drei porenbefestigten Bereiche für Optimierungsfall 1.3.....	117
Abbildung 4.30:	Modellaufbau zur Untersuchung der 3D-Optimierungen ohne Filterung entlang der Aufbaurichtung nach Holoch et al. (2021)	120
Abbildung 4.31:	Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 2.1: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)	122
Abbildung 4.32:	Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 2.1: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts).....	122
Abbildung 4.33:	Resultierende Designvorschläge (Schnittdarstellung) inklusive der drei porenbefestigten Bereiche für Optimierungsfall 2.1: Entwickelte TopOpt-Methode (links) und standardisierte Topologieoptimierung (rechts)	123
Abbildung 4.34:	Konvergenzverläufe für Optimierungsfall 2.1	125
Abbildung 4.35:	Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive fiktiver DichteVerteilung für Optimierungsfall 2.1: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)	125
Abbildung 4.36:	Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive fiktiver DichteVerteilung für Optimierungsfall 2.1: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)	126
Abbildung 4.37:	Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 2.2: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)	127
Abbildung 4.38:	Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 2.2: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts).....	127
Abbildung 4.39:	Projektionen der minimalen Grauwerte senkrecht zur Aufbaurichtung für die Quader aus Tabelle 4.13 nach Czink et al. (2023)	133
Abbildung 4.40:	PorenVerteilung über die horizontale Dicke des Quaders mit einem Überhangwinkel von 75° aus Tabelle 4.13 nach Czink et al. (2023)	134

Abbildung 4.41: Bereichsdicken für die Quader aus Tabelle 4.13 nach Czink et al. (2023): Oberseite (links) und Unterseite (rechts)	135
Abbildung 4.42: Elastische Konstanten C_{11} und C_{44} der drei porenbehafteten Bereiche für die Quader aus Tabelle 4.13 nach Czink et al. (2023)	137
Abbildung 4.43: Modellaufbau zur Untersuchung von 3D-Optimierungen mit Filterung entlang der Aufbaurichtung nach Czink et al. (2023).....	140
Abbildung 4.44: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.1: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)	142
Abbildung 4.45: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 3.1: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)	142
Abbildung 4.46: Konvergenzverläufe für Optimierungsfall 3.1.....	144
Abbildung 4.47: Schnitt durch den resultierenden Designvorschlag inklusive der drei porenbehafteten Bereiche aus der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.1 nach Holoch et al. (2022).....	145
Abbildung 4.48: SLM-gefertigter Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.1 nach Czink et al. (2023).....	146
Abbildung 4.49: μ CT-Aufnahme durch den resultierenden Designvorschlag aus der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.1 nach Czink et al. (2023).....	146
Abbildung 4.50: Spannungsverteilung im resultierenden Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.1.....	148
Abbildung 4.51: Spannungsverteilung im resultierenden Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 3.1	148
Abbildung 4.52: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.2: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)	150
Abbildung 4.53: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 3.2: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)	150
Abbildung 4.54: Schnitt durch den resultierenden Designvorschlag aus der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.2.....	152

Abbildung 4.55:	SLM-gefertigter Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.2 nach Czink et al. (2023)	152
Abbildung 4.56:	μ CT-Aufnahme durch den resultierenden Designvorschlag aus der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.2 nach Czink et al. (2023)	153
Abbildung 4.57:	Spannungsverteilung im resultierenden Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.2	154
Abbildung 4.58:	Spannungsverteilung im resultierenden Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 3.2.....	155
Abbildung 4.59:	Konvergenzverläufe für Optimierungsfall 3.2	156
Abbildung 4.60:	Porenverteilung über die horizontale Dicke der exemplarischen Regionen aus Abbildung 4.49 und Abbildung 4.56 nach Czink et al. (2023)	157
Abbildung 4.61:	Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive der drei porenbefestigten Bereiche für Optimierungsfall 4.1	162
Abbildung 4.62:	Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive der drei porenbefestigten Bereiche für Optimierungsfall 4.1	162
Abbildung 4.63:	Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive vorherrschender Spannung für Optimierungsfall 4.1 nach Holoch et al. (2022b)	164
Abbildung 4.64:	Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive vorherrschender Spannung für Optimierungsfall 4.1 nach Holoch et al. (2022b)	164
Abbildung 4.65:	Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive der drei porenbefestigten Bereiche für Optimierungsfall 4.2.....	165
Abbildung 4.66:	Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive der drei porenbefestigten Bereiche für Optimierungsfall 4.2.....	165
Abbildung 4.67:	Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive vorherrschender Spannung für Optimierungsfall 4.2 nach Holoch et al. (2022b)	167
Abbildung 4.68:	Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive vorherrschender Spannung für Optimierungsfall 4.2 nach Holoch et al. (2022b)	167

Abbildung 4.69: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 4.3	168
Abbildung 4.70: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 4.3	168
Abbildung 4.71: Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive vorherrschender Spannung für Optimierungsfall 4.3 nach Holoch et al. (2022b).....	169
Abbildung 4.72: Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive vorherrschender Spannung für Optimierungsfall 4.3 nach Holoch et al. (2022b)	170

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Enthaltene Geometrieelemente im Demonstrator und deren Größen zur Analyse der entstehenden Defekte im SLM	72
Tabelle 4.2:	Prozessparameter zur Fertigung des Demonstrators im SLM.....	73
Tabelle 4.3:	Materialeigenschaften und Bereichsdicken für Optimierungsfall 1.1	105
Tabelle 4.4:	Quantitative Auswertung der prozentual vorliegenden Anteile der drei porenbehafteten Bereiche in den abgeleiteten Designvorschlägen für Optimierungsfall 1.1	109
Tabelle 4.5:	Quantitative Auswertung der resultierenden Verzerrungsenergie aus der statischen FE-Analyse der abgeleiteten Designvorschläge für Optimierungsfall 1.1	110
Tabelle 4.6:	Optimierungsfälle 1.2 und 1.3 für den zweidimensionalen 3-Punkt-Biegebalken unter Variation der Materialeigenschaften und Bereichsdicken.....	114
Tabelle 4.7:	Quantitative Auswertung von Optimierungsfall 1.2	116
Tabelle 4.8:	Quantitative Auswertung von Optimierungsfall 1.3	118
Tabelle 4.9:	Optimierungsfälle 2.1 und 2.2 für den dreidimensionalen 3-Punkt-Biegebalken ohne Filterung entlang der Aufbaurichtung	121
Tabelle 4.10:	Quantitative Auswertung der prozentual vorliegenden Anteile der drei porenbehafteten Bereiche in den abgeleiteten Designvorschlägen für den Optimierungsfall 2.1	123
Tabelle 4.11:	Quantitative Auswertung der resultierenden Verzerrungsenergie aus der statischen FE-Analyse der abgeleiteten Designvorschläge für Optimierungsfall 2.1	124
Tabelle 4.12:	Quantitative Auswertung von Optimierungsfall 2.2	128
Tabelle 4.13:	Probenumfang zur Validierung der entwickelten TopOpt-Methode nach Czink et al. (2023)	132
Tabelle 4.14:	Aus den elastischen Konstanten C_{11} und C_{44} berechnete Ingenieurskonstanten der drei porenbehafteten Bereiche für die Quader aus Tabelle 4.13	139

Tabelle 4.15:	Materialeigenschaften und Bereichsdicken für die dreidimensionalen Optimierungsfälle inklusive Filterung entlang der Aufbaurichtung nach Czink et al. (2023).....	140
Tabelle 4.16:	Quantitative Auswertung der prozentual vorliegenden Anteile der drei porenbehafteten Bereiche in den abgeleiteten Designvorschlägen für Optimierungsfall 3.1.....	143
Tabelle 4.17:	Quantitative Auswertung der resultierenden Verzerrungsenergie aus der statischen FE-Analyse der abgeleiteten Designvorschläge für Optimierungsfall 3.1.....	144
Tabelle 4.18:	Quantitative Auswertung der prozentual vorliegenden Anteile der drei porenbehafteten Bereiche in den abgeleiteten Designvorschlägen für Optimierungsfall 3.2.....	151
Tabelle 4.19:	Quantitative Auswertung der resultierenden Verzerrungsenergie aus der statischen FE-Analyse der abgeleiteten Designvorschläge für Optimierungsfall 3.2.....	153
Tabelle 4.20:	Abmessungen und Verschiebungen der drei Optimierungsfälle zur Analyse des Einsatzspektrums der entwickelten TopOpt-Methode nach Holoch et al. (2022b).....	161
Tabelle 4.21:	Quantitative Auswertung von Optimierungsfall 4.1	163
Tabelle 4.22:	Quantitative Auswertung von Optimierungsfall 4.2	166
Tabelle 4.23:	Quantitative Auswertung von Optimierungsfall 4.3	169

Abkürzungsverzeichnis

ASME	American Society of Mechanical Engineering
AV	Ausprägungsvariation
C	Connector
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
C&C ²	Contact, Channel und Connector
DfAM	Design for Additive Manufacturing
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DRM	Design Research Methodology
DS	Deskriptive Studie
ELSE	Elastic Strain Energy
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
GV	Gestaltvariation
IAM-WK	Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde
IC	Informationscheck
IPEK	Institut für Produktentwicklung
iPem	Integriertes Produktentstehungsmodell
KaSPro	Karlsruher Schule für Produktentwicklung
KIS	Kontinuierlicher Ideenspeicher
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LSS	Leitstützstruktur
MMA	Method of Moving Asymptotes
PGE	Produktgenerationsentwicklung

PLT	Problemlösungsteam
PLTA	Angepasstes Problemlösungsteam
PPCD	Produkt-Produktion-CoDesign
PS	Präskriptive Studie
PV	Prinzipvariation
RUS	Resonante Ultraschallspektroskopie
SCAI	Fraunhofer Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen
SDF	Signed-Distance-Function
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
SLM	Selektives Laserschmelzen
TE	Tetraederelement
TopOpt-Methode	Topologieoptimierungsmethode
TWA	Target Weighing Ansatz
ÜV	Übernahmevereinfachung
WF	Wirkfläche
WFP	Wirkflächenpaar
µCT	Mikro-Computertomographie

Symbolverzeichnis

a	Minimaler Abstand
C_{11}, C_{44}	Elastische Konstanten
d	Definierte Verschiebung
E	E-Modul
E^0	Initialer E-Modul
$E_{Schraffur}$	E-Modul des Schraffurbereichs
$f(\mathbf{x})$	Zielfunktion
$g_j(\mathbf{x})$	Ungleichheitsrestriktion
$h_k(\mathbf{x})$	Gleichheitsrestriktion
i	Finites Element
K	Globaler Gesamtsteifigkeitstensor
$L(\mathbf{x}, \lambda)$	Lagrange-Funktion
n	Anzahl an Iterationen
p	Straffaktor
\mathbf{P}	Gesamtkraftvektor
\mathbf{r}	Ortsvektor eines Punkts
\mathbf{r}_c	Ortsvektor des randnächsten Punkts
$R_{p0,2}$	Dehgrenze
\mathbf{s}	Vektor der Suchrichtung zur Ermittlung eines Optimums
\mathbf{U}	Globaler Verschiebungsvektor
V	Volumen
V_{res}	Endvolumen
\mathbf{x}	Designvariablen
\mathbf{x}^0	Startdesign
x_i^0	Obere Grenze der zulässigen Werte der Designvariablen

x_i^u	Untere Grenze der zulässigen Werte der Designvariablen
α	Schrittweite
λ_j, λ_k	Lagrange-Multiplikatoren
μ_j	Schlupfvariablen
ν	Querkontraktionszahl
ϱ	Fiktive Dichte
ϱ_0	Fiktive Referenzdichte
ϱ_A	Angepasste fiktive Dichte
ϕ	Signed-Distance-Function
Ψ	Rand einer Kurve (2D) oder Oberfläche (3D)
Ω	Designraum
Ω^{mat}	Materialverteilung

1 Einleitung

Zur Darstellung des Ressourcenverbrauchs der Menschheit wird jährlich der Erdüberlastungstag von der Organisation Global Footprint Network¹ berechnet. Ab diesem Tag sind die nachhaltig nutzbaren Ressourcen, welche die Erde innerhalb eines Jahres zur Verfügung stellen kann, bereits aufgebraucht (Global Footprint Network, 2023a). Zu diesen Ressourcen zählen neben nachwachsenden Rohstoffen wie Holz auch die ausstoßbaren Emissionen wie beispielsweise CO₂, die von der Erde aufgenommen werden können. Dieser Erdüberlastungstag verschiebt sich seit über fünf Jahrzehnten stetig auf ein früheres Datum und ist 2023 bereits am 2. August erreicht (Global Footprint Network, 2023c). Wenn ausschließlich der Ressourcenverbrauch von Deutschland betrachtet werden würde, d. h. alle Länder den gleichen pro Kopf Verbrauch wie Deutschland aufweisen würden, wäre die Erde bereits ab dem 4. Mai überlastet (Global Footprint Network, 2023b).

Um dieser Überlastung der Erde und dem damit verbundenen Klimawandel entgegenzuwirken, nimmt Deutschland mit dem 2019 vom Bundestag verabschiedeten Bundes-Klimaschutzgesetz eine Vorreiterrolle ein. In diesem Gesetz wird eine Reduzierung des Emissionsausstoßes um 65 % bis 2030 sowie eine klimaneutrale Wirtschaft und Gesellschaft ab 2045 in Deutschland vereinbart (Deutscher Bundestag, 2019). Damit diese vereinbarten Ziele erreicht werden können, benötigt es neben dem Ausbau erneuerbarer Energien weitere innovative Ideen und Technologien.

Eine solche Technologie, die als ein Schlüssel zur Klimaneutralität bezeichnet wird, stellt der Leichtbau dar (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2023). Dies lässt sich auf die gezielte Gewichtsreduktion und dem damit einhergehenden verringerten Verbrauch von Ressourcen sowie Ausstoß von Emissionen während der Fertigung und Nutzungsphase zurückführen (Friedrich, 2017). So können beispielsweise bei einem Airbus-A320 jährlich 10.000 Liter Kerosin pro 100 Kilogramm reduziertem Gewicht eingespart werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2023). Um derartige Gewichtsreduktionen allerdings zu ermöglichen, ist die alleinige Änderung des Werkstoffs bei der Fertigung nicht ausreichend (Gundolf Kopp, Burkardt & Majic, 2020). Vielmehr ist eine effektive Materialausnutzung durch eine situationsspezifische Auswahl von Werkstoff und Fertigungsverfahren sowie eine lastpfadoptimierte Produktgestalt notwendig. Infolgedessen kann Leichtbau nur dann effektiv betrieben werden, wenn die Wechselwirkungen zwischen Gestalt, Fertigung und Werkstoff konsequent für den gesamten Lebenszyklus eines Produkts

¹ <https://www.footprintnetwork.org> (abgerufen am 05.07.2023)

bereits im Produktentstehungsprozess integriert werden. Erst dadurch wird das volle Leichtbaupotential von Produkten erzielt und eine effektive Ressourceneinsparung erreicht. (Albers, Holoch, Revfi & Spadinger, 2021)

Eine derartige konsequente Berücksichtigung der Wechselwirkungen über den gesamten Produktentstehungsprozess hinweg stellt den Produktentwickler² vor eine komplexe Herausforderung, weshalb unterstützende Werkzeuge notwendig sind (Albers et al., 2021). Als solche unterstützenden Werkzeuge haben sich in den letzten Jahrzehnten u. a. die rechnergestützten Simulations- und Optimierungsverfahren etabliert. Diese ermöglichen dem Produktentwickler, bereits vor der Fertigung erster Prototypen beispielsweise das mechanische oder thermische Verhalten von Produkten zu untersuchen. Dadurch lassen sich Optimierungspotentiale frühzeitig erkennen und etwaige zeit-, kosten- und ressourcenintensive Überarbeitungen von Produkten in späteren Entwicklungsphasen reduzieren. Mithilfe der rechnergestützten Optimierungsverfahren ist es zudem möglich, lastpfadoptimierte Designvorschläge für Produkte abzuleiten, die Material ausschließlich an jenen Stellen im Produkt vorsehen, an denen es für die Funktionserfüllung zwingend notwendig ist. (Albers, Majic, Schmid & Serf, 2020)

1.1 Fokus der Arbeit

Sowohl die Vorhersage des Produktverhaltens als auch die Ableitung von Designvorschlägen ist im Sinne des Leichtbaus nur dann zielführend, wenn auch die entsprechenden Wechselwirkungen zum eingesetzten Werkstoff und Fertigungsverfahren berücksichtigt werden (Kärger, 2019). Dies gilt vor allem für Fertigungsverfahren, bei denen sich die im Produkt einstellenden Materialeigenschaften erst während der Fertigung abhängig von der Produktgestalt ergeben. Eine solche Gruppe an Fertigungsverfahren, die gleichzeitig aufgrund ihrer hohen Gestaltungsfreiheit im Leichtbau stetig relevanter wird, ist die additive Fertigung (Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, 2023). Dabei wird ein Produkt diskontinuierlich in einem schichtweisen Vorgehen ohne den Einsatz weiterer Werkzeuge (z. B. Gussform) erzeugt (Despesse & Ford, 2015; Lachmayer, Ehlers & Lippert, 2022). Dadurch ergibt sich einerseits die genannte hohe Gestaltungsfreiheit (Gebhardt, 2016). Andererseits entsteht jedoch auch die Abhängigkeit der sich einstellenden Materialeigenschaften von der zu fertigenden Produktgestalt (Leuten-ecker-Twelsiek, Klahn & Meboldt, 2016). Folglich gilt es, diese Abhängigkeit bei der

² Die Bezeichnung *Produktentwickler* schließt gleichermaßen die Produktentwicklerin mit ein. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zur besseren Lesbarkeit jedoch nur das generische Maskulinum verwendet.

Ableitung von Designvorschlägen zur Gestaltfindung von Produkten zu berücksichtigen, um eine möglichst effektive Materialausnutzung sicherzustellen und somit Ressourcen einzusparen. Da diese Berücksichtigung jedoch nicht intuitiv ist, leistet hierfür die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Unterstützung des Produktentwicklers respektive des Entwicklungsteams bei der Gestaltfindung. Dazu wird eine Optimierungsmethode entwickelt, welche die fertigungsbedingten Materialeigenschaften der additiven Fertigung in einer Topologieoptimierung zur Ableitung lastpfadoptimierter Designvorschläge iterativ integriert. Als additives Fertigungsverfahren wird dabei das Selektive Laserschmelzen (SLM) herangezogen, das auf der Verarbeitung von Metallpulver basiert.

Als Fundament für die Entwicklung der Optimierungsmethode dienen die Elemente der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung. Darüber hinaus baut die Optimierungsmethode auf den zahlreichen Vorarbeiten am IPEK – Institut für Produktentwicklung im Kontext der rechnergestützten Simulations- und Optimierungsverfahren auf. Dazu zählen vor allem jene Vorarbeiten im Kontext der Topologieoptimierung wie beispielsweise der Forschungsarbeit von Sander (2014) oder den Untersuchungen von Spadinger & Albers (2019).

Folglich leistet die vorliegende Arbeit einen weiteren Baustein für die kontinuierliche Weiterentwicklung und Ergänzung der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung sowie der zielgerichteten Unterstützung des Produktentwicklers bei der Gestaltfindung.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist aus fünf Kapiteln aufgebaut (siehe Abbildung 1.1). Nachfolgend wird auf jedes der fünf Kapitel Bezug genommen und die darin beschriebenen Inhalte kurz zusammengefasst.

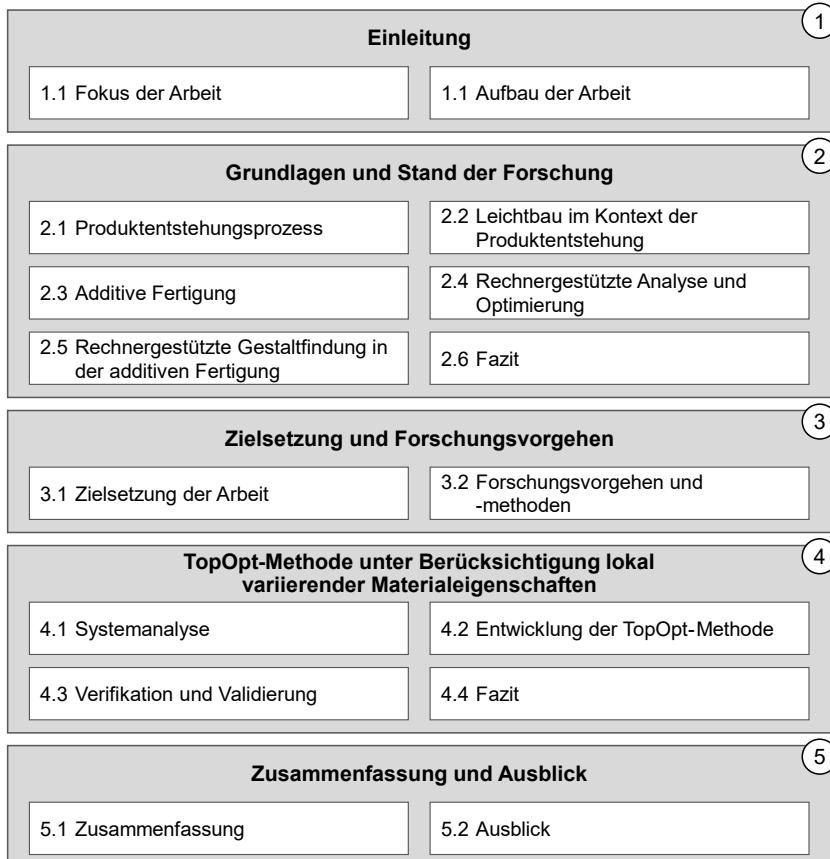


Abbildung 1.1: Aufbau und Kapitelstruktur der vorliegenden Arbeit

Im Anschluss an die in diesem Kapitel 1 gegebene Einleitung werden in Kapitel 2 die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit notwendigen Grundlagen sowie der relevante Stand der Forschung aufbereitet. Dazu werden zunächst die Methoden und Modelle der KaSPro – Karlsruher Schule der Produktentwicklung vorgestellt (siehe Kapitel 2.1), die als Grundlage für einen erfolgreichen Produktentstehungsprozess dienen. Darauf aufbauend erfolgt eine Beschreibung der im Kontext der Produktentstehung relevanten Ansätze und Strategien des Leichtbaus (siehe Kapitel 2.2). Anschließend werden die additiven Fertigungsverfahren mit Fokus auf

das SLM eingeführt und ein Überblick hinsichtlich der Nutzung additiver Fertigungsverfahren im Produktentstehungsprozess gegeben (siehe Kapitel 2.3). Des Weiteren werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Basis verwendeten rechnergestützten Simulations- und Optimierungsverfahren sowie Ansätze zu deren Kopplung präsentiert (siehe Kapitel 2.4). Abgeschlossen wird Kapitel 2 mit einer Aufbereitung der rechnergestützten Gestaltfindung in der additiven Fertigung (siehe Kapitel 2.5) und einem Fazit (siehe Kapitel 2.6).

In Kapitel 3 werden auf Basis der Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung die Zielsetzung abgeleitet und das Forschungsvorgehen beschrieben. Dazu wird zunächst die Forschungslücke hergeleitet, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit geschlossen werden soll. Daraus wird anschließend die leitende Forschungshypothese motiviert und anhand von vier Forschungsfragen operationalisiert (siehe Kapitel 3.1). Danach erfolgt sowohl die Vorstellung des Forschungsvorgehens zur wissenschaftlichen Untersuchung der Forschungsfragen als auch die dabei eingesetzten Forschungsmethoden (siehe Kapitel 3.2).

Die Entwicklung der Optimierungsmethode zur iterativen Berücksichtigung fertigungsbedingter Materialeigenschaften aus dem SLM in einer Topologieoptimierung zur Ableitung lastpfadoptimierter Designvorschläge erfolgt in Kapitel 4. Hierfür wird zunächst eine Systemanalyse (siehe Kapitel 4.1) durchgeführt, um den Forschungsbedarf der vorliegenden Arbeit zu konkretisieren, ein verbessertes Systemverständnis aufzubauen und Anforderungen an die zu entwickelnde Optimierungsmethode abzuleiten. Darauf aufbauend werden die notwendigen Teilmethoden zum Aufbau des Workflows der Optimierungsmethode entwickelt (siehe Kapitel 4.2). Diese Teilmethoden werden anschließend daran validiert und der Workflow verifiziert (siehe Kapitel 4.3). Abgeschlossen wird Kapitel 4 mit einem Fazit (siehe Kapitel 4.4).

Zuletzt werden in Kapitel 5 die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und darauffolgend ein Ausblick hinsichtlich weiterführender, an diese Arbeit anknüpfender Forschungsaktivitäten gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der rechnergestützten Optimierung von additiv gefertigten Leichtbaustrukturen. Daher werden nachfolgend die für das Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen und der Stand der Forschung zusammengefasst. Zunächst wird auf den Produktentstehungsprozess (siehe Kapitel 2.1) eingegangen. Darauf aufbauend wird der Leichtbau im Kontext der Produktentstehung (siehe Kapitel 2.2) beschrieben und die für diese Arbeit relevante additive Fertigung (siehe Kapitel 2.3) vorgestellt. Anschließend erfolgt ein Überblick über die rechnergestützte Analyse und Optimierung (siehe Kapitel 2.4) sowie deren Einsatz im Kontext der additiven Fertigung (siehe Kapitel 2.5). Abschließend wird ein Fazit (siehe Kapitel 2.6) gegeben und damit auf die Zielsetzung sowie das Forschungsvorgehen der Arbeit (siehe Kapitel 3) übergeleitet.

2.1 Produktentstehungsprozess

Mit zunehmender Ressourcenverknappung und den damit einhergehenden steigenden Kosten wird eine effiziente Nutzung der verfügbaren Ressourcen immer wichtiger. Ein Großteil des Ressourcenverbrauchs von Produkten über deren Lebenszyklus wird im Produktentstehungsprozess festgelegt (Gerhard Kopp, Wiedemann & Seeliger, 2019). Es ist daher von entscheidender Bedeutung, Leichtbaubestrebungen zur Reduktion des Ressourceneinsatzes durchgängig über alle Phasen der Produktentstehung hinweg zu betrachten. Erst dadurch kann das volle Potential der Leichtbaubestrebungen genutzt und möglichst viele Ressourcen eingespart werden. (Albers et al., 2021)

Um die in dieser Arbeit entwickelte (Leichtbau-) Methode im Produktentstehungsprozess einordnen zu können, werden nachfolgend die Methoden und Modelle der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung beschrieben. Dazu gehören das iPeM – Integriertes Produktentstehungsmodell (siehe Kapitel 2.1.1), das Beschreibungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung (siehe Kapitel 2.1.2) sowie der Contact, Channel und Connector (C&C²) Ansatz (siehe Kapitel 2.1.3).

2.1.1 iPeM – Integriertes Produktentstehungsmodell

Unternehmen zielen darauf ab, erfolgreich zu sein und eine Gewinnmaximierung zu erreichen (Albers, Braun, Heimicke & Richter, 2020). Um jedoch wirtschaftlich erfolgreich zu sein, reicht die reine Erfahrung, die Invention, eines neuen Produkts

nicht aus. Vielmehr benötigt es eine Innovation, welche die Einführung des Produkts am Markt und dessen Akzeptanz beim Kunden beschreibt. (Schumpeter, 1912) Damit eine derartige Innovation erreicht werden kann, umfasst der Prozess der Produktentstehung nicht nur die Tätigkeiten der Produktentwicklung, sondern auch solche zur Produktionssystementwicklung sowie Produktion und Vermarktung. Dabei beinhaltet die Produktentwicklung die notwendigen Tätigkeiten, um aus einer initialen Idee ein marktfähiges Produkt abzuleiten. Diese Tätigkeiten umfassen neben der Entwicklung, auch die Konstruktion und Validierung. (Albers, Braun et al., 2020)

Nach Albers (2010) ist jeder Produktentstehungsprozess einzigartig und individuell. Um dieser Einzigartigkeit sowie Individualität gerecht zu werden und den Produktentstehungsprozess strukturieren sowie gestalten zu können, wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene Beschreibungsmodelle entwickelt wie beispielsweise die VDI-Richtlinie 2221 (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1), das V-Modell (VDI-Richtlinie 2206) oder der Stage-Gate-Prozess (Cooper, 1990). Für einen tiefergehenden Einblick in die genannten sowie weitere Beschreibungsmodelell wird an dieser Stelle exemplarisch auf das Werk von Wynn & Clarkson (2018) verwiesen.

Zumeist sind die Beschreibungsmodelle zweckgebunden, bedingt reaktiv und haben einen spezifischen Blickwinkel (Management vs. Produktentwickler) auf den Prozess. Des Weiteren erfüllen sie häufig nicht die Anforderungen, die hohe Dynamik heutiger Produktentstehungsprozesse zu bedienen und der hohe Grad an Vernetzung zwischen den Prozesselementen wird nur vereinfacht abgebildet. (Albers, Braun et al., 2020) Aus diesem Grund wurde am IPEK – Institut für Produktentwicklung das iPeM entwickelt und kontinuierlich erweitert (Albers & Meboldt, 2007; Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016). Das iPeM basiert auf fünf zentralen Hypothesen nach Albers (2010), die anhand von Erfahrungswissen im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aufgestellt wurden (Albers, Braun et al., 2020). Beim iPeM handelt es sich um ein Metamodell, das es zulässt, problemorientierte und spezifische Modelle für individuelle Produktentstehungsprozesse abzuleiten (Albers & Meboldt, 2007). Durch den damit verfolgten integrativen Ansatz schließt das iPeM die Lücke zwischen Management und Produktentwickler (Albers, Braun et al., 2020). Eine grafische Darstellung des iPeM ist in Abbildung 2.1 zu sehen.

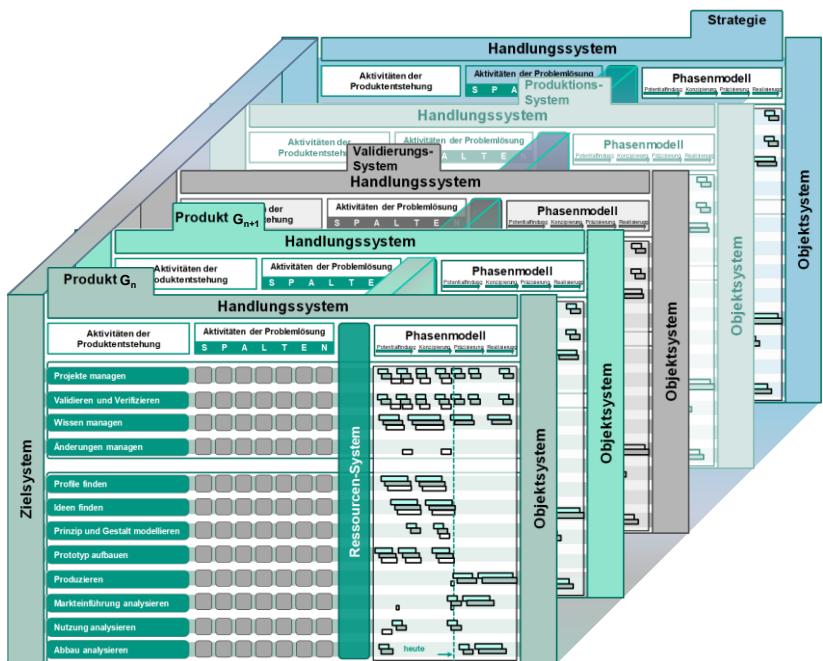


Abbildung 2.1: Graphische Darstellung des iPeM – Integriertes Produktentstehungsmodell nach Albers, Reiss, Bursac & Richter (2016)

Das iPeM ist aus elementaren Bestandteilen aufgebaut, die nachfolgend vorgestellt werden.

Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem – ZHO-Modell

Ein solcher Bestandteil ist das **ZHO-Modell**. Dieses ist auf die Systemtheorie nach Ropohl (1975) zurückzuführen und besteht aus den Elementen **Ziel-**, **Handlungs-** und **Objektsystem**, die im iPeM durch die vertikalen und horizontalen Säulen in Abbildung 2.1 repräsentiert werden. Die Produktentstehung lässt sich als Überführung des Zielsystems in das Objektsystem mithilfe des Handlungssystems beschreiben (Albers, Braun et al., 2020). Das Zielsystem beinhaltet alle relevanten Ziele des zu entwickelnden Produkts, deren Abhängigkeiten sowie Randbedingungen, jedoch nicht die Lösung selbst. Über den gesamten Produktentstehungsprozess wird das Zielsystem permanent erweitert und konkretisiert. Eine korrekte, konsistente und vollständige Definition des Zielsystems ist die Grundlage der erfolgreichen Produktentwicklung. Das Objektsystem beschreibt die realisierte Lösung des Zielsystems

und ist erfüllt, sobald der geplante Soll-Zustand des Zielsystems dem Ist-Zustand des Objektsystems entspricht. (Albers & Meboldt, 2007) Um diesen Zustand zu erreichen, sind das Ziel- und Objektsystem über das sozio-technische Handlungssystem miteinander verbunden (Albers, Braun et al., 2020). Dieses Handlungssystem enthält die strukturierenden Aktivitäten, Methoden und Prozesse sowie die für die Entwicklung benötigten Ressourcen (Albers & Meboldt, 2007). Die Ressourcen sind wiederum im Ressourcensystem zusammengefasst und beinhalten beispielsweise Arbeitsmittel, Kapital und Mitarbeiter. Die strukturierenden Aktivitäten werden in der Aktivitätenmatrix zusammengefasst und setzen sich aus den *Aktivitäten der Produktentstehung* sowie den *Aktivitäten der Problemlösung* zusammen. (Albers, Braun et al., 2020)

Aktivitäten der Produktentstehung

Die Aktivitäten der Produktentstehung orientieren sich an den Phasen eines Produktlebenszyklus. Dabei besteht kein logischer oder zeitlicher Zusammenhang zwischen den Aktivitäten, weshalb deren chronologische Abfolge nicht eingehalten werden muss. Vielmehr wird eine Sammlung an Aktivitäten bereitgestellt, die im Laufe des Entstehungsprozesses von Bedeutung sind. Die Aktivitäten können situationsabhängig individuell und iterativ auf das zu entwickelnde Produkt angepasst werden. Die Aktivitäten der Produktentstehung (siehe Abbildung 2.1) lassen sich in zwei Gruppen einteilen: *Basisaktivitäten* und *Aktivitäten der Produktentwicklung*. (Albers, Braun et al., 2020) Die Basisaktivitäten umfassen *Projekte managen, Validieren und Verifizieren, Wissen managen* sowie *Änderungen managen*. Sie werden unterstützend zu den Aktivitäten der Produktentwicklung durchgeführt, die wiederum *Profile finden, Ideen finden, Prinzip und Gestalt modellieren, Prototyp aufbauen, Produzieren, Markteinführung analysieren, Nutzung analysieren* sowie *Abbau analysieren* beinhalten. (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016)

Aktivitäten der Problemlösung – SPALTEN

Ein jeder Produktentstehungsprozess kann als das Lösen eines Problems verstanden werden (Albers, Saak, Burkardt & Schweinberger, 2002). So gilt es, in den vorgestellten Aktivitäten der Produktentwicklung mithilfe der Aktivitäten der Problemlösung die Zielsystem- in Objektsystemelemente zu überführen. Für diese Überführung kommt die Problemlösungsmethode SPALTEN zum Einsatz, die von Albers et al. (2002) entwickelt wurde und seither stetig weiterentwickelt wird (Albers, Burkardt, Meboldt & Saak, 2005; Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016). SPALTEN ist ein Akronym und setzt sich aus den Anfangsbuchstaben der Problemlösungsaktivitäten zusammen, die zur Lösung des Problems chronologisch durchlaufen werden müssen (Albers, Braun et al., 2020). Eine Übersicht des Ablaufs und der einzelnen Schritte ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

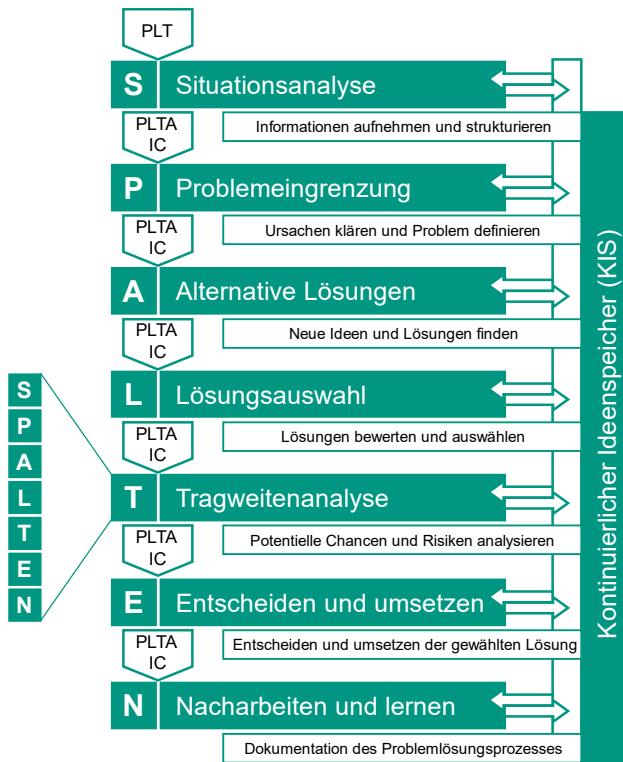


Abbildung 2.2: Übersicht der Problemlösungsmethode SPALTEN nach Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh (2016)

Die SPALTEN-Methode ist fraktal aufgebaut und kann daher innerhalb jedes einzelnen Schritts erneut Anwendung finden (siehe Abbildung 2.2). Zusätzlich zu den sieben Schritten weist SPALTEN drei weitere Elemente auf: Das *Problemlösungsteam (PLT)*, der *kontinuierliche Ideenspeicher (KIS)* sowie der *Informationscheck (IC)*. Zu Beginn eines jeden SPALTEN-Prozesses wird ein PLT zusammengestellt. Das PLT wird während des Prozesses kontinuierlich überprüft und angepasst (PLTA), um zielgerichtet auf die jeweiligen Aktivitäten die passenden Kompetenzen zu bedienen. Im Laufe des Problemlösungsprozesses werden stetig Ideen gesammelt und jene, die nicht direkt verfolgt werden, im KIS gespeichert. Dadurch stehen sie zu einem späteren Zeitpunkt im Prozess oder für zukünftige Problemlösungsprozesse zur Verfügung. Im IC werden die vorhandenen Informationen analysiert und überprüft, ob sie für die Durchführung des nächsten Schritts

ausreichend sind oder zusätzliche Informationen benötigt werden. (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016)

Ebenen im iPeM und deren Interaktionen

Durch die steigende Komplexität von Produkten wird es zunehmend wichtiger, verschiedene Unternehmensbereiche direkt in den Produktentstehungsprozess einzubeziehen. Dadurch können Wechselwirkungen berücksichtigt und sich daraus ergebende Potentiale besser genutzt werden. Als Beispiel lässt sich an dieser Stelle die Wechselwirkung zwischen Produkt und Produktionssystem nennen. Erst durch die Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen des gewählten Produktionsystems bereits während der Produktentwicklung kann der größtmögliche Produktnutzen erzielt werden. Aus diesem Grund ist das iPeM aus mehreren Ebenen (siehe Abbildung 2.1) aufgebaut und bildet somit neben der Produktgeneration selbst, die Strategie des Unternehmens, das Produktionssystem sowie das Validierungssystem ab (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016). Dabei ist die Struktur jeder Ebene gleich aufgebaut und die Aktivitäten der Produktentwicklung sowie Problemlösung sind auf die jeweiligen Ebenen situationsspezifisch anwendbar (Albers, Braun et al., 2020). Dieser ebenenbasierte Aufbau ermöglicht einen fokussierten Blick auf das jeweilige System in Entwicklung bei gleichzeitiger Berücksichtigung der weiteren Ebenen. Jede Ebene erhält ein individuelles Objektsystem. Um Wechselwirkungen zwischen den Objektsystemen zu ermöglichen, können die Objektsysteme über die Ebenen hinweg miteinander interagieren. Im Vergleich zum Objektsystem werden das Ressourcen- und Zielsystem durchgehend über alle Ebenen modelliert, wodurch lediglich ein konsistentes Zielsystem erstellt wird und die verfügbaren Ressourcen zielführend eingeteilt werden können. (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016)

Durch die Ebene *Produkt G_n* (siehe Abbildung 2.1) wird die Entwicklung des aktuellen Produkts beschrieben, das als nächstes auf den Markt kommt. Da Produkte in Generationen entwickelt werden, kann für die darauffolgende Generation G_{n+1} eine separate Ebene hinzugefügt werden. Dadurch können Zusammenhänge zwischen den Generationen abgebildet und die Ressourcen über mehrere Projekte hinweg eingeplant werden. (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016) Um diese Zusammenhänge abzubilden, wurde am IPEK – Institut für Produktentwicklung das Beschreibungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung (siehe Kapitel 2.1.2) entwickelt, das nachfolgend vorgestellt wird.

2.1.2 Beschreibungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Für die vollständige Beschreibung eines Produktentwicklungsprozesses ist der Verständnisaufbau der Neuentwicklungsanteile von Komponenten im System als ziel führend zu erachten. Dadurch kann die Entscheidungsfindung nachfolgender Aktivitäten, die ausschlaggebend die resultierenden Produkt- und Prozesseigenschaften beeinflussen, unterstützt werden. Besonders in frühen Entwicklungsphasen ist dies anzustreben. Gängige Theorien des Innovationsmanagements (Henderson & Clark, 1990) sowie Beschreibungen der Konstruktionsmethodik (Feldhusen & Grote, 2013) reichen dafür jedoch häufig nicht aus. (Albers, Braun et al., 2020) Deshalb wurde am IPEK – Institut für Produktentwicklung zur vollumfänglichen Abbildung unternehmerischer Produktentwicklungsprojekte das Beschreibungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers entwickelt (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015).

Das Beschreibungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung basiert auf zwei zentralen Hypothesen, deren Gültigkeit und Relevanz bereits in einer Vielzahl an praxisrelevanten Beispielen aufgezeigt werden konnten (Albers, Bursac & Rapp, 2017). Die erste Hypothese besagt, dass jede neu entwickelte Produktgeneration auf einem Referenzsystem basiert, das wiederum Referenzsystemelemente enthält. Diese Referenzsystemelemente können beispielsweise unmittelbare Vorgänger einer Produktgeneration, Wettbewerbsprodukte oder auch Produkte aus verschiedenen Branchen darstellen. Die Struktur und Teilsysteme der Referenzsystemelemente werden für die Entwicklung neuer technischer Produkte übernommen oder dienen als Ausgangspunkt für die Neuentwicklung von Teilsystemen. Die zweite Hypothese sagt aus, dass die Entwicklung von neuen Produktgenerationen durch gezielte Kombination der folgenden drei Variationsarten vonstatten geht: *Übernahmeveränderung (ÜV)*, *Ausprägungsvariation (AV)* und *Prinzipvariation (PV)*. Die ÜV besagt, dass ein Teilsystem eines Referenzsystemelements übernommen und bei der Systemintegration lediglich an die Schnittstellen angepasst wird. Bei der AV und PV wird hingegen ein Teilsystem auf Basis eines Referenzsystemelements neu entwickelt. (Albers, Rapp et al., 2019) AV und PV beschreiben daher den Neuentwicklungsanteil einer Produktgeneration (Albers, Braun et al., 2020). Die reine Variation der Gestalt eines Teilsystems wird als Gestaltvariation (GV) bezeichnet und ist ein Sonderfall der AV (Albers, Rapp et al., 2020).

Durch die vorgestellten Variationsarten sowie das Wissen über die Art bzw. Herkunft der Referenzsystemelemente lässt sich zudem das Entwicklungsrisiko neuer Produktgenerationen abschätzen. So führen beispielsweise hohe AV- und PV-Anteile

zu einem erhöhten Entwicklungsrisiko, wohingegen ein hoher ÜV-Anteil das Entwicklungsrisiko eher senkt. Des Weiteren sorgt eine Vielzahl an externen Referenzsystemelementen im Vergleich zu internen ebenfalls für ein erhöhtes Entwicklungsrisiko. (Albers, Rapp, Birk & Bursac, 2017) Diese Erkenntnis lässt sich ebenfalls auf simulationsbasierte Entwicklungstätigkeiten übertragen (siehe Kapitel 2.4.4), wodurch eine zielgerichtete Weiter- oder Neuentwicklung von Simulationsmethoden unter Berücksichtigung vorhandener Risiken ermöglicht wird. (Albers, Haberkern et al., 2022)

Um die Bestimmung der eingesetzten Variationsarten zu unterstützen, kann beispielsweise der C&C²-Ansatz genutzt werden (siehe Kapitel 2.1.3).

2.1.3 Contact, Channel und Connector Ansatz

Ein Bestandteil der Produktentwicklung und gleichzeitig eine Aktivität der Produktentstehung (siehe Abbildung 2.1) beschreibt die Modellierung von Prinzip und Gestalt (Albers, Braun et al., 2020). Bei dieser Modellierung wird in einem iterativen Prozess aus Synthese und Analyse die Gestalt eines Produkts definiert. Zur Unterstützung dieses Prozesses ist es wichtig, dass die notwendigen Informationen der Referenzsystemelemente in geeigneter Form dem Produktentwickler vorliegen, um die Zusammenhänge zwischen der realisierbaren Gestalt und den definierten Funktionen zu verstehen. Dazu kann der C&C²-Ansatz genutzt werden, der ein Metamodell zur Abbildung eben jenes Zusammenhangs zwischen Gestalt und Funktion darstellt. (Matthiesen, 2021) Der C&C²-Ansatz wurde am IPEK – Institut für Produktentwicklung bereits vor über 20 Jahren entwickelt (Albers & Matthiesen, 2002; Matthiesen, 2002) und seither stetig erweitert (Grauberger et al., 2020).

Der C&C²-Ansatz setzt sich aus Modellelementen sowie Grundhypthesen (siehe Abbildung 2.3) zusammen. Anhand der drei Kernelemente *Wirkflächenpaar (WFP)*, *Leitstützstruktur (LSS)* und *Connector (C)* werden die funktionsrelevanten Elemente technischer Systeme modelliert. (Matthiesen, 2021)

Die Schnittstelle, an der zwei Bauteilloberflächen während der Funktionserfüllung in Kontakt stehen, wird als WFP bezeichnet. Die LSS stellt die physikalische Struktur dar, die zwei WFP verbindet. Durch den C werden die Systemgrenzen beschrieben. Er stellt ein Modell der Systemumgebung dar, das außerhalb des Betrachtungsbereichs liegt. (Albers & Wintergerst, 2014) Die Kernelemente enthalten ihrerseits wieder Gestaltungsparameter, die für die Funktionserfüllung relevant sind. Als Beispiele lassen sich der Reibungskoeffizient für einen Gestaltungsparameter eines WFP oder die Steifigkeit eines Bauteils als Gestaltungsparameter für eine LSS nennen.

Der C&C²-Ansatz unterstützt somit die Dokumentation dieser Gestaltungsparameter und ihrer Beziehung zu Funktionen im System. (Albers, Matthiesen et al., 2019)

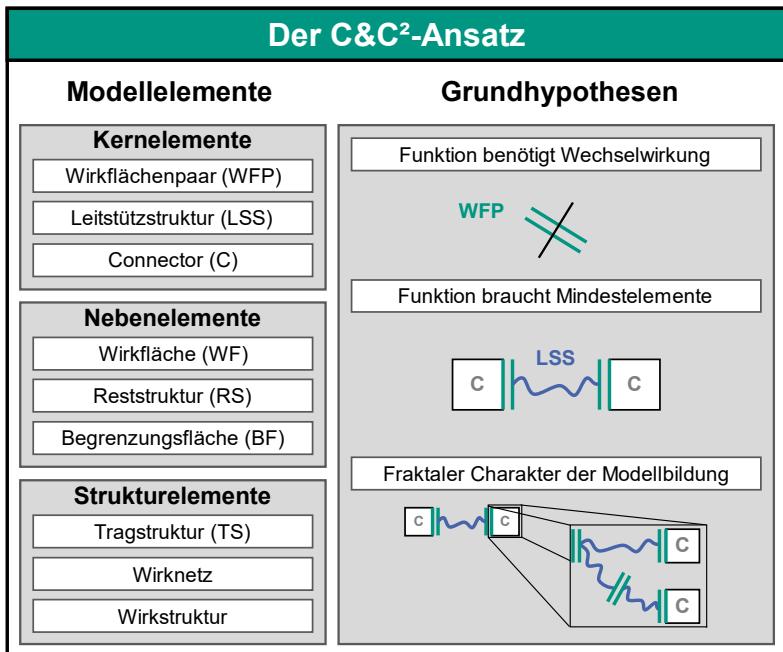


Abbildung 2.3: Der C&C²-Ansatz – Modellelemente und Grundhypothesen nach Matthiesen et al. (2018)

Neben den Kernelementen können im C&C²-Ansatz auch Struktur- und Nebenelemente (siehe Abbildung 2.3) zur Modellbildung eingesetzt werden. So beschreibt beispielsweise die Tragstruktur ein solches Strukturelement und setzt sich aus sämtlichen möglichen LSS zusammen. Die Reststruktur ist im Vergleich Teil der Nebenelemente und beschreibt die Volumen, die zu keinem Moment zur Tragstruktur werden. (Albers & Matthiesen, 2002)

Zusätzlich zu den Modellelementen besteht der C&C²-Ansatz aus drei Grundhypothesen. Diese sind als zur Modellbildung benötigte Regeln zu verstehen, um die Modellelemente in Beziehung zueinander zu setzen. Die erste Grundhypothese besagt, dass für die Funktionserfüllung eine Wechselwirkung zwischen mindestens zwei funktionsrelevanten Elementen stattfinden muss. Diese Wechselwirkung erfolgt ausschließlich in einem WFP, wenn zwei Wirkflächen (WF) in Kontakt stehen.

Die zweite Grundhypothese besagt, dass eine Funktion durch mindestens zwei WFP erfüllt wird, die durch eine LSS verbunden und durch den C in die Umgebung integriert sind. Die dritte Grundhypothese beschreibt den fraktalen Charakter der Modellierung und zeigt, wie sich das erstellte C&C²-Modell eines Systems je nach Blickwinkel und Zweck der Modellierung hinsichtlich Abstraktions- und Detaillierungsgrad unterscheidet. (Matthiesen, 2021)

In Abbildung 2.4 ist ein exemplarisches Anwendungsbeispiel des C&C²-Ansatzes anhand einer Schnellbauschraube zu sehen. Die Systemgrenze wird durch WFP1 (Schnellbauschraube-Wand) und WFP2 (Bit-Schnellbauschraube) definiert. Die Schnellbauschraube selbst stellt die LSS 1-2 dar, die WFP1 und WFP2 verbindet. C1 beschreibt die Systemgrenze zur Wand und beinhaltet Informationen wie beispielsweise die Wandsteifigkeit. Die Systemgrenze auf Seiten der Bohrmaschine beschreibt C2 und gibt zusätzlich Auskunft über die aufgebrachte Axialkraft oder das anliegende Drehmoment. (Matthiesen et al., 2018) Durch diese Systembetrachtung mithilfe des C&C²-Ansatzes kann ein verbessertes Systemverständnis aufgebaut werden und somit der Produktentwickler entscheidend in der Analyse und Synthese von Produkten unterstützt werden. Für eine detaillierte Darstellung der Nutzung des Ansatzes wird an dieser Stelle exemplarisch auf Albers, Alink, Thau & Matthiesen (2008) und Albers & Wintergerst (2014) verwiesen.

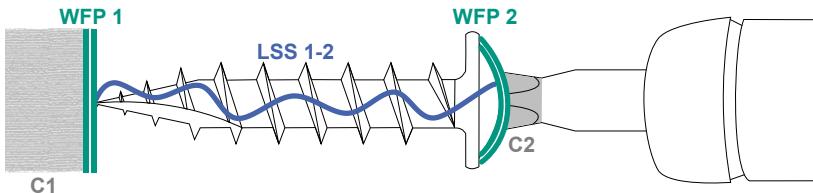


Abbildung 2.4: Anwendungsbeispiel des C&C²-Ansatzes anhand einer Schnellbauschraube nach Matthiesen et al. (2018)

Aufbauend auf der in diesem Kapitel 2.1 gegebenen Einführung in die Modellierung des Produktentstehungsprozesses, vermittelt das nächste Kapitel 2.2 einen Einblick in den Leichtbau im Kontext der Produktentstehung. Den Leichtbau gilt es, in den Aktivitäten der Produktentwicklung zielgerichtet einzusetzen, um das Leichtbaupotential eines Produkts bestmöglich zu heben. Im Sinne des C&C²-Ansatzes zielen Leichtbaubestrebungen, unter Berücksichtigung des Zielsystems, auf die Anpassung von Tragstrukturen oder auf die Reduktion der Reststruktur beispielsweise mithilfe numerischer Optimierungsverfahren ab (Revfi, 2022). Dabei sind die Leichtbaubestrebungen Teil des Handlungssystems, auf dessen Basis ein Zielsystem in ein Objektsystem überführt wird.

2.2 Leichtbau im Kontext der Produktentstehung

Die Bestrebungen im Rahmen des Leichtbaus dienen keineswegs dem Selbstzweck, sondern verfolgen das Ziel, eine erhöhte Energieeffizienz von beschleunigten Massen zu erzielen (Klein, 2013). Besonders vor dem gegenwärtigen Klimawandel und der damit einhergehenden Ressourcenschonung rückt der Leichtbau in den Vordergrund. Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, spielt vor allem die frühe Phase der Produktentstehung eine entscheidende Rolle, in der ein Großteil des Ressourceneinsatzes festgelegt wird. Daher ist es von entscheidender Wichtigkeit, dass Leichtbaubestrebungen frühzeitig und durchgängig über alle Phasen hinweg in den Produktentstehungsprozess einbezogen werden (Albers et al., 2021).

Im Sinne der PGE – Produktgenerationsentwicklung (siehe Kapitel 2.1.2) erfolgen Leichtbaubestrebungen für ein System in Entwicklung auf Basis eines Referenzsystems (siehe Abbildung 2.5). Dieses Referenzsystem kann beispielsweise Leichtbaulösungen und -ansätze aus anderen Branchen oder Bereichen (z. B. Bionik) enthalten. (Albers et al., 2021)

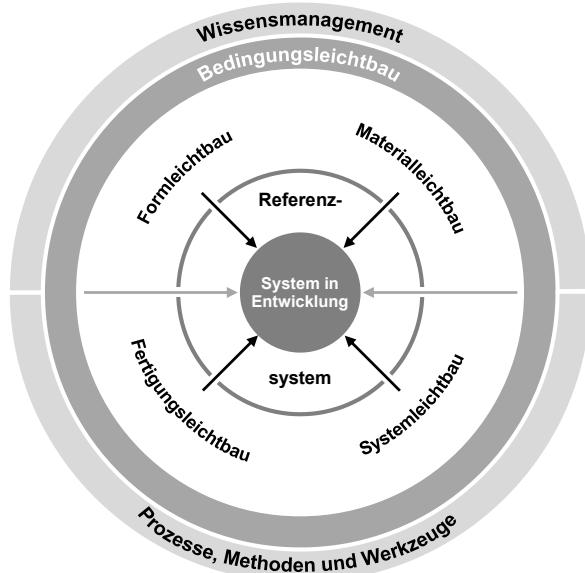


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Anwendung von Leichtbau im Kontext der Produktentwicklung nach Albers, Holoch, Revfi & Spadinger (2021)

Neben dem Referenzsystem stehen dem Produktentwickler verschiedene Leichtbaustrategien, Bauweisen und Prinzipien zur Verfügung, die individuell miteinander kombiniert werden können (Ellenrieder, Gänsicke, Goede & Herrmann, 2013). Die Leichtbaustrategien sind dabei in unterschiedlichsten Abwandlungen und Ausprägungen zu finden (siehe beispielsweise Klein (2013), Gundolf Kopp, Burkardt & Majic (2020) sowie Krause, Schwenke, Gumpinger & Plaumann (2018)) und werden nicht immer einheitlich eingesetzt. Damit im weiteren Verlauf dieser Arbeit ein einheitliches Verständnis der Leichtbaustrategien gewährleistet ist, werden die folgenden fünf Leichtbaustrategien verwendet: *System-, Form-, Stoff-, Fertigungs- und Bedingungsleichtbau* (siehe Abbildung 2.5).

Der Bedingungsleichtbau ist als Randbedingung für die Produktentwicklung zu verstehen und kann somit als Rahmenkonstrukt (siehe Abbildung 2.5) für die Entwicklung eines Systems angesehen werden, weshalb er nicht aktiv vom Produktentwickler erforscht wird. Die vier weiteren Leichtbaustrategien dienen dem Produktentwickler bei der Entwicklung als Instrumente, an denen er sich bedienen kann. Der System- und Formleichtbau sind dabei aktiver Forschungsgegenstand in der Produktentwicklung, während sich dem Stoff- und Fertigungsleichtbau bedient wird, um Werkzeuge zur richtigen Auswahl für Werkstoffe und Fertigungsverfahren zu erhalten. Darüber hinaus stehen dem Produktentwickler bei der Auswahl und Anwendung von Leichtbaubestrebungen Methoden, Prozesse und Werkzeuge sowie Aktivitäten aus dem Wissensmanagement zur Verfügung (siehe Abbildung 2.5). (Albers et al., 2021)

Im Kontext dieser Arbeit sind vorwiegend die Leichtbaustrategien System-, Form- und Stoffleichtbau von Bedeutung, weshalb diese in den Kapiteln 2.2.1, 2.2.2 und 2.2.3 näher beschrieben werden. Für weitere Informationen darüber hinaus sowie einer detaillierten Erläuterung des Bedingungs- und Fertigungsleichtbaus wird an dieser Stelle exemplarisch auf die Werke von Klein (2013) und Gundolf Kopp et al. (2020) verwiesen.

2.2.1 Systemleichtbau

Der Systemleichtbau beschreibt die ganzheitliche Gewichtsreduktion technischer Systeme unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und technischer Randbedingungen sowie aller Wechselwirkungen im System. Zur Identifikation vorliegender Wechselwirkungen und zum Aufbau eines besseren Systemverständnisses eignet sich beispielsweise der C&C²-Ansatz (siehe Kapitel 2.1.3) als unterstützendes Werkzeug. Beim Systemleichtbau steht stets der Zweck des Systems im Vordergrund und nicht die Betrachtung eines einzelnen Bauteils. Somit wird nach einem System gesucht, das den gleichen Zweck erfüllt, jedoch eine verringerte Masse aufweist. Als Ansatz,

um dieses Ziel zu erreichen, kann es hilfreich sein, sich von der Bauteilebene zu lösen und das System auf einer abstrakten Ebene als Black-Box zu betrachten. Anschließend werden Lösungen synthetisiert, die den geforderten Zweck erfüllen. Aufgrund dieser abstrakten Betrachtung des Gesamtsystems kann demnach eine völlig neue Gestalt entstehen, die den geforderten Zweck mit einem anderen Prinzip erfüllt. Des Weiteren kann der Fall eintreten, dass einzelne Bauteile im System ein erhöhtes Gewicht als zuvor aufweisen. Dieser Fall steht jedoch nicht im Widerspruch mit dem Grundgedanken des Systemleichtbaus, denn trotz der Gewichtszunahme eines Bauteils, kann das Gesamtgewicht des Systems reduziert werden. (Albers & Burkardt, 2020) Ein mögliches Szenario für Systemleichtbau lässt sich im Automobilbau finden. Durch den Einsatz von zusätzlichen Sensoren zur automatischen, frühzeitigen Kollisionserkennung wird augenscheinlich das Gewicht auf Gesamtfahrzeugebene zunächst erhöht. Ist dieses System zur Kollisionserkennung jedoch robust und zuverlässig, können beispielsweise Crashstrukturen reduziert werden, wodurch sich eine Gewichtersparnis erzielen lässt, die größer als das Zusatzgewicht der Sensoren ausfällt.

Bei der Synthese neuer Lösungen können die beiden Konstruktionsprinzipien *Trennung der Funktion* und *Funktionsintegration* unterstützend zum Einsatz kommen. Die Trennung der Funktion beschreibt, dass jedes eingesetzte Bauteil lediglich eine Funktion erfüllt. Ein Bauteil ist somit explizit für die zu erfüllende Funktion ausgelegt und berücksichtigt die Wechselwirkungen zwischen den Bauteilen. Als Grundlage zur erfolgreichen Umsetzung des Konstruktionsprinzips Trennung der Funktion kann das in der Systemanalyse erlangte Systemverständnis genutzt werden. Durch die Trennung der Funktion wird die Systemgestaltung eindeutig, wodurch Sicherheitsfaktoren geringer gewählt werden können. Gleichzeitig wird jedoch die Anzahl der Bauteile inklusive Verbindungselementen erhöht. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Funktionsintegration die Realisierung möglichst vieler Funktionen in einem Bauteil unter möglichst geringer Bauraumnutzung. Durch die geringere Anzahl an Bauteilen sind Montage- und Logistikkosten einsparbar. Darüber hinaus können ein niedrigeres Gesamtgewicht des Systems sowie geringere Produktionskosten aufgrund des verringerten Materialeinsatzes realisiert werden. Die Funktionsintegration führt jedoch häufig zu komplexen Bauteilstrukturen, wodurch eine Fertigung mit konventionellen Verfahren nicht immer umsetzbar ist. (Albers & Burkardt, 2020) Deshalb kann die Wahl eines entsprechend flexiblen Fertigungsverfahrens wie beispielsweise die additive Fertigung (siehe Kapitel 2.3) zielführend sein, was jedoch bauteilspezifisch vom Produktentwickler entschieden werden muss. Ein erfolgreiches Beispiel für Funktionsintegration stellt der Flugzeugflügel dar, der für Auftrieb sorgt und gleichzeitig als Tank agiert (Gundolf Kopp et al., 2020).

Eine isolierte Betrachtung des Systemleichtbaus ist nicht als zielführend zu erachten, da dieser in unmittelbarer Wechselwirkung mit anderen Leichtbaustrategien, vorwiegend dem Form- und Stoffleichtbau (siehe Kapitel 2.2.2 und 2.2.3), steht. So kann beispielsweise der verfügbare Bauraum oder der zu nutzende Werkstoff die Gestalt eines Bauteils beeinflussen. (Albers & Burkardt, 2020)

Am IPEK – Institut für Produktentwicklung ist der Systemleichtbau seit vielen Jahren Forschungsgegenstand. Albers et al. (2013) entwickelten beispielsweise den Target Weighing Ansatz (TWA) zur funktionsbasierten Identifikation und Evaluation von Leichtbaupotentialen basierend auf dem in Kapitel 2.1.2 vorgestellten Beschreibungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Der TWA wird sowohl in Forschung als auch Industrie eingesetzt (Nöller et al., 2022). Der TWA wurde von Albers, Revfi & Spadiner (2020) um Module erweitert, um neben der Masse auch die Faktoren Kosten und CO₂-Emissionen bei der Suche nach Leichtbaulösungen zu berücksichtigen (siehe Abbildung 2.6). Diese Faktoren lassen sich je nach deren Priorität unterschiedlich gewichten (Revfi, Albers, Holoch & Spadiner, 2018).

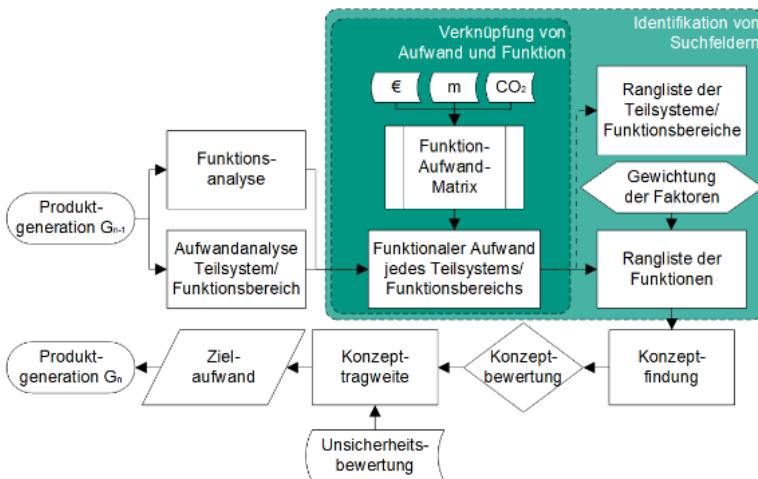


Abbildung 2.6: Ablaufdiagramm des Erweiterten Target Weighing Ansatzes nach Albers, Revfi & Spadiner (2020)

Nach Betrachtung des Systemleichtbaus wird im nachfolgenden Kapitel 2.2.2 auf den Formleichtbau eingegangen.

2.2.2 Formleichtbau

Das Ziel des Formleichtbaus besteht darin, die Materialverteilung im Bauteil derart zu optimieren, dass Material ausschließlich an jenen Bereichen vorliegt, an denen es benötigt wird. Folglich werden, unter Berücksichtigung des gewählten Fertigungsverfahrens, Bereiche hoher Beanspruchung mit zusätzlichem Material versehen, während Material in Bereichen geringer Beanspruchung entfernt wird. (Ellenrieder et al., 2013) Aus diesem Grund wird versucht, auf Basis gegebener Anforderungen eine auf die Kraftleitung optimierte Struktur bei gleichzeitig minimalem Gewicht zu erzeugen. (Gundolf Kopp et al., 2020)

Um dieses Ziel zu erreichen, werden häufig Konstruktions- und Gestaltungsrichtlinien eingesetzt (Gundolf Kopp et al., 2020). Darunter fallen u. a. konstruktive Versteifungen, die als eine gezielt eingebrachte Anisotropie im Bauteil zur Erhöhung der Steifigkeit definiert werden. Diese Versteifungen sollen möglichst ohne Einbringung von zusätzlichem Material erfolgen, um das Leichtbaupotential zu heben. Als in der Praxis gängige Beispiele sind exemplarisch Sicken, Rippen und Sandwich-Strukturen (siehe Abbildung 2.7) zu nennen. Während Sicken eine rinnenartige Versteifung in Blechbauteilen beschreiben, zeichnen sich Rippen durch schmale Versteifungsleisten aus, die flächig auf das Bauteil aufgebracht sind. (Klein, 2013) Sandwich-Strukturen bestehen aus einem Schaumkern und zwei Deckschichten, wodurch das Flächenträgheitsmoment und somit die Steifigkeit erhöht wird (Friedrich, 2017).

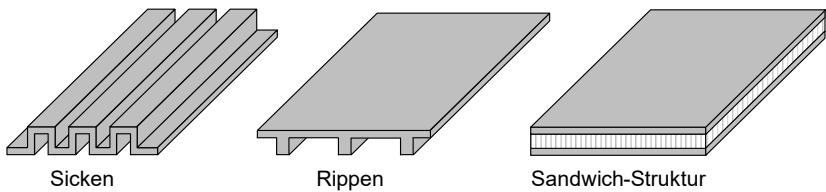


Abbildung 2.7: Beispiele für konstruktive Versteifungen: Sicken, Rippen und Sandwich-Struktur nach Klein (2013)

Neben Konstruktions- und Gestaltungsrichtlinien kommen im Formleichtbau auch die Methoden der Strukturoptimierung (siehe Kapitel 2.4.3) zum Einsatz (Gundolf Kopp et al., 2020). Besonders die Topologieoptimierung stellt ein Werkzeug zur Einsparung von Material und folglich Gewichtsreduktion bereit. Die Topologieoptimierung steht im Rahmen der vorliegenden Arbeit im Vordergrund und wird daher in Kapitel 2.4.3.1 gesondert behandelt.

Wie bereits in Kapitel 2.2.1 beschrieben, stehen die Leichtbaustrategien in Wechselwirkung zueinander. So wird beispielsweise die mögliche Ausprägung der Form des Bauteils einerseits durch den zur Verfügung stehenden Bauraum im System und andererseits vom ausgewählten Werkstoff begrenzt. Die Werkstoffauswahl ist Teil des Stoffleichtbaus, der im nachfolgenden Kapitel 2.2.3 beschrieben wird.

2.2.3 Stoffleichtbau

Beim Stoffleichtbau wird das Ziel verfolgt, eine Struktur unter Einhaltung sämtlicher Anforderungen und Randbedingungen mit einem möglichst leichten Werkstoff zu realisieren. Zu diesen Werkstoffen zählen beispielsweise Aluminium, Magnesium, Titan, Stahl und faserverstärkte Kunststoffe. Um das Ziel des Stoffleichtbaus zu erfüllen, wird häufig ein Werkstoff durch einen anderen mit höheren spezifischen Materialeigenschaften substituiert. Diese reine Substitution des Werkstoffs nutzt jedoch nicht das volle Potential des Werkstoffs, weshalb zusätzlich die Gestalt und somit das zugrunde liegende Fertigungsverfahren angepasst werden sollte. Erst dadurch kann das maximale Leichtbaupotential erreicht werden. Als Negativbeispiel ist die reine Substitution von Aluminium zu faserverstärktem Kunststoff zu nennen. (Günter Kopp et al., 2020) Bei diesem Negativbeispiel wird die Bauteilgestalt, die während des Fertigungsverfahrens die Faserorientierung und somit die resultierenden Materialeigenschaften definiert, nicht berücksichtigt (Kärger, 2019). Erst die Anpassung der Bauteilgestalt abhängig von diesen resultierenden Materialeigenschaften führt zur Nutzung des verfügbaren Leichtbaupotentials. Deshalb ist der Einsatz des Stoffleichtbaus in Kombination mit dem Formleichtbau als zielführend zu erachten.

Neben den spezifischen Materialeigenschaften gilt es bei der Auswahl eines neuen Werkstoffs auch ökonomische und ökologische Randbedingungen zu beachten, wodurch Beschränkungen für einsetzbare Materialien auftreten können (Ellenrieder et al., 2013). Um den Produktentwickler zielgerichtet bei der Auswahl eines Werkstoffs zu unterstützen, können Werkzeuge wie beispielsweise die Materialauswahl nach Ashby (2016) eingesetzt werden. Bei dieser Materialauswahl werden auf Basis der vorliegenden Beanspruchung, Randbedingung (z. B. maximal zulässiges Gewicht) und des Ziels (z. B. minimale Steifigkeit) Werkstoffindizes berechnet, die anschließend zur Materialauswahl im Ashby-Diagramm (siehe Abbildung 2.8) genutzt werden.

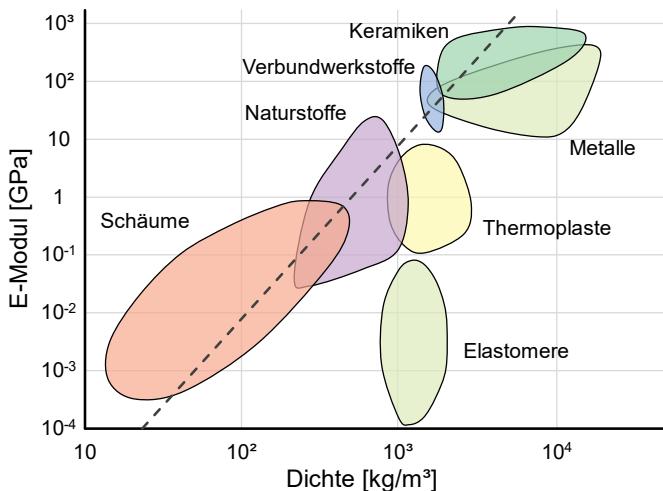


Abbildung 2.8: Exemplarisches Ashby-Diagramm zur Werkstoffauswahl anhand der Materialkenngrößen E-Modul und Dichte nach Weißbach, Dahms & Jaroschek (2018)

In diesen Ashby-Diagrammen sind stets zwei Materialkenngrößen aufgetragen, wie beispielsweise der E-Modul über der Dichte, wodurch ein massenspezifischer Vergleich unterschiedlicher Werkstoffe möglich ist. Die zur Verfügung stehenden Werkstoffe sind im Ashby-Diagramm grafisch aufbereitet. Die berechneten Werkstoffindices sind als Geraden hinterlegt. (Ashby, 2016) Das Ashby-Diagramm ist derart zu lesen, dass jene Werkstoffe, die den Werkstoffindex (siehe Gerade in Abbildung 2.8) bei möglichst geringer Dichte schneiden, am besten für die gegebenen Anforderungen und Randbedingungen geeignet sind (Weißbach et al., 2018). In Abbildung 2.8 ist dies für Schäume der Fall.

Aus den zuvor vorgestellten Leichtbaustrategien geht hervor, dass deren separierter Einsatz nur bedingt zielführend oder mit Einbußen hinsichtlich des möglichen Leichtbaupotentials verbunden ist. Aus diesem Grund gilt es, Leichtbaubestrebungen auf Systemebene unter kombinierter Nutzung der präsentierten Leichtbaustrategien auszuführen (Albers et al., 2021). Derartige Leichtbaubestrebungen können jedoch komplexe Bauteilstrukturen (beispielsweise durch Funktionsintegration) zum Vorschein bringen, die mittels konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur in Verbindung mit hohen Kosten hergestellt werden können (Diegel, Nordin & Motte, 2019). Die additive Fertigung stellt eine Möglichkeit zur Erzeugung derartig komplexer Bauteilstrukturen dar und wird im nachfolgenden Kapitel 2.3 vorgestellt.

2.3 Additive Fertigung

In den Kapiteln 2.1 und 2.2 ist die Wichtigkeit der Ressourcen- und Kosteneinsparung anhand von Entwicklungsaktivitäten und Leichtbaubestrebungen im Produktentstehungsprozess beschrieben. Durch die additive Fertigung lassen sich abhängig von verschiedenen Einflussfaktoren wie beispielsweise Komplexitätsgrad, Stückzahl oder Bauteilgröße beide Ziele erreichen. Einerseits können Ressourcen eingespart werden, da im Vergleich zur subtraktiven Fertigung kein Materialabtrag erzeugt, sondern Material ausschließlich dort eingesetzt wird, wo es im Bauteil benötigt ist (Oettmeier & Hofmann, 2019). Andererseits entfallen Kosten für die Fertigung komplexer Werkzeuge, wodurch sich gleichzeitig die Produkteinführungszeiten reduzieren lassen (Despeisse & Ford, 2015). Des Weiteren besitzt die additive Fertigung besonders bei der Erzeugung komplexer Strukturen einen Kostenvorteil gegenüber konventioneller Fertigung (Lippert, 2018).

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die steifigkeitsoptimierte Gestaltung additiv gefertigter Bauteile, weshalb nachfolgend die additive Fertigung näher beschrieben wird. Zunächst werden die für das Verständnis dieser Arbeit notwendigen Grundlagen der additiven Fertigung (siehe 2.3.1) vorgestellt. Darauf aufbauend folgt die Beschreibung des SLM (siehe 2.3.2), das als Fertigungsverfahren im Kontext dieser Arbeit zum Einsatz kommt. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einem Überblick hinsichtlich der Nutzung additiver Fertigung im Produktentstehungsprozess (siehe 2.3.3).

2.3.1 Grundlagen der additiven Fertigung

Die additive Fertigung geht auf die Erfindung der Stereolithographie durch Chuck Hull 1983 zurück und wird seither stetig weiterentwickelt (Raddatz, Austerjost & Beutel, 2018). Während die additive Fertigung zu Beginn eher im Prototypenbau eingesetzt wurde, kommt sie mit voranschreitendem technologischen Fortschritt zunehmend auch für den industriellen Einsatz in größerem Maßstab in Frage (Holweg, Hoberg, Heinen & Pil, 2016). So lag beispielsweise 2018 die Nutzung der additiven Fertigung weiterhin zu einem Drittel im Prototypenbau, jedoch bereits zu zwei Dritteln in der Produktion von Werkzeugen und Bauteilen (Lippert & Lachmayer, 2020; Lachmayer, Ehlers & Lippert, 2022). Dieser Trend lässt sich zum einen anhand der nahezu vollständigen Unabhängigkeit der Stückkosten von der Stückzahl sowie der Bauteilkomplexität im Vergleich zur konventionellen Fertigung erklären (Oettmeier & Hofmann, 2019). Zum anderen lassen sich Strukturen erzeugen, deren Fertigung mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur unter hohem Zusatzaufwand möglich ist. So lassen sich beispielsweise dämpfende Strukturen in Form von ein-

geschlossenen, nicht konsolidierten Pulverpartikeln direkt bei der Fertigung erzeugen und tragen zu einem verbesserten Systemverhalten im Produkteinsatz bei. Dies ist besonders bei Leichtbaustrukturen von Bedeutung, die aufgrund ihrer geringen Masse ungewollt zu schwingen beginnen können (Ehlers, Tatzko, Wallaschek & Lachmayer, 2021; Ehlers & Lachmayer, 2022; Ehlers, 2023). Des Weiteren weist die additive Fertigung das Potential zur Reparatur filigraner und komplexer Strukturen auf, wodurch die Thematik des Refurbishment an zusätzlicher Relevanz gewinnt (Ganter et al., 2023). Trotz dieser Vorteile ist es nicht immer die beste Lösung die additive Fertigung einzusetzen. Vielmehr muss der Einsatz abhängig vom jeweiligen Komplexitätsgrad und der Stückzahlen eines Bauteils individuell entschieden werden, da hohe Stückzahlen mithilfe der additiven Fertigung ausschließlich durch den Einsatz einer Vielzahl von Maschinen zu bewältigen sind. Aus diesem Grund ist beispielsweise für die Erzeugung von wenig komplexen Bauteilen in hohen Stückzahlen weiterhin die konventionelle Fertigung zu bevorzugen, um wirtschaftlich zu agieren. (Diegel et al., 2019)

Die beschriebenen Zusammenhänge zwischen Fertigungskosten und Bauteilkomplexität sowie der zu bevorzugende Einsatz zwischen konventioneller und additiver Fertigung sind in Abbildung 2.9 grafisch aufbereitet.

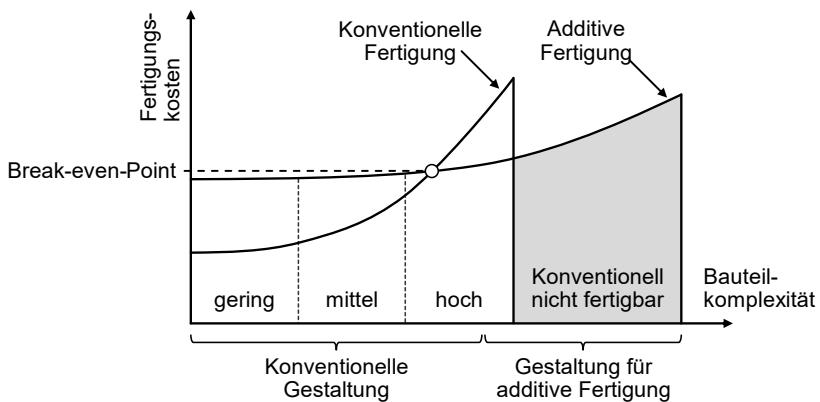


Abbildung 2.9: Zusammenhang zwischen Fertigungskosten und Bauteilkomplexität der additiven Fertigung nach Lippert (2018) und Merkt, Hinke, Schleifenbaum & Voswinckel (2012)

Die additiven Fertigungsverfahren lassen sich sowohl nach deren Materialien (Kunststoffe, Metalle und Mineralien) also auch Aggregatzuständen bei der Verarbeitung (fest, flüssig oder gasförmig) klassifizieren (Berger, Hartmann & Schmid,

2019). Während sich für Kunststoffe vor allem die Stereolithographie und die Extrusionsverfahren etabliert haben, kommen bei Metallen häufig Sinter-Verfahren zum Einsatz. Die Verfahren der Stereolithographie verfestigen photosensitive Monomere punktweise mittels Laser-Scanner und UV-Strahlung. Bei den Extrusionsverfahren (z. B. Fused Deposition Modeling oder Multi-Jet-Modeling) werden thermoplastische oder wachsartige Drähte mithilfe eines Düsenkopfs erwärmt und extrudiert. Die Sinterverfahren basieren auf einem Pulverbett (siehe Kapitel 2.3.2), das zumeist aus Metallpulver besteht. Dieses Metallpulver wird unter Zuhilfenahme eines Lasers lokal aufgeschmolzen und konsolidiert. (Gebhardt, 2016) Für einen tiefergehenden Einblick in die additiven Fertigungsverfahren wird an dieser Stelle exemplarisch auf die Werke von Berger, Hartmann & Schmid (2019) und Gebhard (2016) verwiesen.

Unabhängig von der Klassifizierung besitzen alle additiven Fertigungsverfahren die Gemeinsamkeit, dass sie ein Bauteil in einem schichtweisen Prozess erzeugen (VDI-Richtlinie 3405). Dadurch grenzen sie sich zu den subtraktiven und formativen Verfahren ab (siehe Abbildung 2.10). Subtraktive Verfahren erzeugen ein Bauteil durch Materialabtrag, wohingegen formative Verfahren das Bauteilvolumen beibehalten und lediglich die Bauteilform anpassen. (Gebhardt, 2016)

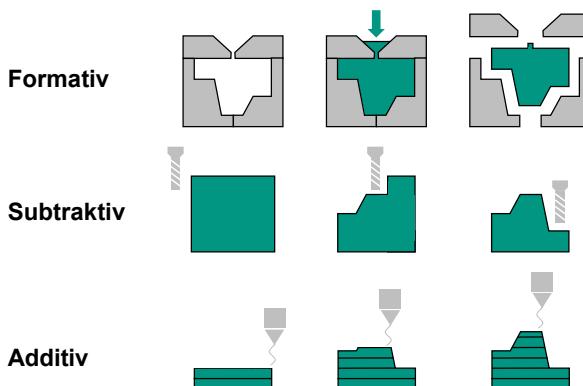


Abbildung 2.10: Abgrenzung der additiven Fertigung zur subtraktiven und formativen Fertigung nach Lang et al. (2019)

Bei der additiven Fertigung wird jede Schicht ausgehend von einer Bauplattform iterativ in Aufbaurichtung übereinander gesetzt (siehe Abbildung 2.10), wodurch ein dreidimensionaler Körper entsteht (Kohlhuber, Kage & Karg, 2016). Durch dieses schichtweise Vorgehen können komplexe Strukturen wie Hohlräume, Hinterschnitte oder Wabenstrukturen, die in konventionellen Fertigungsverfahren zum Teil als geometrische Restriktionen gelten, erzeugt werden (Gebhardt, 2016). Gleichzeitig gilt

es jedoch zu beachten, dass aufgrund der diskontinuierlichen Fertigung häufig ein Unterschied zwischen den mechanischen Materialeigenschaften in Aufbaurichtung und orthogonal zur Aufbaurichtung existiert. Während der orthogonale Aufbau nahezu kontinuierlich abläuft (siehe Abbildung 2.10), erfolgt die Bauteilfertigung in Aufbaurichtung diskontinuierlich in diskreten Schritten von einer Schichtdicke. (Leuten-ecker-Twelsiek et al., 2016) Aus dieser Diskontinuität folgen unterschiedliche Verbindungseigenschaften in und zwischen den abgelegten Materialschichten, weshalb die mechanischen Materialeigenschaften zwischen den Schichten häufig geringer ausfallen als jene in einer Schicht (Gibson, Rosen & Stucker, 2010).

Um einen potentiellen Verzug und ein Absinken von Bauteilstrukturen während des schichtweisen Aufbaus zu vermeiden, kommen sogenannte Stützstrukturen³ zum Einsatz (siehe Abbildung 2.11). Diese stellen eine Art Fundament für die darüberliegenden Schichten dar. (Berger et al., 2019)

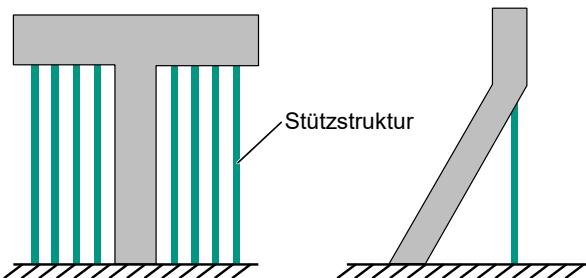


Abbildung 2.11: Exemplarische Darstellung notwendiger Stützstrukturen zur Sicherstellung der Fertigbarkeit nach Jiang, Xu & Stringer (2018)

Die Stützstrukturen sind jedoch nicht Teil des endgültigen Bauteils, weshalb es diese in einem Nachbearbeitungsschritt zu entfernen gilt. Deshalb bestehen die Stützstrukturen häufig aus anderen physikalischen oder chemischen Eigenschaften als das restliche Bauteil, um den Prozess der Nachbearbeitung zu erleichtern. (Balletti, Ballarin & Guerra, 2017) Bei pulverbettbasierten Fertigungsverfahren kann ein Absinken neben dem Einsatz von Stützstrukturen ab einem Überhangwinkel kleiner 45° auch durch das Pulverbett selbst erzielt werden (Fastermann, 2014; Gieseke et al., 2016). Ein solches pulverbettbasiertes Fertigungsverfahren ist das SLM, das im

³ Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird unter dem Begriff *Stützstruktur* jene Struktur im additiv gefertigten Bauteil verstanden, die nicht Teil des endgültigen Bauteils ist und im Nachbearbeitungsschritt entfernt wird. Diese *Stützstruktur* gilt es von den im C&C²-Ansatz (siehe Kapitel 2.1.3) verwendeten *Leitstützstrukturen* abzugrenzen.

Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kommt und im nachfolgenden Kapitel 2.3.2 näher erläutert wird.

2.3.2 Pulverbettbasiertes Fertigungsverfahren – Selektives Laserschmelzen

Das SLM stellt eines der am weitverbreitetsten additiven Fertigungsverfahren für pulverförmige Metalle dar (Gieseke et al., 2016; Gu, 2015). Wie alle additiven Fertigungsverfahren basiert auch das SLM auf einem schichtweisen Vorgehen. Das Fertigungsverfahren lässt sich dabei in die nachfolgend beschriebenen drei Schritte einteilen: *Pre-Prozess*, *In-Prozess* und *Post-Prozess* (VDI-Richtlinie 3405).

Der erste Schritt Pre-Prozess beinhaltet alle Tätigkeiten zur Vorbereitung des eigentlichen physischen Bauprozesses und kann wiederum in zwei Bereiche unterteilt werden: *Prozessvorbereitung* und *Datenvorbereitung*. Zur Prozessvorbereitung gehören alle Einstellungen und Tätigkeiten an der Maschine, wie beispielsweise deren Befüllung mit Pulver oder das Fluten der Maschine mit Inertgas zur Senkung des Sauerstoffgehalts, um Nebenreaktionen (z. B. Oxidation) während der Fertigung zu verhindern. (VDI-Richtlinie 3405; Gebhardt, 2016) In der Datenvorbereitung erfolgt zunächst die Erstellung eines 3D-Modells des zu fertigenden Bauteils. Dieses 3D-Modell wird anschließend im sogenannten Slicing in eine Vielzahl einzelner Schichten (siehe Abbildung 2.12) diskretisiert (Kohlhuber et al., 2016).

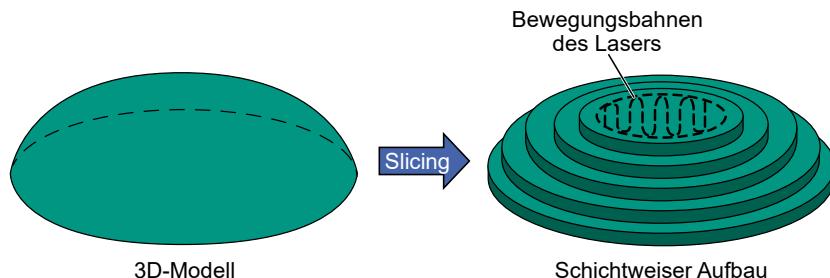


Abbildung 2.12: Datenvorbereitung beim SLM: Exemplarische Darstellung des Slicing des 3D-Modells inklusive Bewegungsbahnen des Lasers nach Nisja, Cao & Gao (2021)

Beim Slicing wird das 3D-Modell im Abstand der beabsichtigten Schichtdicke (vorwiegend wenige Zehntel Millimeter) horizontal geschnitten, wodurch pro Schicht eine zweidimensionale Repräsentation dieser entsteht. (Kohlhuber et al., 2016) Die

sich ergebenden 2D-Repräsentationen jeder Schicht werden genutzt, um die Bewegungsbahnen des Lasers (siehe gestrichelte Linien in Abbildung 2.12 rechts) zur Konsolidierung des Pulvers zu bestimmen (VDI-Richtlinie 3405). Diese Bewegungsbahnen werden automatisiert durch einen Algorithmus abhängig von den gewählten Prozessparametern und der eingesetzten Maschine erstellt. Durch die Diskretisierung wird abhängig von der Schichtdicke eine Art Treppenmuster an der Oberfläche des zu fertigenden Bauteils (siehe Abbildung 2.12 rechts) erzeugt, weshalb mit abnehmender Schichtdicke eine höhere Geometrietreue erreicht werden kann (Gebhardt, 2016). Um eine hohe Geometrietreue zu erzielen, sind im SLM Schichtdicken von 20 µm bis 100 µm üblich (Gebhardt, 2013).

Der zweite Schritt In-Prozess fasst alle Operationen einer SLM-Anlage zur schichtweisen Fertigung eines Bauteils zusammen (VDI-Richtlinie 3405). Abbildung 2.13 zeigt die schematische Darstellung einer solchen SLM-Anlage.

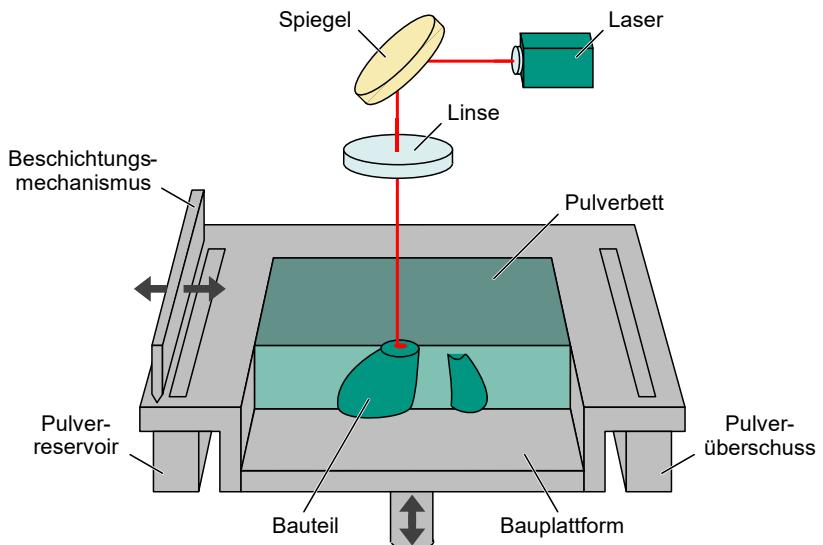


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung der SLM-Anlage inklusive dem in Fertigung befindlichen Bauteil nach Lange (2021)

Ausgehend vom darin ersichtlichen Pulverreservoir wird mithilfe des Beschichtungsmechanismus eine Pulverschicht auf die Bauplattform aufgetragen (Gu, 2015). Überschüssiges Pulver wird in einem separaten Behältnis gesammelt und recy-

celt (Johannknecht & Lippert, 2016). Anschließend erfolgt das sogenannte Scanning, die lokale Konsolidierung des Pulvers mithilfe eines Lasers (Carter, Martin, Withers & Attallah, 2014). Dazu werden die im Schritt Datenvorbereitung bestimmten Bewegungsbahnen durch den Laser abgefahren, wodurch eine Schicht des zu fertigenden Bauteils entsteht. Um eine hohe Oberflächenqualität zu erzielen und somit Nachbearbeitungskosten zu senken, wird häufig zuerst die äußere Kontur einer Schicht erzeugt und erst danach das dazwischenliegende Pulver konsolidiert (Buchbinder & Meiners, 2010). Anschließend wird die Bauplattform um eine Schichtdicke abgesenkt, eine erneute Pulverschicht mithilfe des Beschichtungsmechanismus aufgetragen und durch den Laser anhand der Bewegungsbahnen ebenfalls verfestigt. Dieses Vorgehen wird Schicht für Schicht durchgeführt, bis das zu fertigende Bauteil vorliegt. (Gu, 2015) Gängige Aufbauraten liegen im Bereich von 10 cm³ bis 20 cm³ pro Stunde (Gebhardt, 2013). Um eine Verbindung zwischen den Schichten zu erzeugen, werden während der Fertigung nicht nur die Pulverkörner in einer Schicht vom Laser aufgeschmolzen, sondern auch ein gewisser Bereich des darunterliegenden, bereits konsolidierten Materials, wodurch ein stoffschlüssiger Verbund entsteht (Carter et al., 2014). Neben Titan und Edelstahl kommt beim SLM vor allem Aluminium in Form der Legierung AlSi10Mg zum Einsatz. Dies ist auf die guten mechanischen Eigenschaften (hohe gewichtsspezifische Festigkeit und Steifigkeit), geringen thermischen Ausdehnungen sowie auf die gute Schweiß- und Gießbarkeit der Legierung zurückzuführen (Kempen, Thijs, van Humbeeck & Kruth, 2012; Martin et al., 2017; Wong, Ho, Leong & Wong, 2016).

Im letzten Schritt Post-Prozess sind die Tätigkeiten nach der Fertigung des Bauteils zusammengefasst. Dazu gehören beispielsweise das Ablösen des Bauteils von der Bauplattform, die Nachbehandlung durch Wärme- oder Oberflächenbehandlung sowie die Entfernung von potentiellen Stützstrukturen. (VDI-Richtlinie 3405)

Abhängig von den durchgeführten Tätigkeiten in den drei Schritten, können die aus dem additiven Fertigungsverfahren resultierenden Materialeigenschaften variieren. So haben alle additiven Fertigungsverfahren für metallische Werkstoffe gemein, dass das Scanning und die damit verbundenen Bewegungsbahnen des Lasers einen Einfluss auf die Mikrostruktur und das mechanische Verhalten des gefertigten Bauteils besitzen (Alimardani, Toyserkani, Huissoon & Paul, 2009; Foroozmehr & Kovacevic, 2010). Dieser Einfluss ist zumeist auf die folgenden drei Defektarten zurückzuführen, die sich während der Fertigung einstellen können: *Bindefehler*, *Risse* und *Poren*.

Bindefehler weisen eine unzureichende Verbindung zwischen den Schichten beispielsweise aufgrund eines zu geringen Wärmeeintrags auf (Ladewig, 2019). Die Morphologie dieser Bindefehler weist zum Teil spitze, rissartige Enden auf, wodurch

eine hohe Kerbwirkung entsteht. Dadurch haben Bindefehler eine große Auswirkung auf die Lebensdauer des Bauteils. (Kasperovich, Haubrich, Gussone & Requena, 2016) Risse entstehen hingegen aufgrund der hohen Energiezufuhr des Lasers in Verbindung mit der guten Wärmeleitfähigkeit von Aluminiumpulver. Durch die Kombination kann es zu hohen Schmelz- und Abkühlgeschwindigkeiten im Bauteil kommen. Die dadurch hervorgerufenen Temperaturgradienten induzieren Spannungen, die bei Überschreitung eines kritischen Werts zur Ausbildung von Rissen führen. (Zhang, Li & Bai, 2017) Poren vervollständigen die drei Defektarten. Sie entstehen beim SLM einerseits durch den Schrumpfungsprozess während der Fertigung und schließen nicht-geschmolzenes Pulver ein (Tang, 2017). Andererseits können Poren durch den Einschluss von Gasblasen oder Oxiden entstehen (Thijs, Kempen, Kruth & van Humbeeck, 2013). Keyhole-Poren sind beispielsweise Dampfblasen, die im Schmelzbad entstehen und bei der Erstarrung des Materials eingeschlossen werden. Metallurgische Poren sind im Vergleich kleiner und runder. Sie werden durch einen hohen Energieeintrag des Lasers bei geringer Scangeschwindigkeit hervorgerufen und sind darauf zurückzuführen, dass sich Wasserstoff in der Erstarrungsfront löst und eingeschlossen wird. (Aboulkhair, Everitt, Ashcroft & Tuck, 2014)

Wie im vorherigen Absatz beschrieben, hängen sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch die sich ausbildenden Defekte vom Scanning und den damit verbundenen Bewegungsbahnen des Lasers ab. Letztere werden maßgeblich durch die Bauteilgeometrie definiert, wodurch ein direkter Zusammenhang zwischen Produkt (Design) und Produktionssystem (Fertigungsverfahren) besteht. Dieser Zusammenhang sowie die sich daraus ergebenden Wechselwirkungen sollten bereits während der Entwicklung von Produkten und Systemen berücksichtigt werden, um Potentiale (z. B. hinsichtlich Steifigkeit oder Nachhaltigkeit) bestmöglich zu nutzen (Albers, Rapp, Klippert, Lanza & Schäfer, 2022). Mit dem Ansatz des Produkt-Produktion-CoDesigns (PPCD) stellen Albers, Lanza et al. (2022) eine Möglichkeit dar, um derartige Wechselwirkungen in die Produktentwicklung einfließen zu lassen. PPCD beschreibt dabei die iterative Planung, Entwicklung und Realisierung von Produkten und dem zugehörigen Produktionssystem bis hin zum effizienten und effektiven Betrieb der Produktion. Darüber hinaus werden im Ansatz die Entwicklung zugehöriger Geschäftsmodelle sowie die systematische Außerbetriebnahme von Produkten und Produktionssystemen abgebildet. (Albers, Lanza et al., 2022)

Folglich wird es als zielführend erachtet, dass bereits während der Ableitung initialer Produktdesigns das Fertigungsverfahren inklusive dessen Randbedingungen und Besonderheiten berücksichtigt werden. Weitere Ansätze und Methoden mit Bezug auf die additive Fertigung, die dieses Ziel verfolgen, werden im nächsten Kapitel 2.3.3 beschrieben.

2.3.3 Additive Fertigung als Werkzeug der Produktentwicklung

Im Vergleich zur konventionellen Fertigung handelt es sich bei der additiven Fertigung um eine junge Technologie, weshalb es an Erfahrungen hinsichtlich der spezifischen Merkmale und Besonderheiten unterschiedlicher additiver Fertigungsverfahren fehlt. Dies führt häufig dazu, dass das volle Potential der additiven Fertigung nicht ausgeschöpft wird. Aufgrund dessen gilt es, den Produktentwickler durch den Entwicklungsprozess zu leiten und ihm die richtigen Werkzeuge zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung zu stellen. Erst dadurch können Produkte erzeugt werden, die hinsichtlich additiver Fertigung optimiert sind. Bestrebungen zur Entwicklung derartiger Werkzeuge und unterstützender Methoden lassen sich unter dem Begriff Design for Additive Manufacturing (DfAM) zusammenfassen. (Kumke, Watschke & Viator, 2016)

DfAM verfolgt das Ziel, bei der Synthese von Produkten die Möglichkeiten der additiven Fertigung optimal zu nutzen und somit die gewünschte Produktleistung zu maximieren (Gibson et al., 2010; Rosen, 2007). Dies umfasst auch Untersuchungen hinsichtlich Design- und Optimierungspotentialen eines Produkts durch die Nutzung additiver Fertigung. Daraus leitet sich ab, dass es bereits bei der Auslegung eines Bauteils neben der Sicherstellung der Fertigbarkeit auch die einzigartigen Eigenschaften des jeweiligen additiven Fertigungsverfahrens zu berücksichtigen gilt. Zusätzlich bedarf es einer vorgelagerten Bewertung von Bauteilen hinsichtlich deren wirtschaftlicher Eignung zur additiven Fertigung. Um sowohl die Auslegung als auch die Auswahl zu unterstützen, stehen dem Produktentwickler beispielsweise die nachfolgenden Methoden und Werkzeuge zur Verfügung. (Kumke et al., 2016)

Zur Auswahl geeigneter Bauteile, die sich additiv fertigen lassen, können vom Produktentwickler verschiedene Methoden eingesetzt werden (Kumke et al., 2016). Auf strategischer Ebene werden beispielsweise die drei Hauptkriterien Komplexität, Individualisierung und Losgröße in einem Drei-Achsen-Modell (siehe Abbildung 2.14) abgebildet. Daraus ergeben sich acht Bereiche, die jeweils verschiedene Fertigungsstrategien abbilden. (Conner et al., 2014)

Auf Bauteilebene werden hingegen vier Entscheidungskriterien für ein potentielles Redesign eines Produkts hin zur additiven Fertigung genutzt: Funktionsintegration, Individualisierung, Leichtbau und effizientes Design. Abhängig von der Gewichtung dieser Entscheidungskriterien wird definiert, ob die additive Fertigung zielführend ist. (Klahn, Leutenecker & Meboldt, 2014) Des Weiteren kann die Auswahl eines geeigneten Bauteils mithilfe einer Trade-Off-Matrix erfolgen, die in ihren Spalten die Bauteilkandidaten und in den Zeilen die Entscheidungskriterien enthält. Ihr Zweck

ist ein Screening von Bauteilen sowie deren Bewertung hinsichtlich eines wirtschaftlichen Vorteils durch additive Fertigung. (C. Lindemann, Reiher, Jahnke & Koch, 2015)

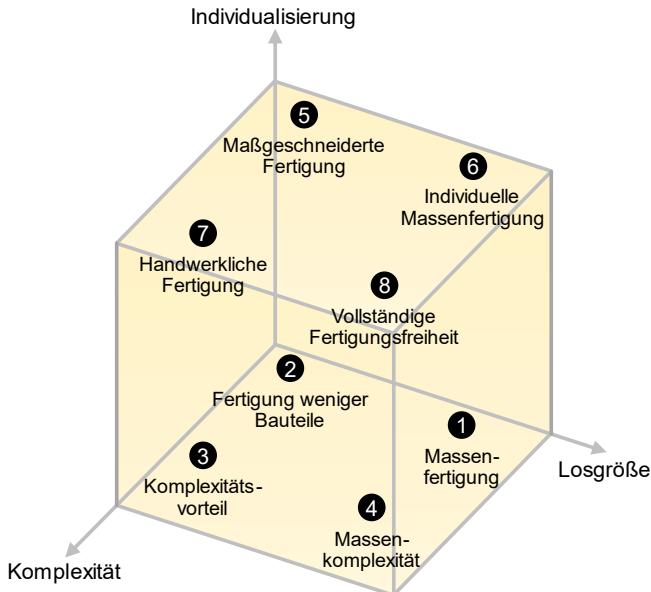


Abbildung 2.14: Drei-Achsen-Modell zur Ableitung unterschiedlicher Fertigungsstrategien nach Conner et al. (2014)

Wenn ein Bauteil detektiert ist, das sich für die additive Fertigung eignet, gilt es, dieses unter Berücksichtigung der entsprechenden Besonderheiten des jeweiligen Fertigungsverfahrens auszulegen. Hilfreiche Werkzeuge hierfür stellen beispielsweise zugeschnittene Konstruktionsprinzipien und -regeln dar. Erstere unterstützen den Produktentwickler dabei, eine prinzipielle Lösung in ein konkretes, fertigbares Design zu überführen. Damit sollen die Gestaltungsfreiheit der additiven Fertigungsverfahren ausgenutzt und bestehende Fertigungsrestriktionen kreativ umgangen werden. Die Konstruktionsprinzipien können von einfachen Hinweisen zur Kosten senkung bis hin zu Empfehlungen reichen, die das Design der Bauteile weitgehend beeinflussen. Im Vergleich zu den Konstruktionsprinzipien umfassen die Konstruktionsregeln die notwendigen charakteristischen Fakten und Zahlen für Produktentwickler, um additiv fertigbare Bauteile zu entwerfen. Die Konstruktionsregeln sind abhängig vom gewählten Fertigungsverfahren, dem eingesetzten Werkstoff, der Maschine und den Maschinenparametern. Dazu gehören beispielsweise Werte wie

Mindestwandstärke oder Rauheitsangaben, die von den Maschinen- und Prozessparametern abhängen. (Leutenecker-Twelsiek et al., 2016)

Neben den vorgestellten Konstruktionsprinzipien und -regeln kommen auch rechnergestützte Verfahren zur Analyse und Ableitung eines auf die additive Fertigung optimierten Bauteildesigns zum Einsatz (Ponche, Kerbrat, Mognol & Hascoet, 2014). Die rechnergestützte Analyse und Optimierung werden in Kapitel 2.4 beschrieben. Darauf aufbauend werden die rechnergestützten Verfahren im Kontext der additiven Fertigung in Kapitel 2.5 vorgestellt.

2.4 Rechnergestützte Analyse und Optimierung

Die Entwicklung neuer Produktgenerationen ist meist mit einer hohen Komplexität verbunden, mit welcher der Produktentwickler konfrontiert wird (Albers, Spadiner et al., 2017). Darüber hinaus steigt die Forderung nach einer hohen Qualität sowie Individualität von Produkten bei gleichzeitiger Senkung der Entwicklungskosten. Dies stellt den Produktentwickler vor große Herausforderungen. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, ist die Nutzung innovativer Simulationsmethoden sowie die Einbindung der virtuellen Produktentwicklung in den Produktentstehungsprozess zielführend. (Albers & Nowicki, 2003) Derartige Simulationsmethoden ermöglichen es, den gesamten Produktentstehungsprozess von der Herstellung bis zum Produkt zu simulieren und somit frühzeitig in die Validierung einzubinden (Albers, Majic et al., 2020).

Im Folgenden werden die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen im Kontext der rechnergestützten Analyse und Optimierung geschaffen. Zunächst werden numerische Verfahren vorgestellt, die zur Vorhersage des physikalischen Verhaltens von Strukturen genutzt werden (siehe Kapitel 2.4.1). Darauf aufbauend folgt die allgemeine Formulierung eines Optimierungsproblems sowie ein Überblick gängiger Verfahren für deren Lösung (siehe Kapitel 2.4.2). Anschließend werden die drei Teilbereiche der Strukturoptimierung in Kapitel 2.4.3 beschrieben. Zuletzt wird ein allgemeiner, strategischer Ansatz zur Kopplung von Simulations- und Optimierungsverfahren vorgestellt (siehe Kapitel 2.4.4).

2.4.1 Numerische Verfahren

Nachfolgend wird zunächst in Kapitel 2.4.1.1 die Finite-Elemente-Methode (FEM) beschrieben. Anschließend folgt eine Einführung in die Level-Set-Methode (siehe Kapitel 2.4.1.2). Zum Abschluss wird das Mapping zur Übertragung von Daten zwischen zwei unterschiedlichen diskreten Netzen vorgestellt (siehe Kapitel 2.4.1.3).

2.4.1.1 Finite-Elemente-Methode

Mithilfe von Differentialgleichungen lassen sich strukturelle, mechanische Problemstellungen beschreiben. Werden diese Problemstellungen mit entsprechend vereinfachenden Annahmen beschrieben, können deren Lösungen durch analytische Verfahren berechnet werden. Diese Vereinfachungen sind jedoch nicht immer möglich oder zielführend, weshalb vermehrt Näherungsverfahren zum Einsatz kommen, um die Lösungen zu approximieren. (Mathiak, 2002) Zu diesen Näherungsverfahren zählt u. a. die FEM, die heutzutage als Standardwerkzeug in der Produktentwicklung angesehen wird. Die FEM ermöglicht die Lösung derartiger Differentialgleichungen und trägt zur Verkürzung der Produktentwicklungszeit sowie der damit einhergehenden -kosten bei (Brand, 2013). Im Rahmen dieser Arbeit wird die FEM im Kontext der Topologieoptimierung (siehe Kapitel 2.4.3.1) eingesetzt.

Die FEM basiert auf der Idee, dass ein komplexes Gesamtproblem in eine endliche (finite) Anzahl an Teilprobleme zerlegt wird. Anschließend wird jedes Teilproblem separat gelöst und zu einer Gesamtlösung zusammengesetzt. (Mathiak, 2002) Das dafür notwendige Vorgehen lässt sich nach Fish & Belytschko (2007) in die folgenden fünf Schritte unterteilen: Pre-Prozess, Elementweise Betrachtung, Assemblierung, Lösen der Gleichungen und Post-Prozess.

Schritt 1: Pre-Prozess

Zunächst wird das Berechnungsgebiet der zu untersuchenden Geometrie definiert und in eine finite Anzahl an Bereichen unterteilt (Vajna et al., 2018). Dadurch entsteht die Vernetzung des Berechnungsgebiets (siehe Abbildung 2.15).

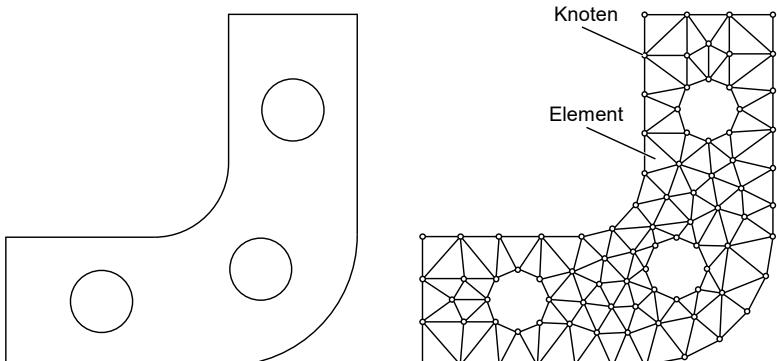


Abbildung 2.15: Diskretisierung eines Haltewinkels nach Okereke & Keates (2018): CAD-Geometrie (links) sowie diskretisierte Geometrie inklusive Knoten und Elemente (rechts)

Die finiten Elemente (FE) spiegeln die unterteilten Bereiche wider. Die Knoten definieren die räumliche Position (Koordinaten) der Elemente. Obwohl durch die Vernetzung geometrische Diskretisierungsfehler (siehe Abbildung 2.15) entstehen, wird durch die Vernetzung das Berechnungsgebiet auf eine endliche Anzahl an Auswertungspunkten (Knoten) reduziert und die Beschreibung der Problemstellung mittels Differentialgleichungen ermöglicht. Die Knoten sind daher gleichzusetzen mit der Anzahl an Unbekannten in einem Gleichungssystem. (Fish & Belytschko, 2007) Für die Vernetzung können unterschiedliche Elementtypen (1D, 2D und 3D) eingesetzt werden (Silber & Steinwender, 2005). In der Regel gilt: Je feiner die Vernetzung, desto genauer die Ergebnisse und geringer die Diskretisierungsfehler. Jedoch erhöht sich damit gleichzeitig der Rechenaufwand. (Klein, 2015) Neben der Vernetzung werden während des ersten Schritts Randbedingungen, Materialeigenschaften sowie ggfs. Nebenbedingungen festgelegt (Fish & Belytschko, 2007).

Schritt 2: Elementweise Betrachtung

Bei der elementweisen Betrachtung des Berechnungsgebiets wird zunächst für jedes Element eine partielle Differentialgleichung aufgestellt. Diese spiegelt die starke Form wider und wird auf Basis der Gleichungen zur Modellbeschreibung sowie der Randbedingungen definiert. Anschließend wird aus der starken die schwache Form gebildet, indem die Gleichungen mit einer Gewichtungsfunktion multipliziert und über das gesamte Berechnungsgebiet integriert werden. (Fish & Belytschko, 2007) Als anschauliches Beispiel zur Überführung der starken in die schwache Form wird an dieser Stelle auf Fish & Belytschko (2007) verwiesen.

Neben der Überführung werden lokale Ansatzfunktionen bestimmt, die es ermöglichen, dass lediglich an den Knoten eine Lösung der jeweiligen Gleichung vorliegen muss. Zwischen den einzelnen Knoten wird der Lösungswert interpoliert. Die Wahl der Ansatzfunktion bestimmt die Genauigkeit der Ergebnisse. Dabei gilt: Je höher die Ordnung, desto genauer das Ergebnis. Gleichzeitig bringt eine höhere Ordnung auch einen steigenden Rechenaufwand mit sich, da die Gleichungen an mehr Knoten gelöst werden müssen. (Fish & Belytschko, 2007) Einen Auszug unterschiedlicher Ansatzfunktionen und Elementtypen mit dazugehöriger Knotenzahl zeigt Abbildung 2.16.

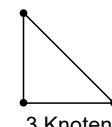
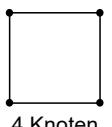
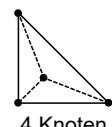
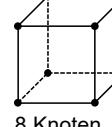
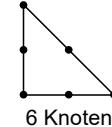
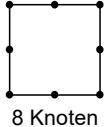
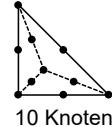
Ansatzfunktion 1. Ordnung	 3 Knoten	 4 Knoten	 4 Knoten	 8 Knoten
Ansatzfunktion 2. Ordnung	 6 Knoten	 8 Knoten	 10 Knoten	 20 Knoten

Abbildung 2.16: Ansatzfunktion und Elementtyp mit dazugehöriger Knotenanzahl nach Spiess, Oeckerath & Landvogt (2018)

Schritt 3: Assemblierung

Im dritten Schritt der FEM werden die elementweise definierten Gleichungen über das gesamte Berechnungsgebiet aufsummiert, um so die globale Problembeschreibung abzubilden und die Betrachtung von der Elementebene auf die Systemebene zu überführen. Die globale Problembeschreibung lässt sich nach Gleichung 2.1 formulieren. \mathbf{P} bezeichnet den globalen Gesamtkraftvektor, \mathbf{K} die globale Gesamtsteifigkeitsmatrix und \mathbf{U} den globalen Verschiebungsvektor. (Klein, 2015)

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} * \mathbf{U}$$

2.1

Schritt 4: Lösen der Gleichungen

Der vierte Schritt umfasst das Lösen der in Gleichung 2.1 beschriebenen globalen Problembeschreibung mithilfe direkter oder indirekter Verfahren wie beispielsweise das Gauß'sche- und Cholesky-Eliminationsverfahren sowie das Frontlösungsverfahren. Um dynamische Problemstellungen zu lösen, wird zusätzlich die Auswertung der Zeit benötigt, was durch den Einsatz expliziter oder impliziter Verfahren erfolgen kann. (Klein, 2015) Für eine tiefergehende Erläuterung der Lösung von Gleichungssystemen wird an dieser Stelle beispielsweise auf Klein (2015) oder Vajna et al. (2018) verwiesen.

Schritt 5: Post-Prozess

Abschließend werden die für den Produktentwickler relevanten Größen visualisiert und ausgewertet sowie Variablen, die nicht direkt aus der Lösung hervorgehen, berechnet. Zu diesen Variablen zählen beispielsweise Spannungen oder Dehnungen. Anhand dieser Ergebnisse wird es dem Produktentwickler ermöglicht, das Simulationsmodell zu bewerten und auf Plausibilität zu untersuchen. Des Weiteren kann der Produktentwickler das Produktdesign beurteilen und potentielle Schwachstellen identifizieren sowie mögliche Verbesserungen vornehmen, ohne einen Prototyp zu fertigen. (Albers, Majic et al., 2020) Durch den Einsatz von Optimierungsverfahren wie beispielsweise der Teilbereiche der Strukturoptimierung (siehe Kapitel 2.4.3) kann das Potential der Verbesserungen systematisch gehoben werden.

Für weitere Informationen über die beschriebenen Grundlagen hinaus wird an dieser Stelle exemplarisch auf die Werke von Fish & Belytschko (2007) und Klein (2015) verwiesen.

2.4.1.2 Level-Set-Methode

Die Level-Set-Methode ist ein numerisches Verfahren zur Darstellung und Verfolgung von sich bewegenden Rändern (Osher & Fedkiw, 2003). Die sich bewegenden Ränder repräsentieren beispielsweise eine Kurve (2D) oder Oberfläche (3D) und werden als Nullstelle (Zero-Level-Set) einer mehrdimensionalen, impliziten Funktion (Level-Set-Funktion) beschrieben. (Gibou, Fedkiw & Osher, 2018) Die Entwicklung der Level-Set-Funktion erfolgt unter Einhaltung der hyperbolischen Erhaltungssätze (Khoei, 2014). Durch die implizite Formulierung der Level-Set-Funktion werden geometrische Phänomene, wie beispielsweise entstehende Überschneidungen durch Veränderungen der Ränder mit fortschreitender Zeit, automatisch vermieden. (Gibou et al., 2018)

Eine häufig eingesetzte Level-Set-Funktion ist die sogenannte Signed-Distance-Function (SDF) ϕ und beschreibt eine vorzeichenbehaftete Abstandsfunktion (Khoei, 2014). Diese SDF kann genutzt werden, wenn der minimale Abstand a eines Punkts r zum Rand Ψ gesucht wird. Dabei gibt das Vorzeichen an, ob der untersuchte Punkt innerhalb Ψ^- oder außerhalb Ψ^+ des Rands liegt. Sämtliche Punkte, die einen Abstand von $a = 0$ aufweisen, liegen direkt auf dem Rand. Daraus lässt sich die implizite Formulierung der SDF aufstellen (siehe Gleichung 2.2). (Osher & Fedkiw, 2003)

$$\phi(x) = \begin{cases} -a(r), & x \in \Psi^- \\ 0, & x \in \partial\Psi \\ a(r), & x \in \Psi^+ \end{cases} \quad 2.2$$

In Gleichung 2.2 entspricht d dem minimalen Abstand eines Punkts \mathbf{r} zu allen weiteren Punkten \mathbf{r}_i auf dem Rand $\partial\Psi$. Der minimale Abstand lässt sich nach Gleichung 2.3 mit dem am randnächsten Punkt \mathbf{r}_c berechnen. (Osher & Fedkiw, 2003)

$$a(\mathbf{x}) = \min(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|) = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_c| \quad 2.3$$

Abbildung 2.17 zeigt beispielhaft die Level-Set-Darstellung eines sich ausbreitenden Rands. Darin ist der initial definierte Rand in Form zweier Kreise (schwarze Linien) dargestellt (siehe Abbildung 2.17 links). Die SDF wird durch die türkise Isofläche repräsentiert. Mit fortschreitender Zeit breitet sich der Rand für $\phi_i > \phi_0$ in Normalenrichtung aus (siehe Abbildung 2.17 mittig und rechts) und die Kreise vergrößern sich. Für jeden Zeitschritt wird nun der minimale Abstand aller Punkte in einer Ebene berechnet und der dadurch entstehende Rand bestimmt. Aufgrund der impliziten Formulierung der SDF verbinden sich die beiden separierten Ränder zu einem gemeinsamen Rand. Geometrische Phänomene wie Überschneidungen werden somit automatisch behandelt und können nicht auftreten.

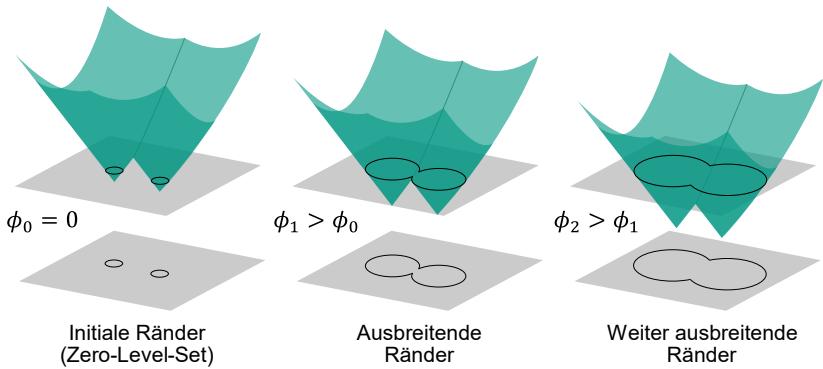


Abbildung 2.17: Level-Set-Darstellung eines sich ausbreitenden Rands nach Gibou et al. (2018)

Für weiterführende Informationen bezüglich der mathematischen Formulierungen und Hintergründe wird an dieser Stelle exemplarisch auf die Werke von Gibou et al. (2018), Khoei (2014) und Osher et al. (2003) verwiesen.

2.4.1.3 Mapping

In Bereichen wie der Automobil- oder Flugzeugbranche werden multidisziplinäre Simulationen immer wichtiger. Diese Simulationen laufen meist gleichzeitig ab und tauschen wiederholt Daten (z. B. Materialeigenschaften oder Faserorientierungen) in vordefinierten Zeit- oder Iterationsschritten aus. Sie basieren häufig auf Verfahren wie der vorgestellten FEM (siehe Kapitel 2.4.1.1), weshalb die auszutauschenden Daten in den jeweils im FE-Netz vorliegenden Knoten oder Elementen hinterlegt sind. Sofern keine direkte Schnittstelle innerhalb der eingesetzten Simulationsprogramme besteht, können die Daten mithilfe von Mapping-Verfahren zwischen zwei unterschiedlichen FE-Netzen ausgetauscht werden. Das Tool MpCCI MapLib des Fraunhofer Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen (SCAI) ermöglicht beispielsweise ein derartiges Mapping durch geometrische Zuordnungen und Interpolationen. (Wirth et al., 2017) Für dieses Mapping werden stets zwei FE-Netze (siehe Abbildung 2.18) benötigt: Das Referenznetz, das die zu übertragenden Daten beinhaltet, und das Zielnetz, auf das die Daten übertragen werden sollen (Spiess et al., 2018). Die Begriffe Referenz- und Zielnetz sind aufgrund der Analogie zum Referenz- und Zielsystem des Beschreibungsmodells der PGE – Produktgenerationsentwicklung (siehe Kapitel 2.1.2) entsprechend in Anlehnung daran gewählt.

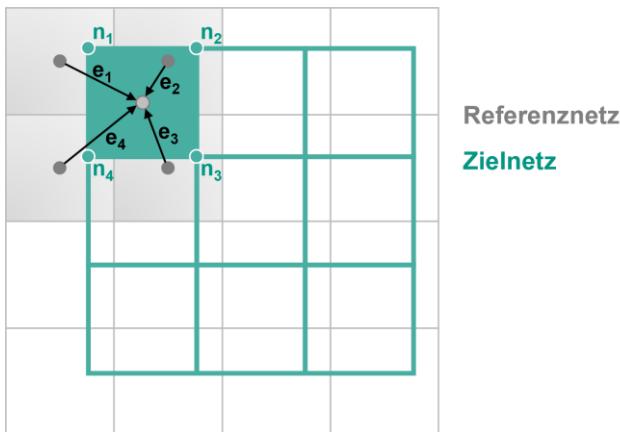


Abbildung 2.18: Weighted Element Mapping: Darstellung der Funktionsweise anhand zweier FE-Netze nach Revfi (2022)

Beide FE-Netze müssen sich räumlich überlappen, damit das Mapping auf Basis der Knoten-Koordinaten bzw. Elemente möglich ist. Darüber hinaus muss zur Durchführung des Mappings bekannt sein, ob die zu übertragenden Daten an den

Knoten oder in den Elementen vorliegen und in welchem Gebiet nach Knoten im Zielnetz zum Mapping gesucht werden soll. (Spiess et al., 2018)

Vor der eigentlichen Datenübertragung wird die relative Position der beiden FE-Netze bestimmt. Diese Bestimmung wird als Nachbarschaftssuche bezeichnet. Dabei wird für jeden Knoten oder jedes Element eines Netzes mindestens ein Partnerknoten oder -element bestimmt. Die genaue Art der Nachbarschaftssuche hängt jedoch vom verwendeten Mapping-Algorithmus ab. Im Rahmen dieser Arbeit kommt das Weighted Element Mapping zum Einsatz (siehe Abbildung 2.18). Beim Weighted Element Mapping werden während der Nachbarschaftssuche zunächst ausgehend von einem Element des Zielnetzes die überlappenden Elemente des Referenznetzes gesucht. In Abbildung 2.18 ist dies anhand des türkisenen Elements sowie der vier grauen Elemente dargestellt. Anschließend werden die Abstände (siehe Vektoren in Abbildung 2.18) der Mittelpunkte der überlappenden Elemente des Referenznetzes zum Mittelpunkt des Elements im Zielnetz berechnet. Die Datenübertragung zwischen den FE-Netzen wird anhand einer gewichteten Summation der Daten der überlappenden Elemente des Referenznetzes durchgeführt. Dabei gilt: Je mehr sich ein Element des Referenznetzes mit dem Element des Zielnetzes überlappt, umso stärker wird dieses gewichtet. Es handelt sich somit um eine reziproke Gewichtung anhand der zuvor berechneten Abstände der Elementmittelpunkte. Dieses Vorgehen wird durchgeführt, bis alle Elemente im Zielnetz Daten des Referenznetzes erhalten haben. (Spiess et al., 2018)

Für zusätzliche Informationen zu weiteren Mapping-Algorithmen wird an dieser Stelle auf die Dokumentation von MapLib verwiesen (Spiess et al., 2018).

2.4.2 Optimierungsverfahren

Unter Optimierung wird das Vorgehen zur Bestimmung einer optimalen Lösung bezüglich einer gegebenen Problemstellung verstanden (Harzheim, 2019). Dabei sind die Optimierungsverfahren, wie beispielsweise die Strukturoptimierung (siehe Kapitel 2.4.3), als Entwicklungswerzeug anzusehen und dort anwendbar, wo es Verbesserungspotential gibt (Schumacher, 2020). Im Kontext der Produktentwicklung bedeutet Optimierung somit, das Design eines Produkts derart zu verändern, dass es die definierten Anforderungen bestmöglich mit den verfügbaren Ressourcen erfüllt (Kirsch, 1993).

Der Optimierungsprozess ist generell manuell einsetzbar, indem beispielsweise vom Produktentwickler Parameter händisch angepasst werden, wodurch jedoch ein hoher Zeitaufwand entstehen kann. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahr-

zehnten eine Vielzahl an unterstützenden mathematischen Algorithmen und Optimierungstools entwickelt. Da die daraus erzeugten Ergebnisse stets vom Modellaufbau sowie den gewählten Einstellungen abhängig sind und einer Interpretation bedürfen, kann der Produktentwickler nie vollständig aus dem Optimierungsprozess ausgeschlossen werden. (Harzheim, 2019) Vielmehr ist die Aufgabe des Produktentwicklers, die Optimierungsverfahren bestmöglich und zielgerichtet zum Einsatz zu bringen. Dazu gilt es, alle Anforderungen an ein Produkt im Optimierungsprozess zu berücksichtigen, um eine Einschätzung hinsichtlich Optimalität des Ergebnisses treffen zu können (Schumacher, 2020).

Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf die simulationsgestützte Optimierung im Rahmen der Strukturoptimierung (siehe Kapitel 2.4.3). Um ein Verständnis für die simulationsgestützte Optimierung zu schaffen, wird nachfolgend zunächst die allgemeine Formulierung eines Optimierungsproblems (siehe Kapitel 2.4.2.1) vorgestellt. Darauf aufbauend folgen die Lösungsansätze der mathematischen Programmierung (siehe Kapitel 2.4.2.2), Optimalitätskriterien (siehe Kapitel 2.4.2.3) sowie stochastische Verfahren (siehe Kapitel 2.4.2.4).

2.4.2.1 Formulierung eines Optimierungsproblems

Eine Optimierungsaufgabe besteht in der Regel darin, eine Zielfunktion $f(\mathbf{x})$, die abhängig von den Designvariablen \mathbf{x} ist, unter Einhaltung gegebener Randbedingungen zu minimieren (Schumacher, 2020). Maximierungsaufgaben werden dabei zumeist in Minimierungsaufgaben mithilfe der geltenden Beziehung $\max(f(\mathbf{x})) = -\min(-f(\mathbf{x}))$ überführt (Harzheim, 2019). Nach Schumacher (2020) wird eine Optimierungsaufgabe wie folgt definiert:

$$\text{minimiere } f(\mathbf{x}) \quad 2.4$$

$$\text{sodass } g_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, m_g \quad 2.5$$

$$h_k(\mathbf{x}) = 0, \quad k = 1, m_h \quad 2.6$$

$$x_i^u \leq x_i \leq x_i^o, \quad i = 1, n \quad 2.7$$

Die Randbedingungen für die Optimierungsaufgabe werden durch die Ungleichheitsrestriktion $g_j(\mathbf{x})$ und die Gleichheitsrestriktion $h_k(\mathbf{x})$ beschrieben. Des Weiteren entsprechen x_i^u und x_i^o der unteren und oberen Grenze der zulässigen Werte der Designvariablen, die durch den Vektor in Gleichung 2.8 definiert sind. (Schumacher, 2020)

$$\boldsymbol{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad 2.8$$

Die Designvariablen stellen die Modellparameter dar, welche die Eigenschaften des Optimierungsproblems beschreiben und variiert werden können (Harzheim, 2019). Jede Kombination aus Designvariablen, welche die Randbedingungen erfüllt, entspricht dabei einer zulässigen Lösung (Jarre & Stoer, 2019).

Um eine Optimierungsaufgabe lösen zu können, muss sichergestellt werden, dass die Zielfunktion ein Minimum besitzt. Hierfür kann die notwendige Bedingung aus Gleichung 2.9 überprüft werden (Jarre & Stoer, 2019). Alternativ kann die Hesse-Matrix herangezogen werden. Wenn die Hesse-Matrix für einen Satz an Designvariablen \boldsymbol{x} positiv definit ist, existiert ein Minimum für die Zielfunktion. (Schumacher, 2020)

$$\nabla f(\boldsymbol{x}) = 0 \quad 2.9$$

Ein gemäß der Gleichungen 2.4 bis 2.7 restringiertes Optimierungsproblem kann durch die Nutzung der Lagrange-Funktion $L(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\lambda})$ in Gleichung 2.10 überführt werden (Schumacher, 2020).

$$L(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\boldsymbol{x}) + \sum_{j=1}^{m_g} \lambda_j (g_j(\boldsymbol{x}) + \mu_j^2) + \sum_{k=1}^{m_h} \lambda_k h_k(\boldsymbol{x}) \quad 2.10$$

Dabei wird der Einfluss der Restriktionen $g_j(\boldsymbol{x})$ und $h_k(\boldsymbol{x})$ durch die jeweiligen Lagrange-Multiplikatoren λ_j und λ_k widergespiegelt. Gleichung 2.10 gilt als lösbar, wenn $f(\boldsymbol{x})$, $g_j(\boldsymbol{x})$ und $h_k(\boldsymbol{x})$ bezüglich aller Designvariablen zweifach stetig differenzierbar sind. Um die Ungleichheitsrestriktion wie eine Gleichheitsrestriktion zu behandeln, werden sogenannte Schlupfvariablen μ_j eingeführt. (Schumacher, 2020)

Die Gleichungen 2.4 bis 2.7 lassen sich zumeist nicht direkt lösen, weshalb Verfahren eingesetzt werden, die ausgehend von einem Startdesign \boldsymbol{x}^0 das Design iterativ anhand einer sogenannten Redesign-Regel (siehe Gleichung 2.11) anpassen. Dabei entspricht n der Anzahl an Iterationen, die durchgeführt werden. Anhand der Suchrichtung \boldsymbol{S} und der Schrittweite α wird das Design so lange verändert, bis ein definiertes Abbruchkriterium erreicht ist. Dieses kann beispielsweise eine maximale Anzahl an Iterationen oder das Erreichen von Konvergenz beschreiben. (Schumacher, 2020)

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^n + \alpha \mathbf{S}^n$$

2.11

2.4.2.2 Mathematische Programmierung

Ein Ansatz zur Lösung von Optimierungsproblemen stellt die mathematische Programmierung dar. Dieser Ansatz ist universell einsetzbar und hat sich als ein Standardwerkzeug in der Praxis, beispielsweise in der Strukturowptimierung (siehe Kapitel 2.4.3), etabliert (Harzheim, 2019). Die zugrunde liegende Idee der mathematischen Programmierung besteht darin, dass das Optimum ausgehend von einem Startdesign \mathbf{x}^0 in einem iterativen Vorgehen analog zu Gleichung 2.11 unter Einhaltung der Randbedingungen bestimmt wird (Schumacher, 2020). Zur effizienten Umsetzung dieser Idee wurden in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren entwickelt (Kirsch, 1993). Um einen Einblick in die Verfahren zu erhalten, wird an dieser Stelle exemplarisch auf die Werke von Harzheim (2019), Jarre & Stoer (2019), Meske (2007) und Schumacher (2020) verwiesen.

Eine gängige Einteilung dieser Verfahren ist anhand deren Ordnung möglich. So wird unterschieden zwischen nullter, erster und zweiter Ordnung. Während Verfahren nullter Ordnung lediglich die Funktionswerte zur Suche des Optimums nutzen, wird bei Verfahren erster Ordnung zusätzlich die Ableitung der Zielfunktion miteinbezogen. Verfahren zweiter Ordnung benötigen darüber hinaus die Auswertung der Hesse-Matrix. In der Praxis werden vorwiegend Verfahren erster und zweiter Ordnung eingesetzt und basieren grundlegend auf der Berechnung und Auswertung von Gradienten, um die Suchrichtung, in der das Optimum vermutet wird, zu bestimmen. (Harzheim, 2019) Dabei werden die partiellen Ableitungen der Zielfunktion und Randbedingungen bezüglich der Designvariablen \mathbf{x} berechnet. Dadurch kann der Einfluss der Designvariablen auf die Zielfunktion anhand der Ergebnisse bestimmt werden, weshalb dies als Sensitivitätsanalyse bezeichnet wird. (Schumacher, 2020)

Ein Verfahren erster Ordnung stellt die Methode des steilsten Abstiegs bereit. Ausgehend von einem Startpunkt wird in jeder Iteration die Suchrichtung anhand des Gradienten bestimmt, der den negativsten Wert aufweist (siehe Gleichung 2.12). Das Vorgehen wird durchgeführt, bis kein negativer Gradient mehr vorliegt und somit ein Minimum erreicht ist. (Schumacher, 2020)

$$\mathbf{S}^{n+1} = -\nabla f(\mathbf{x}^n)$$

2.12

Da dieses Vorgehen ausschließlich die aktuelle Iteration berücksichtigt, entsteht häufig ein Zick-Zack-Kurs, bis das Minimum erreicht ist. Dafür wird eine erhöhte Anzahl an Iterationen und somit Rechenaufwand benötigt, wodurch die Verfahren ineffizient werden. (Harzheim, 2019) Fletcher & Reeves (1964) entwickelten daher das Verfahren zur Methode der konjugierten Gradienten weiter. Bei diesem Verfahren wird dasselbe Vorgehen wie zuvor genutzt, allerdings mit der Erweiterung um die Information der vorherigen Iteration zur Berechnung der Suchrichtung (siehe Gleichung 2.13 und Gleichung 2.14). Durch diese Erweiterung kann das Konvergenzverhalten und somit die Effizienz verbessert werden. (Fletcher & Reeves, 1964)

$$\mathbf{S}^{n+1} = -\nabla f(\mathbf{x}^n) + \beta^n \mathbf{S}^n \quad 2.13$$

$$\text{mit } \beta^n = \frac{|\nabla f(\mathbf{x}^n)|^2}{|\nabla f(\mathbf{x}^{n-1})|^2} \quad 2.14$$

Die beiden vorgestellten Verfahren nähern sich einem Minimum ausgehend von jeweils einem Startpunkt an. Häufig weisen Problemstellungen in der Praxis jedoch nicht nur ein Minimum, sondern mehrere Minima auf, von denen eines das globale Minimum darstellt (Schumacher, 2020). Um mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit das globale Minimum zu finden, können die vorgestellten Verfahren gleichzeitig ausgehend von einer Vielzahl an Startpunkten durchgeführt werden (Harzheim, 2019).

Bei komplexen Problemstellungen weisen die Gradienten-basierten Verfahren trotz ihrer universellen Einsetzbarkeit einen Nachteil auf. In jeder Iteration müssen die Gradienten berechnet werden. Diese Berechnung kann abhängig von der Problemstellung zu hohem Zeit- und Rechenaufwand führen. (Harzheim, 2019) Abhilfe kann die Formulierung eines Optimalitätskriteriums schaffen, das in nachfolgendem Kapitel 2.4.2.3 beschrieben wird.

2.4.2.3 Optimalitätskriterien

Die Optimalitätskriterien stellen einen weiteren Ansatz zur Lösung eines Optimierungsproblems dar (Harzheim, 2019). Die Ursprünge der Optimalitätskriterien gehen auf die analytischen Ansätze von Prager & Shield (1968) und die numerischen Ansätze durch Venkayya, Khot & Reddy (1968) zurück. Im Vergleich zur mathematischen Programmierung (siehe Kapitel 2.4.2.2) werden keine Gradienten zur iterativen Suche eines Optimums genutzt, weshalb der Rechenaufwand häufig geringer und Konvergenz nach weniger Iterationen erreicht wird (Harzheim, 2019). Aufgrund dieser Effizienz hinsichtlich Konvergenz kommen die optimalitätskriterienbasierten Verfahren auch im Kontext der Topologieoptimierung (siehe Kapitel 2.4.3.1) zum Einsatz (Bendsøe, Bendsøe & Sigmund, 2003).

Um ein Optimalitätskriterium aufzustellen, muss vorausgesetzt sein, dass sich im definierten Suchbereich ein Optimum befindet und dieses mathematisch beschreibbar ist (Harzheim, 2019). Somit gilt, dass eine Kombination an Designvariablen existieren muss, die ein Optimum abbildet. Wenn eine solche Kombination vorliegt, wird eine auf Rekursiv-Formeln basierende Redesign-Regel aufgestellt. Diese definiert, in welchem Ausmaß die Designvariablen in jeder Iteration verändert werden, um sich dem Optimum anzunähern. (Schumacher, 2020) In der Praxis liegt jedoch nicht für jegliche Problemstellung eine derartige Kombination an Designvariablen vor, die ein Optimum beschreiben. Daher sind die optimalitätskriterienbasierten Verfahren im Vergleich zu jenen der mathematischen Programmierung nur für spezielle Anwendungsfälle und Zielfunktionen anwendbar. (Harzheim, 2019)

Ein gängiges Beispiel für den Einsatz von Optimalitätskriterien ist das Prinzip vom voll beanspruchten Tragwerk (Schmidt, 1958). Für weitere Erläuterungen und Beispiele wird an dieser Stelle exemplarisch auf die Werke von Baier, Seeßelberg & Specht (1994) und Kirsch (1993) verwiesen.

2.4.2.4 Stochastische Verfahren

Die zuvor beschriebenen Optimierungsverfahren müssen gewisse Voraussetzungen erfüllen, um eingesetzt werden zu können. Während die Verfahren der mathematischen Programmierung (siehe Kapitel 2.4.2.2) die Bildung von Gradienten voraussetzt, muss bei den optimalitätskriterienbasierten Verfahren (siehe Kapitel 2.4.2.3) ein Kriterium formulierbar sein. Beides ist jedoch nicht für sämtliche Optimierungsprobleme gegeben, weshalb ein weiterer Ansatz zur Suche eines Optimums existiert. Dieser wird durch die stochastischen Verfahren beschrieben, welche die definierten Designvariablen nach einem gewissen Schema, jedoch stets mit einer zufälligen Komponente, variieren (Harzheim, 2019). Die stochastischen Verfahren benötigen eine Vielzahl an Iterationen, um Konvergenz zu erreichen (Schumacher, 2020). Aus diesem Grund werden sie vorwiegend eingesetzt, wenn über das Systemverhalten wenig bekannt und der Rechenaufwand zur Auswertung der Zielfunktion gering ist (Troll, 2015). Durch die zufällige Komponente bei der Variation der Designvariablen sind die stochastischen Verfahren in der Lage aus lokalen Minima auszubrechen. Dadurch weisen sie im Vergleich zu den bereits vorgestellten Verfahren der mathematischen Programmierung und Optimalitätskriterien eine höhere Wahrscheinlichkeit auf, ein globales Optimum zu finden. (Schumacher, 2020)

Ein bekanntes Beispiel für ein stochastisches Verfahren ist die Monte Carlo Methode (Sobol, 1994). Als weiteres Beispiel können die evolutionären Algorithmen genannt werden, die auch im Rahmen der Strukturompimierung eingesetzt werden. Die evolutionären Algorithmen basieren auf dem biologischen Selektionsprozess *Survival of the Fittest*, in dem lediglich jene Individuen überleben, die sich am besten

an die Umwelt anpassen (Spencer, 1864). Für die Lösung eines Optimierungsproblems wird zunächst eine gewisse Anzahl an Individuen definiert. Jedes Individuum repräsentiert eine zufällig gewählte Kombination an Designvariablen. Anschließend wird die Zielfunktion für jedes Individuum bestimmt und bewertet. Anhand dieser Bewertung wird die nächste Generation durch Mutation und Rekombination der besten Individuen erzeugt. Mutation beschreibt dabei die zufällige Variation von Designvariablen eines Individuums. Als Rekombination wird die Kombination einzelner Designvariablen zweier Individuen bezeichnet. Das Vorgehen, bestehend aus Mutation und Rekombination, wird so lange fortgesetzt, bis ein Abbruch- oder Konvergenzkriterium erreicht ist. (Weicker, 2015)

Für die stochastischen Optimierungsverfahren existiert eine Vielzahl an weiteren Verfahren. Als Beispiele sind an dieser Stelle die *Particle Swarm Optimization* und das *Simulated Annealing* zu nennen (Kennedy & Eberhart, 1995; Kirkpatrick, Gelatt & Vecchi, 1983).

2.4.3 Strukturoptimierung

Die vorliegende Arbeit nutzt die Optimierung als unterstützendes Werkzeug, um dem Produktentwickler bei der Gestaltfindung eines verbesserten Designs eine Hilfestellung zu leisten. Die in Kapitel 2.4.2 vorgestellten Optimierungsverfahren werden nachfolgend im Kontext der Strukturoptimierung betrachtet.

Bei der Strukturoptimierung wird das zu optimierende System stets durch ein Modell abgebildet, das dessen mechanisches Verhalten beschreibt (Schumacher, 2020). Derartige Modelle weisen drei Hauptmerkmale auf. Das *Abbildungsmerkmal* besagt, dass Modelle stets eine Repräsentation von Originalen sind. Durch das *Verkürzungsmerkmal* wird ausgesagt, dass Modelle nicht alle, sondern lediglich jene Attribute abbilden, die für den Ersteller oder Nutzer (z. B. Produktentwickler) der Modelle sinnvoll erscheinen. Das *pragmatische Merkmal* beschreibt die Zweckgebundenheit von Modellen. Somit enthält jedes Modell ausschließlich jene Informationen, die für den angedachten Zweck relevant sind. (Stachowiak, 1973) Diese Hauptmerkmale beschränken sich nicht ausschließlich auf rechnergestützte Methoden, sondern gelten auch für die vorgestellten Modelle im Rahmen des Produktentstehungsprozesses (siehe Kapitel 2.1).

Analog zu den beschriebenen Optimierungsverfahren (siehe Kapitel 2.4.2) werden auch bei der Strukturoptimierung die gewählten Designvariablen derart variiert, dass ein optimiertes Design entsteht. Als optimiert wird hierbei nicht das absolute (globale) Optimum bezeichnet, sondern vielmehr ein relatives Optimum in Bezug auf

die Ausgangssituation (Vajna et al., 2018). Das bedeutet, dass unter den gegebenen Randbedingungen das abgeleitete Design die Zielfunktion besser erfüllt als das Referenzdesign. Um verbesserte Designs abzuleiten, stehen dem Produktentwickler unterschiedliche Optimierungsalgorithmen zur Verfügung, die entscheidend für die Effizienz zur Lösung der Optimierungsaufgabe sind (Baier et al., 1994). Vorwiegend können hierbei sensitivitäts- und optimalitätskriterienbasierte Algorithmen analog zu Kapitel 2.4.2.2 und 2.4.2.3 unterschieden werden.

Die Strukturoptimierung ist in drei Teilbereiche (siehe Abbildung 2.19) gegliedert: *Topologie-, Form- und Parameteroptimierung* (Harzheim, 2019).

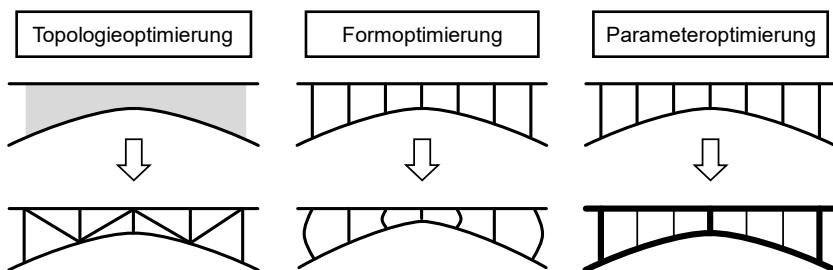


Abbildung 2.19: Darstellung der drei Teilbereiche der Strukturoptimierung nach Rieg, Hackenschmidt & Alber-Laukant (2019)

Während die Topologieoptimierung in einem definierten Gebiet neue Strukturen ausbildet, variiert die Formoptimierung lediglich die Gestalt der bestehenden Strukturen und die Parameteroptimierung ausschließlich vordefinierte Werte wie beispielsweise die Strebenabmessungen (Harzheim, 2019). Alle drei Teilbereiche sind dem Formleichtbau (siehe Kapitel 2.2.2) zugeordnet und können in unterschiedlichen Phasen im Produktentstehungsprozess (siehe Kapitel 2.1) eingesetzt werden, um ein Produktdesign zu optimieren. Bezogen auf das iPeM sind an dieser Stelle die Phasen *Ideen finden* sowie *Prinzip und Gestalt modellieren* hervorzuheben. So lässt sich beispielsweise die Topologieoptimierung in diesen Phasen nutzen, um die Kreativität anzuregen oder initiale Designvorschläge unter Berücksichtigung der Hauptlastpfade zu erstellen (Albers et al., 2021).

Auch wenn sich die drei Teilbereiche voneinander abgrenzen lassen, wird das größte Leichtbaupotential erzielt, wenn die drei Teilbereiche iterativ und nicht einzeln angewendet werden (Albers, Majic et al., 2020). Jeder der drei Teilbereiche (siehe Kapitel 2.4.3.1 bis 2.4.3.3) wird nachfolgend vorgestellt.

2.4.3.1 Topologieoptimierung

Die Verfahren der Topologieoptimierung sind in eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungsansätze gegliedert (Sigmund & Maute, 2013). Dazu zählen beispielsweise die in Kapitel 2.4.1.2 beschriebene Level-Set-Methode (Allaire, Jouve & Toader, 2002, 2004; M. Y. Wang, Wang & Guo, 2003) und Topological Derivative (Sokolowski & Zochowski, 1999), die in Kapitel 2.4.2.4 beschriebenen Evolutionären Algorithmen (Xie & Steven, 1993), der Phasenfeld-Ansatz (Bourdin & Chambolle, 2003; Quarti et al., 2013) sowie die dichtebasierter Verfahren (Bendsøe, 1989; Mlejnek, 1992; Zhou & Rozvany, 1991). All diese Lösungsansätze bestimmen und variieren die Anzahl, Lage und Form von Löchern sowie den Aufbau der Struktur in einem definierten Bauraum. Damit wird das Ziel verfolgt, die bestmögliche Materialverteilung in einem definierten Designraum für gegebene Randbedingungen und Lasten zu erzielen. (Bendsøe et al., 2003) Im Sinne des C&C²-Ansatzes (siehe Kapitel 2.1.3) bedeutet dies, dass die Reststruktur durch Optimierung der Tragstruktur minimiert wird. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kommt die dichtebasierte Topologieoptimierung zum Einsatz, weshalb diese nachfolgend näher behandelt werden.

Die dichtebasierte Topologieoptimierung nutzt zumeist die FEM (siehe Kapitel 2.4.1.1) zur Diskretisierung des Bauraums, um eine endliche Anzahl an lösbarer Teilproblemen zu erzeugen (Bendsøe et al., 2003). Gleichzeitig dienen die dadurch entstehenden FE i als Designvariablen x , die im Laufe der Optimierung variiert werden, um so einen optimierten Designvorschlag zu erzeugen (Sigmund & Maute, 2013). Als Zielfunktionen kommen dabei häufig die Verschiebung von Eigenfrequenzen, Minimierung der Masse oder Maximierung der Steifigkeit zum Einsatz. Besonders letztere in Verbindung mit einer Volumenrestriktion stellt ein gängiges Optimierungsproblem dar. (Harzheim, 2019) Daher wird dieses Optimierungsproblem nachfolgend als exemplarisches Beispiel zur Beschreibung des Vorgehens der dichtenbasierter Topologieoptimierung genutzt.

Zunächst gilt es, die Zielfunktion in mathematischer Form zu beschreiben. Um, statt eines Maximierungsproblems ein Minimierungsproblem zu lösen, wird auf den Kehrwert der Steifigkeit, die Nachgiebigkeit, zurückgegriffen. Dadurch kann aus Gleichung 2.1 die in Gleichung 2.15 beschriebene Zielfunktion abgeleitet werden. \mathbf{P} beschreibt darin den Vektor der äußeren Kräfte und \mathbf{U} den Vektor der Verschiebungen. (Bendsøe et al., 2003)

$$\text{minimiere } f(\mathbf{x}) = \mathbf{P}^T \mathbf{U}$$

2.15

Neben der Zielfunktion muss der Designraum inklusive Randbedingungen definiert werden (Bendsøe et al., 2003). In Abbildung 2.20 ist exemplarisch eine graphische Darstellung eines Topologieoptimierungsproblems zu sehen. Darin ist P (Vektor der äußereren Kräfte), eine Lagerung und der Designraum Ω enthalten. Im Laufe der Optimierung wird der Designraum auf das restriktierte Volumen V reduziert. Der Designraum wird dabei durch die FE repräsentiert. Zusätzlich ist in Abbildung 2.20 ein Bereich ohne Material sowie ein Bereich mit festem, nicht veränderbarem Material (non-Designraum) gezeigt. Da beide nicht zum Designraum gehören, dürfen sie während der Optimierung nicht verändert werden (Bendsøe et al., 2003).

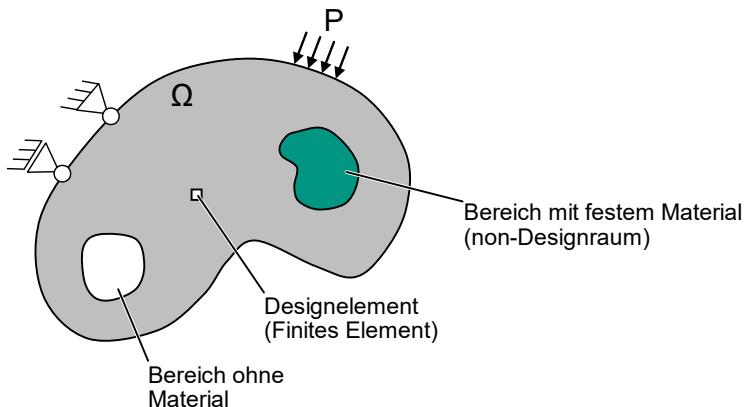


Abbildung 2.20: Graphische Darstellung eines Topologieoptimierungsproblems
nach Ibhadode, Zhang, Rahnama, Bonakdar & Toyserkani (2020)

Um das Optimierungsproblem zu lösen und somit eine Materialverteilung Ω^{mat} anhand des verfügbaren Volumens V zu erzielen, die eine möglichst geringe Nachgiebigkeit aufweist, werden die Designvariablen x variiert. Im Falle der dichtebasierten Topologieoptimierung sind die Designvariablen durch den E-Modul E_i bzw. die fiktive Dichte ρ_i eines jeden FE i beschrieben. Konkret bedeutet dies, dass durch den Optimierungsalgorithmus entschieden wird, welches FE einen Beitrag zur Bildung der lasttragenden Struktur leistet. Somit kann jedes FE zwei mögliche Zustände annehmen: Kein Material, repräsentiert durch einen E-Modul von 0, oder Vollmaterial, beschrieben durch den E-Modul E^0 des gewählten Materials. Dieser Zusammenhang ist Gleichung 2.16 zu entnehmen. (Bendsøe et al., 2003)

$$E_i = 1_{\Omega^{mat}} E_i^0, 1_{\Omega^{mat}} = \begin{cases} 1 & \text{für } x \in \Omega^{mat} \\ 0 & \text{für } x \in \Omega / \Omega^{mat}, \int_{\Omega} 1_{\Omega^{mat}} d\Omega \leq V \end{cases} \quad 2.16$$

Bei Gleichung 2.16 handelt es sich um ein sogenanntes „0-1“-Problem, da der E-Modul eines jeden FE ausschließlich „0“ oder „1“ annehmen darf (Harzheim, 2019). Ein häufig angewandter Ansatz zur iterativen Lösung dieses Problems besteht darin, die ganzzahlige Variable (im vorliegenden Beispiel $1_{\Omega^{mat}}$) durch eine kontinuierliche Variable zu ersetzen und einen Straffaktor einzuführen, der die Lösung in Richtung der diskreten Werte „0“ und „1“ lenkt (Bendsøe et al., 2003). Für die dichtegebasierte Topologieoptimierung wurde daher der SIMP-Ansatz entwickelt. SIMP ist ein Akronym und steht für *Solid Isotropic Material with Penalization*. (Bendsøe & Kikuchi, 1988) Beim SIMP-Ansatz wird $1_{\Omega^{mat}}$ durch die normierte fiktive Dichte $\frac{\rho(x)}{\rho_0}$ inklusive Straffaktor p ersetzt. ρ_0 entspricht der Referenzdichte mit einem Wert von 1. Aus Gleichung 2.16 ergibt sich somit Gleichung 2.17. (Bendsøe et al., 2003)

$$E_i(x) = \left(\frac{\rho(x)}{\rho_0} \right)^p E_i^0, 0 \leq \left(\frac{\rho(x)}{\rho_0} \right) \leq 1, p > 1, \int_{\Omega} \frac{\rho(x)}{\rho_0} d\Omega \leq V \quad 2.17$$

Durch die kontinuierliche Beschreibung der Designvariable werden die Werte des E-Moduls eines jeden FE im Laufe der Optimierung zwischen 0 und E_i^0 interpoliert. Um am Ende der Optimierung jedoch einen Designvorschlag zu erhalten, der lediglich aus FE besteht, die den Wert 0 oder E_i^0 aufweisen, werden die interpolierten Zwischenwerte anhand des Strafffaktors p bestraft. Eine Wahl des Strafffaktors größer 1 bestraft die Zwischenwerte derart, dass der Steifigkeitszugewinn im Vergleich zur notwendigen Masse gering ausfällt und somit nicht zielführend ist. Für das in Abbildung 2.20 beispielhaft dargestellte Optimierungsproblem führt ein Strafffaktor von drei zu den besten Ergebnissen. (Harzheim, 2019) Ein möglicher Designvorschlag für das vorgestellte Optimierungsproblem ist Abbildung 2.21 zu entnehmen. Darin entspricht Ω^{mat} dem Designvorschlag bestehend aus jenen FE, die den Wert E^0 aufweisen.

Um einen derartigen Designvorschlag für die beispielhafte Steifigkeitsoptimierung zu erhalten, wird während der Optimierung in jeder Iteration die sogenannte Designantwort mithilfe der FEM ausgewertet. Diese kann beispielsweise die Dehnungsenergie sein, die ein Maß für die Nachgiebigkeit darstellt. Auf Basis dieser Designantwort wird für jedes FE entschieden, ob die fiktive Dichte (Designvariable) zu erhöhen oder zu verringern ist, um eine steifere Struktur zu erreichen. (Albers, Majic et al., 2020) Für diese Entscheidung, in welcher Art und Weise eine Designvariable

anzupassen ist, kommen vorwiegend zwei Ansätze zum Einsatz: *Optimalitätskriterienbasiert* und *sensitivitätsbasiert* (Harzheim, 2019).

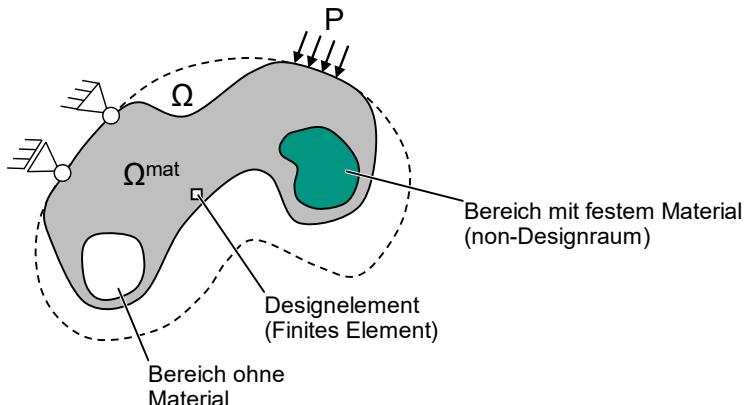


Abbildung 2.21: Beispielhaftes Ergebnis des Optimierungsproblems aus Abbildung 2.20 nach Ibhadode et al. (2020)

Beim optimalitätskriterienbasierten Ansatz wird speziell für den Anwendungsfall ein Optimalitätskriterium (siehe Kapitel 2.4.2.3) definiert, auf Basis dessen die Zielfunktion in einer vorgegebenen Anzahl an Iterationen erreicht wird. Dieser Ansatz zeichnet sich durch seine Recheneffizienz aus. (Dassault Systèmes, 2017) Die Recheneffizienz ist darauf zurückzuführen, dass die Designvariablen für jedes FE auf Basis von lokalen Zielgrößen der Designantwort aktualisiert werden. Diese Aktualisierung findet ausschließlich anhand des definierten Optimalitätskriteriums statt und ist dabei unabhängig von Änderungen anderer FE. (Bendsøe et al., 2003) Zusätzlich zum Optimalitätskriterium wird eine Redesign-Regel (vgl. Kapitel 2.4.2.3) benötigt, anhand derer die Designvariablen angepasst werden. Wie in Kapitel 2.4.2.3 beschrieben, führt dies jedoch dazu, dass der optimalitätskriterienbasierte Ansatz lediglich für bestimmte Problemklassen geeignet und nicht allgemein anwendbar ist. (Harzheim, 2019) So lassen sich nicht jegliche Nebenbedingungen in Form von zusätzlichen Beschränkungen ohne weiteres berücksichtigen, um die gewünschten Anforderungen realer Anwendungen abzubilden (Sigmund & Maute, 2013). Zu solchen Nebenbedingungen zählen beispielsweise die minimale oder maximale Wandstärke, die Einführung einer Entformungsrichtung oder eine globale Spannungsrestriktion. Die minimale bzw. maximale Wandstärke zielt darauf ab, dass keine filigranen bzw. zu dicken Strukturen erzeugt werden. Die Entformungsrichtung verhindert hingegen die Entstehung von Hinterschnitten und Hohlprofilen im Designvorschlag, die beispielsweise bei Gussbauteilen zu Problemen führen können. Die

globale Spannungsrestriktion verfolgt das Ziel, dass im erzeugten Designvorschlag kein Materialbereich vorhanden ist, der eine zulässige Maximalspannung (z. B. Dehngrenze $R_{p0,2}$) überschreitet. (Harzheim, 2019)

Damit solche Nebenbedingungen in einer Topologieoptimierung Berücksichtigung finden, kann der sensitivitätsbasierte Ansatz eingesetzt werden. Dieser stützt sich auf die Verfahren der mathematischen Programmierung (siehe Kapitel 2.4.2.2). Das Optimierungsproblem wird derart formuliert, dass eine Lösung anhand der abgeleiteten Zielfunktion nach den Designvariablen (fiktive Dichten) gefunden werden kann (Bendsøe et al., 2003). Dabei kann jede Designantwort aus der FEM zur Definition einer Restriktion oder Zielfunktion genutzt werden, solange diese nach der Designvariable ableitbar ist. Im Vergleich zum optimalitätskriterienbasierten Ansatz ist allerdings mehr Rechenaufwand zur Lösung des Optimierungsproblems notwendig. Dieser erhöhte Rechenaufwand ist auf die hohe Anzahl an Designvariablen in Form der FE zurückzuführen. (Harzheim, 2019) Damit die Optimierung in möglichst wenigen Iterationen konvergiert, wurde von Svanberg (1987) der MMA-Algorithmus entwickelt. MMA ist ein Akronym und steht für *Method of Moving Asymptotes*. Beim MMA-Algorithmus werden die Restriktions- und Zielfunktionen approximiert. Um das Optimum der Zielfunktion anzunähern, werden die Asymptoten von Hyperbelfunktionen in einem iterativen Vorgehen verschoben. (Svanberg, 1987) Darauf aufbauend wurde die Methode für ein besseres Konvergenzverhalten hinsichtlich globalem Optimum erweitert (Svanberg, 2002). Für weitere Erläuterungen des MMA-Algorithmus wird an dieser Stelle exemplarisch auf die Werke von Svanberg (1987, 2002) und Zuo, Chen, Zhang & Yang (2007) verwiesen.

Die Forschungsarbeiten am IPEK – Institut für Produktentwicklung beschäftigen sich bereits seit vielen Jahren mit der Topologieoptimierung. So gehen die Anfänge dazu auf Sauter, Mulfinger & Müller (1992) zurück, aus deren Arbeiten die kommerzielle Software Tosca entwickelt wurde, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingesetzt werden. Darauf aufbauend konnten in der Forschungsgruppe um Albers eine Vielzahl an erfolgreichen Erweiterungen und Anwendungen der Topologieoptimierung entwickelt werden (Albers et al., 2009; Albers & Ottnad, 2010; Pedersen, Hessenauer, Sigmund & Albers, 2009). Im Kontext faserverstärkter Kunststoffe wurde durch Troll, Marston & Albers (2014) die Robustheit streuernder Materialeigenschaften in der Topologieoptimierung untersucht. Spadiner & Albers (2019) machten sich die Kopplung der Topologieoptimierung mit einer Formfüllsimulation zu Nutze, um die prozess- und formbedingten Materialeigenschaften faserverstärkter Kunststoffe in der rechnergestützten Gestaltfindung zu berücksichtigen. Des Weiteren wurde ein Optimierungsansatz zur Reduktion von Trägheitskräften dynamisch beanspruchter Strukturen entwickelt (Sander, Petrich & Albers, 2012; Sander,

2014). Auf die Anwendung der Topologieoptimierung im Kontext additiver Fertigung wird in Kapitel 2.5 gesondert eingegangen.

2.4.3.2 Formoptimierung

Ein weiterer Teilbereich der Strukturoptimierung stellt die Formoptimierung dar, die in diesem Kapitel 2.4.3.2 kurz zusammengefasst wird. Für weitere Erläuterungen wird an dieser Stelle exemplarisch auf die Werke von Harzheim (2019), Rieg et al. (2019) und Schumacher (2020) verwiesen.

Im Vergleich zur Topologieoptimierung (siehe Kapitel 2.4.3.1) verändert die Formoptimierung nicht die gesamte Struktur des zu optimierenden Bauteils, sondern lediglich die äußere Kontur (siehe Abbildung 2.19). Als Hauptziel verfolgt die Formoptimierung nicht die Volumenreduktion. Vielmehr liegt der Fokus auf der Anpassung der Kontur, um eine möglichst homogene Spannungsverteilung zu erzielen und somit Spannungsspitzen zu beseitigen. (Rieg et al., 2019) Dadurch kann die Lebensdauer von Bauteilen erhöht werden (Harzheim, 2019). Die Formoptimierung lässt sich in die *parametrische* und *parameterfreie* Optimierung unterteilen (siehe Abbildung 2.22).

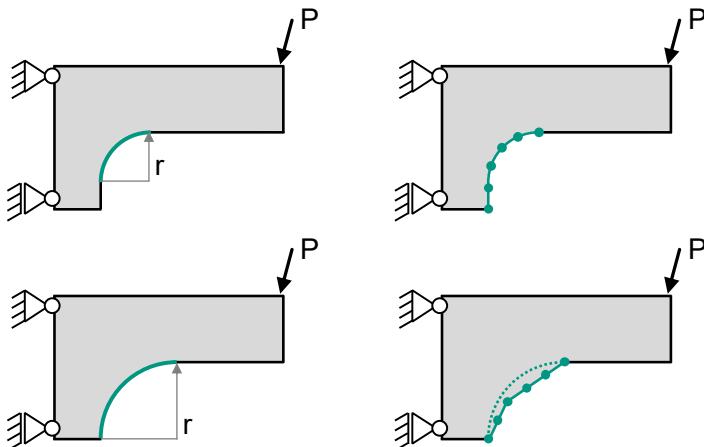


Abbildung 2.22: Parametrische (links) und parameterfreie (rechts) Formoptimierung nach Troll (2015)

Die parametrische Formoptimierung basiert auf einem parametrisierten Modell, an das zumeist die Designvariablen gekoppelt sind. So können beispielsweise CAD-Parameter wie Winkel, Durchmesser oder Längen als Designvariablen dienen. Aufgrund der Parametrisierung des Bauteils liefert diese Art der Formoptimierung als

Ergebnis ebenfalls ein solches parametrisiertes Bauteil, wodurch kein aufwendiges Redesign notwendig ist. Bei der parameterfreien Formoptimierung wird das zu optimierende Bauteil hingegen durch ein FE-Netz repräsentiert, weshalb die Optimierung unabhängig vom CAD-Modell ist. (Albers, Majic et al., 2020) Als Designvariablen werden meist die Knotenkoordinaten des FE-Netzes genutzt und im Laufe der Optimierung räumlich verschoben. Diese Knotenverschiebung kann jedoch zu Netzverzerrungen führen, die es in einem Nachbearbeitungsschritt zu beseitigen gilt. (Rieg et al., 2019)

Zur Durchführung einer Formoptimierung können die Optimierungsverfahren aus Kapitel 2.4.2 eingesetzt werden. Am IPEK – Institut für Produktentwicklung wurde beispielsweise von Albers, Rovira, Aguayo & Maier (2008) ein evolutionärer Algorithmus (siehe Kapitel 2.4.2.4) zur Optimierung der Außenkontur von Ausgleichgewichten einer Kurbelwelle genutzt. Weiterhin entwickelten Häussler & Albers (2007) auf Basis der mathematischen Programmierung (siehe Kapitel 2.4.2.2) einen Ansatz zur Formoptimierung von dynamisch belasteten Bauteilen hinsichtlich Ermüdung.

2.4.3.3 Parameteroptimierung

Die Parameteroptimierung vervollständigt die drei Teilbereiche der Strukturoptimierung und wird nachfolgend lediglich kurz zusammengefasst. Für zusätzliche Informationen wird an dieser Stelle exemplarisch auf die Werke von Harzheim (2019) und Rieg et al. (2019) verwiesen.

Unter Parameteroptimierung oder auch Dimensionierung wird die bestmögliche Auswahl von definierten Parametern verstanden (siehe Abbildung 2.19). Dies kann beispielsweise Blehdicken, Wandstärken oder Faserorientierungen umfassen. (Rieg et al., 2019) Zur Lösung eines solchen Optimierungsproblems können die in Kapitel 2.4.2 vorgestellten Optimierungsverfahren Anwendung finden. Am IPEK – Institut für Produktentwicklung stand die Parameteroptimierung bereits in mehreren Forschungsarbeiten im Fokus. So befassten sich Heldmaier, Reichert, Li & Albers (2018) mit der Dimensionierung von Tailor Rolled Blanks, die thermomechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Schulz & Albers (2018) entwickelten eine Parameteroptimierung auf Bauteilebene zur Verbesserung des Thermomanagements auf Gesamtfahrzeugebene.

Wie eingangs zu Kapitel 2.4.3 beschrieben, lassen sich die drei Teilbereiche der Strukturoptimierung voneinander abgrenzen. Allerdings sollten stets alle drei Teilbereiche eingesetzt werden, um das größtmögliche Leichtbaupotential zu erzielen. Hierzu gilt es, die drei Teilbereiche miteinander und potentiell weiteren Simulationen

zu koppeln. Daher wird im nachfolgenden Kapitel 2.4.4 auf die Kopplung von Simulations- und Optimierungsverfahren eingegangen.

2.4.4 Kopplung von Simulations- und Optimierungsverfahren

Steigende Komplexitäten und Anforderungen bei der Entwicklung neuer Produkte stellen den Produktentwickler heutzutage vor große Herausforderungen. Eine Möglichkeit zur Bewältigung dieser Komplexitäten und Anforderungen stellen die zuvor beschriebenen Simulations- und Optimierungsverfahren (siehe Kapitel 2.4.3) als unterstützende Werkzeuge für den Produktentwickler dar. Durch die Simulationsverfahren wurden Ansätze entwickelt, um verschiedene physikalische Phänomene abzubilden und somit das Verhalten von Produkten vorherzusagen. Die Optimierungsverfahren stellen darüber hinaus weitere Ansätze bereit, um Potentiale bei der Gestaltung von Produkten zu heben. Die Ansätze sind jedoch begrenzt, da sie die Ergebnisse früherer Simulationen bzw. Optimierungen oder Informationen aus anderen Domänen nicht automatisiert berücksichtigen. Besonders diese Berücksichtigung von Wechselwirkungen verschiedener Domänen ist jedoch bei der Entwicklung neuer Produkte von entscheidender Bedeutung. Daher rückt die automatisierte Kopplung verschiedener Simulations- und Optimierungsverfahren vermehrt in den Vordergrund. (Albers, Spadiner et al., 2017) Derartige Kopplungen sind meist nicht trivial, weshalb eine zentrale Forschungsrichtung der Forschungsgruppe um Albers am IPEK – Institut für Produktentwicklung die Entwicklung eines allgemeinen, strategischen Ansatzes zur Kopplung von Simulations- und Optimierungsverfahren ist.

Einen solchen Ansatz entwickelten Albers, Reichert, Serf, Thorén & Bursac (2017) mit dem Kopplungsmodell, das seither stetig weiterentwickelt wird (Albers, Haberkern et al., 2022). In Abbildung 2.23 ist eine generische, grafische Darstellung des Kopplungsmodells visualisiert.

Das Kopplungsmodell besteht aus der Umwelt und dem virtuellen System. Abhängig vom Reifegrad des virtuellen Systems wird das Detailierungslevel des Kopplungsmodells vom Produktentwickler definiert. Mithilfe der sogenannten Interfaces werden Randbedingungen wie beispielsweise Materialkennwerte oder Messdaten aus Prüfstandversuchen von der Umwelt in das virtuelle System übertragen. Das virtuelle System ist durch dreistufige Blöcke definiert. Jeder dieser Blöcke beschreibt ein Simulations- oder Optimierungsverfahren und enthält die folgenden drei Informationen: *Art der verwendeten Methode* (z. B. FEM), *genutzte Software* (z. B. Abaqus oder Python) sowie *Angaben zur Aufgabe der Methode* (z. B. Berechnung von Eigenspannungen). Die dreistufigen Blöcke sind wiederum miteinander gekoppelt und tauschen Parametersätze durch Interaktionen aus. Diese Interaktionen sind durch

Pfeile visualisiert und können uni- oder bidirektional verlaufen. Darüber hinaus beschreibt die Art der Pfeile, ob es sich um eine manuelle (gepunktete Linie) oder automatisierte Kopplung (durchgezogene Linie) handelt. Im Mittelpunkt des Kopplungsmodells steht der Produktentwickler, der die Schnittstelle zurück vom virtuellen System zur Umwelt bildet und die gewonnenen Informationen aus der Methodenkopplung zur Entwicklung neuer Produktgenerationen nutzt. Im Vergleich zu klassischen Computer Aided Engineering (CAE) Ketten können im vorgestellten Kopplungsmodell auch parallel oder iterativ ablaufende Prozesse wie beispielsweise Optimierungsverfahren abgebildet werden. (Albers, Reichert et al., 2017)

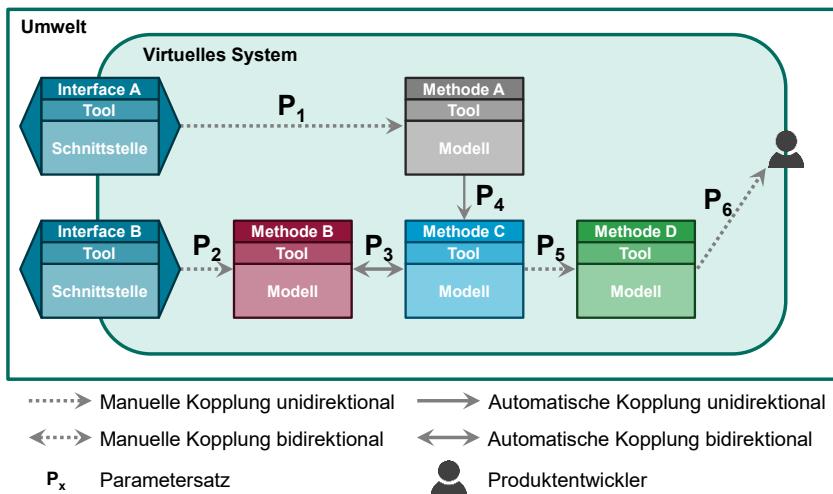


Abbildung 2.23: Generische Darstellung des Kopplungsmodells nach Albers, Reichert et al. (2017)

Als Ziel verfolgt der entwickelte Ansatz die Kopplung von etablierten, kommerziellen Methoden und Werkzeugen, um deren Einsatz in Produktentwicklungsprozessen zu ermöglichen und somit komplexe Problemstellungen handhabbar zu machen. Dadurch wird der Produktentwickler bei der Analyse und Synthese unterstützt, wodurch die Produktqualität gesteigert werden kann. Darüber hinaus kann in frühen Phasen der Produktentwicklung die kontinuierliche Validierung vorangetrieben werden. Die Nutzung kommerzieller Methoden und Werkzeuge ist auf deren Vorteil hin- sichtlich Robustheit und Verfügbarkeit zurückzuführen. (Albers, Reichert et al., 2017) Durch die Erweiterung um die Aspekte der PGE – Produktgenerationsentwicklung (siehe Kapitel 2.1.2) lässt sich der Ansatz zur Quantifizierung des Entwicklungsrisikos neuer Simulations- und Optimierungsverfahren und der darauffolgen- den Ableitung von Maßnahmen zur Reduzierung dieses Entwicklungsrisikos nutzen.

Daraus resultiert die Möglichkeit zur zielgerichteten Steuerung simulativer Entwicklungsaktivitäten. (Albers, Haberkern et al., 2022)

Der erfolgreiche Einsatz des Kopplungsmodells konnte bereits in unterschiedlichen Bereichen am IPEK – Institut für Produktentwicklung nachgewiesen werden. Majic, Albers, Kalmbach & Clausen (2013) entwickelten beispielsweise eine Optimierungsmethode, bei der eine Sickenoptimierung mit einer Tiefziehsimulation gekoppelt wird, um die Herstellbarkeit der Optimierungsergebnisse sicherzustellen. Darüber hinaus entwickelten Revfi, Mikus, Behdinan & Albers (2020) die Sickenoptimierung weiter, indem sie mit einer Formfüllsimulation faserverstärkter Kunststoffe gekoppelt wurde. Durch diese Kopplung werden bereits bei der Auslegung der Sickengestalt die mechanischen Materialeigenschaften, die sich durch die Faserausrichtung abhängig vom Formfüllverhalten ergeben, berücksichtigt und so belastungsgerechte Designvorschläge abgeleitet. Auf dem Gebiet der tribologischen Systeme konnte das Kopplungsmodell zur Übertragung von Rauheitsmessungen mittels Weißlichtinterferometer realer Oberflächen in die FEM erfolgreich genutzt werden (Joerger, Reichert, Wittig, Sistanizadeh Aghdam & Albers, 2021; Reichert, Lorentz & Albers, 2016).

Aufbauend auf den in Kapitel 2.4 vorgestellten Ansätzen und Verfahren der rechnergestützten Analyse und Optimierung wird in nachfolgendem Kapitel 2.5 deren Einsatz im Kontext der additiven Fertigung beschrieben.

2.5 Rechnergestützte Gestaltfindung in der additiven Fertigung

Die hohe Komplexität bei der Entwicklung von neuen Produktgenerationen ist eine der größten Herausforderungen im Produktentstehungsprozess. Eine Lösung zur Unterstützung des Produktentwicklers ist der Einsatz von rechnergestützten Methoden. (Albers, Spadinger et al., 2017) Gerade die additive Fertigung birgt eine Vielzahl an Prozess- und Materialunsicherheiten, die es in der Gestaltfindung vom Produktentwickler zu berücksichtigen gilt (Leary, Merli, Torti, Mazur & Brandt, 2014). Um diesen dabei zu unterstützen, kommen neben den in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Methoden auch numerische Ansätze zum Einsatz. Letztere können den Einfluss spezifischer Prozessparameter auf die resultierenden Bauteileigenschaften untersuchen. Dies sorgt für ein verbessertes Systemverständnis und kann die Gestaltfindung gezielt unterstützen. (Francois et al., 2017) Besonders der Einsatz der Strukturoptimierung im Kontext der additiven Fertigung gewinnt stetig an Bedeutung (Plocher & Panesar, 2019). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bislang die lastpfadoptimierten Ergebnisse der Topologieoptimierung nur bedingt mit kon-

ventionellen Fertigungsverfahren erzeugt werden konnten (Lange, 2021). Die additive Fertigung schafft bei dieser Problematik Abhilfe und ermöglicht somit, dass sich der Produktentwickler bei der Gestaltfindung von Beschränkungen konventioneller Fertigungsverfahren lösen und das Hauptaugenmerk auf die Entwicklung leichter und leistungsstarker Strukturen richten kann (Zhu et al., 2021).

Trotz der hohen Gestaltungsfreiheit besitzt die additive Fertigung spezifische Besonderheiten wie beispielsweise unterschiedliche Materialeigenschaften abhängig von der Aufbaurichtung (J. Liu et al., 2018). Um das Potential der additiven Fertigung auszuschöpfen, ist es zielführend, prozessabhängige Fertigungsrestriktionen direkt in numerischen Verfahren zu berücksichtigen (Lange, 2021). Als Beispiel für einen derartigen Ansatz zur Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen lässt sich die Interfacial Zone Evolutionary Optimization nennen, mit der sich Multi-Material-Strukturen ableiten lassen (Da Silva de Siqueira, 2020; Da Silva de Siqueira, Mozgova & Lachmayer, 2019). Bei pulverbettbasierten Verfahren wie dem SLM beinhaltet diese Fertigungsrestriktionen beispielsweise die Vermeidung von Pulvereinschlüssen, die Einhaltung einer minimalen Wandstärke sowie eines maximalen Überhangwinkels und die Reduktionen von Stützstrukturen (Lange, 2021).

Die Restriktion einer einzuhaltenden minimalen Wandstärke lässt sich auf den Laserstrahlfokusdurchmesser zurückführen und ist somit ein unveränderbarer Maschinenparameter (Lange, 2021). Bereits vor über 20 Jahren wurden erste Ansätze zur Berücksichtigung einer minimalen Wandstärke in der Topologieoptimierung von Sigmund & Petersson (1998) entwickelt und werden auch im Kontext der additiven Fertigung eingesetzt. Ergänzende Ansätze wurden beispielsweise durch Poulsen (2003) sowie Guest, Prévost & Belytschko (2004) entworfen. Ein weiterer unveränderbarer Aspekt pulverbettbasierter Verfahren stellt die notwendige Entfernung des nicht konsolidierten Pulvers nach der Fertigung dar, weshalb sichergestellt werden muss, dass keine Pulvereinschlüsse im Ergebnis einer Topologieoptimierung auftreten können (Lange, 2021). S. Liu, Li, Chen, Tong & Cheng (2015) entwickelten einen Ansatz, der dies gewährleistet und somit den Nachbearbeitungsaufwand reduziert.

Auch wenn die Fertigung von Bauteilen unter Zuhilfenahme von Stützstrukturen für eine höhere Formtreue sorgt, kann sich der Prozess dadurch verlangsamen, da zusätzliches Material konsolidiert und in einem Nachbearbeitungsschritt wieder entfernt werden muss. Des Weiteren ist die Zugänglichkeit zu diesen Stützstrukturen nicht immer gewährleistet. (J. Liu et al., 2018) Daher ist es zeit- und kosteneffizient, wenn bereits bei der Gestaltfindung Designs entworfen werden, die möglichst wenig Stützstrukturen zur Fertigung benötigen (Plocher & Panesar, 2019). Mirzendehdel & Suresh (2016) entwickelten hierzu einen Topologieoptimierungsalgorithmus, der

dies umsetzt. Die Notwendigkeit von Stützstrukturen ist eng mit den im Bauteil enthaltenen und somit zu fertigenden Überhangwinkeln verknüpft. Sobald die Überhangwinkel einen prozessspezifischen Wert (häufig 45°) überschreiten, sind Stützstrukturen zur Gewährleistung der Formtreue notwendig (Gieseke et al., 2016). Deshalb wird diese Verknüpfung zunehmend auch im Kontext der Topologieoptimierung umgesetzt. Leary et al. (2014) entwickelten beispielsweise einen Ansatz, der im Anschluss an die Topologieoptimierung dem abgeleiteten Designvorschlag Material an jenen Stellen hinzufügt, die den maximal zulässigen Überhangwinkel überschreiten. Somit ist zwar keine Stützstruktur mehr zur Fertigung notwendig, jedoch weicht die daraus entstehende Struktur vom lastpfadoptimierten Ergebnis ab. (Leary et al., 2014) Einen integrativeren Ansatz stellt hingegen Langelaar (2018) mit einer auf Filtern basierenden Topologieoptimierung bereit, die lediglich Ergebnisse erzeugt, die keine Stützstrukturen zur Fertigung benötigen. Weitere Ansätze zur Berücksichtigung von Stützstrukturen in der Topologieoptimierung wurden beispielsweise durch Brackett, Ashcroft & Hague (2011), Gaynor & Guest (2016), Mass & Amir (2017) sowie van de Ven, Ayas, Langelaar, Maas & van Keulen (2017) entwickelt.

Neben den Fertigungsrestriktionen sorgt auch die numerische Abbildung der prozessspezifischen Mikrostruktur für ein besseres Systemverständnis und kann bei der Gestaltungswahl gewinnbringend eingesetzt werden. Unter der Mikrostruktur werden vor allem die sich im Fertigungsverfahren ausbildenden Materialeigenschaften aufgrund der gewählten Aufbaurichtung sowie Bewegungsbahnen und dem damit verbundenen lokal unterschiedlichen Wärmeeintrag verstanden (J. Liu et al., 2018; Plocher & Panesar, 2019). Besonders die Aufbaurichtung sorgt häufig für ein anisotropes Materialverhalten, da die mechanischen Materialeigenschaften zwischen den Schichten meist geringer ausfallen als in den Schichten (Gibson et al., 2010). Abhängig vom Lastfall kann diese Anisotropie gezielt genutzt werden, um die mechanische Leistung eines gefertigten Bauteils zu verbessern (J. Liu et al., 2018). Daraus resultierte die Entwicklung von Optimierungsansätzen, welche die optimale Aufbaurichtung abhängig vom gegebenen Lastfall bestimmen (J. Liu, 2016; Ulu, Korkmaz, Yay, Burak Ozdoganlar & Burak Kara, 2015; Umetani & Schmidt, 2013).

Um eine Vorhersage des Spannungs- und Verformungszustands des gefertigten Bauteils zu erhalten, kommen Prozesssimulationen zum Einsatz, wie sie beispielsweise in Software von Autodesk NetFabb⁴ oder ANSYS Additive Suite⁵ bereitgestellt werden. Diese Prozesssimulationen können das schichtweise Vorgehen abbilden und berücksichtigen sowohl die damit verbundene Erwärmung als auch Abkühlung

⁴ <https://www.autodesk.de/products/netfabb/overview> (abgerufen am 14.03.2023)

⁵ <https://www.ansys.com/products/additive> (abgerufen am 14.03.2023)

jeder Schicht mithilfe von Thermo-Modellen während des gesamten Fertigungsprozesses. Dadurch werden die Eigenspannungen und die Verformung aufgrund der Materialschrumpfung erfasst. Für genauere Vorhersagen können die Bewegungsbahnen anhand des G-Codes (Maschinencode, der den Laser steuert) abgebildet werden. Dazu wird das schichtweise Vorgehen ebenfalls modelliert, allerdings auf einer höheren Detailebene. Dadurch kann der Einfluss des Laserscanpfads berücksichtigt werden, jedoch auf Kosten eines höheren Rechenaufwands. (Diegel et al., 2019; Thorborg, Esser & Bayat, 2020)

Diese Prozesssimulationen basieren häufig auf einer Kopplung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge, wie beispielsweise Computational Fluid Dynamics (CFD) und der FEM. Darüber hinaus können diese Prozesssimulationen zusätzlich mit einer Strukturoptimierung gekoppelt werden, um die vorhergesagten Bauteileigenschaften direkt in der Erzeugung eines lastpfadoptimierten Bauteils zu integrieren (Misiun et al., 2021). Somit tragen Kopplungen von Simulations- und Optimierungsverfahren (siehe Kapitel 2.4.4) zur Unterstützung des Produktentwicklers bei der Synthese von Bauteilen bei und sorgen für eine bessere Beherrschbarkeit komplexer Problemstellungen (Albers, Spadiner et al., 2017).

2.6 Fazit

Die Verfahren der additiven Fertigung ermöglichen es, Bauteile ohne die gängigen Restriktionen der konventionellen Fertigungsverfahren zu erzeugen. Die additive Fertigung sollte jedoch nicht als Standard für jegliche Bauteilfertigungen herangezogen werden. Vielmehr gilt es, gezielt Bauteile auszuwählen und auf die additive Fertigung aus einem wirtschaftlichen sowie leistungssteigernden Aspekt zuzuschneiden. So ist beispielsweise die Nutzung der additiven Fertigung besonders bei komplexen, lastpfadoptimierten Bauteilen, wie sie sich aufgrund der Funktionsintegration oder unter Einsatz von Optimierungsverfahren ergeben, als zielführende Maßnahme zur Steigerung des Leichtbaupotentials anzusehen. Damit der gewinnbringende Einsatz der additiven Fertigung ermöglicht wird, muss diese durchgängig im Produktentstehungsprozess eingebunden und in Phasen wie der *Modellierung von Prinzip und Gestalt* berücksichtigt werden. Basierend auf dieser notwendigen Einbindung bestehen Methoden, die den Produktentwickler bei der Bewertung von Bauteilen hinsichtlich derer wirtschaftlicher Eignung zur additiven Fertigung unterstützen. Darüber hinaus existieren Werkzeuge zur Anpassung von Bauteilgestalten, um eine möglichst ressourcenschonende Fertigung durch beispielsweise reduzierten Einsatz von Stützstrukturen zu ermöglichen.

Einen weiteren Aspekt, vor allem bei pulverbettbasierten Fertigungsverfahren, repräsentieren die sich prozessspezifisch einstellenden mechanischen Materialeigenschaften im gefertigten Bauteil. Die Materialeigenschaften hängen von der entstehenden Mikrostruktur sowie den auftretenden Defekten ab, die wiederum von den gewählten Prozessparametern (z. B. Bewegungsbahnen des Lasers) bei der Fertigung beeinflusst werden. Zur Berücksichtigung des Einflusses derartiger Mikrostrukturen bei der Auslegung von Bauteilen eignen sich gekoppelte Simulations- und Optimierungsverfahren, welche die auftretenden mechanischen Materialeigenschaften direkt bei der Ableitung eines initialen Bauteildesigns einbeziehen.

3 Zielsetzung und Forschungsvorgehen

Basierend auf dem in Kapitel 2 dargestellten Stand der Forschung wird nachfolgend die Zielsetzung und die Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit definiert sowie die zur strukturierten Untersuchung der Forschungshypothese notwendigen Forschungsfragen abgeleitet (siehe Kapitel 3.1). Darauffolgend werden das Forschungsvorgehen und die genutzten Forschungsmethoden in Kapitel 3.2 präsentiert.

3.1 Zielsetzung der Arbeit

Die Anforderungen an ein zu entwickelndes Produkt gehen dahin, dass dieses möglichst leistungsfähig und gleichzeitig ressourcenschonend sein muss. Für die gezielte Einsparung von Ressourcen ist eine hohe Materialausnutzung innerhalb eines Produkts notwendig, die eine Reduktion des Gewichts impliziert und demzufolge einen positiven Beitrag zur Klimabilanz leistet. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Materialausnutzung eines Produkts stellen die in Kapitel 2.2 vorgestellten Leichtbaubestrebungen dar, die dem Produktentwickler bei der Erfüllung der Anforderungen zur Verfügung stehen. Besonders die Funktionsintegration (siehe Kapitel 2.2.1) stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Ressourceneinsparung dar. Häufig resultiert eine solche Funktionsintegration jedoch in multiaxialen Lastfällen, die mit standardisierten Hilfsmitteln wie beispielsweise Konstruktionskatalogen nur eingeschränkt zu bedienen sind. Dadurch wird der Entwurf eines lastgerechten, initialen Bauteildesigns erschwert. Um den Produktentwickler respektive das Entwicklungsteam bei der Gestaltung derartiger Bauteildesigns zu unterstützen, werden daher vermehrt rechnergestützte Verfahren wie die Topologieoptimierung (siehe Kapitel 2.4.3.1) eingesetzt. Die Topologieoptimierung erzeugt eine lastpfadoptimierte Aufteilung des Materials in einem vorgegebenen Designraum, wodurch der Entwurf eines lastgerechten, initialen Bauteildesigns unter multiaxialen Lastfällen erleichtert wird. Das Ergebnis einer solchen Topologieoptimierung spiegelt sich häufig in komplexen Bauteildesigns wider, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder lediglich unter erhöhtem Aufwand und folglich zusätzlichen Kosten erzeugt werden können (siehe Abbildung 2.9). Vor allem im Bereich geringer Losgrößen bietet die additive Fertigung (siehe Kapitel 2.3) eine wirtschaftliche Lösung, mit der komplexe Bauteile situationsabhängig nicht nur mit kürzeren Zykluszeiten, sondern auch weniger Materialverbrauch hergestellt werden können. Demnach stellt die Kombination aus additiver Fertigung und Topologieoptimierung einen Ansatz für den Produktentwickler bereit, um Bauteildesigns lastpfadoptimiert zu entwerfen und endkonturnah zu fertigen.

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, basieren derartige Verfahren der additiven Fertigung alle auf dem Prinzip, ein Bauteil in einem schichtweisen Vorgehen aufzubauen. Besonders bei pulverbettbasierten Fertigungsverfahren (siehe Kapitel 2.3.2) werden die Mikrostruktur und somit die sich einstellenden elastischen, mechanischen Materialeigenschaften aufgrund der diskontinuierlichen Konsolidierung des Metallpulvers mithilfe eines Lasers beeinflusst. Diese Beeinflussung durch den Laser ist maßgeblich von dessen Bewegungsbahnen und folglich von der zu fertigenden Bauteilgestalt abhängig (siehe Abbildung 2.12). Dadurch besteht eine direkte Wechselwirkung zwischen Produkt (Bauteil) und Produktionssystem (additive Fertigung). Diese Wechselwirkung muss vom Produktentwickler frühzeitig und durchgängig im Produktentstehungsprozess berücksichtigt werden, um das Potential der additiven Fertigung bei der Synthese lasttragender Produkte zu nutzen. Somit gilt es, die fertigungsbedingten Materialeigenschaften direkt in die Topologieoptimierung einfließen zu lassen, um den Produktentwickler beim Entwurf lastpfadoptimierter Bauteildesigns unter Berücksichtigung der additiven Fertigung zu unterstützen und nachgelagerte, kostenintensive Designüberarbeitungen zu reduzieren. Bezogen auf den Produktentstehungsprozess stellt eine derartige Topologieoptimierung unter Berücksichtigung fertigungsbedingter Materialeigenschaften eine Hilfestellung für den Produktentwickler bzw. das Entwicklungsteam zur Erzeugung *alternativer Lösungen* in der Kernaktivität *Prinzip und Gestalt modellieren* im iPeM (siehe Kapitel 2.1.1) bereit.

Im Stand der Forschung werden Ansätze der rechnergestützten Gestaltfindung unter Berücksichtigung der additiven Fertigung (siehe Kapitel 2.5) aufgezeigt. Diese Ansätze im Kontext der Topologieoptimierung konzentrieren sich vorwiegend auf die Erzeugung von Bauteilen, die für ihre Fertigung möglichst wenig Stützstrukturen erfordern. Weitere Ansätze beschäftigen sich mit der Vorhersage von Verzug oder Eigenspannungen während der Fertigung anhand von Prozesssimulationen, wodurch Rückschlüsse auf potentielle Gestaltänderungen gezogen werden können. Diese Prozesssimulationen sind zumeist rechenintensiv und basieren auf bereits topologieoptimierten Bauteildesigns. Ein Ansatz für die gezielte Integration von fertigungsbedingten Materialeigenschaften pulverbettbasierter Fertigungsverfahren wie dem SLM in einer Topologieoptimierung zur Ableitung lastpfadoptimierter Bauteildesigns besteht bislang nicht. Um die daraus resultierende Forschungslücke zu schließen, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung einer derartigen Topologieoptimierungsmethode (nachfolgend als TopOpt-Methode bezeichnet). Diese soll den Produktentwickler respektive das Entwicklungsteam bei der initialen Gestaltfindung unterstützen und es ihm erlauben, bereits in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses einen Designvorschlag für das benötigte Steifigkeitsverhalten SLM-gefertigter Bauteile unter gegebener Belastung ableiten zu können.

Basierend auf diesem Ziel sowie dem in Kapitel 2 aufgezeigten Stand der Forschung kann die leitende Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit formuliert werden.

Forschungshypothese

Die Berücksichtigung isotrop linear-elastischer, lokal variierender mechanischer Materialeigenschaften in einer dichtebasierter⁶ Topologieoptimierung führt zur verfahrensspezifischen, steifigkeitsoptimierten Synthese von initialen Designvorschlägen für im SLM gefertigte Bauteile.

Zur strukturierten Untersuchung der formulierten Forschungshypothese werden die nachfolgenden Forschungsfragen definiert. Durch die Beantwortung dieser Forschungsfragen wird die Erreichung des Ziels unterstützt und evaluiert.

Forschungsfragen

1. Welcher Bedarf besteht hinsichtlich der Berücksichtigung von SLM-verfahrensspezifischen, mechanischen Materialeigenschaften in einer Topologieoptimierung zur Unterstützung des Produktentwicklers bei der initialen Gestaltfindung?
2. Welche Anforderungen an die zu entwickelnde Topologieoptimierungsmethode leiten sich aus diesem Bedarf ab?
3. Wie kann eine dichte basierte Topologieoptimierungsmethode aussehen, um automatisiert einen initialen Designvorschlag für SLM-gefertigte, steifigkeitsoptimierte Bauteile zu generieren?
4. Welche Erkenntnisse zur Synthese SLM-gefertigter, steifigkeitsoptimierter Designvorschläge ergeben sich durch die Anwendung der entwickelten Topologieoptimierungsmethode im Vergleich zu einer standardisierten⁷ Topologieoptimierung?

Um die entwickelte TopOpt-Methode zu beurteilen und die leitende Forschungshypothese dieser Arbeit zu verifizieren oder falsifizieren, werden zunächst die daraus

⁶ Unter *dichte basierter* Topologieoptimierung wird im Kontext der vorliegenden Arbeit eine solche verstanden, die auf Homogenisierungsansätzen sowie der Nutzung fiktiver Dichten und der Auswertung von Sensitivitäten zur Ermittlung eines Optimums beruht (siehe Kapitel 2.4.3.1).

⁷ Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist unter der Bezeichnung *standardisierte Topologieoptimierung* eine solche zu verstehen, in der für den gesamten Designraum ein homogenes, isotropes Material angenommen wird.

abgeleiteten Designvorschläge mit jenen einer standardisierten Topologieoptimierung sowohl qualitativ als auch quantitativ verglichen. Darüber hinaus werden im SLM-gefertigte Proben herangezogen, um die Modellierung und Berücksichtigung der fertigungsbedingten Materialeigenschaften in der entwickelten TopOpt-Methode zu evaluieren. Die dafür notwendigen Untersuchungen werden in Kapitel 4 beschrieben und tragen zum besseren Verständnis der additiven Gestaltfindung durch die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem bei.

Aus der formulierten Forschungshypothese sowie den damit verbundenen Forschungsfragen lässt sich die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit konkretisieren.

Zielsetzung

Entwicklung einer dichtebasierter Topologieoptimierungsmethode zur Synthese steifigkeitsoptimierter, initialer Bauteildesigns unter Berücksichtigung der fertigungsbedingten, isotrop linear-elastischen, mechanischen Materialeigenschaften aus dem SLM – Selektives Laserschmelzen.

3.2 Forschungsvorgehen und -methoden

Nachfolgend wird das Forschungsvorgehen vorgestellt, das zur Untersuchung der Forschungshypothese und zur Beantwortung der formulierten Forschungsfragen im Rahmen der vorliegenden Arbeit angewendet wird. Das Forschungsvorgehen lehnt sich dabei an die Design Research Methodology (DRM) nach Blessing & Chakrabarti (2009) an. Bei der DRM handelt es sich um einen generischen Ansatz zur effizienten und effektiven Strukturierung und Planung designorientierter Forschungsvorhaben. Die DRM ist aus den vier Phasen *Klärung des Forschungsgegenstands*, *Deskriptive Studie I* (DS I), *Präskriptive Studie* (PS) und *Deskriptive Studie II* (DS II) aufgebaut und enthält Merkmale von Designprozessen. So sind die vier Phasen nicht als starr anzusehen und müssen nicht sequentiell ausgeführt werden. Vielmehr sind mehrere Iterationen innerhalb jeder Phase und zwischen den Phasen sowie die parallele Ausführung von Phasen möglich. Des Weiteren kann ein Forschungsvorhaben in jeder der vier Phasen beginnen. Dabei sollten die Verbindungen zu den anderen Phasen jedoch berücksichtigt werden, auch wenn diese nicht alle im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführt werden. (Blessing & Chakrabarti, 2009)

In den Methoden und Modellen der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung sind diese Merkmale ebenfalls vorhanden, wodurch die Wahl der DRM zur Strukturierung der vorliegenden Arbeit gestärkt wird (Revfi, 2022). Die Adaption der DRM im Kontext der vorliegenden Arbeit zur Entwicklung der angestrebten TopOpt-Methode für im SLM gefertigte Bauteile ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

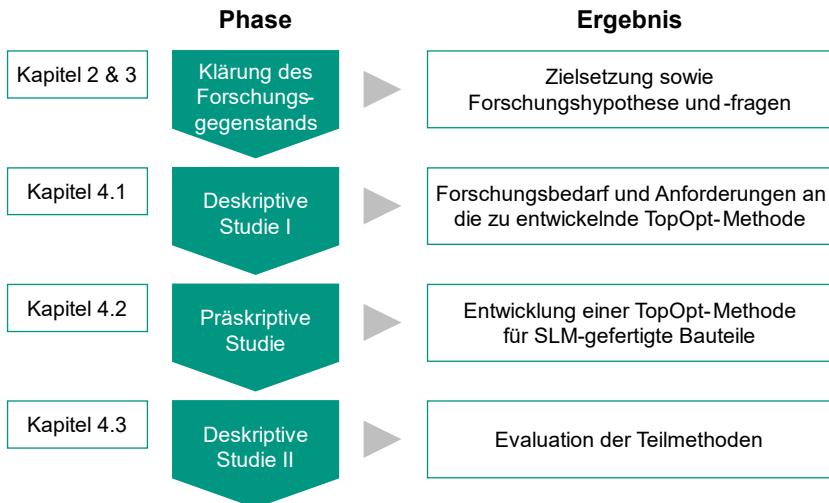


Abbildung 3.1: Forschungsvorgehen der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an die DRM nach Blessing & Chakrabarti (2009)

Für die vorliegende Arbeit baut die Klärung des Forschungsgegenstands auf dem literaturbasierten, relevanten Stand der Forschung (siehe Kapitel 2) auf. Dieser behandelt den Leichtbau und die rechnergestützte Gestaltfindung in der additiven Fertigung im Rahmen der Produktentstehung. Daraus leitet sich der Forschungsgegenstand in Form der Zielsetzung sowie der Forschungshypothese und den dazugehörigen -fragen (siehe Kapitel 3) ab. In Kapitel 4.1 (DS I) werden experimentelle und literaturbasierte Methoden eingesetzt, um den Forschungsbedarf für die Entwicklung einer TopOpt-Methode im Kontext SLM-gefertigter Bauteile weiter zu konkretisieren und zu bestätigen. Darauf aufbauend werden Anforderungen definiert, welche die zu entwickelnde TopOpt-Methode erfüllen muss, und im Zielsystem der Arbeit festgehalten. Anschließend werden in Kapitel 4.2 (PS) Teilmethoden entwickelt und daraus eine dichtebasierte TopOpt-Methode aufgebaut. Diese TopOpt-Methode steht dem Produktentwickler und somit dem Entwicklungsteam als unterstützendes Werkzeug zur Ableitung steifigkeitsoptimierter, im SLM gefertigter Bauteildesigns unter Berücksichtigung der fertigungsbedingten Materialeigenschaften

bereit. Zuletzt erfolgt in Kapitel 4.3 (DS II) die Evaluation der entwickelten Teilmethoden der TopOpt-Methode. Dazu werden experimentelle Untersuchungen sowie qualitative und quantitative Vergleiche mit einer standardisierten Topologieoptimierung herangezogen. Auf Basis der evaluierten Teilmethoden werden abschließend Rückschlüsse auf die Validität der Gesamtmethode (TopOpt-Methode) gezogen.

Die DRM stellt, wie zuvor beschrieben, einen generischen Ansatz zur Strukturierung und Planung von designorientierten Forschungsvorhaben dar. Es werden jedoch keine expliziten Methoden für die Durchführung des definierten Forschungsvorhabens bereitgestellt. Deshalb werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzten Forschungsmethoden nachfolgend gesondert beschrieben.

Um den Forschungsbedarf in Kapitel 4.1 zu konkretisieren, kommen neben literaturbasierten Analysen auch werkstoffliche Untersuchungen (z. B. Aufnahmen mithilfe der Mikro-Computertomographie) zum Einsatz. Die sich daraus für SLM-geferigte Bauteile ergebenden Materialeigenschaften werden in Kapitel 4.2 mithilfe der FEM (siehe Kapitel 2.4.1.1) in Abaqus⁸ sowie der Level-Set-Methode (siehe Kapitel 2.4.1.2) modelliert. Die FEM wird darüber hinaus genutzt, um das strukturmechanische Verhalten abzubilden und die Designantwort im Rahmen der dichtebasierter TopOpt-Methode in Tosca Structure⁹ zu berechnen. Um die Validität der Modellierung der Materialeigenschaften zu prüfen, werden in Kapitel 4.3 Abgleiche mit real gefertigten Bauteilen herangezogen sowie Verfahren der Materialcharakterisierung (z. B. Ultraschallverfahren) eingesetzt. Zur Verifikation der entwickelten TopOpt-Methode werden die abgeleiteten Designvorschläge einer qualitativen und quantitativen Evaluation unterzogen sowie jenen Designvorschlägen einer standardisierten Topologieoptimierung gegenübergestellt.

⁸ <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/simulia/produkte/abaqus> (abgerufen am 21.03.2023)

⁹ <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/simulia/produkte/tosca/> (abgerufen am 21.03.2023)

4 TopOpt-Methode unter Berücksichtigung lokal variierender Materialeigenschaften

In diesem Kapitel werden die Schritte zur Erreichung der in Kapitel 3.1 formulierten Zielsetzung der vorliegenden Arbeit beschrieben. Zunächst wird im ersten Schritt die Relevanz der Thematik (siehe Kapitel 3.1) im Kontext des Produktentstehungsprozesses anhand des Forschungsbedarfs konkretisiert (siehe Kapitel 4.1). Hierzu erfolgt mithilfe von werkstofflichen Untersuchungen eine Analyse SLM-gefertigter Proben, wodurch ein verbessertes Systemverständnis aufgebaut und das Zielsystem der vorliegenden Arbeit abgeleitet wird. Dieses Zielsystem enthält sowohl die Ziele als auch die damit abgeleiteten Anforderungen an die zu entwickelnde TopOpt-Methode für die Unterstützung des Produktentwicklers in der Gestaltungsforschung.

Als zweiter Schritt erfolgt die Entwicklung der dichtebasierter TopOpt-Methode zur Ableitung initialer Designvorschläge steifigkeitsoptimierter, im SLM gefertigter Bauteile (siehe Kapitel 4.2). Mithilfe der Systemanalyse (siehe Kapitel 4.1) und den darin abgeleiteten Anforderungen wird ein Workflow für die entwickelte TopOpt-Methode aufgebaut. Dieser Workflow soll derart gestaltet sein, dass sowohl im Sinne des Verkürzungsmerkmals nach Stachowiak (1973) ein angebrachtes Verhältnis zwischen Rechenaufwand und Detaillierungsgrad besteht als auch eine benutzerfreundliche Bedienung möglich ist.

Kapitel 4.3 umfasst den letzten Schritt, der aus der qualitativen und quantitativen Evaluation sowie der damit verbundenen Verifikation und Validierung der entwickelten TopOpt-Methode besteht. Hierzu werden neben Abgleichen zwischen Realität und Modellierung auch Vergleiche mit den initialen Designvorschlägen einer standardisierten Topologieoptimierung herangezogen. Abschließend wird in Kapitel 4.4 ein Fazit gezogen.

Die in diesem Kapitel 4 genutzten Daten sind im Rahmen des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekts *SLM-Topo: Entwicklung einer prozessspezifischen Topologieoptimierungsmethode für die additive Fertigung von Leichtbaustrukturen am Beispiel des SLM-Verfahrens*¹⁰ (im Folgenden lediglich als *SLM-Topo* bezeichnet) entstanden. Das DFG-Forschungsprojekt

¹⁰ <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/399233791> (abgerufen am 21.03.2023)

wurde in Kooperation und engem Austausch mit dem Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde (IAM-WK)¹¹ durchgeführt. Die im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit genutzten werkstofflichen Erkenntnisse sowie die in Kapitel 4.3 verwendeten Materialdaten stammen aus Untersuchungen und Experimenten, die vom IAM-WK durchgeführt wurden.

4.1 Systemanalyse

Dieses Kapitel 4.1 umfasst die Systemanalyse, die sich in zwei Teile gliedert und im Sinne der DRM der DS I entspricht. Zunächst wird in Kapitel 4.1.1 der Forschungsbedarf anhand von werkstofflichen Untersuchungen SLM-gefertigter Proben sowie einer zum Stand der Forschung (siehe Kapitel 2) ergänzenden literaturbasierten Analyse konkretisiert. Darauf aufbauend werden die Ziele und daraus abgeleiteten Anforderungen an die zu entwickelnde TopOpt-Methode (siehe Kapitel 4.1.2). Durch die Inhalte dieses Kapitels werden die ersten beiden Forschungsfragen zur Überprüfung der Forschungshypothese beantwortet.

Forschungsfragen

1. Welcher Bedarf besteht hinsichtlich der Berücksichtigung von SLM-verfahrensspezifischen, mechanischen Materialeigenschaften in einer Topologieoptimierung zur Unterstützung des Produktentwicklers bei der initialen Gestaltfindung?
2. Welche Anforderungen an die zu entwickelnde Topologieoptimierungs methode leiten sich aus diesem Bedarf ab?

4.1.1 Konkretisierung des Forschungsbedarfs

Additive Fertigungsverfahren basieren darauf, dass sie ein Bauteil in einem schichtweisen Vorgehen erzeugen (siehe Kapitel 2.3). Während dieses schichtweise Vorgehen einerseits die Fertigung komplexer Geometrien zulässt, sorgt es andererseits für eine diskontinuierliche Fertigung. Besonders bei pulverbettbasierten Fertigungsverfahren wie dem SLM kann diese diskontinuierliche Fertigung aufgrund der Bewegungsbahnen des Lasers, die durch die gewählte Scanstrategie definiert werden, zu Defekten (siehe Kapitel 2.3.2) und somit zu lokal variierenden Mikrostrukturen

¹¹ <https://www.iam.kit.edu/wk/index.php> (abgerufen am 21.03.2023)

führen. Die Mikrostrukturen definieren wiederum die resultierenden Materialeigenschaften im gefertigten Bauteil. Dadurch besteht ein direkter Zusammenhang zwischen den Bewegungsbahnen des Lasers respektive der gewählten Scanstrategie und den resultierenden Materialeigenschaften. Dieser Zusammenhang konnte im Rahmen der Vorarbeiten zum DFG-Forschungsprojekt SLM-Topo anhand von Testkörpern gezeigt werden. Aus diesen Vorarbeiten geht hervor, dass vor allem an oberflächennahen Regionen im gefertigten Bauteil ein Bereich erhöhter Porosität entsteht. Dieser porenbehaftete Bereich ist vermutlich auf die eingesetzte, zweistufige Scanstrategie (siehe Kapitel 2.3.2) zurückzuführen, bei der in jeder Schicht zuerst die Außenkontur generiert und danach das dazwischenliegende Metallpulver konsolidiert wird. Um diese Vermutung zu evaluieren und die Entstehung des porenbehafteten Bereichs abhängig vom gefertigten Bauteil genauer zu analysieren, wurden im Rahmen des DFG-Forschungsprojekts SLM-Topo in Kooperation mit dem IAM-WK zunächst werkstoffliche Untersuchungen auf Basis eines Demonstrators (siehe Abbildung 4.1) durchgeführt. Diese werkstofflichen Untersuchungen trugen zudem dazu bei, ein verbessertes Systemverständnis zu erzeugen.

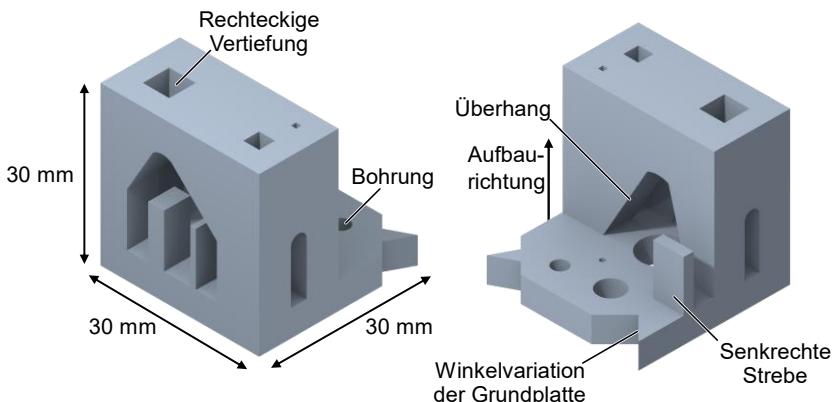


Abbildung 4.1: Demonstrator zur Untersuchung der im SLM entstehenden Defekte und deren Verteilung im Bauteil

Wie in Abbildung 2.12 zu sehen, hängen die Bewegungsbahnen des Lasers vom zu fertigenden Bauteil bzw. von den im Bauteil enthaltenen Geometrieelementen (z. B. Bohrungen oder Überhänge) ab und werden durch die gewählte Scanstrategie definiert. Deshalb wurde der Demonstrator derart konzipiert, dass die aus der Literatur bekannten und für werkstoffliche Untersuchungen eingesetzten Geometrieelemente (siehe Tabelle 4.1 und Abbildung 4.1) vertreten sind. Der Aufbau erfolgte im

Rahmen der zwei studentischen Abschlussarbeiten von Wexel (2020)¹² und Wiegert (2020)¹³, die beide vom Autor dieser Arbeit co-betreut wurden. Darüber hinaus wurde der Demonstrator in diesen Arbeiten hinsichtlich fertigungsbedingter Defekte wie Poren oder Risse analysiert. Durch die Kombination unterschiedlicher Geometrieelemente in einem einzigen Demonstrator war es möglich, die entstehenden Defekte ohne potentielle Einflüsse der Prozessvorbereitung (siehe Kapitel 2.3.2) auf die Defektbildung zu analysieren.

Tabelle 4.1: Enthaltene Geometrieelemente im Demonstrator und deren Größen zur Analyse der entstehenden Defekte im SLM

Geometrieelement	Variierte Größe	Werte
Rechteckige Vertiefung	Kantenlänge	1 mm, 3 mm, 5 mm
Bohrung	Durchmesser	1 mm, 3 mm, 5 mm, 8 mm
Überhang	Winkel	45°, 2 x 60°, 75°
Grundplatte	Winkel	35°, 45°, 2 x 72,5°, 3 x 90°, 3 x 135°
Senkrechte Strebe	Wandstärke	1 mm, 2 mm, 3 mm, 5 mm, 8 mm

Um den Zusammenhang zwischen Geometrieelement und Defektbildung zu analysieren, wurde der Demonstrator aus AlSi10Mg in Summe 32-mal im SLM gefertigt. Die Fertigung erfolgte in acht Chargen á vier Demonstratoren auf der Anlage OR-LAS Creator¹⁴ der Firma O.R. Lasertechnologie GmbH. Mithilfe dieser Anlage lassen sich Bauteile mit einem Maximaldurchmesser von 100 mm und einer Maximalhöhe von 110 mm erzeugen. Zur Fertigung wurde die in Kapitel 2.3.2 beschriebene, zweistufige Scanstrategie analog zu den Voruntersuchungen zum DFG-Forschungsprojekt SLM-Topo angewendet. Dabei wird in jeder Schicht zunächst die Außenkontur erzeugt und erst anschließend das dazwischenliegende Metallpulver konsolidiert (Gu, Meiners, Wissenbach & Poprawe, 2012). Diese zweistufige Scanstrategie gewährleistet eine hohe Formtreue des gefertigten Bauteils und wird daher häufig im industriellen Umfeld genutzt (Gebhardt, 2016). Vor allem bei Bauteilen, die aufgrund ihrer Komplexität keiner Nachbehandlung wie beispielsweise einem Fräsvorgang unterzogen werden können, ist eine solche hohe Formtreue von Vor-

¹² Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹³ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁴ <https://www.anima.eu/orlas-creator> (abgerufen am 22.03.2023)

teil. Die genutzten Prozessparameter zur Fertigung der Demonstratoren sind Tabelle 4.2 zu entnehmen. Die Scandistanz beschreibt dabei den Abstand zwischen zwei Laserbahnen während der Konsolidierung des Metallpulvers.

Tabelle 4.2: Prozessparameter zur Fertigung des Demonstrators im SLM

Laserleistung	Scangeschwindigkeit	Scandistanz	Schichtdicke
250 W	900 mm/s	150 µm	30 µm

Im Anschluss an die Fertigung wurden die Demonstratoren mithilfe der Mikro-Computertomographie (μ CT) hinsichtlich fertigungsbedingt entstandener Defekte untersucht. Bei der μ CT handelt es sich um ein auf Röntgenstrahlung basierendes zerstörungsfreies Verfahren zur Abbildung der Mikrostruktur von dreidimensionalen Bauteilen. Bei diesem Verfahren wird das zu untersuchende Bauteil von einer Seite mit Röntgenstrahlung beaufschlagt. Die durchgelassene Reststrahlung wird von einem Detektor auf der gegenüberliegenden Seite des Bauteils erfasst, wodurch eine einzelne 2D-Projektion der vorliegenden Mikrostruktur entsteht. Durch das Drehen des Bauteils während der Bestrahlung entsteht eine Vielzahl an 2D-Projektionen aus verschiedenen Winkeln. Aus diesen 2D-Projektionen kann in einem nachgelagerten Prozess die dreidimensionale Mikrostruktur (siehe Abbildung 4.2) rekonstruiert werden. (Vásárhelyi, Kónya, Kukovecz & Vajtai, 2020)

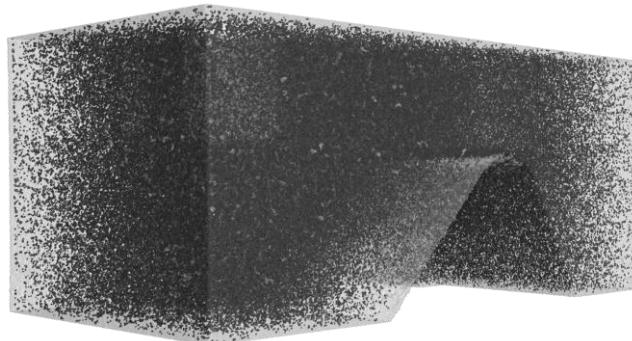


Abbildung 4.2: Ausschnitt der aus μ CT-Aufnahmen rekonstruierten Mikrostruktur des Demonstrators: Defektfreie Bereiche (helle Regionen) und entstehende Poren (dunkle Regionen)

Diese rekonstruierte dreidimensionale Mikrostruktur (siehe Abbildung 4.2) beinhaltet sämtliche Poren, die sich im Demonstrator befinden. Durch die Betrachtung über die gesamte Breite und Tiefe des Demonstrators entsteht der Eindruck, dass dieser

ausschließlich aus Poren besteht. Dies ist jedoch lediglich der Darstellung geschuldet und kann zu einer Fehlinterpretation führen. Daher gilt es, stets auch die 2D-Projektionen (siehe beispielsweise Abbildung 4.3 rechts) bei der Analyse der Porenverteilung einfließen zu lassen.

Aus den mittels µCT durchgeführten Untersuchungen ergab sich, dass vorwiegend metallurgische Poren und Keyhole-Poren (siehe Kapitel 2.3.2) als Defekte im gefertigten Demonstrator vorliegen (Czink, Dietrich & Schulze, 2022). Um Rückschlüsse auf die daraus resultierenden Materialeigenschaften, die in direktem Zusammenhang mit den Poren stehen, zu ziehen, wurde die Porenverteilung analysiert. Die Analyse führte zu der Erkenntnis, dass sich im Vergleich zu den Vorarbeiten zum DFG-Forschungsprojekt SLM-Topo nicht lediglich eine oberflächennahe, porenbefahftete Schicht ausbildet, sondern abhängig von der Aufbaurichtung drei Bereiche (siehe Abbildung 4.3) unterschiedlicher Porosität im Demonstrator entstehen: Kontur-, Interface- und Schraffurbereich¹⁵ (Holoch, Lenhardt, Revfi & Albers, 2022).

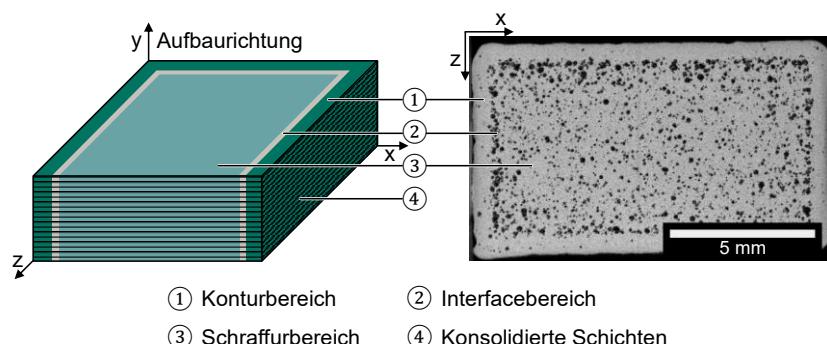


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der drei porenbehafteten Bereiche entlang der Aufbaurichtung (links) und µCT-Aufnahme zur Visualisierung der Porositätsverteilung in einer konsolidierten Schicht (rechts) nach Holoch, Lenhardt, Revfi & Albers (2022)

Diese drei Bereiche bilden sich aufgrund der zweistufigen Scanstrategie aus (Czink et al., 2022). Durch die Betrachtung der Porenverteilung lässt sich diese Scanstrategie darin wiederfinden. So entspricht der Konturbereich jenem Material, das in jeder Schicht als erstes konsolidiert wird und die Außenkontur des gefertigten Bauteils

¹⁵ Der Begriff *Schraffurbereich* wird in der Regel im Kontext technischer Zeichnungen eingesetzt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit bezeichnet der Begriff *Schraffurbereich* jedoch ausschließlich das vom Kontur- und Interfacebereich eingeschlossene Volumen im gefertigten Bauteil.

beschreibt. Der Schraffurbereich spiegelt das in jeder Schicht darauffolgend aufgeschmolzene Metallpulver wider. Während dieses Aufschmelzens des Metallpulvers wird auch ein gewisser Anteil des bereits konsolidierten Konturbereichs verflüssigt, wodurch der sogenannte Interfacebereich entsteht. Somit lässt sich schließen, dass die drei Bereiche in jeder konsolidierten Schicht stets abhängig von der resultierenden Bauteiloberfläche (Außenkontur) entstehen. Die räumliche Anordnung der einzelnen, konsolidierten Schichten wird wiederum durch die Aufbaurichtung bei der Fertigung definiert. Folglich besitzen die entstehenden drei Bereiche neben der Bauteiloberfläche eine Abhängigkeit zur Aufbaurichtung.

Aus der μ CT-Aufnahme (siehe Abbildung 4.3 rechts) ergibt sich, dass der Konturbereich annähernd keine Porosität aufweist. Im Vergleich dazu tritt im Schraffurbereich eine mäßige Porosität und im Interfacebereich eine deutlich erhöhte Porosität auf. (Czink et al., 2022) Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der auftretenden Porosität und den daraus resultierenden mechanischen Materialeigenschaften. In der Regel gilt dabei, je geringer die Porosität, desto besser die mechanischen Materialeigenschaften. Somit kann festgehalten werden, dass durch die unterschiedliche Porositätsverteilung in den drei Bereichen auch verschiedene mechanische Materialeigenschaften entstehen (siehe Kapitel 4.3.2.2), die wiederum den Kraftfluss und dadurch das Bauteilverhalten beeinflussen.

Um diesen Zusammenhang zwischen porenbefestigten Bereichen und Bauteilverhalten zu verdeutlichen sowie ein verbessertes Systemverständnis in Bezug auf das SLM aufzubauen, wird der in Kapitel 2.1.3 beschriebene C&C²-Ansatz herangezogen (siehe Abbildung 4.4).

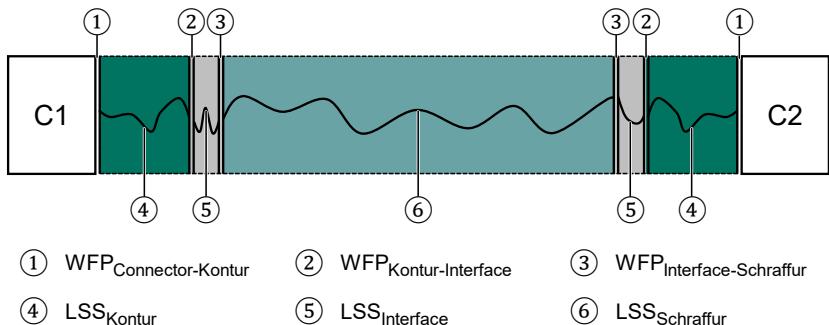


Abbildung 4.4: Analyse der drei porenbefestigten Bereiche mithilfe des C&C²-Ansatzes

Abbildung 4.4 zeigt schematisch die drei porenbehafteten Bereiche, wie sie sich aus dem SLM entlang der Aufbaurichtung ergeben. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Porosität in den drei Bereichen werden diese jeweils als einzelne LSS angesehen und sind über die entsprechenden WFP miteinander verbunden. Aus der Betrachtung (siehe Abbildung 4.4) geht hervor, dass LSS_{Kontur} und $LSS_{Interface}$ stets nah an der Oberfläche liegen, wo aufgrund von potentiellen Biege- oder Torsionsbelastungen die höchsten Spannungen herrschen. Da $LSS_{Interface}$ die größte Porosität und demnach geringsten mechanischen Materialeigenschaften aufweist, ist die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen beispielsweise durch Rissbildung bei hohen Belastungen in $LSS_{Interface}$ am höchsten. Gleichzeitig weist LSS_{Kontur} die geringste Porosität und folglich die besten mechanischen Materialeigenschaften auf. Da $LSS_{Interface}$ jedoch prozessbedingt immerzu direkt an LSS_{Kontur} anschließt, ist bei der Gestaltungsfundung von SLM-gefertigten Bauteilen ein Kompromiss zu finden. So sollte eine möglichst hohe Steifigkeit erzielt, aber gleichzeitig ein potentiell verfrühtes Versagen verhindert werden. Daher gilt es, durch die gezielte Variation der Gestalt diesen Kompromiss zu erfüllen.

Somit lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die drei porenbehafteten Bereiche inklusiv deren mechanischen Materialeigenschaften vom Produktentwickler bzw. dem Entwicklungsteam bereits bei der Gestaltungsfundung und Auslegung von lasttragenden Strukturen berücksichtigt werden sollten. Dadurch können notwendige Anpassungen an der Gestalt in späteren Phasen des Produktentstehungsprozesses reduziert werden. Dies spart zusätzlich Kosten ein, denn je später eine Gestaltänderung im Produktentstehungsprozess notwendig ist, desto teurer sind diese gemäß der Rule of Ten (Clark & Fujimoto, 1991; Reinhart, Lindemann & Heinzl, 1996).

Wie in Kapitel 2.4.3.1 beschrieben, stellt die dichtegebasierte Topologieoptimierung ein unterstützendes Werkzeug für den Produktentwickler bzw. das Entwicklungsteam bei der Gestaltungsfundung solcher lasttragender Bauteildesigns dar. Unter Berücksichtigung der vorgestellten Untersuchungen des SLM mittels μ CT wird es als ziel führend erachtet, die drei porenbehafteten Bereiche direkt in einer Topologieoptimierung zu berücksichtigen, um lastpfadoptimierte Designvorschläge unter Einbeziehung des SLM abzuleiten. Da die drei porenbehafteten Bereiche in direktem Zusammenhang mit der Aufbaurichtung und der Bauteilloberfläche stehen, gilt es, diese in die Topologieoptimierung einfließen zu lassen.

Um unterschiedliche Materialeigenschaften in einer Topologieoptimierung abhängig von der Bauteilloberfläche zu berücksichtigen, wurden in den letzten Jahren verschiedene Ansätze entwickelt. Clausen, Aage & Sigmund (2015) untersuchten beispielsweise einen auf Filtern und Materialinterpolation basierenden Ansatz für dichtegebasierte Topologieoptimierungen zur Berücksichtigung metallischer

Oberflächenbeschichtungen von Polymeren. Suresh, Thore, Torstenfelt & Klarbring (2020) analysierten hingegen auf Basis einer zweistufigen Filterung den Einfluss einer Oberflächenschicht, die im Vergleich zum innenliegenden Volumen variierte Materialeigenschaften aufweist, auf das Ergebnis einer dichtebasierter Topologieoptimierung. Aus beiden Ansätzen ergibt sich, dass die Berücksichtigung einer einzelnen Oberflächenschicht im iterativen Vorgehen einer dichtebasierter Topologieoptimierung einen signifikanten Einfluss auf das Optimierungsergebnis hat. Folglich können derartige Ansätze zur zielgerichteten Ableitung von Designvorschlägen herangezogen werden. Die Ansätze modellieren jedoch stets die gesamte Oberfläche als beschichtet und unterscheiden nicht gesondert entlang einer Aufführung oder weiterer Schichten. Auch wenn die Ansätze die im SLM entstehenden Bereiche nicht abbilden, zeigen sie, dass eine direkte Berücksichtigung von unterschiedlichen Materialeigenschaften in einer Topologieoptimierung zu variierenden Designvorschlägen führen und demnach für die Ableitung steifigkeitsoptimierter Bauteildesigns zielführend sein kann.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass anhand der Untersuchungen des SLM mithilfe der μ CT ein direkter Zusammenhang zwischen Bauteilgestalt und Fertigungsverfahren aufgezeigt werden kann. Da die Berücksichtigung dieses Zusammenhangs bei der Ableitung von lastpfadoptimierten Bauteildesigns nicht intuitiv ist, werden Werkzeuge benötigt, die den Produktentwickler unterstützen. Die vorgestellten Ansätze von Clausen et al. (2015) und Suresh et al. (2020) zeigen, dass die Topologieoptimierung als ein solches Werkzeug zielführend eingesetzt werden kann, wenn sie auf das jeweilige Fertigungsverfahren zugeschnitten ist. Daraus ergibt sich der konkretisierte Forschungsbedarf der vorliegenden Arbeit in Form der Entwicklung einer TopOpt-Methode, welche die drei porenbehafteten Bereiche inklusive der daraus resultierenden Materialeigenschaften bei der Ableitung initialer Designvorschläge miteinbezieht. Folglich kann die in Kapitel 3.1 formulierte erste Forschungsfrage als beantwortet angesehen werden.

4.1.2 Anforderungen an die TopOpt-Methode

Anhand des konkretisierten Forschungsbedarfs aus Kapitel 4.1.1 werden in diesem Kapitel 4.1.2 die Anforderungen an die zu entwickelnde TopOpt-Methode abgeleitet. Auf Basis dieser Anforderungen wird das Zielsystem der vorliegenden Arbeit spezifiziert.

Anforderungen an die Modellbildung

Bei der Nutzung von rechnergestützten Simulations- und Optimierungsverfahren ist die Modellbildung von entscheidender Bedeutung, um ein anforderungsspezifisches Verhältnis zwischen Detaillierungsgrad und Rechenaufwand zu schaffen. So gilt es,

im Sinne des Verkürzungsmerkmals nach Stachowiak (1973) lediglich jene Attribute abzubilden, die für die Modellierung als notwendig zu erachten sind. Aus diesem Grund werden nachfolgend anhand der in Kapitel 4.1.1 gewonnenen Erkenntnisse die für die vorliegende Arbeit notwendigen Attribute und damit verbundenen Anforderungen an die Modellbildung abgeleitet.

Aus den Untersuchungen mittels µCT geht hervor, dass sich im SLM drei Bereiche unterschiedlicher Porosität ausbilden (siehe Kapitel 4.1.1). Diese Porosität und die daraus resultierenden mechanischen Materialeigenschaften eines Bauteils gilt es, in der Modellbildung zu berücksichtigen. Ein hierfür möglicher Ansatz besteht darin, die dreidimensionalen Rekonstruktionen der µCT-Aufnahmen in der FEM (siehe Kapitel 2.4.1.1) einzubetten (Zaretskiy, Geiger, Sorbie & Förster, 2010). Dadurch wird jede Pore im FE-Modell berücksichtigt und das sich daraus ergebende mechanische Materialverhalten abgebildet. Durch dieses Vorgehen werden hochaufgelöste FE-Modelle aufgebaut, die vorwiegend für Detailauslegungen im Mikrometerbereich geeignet und mit einem hohen Rechenaufwand verbunden sind. Im Kontext der zu entwickelnden TopOpt-Methode, bei der in mehreren Iterationen ein initialer Designvorschlag abgeleitet werden soll, sind derart hohe Rechenaufwände mit den heute zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten jedoch nicht praktikabel.

Ein weiterer Ansatz besteht darin, die drei porenbehafteten Bereiche jeweils separat mit homogenisierten mechanischen Materialeigenschaften aus werkstofflichen Untersuchungen (siehe Kapitel 4.3.2.2) zu modellieren und in der TopOpt-Methode zu berücksichtigen. Dieser Ansatz ist im vorliegenden Kontext aus zwei Gesichtspunkten als zulässig anzusehen. Zum einen entstehen die drei porenbehafteten Bereiche stets abhängig von der Aufbaurichtung sowie der Bauteilloberfläche ohne etwaige Überlappungen (siehe Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4), wodurch die Bereiche als einzelne Materialschichten angesehen werden können. Zum anderen unterscheiden sich die Größenskalen zwischen den modellierten Schichten und den entstehenden Poren um mehrere Zehnerpotenzen. Durch die Nutzung des Ansatzes ergibt sich zusätzlich eine Reduktion des Rechenaufwands im Vergleich zum Einsatz der dreidimensionalen Rekonstruktionen der µCT-Aufnahmen. Somit wird dieser Ansatz als zielführend erachtet und im Rahmen der vorliegenden Arbeit weiterverfolgt.

Anhand des gewählten Ansatzes lassen sich die damit verbundenen Anforderungen an die Modellbildung ableiten. So gilt es, die drei porenbehafteten Bereiche rechnergestützt, automatisiert und zuverlässig auf Basis der Aufbaurichtung und Bauteilloberfläche unabhängig von der Bauteilkomplexität abzuleiten. Bei dieser Ableitung ist darauf zu achten, dass die Bereiche mit einer ausreichenden Auflösung

modelliert werden. Dadurch wird sichergestellt, dass der Einfluss der unterschiedlichen Porosität auf die resultierenden Designvorschläge berücksichtigt werden kann. Für diese Berücksichtigung der Porosität und den damit verbundenen mechanischen Materialeigenschaften wird eine geeignete Schnittstelle zwischen werkstofflichen Untersuchungen und der TopOpt-Methode benötigt. Diese Schnittstelle ist derart zu gestalten, dass die entsprechenden mechanischen Materialeigenschaften eines jeden Bereichs automatisiert und zuverlässig in die TopOpt-Methode übertragen werden können. Um potentielle Nachbearbeitungsschritte zu reduzieren, ist die TopOpt-Methode so zu restringieren, dass die abgeleiteten Designvorschläge im SLM ohne größere Einschränkungen fertigbar sind. Darüber hinaus müssen die abgeleiteten Designvorschläge automatisiert in einem von der SLM-Anlage verarbeitbaren Datenformat vorliegen, um etwaige Informationsverluste bei einer Datentransformation zu vermeiden.

Neben den aufgezeigten Anforderungen an die Modellbildung leiten sich zusätzliche Anforderungen an die zu entwickelnde TopOpt-Methode aufgrund deren Nutzung im Kontext der Produktentstehung ab. Nachfolgend werden diese zusätzlichen Anforderungen beschrieben.

Anforderungen aus Sicht der Produktentstehung

Der Anspruch an die zu entwickelnde TopOpt-Methode ist die zielgerichtete Unterstützung des Produktentwicklers respektive des Entwicklungsteams bei der Ableitung initialer Designvorschläge für SLM-gefertigte, steifigkeitsoptimierte Bauteile in frühen Phasen der Produktentstehung. Dabei soll nicht nur ein Nutzen für Experten auf dem Gebiet der Simulation und Optimierung erzeugt werden, sondern auch Produktentwickler mit geringerem Know-how auf diesem Gebiet unterstützt werden. Aus diesem Grund besteht die Anforderung an die TopOpt-Methode, dass diese für den anwendenden Produktentwickler bzw. das anwendende Entwicklungsteam mit wenig Modellvorbereitung verbunden ist und der Optimierungsschritt automatisiert abläuft. Nichtsdestotrotz muss ein gewisses Grundverständnis für Simulation und Optimierung sowie Materialwissenschaften und additive Fertigung im Entwicklungsteam vorhanden sein. Dieses Grundverständnis kann auf verschiedene Personen aufgeteilt sein oder von einer Person abgedeckt werden. Des Weiteren ist eine Schnittstelle zu definieren und zu implementieren, die eine effiziente Anpassung der veränderbaren Parameter der TopOpt-Methode bereitstellt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt die Entwicklung der TopOpt-Methode zwar mithilfe akademischer Beispiele, eine Nischenlösung soll jedoch nicht entstehen. Vielmehr wird der potentielle Einsatz im industriellen Umfeld angestrebt. Besonders in diesem Umfeld kommt häufig kommerzielle Software zum Einsatz, da sie durch das anbietende Unternehmen regelmäßige Updates erhält und zumeist über

Jahre hinweg verfügbar ist. Des Weiteren werden Fehler in Algorithmen aufgrund der Vielzahl an Anwendern häufiger erfasst und direkt vom Unternehmen beseitigt. Darüber hinaus zeichnet sich kommerzielle Software durch ihre gute Verfügbarkeit und Dokumentation sowie hohe Robustheit aus. Bei nicht-kommerzieller Software sind diese Aspekte nicht immer gegeben. Daraus leitet sich eine weitere Anforderung an die zu entwickelnde TopOpt-Methode ab, als Basis kommerzielle Software zu nutzen. Diese Anforderung spiegelt zudem die Forschungsaktivitäten der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung im Kontext der Simulation und Optimierung wider. Hierbei liegt der Fokus auf der gezielten Nutzung bestehender Methoden und deren situationsspezifischen Adaption, um das gewünschte Ergebnis zu erreichen. Die Entwicklung vollständig neuer Optimierungsalgorithmen oder Software wird nicht angestrebt.

Die PGE – Produktgenerationsentwicklung (siehe Kapitel 2.1.2) verfolgt ebenfalls diesen Ansatz hinsichtlich Nutzung sowie Adaption bestehender Methoden und Werkzeuge. Aus diesem Grund wird die PGE – Produktgenerationsentwicklung ebenfalls für die Entwicklung neuer Generationen im Kontext der rechnergestützten Simulation und Optimierung genutzt (siehe Kapitel 2.4.4) und definiert die Entwicklungsumgebung der vorliegenden Arbeit. Die Entwicklung einer solchen neuen Generation erfolgt auf Basis von Referenzsystemelementen durch ÜV, AV oder PV. Je nach Art bzw. Herkunft dieser Referenzsystemelemente ergibt sich allerdings ein unterschiedlich hohes Entwicklungsrisiko für die neue Generation (siehe Kapitel 2.4.4). Auch wenn dieses Entwicklungsrisiko im Kontext von Forschungsprojekten höher als bei Industrieprojekten sein darf, sollte dadurch der Erfolg der Entwicklung nicht gefährdet sein (Albers, Haberkern et al., 2022). Infolgedessen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit bei der Wahl der Referenzsystemelemente, sofern zielführend möglich, auf institutseigene Vorarbeiten und institutbekannte Methoden zurückgegriffen. Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methoden und Ansätze sollen im Sinne der PGE – Produktgenerationsentwicklung wiederum als Referenzsystemelemente für die Entwicklung weiterer Simulations- und Optimierungsgenerationen dienen. Dadurch wird die Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfelder und Forschungsaktivitäten ermöglicht (siehe Kapitel 5.2).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass auf Basis des abgeleiteten Forschungsbedarfs (siehe Kapitel 4.1.1) die Anforderungen an die zu entwickelnde TopOpt-Methode im Zielsystem dieser Arbeit definiert sind. Demnach kann die in Kapitel 3.1 formulierte zweite Forschungsfrage als beantwortet angesehen werden. Aufbauend auf den abgeleiteten Anforderungen wird im folgenden Kapitel 4.2 die Entwicklung der TopOpt-Methode, die ein Teil des Handlungssystems darstellt, beschrieben.

4.2 Entwicklung der TopOpt-Methode

Dieses Kapitel 4.2 umfasst die Entwicklung der TopOpt-Methode zur Ableitung SLM-gefertigter, steifigkeitsoptimierter Bauteildesigns. Die Entwicklung entspricht im Sinne der DRM der PS (siehe Abbildung 3.1) und erfolgt in einem schrittweisen und iterativen Vorgehen. Dieses Vorgehen beschreibt das Wechselspiel zwischen Entwicklung sowie Verifikation und Validierung (siehe Kapitel 4.3). Das sich daraus ergebende Resultat sind die nachfolgend vorgestellten Methoden zur Modellierung der SLM-spezifischen Porenverteilung und zur Berücksichtigung der damit verbundenen mechanischen Materialeigenschaften in der TopOpt-Methode auf Basis der definierten Anforderungen (siehe Kapitel 4.1.2). Dabei wird auf die Vorstellung von Entwicklungsgenerationen der Methoden verzichtet.

Nachfolgend wird zunächst die Modellbildung der drei porenbehafteten Bereiche vorgestellt (siehe Kapitel 4.2.1). Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 4.2.2 die Beschreibung der notwendigen Anpassungen an einer dichtebasierter Topologieoptimierung, sodass die Ableitung initialer Designvorschläge für SLM-gefertigte Bauteile automatisiert erfolgen kann. Durch die in diesem Kapitel 4.2 beschriebenen Inhalte wird die dritte Forschungsfrage zur Untersuchung der in dieser Arbeit vorliegenden Forschungshypothese beantwortet.

Forschungsfrage

3. Wie kann eine dichte basierte Topologieoptimierungsmethode aussehen, um automatisiert einen initialen Designvorschlag für SLM-gefertigte, steifigkeitsoptimierte Bauteile zu generieren?

4.2.1 Modellbildung der drei porenbehafteten Bereiche

Nachfolgend werden zunächst anhand von zweidimensionalen Modellen die notwendigen Schritte zur automatisierten, rechnergestützten Bestimmung der drei porenbehafteten Bereiche vorgestellt. Des Weiteren werden Anforderungen an diese Bereichsbestimmung und damit verbundene Herausforderungen abgeleitet. Darauf aufbauend erfolgt die Beschreibung der Methode zur Bestimmung der drei porenbehafteten Bereiche in dreidimensionalen Modellen.

Aus den werkstofflichen Untersuchungen mittels μ CT in Kapitel 4.1.1 geht hervor, dass sich die drei porenbehafteten Bereiche stets abhängig von der Aufbaurichtung und der Bauteiloberfläche ausbilden. Daraus ergibt sich die in Kapitel 4.1.2 abgeleit-

tete Anforderung einer rechnergestützten, automatisierten und zuverlässigen Bestimmung dieser Bereiche unabhängig von der Komplexität des Bauteils. Um die damit einhergehenden Herausforderungen zu analysieren, wird nachfolgend zunächst eine einzelne, konsolidierte Schicht als 2D-Präsentation, wie sie sich im Slicing (siehe Abbildung 2.12) entlang der Aufbaurichtung einstellt, herangezogen. Abbildung 4.5 stellt exemplarisch eine derartige 2D-Präsentation aus der Mitte der Bodenplatte des vorgestellten Demonstrators (siehe Abbildung 4.5) dar.

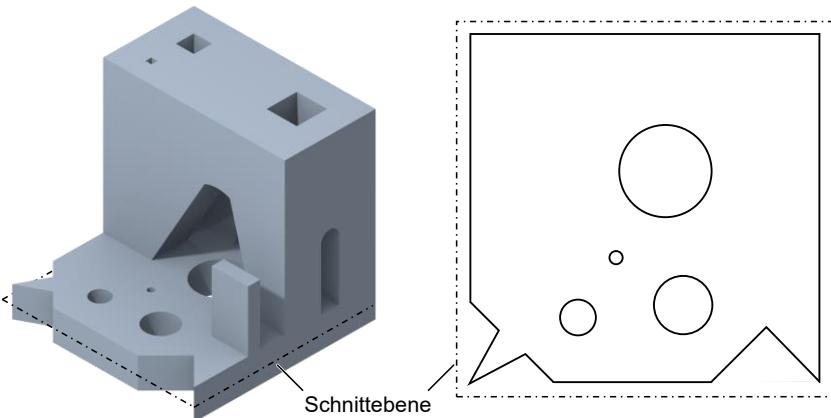


Abbildung 4.5: Demonstrator aus Abbildung 4.1 (links) und 2D-Präsentation einer konsolidierten Schicht der Schnittebene (rechts)

Wie in Abbildung 4.5 rechts zu erkennen ist, stellt die 2D-Präsentation gleichzeitig die in der Schnittebene vorliegende Oberfläche, bestehend aus Umriss und Bohrungen, des Demonstrators dar. Da Kontur- und Interfacebereich stets in einem definierten Abstand zur Oberfläche auftreten (siehe Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4), besteht die Möglichkeit, die 2D-Präsentation mithilfe zweier Offsetbildungen automatisiert zu unterteilen und daraus die drei porenbehafteten Bereiche abzuleiten (Holoch, Lenhardt & Albers, 2022a). Abbildung 4.6 stellt die daraus resultierenden Ergebnisse für zwei unterschiedlich große Offsetbildungen dar.

Durch diese Unterteilung werden Offsets erzeugt, die jeweils als Grenzlinien zwischen zwei der porenbehafteten Bereiche anzusehen sind. So spiegelt einerseits Offset 1 die Grenzlinie zwischen Kontur- und Interfacebereich und andererseits Offset 2 jene zwischen Interface- und Schraffurbereich wider (siehe gestrichelte Linien in Abbildung 4.6). Folglich entspricht die Fläche zwischen der Oberfläche und Offset 1 dem Konturbereich, während der Interfacebereich durch die Fläche zwischen Offset 1 und Offset 2 repräsentiert wird (siehe Abbildung 4.6). Der Schraffurbereich

ergibt sich immerzu aus der von Offset 2 eingeschlossenen Fläche. (Holoch et al., 2022a)

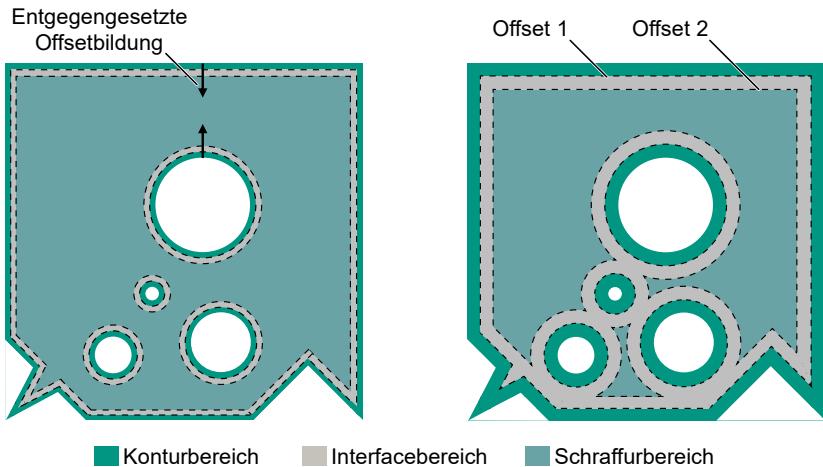


Abbildung 4.6: Beispielhafte Unterteilung der abgeleiteten 2D-Bauteilkontur aus Abbildung 4.5 in die drei porenbehafteten Bereiche anhand eines geringen Offset (links) und großen Offset (rechts)

Aus Abbildung 4.6 geht ebenfalls hervor, dass die Offsetbildung stets von der Oberfläche aus ins Innere der 2D-Bauteilkontur verläuft (siehe Abbildung 4.6 links). So vergrößert sich bei den Bohrungen der Durchmesser durch die Offsetbildung. Die äußeren Abmaße (Außenkontur) werden hingegen verringert. Folglich verläuft die Offsetbildung bei Bohrungen in entgegengesetzte Richtung als jene der äußeren Abmaße. Dadurch kann es abhängig von der Offsetgröße zu Überschneidungen kommen, wodurch die drei porenbehafteten Bereiche inkorrekt abgebildet werden. Um derartige Überschneidungen zu verhindern, wird das sogenannte Clipping nach Vatti (1992) genutzt. Sich überlappende Offsets werden dadurch beschnitten und zu einem verbunden, wie beispielsweise an den Bohrungen in Abbildung 4.6 rechts zu erkennen ist. Diese Art der Offsetbildung stellt demnach eine Möglichkeit zur zuverlässigen und automatisierten Bereichsbestimmung für zweidimensionale Bauteile bereit.

Diese zweidimensionale Bereichsbestimmung kann für FE-Modelle, wie sie im Kontext der Topologieoptimierung eingesetzt werden, anhand einzelner Partitionen durchgeführt werden (Holoch, Träger & Albers, 2020; Holoch et al., 2022a). Im Rahmen der in dieser Arbeit entwickelten TopOpt-Methode wird die zweidimensionale

Bereichsbestimmung im ersten Schritt der Verifikation (siehe Kapitel 4.3.1.1) sowie zur Untersuchung des Größeneinflusses von Bauteilen auf die resultierenden Designvorschläge genutzt (siehe Kapitel 4.3.3). Die Implementierung zweidimensionaler Offsets anhand derartiger Partitionen basiert auf der vom Autor co-betreuten Abschlussarbeit von Glaser (2019)¹⁶.

Da im Kontext der vorliegenden Arbeit vorwiegend dreidimensionale Bauteile im Fokus stehen, gilt es, die drei porenbefahfteten Bereiche auch in solchen Bauteilen zu bestimmen. Ein möglicher Ansatz hierfür besteht darin, die vorgestellte zweidimensionale Offsetbildung wiederholt zu nutzen. Dazu werden für jede sich aus dem Slicing ergebende 2D-Repräsentation eines Bauteils die Offsets bestimmt und die drei porenbefahfteten Bereiche abgeleitet. Durch die anschließende Stapelung der einzelnen 2D-Repräsentationen entlang der Aufbaurichtung ergibt sich das Bauteil inklusive der drei Bereiche. Für einfache Geometrien mit wenigen geometrischen Variationen entlang der Aufbaurichtung, wie beispielsweise die Bodenplatte des Demonstrators, ist dieser Ansatz zuverlässig anwendbar. Bei komplexeren Geometrien, wie sie sich beispielsweise aus einer Topologieoptimierung ergeben, kann dieser Ansatz allerdings Abweichungen im Vergleich zur ursprünglichen Geometrie hervorrufen. Zurückzuführen ist dies auf einen Informationsverlust aufgrund der 2D-Repräsentationen, wie sie sich aus dem Slicing ableiten lassen.

Durch die Repräsentation eines Bauteils in einer Vielzahl zweidimensionaler Schichten wird die Dicke und somit die dritte Raumrichtung nicht länger abgebildet, wodurch die Information hinsichtlich des Zusammenhangs der Schichten in Aufbaurichtung verloren geht. Verdeutlichen lässt sich dieser Informationsverlust anhand des exemplarischen Beispiels in Abbildung 4.7. Weist die ursprüngliche Geometrie beispielsweise scharfe Übergänge oder Verzweigungen auf (siehe Abbildung 4.7 links), kann anhand der Schichten nicht eindeutig bestimmt werden, wie diese zu verbinden sind und die Geometrie wird gegebenenfalls inkorrekt aufgebaut. Konkret lässt sich der inkorrekte Aufbau anhand der Stufe, der Gabelung in der Geometrie sowie des Übergangs von Bodenplatte zu den Streben erkennen (siehe schwarze Markierungen in Abbildung 4.7 rechts). An diesen Stellen treten aufgrund der Rekonstruktion der dreidimensionalen Geometrie mithilfe der 2D-Repräsentationen Ungenauigkeiten auf.

¹⁶ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

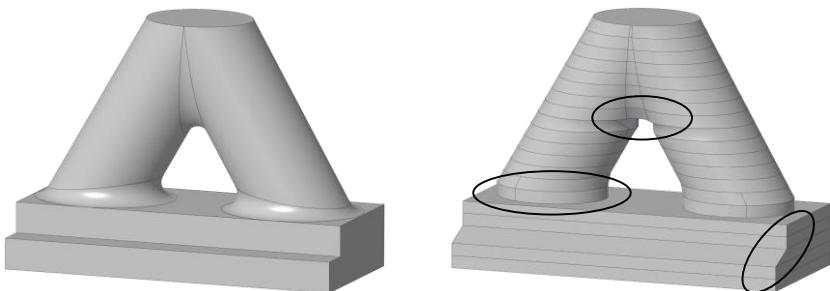


Abbildung 4.7: Beispielhafte Darstellung der Auswirkung des Informationsverlusts beim Slicing auf den Aufbau einer Geometrie aus 2D-Repräsentationen: Ursprüngliche Geometrie (links) und inkorrekt aufgebauten Geometrie (rechts)

Das Beispiel aus Abbildung 4.7 verdeutlicht, dass die Nutzung der zweidimensionalen Offsetbildung zur Rekonstruktion einer dreidimensionalen Geometrie nicht ohne Weiteres zuverlässig umzusetzen ist und es einer Vielzahl einzelner Fallunterscheidungen hinsichtlich des Zusammenhangs zweier Schichten zueinander in Aufbaurichtung bedarf. Folglich ist dieser Ansatz zur Offsetbildung lediglich für zweidimensionale Topologieoptimierungen praktikabel. Für dreidimensionale Topologieoptimierungen, wie sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit zum Einsatz kommen, gilt es vielmehr, einen Ansatz zu nutzen, der den beschriebenen Informationsverlust beim Slicing umgeht. Derartige Ansätze wurden in den Abschlussarbeiten von Kreissig (2020)¹⁷ und Schiedermair (2020)¹⁸, die beide vom Autor der vorliegenden Arbeit co-betreut wurden, untersucht. Schiedermair (2020) erfasst die drei porenbehafteten Bereiche mithilfe boolescher Operationen an Volumenkörpern in Abaqus. Hierfür werden jedoch parametrisierte Geometrien benötigt, die im Rahmen einer Topologieoptimierung nicht stets gewährleistet werden können. Im Vergleich zu Schiedermair (2020) bestimmt Kreissig (2020) die drei porenbehafteten Bereiche auf Basis eines Oberflächennetzes, indem die Oberflächenelemente verschoben und beschnitten werden. Bei dieser Beschneidung ergeben sich jedoch wie bei der Rekonstruktion aus den zweidimensionalen Repräsentationen eine Vielzahl an Fallunterscheidungen, die es abzufangen gilt. Demnach weisen beide Ansätze Grenzen hinsichtlich Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit bei komplexen dreidimensionalen Bauteilen auf. Daraus leitet sich die Notwendigkeit eines allgemeingültigen Ansatzes unabhängig von der Bauteilkomplexität ab.

¹⁷ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁸ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Ein solcher Ansatz besteht darin, dreidimensionale Offsets direkt anhand eines Bau-teils unter Berücksichtigung der Aufbaurichtung zu bestimmen. Hierzu wird im Rah-men der vorliegenden Arbeit eine zweistufige Methode, bestehend aus Offsetbil-dung und anschließender Filterung entlang der Aufbaurichtung, entwickelt und anhand von Skripten in Python 3.10.0¹⁹ und Julia 1.8.1²⁰ umgesetzt. Diese zweistu-fige Methode wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels 4.2.1 vorgestellt und wurde bereits im Rahmen der Publikationen Holoch, Lenhardt, Renz & Albers (2021) sowie Holoch, Lenhardt, Revfi & Albers (2022) veröffentlicht.

Die vorliegende Arbeit umfasst die Entwicklung einer dichte-basierten TopOpt-Methode (siehe Kapitel 4.2.2), die zur Evaluation der Zielfunktion und zur Diskreti-sierung des Designraums die FEM einsetzt. Folglich nutzt die zweistufige Methode zur Offsetbildung ebenfalls diskretisierte Geometrien als Ausgangspunkt. Konkret kommt ein Oberflächennetz im Standard Triangulation Language (STL) Format zum Einsatz (siehe Abbildung 4.8). (Holoch et al., 2021)

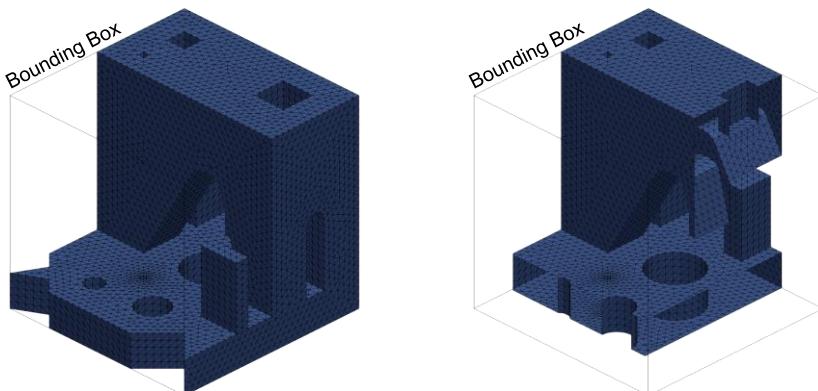


Abbildung 4.8: Oberfläche des Demonstrators aus Abbildung 4.1 im STL-Format:
Gesamter Demonstrator (links) und Schnittansicht (rechts)

Bei diesem Oberflächennetz handelt es sich, per Definition des STL-Formats um eine im Inneren hohle 3D-Repräsentation des Demonstrators bestehend aus Kno-ten und zweidimensionalen Dreieckelementen (siehe Abbildung 4.8 rechts). Auf Ba-sis des Oberflächennetzes wird der Übergang (Offset 1) zwischen Kontur- und In-terfacebereich (siehe Abbildung 4.9 links) sowie der Übergang (Offset 2) zwischen

¹⁹ <https://www.python.org> (abgerufen am 06.04.2023)

²⁰ <https://julialang.org> (abgerufen am 06.04.2023)

Interface- und Schraffurbereich (siehe Abbildung 4.9 rechts) bestimmt. Diese beiden Offsets beschreiben jeweils die Grenzfläche zwischen den drei porenbefestigten Bereichen und ermöglichen somit deren Abgrenzung voneinander.

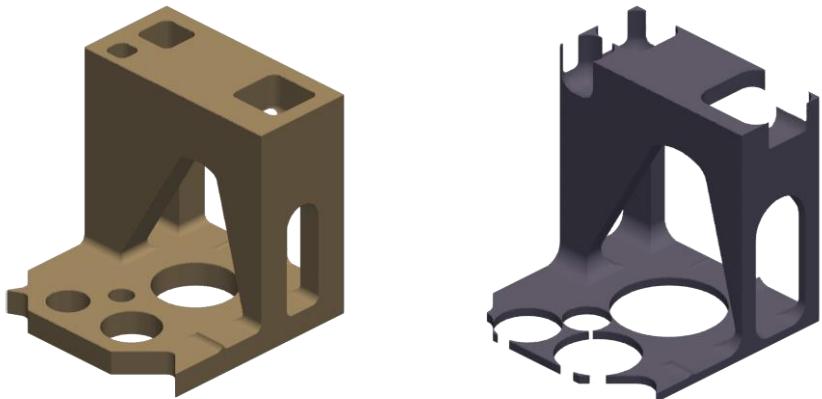


Abbildung 4.9: Offset 1 (links) und Offset 2 (rechts) zur Bestimmung der drei porenbehafteten Bereiche

Um die beiden Offsets zu bestimmen, wird zunächst innerhalb einer Bounding Box (siehe Abbildung 4.8) ein Raumgitter erzeugt, das aus Gitterknoten und Voxel aufgebaut ist. Abhängig vom Gitterknotenabstand bzw. der Voxelanzahl wird die Auflösung der Offsets und somit die Abbildungsgenauigkeit der drei Bereiche definiert. Die Bounding Box repräsentiert die maximalen Abmessungen des Oberflächennetzes des Demonstrators. Die entstehenden Gitterknoten werden genutzt, um eine Signed-Distance-Function (siehe Kapitel 2.4.1.2) zu erzeugen. (Holoch et al., 2021) Für diese Erzeugung werden, wie in Kapitel 2.4.1.2 beschrieben, der minimale Abstand und die Position (inner- oder außerhalb des Oberflächennetzes) eines jeden Gitterknotens zum Oberflächennetz des Demonstrators benötigt. Der minimale Abstand ergibt sich aus dem Abstand des betrachteten Gitterknotens zum nächstgelegenen Dreieckelements des Oberflächennetzes (Ericson, 2004). Zur Bestimmung, ob der vorliegende Gitterknoten inner- oder außerhalb des Oberflächennetzes positioniert ist, wird das Prinzip der Winding Numbers nach Jacobson, Kavan & Sorkine-Hornung (2013) genutzt. Bei diesem Prinzip handelt es sich um ein Vorgehen zur Überprüfung, ob ein bestimmter Punkt im Zweidimensionalen von einem Polygonzug bzw. im Dreidimensionalen von einer Oberfläche eingeschlossen wird. Anhand der Informationen hinsichtlich des Abstands und der Position jedes Gitterknotens werden nun die Signed-Distance-Function erstellt und die beiden Offsets (siehe Abbildung 4.9) mit einem definierten Abstand zum Oberflächennetz des

Demonstrators bestimmt (Holoch et al., 2021). Hierzu wird der Algorithmus Marching Tetrahedra nach Carneiro, Silva & Kaufmann (1996) eingesetzt, wodurch die beiden Offsets ebenfalls als Oberflächennetze im STL-Format abgebildet werden.

Eine räumliche Überlagerung der drei Oberflächennetze ist Abbildung 4.10 links zu entnehmen. Anhand der Schnittdarstellung lässt sich erkennen, dass keine Überlappungen oder Kollisionen zwischen den Oberflächennetzen bestehen.

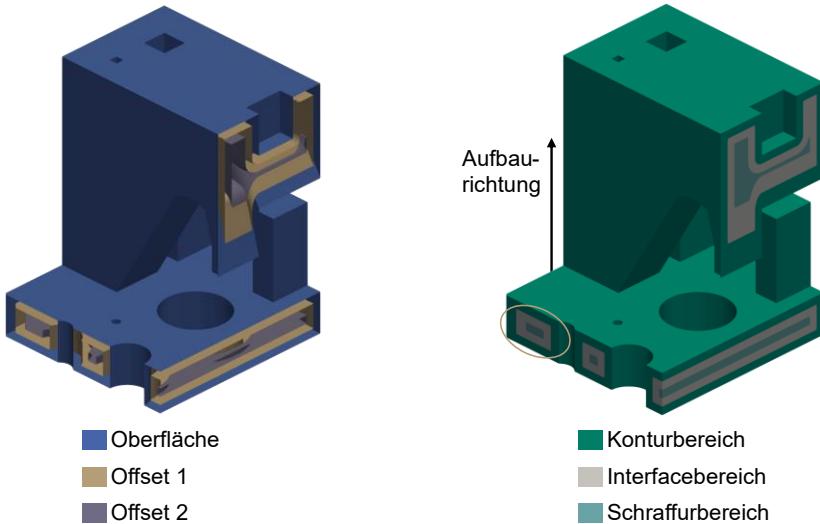


Abbildung 4.10: Schnittdarstellung der Oberflächennetze des Demonstrators und der Offsets (links) sowie der daraus abgeleiteten drei porenbefahnten Bereiche ohne Filterung (rechts)

Mit diesen nun vorliegenden Oberflächennetzen (siehe Abbildung 4.10 links) kann eine Einteilung in die drei porenbefahnten Bereiche durchgeführt werden (Holoch et al., 2021). Für diese Einteilung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit der Vernetzungsalgorithmus TetGen nach Si (2015) eingesetzt, der die jeweiligen Bereiche zwischen den Oberflächennetzen mit Tetraederelementen (TE) vernetzt und somit einen dreidimensionalen Volumenkörper erzeugt (siehe Abbildung 4.10 rechts). Bei dieser Vernetzung wird die Position der Dreiecke in den Oberflächennetzen nicht verändert, wodurch die Konformität des entstehenden TE-Netzes sichergestellt wird (Si, 2015). Als Ergebnis liegen nun die drei porenbefahnten Bereiche als TE-Netze vor, wodurch der erste Schritt der entwickelten zweistufigen Methode zur Offsbildung abgeschlossen ist. An dieser Stelle gilt es anzumerken, dass die Wahl

des Vernetzungsalgorithmus TetGen darauf beruht, dass dieser frei zugänglich (Open Source) ist und die spezifischen Anforderungen an die Vernetzung erfüllt. Für die Vernetzung können jedoch auch weitere Algorithmen genutzt werden, solange die notwendigen Schnittstellen angepasst werden. Daher ist TetGen lediglich als ein Beispiel für einen zielführend einsetzbaren Vernetzungsalgorithmus zu verstehen.

Aufgrund der Offsetbildung mittels Signed-Distance-Function liegen die drei porenbefesteten Bereiche allerdings noch in allen Raumrichtungen vor (siehe Abbildung 4.10 rechts). Da sich die Bereiche jedoch abhängig von der Aufbaurichtung ausbilden, folgt im zweiten Schritt der entwickelten zweistufigen Methode zur Offsetbildung eine Filterung der abgeleiteten Bereiche entlang eben dieser Aufbaurichtung (Holoch et al., 2022). Um das Vorgehen zur Filterung zu beschreiben, wird ein Ausschnitt des Demonstrators (siehe braune Markierung in Abbildung 4.10 rechts) als Beispiel herangezogen. Dieser Ausschnitt inklusive TE-Netz sowohl vor als auch nach der Filterung ist Abbildung 4.11 zu entnehmen.

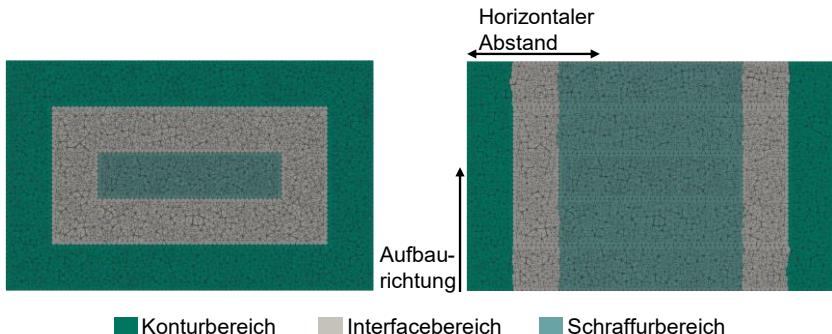


Abbildung 4.11: Beispielhafte Darstellung der drei porenbefesteten Bereiche inklusive TE-Netz in allen Raumrichtungen vor der Filterung (links) und entlang der Aufbaurichtung nach der Filterung (rechts)

Aus dem Vergleich der vorliegenden Bereiche in Abbildung 4.11 wird ersichtlich, dass die korrekte Einteilung (siehe Abbildung 4.11 rechts) der drei porenbefesteten Bereiche dadurch erzielt wird, dass der Kontur- und Interfacebereich entlang der Aufbaurichtung einer erneuten Unterteilung unterzogen werden. Sämtliche TE, die aufgrund der Offsetbildung fälschlicherweise dem Kontur- oder Interfacebereich zugeordnet wurden (siehe Abbildung 4.11 links), gilt es, zu identifizieren und dem jeweils korrekten der drei Bereiche zuzuweisen. Um dies zu erreichen, werden zunächst alle TE an der Oberfläche des Kontur- und Interfacebereichs bestimmt, die einen Normalenvektor parallel zur Aufbaurichtung besitzen. In Abbildung 4.11 sind

dies alle TE an der Ober- und Unterseite des Kontur- und Interfacebereichs. Anschließend erfolgt die Berechnung der Mittelpunkte dieser TE. Durch den horizontalen Abstand (senkrecht zur Aufbaurichtung) der Mittelpunkte zur Oberfläche des Demonstrators kann danach abgeleitet werden, welchem der drei Bereiche das TE abhängig von der Aufbaurichtung zugeordnet wird. So wird beispielsweise das TE dem Schraffurbereich zugewiesen, wenn der horizontale Abstand größer als die Summe der Dicken des Kontur- und Interfacebereichs ist (siehe Abbildung 4.11 rechts). Nachdem alle TE an der Oberfläche im Kontur- und Interfacebereich neu eingeteilt sind, werden deren Nachbarelemente derselben horizontalen Abstandsberechnung unterzogen und ebenfalls dem entsprechenden Bereich zugeordnet. Dieses Vorgehen wird so lange durchgeführt, bis alle TE korrekt zugeordnet sind, wodurch sich die in Abbildung 4.11 rechts dargestellte Bereichseinteilung ergibt. Da die Bereichseinteilung auf Basis des bestehenden TE-Netzes durchgeführt wird, besteht folglich eine direkte Abhängigkeit zwischen der Auflösung des TE-Netzes und der Abbildungsgenauigkeit der drei Bereiche. Dies gilt es, bei der Wahl der Elementgröße zur Offsetbildung zu berücksichtigen. (Holoch et al., 2022)

Durch die Anwendung dieser Filterung auf die resultierenden Bereiche der Offsetbildung (siehe Abbildung 4.10 rechts) stellt sich das Ergebnis aus Abbildung 4.12 ein.

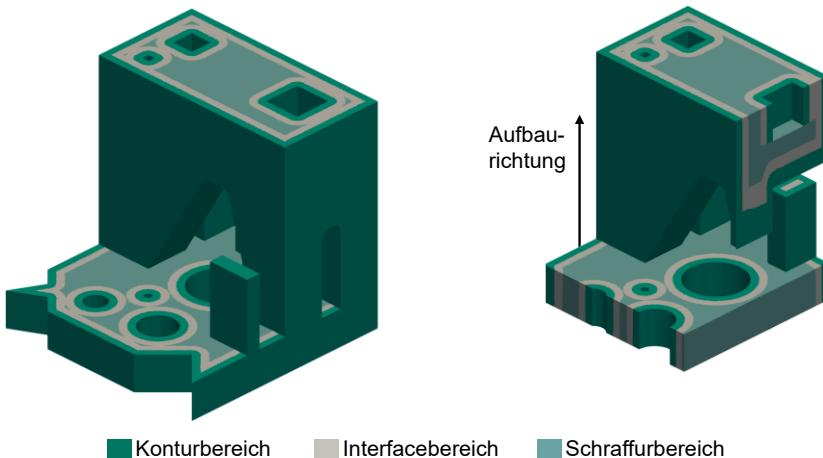


Abbildung 4.12: Aufgrund der Filterung entlang der Aufbaurichtung entstehenden drei porenbehaftete Bereiche: Gesamter Demonstrator (links) und Schnittansicht (rechts)

Aus Abbildung 4.12 geht hervor, dass sowohl der Kontur- als auch Interfacebereich derart angepasst wurden, dass die drei porenbehafteten Bereiche entlang der Aufbaurichtung vorliegen. Dies ist vor allem an den durchschnittenen Durchgangsbohrungen sowie der rechteckigen Vertiefung in Abbildung 4.12 rechts zu erkennen.

Durch die vorgestellte dreidimensionale Offsetbildung inklusive Filterung wird eine zentrale Anforderung an die Modellbildung aus Kapitel 4.1.2, bestehend aus der automatisierten und zuverlässigen Erfassung der drei porenbehafteten Bereiche unabhängig von der Bauteilkomplexität, bedient. Darauf aufbauend wird im nächsten Kapitel 4.2.2 das Vorgehen vorgestellt, um die erfassten Bereiche in einer dichtebasierter Topologieoptimierung zur Ableitung initialer Designvorschläge steifigkeitsoptimierter Bauteile zu berücksichtigen.

4.2.2 Workflow der TopOpt-Methode

Zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage (siehe Kapitel 3.1) der vorliegenden Arbeit wird in diesem Kapitel 4.2.2 nachfolgend der Workflow der dichtebasierter TopOpt-Methode entwickelt. Diese berücksichtigt die zuvor vorgestellte Unterteilung von Bauteilen in die drei porenbehafteten Bereiche (siehe Kapitel 4.2.1) inklusive der damit verbundenen Materialeigenschaften aus dem SLM (siehe Kapitel 4.3.2.2) im iterativen Vorgehen zur Auswertung der Sensitivitäten der Optimierung. Damit wird die Wechselwirkung zwischen Produkt und Produktionssystem direkt bei der Synthese von Produktdesigns miteinbezogen, wodurch die Komplexität derartiger Wechselwirkungen für den Produktentwickler besser handhabbar gemacht wird. Daraus wird das Ziel verfolgt, durch die Entwicklung der TopOpt-Methode dem Produktentwickler respektive dem Entwicklungsteam ein unterstützendes Werkzeug für die initiale Gestaltfindung steifigkeitsoptimierter, SLM-gefertigter Bauteildesigns zur Verfügung zu stellen (Albers, Holoch, Dietrich & Spadinger, 2018). Die TopOpt-Methode soll derart aufgebaut werden, dass sie den zuvor in Kapitel 4.1.2 definierten Anforderungen genügt.

Die nachfolgenden Inhalte dieses Kapitels 4.2.2 wurden bereits im Rahmen der Publikationen Albers, Holoch et al. (2018), Holoch et al. (2021) und Holoch et al. (2022) veröffentlicht.

Um den Ablauf der TopOpt-Methode schematisch darzustellen und die Zusammenhänge der einzelnen Teilmethoden zu verdeutlichen, ist sie im IPEK-Kopplungsmodell (siehe Kapitel 2.4.4) visualisiert (siehe Abbildung 4.13). Aus Abbildung 4.13 ergibt sich, dass aufgrund der in Kapitel 4.1.2 abgeleiteten Anforderung an die TopOpt-Methode kommerzielle Software zu nutzen, ein Großteil der Teilmethoden auf derartiger Software beruht. Die Vorteile durch die Nutzung von kommerzieller

Software wurden bereits in Kapitel 4.1.2 diskutiert und lassen sich zusätzlich in Albers, Reichert et al. (2017) finden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird Abaqus 2019 und Tosca 2019 von Dassault Systèmes sowie MapLib vom Fraunhofer SCAI und Creo 8²¹ von PTC als kommerzielle Softwares verwendet. (Holoch et al., 2022) Der Einsatz der genannten Softwares lässt sich darauf zurückführen, dass am IPEK – Institut für Produktentwicklung langjährige Erfahrung mit diesen Softwares besteht und sowohl in Forschung als auch Lehre eingesetzt werden. Dadurch kann im Sinne der PGE – Produktgenerationsentwicklung auf Referenzen wie bestehende Skripte, Vorgehensweisen und Anwendungsbeispiele zurückgegriffen werden.

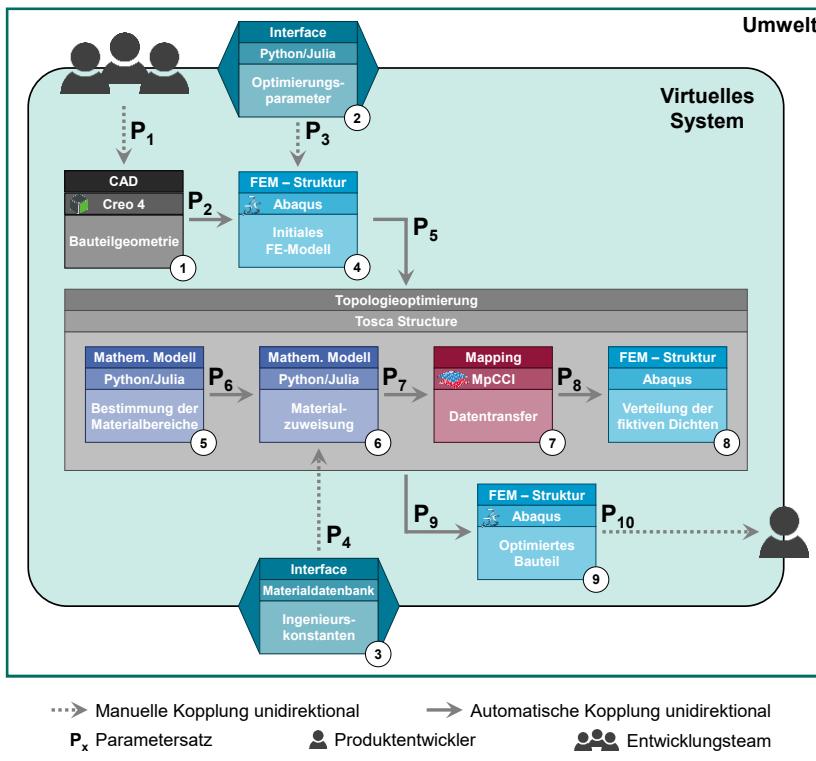


Abbildung 4.13: Kopplungsmodell der TopOpt-Methode zur Ableitung initialer Designvorschläge für steifigkeitsoptimierte, SLM-gefertigte Bauteile

²¹ <https://www.ptc.com/de/products/creo> (abgerufen am 07.04.2023)

Das Vorgehen der TopOpt-Methode (siehe Abbildung 4.13) zeichnet sich dadurch aus, dass eine standardisierte Topologieoptimierung in jeder Iteration zunächst kurzzeitig unterbrochen und das vorliegende Zwischenergebnis in Form eines geglätteten Oberflächennetzes im STL-Format exportiert wird. Anschließend werden auf Basis des exportierten Zwischenergebnisses die drei porenbehafteten Bereiche bestimmt sowie die dazugehörigen Materialeigenschaften abgebildet und der nächsten Iteration der Topologieoptimierung als Eingangsparameter zur Weiterführung der Optimierung übergeben. Dieses Vorgehen wird wiederholt, bis ein Konvergenzkriterium erreicht ist. Mit der TopOpt-Methode wird demnach der Ansatz verfolgt, das Bauteilverhalten jedes Zwischenergebnisses der Optimierung mit den sich im SLM einstellenden Materialeigenschaften mithilfe der FEM zu analysieren. Durch die Berücksichtigung dieser Analyse in den nächsten Iterationen der Optimierung soll im Vergleich zu einer standardisierten Topologieoptimierung zielgerichtet ein Designvorschlag abgeleitet werden, der die Randbedingungen des SLM abbildet. (Holoch et al., 2022) Ein derartiges iteratives Vorgehen zur Ableitung eines optimierten Designvorschlags hat sich bereits bei der Forschungsarbeit von Sander (2014) am IPEK – Institut für Produktentwicklung sowie Untersuchungen von Spadlinger & Albers (2019) als zielführend erwiesen und wird im Sinne der PGE – Produktgenerationsentwicklung in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen.

Um das Vorgehen der in dieser Arbeit entwickelten TopOpt-Methode zu verdeutlichen, werden nachfolgend die einzelnen Teilmethoden aus Abbildung 4.13 in Form ihrer schrittweisen Durchführung beschrieben. Bevor jedoch der erste Schritt durchgeführt werden kann, gilt es zunächst das Entwicklungsteam zusammenzustellen, um die entwickelte TopOpt-Methode gewinnbringend einzusetzen zu können. Dieses Entwicklungsteam wird analog zum PLT (siehe Kapitel 2.1.1) während der Phasen des Produktentwicklungsprozesses kontinuierlich überprüft und angepasst, um zielgerichtet die jeweils notwendigen Kompetenzen zu bedienen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit lassen sich diese Kompetenzen in einem Grundverständnis für CAD, Simulation, Optimierung, Materialwissenschaften sowie additiver Fertigung und einem ausgeprägten Wissen hinsichtlich Produktentwicklung zusammenfassen. Diese Kompetenzen sind erforderlich, um die verfügbaren Materialdaten zu plausibilisieren und die Ergebnisse der TopOpt-Methode zu interpretieren sowie die sich daraus für die Produktentwicklung ergebenden Handlungsfelder abzuleiten. Das Entwicklungsteam kann dabei aus mehreren Personen unterschiedlicher Domänen bestehen oder lediglich durch einen Produktentwickler abgebildet werden, sofern dieser die notwendigen Kompetenzen aufweist.

Schritt 1: Bauteilgeometrie

Schritt 1 ist als vorbereitende Aktivität für die TopOpt-Methode anzusehen, die vom Produktentwickler bzw. dem Entwicklungsteam durchgeführt werden muss. Dazu

wählt er das im Sinne des Leichtbaus (siehe Kapitel 2.2) zu optimierende Bauteil oder einen Designraum, in dem eine optimierte Gestalt entstehen soll. Dabei gilt es, die Randbedingungen der SLM-Anlage wie beispielsweise den maximalen Bauraum zu beachten. Für eine zielgerichtete Unterstützung des Produktentwicklers respektive des Entwicklungsteams bei dieser Auswahl können beispielsweise die in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Methoden zur Bestimmung geeigneter Bauteile für die additive Fertigung herangezogen werden. Wenn ein zu optimierendes Bauteil oder ein zu optimierender Designraum gewählt ist, wird das Bauteil oder der Designraum aus einer beliebigen CAD-Software wie beispielsweise Creo abgeleitet und in die Software Abaqus manuell importiert. (Holoch et al., 2022)

Schritt 2: Optimierungsparameter

Neben Schritt 1 ist auch Schritt 2 den vorbereitenden Aktivitäten für die TopOpt-Methode zuzuordnen. So gilt es für den Produktentwickler bzw. das Entwicklungsteam neben der Bauteil- oder Designraumauswahl, die Optimierungsparameter zu definieren und in einer Parameterdatei abzuspeichern. In dieser Parameterdatei werden alle wesentlichen Optimierungsparameter (siehe Kapitel 4.3.1) zentral zusammengetragen, wodurch in den weiteren Schritten der TopOpt-Methode die notwendigen Parameter automatisiert abgerufen werden können. (Holoch et al., 2022) Zu den Optimierungsparametern zählen u. a. der zugrunde liegende Lastfall inklusive Randbedingungen sowie zusätzliche Restriktionen (z. B. minimale Wandstärke) und das Optimierungsziel (z. B. Volumenreduktion unter Steifigkeitsmaximierung). Darüber hinaus sind Elementtyp und -größe sowie das Konvergenzkriterium (z. B. maximal zulässige Änderung der Designantwort) zu definieren.

Schritt 3: Ingenieurskonstanten²²

Um die vorbereitenden Aktivitäten für die Durchführung der TopOpt-Methode abzuschließen, werden zuletzt in Schritt 3 die jeweiligen Materialeigenschaften der drei porenbehafteten Bereiche in einer Datenbank abgespeichert. Dazu können die Materialeigenschaften aus der Literatur oder wie im Rahmen der vorliegenden Arbeit aus den Ergebnissen einer experimentellen Charakterisierung (siehe Kapitel 4.3.2.2) stammen. Zur Verwaltung der Datenbank kommt in der vorliegenden Arbeit MySQL²³ zum Einsatz, wodurch die Materialeigenschaften der drei Bereiche zur automatisierten Nutzung während der TopOpt-Methode bereitgestellt werden (Holoch, Czink et al., 2020). Durch die Nutzung einer derartigen Datenbank

²² Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden unter dem Begriff *Ingenieurskonstanten* die Materialkennwerte *Elastizitätsmodul*, *Querkontraktionszahl* und *Schubmodul* inklusive deren Anteile in die drei Raumrichtungen zusammengefasst.

²³ <https://www.mysql.com> (abgerufen am 09.04.2023)

werden die Materialeigenschaften zentral verwaltet, wodurch sie kontinuierlich erweitert und vom gesamten Entwicklungsteam genutzt werden können. Des Weiteren kann die Datenbank um weitere Verfahren und Materialien ergänzt werden, die somit für eine potentielle Nutzung in der TopOpt-Methode zur Verfügung stehen.

Nachdem sowohl das Bauteil bzw. der Designraum ausgewählt als auch die Optimierungsparameter definiert und die Materialeigenschaften abgespeichert sind, laufen die weiteren Schritte der TopOpt-Methode automatisiert ohne weiteren notwendigen Eingriff des Produktentwicklers bzw. des Entwicklungsteams ab. Dadurch werden die Anforderungen an eine möglichst geringe Modellvorbereitung und die automatisierte Durchführung des Optimierungsschritts aus Kapitel 4.1.2 erfüllt.

Schritt 4: Initiales FE-Modell

In Abaqus werden in Schritt 4 auf Basis der Parameterdatei automatisiert der Lastfall inklusive Randbedingungen sowie das initiale FE-Netz (siehe Abbildung 4.14) und die Topologieoptimierung aufgebaut. Des Weiteren wird in diesem Schritt das gesamte Bauteil zunächst mit den Materialeigenschaften des Schraffurbereichs (siehe Kapitel 4.3.2.2) initialisiert. In den weiteren Schritten der TopOpt-Methode werden diese Materialeigenschaften durch die gezielte Manipulation der fiktiven Dichten (siehe Schritt 8) auf die Materialeigenschaften im Kontur- und Interfacebereich in jeder Iteration (schließt die nullete Iteration mit ein) vor Durchführung der FE-Analyse angepasst. Mit diesem initialen FE-Modell wird nun eine standardisierte Topologieoptimierung in Tosca gestartet. (Holoch et al., 2022)

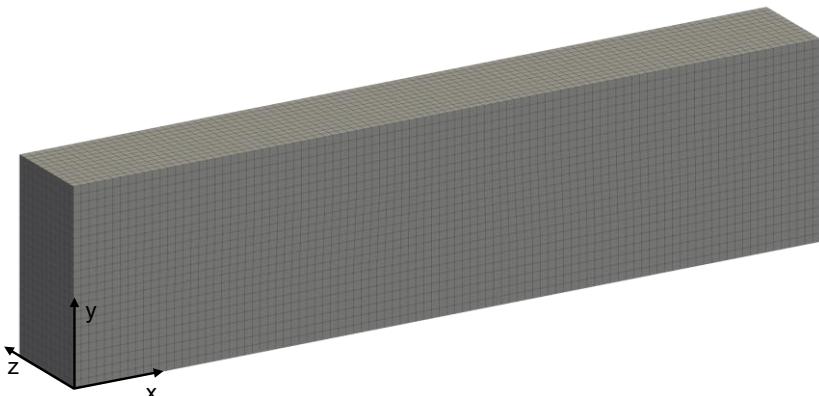


Abbildung 4.14: Exemplarische Darstellung (Schnitt entlang der x-y-Ebene) des initialen FE-Netzes zur Durchführung einer Topologieoptimierung

Damit die drei porenbehafteten Bereiche und die daraus resultierenden Materialeigenschaften in der Topologieoptimierung berücksichtigt werden können, wird diese in jeder Iteration kurzzeitig unterbrochen (Holoch, Träger & Albers, 2020). Bei dieser Unterbrechung handelt es sich nicht um einen Abbruch mit anschließendem Neustart, sondern vielmehr um das Durchführen benutzerdefinierter Python-Skripte innerhalb des Workflows der Topologieoptimierung (Dassault Systèmes, 2019a). Hierfür bietet Tosca eine definierte Schnittstelle und eine Vielzahl unterschiedlicher Zeitpunkte zum Ausführen derartiger Python-Skripte. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Topologieoptimierung in jeder Iteration direkt vor dem Start des Solvers der FE-Analyse unterbrochen. Die Wahl dieses Unterbrechungszeitpunkts basiert auf den Ergebnissen der vom Autor co-betreuten Abschlussarbeit von Träger (2020)²⁴ und ist damit begründet, dass die Designantwort mithilfe der FE-Analyse bestimmt sowie ausgewertet wird (siehe Kapitel 2.4.3.1). Die Designantwort dient wiederum als Input für den MMA-Algorithmus zur Ermittlung eines Optimums (siehe Kapitel 2.4.3.1). Insofern bietet die Unterbrechung der Topologieoptimierung direkt vor der FE-Analyse die Möglichkeit, durch eine gezielte Anpassung des FE-Modells Einfluss auf das Optimierungsergebnis zu nehmen (Holoch et al., 2022). Für einen tiefergehenden Einblick in die unterschiedlichen Möglichkeiten und Zeitpunkte zur Unterbrechung einer dichtebasierten Topologieoptimierung in Tosca wird an dieser Stelle auf die Onlinedokumentation²⁵ verwiesen.

Während der Unterbrechung werden Schritt 5 (Bestimmung der Materialbereiche), Schritt 6 (Materialzuweisung), Schritt 7 (Datentransfer) sowie Schritt 8 (Verteilung der fiktiven Dichten) durchgeführt und bilden den Kern der TopOpt-Methode.

Schritt 5: Bestimmung der Materialbereiche

In Schritt 5 wird zunächst das in der unterbrochenen Iteration vorliegende Zwischenergebnis der Topologieoptimierung als Oberflächennetz im STL-Format mithilfe von Tosca exportiert (siehe Abbildung 4.15). In der ersten Iteration der Topologieoptimierung entspricht das abgeleitete Oberflächennetz dem in Schritt 1 definierten, zu optimierenden Bauteil bzw. Designraum (siehe Abbildung 4.14).

²⁴ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

²⁵ <https://www.3ds.com/de/support/dokumentation> (abgerufen am 07.04.2023)

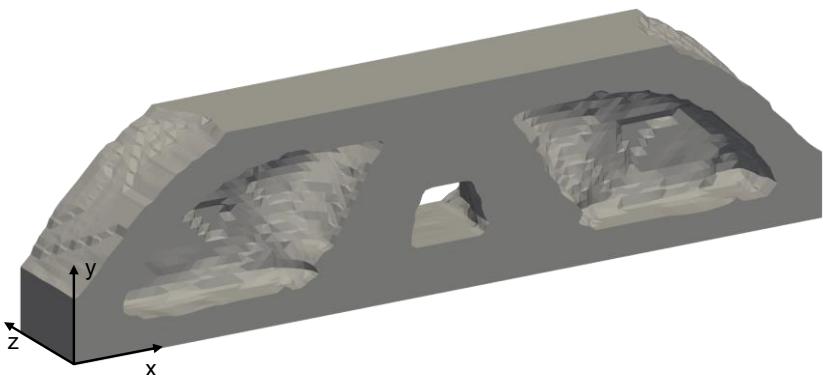


Abbildung 4.15: Aus Tosca abgeleitetes Zwischenergebnis (Schnitt entlang der x-y-Ebene) einer Topologieoptimierung ohne Glättung

Aus Abbildung 4.15 geht hervor, dass durch den unbearbeiteten Export des Zwischenergebnisses aus Tosca lediglich eine diskrete, raue Oberfläche vorliegt, die einerseits nicht vollkommen fertigbar ist und andererseits nach einer potentiellen Fertigung zu Spannungsüberhöhungen führt. Da der verfolgte Ansatz der TopOpt-Methode jedoch darin besteht, das Bauteilverhalten jedes Zwischenergebnisses in der Suche nach einem Optimum zu berücksichtigen, ist die Nutzung einer derartigen Oberfläche nicht zielführend. Vielmehr wird ein Zwischenergebnis benötigt, das plausibel fertigbar ist (siehe Abbildung 4.16). Einen automatisierten Ansatz ohne manuelles Eingreifen stellt die Glättung beim Export des Zwischenergebnisses bereit. Dazu kommt der in Tosca implementierte Laplace-Glättungsalgorithmus zum Einsatz. Dieser verschiebt die Oberflächenknoten in einem iterativen Vorgehen, so dass eine geglättete Oberfläche ohne Schrumpfung entsteht (Bacciaglia, Ceruti & Liverani, 2021). Der Glättungseffekt ist in Abbildung 4.15 und Abbildung 4.16 mittels eines exemplarischen Zwischenergebnisses der Topologieoptimierung zu sehen.

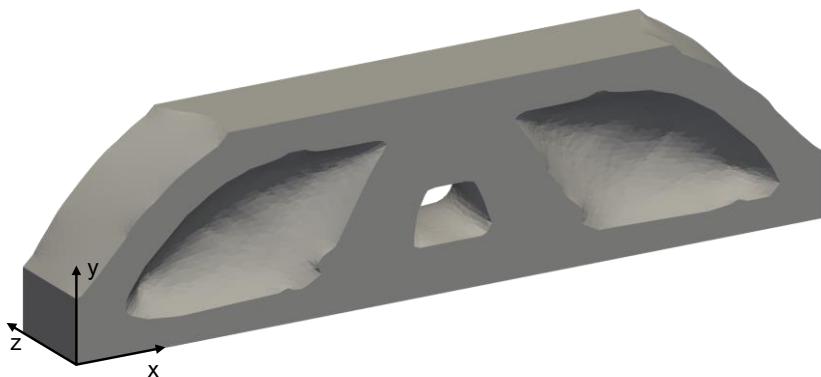


Abbildung 4.16: Aus Tosca abgeleitetes Zwischenergebnis (Schnitt entlang der x-y-Ebene) einer Topologieoptimierung mit Glättung

Auf Basis des exportierten, geglätteten Oberflächennetzes wird das Zwischenergebnis in die drei porenbehafteten Bereiche unterteilt (Holoch et al., 2021). Für diesen Zweck wird die in Kapitel 4.2.1 erläuterte zweistufige Methode bestehend aus Off-setbildung und anschließender Filterung entlang der Aufbaurichtung eingesetzt (Holoch et al., 2022). Dadurch liegt das Zwischenergebnis, eingeteilt in die drei porenbehafteten Bereiche, als FE-Netz bestehend aus TE vor (siehe Abbildung 4.17).

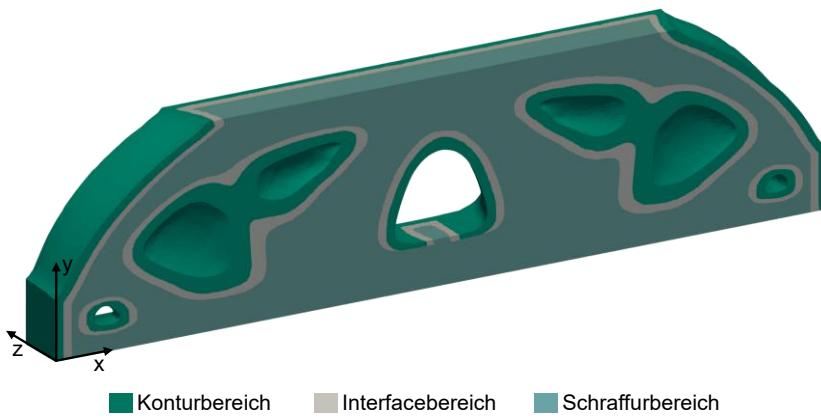


Abbildung 4.17: Exemplarische Darstellung der drei porenbehafteten Bereiche inklusive deren Materialeigenschaften des Zwischenergebnisses (Schnitt entlang der x-y-Ebene)

Schritt 6: Materialzuweisung

Damit die charakterisierten Materialeigenschaften aus dem SLM (siehe Kapitel 4.3.2.2) in der Topologieoptimierung Berücksichtigung finden, werden diese jeweils den drei porenbehafteten Bereichen in Schritt 6 zugewiesen. Dafür wird die Datenbank aus Schritt 3 eingesetzt, welche die jeweiligen Materialeigenschaften der drei Bereiche beinhaltet und diese zur automatisierten Übertragung auf die zugehörigen Bereiche zur Verfügung stellt (Holoch, Czink et al., 2020). So bekommt jedes TE abhängig von dessen Bereichszugehörigkeit die jeweiligen Materialeigenschaften aus der Datenbank in Form von Ingenieurskonstanten übertragen.

Schritt 7: Datentransfer

Somit liegt nun das Zwischenergebnis der aktuellen Iteration mit den drei porenbehafteten Bereichen und den daraus resultierenden Materialeigenschaften vor. Da die Topologieoptimierung jedoch stets auf Basis des initialen FE-Netzes (siehe Abbildung 4.14) agiert, müssen diesem ebenfalls die elementweise vorliegenden Materialeigenschaften zugewiesen werden. Hierfür wird in Schritt 7 das Weighted Element Mapping (siehe Kapitel 2.4.1.3) in der Software MapLib genutzt. Die Genauigkeit des Mapping kann über die Elementgröße gesteuert werden, weshalb es notwendig ist, einen Kompromiss aus Detaillierungsgrad und Rechenaufwand zu finden. (Holoch et al., 2021) Mithilfe des Mapping ergibt sich für das Zwischenergebnis aus Abbildung 4.17 das Ergebnis in Abbildung 4.18.

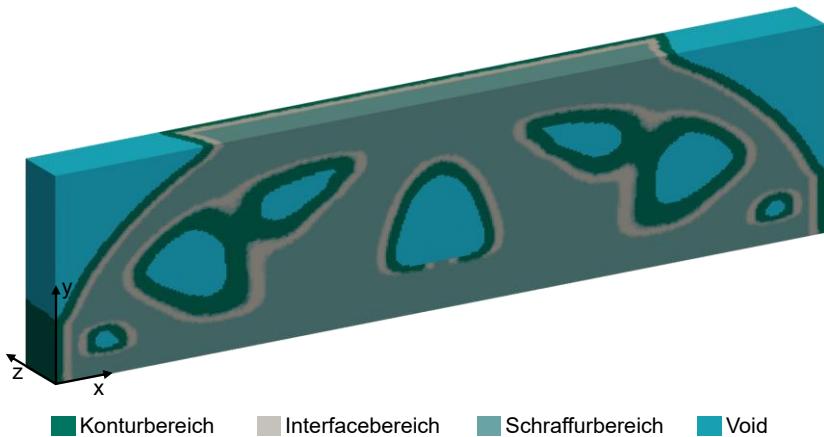


Abbildung 4.18: Mapping der drei porenbehafteten Bereiche inklusive deren Materialeigenschaften des Zwischenergebnisses (Schnitt entlang der x-y-Ebene) aus Abbildung 4.17 auf das initiale FE-Netz

Aus Abbildung 4.18 ergibt sich, dass neben den drei Materialbereichen auch ein sogenanntes void-Gebiet (siehe blaues Gebiet in Abbildung 4.18) entsteht. Dieses void-Gebiet enthält ausschließlich FE, die von der Topologieoptimierung bereits in vorherigen Iterationen eliminiert wurden und leistet somit keinen Beitrag zur Kraftleitung.

Schritt 8: Verteilung der fiktiven Dichten

Durch das Mapping sind die vorliegenden Materialeigenschaften in jedem FE des initialen FE-Netzes der Topologieoptimierung (siehe Abbildung 4.14) bekannt, sodass nun Schritt 8 folgt. Darin werden die fiktiven Dichten ρ_i angepasst, die in den FE i vorliegen und der Optimierer zur Berechnung der Sensitivitäten heranzieht. Dazu wird der E-Modul des Schraffurbereichs $E_{Schraffur}$ als Bezugsgröße genutzt, da dieser in Schritt 4 in allen FE hinterlegt wurde. Wenn ein FE im initialen FE-Netz der Topologieoptimierung infolge der übertragenen Materialeigenschaften einen E-Modul E_i besitzt, der geringer als der des Schraffurbereichs ist, wird das FE durch eine Verringerung der fiktiven Dichte bestraft. Wenn der E-Modul dagegen höher ist, wird auch die fiktive Dichte erhöht. Daraus ergibt sich für die pro FE angepasste fiktive Dichte $\rho_{A,i}$ die in Gleichung 4.1 formulierte Berechnungsvorschrift. (Holoch et al., 2022)

$$\rho_{A,i} = \rho_i \frac{E_i}{E_{Schraffur}} \quad 4.1$$

Unter Anwendung des in dichtebasierten Topologieoptimierungen genutzten SIMP-Ansatzes (siehe Gleichung 2.17) ergibt sich daher für jedes angepasste FE schließlich der skalierte E-Modul $E_{A,i}$ nach Gleichung 4.2.

$$E_{A,i} = \rho_{A,i}^3 E_{Schraffur} = \left(\rho_i \frac{E_i}{E_{Schraffur}} \right)^3 E_{Schraffur} \quad 4.2$$

Die Berechnung der skalierten E-Moduln schließt den letzten durchzuführenden Schritt während der Unterbrechung der Topologieoptimierung ab. Mithilfe dieser skalierten E-Moduln wird nun die FE-Analyse ausgeführt und die Designantwort evaluiert. Auf Basis der aus der FE-Analyse resultierenden Größen wie beispielsweise Verschiebungen werden die Sensitivitäten berechnet und anschließend an den MMA-Algorithmus (siehe Kapitel 2.4.3.1) übergeben. Der MMA-Algorithmus berechnet daraus die Verteilung der fiktiven Dichten der nächsten Iteration unter Berücksichtigung der drei porenbehafteten Bereiche und der damit verbundenen Materialeigenschaften. (Holoch et al., 2022)

In jeder Iteration der Topologieoptimierung werden Schritt 5 (Bestimmung der Materialbereiche), Schritt 6 (Materialzuweisung), Schritt 7 (Datentransfer) und Schritt 8 (Verteilung der fiktiven Dichten) durchgeführt, bis das definierte Konvergenzkriterium erreicht ist. Das Konvergenzkriterium ist erfüllt, wenn zwischen zwei Iterationen die Änderungen der fiktiven Dichten und der Designantwort unter einen zuvor definierten Wert fallen. (Holoch et al., 2022)

Schritt 9: Optimierte Bauteile

Als Ergebnis der TopOpt-Methode ergibt sich in Schritt 9 schlussendlich ein optimiertes Bauteildesign, das unter Berücksichtigung der drei porenbehafteten Bereiche inklusive Materialeigenschaften erzielt wurde. Dieses Bauteildesign liegt dem Produktentwickler sowohl als FE-Modell als auch geglättetes Oberflächennetz im STL-Format vor, wodurch eine potentielle Designanpassung oder eine direkte Fertigung im SLM (siehe Kapitel 4.3.2.3) ermöglicht wird. (Holoch et al., 2021)

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die in diesem Kapitel 4.2 vorgestellten Methoden (automatisierte Abbildung der porenbehafteten Bereiche und iterative Anpassung der fiktiven Dichten) den Bedarf (siehe Kapitel 4.1.1) an eine dichtegebasierte TopOpt-Methode zur Ableitung initialer Designvorschläge für SLM-gefertigte Bauteile adressieren. Die Methoden sind dabei modular aufgebaut und können folglich als Referenzsystemelemente für weitere Forschungsvorhaben herangezogen und durch geringfügige Anpassungen adaptiert werden (siehe Kapitel 5.2). Somit stellen die entwickelten Methoden die Antwort auf die dritte Forschungsfrage (siehe Kapitel 3.1) der vorliegenden Arbeit dar.

Das nächste Kapitel 4.3 befasst sich mit der Verifikation und Validierung der TopOpt-Methode aus Abbildung 4.13.

4.3 Verifikation und Validierung

In diesem Kapitel werden die Verifikation und Validierung der in Kapitel 4.2 vorgestellten Methoden zur Ableitung initialer Designvorschläge SLM-gefertigter, steifigkeitsoptimierter Bauteile behandelt. Im Kontext der Produktentwicklung werden die Begriffe Verifikation und Validierung häufig im Sinne der VDI 2206 verstanden. Darin wird die Verifikation als „Überprüfung des Systems in Bezug auf die Spezifikation auf unterschiedlichen Systemebenen und Konkretisierungsniveaus“ (VDI-Richtlinie 2206, S. 8) definiert. Die Validierung umfasst hingegen die „Überprüfung der Systemeigenschaften gegenüber einem vordefinierten Einsatzzweck oder Nutzen“ (VDI-Richtlinie 2206, S. 7). Um im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch einen simulationsspezifischeren Blickwinkel bei der Verifikation und Validierung zu

verfolgen, kommen die nachfolgenden Definitionen der American Society of Mechanical Engineering (ASME)²⁶ zum Einsatz. So wird nach Schwer (2007) die Verifikation als die Überprüfung beschrieben, ob ein Rechenmodell plausibel ist und das zugrunde liegende mathematische Modell sowie dessen Lösung angemessen abbildet. Die Validierung umfasst die Überprüfung, inwieweit ein Modell die Realität aus der Perspektive der beabsichtigten Verwendungszwecke des Modells wieder gibt (Schwer, 2007).

Nachfolgend wird in Kapitel 4.3.1 zunächst das Vorgehen der entwickelten dichte-basierten TopOpt-Methode, bestehend aus iterativer Unterbrechung und Anpassung der fiktiven Dichten, verifiziert. Im Zuge dessen werden qualitative Analysen der Ergebnisse und Untersuchungen hinsichtlich Konvergenz herangezogen. Darüber hinaus wird der Unterschied zwischen den resultierenden Designvorschlägen sowie jenen einer standardisierten Topologieoptimierung analysiert und evaluiert. Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 4.3.2 die Validierung anhand von SLM-gefertigten Bauteilen. Zuletzt wird in Kapitel 4.3.3 eine Analyse des Einsatzspektrums der entwickelten TopOpt-Methode durchgeführt.

Im Sinne der DRM sind die in Kapitel 4.2 vorgestellten Methoden zur Erfassung der drei porosen behafteten Bereiche und die TopOpt-Methode das durch die vorliegende Arbeit erzielte Ergebnis eines iterativen Vorgehens bestehend aus Methodenentwicklung sowie Verifikation und Validierung. Trotz der iterativen Entwicklung werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels lediglich die finalen Ergebnisse präsentiert und nicht jede Entwicklungsgeneration vorgestellt.

Mithilfe der in diesem Kapitel beschriebenen Inhalte wird die vierte Forschungsfrage zur Untersuchung der definierten Forschungshypothese beantwortet.

Forschungsfrage

4. Welche Erkenntnisse zur Synthese SLM-gefertigter, steifigkeitsoptimierter Designvorschläge ergeben sich durch die Anwendung der entwickelten Topologieoptimierungsmethode im Vergleich zu einer standardisierten Topologieoptimierung?

²⁶ <https://www.asme.org/> (abgerufen am 14.04.2023)

4.3.1 Verifikation der entwickelten TopOpt-Methode

Dieses Kapitel 4.3.1 widmet sich der Verifikation der in Kapitel 4.2.2 entwickelten TopOpt-Methode zur Berücksichtigung von drei oberflächennahen, unterschiedlichen Bereichen inklusive deren Materialeigenschaften in einer dichtebasierter Topologieoptimierung. Dazu wird das entwickelte Vorgehen (siehe Abbildung 4.13), bestehend aus iterativer Unterbrechung der Topologieoptimierung und Anpassung der fiktiven Dichten, analysiert. Auf die Filterung entlang der Aufbaurichtung (siehe Kapitel 4.2.1) wird zunächst in diesem Kapitel 4.3.1 aus Gründen der besseren Ergebnisinterpretation verzichtet. Die Filterung entlang der Aufbaurichtung wird stattdessen in Kapitel 4.3.2.3 auf Basis der aus dem SLM charakterisierten Materialeigenschaften (siehe Kapitel 4.3.2.2) evaluiert. Die Vernachlässigung der Aufbaurichtung zur Verifikation des entwickelten Vorgehens ist als zulässig anzusehen, da hierfür lediglich drei unterschiedliche Materialbereiche im zu optimierenden Bauteil vorliegen müssen. Diese drei unterschiedlichen Materialbereiche werden durch die in Kapitel 4.2.1 vorgestellte Offsetbildung erzeugt. Eine zusätzliche, weitere Unterteilung der Materialbereiche entlang der Aufbaurichtung ist für die Verifikation nicht nötig.

Die Verifikation gliedert sich in zwei Stufen. Zunächst wird in der ersten Stufe die entwickelte TopOpt-Methode anhand von Untersuchungen im Zweidimensionalen analysiert (siehe Kapitel 4.3.1.1). Darauf aufbauend werden in der zweiten Stufe Analysen im Dreidimensionalen (siehe Kapitel 4.3.1.2) durchgeführt. Durch diese zwei Stufen kann der Einfluss des entwickelten Vorgehens (iterative Anpassung der fiktiven Dichten) zunächst an weniger komplexen, zweidimensionalen Modellen untersucht und hinsichtlich Plausibilität bewertet werden. Die anschließende kontinuierliche Steigerung des Komplexitätsgrads ermöglicht es, dass stets ein Abgleich mit den Ergebnissen und daraus abgeleiteten Erkenntnissen aus dem Zweidimensionalen erfolgen kann.

4.3.1.1 Untersuchungen im Zweidimensionalen

In diesem Kapitel 4.3.1.1 wird die entwickelte TopOpt-Methode mit iterativer Unterbrechung und Anpassung der fiktiven Dichten mithilfe von Untersuchungen im Zweidimensionalen analysiert. Infolgedessen werden zunächst der Modellaufbau und die verwendeten Optimierungsparameter in der entwickelten, dichtebasierter TopOpt-Methode vorgestellt. Anschließend werden die mithilfe der entwickelten TopOpt-Methode abgeleiteten Designvorschläge sowohl qualitativ als auch quantitativ jenen Designvorschlägen einer standardisierten Topologieoptimierung gegenübergestellt und evaluiert. Um den Einfluss der iterativen Berücksichtigung oberflächennaher, unterschiedlicher Bereiche inklusive deren verschiedener Materialeigenschaften auf die abgeleiteten Designvorschläge zu analysieren, wird eine Parameterstudie

durchgeführt. Darin werden neben den Dicken der oberflächennahen Bereiche auch die darin vorliegenden Materialeigenschaften variiert, wodurch sich drei Optimierungsfälle für die Untersuchungen im Zweidimensionalen ergeben. Abschließend wird auf Basis dieser Parameterstudie das Potential der entwickelten TopOpt-Methode ermittelt und ein Fazit gezogen.

Die nachfolgenden Inhalte dieses Kapitels 4.3.1.1 wurden bereits teilweise in der Publikation Holoch, Lenhardt & Albers (2022a) veröffentlicht und basieren auf der vom Autor co-betreuten Abschlussarbeit von Lenhardt (2021)²⁷.

Modellaufbau und Optimierungsparameter

Um den Einsatz der entwickelten TopOpt-Methode und deren Einfluss auf die abgeleiteten Designvorschläge zu untersuchen, wird ein 3-Punkt-Biegebalken als akademischer Beispieldesignfall (siehe Abbildung 4.19) genutzt. Die Wahl des Lastfalls begründet sich darin, dass die resultierenden Ergebnisse aufgrund des geringen Komplexitätsgrads des Lastfalls gut zu interpretieren sind. Folglich können Schlüsse in Bezug auf die Plausibilität der entwickelten TopOpt-Methode anhand der zu erwartenden Ergebnisse gezogen werden. Der 3-Punkt-Biegebalken ist aus einer Fest-Los-Lagerung an den unteren Eckpunkten aufgebaut und wird mit einer Verschiebung d von 0,5 mm mittig auf der oberen Kante des Balkens belastet.

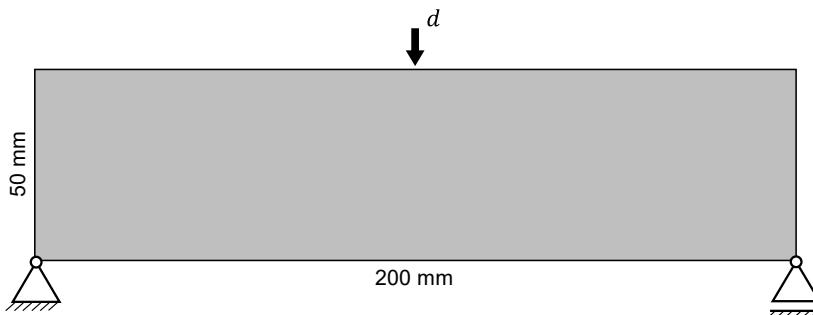


Abbildung 4.19: Modellaufbau zur Untersuchung der 2D-Optimierungen ohne Filtrierung entlang der Aufbaurichtung nach Holoch, Lenhardt & Albers (2022a)

Bei der Initialisierung des FE-Modells werden Dreieckelemente mit einer linearen Ansatzfunktion (siehe Abbildung 2.16) und einer Elementkantenlänge von 0,5 mm eingesetzt. Die Elementkantenlänge inklusive Ansatzfunktion stellt dabei einen

²⁷ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Kompromiss zwischen Detaillierungsgrad sowie Rechenaufwand dar und gewährleistet, dass jeder Materialbereich (siehe Tabelle 4.3) stets mit mehreren FE abgebildet wird. Als Optimierungsziel wird die Maximierung der Steifigkeit unter Reduktion des Balkenvolumens auf ein relatives Endvolumen von 40 % gewählt. Die Materialeigenschaften werden als isotrop angenommen und mithilfe der in Abaqus zur Verfügung stehenden Materialmodelle implementiert. Diese Materialeigenschaften sind gemeinsam mit den gewählten Bereichsdicken Tabelle 4.3 zu entnehmen. Die Annahme hinsichtlich Isotropie wird getroffen, um die Modellkomplexität zunächst einzuschränken. Die Gültigkeit dieser Annahme wird in Kapitel 4.3.2.2 und 4.3.2.3 evaluiert. Des Weiteren wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit kein elastisch-plastisches Materialverhalten SLM-gefertigter Bauteile untersucht, weshalb die Materialeigenschaften als ideal linear-elastisch definiert werden. Aus den Materialeigenschaften und Bereichsdicken in Kombination mit den definierten Optimierungsparametern ergibt sich Optimierungsfall 1.1.

Tabelle 4.3: Materialeigenschaften und Bereichsdicken für Optimierungsfall 1.1

	Kontur	Interface	Schraffur
E-Modul [GPa]	75,6	63,0	70,0
Querkontraktion [-]	0,35	0,35	0,35
Dicke [mm]	2,0	2,0	-

Für den Schraffurbereich ist in Tabelle 4.3 keine explizite Dicke angegeben, da sich diese aus dem Gesamtvolume abzüglich des Kontur- und Interfacebereichs ergibt und demnach stets den zurückbleibenden Innenbereich beschreibt. Die quantitativen Werte sowohl für die Materialeigenschaften als auch Bereichsdicken stellen lediglich ein exemplarisches Beispiel dar und dienen zur Verifikation der entwickelten TopOpt-Methode sowie als Referenz für die am Ende dieses Kapitels 4.3.1.1 durchgeführte Parameterstudie. An dieser Stelle wird jedoch angemerkt, dass bei der Wahl der Materialeigenschaften immerzu darauf geachtet wird, dass der Interfacebereich einen geringeren E-Modul und der Konturbereich einen höheren E-Modul im Vergleich zum Schraffurbereich aufweist. Dieses Verhältnis der Materialeigenschaften ergibt sich aus der abgeleiteten Porenverteilung in Kapitel 4.1.1, ist in Abbildung 4.3 rechts zu sehen und wird in Kapitel 4.3.2.2 näher untersucht.

Vorgehen zum quantitativen Vergleich der abgeleiteten Designvorschläge

Um die mithilfe der entwickelten TopOpt-Methode abgeleiteten Designvorschläge sowohl qualitativ als auch quantitativ bewerten zu können, werden sie jenen Designvorschlägen einer standardisierten Topologieoptimierung gegenübergestellt.

Für die quantitative Gegenüberstellung werden die abgeleiteten Designvorschläge aus der entwickelten TopOpt-Methode und der standardisierten Topologieoptimierung einer rein statischen FE-Analyse unter gleichen Last- und Randbedingungen sowie identischem FE-Netz unterzogen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden nicht nur den Designvorschlägen aus der entwickelten TopOpt-Methode die drei porenbefahnten Bereiche inklusive Materialeigenschaften aus Tabelle 4.3 zugewiesen, sondern auch den Designvorschlägen aus der standardisierten Topologieoptimierung. Dazu werden zunächst die drei Bereiche analog zu Kapitel 4.2.1 für die jeweiligen Designvorschläge ermittelt. Anschließend werden die Materialeigenschaften mithilfe des Weighted Element Mapping (siehe Kapitel 2.4.1.3) in der Software MapLib auf das FE-Netz der statischen FE-Analyse übertragen. Als Resultat liegen dadurch die abgeleiteten Designvorschläge mit den drei porenbefahnten Bereichen inklusive Materialeigenschaften im FE-Netz der statischen FE-Analyse vor. Das FE-Netz wird mit einer feineren Vernetzung als das initiale FE-Optimierungsnetz gewählt. Dieses verfeinerte FE-Netz ist damit zu begründen, dass die statische FE-Analyse lediglich ein einziges Mal pro Designvorschlag durchzuführen ist und somit ein höherer Rechenaufwand für ein genaueres Ergebnis akzeptiert werden kann. Des Weiteren werden durch die feinere Vernetzung potentielle Ungenauigkeiten beim Weighted Element Mapping reduziert und die drei Bereiche folglich detaillierter abgebildet. (Holoch et al., 2022a)

Als quantitative Größe für den Vergleich der abgeleiteten Designvorschläge wird die Verzerrungsenergie herangezogen, die der vom System aufgenommenen elastischen Energie entspricht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird als Wert für die Verzerrungsenergie die aus der statischen FE-Analyse in Abaqus berechnete Elastic Strain Energy (ELSE) herangezogen. Die Verzerrungsenergie gilt es, bei definierter Verschiebung (siehe Abbildung 4.19) zu maximieren, wodurch eine Struktur erzeugt werden soll, die möglichst viel innere Energie aufnehmen kann und somit einen erhöhten Widerstand gegen Verformung aufweist. Als Vergleichsgröße wird im weiteren Verlauf der Arbeit die volumenspezifische Verzerrungsenergie eingesetzt und dient zur Steifigkeitsbewertung der Designvorschläge. (Holoch et al., 2021)

Die Wahl der volumenspezifischen Verzerrungsenergie ist dadurch begründet, dass die abgeleiteten Designvorschläge der entwickelten TopOpt-Methode und der standardisierten Topologieoptimierung trotz gleicher Last- und Randbedingungen sowie Optimierungsparameter nicht immer das exakt gleiche Endvolumen aufweisen. Dies ist auf das Vorgehen dichtebasierter Topologieoptimierungen zur Überprüfung, ob das gewünschte Zielvolumen erreicht ist, zurückzuführen (Dassault Systèmes,

2019b). Bei dieser Überprüfung wird zunächst das Volumen V_i eines jeden FE i mit Hilfe der darin vorliegenden fiktiven Dichte ρ_i skaliert. Das Endvolumen V_{res} ergibt sich anschließend aus der Summe aller Volumen in den FE (siehe Gleichung 4.3).

$$V_{res} = \sum_i V_i \rho_i \quad 4.3$$

Liegen im Endergebnis der Topologieoptimierung ausschließlich fiktive Dichten mit einem Wert von exakt 0 oder 1 vor, entspricht die Summe der skalierten Volumen der FE dem gewünschten Zielvolumen. Da dieser Fall jedoch in der Regel nicht auftritt und somit stets eine geringe Anzahl an FE mit einer fiktiven Dichte zwischen 0 und 1 vorhanden ist, weisen die abgeleiteten Designvorschläge stets ein erhöhtes Endvolumen im Vergleich zum gewünschten Zielvolumen auf. Damit die Vergleichbarkeit der Designvorschläge der entwickelten TopOpt-Methode und der standardisierten Topologieoptimierung gewährleistet werden kann, müssen diese ein ähnliches Endvolumen aufweisen. Daher erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine geringfügige Variation des Zielvolumens für die Erzeugung der Designvorschläge der standardisierten Topologieoptimierung, um deren Endvolumen an jene der Designvorschläge aus der entwickelten TopOpt-Methode anzupassen. Das gewünschte Zielvolumen der standardisierten Topologieoptimierung wird demnach um maximal drei Prozent erhöht oder verringert. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die in den Designvorschlägen aus der entwickelten TopOpt-Methode und der standardisierten Topologieoptimierung stets nah beieinander liegende Endvolumen aufweisen und folglich in Bezug auf Steifigkeit vergleichbar sind. Wenn die Endvolumen einen Unterschied von mehreren Prozent besitzen würden, ist diese Vergleichbarkeit nicht mehr gegeben, da mehr Volumen bei gezielter Anordnung im Bauteil in der Regel auch einen verbesserten Steifigkeitswert mit sich bringt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die geometrische Steifigkeit häufig die werkstoffliche Steifigkeit übertrifft.

Qualitative und quantitative Analyse von Optimierungsfall 1.1

Nachfolgend werden die aus der entwickelten TopOpt-Methode und einer standardisierten Topologieoptimierung unter Nutzung der Parameter aus Tabelle 4.3 resultierenden Designvorschläge zunächst einem qualitativen Vergleich unterzogen. Die abgeleiteten Designvorschläge sind in Abbildung 4.20 (entwickelte TopOpt-Methode) und Abbildung 4.21 (standardisierte Topologieoptimierung) dargestellt.

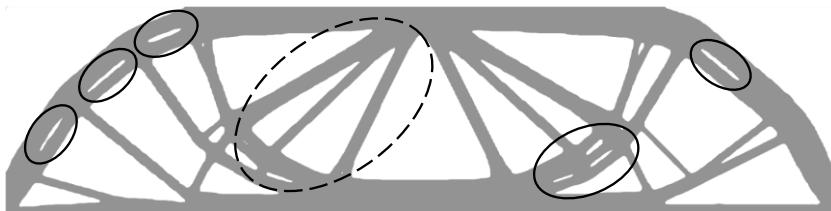


Abbildung 4.20: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 1.1

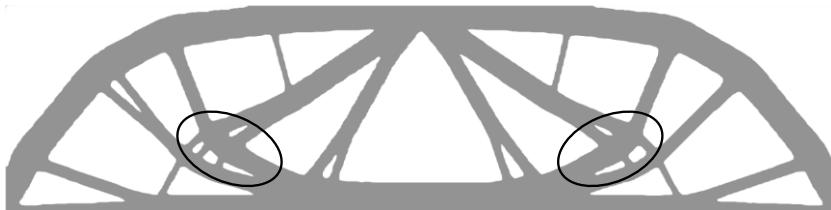


Abbildung 4.21: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 1.1

Aus Abbildung 4.21 geht hervor, dass das Ergebnis der standardisierten Topologieoptimierung eine Art Fachwerkstruktur als optimiertes Bauteildesign ausbildet. Des Weiteren lässt sich erkennen, dass vorwiegend große Aussparungen und lediglich wenige kleine Löcher entstehen (siehe durchgezogene Markierungen in Abbildung 4.21). Dieses Ergebnis ist dem einachsigen Lastfall geschuldet und spiegelt eine typische Gestalt für Biegebeanspruchungen wider. Im Vergleich hierzu weist der Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode eine Vielzahl kleiner Löcher auf, besonders in den dickeren Streben (siehe durchgezogene Markierungen in Abbildung 4.20). Darüber hinaus werden im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung vorwiegend in der lasttragenden mittleren Region statt dicken, eher dünne Streben ausgebildet (siehe gestrichelte Markierung in Abbildung 4.20).

Sowohl die Ausbildung von zusätzlichen Löchern als auch dünnen Streben trägt dazu bei, dass die Oberfläche des resultierenden Designvorschlags vergrößert wird. Durch diese Vergrößerung liegt ein erhöhter Anteil an Konturbereich im Vergleich zum Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung vor. Des Weiteren wird durch die Ausbildung der dünnen Streben dafür gesorgt, dass darin ausschließlich Konturbereich auftritt, der im Vergleich zum Interface- und Schraffurbereich einen höheren E-Modul aufweist. Die quantitative Auswertung der vorliegenden Bereiche in den beiden Designvorschlägen ist Tabelle 4.4 zu entnehmen und stützt die qualitativ getroffenen Aussagen. So erzeugt die entwickelte TopOpt-Methode 4,5 %

mehr Kontur- und gleichzeitig 4,8 % weniger Interfacebereich als die standardisierte Topologieoptimierung.

Tabelle 4.4: Quantitative Auswertung der prozentual vorliegenden Anteile der drei porenbehafteten Bereiche in den abgeleiteten Designvorschlägen für Optimierungsfall 1.1

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Kontur [%]	75,0	70,5
Interface [%]	23,1	27,9
Schraffur [%]	1,9	1,6

Die Unterschiede in den prozentual vorliegenden Anteilen der drei porenbehafteten Bereiche lassen sich zusätzlich visuell anhand von Abbildung 4.22 (entwickelte TopOpt-Methode) und Abbildung 4.23 (standardisierte Topologieoptimierung) erkennen. Darin fallen besonders die dünnen Streben in der mittleren Region unterhalb der Lasteinleitung, die ausschließlich aus Konturbereich bestehen, und der kaum vorhandene Schraffurbereich auf. Letzteres ist damit zu begründen, dass der Schraffurbereich immerzu das zurückbleibende Innenvolumen einnimmt und demnach bei einer Maximierung des Konturbereichs verkleinert wird.

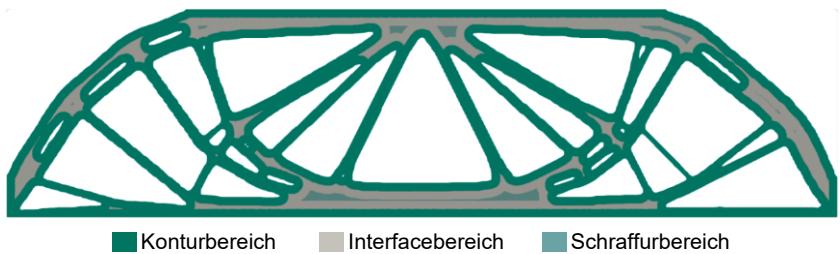


Abbildung 4.22: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 1.1

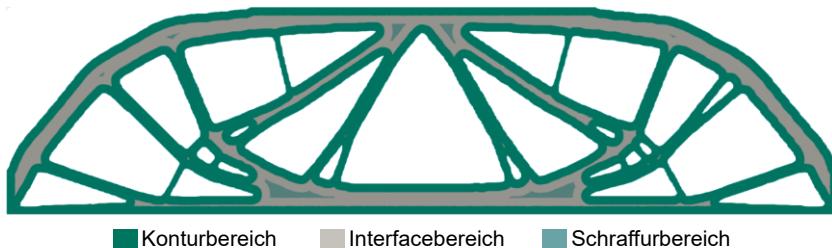


Abbildung 4.23: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 1.1

Werden neben den prozentualen Anteilen der drei porenbehafteten Bereiche auch die statischen FE-Analysen zur Auswertung der resultierenden Verzerrungsenergie für die beiden Designvorschläge herangezogen, ergeben sich die Werte in Tabelle 4.5. Daraus kann die volumenspezifische Verzerrungsenergie berechnet werden (siehe Tabelle 4.5), die für den Designvorschlag unter Nutzung der entwickelten TopOpt-Methode im Vergleich zu jenem der standardisierten Topologieoptimierung um 2,76 % höher ausfällt. Folglich lässt sich festhalten, dass die entwickelte TopOpt-Methode unter gleichen Last- und Randbedingungen zu einem steiferen Designvorschlag im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung führt.

Tabelle 4.5: Quantitative Auswertung der resultierenden Verzerrungsenergie aus der statischen FE-Analyse der abgeleiteten Designvorschläge für Optimierungsfall 1.1

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Endvolumen [%]	43,21	43,27
Verzerrungsenergie [mJ]	203,27	198,08
Spez. Verzerrungsenergie [mJ/mm ³]	0,047042	0,045778

Aus Tabelle 4.5 geht anhand der vorliegenden Endvolumen zusätzlich hervor, dass beide Designvorschläge die gewünschten relativen 40 % des ursprünglichen Balkenvolumens nicht erreichen, sondern bei ca. 43,2 % enden. Dies ist auf die zuvor beschriebene Überprüfung hinsichtlich der Erreichung des gewünschten Zielvolumens zurückzuführen (siehe Gleichung 4.3) und lässt sich für dichtegebasierte Topo-

logieoptimierungen nicht beseitigen. Da die Endvolumen der beiden Designvorschläge jedoch ausreichend nahe beieinanderliegen, ist ein volumenspezifischer Vergleich zulässig.

Neben der qualitativen und quantitativen Auswertung der Designvorschläge ist die Analyse des Konvergenzverlaufs bei einer Topologieoptimierung ebenfalls von entscheidender Bedeutung, da dieser eine Aussage darüber zulässt, ob die Optimierung zielgerichtet in ein Optimum läuft. In Abbildung 4.24 ist der Konvergenzverlauf sowohl für die standardisierte Topologieoptimierung als auch für die entwickelte TopOpt-Methode visualisiert.

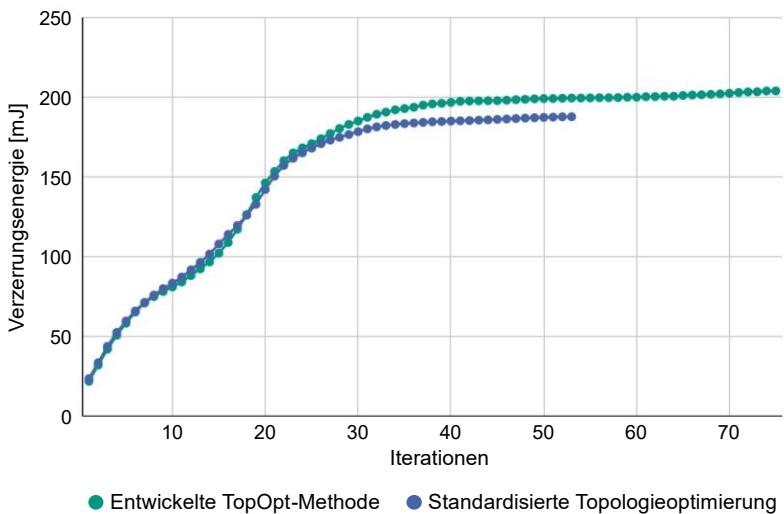


Abbildung 4.24: Konvergenzverläufe für Optimierungsfall 1.1

Abbildung 4.24 zeigt, dass beide Optimierungen einen ähnlichen Konvergenzverlauf aufweisen und jeweils gegen einen Verzerrungsenergiewert konvergieren. Dazu benötigt die Optimierung unter Nutzung der entwickelten TopOpt-Methode ca. ein Drittel mehr Iterationen, konvergiert dafür jedoch gegen eine erhöhte Verzerrungsenergie, die sich auch in der statischen FE-Analyse zeigt (siehe Tabelle 4.5). Die erhöhte Anzahl an Iterationen der entwickelten TopOpt-Methode ist auf das vorliegende Konvergenzkriterium zurückzuführen. Dieses ist erfüllt, wenn die Änderungen der fiktiven Dichten und der Designantwort (Verzerrungsenergie) zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationen unter einen zuvor definierten Wert fallen (siehe

Kapitel 4.2.2). Im Vorgehen der entwickelten TopOpt-Methode werden in jeder Iteration die fiktiven Dichten anhand der drei porenbehafteten Bereiche angepasst (siehe Kapitel 4.2.2). Dadurch wird eine erhöhte Anzahl an Iterationen benötigt, bis die Änderungen der fiktiven Dichten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationen unter den definierten Wert fallen und somit das Konvergenzkriterium erfüllt ist. Aus den Konvergenzverläufen folgt jedoch, dass die iterative Anpassung der fiktiven Dichten zu keiner Divergenz oder zu unzulässigen Sprüngen führt, wodurch das Vorgehen anhand des vorliegenden Ergebnisses als zielführend und plausibel einzustufen ist.

Neben des Konvergenzverlaufs kann auch die Verteilung der fiktiven Dichten in den abgeleiteten Designvorschlägen herangezogen werden, um zu überprüfen, ob die Optimierung korrekt konvergiert ist und folglich vorwiegend FE mit einer fiktiven Dichte von 0 oder 1 im Designvorschlag vorliegen (siehe Kapitel 2.4.3.1). Für die beiden abgeleiteten Designvorschläge stellt Abbildung 4.25 die Verteilungen der fiktiven Dichten dar. Daraus geht hervor, dass beide Designvorschläge größtenteils aus FE mit einer fiktiven Dichte von 0 und 1 bestehen. Dadurch weist auch die Dichteverteilung auf ein korrektes Konvergenzverhalten der beiden Optimierungen hin und unterstützt somit die Aussage, dass die entwickelte TopOpt-Methode für den vorliegenden Beispieldesign zielführend und zulässig ist.

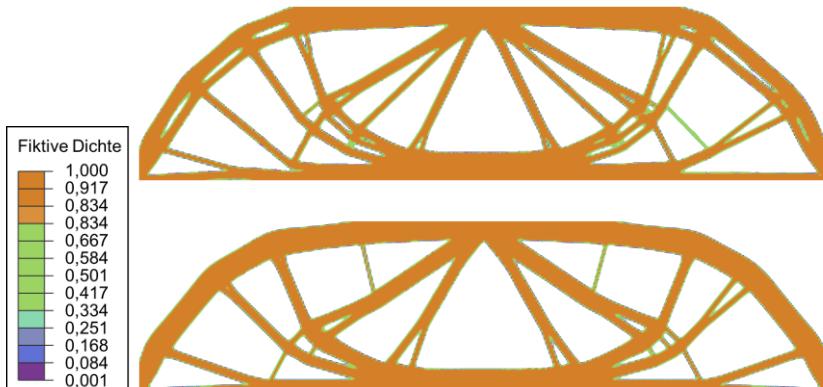


Abbildung 4.25: Resultierende Designvorschläge inklusive Verteilung der fiktiven Dichten für Optimierungsfall 1.1: Entwickelte TopOpt-Methode (oben) und standardisierte Topologieoptimierung (unten)

Mithilfe der fiktiven Dichteverteilung aus Abbildung 4.25 lässt sich zusätzlich die bereits zuvor beschriebene Prämissen verdeutlichen, dass die Ergebnisse einer dichte-

basierten Topologieoptimierung trotz korrekten Konvergenzverhaltens nicht ausschließlich aus fiktiven Dichten mit einem Wert von 0 oder 1 bestehen. Dies führt zu den beschriebenen Unterschieden in den resultierenden Endvolumen im Vergleich zum definierten Zielvolumen (siehe Tabelle 4.5).

Anhand der vorgestellten ersten Ergebnisse aus Optimierungsfall 1.1 lässt sich die Annahme treffen, dass durch die entwickelte TopOpt-Methode und der damit verbundenen iterativen Anpassung der fiktiven Dichten der Konturbereich aufgrund der verbesserten Materialeigenschaften maximiert wird. Gleichzeitig erfolgt eine Verringerung des Interface- und Schraffurbereichs. Dieses Verhalten des Optimierungsalgorithmus ist im Kontext des definierten Optimierungsziels einer möglichst hohen Steifigkeit als zielführend anzusehen. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels 4.3.1.1 wird die getroffene Annahme durch eine Parameterstudie näher untersucht. Dazu werden sowohl die Bereichsdicken als auch die Materialeigenschaften variiert und die damit aus der entwickelten TopOpt-Methode resultierenden Designvorschläge analysiert sowie mit jenen der standardisierten Topologieoptimierung verglichen.

Variation der Bereichsdicken und Materialeigenschaften zur Analyse derer Einflüsse auf die abgeleiteten Designvorschläge

Um die zuvor getroffenen Annahmen, die aus den abgeleiteten Designvorschlägen von Optimierungsfall 1.1 resultieren, weiter zu untersuchen, werden nachfolgend zusätzliche Designvorschläge erzeugt und analysiert. Dazu erfolgt sowohl eine Variation der Bereichsdicken als auch der Materialeigenschaften, die von der entwickelten TopOpt-Methode zur iterativen Anpassung der fiktiven Dichte herangezogen werden. Die gewählten Bereichsdicken und Materialeigenschaften sind in Tabelle 4.6 aufgeführt und bilden die Optimierungsfälle 1.2 und 1.3. Die Last- und Randbedingungen aus Abbildung 4.19 sowie die Optimierungsparameter bleiben unverändert.

Tabelle 4.6: Optimierungsfälle 1.2 und 1.3 für den zweidimensionalen 3-Punkt-Biegebalken unter Variation der Materialeigenschaften und Bereichsdicken

		Kontur	Interface	Schraffur
Optimierungsfall 1.2	E-Modul [GPa]	75,6	63,0	70,0
	Querkontraktion [-]	0,35	0,35	0,35
	Dicke [mm]	1,0	1,0	-
Optimierungsfall 1.3	E-Modul [GPa]	105,0	35,0	70,0
	Querkontraktion [-]	0,35	0,35	0,35
	Dicke [mm]	2,0	2,0	-

Die abgeleiteten Designvorschläge für die Optimierungsfälle 1.2 und 1.3 (siehe Tabelle 4.6) werden nachfolgend qualitativ und quantitativ untersucht. Hierzu werden die Designvorschläge inklusive der darin vorliegenden Materialbereiche analog zu Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23 dargestellt. Darüber hinaus werden die prozentualen Anteile der drei Bereiche in den jeweiligen Designvorschlägen sowie das Endvolumen und die sich ergebende Verzerrungsenergie der statischen FE-Analyse herangezogen. Da die fiktive Dichteverteilung der beiden Optimierungsfälle 1.2 und 1.3 analog zu Abbildung 4.25 eintritt und somit ein Indiz für Konvergenz bereitstellt, wird im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit auf deren detaillierte Auswertung verzichtet.

Für Optimierungsfall 1.2, bei dem sowohl der Kontur- als auch Interfacebereich jeweils mit nur 1 mm statt wie zuvor 2 mm (Optimierungsfall 1.1) modelliert wird, ergeben sich die Designvorschläge in Abbildung 4.26 (entwickelte TopOpt-Methode) und Abbildung 4.27 (standardisierte Topologieoptimierung).

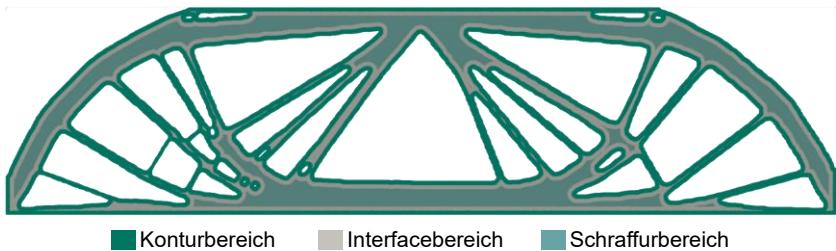


Abbildung 4.26: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 1.2

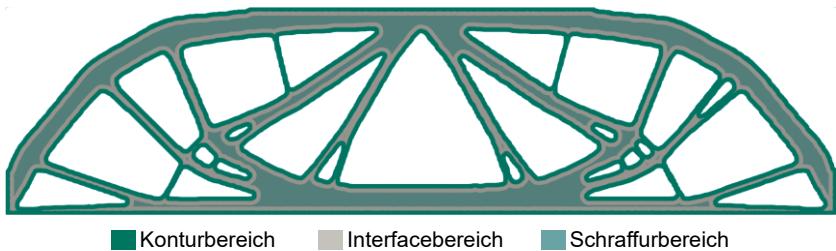


Abbildung 4.27: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 1.2

Aus dem Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode (siehe Abbildung 4.26) ergibt sich, dass wie bereits in Optimierungsfall 1.1 dünne Streben, die ausschließlich aus Konturbereich bestehen, ausgebildet werden. Dies ist im Vergleich zu Optimierungsfall 1.1 (siehe Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23) stärker ausgeprägt und lässt sich mit den geringeren Bereichsdicken (siehe Tabelle 4.6) begründen. Auch die Anzahl der sich ausbildenden Streben nimmt zu, wodurch die getroffene Annahme hinsichtlich Maximierung des Konturbereichs und damit verbundener Reduktion des Interfacebereichs gestützt wird. Gleichzeitig wird dadurch die Plausibilität des Optimierungsalgorithmus unterstrichen. Der Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung (siehe Abbildung 4.27) entspricht jenem aus Optimierungsfall 1.1 und ist darauf zurückzuführen, dass keine geringfügige Anpassung am Zielvolumen vorgenommen wird, da die Endvolumen der beiden Designvorschläge bereits nah beieinanderliegen (siehe Tabelle 4.7). Lediglich die prozentualen Anteile der Materialbereiche unterscheiden sich aufgrund der geringeren Bereichsdicken.

Wie bereits bei Optimierungsfall 1.1 bestätigen die prozentualen Anteile der Materialbereiche (siehe Tabelle 4.7) die qualitativen Beobachtungen, dass der Konturbereich maximiert und der Interfacebereich reduziert wird. So weist der Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode einen 4,5 % größeren Konturbereich und 4,8 % geringeren Interfacebereich im Vergleich zum Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung auf. Die Schraffurbereiche liegen hingegen auf einem ähnlichen Niveau.

Tabelle 4.7: Quantitative Auswertung von Optimierungsfall 1.2

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Kontur [%]	44,2	39,7
Interface [%]	26,0	30,8
Schraffur [%]	29,8	29,5
Endvolumen [%]	43,56	43,27
Verzerrungsenergie [mJ]	198,92	194,60
Spez. Verzerrungsenergie [mJ/mm ³]	0,045666	0,044963

Wird neben der qualitativen Betrachtung der Designvorschläge sowie der prozentualen Verteilung der Materialbereiche die volumenspezifische Verzerrungsenergie (siehe Tabelle 4.7) herangezogen, ergibt sich ein ähnliches Ergebnis wie bei Optimierungsfall 1.1. Erneut weist der Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode eine erhöhte Steifigkeit aufgrund der iterativen Anpassung der fiktiven Dichten im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung auf. Im Vergleich zu Optimierungsfall 1.1 fällt diese erhöhte Steifigkeit mit einem Wert von 1,56 % jedoch geringer aus. Dies kann auf den insgesamt höheren Anteil an Schraffurbereich im Vergleich zu Optimierungsfall 1.1 zurückgeführt werden. Daraus lässt sich gleichzeitig die Annahme ableiten, dass aus kleineren Bereichsdicken bezogen auf die Bauteilabmessungen ein geringerer Steifigkeitszugewinn folgt. Diese Annahme wird in Kapitel 4.3.3 näher analysiert.

Um den Einfluss der gewählten Materialeigenschaften auf die resultierenden Designvorschläge abzuleiten, wird Optimierungsfall 1.3 herangezogen. Darin weist der Konturbereich einen 50 % höheren und der Interfacebereich einen 50 % niedrigeren E-Modul als in Optimierungsfall 1.1 auf (siehe Tabelle 4.3). Die sich daraus ergebenden Designvorschläge sind Abbildung 4.28 (entwickelte TopOpt-Methode) und Abbildung 4.29 (standardisierte Topologieoptimierung) zu entnehmen.

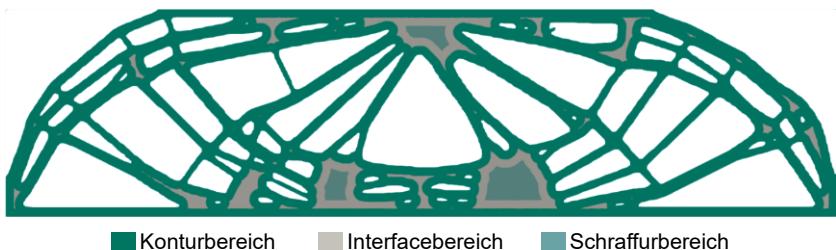


Abbildung 4.28: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 1.3

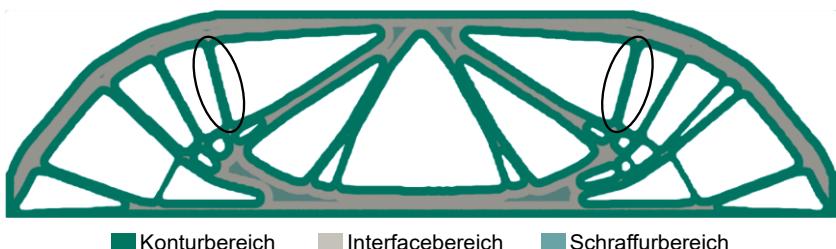


Abbildung 4.29: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 1.3

Für Optimierungsfall 1.3 wird eine geringfügige Anpassung des Zielvolumens der standardisierten Topologieoptimierung vorgenommen, damit die Endvolumen der beiden Designvorschläge näher beieinander liegen. Dadurch wird die vergleichbare Auswertung der volumenspezifischen Verzerrungsenergie möglich. Durch die Anpassung ergibt sich im Vergleich zu Optimierungsfall 1.1 ein etwas anderer Designvorschlag aus der standardisierten Topologieoptimierung (siehe Abbildung 4.23), bei dem im Wesentlichen jedoch nur zwei dünne Streben der mittleren oberen Region (siehe schwarze Markierungen in Abbildung 4.29) weiter außen positioniert sind. Ansonsten bildet sich wie zuvor eine Art Fachwerkstruktur und einige wenige Löcher in den Streben aus. Im Vergleich hierzu weist der Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode (siehe Abbildung 4.28) deutliche Unterschiede sowohl zum Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung als auch jenen aus Optimierungsfall 1.1 und Optimierungsfall 1.2 auf. So bildet sich zwar weiterhin eine Art Fachwerkstruktur aus, jedoch annähernd vollständig aus dünnen Streben, die ausschließlich Konturbereich aufweisen. Außerdem wird eine Vielzahl an Löchern

erzeugt, wodurch der Anteil an Konturbereich weiter ansteigt. Dieses Beispiel bestätigt die zuvor getroffene Annahme, dass der Konturbereich vom Optimierungsalgorithmus möglichst maximiert wird.

Dies wird verdeutlicht, wenn die prozentual vorliegenden Materialbereiche der Designvorschläge aus Tabelle 4.8 herangezogen werden. Der Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode weist einen Konturbereich von über 85 % auf und somit im Vergleich zu Optimierungsfall 1.1, bei dem alle Parameter außer die Materialeigenschaften gleich sind, einen Zuwachs von über 10 %. Im Vergleich zum Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung ergibt sich ein 16,5 % größerer Kontur- und 18,2 % geringerer Interfacebereich. Dieser Unterschied in den Materialbereichen wirkt sich auch auf die volumenspezifischen Verzerrungsenergien (siehe Tabelle 4.8) aus. So wird durch die entwickelte TopOpt-Methode ein Steifigkeitszugewinn von 14,71 % gegenüber der standardisierten Topologieoptimierung erreicht.

Tabelle 4.8: Quantitative Auswertung von Optimierungsfall 1.3

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Kontur [%]	85,8	69,3
Interface [%]	10,6	28,8
Schraffur [%]	3,6	1,8
Endvolumen [%]	44,67	44,46
Verzerrungsenergie [mJ]	259,20	224,89
Spez. Verzerrungsenergie [mJ/mm ³]	0,058026	0,050583

Fazit

Anhand der drei zweidimensionalen Optimierungsfälle lässt sich zusammenfassen, dass die iterative Anpassung der fiktiven Dichten in der entwickelten TopOpt-Methode stets in steiferen und deutlich variierenden Designvorschlägen im Vergleich zu einer standardisierten Topologieoptimierung resultiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Bereich mit den besten Materialeigenschaften (Konturbereich) vom Optimierungsalgorithmus bevorzugt und somit maximiert wird. Gleichzeitig erfolgt eine Reduktion des Bereichs mit den geringeren Materialeigenschaften (Interfacebereich). Dieses Verhalten kann in allen drei vorgestellten Optimierungsfällen festgestellt werden. Daraus resultiert, dass das gewählte Vorgehen

in der entwickelten TopOpt-Methode plausibel und zielführend ist. Dadurch kann die TopOpt-Methode als verifiziert im Kontext der Untersuchungen im Zweidimensionalen angesehen werden. Darüber hinaus bestätigen die vorgestellten Ergebnisse aus Sicht der Produktentstehung bereits, dass die Einbeziehung fertigungsspezifischer Randbedingungen in der Gestaltfindung nicht vernachlässigt werden sollte.

Da die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte TopOpt-Methode jedoch vorwiegend für dreidimensionale Bauteile eingesetzt werden soll, wird nachfolgend in Kapitel 4.3.1.2 überprüft, ob die im Zweidimensionalen abgeleiteten Erkenntnisse auf Fragestellungen im Dreidimensionalen übertragbar sind.

4.3.1.2 Untersuchungen im Dreidimensionalen

Aufbauend auf den Ergebnissen der zweidimensionalen Optimierungsfälle wird in diesem Kapitel 4.3.1.2 die entwickelte TopOpt-Methode im Kontext dreidimensionaler Bauteile untersucht. Diese Untersuchung steigert somit den Komplexitätsgrad sukzessiv und beschreibt die zweite Stufe der Verifikation. Zunächst erfolgt analog zu Kapitel 4.3.1.1 eine Beschreibung des Modellaufbaus und der verwendeten Optimierungsparameter. Danach werden zwei dreidimensionale Optimierungsfälle mit variierenden Materialeigenschaften qualitativ und quantitativ analysiert sowie die abgeleiteten Designvorschläge mit jenen der standardisierten Topologieoptimierung verglichen. Abgeschlossen wird das Kapitel 4.3.1.2 und damit verbunden die zweistufige Verifikation mit einer Bewertung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse aus den Untersuchungen im Zweidimensionalen auf die Anwendungen im Dreidimensionalen sowie einem Fazit bezüglich der entwickelten TopOpt-Methode.

Die nachfolgenden Inhalte dieses Kapitels 4.3.1.2 wurden teilweise in der Publikation Holoch et al. (2021) veröffentlicht und basieren sowohl auf dieser Publikation als auch der vom Autor co-betreuten Abschlussarbeit von Lenhardt (2021)²⁸.

Modellaufbau und Optimierungsparameter

Um eine potentielle Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Untersuchungen im Zweidimensionalen (siehe Kapitel 4.3.1.1) sicherzustellen, wird auch für die folgenden Analysen im Dreidimensionalen ein 3-Punkt-Biegebalken als akademisches Beispiel herangezogen (siehe Abbildung 4.30). Wie sich bereits zuvor in Kapitel 4.3.1.1 gezeigt hat, eignet sich der 3-Punkt-Biegebalken als Leitbeispiel, da die damit erzeugten Ergebnisse gut interpretierbar sind und somit Schlüsse hinsichtlich

²⁸ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Wirkungsweise und Potentialen der entwickelten TopOpt-Methode gezogen werden können.

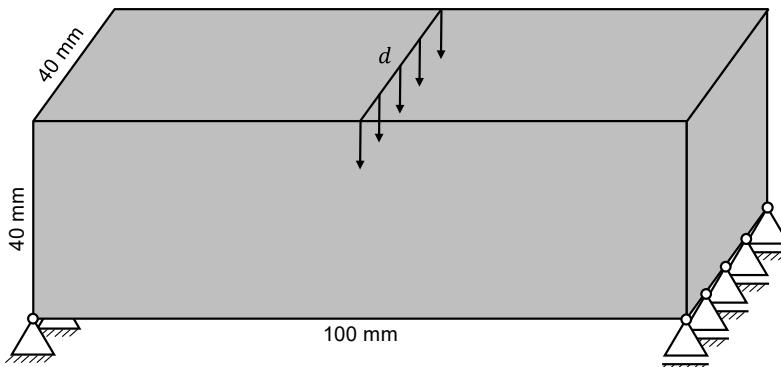


Abbildung 4.30: Modellaufbau zur Untersuchung der 3D-Optimierungen ohne Filterung entlang der Aufbaurichtung nach Holoch et al. (2021)

Wie zuvor in Kapitel 4.3.1.1 besteht der 3-Punkt-Biegebalken aus einer Fest-Los-Lagerung, die sich an den beiden unteren Eckkanten befindet. Zudem wird eine vordefinierte Verschiebung d in Höhe von 0,2 mm auf der Oberseite des 3-Punkt-Biegebalkens mittig über die gesamte Tiefe aufgebracht. Als FE werden Tetraeder mit linearer Ansatzfunktion (siehe Abbildung 2.16) und einer Elementkantenlänge von 1 mm genutzt, wodurch sichergestellt wird, dass die unterschiedlichen Materialbereiche stets aus mehreren FE bestehen. Die Maximierung der Steifigkeit bei gleichzeitiger Reduktion des Balkenvolumens auf ein relatives Endvolumen von 40 % stellt erneut das Optimierungsziel dar. Des Weiteren werden die Materialeigenschaften ebenfalls als isotrop, ideal linear-elastisch angenommen und sind zusammen mit den Bereichsdicken für die beiden Optimierungsfälle 2.1 und 2.2 der Tabelle 4.9 zu entnehmen.

Tabelle 4.9: Optimierungsfälle 2.1 und 2.2 für den dreidimensionalen 3-Punkt-Biegebalken ohne Filterung entlang der Aufbaurichtung

		Kontur	Interface	Schraffur
Optimierungsfall 2.1	E-Modul [GPa]	75,6	63,0	70,0
	Querkontraktion [-]	0,35	0,35	0,35
	Dicke [mm]	2,0	2,0	-
Optimierungsfall 2.2	E-Modul [GPa]	87,5	52,5	70,0
	Querkontraktion [-]	0,35	0,35	0,35
	Dicke [mm]	2,0	2,0	-

Wie bereits in den Untersuchungen im Zweidimensionalen (siehe Kapitel 4.3.1.1) sind die quantitativen Werte der Materialeigenschaften und Bereichsdicken lediglich als exemplarisches Beispiel anzusehen, um Schlüsse auf das Verhalten der entwickelten TopOpt-Methode zu ziehen. Es wird erneut darauf geachtet, dass die Materialeigenschaften derart gewählt werden, dass der Interfacebereich stets einen geringeren E-Modul und der Konturbereich einen höheren E-Modul im Vergleich zum Schraffurbereich aufweisen. Für die quantitative Auswertung der vorliegenden Verzerrungsenergie wird auf das in Kapitel 4.3.1.1 beschriebene Vorgehen, bestehend aus Mapping und statischer FE-Analyse, zurückgegriffen.

Qualitative und quantitative Analyse der abgeleiteten Designvorschläge

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels 4.3.1.2 werden die beiden Optimierungsfälle 2.1 und 2.2 (siehe Tabelle 4.9) sowohl einer qualitativen als auch quantitativen Analyse unterzogen. Hierzu werden die abgeleiteten Designvorschläge der entwickelten TopOpt-Methode erneut mit jenen einer standardisierten Topologieoptimierung unter gleichen Last- und Randbedingungen sowie Optimierungsparametern verglichen. Um die quantitative Vergleichbarkeit der resultierenden volumenspezifischen Verzerrungsenergie der Designvorschläge sicherzustellen, wird wie in Kapitel 4.3.1.1 beschrieben, eine geringfügige Anpassung des Zielvolumens der standardisierten Topologieoptimierung durchgeführt, um Ergebnisse mit annähernd gleichen Endvolumen zu erreichen.

Die abgeleiteten Designvorschläge für Optimierungsfall 2.1 sind Abbildung 4.31 (entwickelte TopOpt-Methode) und Abbildung 4.32 (standardisierte Topologieoptimierung) zu entnehmen.

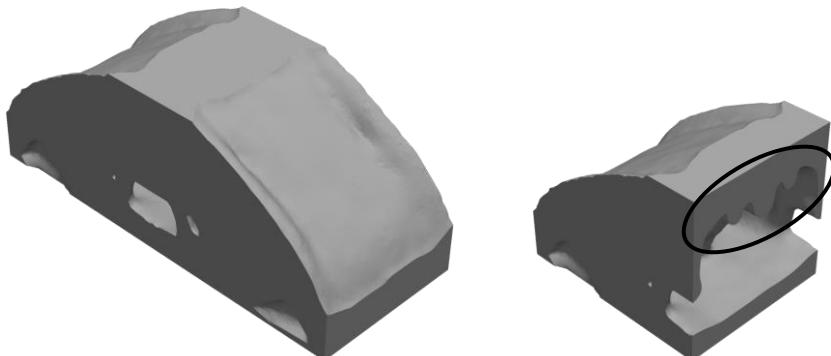


Abbildung 4.31: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 2.1: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)

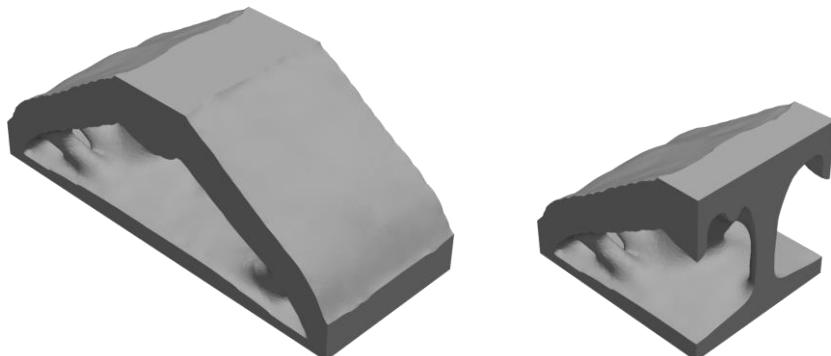


Abbildung 4.32: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 2.1: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)

Anhand des Designvorschlags der standardisierten Topologieoptimierung wird ersichtlich, dass eine Art Doppel-T-Träger (siehe Abbildung 4.32 rechts) in der Mitte und lokal verteilte Verstrebungen erzeugt werden. Dies ist auf den einachsigen Biegefall zurückzuführen und spiegelt ein bekanntes Konstruktionsdesign für Biegebeanspruchungen wider. Im Gegensatz hierzu geht aus dem Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode (siehe Abbildung 4.31) hervor, dass eine Art Hohlprofil entsteht. Dieses Hohlprofil lässt sich vor allem an den Längsseiten des Balkens erkennen. Zusätzlich bildet sich im Inneren des Balkens eine rippenartige Struktur an der Oberseite aus (siehe schwarze Markierung in Abbildung 4.31 rechts), was zusammen mit dem Hohlprofil zu einer Vergrößerung der Oberfläche

beiträgt, wodurch der Konturbereich maximiert wird. Die Maximierung des Konturbereichs konnte ebenfalls in den Untersuchungen im Zweidimensionalen (siehe Kapitel 4.3.1.1) beobachtet werden und lässt sich auf dessen höheren E-Modul zurückführen. (Holoch et al., 2021) Die quantitative Auswertung der prozentual vorliegenden Bereiche stützt erneut diese Beobachtung (siehe Tabelle 4.10).

Tabelle 4.10: Quantitative Auswertung der prozentual vorliegenden Anteile der drei porenbehafteten Bereiche in den abgeleiteten Designvorschlägen für den Optimierungsfall 2.1

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Kontur [%]	66,4	58,0
Interface [%]	30,7	36,9
Schraffur [%]	2,9	5,1

Die prozentual unterschiedlich stark vertretenen Anteile der drei porenbehafteten Bereiche sind auch visuell anhand von Abbildung 4.33 ersichtlich. Besonders in Abbildung 4.33 links wird deutlich, wie durch die Erzeugung des Hohlprofils im Vergleich zum Doppel-T-Träger (siehe Abbildung 4.33 rechts) vermehrt Konturbereich im Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode auftritt.

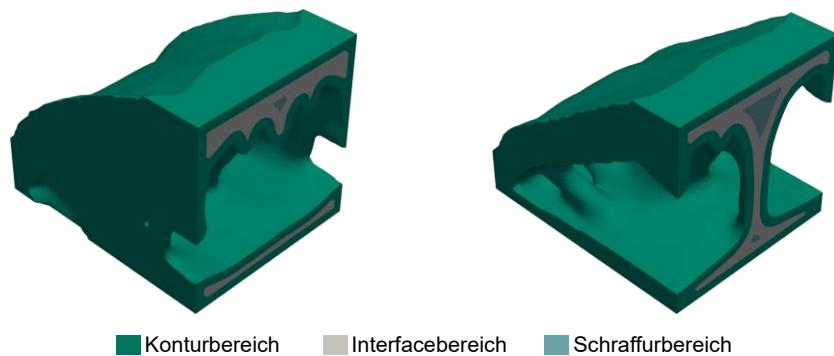


Abbildung 4.33: Resultierende Designvorschläge (Schnittdarstellung) inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 2.1: Entwickelte TopOpt-Methode (links) und standardisierte Topologieoptimierung (rechts)

Um neben den vorliegenden Materialbereichen auch die Verzerrungsenergien der Designvorschläge zu berücksichtigen, wird analog zu den Untersuchungen im Zweidimensionalen (siehe Kapitel 4.3.1.1) eine statische FE-Analyse durchgeführt. Die sich daraus ergebenden Werte für die Verzerrungsenergie sowie die resultierenden Endvolumen können Tabelle 4.11 entnommen werden.

Tabelle 4.11: Quantitative Auswertung der resultierenden Verzerrungsenergie aus der statischen FE-Analyse der abgeleiteten Designvorschläge für Optimierungsfall 2.1

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Endvolumen [%]	45,84	45,64
Verzerrungsenergie [mJ]	842,22	828,70
Spez. Verzerrungsenergie [mJ/mm ³]	0,011483	0,011348

Anhand von Tabelle 4.11 ergibt sich für den Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode im Vergleich zu jenem der standardisierten Topologieoptimierung eine um 1,19 % erhöhte volumenspezifische Verzerrungsenergie. Somit lässt sich der Schluss ziehen, dass auch im Dreidimensionalen die entwickelte TopOpt-Methode durch die Maximierung des Konturbereichs steifere Ergebnisse erzeugt. Neben der Verzerrungsenergie und der damit verbundenen Steifigkeit geht aus Tabelle 4.11 erneut die in Kapitel 4.3.1.1 beschriebene Prämisse hervor, dass die Endvolumen der Optimierungsergebnisse das definierte Zielvolumen übersteigen. Wie bereits in den Untersuchungen im Zweidimensionalen (siehe Kapitel 4.3.1.1) ist dies auf die Überprüfung des Optimierers hinsichtlich der Erreichung des gewünschten Zielvolumens mittels Skalierung anhand der fiktiven Dichten zurückzuführen (siehe Gleichung 4.3).

Um zu gewährleisten, dass die abgeleiteten Designvorschläge nicht zufällig, sondern durch die zielgerichtete Ermittlung eines Optimums erzeugt werden, wird der Konvergenzverlauf ausgewertet (siehe Abbildung 4.34). Daraus geht hervor, dass sich wie bereits bei den Untersuchungen im Zweidimensionalen sowohl die entwickelte TopOpt-Methode als auch die standardisierte Topologieoptimierung kontinuierlich einem Verzerrungsenergiewert annähern, ohne dabei Sprünge oder eine Divergenz vorzuweisen. Dadurch lässt sich auch für die Umsetzung im Dreidimensionalen der entwickelten TopOpt-Methode schließen, dass die iterative Anpassung der fiktiven Dichten keinen negativen Einfluss auf das Konvergenzverhalten hat und folglich als zulässig und zielführend einzustufen ist.

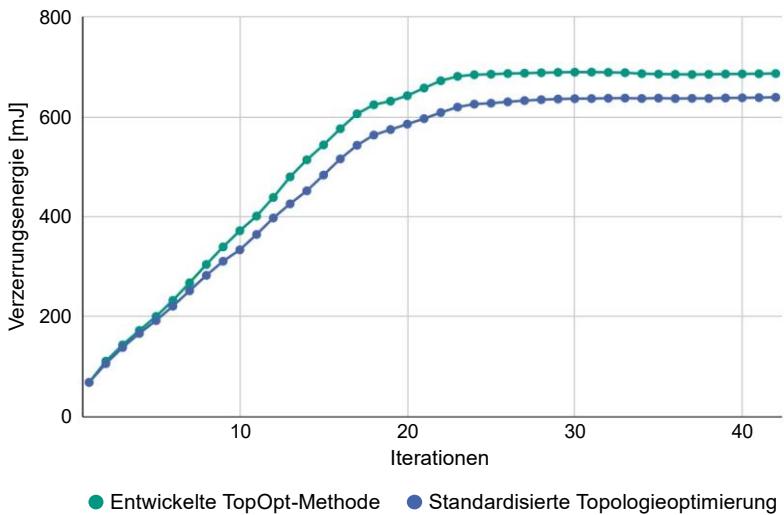


Abbildung 4.34: Konvergenzverläufe für Optimierungsfall 2.1

Neben dem Konvergenzverlauf werden erneut die Verteilungen der fiktiven Dichten der abgeleiteten Designvorschläge herangezogen, da diese ebenfalls ein Indiz für Konvergenz darstellen. Diese Verteilungen der beiden Designvorschläge für Optimierungsfall 2.1 sind in Abbildung 4.35 (entwickelte TopOpt-Methode) und Abbildung 4.36 (standardisierte Topologieoptimierung) dargestellt.

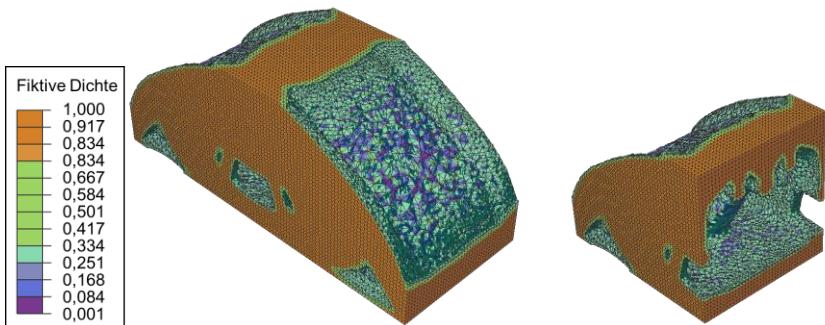


Abbildung 4.35: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive fiktiver DichteVerteilung für Optimierungsfall 2.1: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)

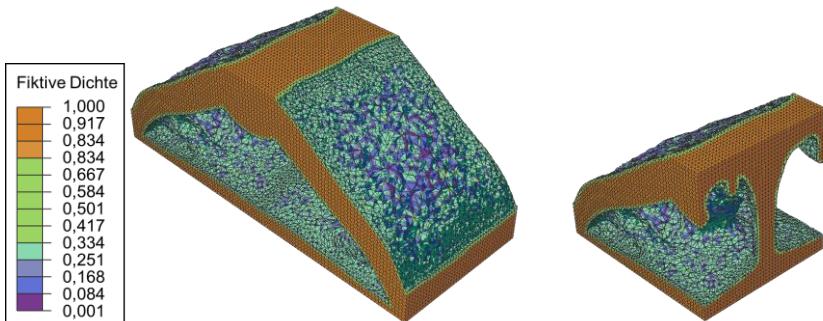


Abbildung 4.36: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive fiktiver DichteVerteilung für Optimierungsfall 2.1: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)

Anhand der fiktiven DichteVerteilungen (siehe Abbildung 4.35 und Abbildung 4.36) ist erkennbar, dass beide Designvorschläge fast ausschließlich aus FE bestehen, die eine fiktive Dichte von 0 oder 1 aufweisen, wodurch die Aussage hinsichtlich Konvergenz gestützt wird. Nichtsdestotrotz liegen auch einige FE an der Oberfläche vor, die Werte für die fiktive Dichte zwischen 0 und 1 aufweisen. Dies tritt, wie bereits erläutert bei dichtebasierter Topologieoptimierungen stets auf und führt zu der beschriebenen Abweichung zwischen gewünschtem Zielvolumen und tatsächlich erreichtem Endvolumen (siehe Kapitel 4.3.1.1).

Durch die Auswertung von Optimierungsfall 2.1 lassen sich erste Schlüsse hinsichtlich Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Untersuchungen im Zweidimensionalen ziehen. So wird erneut der Konturbereich aufgrund der verbesserten Materialeigenschaften maximiert und gleichzeitig der Interfacebereich reduziert (siehe beispielsweise Hohlprofil in Abbildung 4.33). Dieses Verhalten des Optimierungsalgorithmus erhöht die volumenspezifische Verzerrungsenergie und sorgt demnach für eine verbesserte Steifigkeit. Des Weiteren sind auch bei den Untersuchungen im Dreidimensionalen keine Auffälligkeiten des Konvergenzverhaltens zu erkennen. Daraus folgt, dass die gewonnenen Erkenntnisse aus den Untersuchungen im Zweidimensionalen auf dreidimensionale Anwendungsfälle übertragen werden können.

Um diesen Schluss zu verifizieren, wird Optimierungsfall 2.2 aus Tabelle 4.9 analysiert, dem ein erhöhter E-Modul im Kontur- und geringerer E-Modul im Interfacebereich zugrunde liegen. Für die standardisierte Topologieoptimierung wird eine geringfügige Anpassung des Zielvolumens gegenüber Optimierungsfall 2.1 vorgenommen, damit die Endvolumen der beiden Designvorschläge (entwickelte

TopOpt-Methode und standardisierte Topologieoptimierung) näher beieinanderliegen. Dadurch wird die Auswertung der volumenspezifischen Verzerrungsenergie vergleichbar möglich.

Die abgeleiteten Designvorschläge der entwickelten TopOpt-Methode und der standardisierten Topologieoptimierung sind in Abbildung 4.37 und Abbildung 4.38 dargestellt.

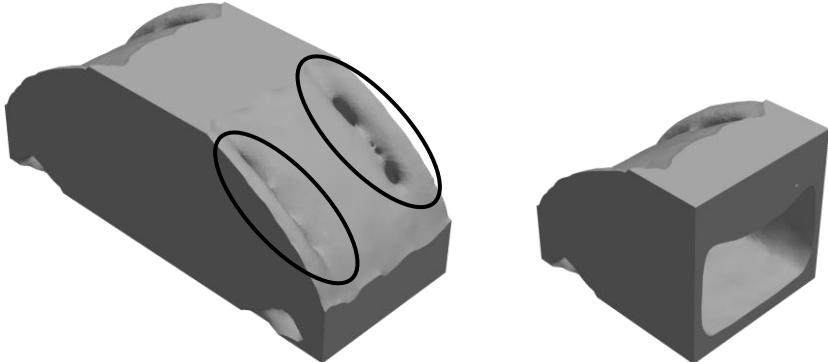


Abbildung 4.37: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 2.2: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)

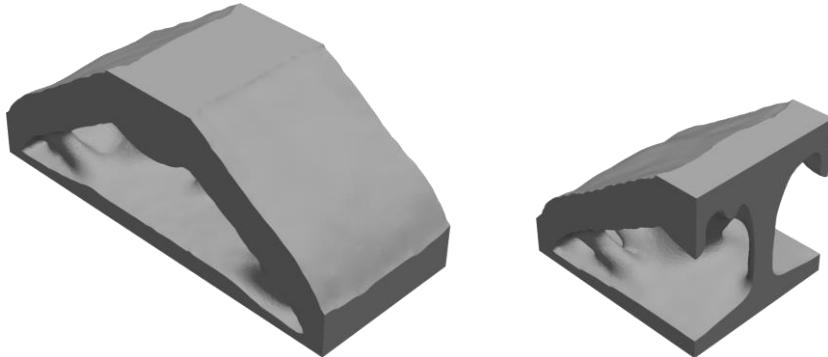


Abbildung 4.38: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 2.2: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)

Aus Abbildung 4.37 und Abbildung 4.38 ergibt sich, dass der Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung analog zu Optimierungsfall 2.1 erneut eine

Art Doppel-T-Träger mit kleinen Verstrebungen an den Lagerungen ausbildet (siehe Abbildung 4.38). Der Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode weist im Vergleich zu Abbildung 4.31 ein stärker ausgeprägtes Hohlprofil mit geschlossenen Seitenwänden auf. Des Weiteren bilden sich auf der Oberfläche mehrere Löcher aus, wodurch seitliche Streben angedeutet werden (siehe schwarze Markierungen in Abbildung 4.37). Diese Ausprägungen sind erneut auf die stärker fokussierte Maximierung des Konturbereichs zurückzuführen, da dieser im vorliegenden Optimierungsfall deutlich verbesserte Materialeigenschaften im Vergleich zum Interfacebereich aufweist. Dieses Verhalten der Optimierung ist analog zu den Beobachtungen aus den Untersuchungen im Zweidimensionalen, wodurch die Schlussfolgerung hinsichtlich deren Übertragbarkeit auf dreidimensionale Anwendungen gestärkt wird.

Durch die quantitative Auswertung (siehe Tabelle 4.12) der Designvorschläge ergibt sich, dass die entwickelte TopOpt-Methode einen Konturbereich von 74,3 % und einen Interfacebereich von 20,5 % aufweist. Dadurch erzeugt die entwickelte TopOpt-Methode im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung 19,2 % mehr Konturbereich und 16,9 % weniger Interfacebereich. Dieser Unterschied spiegelt sich in einer verbesserten Steifigkeit wider. So erreicht die entwickelte TopOpt-Methode eine um 5,19 % erhöhte volumenspezifische Verzerrungsenergie. Diese verbesserte Steifigkeit aufgrund stärkerer Unterschiede in den vorliegenden Materialeigenschaften ist mit den gewonnenen Erkenntnissen aus den in Kapitel 4.3.1.1 beschriebenen Untersuchungen im Zweidimensionalen identisch.

Tabelle 4.12: Quantitative Auswertung von Optimierungsfall 2.2

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Kontur [%]	74,3	55,1
Interface [%]	20,5	37,4
Schraffur [%]	5,2	7,5
Endvolumen [%]	48,92	48,92
Verzerrungsenergie [mJ]	923,29	912,93
Spez. Verzerrungsenergie [mJ/mm ³]	0,012269	0,011664

Fazit

Anhand der in diesem Kapitel 4.3.1.2 vorgestellten Ergebnisse lassen sich die analogen Erkenntnisse zu den Untersuchungen im Zweidimensionalen (siehe Kapitel 4.3.1.1) ableiten. So wird durch die iterative Anpassung der fiktiven Dichten in der entwickelten TopOpt-Methode stets der Konturbereich aufgrund der verbesserten Materialeigenschaften maximiert, während der Interfacebereich einer Reduktion unterzogen wird. Gleichzeitig hat diese iterative Anpassung keine negative Auswirkung auf den Konvergenzverlauf und führt somit zielgerichtet zu einem Optimum. Daraus folgt, dass die im Zweidimensionalen gewonnenen Erkenntnisse direkt auf dreidimensionale Anwendungen übertragbar sind. Des Weiteren wird das entwickelte Vorgehen zur iterativen Anpassung der fiktiven Dichten als zielführend und plausibel eingestuft, da dieses im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung unter den vorgestellten Optimierungsfällen stets steifere Ergebnisse erzeugt. Somit kann die entwickelte TopOpt-Methode auch im Kontext der durchgeführten Untersuchungen im Dreidimensionalen als verifiziert angesehen werden.

4.3.2 Validierung der entwickelten TopOpt-Methode anhand SLM-gefertigter Designvorschläge

Aufbauend auf den Ergebnissen der Verifikation (siehe Kapitel 4.3.1) wird in diesem Kapitel 4.3.2 die Validität der entwickelten TopOpt-Methode im Kontext des SLM analysiert. Hierzu werden in Kooperation mit dem IAM-WK experimentelle Untersuchungen anhand von Probengeometrien durchgeführt und die daraus resultierenden Ergebnisse in Bezug auf Porenverteilung sowie den damit verbundenen elastischen, mechanischen Materialeigenschaften evaluiert. Dadurch werden die qualitativen Beobachtungen anhand des Demonstrators (siehe Kapitel 4.1.1) näher untersucht und mit quantitativen Werten versehen.

Nach Klahn (2017) weist das SLM über 100 Einflussfaktoren auf, die eine potentielle Auswirkung auf die Qualität (z. B. Porenentstehung) des gefertigten Bauteils haben. Zu diesen zählen u. a. das Material inklusive der damit einhergehenden thermischen und mechanischen Eigenschaften, die SLM-Anlage zusammen mit dem bedienenden Produktentwickler und die Prozessdurchführung. Auf Basis der Vielzahl an Einflussfaktoren ist der Anspruch der nachfolgend vorgestellten experimentellen Untersuchungen nicht, alle im SLM vorherrschenden Einflussfaktoren und deren potentiellen Auswirkungen zu untersuchen. Vielmehr wird ein Satz an Einflussfaktoren ausgewählt und detailliert untersucht. Auf Basis der sich daraus ergebenden Erkenntnisse können darauf aufbauende ergänzende Untersuchungen, die weitere Einflussgrößen einbeziehen, Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten werden (siehe Kapitel 5.2). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher stets die

gleiche SLM-Anlage herangezogen und von einem erfahrenen Mitarbeiter am IAM-WK bedient. Darüber hinaus werden in industriellen Anwendungen genutzte Prozessparameter gewählt (siehe Kapitel 4.3.2.1) und nicht variiert. Zusammen mit den angewendeten Charakterisierungsverfahren und den Probenumfängen beschreiben die Prozessparameter sowie die SLM-Anlage die Validierungsumgebung für die entwickelte TopOpt-Methode. In Kapitel 4.3.2.1 wird diese Validierungsumgebung vorgestellt. Anschließend werden in Kapitel 4.3.2.2 die Ergebnisse der Charakterisierung präsentiert. Auf Basis dieser Ergebnisse werden in Kapitel 4.3.2.3 weitere Optimierungsfälle ergänzend zu jenen aus Kapitel 4.3.1 analysiert und Erkenntnisse hinsichtlich der Validität der TopOpt-Methode abgeleitet. Abschließend erfolgt ein Fazit (siehe Kapitel 4.3.2.4).

Die nachfolgenden Inhalte dieses Kapitels 4.3.2 wurden bereits in den Publikationen Holoch, Lenhardt, Revfi & Albers (2022) und Czink, Holoch, Renz, Schulze, Albers & Dietrich (2023) veröffentlicht.

4.3.2.1 Validierungsumgebung

In diesem Kapitel 4.3.2.1 wird die zugrunde liegende Validierungsumgebung spezifiziert. Zunächst wird die genutzte SLM-Anlage inklusive der Prozessparameter und des verwendeten Materials vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgt die Beschreibung der Charakterisierungsverfahren zur Bestimmung der Porenverteilung und den damit verbundenen mechanischen Materialeigenschaften. Zusätzlich werden die zur Validierung der TopOpt-Methode herangezogenen Probenumfänge präsentiert.

SLM-Anlage, Prozessparameter und Material

Wie bereits bei den qualitativen Untersuchungen der Porenverteilung anhand des Demonstrators (siehe Kapitel 4.1.1) wird auch im Kontext der Validierung als Material die im Leichtbau häufig verwendete Aluminiumlegierung AlSi10Mg genutzt. Darüber hinaus kommt erneut die SLM-Anlage ORLAS Creator der Firma O.R. Laser-technologie GmbH zum Einsatz. Die SLM-Anlage ist mit einem Ytterbium-Faserlaser (YLM-150) ausgestattet, der eine maximale Leistung von 250 W und eine Wellenlänge von 1070 nm aufweist. Um Oxidation an der eingesetzten Aluminiumlegierung zu vermeiden, wird die Fertigung der für die Validierung benötigten Probenumfänge (siehe Tabelle 4.13) in einer Argon-Atmosphäre mit einem Sauerstoffgehalt kleiner 0,1 % durchgeführt. Des Weiteren erfolgt die Fertigung analog zu Tabelle 4.2 mit einer Laserleistung von 250 W, Scangeschwindigkeit von 900 mm/s, Scandistanz von 150 µm, Schichtdicke von 30 µm und einem Laserspotdurchmesser von 40 µm. Als Scanstrategie wird erneut das bereits in Kapitel 2.3.2 beschriebene, zweistufige Vorgehen angewendet, bei dem in jeder Schicht zunächst die Außenkontur erzeugt und erst anschließend das dazwischenliegende Metallpulver konsolidiert wird. Zwischen den einzelnen Schichten wird die Scanrichtung im

Schraffurbereich jeweils um 67° gedreht, damit möglichst wenige Schichten mit exakt gleicher Scanrichtung übereinanderliegen. (Czink et al., 2023)

Durch die Wahl desselben Materials inklusive derselben Prozessparameter wie bei der Fertigung des Demonstrators besteht die Möglichkeit, die in Kapitel 4.1.1 getroffenen Annahmen hinsichtlich Porenverteilung anhand weiterer Probenumfänge zu evaluieren. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels 4.3.2.1 werden diese Probenumfänge und die zur Evaluation notwendigen Charakterisierungsverfahren vorgestellt.

Charakterisierungsverfahren und Probenumfänge

Um die entstehende Porenverteilung in abgeleiteten Designvorschlägen (siehe Kapitel 4.3.2.3) der entwickelten TopOpt-Methode sowie weiteren Probengeometrien zu untersuchen, wird erneut das μ CT genutzt. Zur qualitativen Auswertung der Porenverteilung wird die dreidimensionale Mikrostruktur anhand der aus dem μ CT stammenden 2D-Projektionen analog zu Kapitel 4.1.1 rekonstruiert (siehe Abbildung 4.2). Für die quantitative Analyse der jeweils vorliegenden Bereichsdicken (Kontur- und Interfacebereich) werden Projektionen der minimalen Grauwerte entlang der Aufbaurichtung (siehe Abbildung 4.3 rechts) mithilfe der Software VGStudio MAX²⁹ erstellt. (Czink et al., 2023)

Während die Bestimmung der Dehngrenze $R_{p0,2}$ anhand von Zugversuchen erfolgt, wird zur Charakterisierung der elastischen, mechanischen Materialeigenschaften die Resonante Ultraschallspektroskopie (RUS) eingesetzt (Czink et al., 2023). Die RUS eignet sich für Untersuchungen im Millimeterbereich und nutzt zur Bestimmung der elastischen, mechanischen Materialeigenschaften die Eigenfrequenzen der jeweils vorliegenden Probe. Diese Eigenfrequenzen hängen neben der Geometrie, Dichte und Dämpfung der Probe auch von den elastischen Konstanten, die ein Maß für die elastischen, mechanischen Materialeigenschaften darstellen, ab. Durch diese Abhängigkeit können die elastischen Konstanten einer Probe anhand der gemessenen Eigenfrequenzen abgeleitet werden. Dazu ist es jedoch erforderlich, dass die Probe in Form einer einfachen Geometrie vorliegt, wie beispielsweise einem Quader oder Zylinder und präzise, parallele Oberflächen aufweist. (Migliori et al., 1993)

Aufgrund dieser Anforderung an einfache Geometrien ist die Charakterisierung der Materialeigenschaften anhand von gefertigten Designvorschlägen, die aus der entwickelten TopOpt-Methode abgeleitet werden, nicht direkt umsetzbar (Czink et al., 2023). Deshalb wird zunächst die Charakterisierung mithilfe einfacher Geometrien durchgeführt und Erkenntnisse hinsichtlich der vorliegenden Materialeigenschaften

²⁹ <https://www.volumegraphics.com/de> (abgerufen am 26.04.2023)

abgeleitet. Anschließend erfolgt die Evaluation der Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse mittels zweier gefertigter Designvorschläge aus der entwickelten TopOpt-Methode (siehe Kapitel 4.3.2.3).

Zur Charakterisierung der Materialeigenschaften mittels RUS werden einfache Geometrien in Form von Quadern mit präzisen, parallelen Oberflächen gefertigt. Die Fertigung dieser Quader erfolgt mit variierenden Überhangwinkeln ohne Stützstruktur, um einen möglichen Einfluss derartiger Überhangwinkel auf die entstehende Porenverteilung zu analysieren. Zusätzlich zu den Quadern werden Zugstäbe zur Bestimmung der Dehngrenze $R_{p0,2}$ präpariert. Darüber hinaus erfolgt die Fertigung der mithilfe der entwickelten TopOpt-Methode abgeleiteten Designvorschläge (siehe Kapitel 4.3.2.3), um die Übertragbarkeit der Charakterisierungsergebnisse vom Quader auf die Designvorschläge zu evaluieren. (Czink et al., 2023) Der gesamte Probenumfang ist in Tabelle 4.13 zusammengefasst.

Tabelle 4.13: Probenumfang zur Validierung der entwickelten TopOpt-Methode nach Czink et al. (2023)

Probentyp	Abmessungen	Überhangwinkel	Anzahl an Proben
Quader	6 x 2 x 60 mm ³	45°, 60°, 75°, 90°	12
Zugstab	Ø 4 x 30 mm ³	90°	5
Biegebalken	48 x 12 x 12 mm ³	-	2

4.3.2.2 Ergebnisse der experimentellen Charakterisierung

In diesem Kapitel 4.3.2.2 werden die Ergebnisse der µCT-Untersuchungen hinsichtlich Porenverteilung und die Charakterisierung der Materialeigenschaften sowohl anhand der Quader als auch der Zugstäbe (siehe Tabelle 4.13) vorgestellt. Darauf aufbauend werden Erkenntnisse hinsichtlich Modellbildung gewonnen, die in Kapitel 4.3.2.3 zur Definition weiterer Optimierungsfälle genutzt werden.

Analyse der in den gefertigten Quadern vorliegenden Porenverteilung

Zur detaillierten Untersuchung der Porenverteilung und den damit verbundenen Dicken des Kontur- und Interfacebereichs werden µCT-Aufnahmen von repräsentativen Gebieten der Quader (siehe Tabelle 4.13) genutzt. Daraus ergeben sich die in Abbildung 4.39 dargestellten Projektionen der minimalen Grauwerte senkrecht zur Aufbaurichtung für die gefertigten Quader mit variierenden Überhangwinkeln. (Czink et al., 2023)

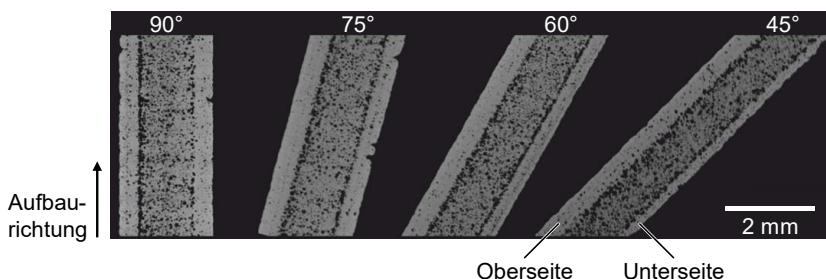


Abbildung 4.39: Projektionen der minimalen Grauwerte senkrecht zur Aufbaurichtung für die Quader aus Tabelle 4.13 nach Czink et al. (2023)

Aus Abbildung 4.39 geht hervor, dass sich wie bereits beim Demonstrator (siehe Kapitel 4.1.1) die drei Bereiche (Kontur, Interface und Schraffur) unterschiedlicher Porosität abhängig von der Aufbaurichtung deutlich ausbilden. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Konturbereich stets am wenigsten und der Interfacebereich am meisten Poren aufweist. Die Porenanzahl des Schraffurbereichs liegt zwischen jener der beiden anderen Bereiche. Dieser Sachverhalt lässt sich mithilfe der Porenverteilung über die horizontale Dicke der Quader quantifizieren und ist beispielhaft für den Quader mit einem Überhangwinkel von 75° in Abbildung 4.40 dargestellt. Darin ist ein signifikanter Ausschlag der globalen Porosität im Interfacebereich zu sehen und deckt sich folglich mit den qualitativen Beobachtungen anhand von Abbildung 4.39. Des Weiteren kann die Beobachtung, dass die Porosität im Schraffurbereich stets zwischen jener der beiden anderen Bereiche liegt, ebenfalls bestätigt werden. (Czink et al., 2023)

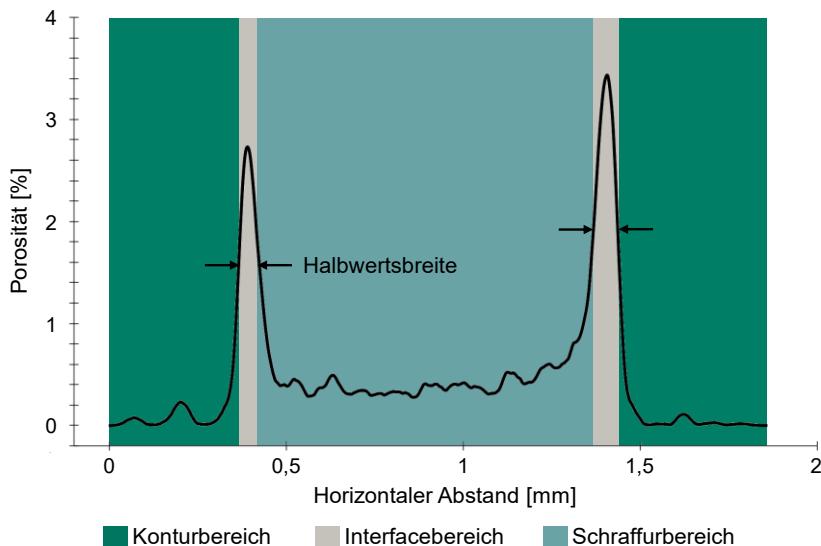


Abbildung 4.40: Porenverteilung über die horizontale Dicke des Quaders mit einem Überhangwinkel von 75° aus Tabelle 4.13 nach Czink et al. (2023)

Neben der Beobachtung, dass sich die drei porenbehafteten Bereiche ausbilden, zeigt Abbildung 4.39 einen Unterschied in den Dicken des Konturbereichs abhängig von den Überhangwinkeln. Der Konturbereich weist beispielsweise für einen Überhangwinkel von 45° auf der Unterseite eine geringere Dicke als an der Oberseite auf (siehe Abbildung 4.39). Dieser Effekt wird mit größerem Überhangwinkel deutlich geringer und ist mutmaßlich auf das schichtweise Vorgehen beim SLM zurückzuführen. So wird während der Konsolidierung des Schraffurbereichs der Konturbereich auf der Unterseite der bereits zuvor konsolidierten Schichten teilweise mit aufgeschmolzen. Dadurch kommt es zu einer Verschiebung der Grenzfläche zwischen Kontur- und Schraffurbereich näher an die Oberfläche des Quaders und führt zu einer geringeren Breite des Konturbereichs auf der Unterseite. Der Interfacebereich scheint hingegen keine Veränderung in den Dicken aufzuweisen. (Czink et al., 2023)

Um die qualitativen Beobachtungen zu überprüfen, werden die Bereichsdicken quantifiziert (siehe Abbildung 4.41). Dazu wird die Dicke des Interfacebereichs als Halbwertsbreite (siehe Abbildung 4.40) der signifikanten Ausschläge in der Porosität definiert. Die Halbwertsbreite beschreibt jene Breite eines signifikanten Ausschlags in der halben Höhe des Maximums. Die Dicke des Konturbereichs ergibt

sich aus dem jeweils vorliegenden Abstand zwischen Quaderoberfläche und dem Beginn des Interfacebereichs (siehe grünes Gebiet in Abbildung 4.40). (Czink et al., 2023)

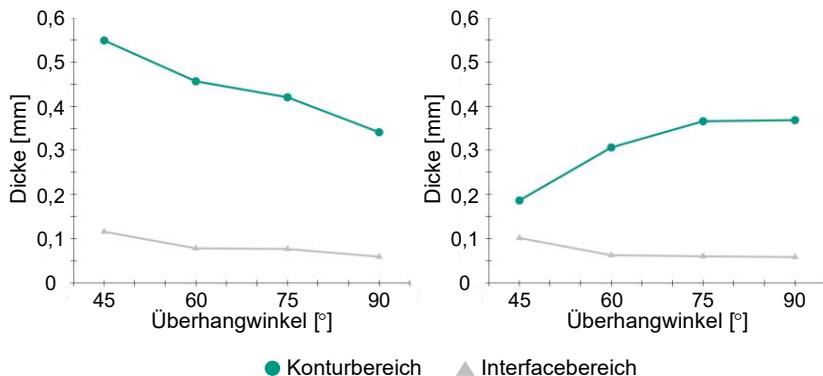


Abbildung 4.41: Bereichsdicken für die Quader aus Tabelle 4.13 nach Czink et al. (2023): Oberseite (links) und Unterseite (rechts)

Mithilfe von Abbildung 4.41 können die qualitativen Beobachtungen hinsichtlich Bereichsdicken gestützt werden. So besitzen die unterschiedlichen Überhangwinkel einen vernachlässigbaren kleinen Einfluss auf die resultierende Dicke des Interfacebereichs, der stets zwischen 0,07 mm und 0,13 mm liegt. Im Vergleich hierzu nehmen die Unterschiede in den vorherrschenden Dicken des Konturbereichs an der Ober- und Unterseite mit abnehmendem Überhangwinkel zu (siehe Abbildung 4.39). Besonders ab einem Winkel kleiner 60° werden diese Unterschiede deutlicher. Die Verläufe der Dicke des Konturbereichs an der Ober- und Unterseite zeigen zudem, dass mit abnehmender Dicke an der Unterseite die Dicke an der Oberseite hingegen zunimmt. Demnach ergibt sich ein gegenläufiger Verlauf der Dicken im Konturbereich über die variierenden Überhangwinkel. (Czink et al., 2023)

Anhand der Ergebnisse im Kontext Porenverteilung und Bereichsdicken lassen sich erste Schlüsse auf die Modellbildung im Rahmen der entwickelten TopOpt-Methode ziehen. So ist die in Kapitel 4.2 angenommene Modellierung von stets drei unterschiedlich porenbefestigten Bereichen entlang der Aufbaurichtung als valide einzustufen. Darüber hinaus kann die Dicke des Interfacebereichs als erste Näherung mit einem Wert von 0,1 mm angenommen werden, wodurch der Mittelwert der in Abbildung 4.41 gering vorliegenden Schwankung abgebildet wird. Die Dicke des Konturbereichs weist deutlich größere Schwankungen auf, wird jedoch als erste Näherung im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit mit einem konstanten Wert von 0,4 mm

angenommen. Dadurch wird zwar für Konturbereiche kleiner 60° die Unterseite überschätzt bzw. die Oberseite in gleichem Maße unterschätzt, im Sinne des Verkürzungsmerkmals nach Stachowiak (1973) wird die Nutzung des Mittelwerts in erster Näherung jedoch als plausibel und zulässig angesehen.

Des Weiteren zeigt Abbildung 4.41 lediglich vier verschiedene Überhangwinkel, wodurch ausschließlich eine Tendenz für die Dicke im Konturbereich abgeleitet werden kann. Eine vollumfängliche Aussage über die resultierenden Dicken bei deutlich abweichenden Überhangwinkeln, wie sie beispielsweise in Designvorschlägen der entwickelten TopOpt-Methode auftreten, ist dadurch nicht gegeben. Dies spricht ebenfalls für die Wahl einer gemittelten Dicke, bis in zukünftigen Forschungsarbeiten (siehe Kapitel 5.2) weiterführende Untersuchungen der Überhangwinkel beispielsweise auch unter Einsatz einer Stützstruktur erfolgen.

Charakterisierung der Materialeigenschaften anhand der gefertigten Quader und Zugstäbe

Um neben der Porenverteilung und den Bereichsdicken auch das in den drei porenbefestigten Bereichen vorliegende Materialverhalten zu bewerten, kann die Porenmorphologie anhand der μ CT-Aufnahmen analysiert werden. Daraus geht hervor, dass die Poren in den drei Bereichen durchschnittlich eine hohe Sphärität aufweisen. Folglich besitzt die Mehrzahl der Poren eine sphärische Form, wodurch die Annahme eines isotropen, elastischen Materialverhaltens getroffen werden kann. (Czink et al., 2023) Daraus folgt, dass das in Kapitel 4.3.1 angenommene isotrope Materialverhalten in den drei Bereichen zur Ableitung initialer Designvorschläge valide ist und wird daher auch im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit genutzt.

Zusätzlich zum Materialverhalten wird mithilfe der Zugstäbe (siehe Tabelle 4.13) die Dehngrenze $R_{p0,2}$ anhand von Zugversuchen bestimmt, da die Dehngrenze ein Maß für eintretendes plastisches Verformen und somit beginnendes Versagen darstellt. Die Zugversuche zeigen, dass die Dehngrenze $R_{p0,2}$ im Bereich von 230 MPa streut, weshalb dieser Wert als globale erste Näherung angenommen wird. (Czink et al., 2023)

Zur Charakterisierung der elastischen, mechanischen Materialeigenschaften wird die in Kapitel 4.3.2.1 beschriebene RUS genutzt. Die sich daraus ergebenden elastischen Konstanten³⁰ C_{11} und C_{44} der drei porenbehafteten Bereiche für die Quader aus Tabelle 4.13 sind in Abbildung 4.42 zu sehen.

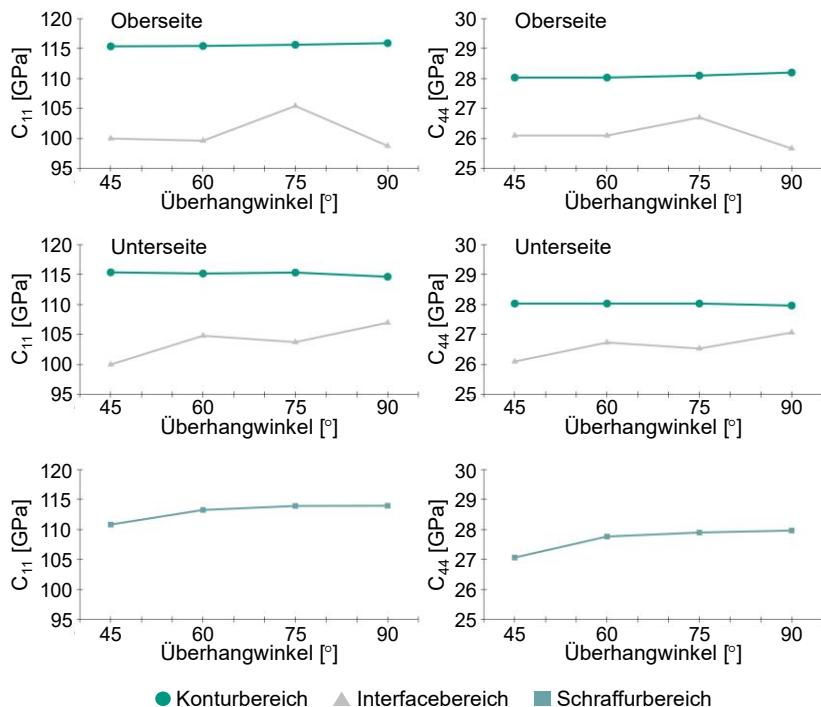


Abbildung 4.42: Elastische Konstanten C_{11} und C_{44} der drei porenbehafteten Bereiche für die Quader aus Tabelle 4.13 nach Czink et al. (2023)

Aus den elastischen Konstanten (siehe Abbildung 4.42) ergibt sich, dass zwischen den drei porenbehafteten Bereichen ein deutlicher Unterschied in Bezug auf deren Steifigkeit besteht. So weist der Konturbereich stets die höchste Steifigkeit auf, gefolgt vom Schraffur- und Interfacebereich. Verdeutlicht wird dies, wenn die Werte für

³⁰ Aufgrund des vorherrschenden isotropen mechanischen Materialverhaltens können nach Rösler, Harders & Bäker (2012) die 21 unabhängigen Elastizitätskonstanten des Steifigkeitstensors auf lediglich zwei (C_{11} und C_{44}) reduziert werden.

C_{11} beispielsweise für den Quader mit einem Überhangwinkel von 90° verglichen werden. Der Vergleich zeigt, dass der Kontur- gegenüber dem Schraffurbereich einen um 4,1 % höheren Wert für C_{11} aufweist. Wird der Interfacebereich zudem herangezogen, zeigt dieser einen Unterschied zum Konturbereich von 14,5 %. Dieses Verhältnis der Materialeigenschaften deckt sich mit den Erkenntnissen der Porenverteilung aus Abbildung 4.40 und stärkt demnach die Annahme, dass eine geringere Porosität verbesserte elastische, mechanische Materialeigenschaften hervorbringt. (Czink et al., 2023)

Mithilfe der in Abbildung 4.42 dargestellten Verläufe der elastischen Konstanten ist kein eindeutiger Einfluss der Überhangwinkel auf die resultierenden Werte für C_{11} und C_{44} festzustellen. Für die elastischen Konstanten an der Ober- und Unterseite im Kontur- und Interfacebereich sind ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Auftretende geringfügige Abweichungen resultieren aus prozessbedingten Unterschieden in der lokalen Porosität aufgrund thermisch bedingter Veränderung des Brechungswinkels der Linse in der SLM-Anlage oder Unregelmäßigkeiten in der Inertgaszuführung. Demnach lässt sich anhand von Abbildung 4.42 zusammenfassen, dass für die drei porenbehafteten Bereiche unabhängig vom Überhangwinkel stets die gleichen mittleren Materialeigenschaften herangezogen werden können. (Czink et al., 2023) Durch den Einsatz von Gleichung 4.4 und 4.5 können die elastischen Konstanten C_{11} und C_{44} für isotropes Materialverhalten in die sogenannten Ingenieurskonstanten, bestehend aus Querkontraktionszahl ν und E-Modul E , umgerechnet werden (Rösler, Harders & Bäker, 2012).

$$C_{11} = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad 4.4$$

$$C_{44} = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad 4.5$$

Durch diese Umrechnung anhand der mittleren Werte für C_{11} und C_{44} ergeben sich die Ingenieurskonstanten in Tabelle 4.14. Diese Ingenieurskonstanten werden im nachfolgenden Kapitel 4.3.2.3 zur Untersuchung weiterer Optimierungsfälle herangezogen.

Tabelle 4.14: Aus den elastischen Konstanten C_{11} und C_{44} berechnete Ingenieurskonstanten der drei porenbehafteten Bereiche für die Quader aus Tabelle 4.13

	Kontur	Interface	Schraffur
E-Modul [GPa]	75,0	65,5	72,5
Querkontraktion [-]	0,35	0,35	0,35

4.3.2.3 Evaluation der TopOpt-Methode unter Nutzung der Ergebnisse der experimentellen Charakterisierung

Aufbauend auf den Ergebnissen der Charakterisierung (siehe Kapitel 4.3.2.2) werden in diesem Kapitel 4.3.2.3 zwei weitere Optimierungsfälle ergänzend zu Kapitel 4.3.1 analysiert, um die entwickelte TopOpt-Methode weiter zu untersuchen und Schlüsse hinsichtlich deren Validität abzuleiten. Im Vergleich zu Kapitel 4.3.1 wird nun eine Filterung der Materialbereiche entlang der Aufbaurichtung (siehe Kapitel 4.2.1) vorgenommen, um die aus dem SLM resultierenden Materialeigenschaften näher abzubilden. Durch die Untersuchungen mit Filterung entlang der Aufbaurichtung wird einerseits geprüft, ob die in Kapitel 4.3.1 gewonnenen Erkenntnisse und daraus gezogenen Schlüsse ebenfalls übertragbar sind. Andererseits erfolgt die Ableitung von Designvorschlägen, die im SLM gefertigt und mithilfe von experimentellen Untersuchungen analysiert werden. Dadurch wird die Übertragbarkeit der mit Hilfe der Quader gewonnenen Erkenntnisse evaluiert.

Nachfolgend werden analog zu Kapitel 4.3.1.1 und 4.3.1.2 zunächst der Modellaufbau und die Optimierungsparameter vorgestellt. Anschließend erfolgt die qualitative und quantitative Analyse der abgeleiteten Designvorschläge aus der entwickelten TopOpt-Methode sowie einer standardisierten Topologieoptimierung. Darauf aufbauend werden sowohl der Einfluss einer minimalen Wandstärke als auch der Einfluss einer globalen Festigkeitsrestriktion auf die resultierenden Designvorschläge untersucht und die sich dadurch ergebenen Potentiale abgeleitet. Zudem werden experimentelle Untersuchungen anhand der abgeleiteten, gefertigten Designvorschläge durchgeführt, um Rückschlüsse auf die Porenverteilung sowie die damit verbundenen Materialeigenschaften zu ziehen.

Modellaufbau und Optimierungsparameter

Damit eine Vergleichbarkeit mit den zuvor erzeugten Ergebnissen in Kapitel 4.3.1 gewährleistet werden kann, wird für die Untersuchungen unter Nutzung der Ergebnisse der experimentellen Charakterisierung (siehe Kapitel 4.3.2.2) auch ein 3-

Punkt-Biegebalken als akademisches Leitbeispiel herangezogen (siehe Abbildung 4.43). Der Balken ist ebenfalls aus einer Fest-Los-Lagerung an den unteren Seitenkanten aufgebaut. Zusätzlich wird er mit einer Verschiebung d von 0,24 mm beaufschlagt, die mittig auf der Oberseite über die gesamte Tiefe des Balkens anliegt. (Czink et al., 2023)

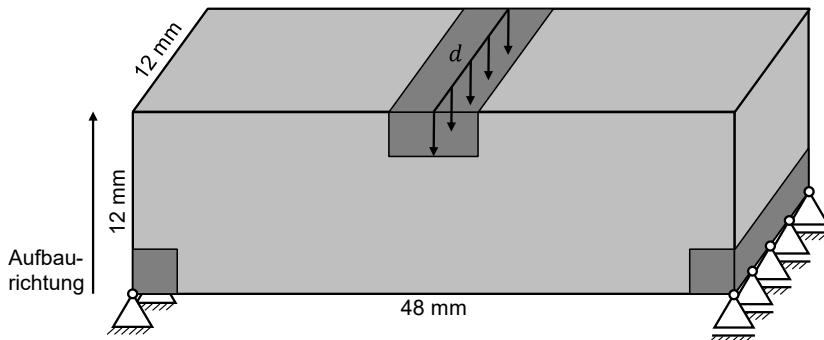


Abbildung 4.43: Modellaufbau zur Untersuchung von 3D-Optimierungen mit Filterung entlang der Aufbaurichtung nach Czink et al. (2023)

In Tabelle 4.15 sind die sich aus Kapitel 4.3.2.2 ergebenden Materialeigenschaften sowie Bereichsdicken zusammengefasst und werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels 4.3.2.3 eingesetzt. Die Materialeigenschaften werden, wie bereits zuvor als isotrop angenommen, wodurch sich diese Annahme mit den Erkenntnissen aus der Charakterisierung (siehe Kapitel 4.3.2.2) deckt. Darüber hinaus wird das Materialverhalten als ideal linear-elastisch modelliert.

Tabelle 4.15: Materialeigenschaften und Bereichsdicken für die dreidimensionalen Optimierungsfälle inklusive Filterung entlang der Aufbaurichtung nach Czink et al. (2023)

	Kontur	Interface	Schraffur
E-Modul [GPa]	75,0	65,5	72,5
Querkontraktion [-]	0,35	0,35	0,35
Dicke [mm]	0,4	0,1	-

Aus den Charakterisierungen des SLM (siehe Kapitel 4.3.2.2) geht hervor, dass die Dicken der drei porenbehafteten Bereiche (siehe Tabelle 4.15) recht gering ausfallen. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit, eine feinere Vernetzung zu wählen, um

den Kontur- und Interfacebereich mithilfe der FEM mit ausreichender Auflösung abzubilden. Um gleichzeitig einen Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Detailierungsgrad zu schaffen, wird der 3-Punkt-Biegebalken in seinen Grundabmessungen im Vergleich zu jenen aus Abbildung 4.30 verkleinert. Außerdem werden als FE Hexaeder mit linearer Ansatzfunktion eingesetzt, die im Vergleich zu Tetraedern bei gleichem Volumen eine geringere Anzahl an Elementen aufweisen, wodurch die in Abaqus auswertbare Anzahl an FE nicht überschritten wird. Die globale Elementkantenlänge wird mit 0,1 mm definiert. (Holoch et al., 2022)

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels 4.3.2.3 werden die Optimierungsfälle 3.1 und 3.2 analysiert. Für Optimierungsfall 3.1 liegt das Optimierungsziel in der Maximierung der Steifigkeit unter vorgegebener Volumenreduktion auf ein relatives Endvolumen von 60 %. Dieses vergrößerte relative Endvolumen im Vergleich zu den Untersuchungen in Kapitel 4.3.1.1 und 4.3.1.2 ist der in Optimierungsfall 3.2 ergänzten Restriktion einer minimalen Wandstärke geschuldet. Denn geringe relative Endvolumen wie beispielsweise 40 % können dazu führen, dass die minimale Wandstärke unter den definierten Last- und Randbedingungen nicht eingehalten werden. Zusätzlich zur minimalen Wandstärke wird Optimierungsfall 3.2 um eine globale Festigkeitsrestriktion erweitert. Für die Auswertung der globalen Festigkeitsrestriktion werden die dunkelgrauen Regionen im 3-Punkt-Biegebalken (siehe Abbildung 4.43) ausgeklammert. Dies lässt sich damit begründen, dass durch den gewählten Modellaufbau die maximal zulässige Spannung an den Krafteinleitungs- und Lagerungsstellen aufgrund der direkten Verschiebung von Knoten stets überschritten wird.

Für die folgenden quantitativen Auswertungen der jeweils in den Designvorschlägen vorliegenden Verzerrungsenergien wird auf das in Kapitel 4.3.1.1 beschriebene Vorgehen, bestehend aus Mapping und statischer FE-Analyse, zurückgegriffen. Um für eine quantitative Vergleichbarkeit der volumenspezifischen Verzerrungsenergie der Designvorschläge zu sorgen, werden die Zielvolumen der standardisierten Topologieoptimierung erneut einer geringfügigen Anpassung unterzogen (siehe Kapitel 4.3.1.1).

Qualitative und quantitative Analyse der abgeleiteten Designvorschläge für Optimierungsfall 3.1

Die Designvorschläge für Optimierungsfall 3.1 sind in Abbildung 4.44 (entwickelte TopOpt-Methode) und Abbildung 4.45 (standardisierte Topologieoptimierung) dargestellt. Durch deren qualitative Betrachtung ist festzuhalten, dass sowohl die standardisierte Topologieoptimierung als auch die entwickelte TopOpt-Methode eine Art Fachwerkstruktur, bestehend aus Streben entlang der Hauptlastpfade, ausbilden. Dies deckt sich mit den Beobachtungen aus Kapitel 4.3.1.1 und lässt sich weiterhin auf den Biegelastfall zurückführen. Neben der Gemeinsamkeit der Fachwerkstruktur

ergeben sich jedoch auch Unterschiede in den Designvorschlägen. So entstehen bei der standardisierten Topologieoptimierung breite Einkerbungen in den unteren Ecken und eine große Aussparung in der Mitte des Balkens (siehe durchgezogene Markierungen in Abbildung 4.45 links). Die entwickelte TopOpt-Methode bildet hingegen sowohl die Einkerbungen als auch die Aussparung deutlich geringer aus (siehe durchgezogene Markierungen in Abbildung 4.44 links). Es wird dafür, wie bereits in Kapitel 4.3.1.2 eine Art Hohlprofil erzeugt, was sich an der dünnen Außenhaut erkennen lässt (siehe durchgezogene Markierung in Abbildung 4.44 rechts). (Holoch et al., 2022)

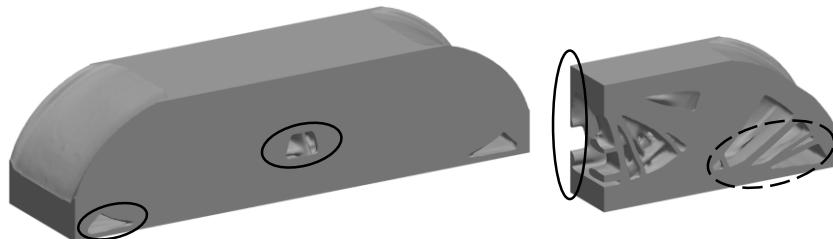


Abbildung 4.44: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.1: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)

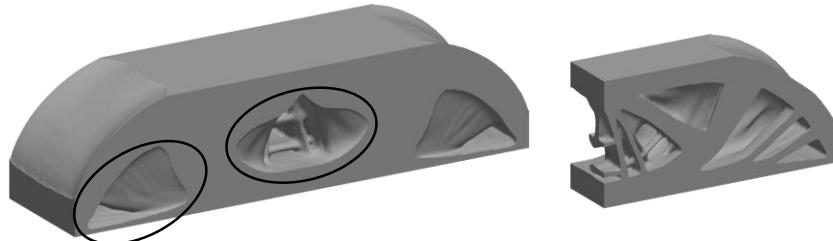


Abbildung 4.45: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 3.1: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)

In den Designvorschlägen (siehe Abbildung 4.44 und Abbildung 4.45) lässt sich des Weiteren ebenfalls erkennen, dass die entwickelte TopOpt-Methode zu einer vermehrten Ausbildung von dünnen Streben im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung neigt. Dies ist beispielsweise in der Ecke der Einspannung anhand der drei Streben zu erkennen (siehe gestrichelte Markierung in Abbildung 4.44 rechts). Daraus ergibt sich, dass auch bei deutlich geringeren Bereichsdicken als noch in Kapitel 4.3.1.2 die entwickelte TopOpt-Methode weiterhin die Oberfläche

des resultierenden Designs unter Berücksichtigung des Lastfalls vergrößert und somit den Konturbereich maximiert. (Holoch et al., 2022)

Die Vergrößerung des Konturbereichs wird zusätzlich durch die quantitative Auswertung der prozentual vorliegenden Anteile der porenbefestigten Bereiche in den Designvorschlägen gestützt (siehe Tabelle 4.16). So ist der Konturbereich durch die entwickelte TopOpt-Methode 6,8 % größer als beim Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung. Folglich resultiert daraus, dass die Erkenntnis bezüglich Maximierung des Konturbereichs aus Kapitel 4.3.1 auch für den hier vorliegenden Optimierungsfall 3.1 unter Filterung der drei porenbefestigten Bereiche entlang der Aufbaurichtung gilt.

Tabelle 4.16: Quantitative Auswertung der prozentual vorliegenden Anteile der drei porenbefestigten Bereiche in den abgeleiteten Designvorschlägen für Optimierungsfall 3.1

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Kontur [%]	37,7	30,9
Interface [%]	7,7	7,6
Schraffur [%]	54,6	61,5

Neben der quantitativen Auswertung der prozentualen Bereichsverteilungen liefert auch die statische FE-Analyse in Verbindung mit den daraus resultierenden Verzerrungsenergien ein Resultat analog zu den Untersuchungen aus Kapitel 4.3.1. Die Ergebnisse der statischen FE-Analyse und die Endvolumen der beiden Designvorschläge sind in Tabelle 4.17 enthalten. Daraus leitet sich eine um 0,26 % erhöhte volumenspezifische Verzerrungsenergie zugunsten der entwickelten TopOpt-Methode ab. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus Kapitel 4.3.1 fällt der Unterschied in den volumenspezifischen Verzerrungsenergien deutlich kleiner aus. Dies lässt sich jedoch auf die geringen Bereichsdicken sowie die verringerten Unterschiede in den Materialeigenschaften im Vergleich zu Kapitel 4.3.1.2 (siehe Tabelle 4.9) zurückführen. (Holoch et al., 2022) Bereits in den Untersuchungen im Zweidimensionalen (siehe Kapitel 4.3.1.1) wird gezeigt, dass geringere Bereichsdicken zu verringerter Steifigkeitszunahmen führen. Dies kann mithilfe von Optimierungsfall 3.1 verdeutlicht werden. Dennoch liefert die entwickelte TopOpt-Methode durch die iterative Anpassung der fiktiven Dichten einen steiferen Designvorschlag.

Tabelle 4.17: Quantitative Auswertung der resultierenden Verzerrungsenergie aus der statischen FE-Analyse der abgeleiteten Designvorschläge für Optimierungsfall 3.1

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Endvolumen [%]	65,83	65,69
Verzerrungsenergie [mJ]	350,25	348,60
Spez. Verzerrungsenergie [mJ/mm ³]	0,076974	0,076775

Um sicherzustellen, dass die Filterung der porenbehafteten Bereiche entlang der Aufbaurichtung keinen negativen Einfluss auf den Konvergenzverlauf hat, wird dieser Konvergenzverlauf analysiert (siehe Abbildung 4.46).

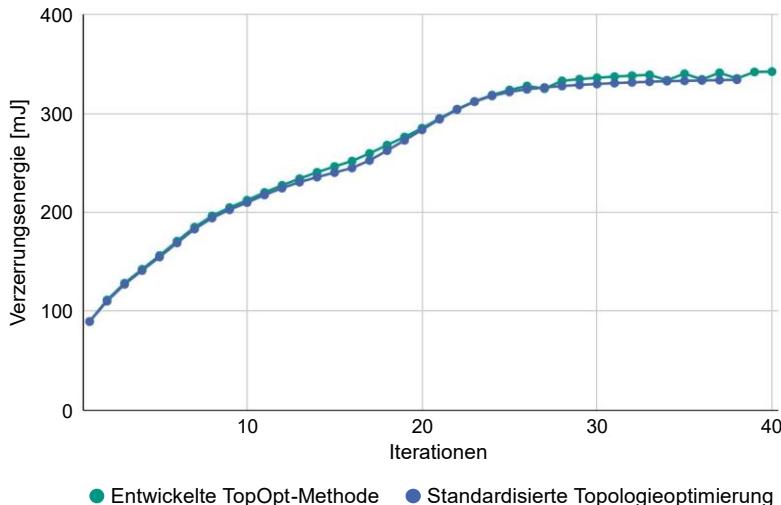


Abbildung 4.46: Konvergenzverläufe für Optimierungsfall 3.1

Aus den Konvergenzverläufen (siehe Abbildung 4.46) geht hervor, dass sich wie bereits in den vorherigen Untersuchungen im Zwei- und Dreidimensionalen (siehe Kapitel 4.3.1) weder Sprünge noch eine Divergenz einstellt. Sowohl die standardisierte Topologieoptimierung als auch die entwickelte TopOpt-Methode konvergieren

jeweils zielgerichtet gegen einen Verzerrungsenergiwert. Dabei weist jener der entwickelten TopOpt-Methode einen etwas erhöhten absoluten Wert auf. Dies ist auf den vergrößerten Anteil an Konturbereich zurückzuführen. Zusätzlich ist erkennbar, dass zur Ermittlung eines Optimums beide Topologieoptimierungen annähernd die gleiche Anzahl an Iterationen und damit einen ähnlichen Rechenaufwand benötigen. Auf Basis der Auswertungen der Verzerrungsenergien und des Konvergenzverlaufs kann die entwickelte TopOpt-Methode demnach auch mit Filterung entlang der Aufbaurichtung analog zu Kapitel 4.3.1 als zielführend und verifiziert eingestuft werden. (Holoch et al., 2022)

Da in diesem Kapitel erstmalig die Filterung der drei porenbefüllten Bereiche entlang der Aufbaurichtung Berücksichtigung findet, wird diese nachfolgend anhand des abgeleiteten Designvorschlags analysiert. Hierzu wird ein Schnitt durch die Mitte (Hälfte der Gesamthöhe) des Balkens herangezogen (siehe Abbildung 4.47).

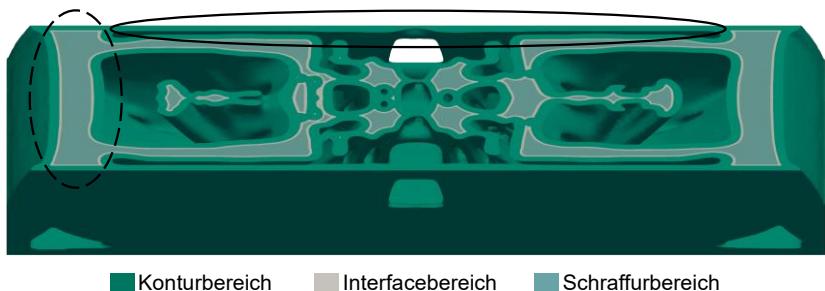


Abbildung 4.47: Schnitt durch den resultierenden Designvorschlag inklusive der drei porenbefüllten Bereiche aus der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.1 nach Holoch et al. (2022)

Die Schnittdarstellung (siehe Abbildung 4.47) zeigt, dass die Erzeugung der Offsets inklusive Definition der Materialbereiche (siehe Kapitel 4.2.1) wie vorgesehen durchgeführt wird und keine Überschneidungen zwischen den Bereichen auftreten. In den dickeren Streben und Regionen des Balkens (siehe gestrichelte Markierung in Abbildung 4.47) wird die Materialverteilung, wie sie sich aus der Porenverteilung im SLM ergibt (siehe Kapitel 4.3.2.2), ersichtlich. Jedoch fällt auf, dass vor allem in dünneren Regionen nicht alle drei porenbefüllten Bereiche vertreten sind. So ist beispielsweise im Hohlprofil (siehe durchgezogene Markierung in Abbildung 4.47) ausschließlich Konturbereich vorzufinden. Dies ist erneut auf das Verhalten des Optimierungsalgorithmus zur Maximierung des besten Materialbereichs (Konturbereich) zurückzuführen. Aus rein steifigkeitsorientierter Sicht ist dieses Verhalten plausibel, zielführend und ergebnisorientiert. (Holoch et al., 2022)

Wird jedoch die Fertigung dieser sehr dünnen Bereiche mit in die Bewertung des Ergebnisses einbezogen, lässt sich die Annahme ableiten, dass derartig filigrane Strukturen nur bedingt fertigbar sind. Um diese Annahme zu untersuchen, wird der Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.1 gefertigt. Für diese Fertigung kommen dieselben Randbedingungen (z. B. SLM-Anlage und Material) sowie Parameter (z. B. Scanstrategie) wie bereits bei den Quadern und Zugstäben zum Einsatz (siehe Kapitel 4.3.2.1). Der gefertigte Designvorschlag ist in Abbildung 4.48 dargestellt.



Abbildung 4.48: SLM-gefertigter Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.1 nach Czink et al. (2023)

Aus der äußerlichen Betrachtung des Designvorschlags aus Abbildung 4.48 lässt sich vermuten, dass dieser ohne größere Einschränkungen im SLM gefertigt werden kann. Um diese Vermutung und die Annahme hinsichtlich fertigungsbedingter Einschränkungen in Bezug auf filigrane Strukturen zu untersuchen, wird der Designvorschlag mithilfe einer µCT-Aufnahme analysiert. Abbildung 4.49 zeigt diese µCT-Aufnahme in derselben Schnittdarstellung wie Abbildung 4.47.

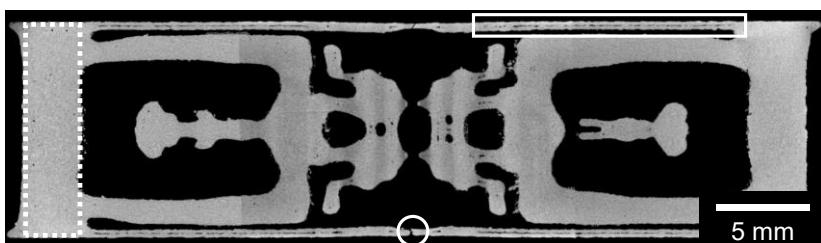


Abbildung 4.49: µCT-Aufnahme durch den resultierenden Designvorschlag aus der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.1 nach Czink et al. (2023)

Aus Abbildung 4.49 geht hervor, dass der abgeleitete Designvorschlag im SLM erzeugt werden kann und eine hohe Detailtreue aufweist. Besonders letzteres unterstreicht die in Kapitel 2.3.2 getroffene Aussage, dass sich das SLM zur direkten Fertigung endkonturnaher komplexer Geometrien eignet, wie sie beispielsweise in einer Topologieoptimierung entstehen. Werden jedoch die filigranen Strukturen betrachtet, fallen die darin auftretenden Fehlstellen auf. So ist beispielsweise das einhüllende Hohlprofil in der Mitte des Balkens (siehe kreisförmige Markierung in Abbildung 4.49) nicht durchgängig verbunden, sondern weist eine Lücke auf. In den äußeren Regionen (siehe rechteckige, durchgezogene Markierung in Abbildung 4.49) wird der Konturbereich nicht korrekt aufgeschmolzen, wodurch ein dünner Spalt entsteht. Somit kann die Annahme hinsichtlich bedingter Fertigbarkeit von filigranen Strukturen, die rein aus Konturbereich bestehen, bestätigt werden. Aus diesem Grund gilt es, diese filigranen Strukturen zu vermeiden, um die Fertigbarkeit der abgeleiteten Designvorschläge zu gewährleisten. (Czink et al., 2023)

Eine Möglichkeit hierfür stellt die Einführung einer minimalen Wandstärke bei der Ableitung initialer Designvorschläge dar (Diegel et al., 2019). Infolgedessen wird die entwickelte TopOpt-Methode durch eine derartige minimale Wandstärke erweitert. Dadurch werden einerseits diese filigranen Strukturen verhindert und andererseits stets alle drei porenbehafteten Bereiche, wie sie sich in real gefertigten Bauteilen einstellen, in allen Regionen des abgeleiteten Designvorschlags ausgebildet. Der quantitative Wert dieser minimalen Wandstärke ergibt sich aus den einzelnen Dicken der Materialbereiche, da in einer geschlossenen Struktur je konsolidierter Schicht stets zweimal der Konturbereich, zweimal der Interfacebereich sowie ein geringer Anteil an Schraffurbereich auftritt (siehe Abbildung 4.3). (Holoch et al., 2022) Daraus ergibt sich auf Grundlage von Tabelle 4.15 eine Mindestdicke größer als 1 mm, die im Rahmen von Optimierungsfall 3.2 miteinbezogen wird.

In der Publikation Holoch et al. (2021) wird der Einsatz einer solchen minimalen Wandstärke im Kontext der entwickelten TopOpt-Methode untersucht. Daraus ergibt sich, dass unter Einbeziehung der minimalen Wandstärke die gleichen Erkenntnisse wie in Kapitel 4.3.1 entstehen. So wird der Konturbereich möglichst maximiert, allerdings ohne die minimale Wandstärke zu unterschreiten. Dadurch erzeugt die entwickelte TopOpt-Methode auch unter Nutzung einer minimalen Wandstärke einen Designvorschlag mit erhöhter Steifigkeit im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung. Für einen tiefergehenden Einblick in die Ergebnisse wird an dieser Stelle auf die Publikation Holoch et al. (2021) verwiesen.

Neben der reinen Optimierung hinsichtlich Steifigkeit gilt es bei der Ableitung eines initialen Designvorschlags auch die vorherrschenden Spannungen auszuwerten. Um eine solche Auswertung durchzuführen, können die Ergebnisse der statischen

FE-Analyse, die analog zum Vorgehen aus Kapitel 4.3.1 durchgeführt wird, herangezogen werden (siehe Abbildung 4.50 und Abbildung 4.51).

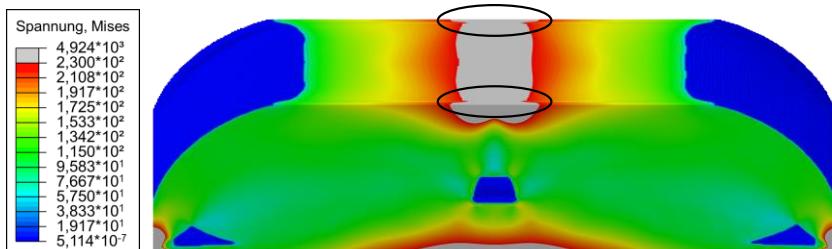


Abbildung 4.50: Spannungsverteilung im resultierenden Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.1

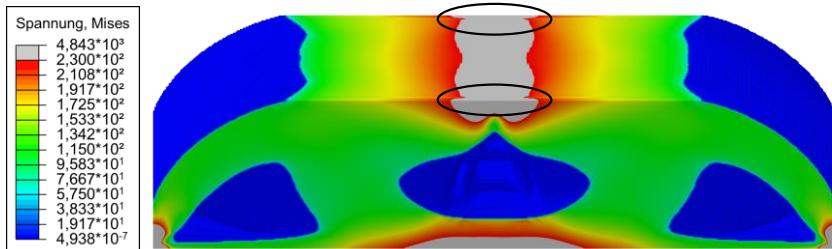


Abbildung 4.51: Spannungsverteilung im resultierenden Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 3.1

Als kritische Spannung wird in Abbildung 4.50 und Abbildung 4.51 ein Wert von 230 MPa definiert, da diese beim verwendeten Material als Dehngrenze $R_{p0,2}$ (siehe Kapitel 4.3.2.2) und somit als Grenze elastischer Verformung angenommen werden kann. Sämtliche FE, die diesen Spannungswert überschreiten, sind in Abbildung 4.50 und Abbildung 4.51 grau eingefärbt. Dadurch wird ersichtlich, dass vor allem die Krafteinleitungsstelle sowie die Einspannungen für die Fest-Los-Lagerung den Wert von 230 MPa übersteigen. Diese Überschreitung ist, wie eingangs in diesem Kapitel 4.3.2.3 beschrieben, auf die direkte Verschiebung der Knoten im FE-Modell zurückzuführen. Des Weiteren wird der kritische Spannungswert in den FE an der Unterseite der beiden 3-Punkt-Biegebalken, an der aufgrund der Biegebelastung eine hohe Zugbeanspruchung vorliegt, überschritten. Dies folgt vor allem aus der Belastung selbst und ist vorwiegend der gewählten Verschiebung geschuldet.

In Abbildung 4.50 und Abbildung 4.51 ist anhand der vorliegenden Spannungen in den beiden Balken außerdem zu erkennen, dass sich aufgrund der drei porenbefüllten Bereiche, deren E-Moduln unterschiedlich hoch sind, ein sprunghafter Spannungsverlauf über die Bereiche hinweg einstellt (siehe schwarze Markierungen in Abbildung 4.50 und Abbildung 4.51). Dabei weist der Konturbereich die höchste und der Interfacebereich die geringste Spannung auf. Dies korreliert mit den E-Moduln, denn ein höherer E-Modul verursacht bei gleicher Belastung eine höhere Spannung. Wird nun die Grenze von 230 MPa angesetzt, kann es bei einer standardisierten Topologieoptimierung, bei der die drei porenbefüllten Bereiche nicht berücksichtigt werden, vorkommen, dass diese Grenze nicht überschritten wird. Werden jedoch anschließend die drei porenbefüllten Bereiche aus dem SLM auf das Design übertragen und in einer statischen FE-Analyse ausgewertet, kann aufgrund des höheren E-Moduls im Konturbereich die Versagensgrenze von 230 MPa überschritten werden. Daraus resultiert die Annahme, dass diese Versagensgrenze bereits direkt in der entwickelten TopOpt-Methode berücksichtigt werden sollte. Dies kann beispielsweise durch die Einführung einer Festigkeitsrestriktion erfolgen und wird in Optimierungsfall 3.2 untersucht.

Qualitative und quantitative Analyse der abgeleiteten Designvorschläge für Optimierungsfall 3.2

Nachfolgend wird Optimierungsfall 3.1 um die beschriebene minimale Wandstärke und Festigkeitsrestriktion erweitert, woraus sich Optimierungsfall 3.2 ergibt. Für die Umsetzung der Erweiterung werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die bereits in Tosca implementierten Ansätze herangezogen, die der Onlinedokumentation³¹ von Dassault Systèmes entnommen werden können. Neben der entwickelten TopOpt-Methode wird die standardisierte Topologieoptimierung ebenfalls erweitert, um die resultierenden Designvorschläge vergleichbar zu machen. Als minimale Wandstärke, die sich aus den einzelnen Dicken der Materialbereiche ergibt, wird 1 mm definiert und die maximal zulässige Spannung der Festigkeitsrestriktion beträgt 230 MPa. Die Last- und Randbedingungen sowie alle weiteren Optimierungsparameter bleiben unverändert, um den Einfluss der beiden Erweiterungen auf die Designvorschläge zu analysieren. (Czink et al., 2023)

Die sich ergebenden Designvorschläge sind in Abbildung 4.52 (entwickelte TopOpt-Methode) und Abbildung 4.53 (standardisierte Topologieoptimierung) dargestellt.

³¹ <https://help.3ds.com/HelpProductsDS.aspx> (abgerufen am 23.04.2023)

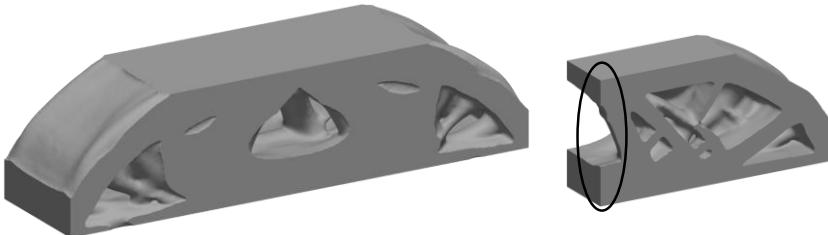


Abbildung 4.52: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.2: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)

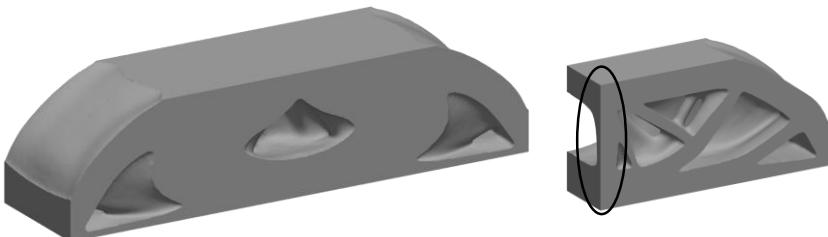


Abbildung 4.53: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 3.2: Vollansicht (links) und Schnittdarstellung (rechts)

Werden die Designvorschläge aus Abbildung 4.52 und Abbildung 4.53 ebenfalls qualitativ betrachtet, folgt unter Anwendung der Restriktionen einer minimalen Wandstärke sowie maximal zulässigen Spannung eine Art Fachwerkstruktur. Dies ist weiterhin dem gewählten 3-Punkt-Biegelastfall geschuldet. Auffällig ist jedoch, dass das dünne Hohlprofil beim Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode im Vergleich zu Optimierungsfall 3.1 nicht mehr vorhanden ist. Der Grund hierfür ist die Restriktion der minimalen Wandstärke, die derart dünne Strukturen verhindert. In Bezug auf die Ausbildung von Streben unterscheiden sich die Designvorschläge aus Optimierungsfall 3.2 deutlicher als noch jene für Optimierungsfall 3.1. Dies wird daran ersichtlich, dass sich die Streben in den beiden 3-Punkt-Biegebalken stärker in ihrer Position, Anordnung und Dicke unterscheiden. So weist beispielsweise der Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung (siehe Abbildung 4.53) in der Mittelebene vorwiegend dicke Streben auf. Des Weiteren entsteht eine durchgängige, senkrecht zur Krafteinleitung positionierte Strebe in der Mitte des Balkens und spiegelt eine Art Doppel-T-Träger wider (siehe schwarze Markierung in Abbildung 4.53 rechts). Im Vergleich hierzu bilden sich beim Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode (siehe Abbildung 4.52) erneut (im zulässigen Bereich von 1 mm) eher dünnere Streben sowie eine Aussparung (siehe schwarze Markierung

in Abbildung 4.52 rechts) in der Mitte des Balkens aus. Diese qualitativen Unterschiede weisen darauf hin, dass durch die iterative Berücksichtigung der drei porenbefahnten Bereiche in der entwickelten TopOpt-Methode in Kombination mit den beiden Restriktionen stärker varierende Designvorschläge im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung generiert werden. (Czink et al., 2023)

Wird auch für Optimierungsfall 3.2 die quantitative Auswertung der prozentual vorliegenden Anteile der drei porenbefahnten Bereiche der Designvorschläge herangezogen, ergibt sich Tabelle 4.18.

Tabelle 4.18: Quantitative Auswertung der prozentual vorliegenden Anteile der drei porenbefahnten Bereiche in den abgeleiteten Designvorschlägen für Optimierungsfall 3.2

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Kontur [%]	21,5	22,0
Interface [%]	4,9	5,1
Schraffur [%]	73,6	72,9

Aus Tabelle 4.18 geht hervor, dass die Werte für die Bereichsanteile der beiden Designvorschläge nahe beieinander liegen, trotz deren deutlichen qualitativen Unterschiede (siehe Abbildung 4.52 und Abbildung 4.53). So unterscheiden sich die Bereichsanteile im Vergleich zu Optimierungsfall 3.1 stets weniger als ein Prozent. Außerdem weist der Konturbereich des Designvorschlags der entwickelten TopOpt-Methode im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen im Zwei- und Dreidimensionalen (siehe Kapitel 4.3.1) erstmals einen geringeren prozentualen Anteil als jener Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung auf. Dies ist auf die Kombination aus Festigkeitsrestriktion und minimaler Wandstärke im vorliegenden Optimierungsfall 3.2 zurückzuführen. So sorgt die Festigkeitsrestriktion dafür, dass Bereiche, welche die maximal zulässige Spannung überschreiten, reduziert werden. Da aufgrund des erhöhten E-Moduls im Konturbereich vorwiegend höhere Spannungen auftreten (siehe Abbildung 4.50 und Abbildung 4.51) wird dieser im Vergleich zum Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung etwas reduziert. Darüber hinaus sorgt die minimale Wandstärke dafür, dass sich keine Streben ausbilden können, die ausschließlich aus Konturbereich bestehen. Dadurch wird einerseits der prozentuale Anteil des Konturbereichs reduziert und andererseits verhindert, dass filigrane Strukturen entstehen. Dies ist anhand der

Schnittdarstellung des Designvorschlags der entwickelten TopOpt-Methode in Abbildung 4.54 zu erkennen.

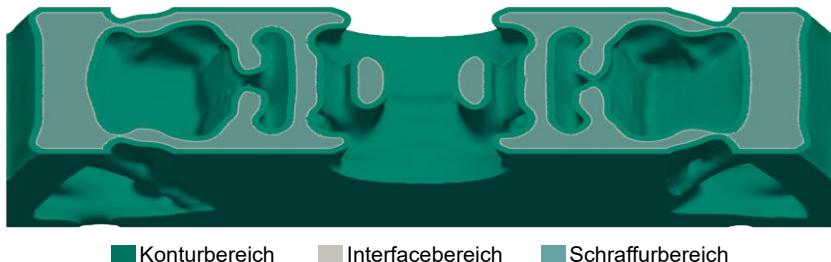


Abbildung 4.54: Schnitt durch den resultierenden Designvorschlag aus der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.2

Um wie bereits bei Optimierungsfall 3.1 die Fertigbarkeit zu untersuchen, wird der abgeleitete Designvorschlag für Optimierungsfall 3.2 ebenfalls im SLM gefertigt. Als Randbedingungen und Parameter werden erneut dieselben wie bereits bei den Quadern und Zugstäben genutzt (siehe Kapitel 4.3.2.1). Der gefertigte Designvorschlag für Optimierungsfall 3.2 ist in Abbildung 4.55 dargestellt.



Abbildung 4.55: SLM-gefertigter Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.2 nach Czink et al. (2023)

Auch für Optimierungsfall 3.2 lässt sich anhand der äußerlichen Betrachtung des Designvorschlags aus Abbildung 4.55 vermuten, dass dieser ohne größere Einschränkungen im SLM gefertigt werden kann. Um analog zu Optimierungsfall 3.1 diese Vermutung zu untersuchen und zu überprüfen, ob die minimale Wandstärke für fertigbare Strukturen sorgt, wird analog zu Abbildung 4.49 eine µCT-Aufnahme des Designvorschlags für Optimierungsfall 3.2 angefertigt (siehe Abbildung 4.56).

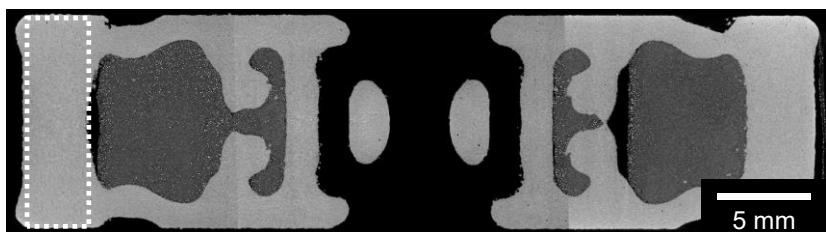


Abbildung 4.56: μ CT-Aufnahme durch den resultierenden Designvorschlag aus der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.2 nach Czink et al. (2023)

Abbildung 4.56 zeigt, dass keinerlei filigrane Strukturen oder etwaige Fehlstellen im gefertigten Designvorschlag für Optimierungsfall 3.2 auftreten. Dadurch kann die Fertigbarkeit des abgeleiteten Designvorschlags als bestätigt angesehen werden. Folglich ist die in Kapitel 4.1.2 definierte Anforderung an die entwickelte TopOpt-Methode hinsichtlich der automatisierten Ableitung von Designvorschlägen, die direkt im SLM fertigbar sind, erfüllt.

Um neben der Fertigbarkeit auch die resultierenden Steifigkeiten der abgeleiteten Designvorschläge unter Nutzung einer minimalen Wandstärke sowie Festigkeitsrestriktion zu bewerten, kommt erneut die statische FE-Analyse zum Einsatz. Die aus den FE-Analysen resultierenden Verzerrungsenergien sowie Endvolumen der Designvorschläge sind in Tabelle 4.19 aufgeführt.

Tabelle 4.19: Quantitative Auswertung der resultierenden Verzerrungsenergie aus der statischen FE-Analyse der abgeleiteten Designvorschläge für Optimierungsfall 3.2

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Endvolumen [%]	68,66	68,07
Verzerrungsenergie [mJ]	360,12	365,13
Spez. Verzerrungsenergie [mJ/mm ³]	0,075882	0,077606

Anhand von Tabelle 4.19 kann die volumenspezifische Verzerrungsenergie berechnet werden, die im vorliegenden Optimierungsfall 3.2 mit einem um 2,22 % erhöhten Wert zugunsten der standardisierten Topologieoptimierung ausfällt. Dies erscheint

zunächst widersprüchlich zu den Erkenntnissen aus Kapitel 4.3.1 und Optimierungsfall 3.1. Werden jedoch die vorherrschenden Spannungen in den Designvorschlägen berücksichtigt, ist zu erkennen, dass die Abnahme an volumenspezifischer Verzerrungsenergie und somit Steifigkeit aufgrund einer verbesserten Spannungsverteilung entsteht. Dies ist an den Gebieten zu erkennen, welche die maximal zulässige Spannung von 230 MPa überschreiten (siehe graue Bereiche in Abbildung 4.57 und Abbildung 4.58). Hier gilt, wie bereits bei Optimierungsfall 3.1, dass die Regionen der Krafteinleitung und Lagerung die maximal zulässige Spannung aufgrund des Modellaufbaus überschreiten. Werden die Regionen auf der Unterseite der beiden abgeleiteten Designvorschläge analysiert, lassen sich deutliche Unterschiede festhalten. Beide Designvorschläge überschreiten zwar die maximal zulässige Spannung in dieser Region, allerdings fällt das Gebiet der Spannungsüberschreitung beim abgeleiteten Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode wesentlich geringer aus. So überschreiten lediglich zwei kleine Gebiete (siehe schwarze Markierung in Abbildung 4.57) die maximal zulässige Spannung. Im direkten Vergleich fällt das Gebiet für den Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung deutlich größer aus und weist eine durchgängige Fläche auf (siehe schwarze Markierung in Abbildung 4.58). Diese Erkenntnis kann durch die Betrachtung der absoluten Spannungswerte in den Gebieten (siehe schwarze Markierungen in Abbildung 4.57 und Abbildung 4.58) unterstützt werden. So überschreitet der Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode den zulässigen Spannungswert von 230 MPa um bis zu maximal 7 MPa. Der Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung liegt in diesem Vergleich mit einer Überschreitung von bis zu 14 MPa deutlich darüber. (Czink et al., 2023)

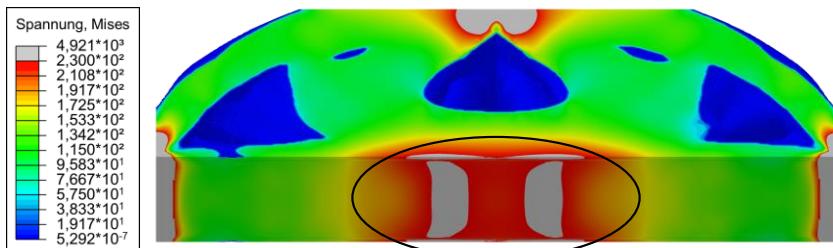


Abbildung 4.57: Spannungsverteilung im resultierenden Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.2

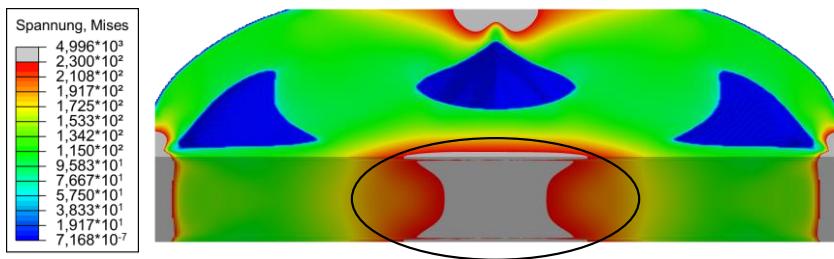


Abbildung 4.58: Spannungsverteilung im resultierenden Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung für Optimierungsfall 3.2

Werden die globalen Spannungsverteilungen als Summe über alle FE betrachtet, ist festzuhalten, dass die mittlere Spannung im Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode auf einem ca. 3 % niedrigeren Niveau liegt. Daraus folgt der Schluss, dass durch die iterative Berücksichtigung der drei porosenbehafteten Bereiche das verfügbare Material derart umverteilt wird, dass die maximal zulässigen Spannungen besser eingehalten werden können. Gleichzeitig entsteht ein insgesamt niedrigeres, homogeneres Spannungsniveau. (Czink et al., 2023) Dieser Schluss kann auf der Grundlage einer 2D-Studie von Holoch, Lenhardt & Albers (2022b) bestätigt werden, deren Ergebnisse in Kapitel 4.3.3 vorgestellt werden.

Um sicherzustellen, dass die Designvorschläge für Optimierungsfall 3.2 ebenfalls einer vollständig konvergierten Optimierung entstammen, sind in Abbildung 4.59 die Konvergenzverläufe der beiden Optimierungen dargestellt. Daraus geht hervor, dass sowohl die standardisierte Topologieoptimierung als auch entwickelte TopOpt-Methode gegen einen Verzerrungsenergiewert konvergieren. Im Vergleich zu Optimierungsfall 3.1 fällt jedoch auf, dass beide Optimierungen Schwankungen in der Verzerrungsenergie über den Verlauf der Optimierung hinweg aufweisen. Diese Schwankungen sind auf die zusätzlichen Restriktionen zurückzuführen. So bilden sich über die Iterationen der Optimierungen dünne Streben aus, welche die Restriktionen (maximal zulässige Spannung und minimale Wandstärke) nicht erfüllen. Da-her werden diese Streben kontinuierlich entfernt, wodurch das Volumen und damit einhergehend die Verzerrungsenergie abnimmt. In den darauffolgenden Iterationen wird das dadurch eingesparte und nun verfügbare Volumen gezielt im Balken neu verteilt, wodurch die Verzerrungsenergie ansteigt. Dies führt zu den ersichtlichen Schwankungen, die bei der entwickelten TopOpt-Methode stärker ausfallen. Aufgrund dieser stärkeren Schwankungen benötigt die entwickelte TopOpt-Methode eine erhöhte Anzahl an Iterationen, um das Konvergenzkriterium zu erreichen. So-mit scheint die iterative Anpassung der fiktiven Dichten einen Einfluss auf diese Schwankungen zu besitzen, den es zukünftig in weiterführenden Arbeiten näher zu

untersuchen gilt. Da jedoch auch die entwickelte TopOpt-Methode in ihren letzten Iterationen zielgerichtet auf ein Optimum zuläuft, kann der Designvorschlag als vollständig konvergiert angesehen werden.

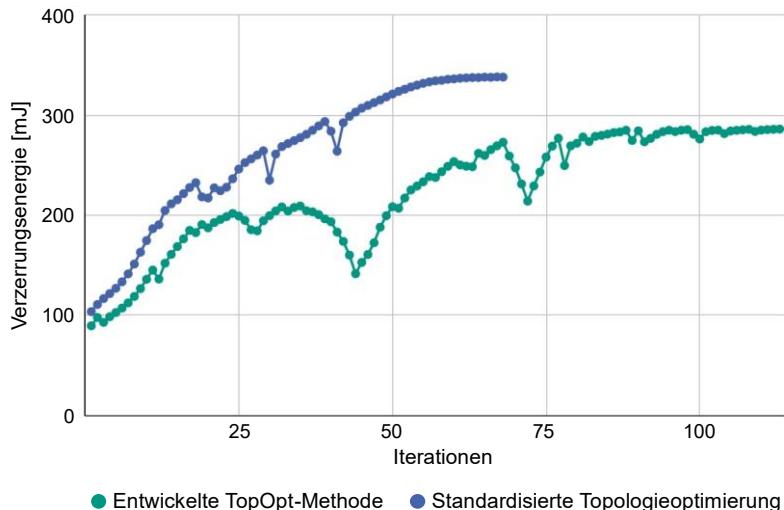


Abbildung 4.59: Konvergenzverläufe für Optimierungsfall 3.2

Experimentelle Untersuchungen der abgeleiteten Designvorschläge aus der entwickelten TopOpt-Methode für Optimierungsfall 3.1 und 3.2

Neben den Quadern und Zugstäben (siehe Kapitel 4.3.2.2) gilt es auch die abgeleiteten Designvorschläge der entwickelten TopOpt-Methode für die Optimierungsfälle 3.1 und 3.2 werkstofflich zu untersuchen, um Rückschlüsse auf die Porenverteilung und die damit verbundenen Materialeigenschaften zu ziehen. Hierzu werden die gefertigten Designvorschläge (siehe Abbildung 4.48 und Abbildung 4.55) der zwei Optimierungsfälle 3.1 und 3.2 inklusive deren µCT-Aufnahmen (siehe Abbildung 4.49 und Abbildung 4.56) herangezogen.

Die qualitative Betrachtung der µCT-Aufnahmen in Abbildung 4.49 und Abbildung 4.56 zeigt, dass die Porosität in den gefertigten Designvorschlägen im Vergleich zu den Quadern geringer ausgeprägt ist. Dies könnte auf unterschiedliche Scanzeiten des Lasers, in denen das Aluminiumpulver in einer Schicht aufgeschmolzen wird, zwischen den Quadern und den geometrisch deutlich größeren Designvorschlägen zurückzuführen sein. Bei längeren Scanzeiten kann sich die Temperatur in den optischen Linsen des Lasersystems in der SLM-Anlage ändern.

Durch diese Änderung werden thermische Ausdehnungen oder temperaturabhängige Veränderungen des Brechungsindexes der optischen Linsen begünstigt, wodurch eine Verschiebung der Fokusebene des Laserstrahls entsteht. Dieser Effekt führt zu einer Vergrößerung des Laserspots mit zunehmender Belichtungszeit und kann folglich zu einer veränderten Porenausbildung führen. (Czink et al., 2023)

Um die veränderte Porenausbildung bewerten zu können, wird die Porenverteilung über die horizontale Dicke analog zu Abbildung 4.40 für exemplarische Regionen in den beiden Designvorschlägen bestimmt. Diese Regionen sind beispielsweise anhand der weißen, gestrichelten Markierungen in Abbildung 4.49 und Abbildung 4.56 zu sehen. Die sich daraus ergebende Porenverteilung ist nachfolgend in Abbildung 4.60 dargestellt.

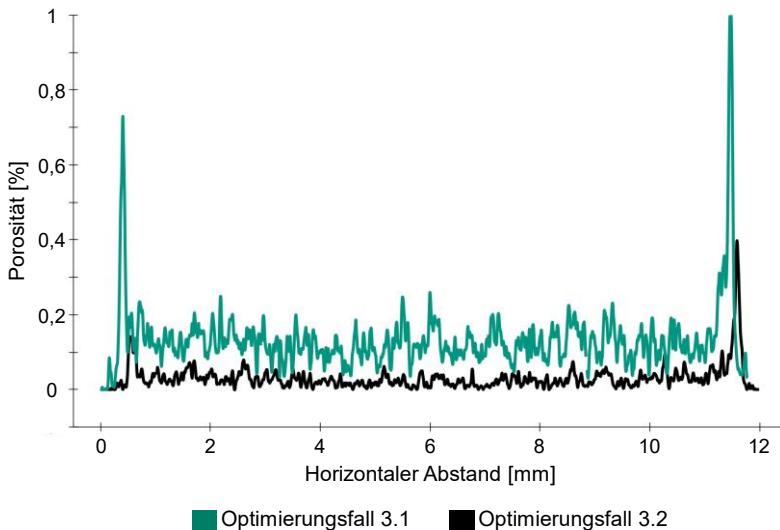


Abbildung 4.60: Porenverteilung über die horizontale Dicke der exemplarischen Regionen aus Abbildung 4.49 und Abbildung 4.56 nach Czink et al. (2023)

Abbildung 4.60 zeigt, dass sich analog zu den Quadern (siehe Abbildung 4.40) für die gefertigten Designvorschläge der entwickelten TopOpt-Methode ebenfalls zwei signifikante Ausschläge in der Porosität über der horizontalen Dicke einstellen. Die Ausschläge definieren erneut den entstehenden Interfacebereich, der den Kontur vom Schraffurbereich trennt. Folglich treten auch bei den beiden abgeleiteten Designvorschlägen der Optimierungsfälle 3.1 und 3.2 drei Bereiche unterschiedlicher

Porosität auf, auch wenn deren absoluter Porositätswert im Vergleich zu Abbildung 4.40 niedriger ausfällt. Diese niedrigeren absoluten Porositätswerte führen vermutlich ebenfalls zu etwas geringeren Unterschieden in den Materialeigenschaften der drei porenbehafteten Bereiche. Diese Vermutung kann zum aktuellen Stand der Arbeit jedoch nicht quantitativ gestützt werden, da die hierfür notwendigen Charakterisierungsumfänge mithilfe der RUS anhand der Designvorschläge nicht möglich sind. Dies ist auf die Notwendigkeit einfacher Geometrien (z. B. Quader) zur Charakterisierung mithilfe der RUS zurückzuführen (siehe Kapitel 4.3.2.1). Nichtsdestotrotz weist weiterhin der Konturbereich die besten und der Interfacebereich die geringsten Materialeigenschaften auf und deckt sich folglich mit den in der entwickelten TopOpt-Methode getroffenen Annahmen. (Czink et al., 2023)

Zur Überprüfung der weiteren getroffenen Annahmen in der entwickelten TopOpt-Methode werden die Bereichsdicken sowie die Porenmorphologie analysiert. Die Dicke des Konturbereichs ergibt sich dabei im Mittel für die beiden Designvorschläge mit einem Wert von 0,42 mm, wodurch die getroffene Annahme einer Modellierung des Konturbereichs mit 0,4 mm als sinnvoll angesehen wird. Für die Dicke des Interfacebereichs ergibt sich im Mittel ein Wert von 0,106 mm, wodurch die Modellierungsannahme von 0,1 mm ebenfalls als zielführend eingestuft wird. Die Analyse der Porenmorphologie zeigt, dass in den beiden Designvorschlägen, wie bereits bei den Quadern, vorwiegend Poren mit einer hohen Sphärität vorliegen. Dadurch kann auch die Annahme hinsichtlich des isotropen Materialverhaltens bestätigt werden. (Czink et al., 2023)

4.3.2.4 Fazit

Anhand der vorgestellten Ergebnisse kann zusammengefasst werden, dass sich für Optimierungsfall 3.1 die gleichen Erkenntnisse und Schlüsse wie bereits in Kapitel 4.3.1 ergeben. So wird auch unter Filterung der drei porenbehafteten Bereiche entlang der Aufbaurichtung der Konturbereich bei einer Optimierung rein auf Steifigkeit maximiert. Dadurch weist der abgeleitete Designvorschlag im Vergleich zu einer standardisierten Topologieoptimierung eine erhöhte volumenspezifische Verzerrungsenergie auf. Gleichzeitig bilden sich jedoch filigrane, nur bedingt fertigbare Strukturen aus, die mithilfe der Restriktion einer minimalen Wandstärke verhindert werden können. Um auch die in realen Anwendungsfällen entscheidende maximal zulässige Spannung als Versagensgrenze bei der Ableitung initialer Designvorschläge zu berücksichtigen, kommt eine Festigkeitsrestriktion zum Einsatz. Diese Festigkeitsrestriktion führt einerseits in der entwickelten TopOpt-Methode zu geringeren Steifigkeiten, andererseits ermöglicht sie die zulässigen Spannungen durch die zielgerichtete Umverteilung der entstehenden Materialbereiche besser einzuhalten. Gleichzeitig sorgt diese Umverteilung aufgrund der Festigkeitsrestriktion für ein global niedrigeres Spannungsniveau im Designvorschlag der entwickelten TopOpt-

Methode. Daraus resultiert, dass die iterative Anpassung der fiktiven Dichten eine Möglichkeit darstellt, die unterschiedlichen Materialbereiche gewinnbringend bei der Ableitung steifigkeitsoptimierter Designvorschläge einzusetzen.

Darüber hinaus lässt sich festhalten, dass die in der entwickelten TopOpt-Methode getroffenen Modellierungsannahmen mithilfe der experimentellen Untersuchungen gestützt werden können. So entstehen durch die Fertigung mittels SLM unabhängig vom Bauteil stets die drei porenbefüllten Bereiche entlang der Aufbaurichtung, wie sie von der entwickelten TopOpt-Methode iterativ berücksichtigt werden (siehe Kapitel 4.2). Des Weiteren weisen die drei porenbefüllten Bereiche jeweils isotropes Materialverhalten auf, wodurch die Nutzung der in Abaqus implementierten isotropen Materialmodelle (siehe Kapitel 4.3.1) valide ist. Die experimentelle Charakterisierung zeigt, dass der Konturbereich immerzu die besten und der Interfacebereich die geringsten Materialeigenschaften besitzt. Der Schraffurbereich reiht sich stets dazwischen ein. Dieses Verhältnis der Materialeigenschaften deckt sich ebenfalls mit den getroffenen Annahmen in der Modellbildung (siehe Kapitel 4.2.1). Aus den μ CT-Aufnahmen lässt sich weiterhin ableiten, dass die anhand der Quader erfassten Dicken der drei porenbefüllten Bereiche im Mittel mit jenen der abgeleiteten Designvorschläge für Optimierungsfall 3.1 und 3.2 übereinstimmen. Demnach können die in Kapitel 4.3.2.3 getroffenen Annahmen zur Modellierung der im SLM entstehenden Porenverteilung inklusive der daraus resultierenden Materialeigenschaften als zweckmäßig im Sinne der Modellbildung nach Stachowiak (1973) angesehen werden.

In Kombination mit den Erkenntnissen der Verifikation (siehe Kapitel 4.3.1) ist die entwickelte TopOpt-Methode somit als zielführend und gewinnbringend einzustufen und kann den Produktentwickler bei der Gestaltfindung initialer Designvorschläge SLM-gefertigter Bauteile unterstützen. Um eine Aussage über das Einsatzspektrum der entwickelten TopOpt-Methode treffen zu können, werden im nachfolgenden Kapitel 4.3.3 verschiedene Bauteilabmessungen inklusive deren Auswirkungen auf die entstehenden Designvorschläge analysiert.

4.3.3 Analyse des Einsatzspektrums der entwickelten TopOpt-Methode

Aus den experimentellen Untersuchungen in Kapitel 4.3.2.2 geht hervor, dass der Kontur- und Interfacebereich für die gewählten Prozessparameter stets Dicken von lediglich wenigen Zehntelmillimetern aufweisen. Die Dicken sind dabei unabhängig von den Abmessungen des zu fertigenden Bauteils und bilden sich immerzu als Offset von der Oberfläche entlang der Aufbaurichtung aus. Diese Unabhängigkeit

führt dazu, dass die prozentual vorliegenden Anteile der beiden Bereiche im gefertigten Bauteil sinken, wenn die Bauteilabmessungen zunehmen. Damit verbunden nimmt auch der prozentuale Anteil an Schraffurbereich mit steigenden Bauteilabmessungen zu. Um den daraus resultierenden Einfluss auf die entwickelte TopOpt-Methode zu evaluieren, werden nachfolgend verschiedene Bauteilabmessungen untersucht. Dazu werden zunächst analog zu Kapitel 4.3.1 der Modellaufbau und die Optimierungsparameter vorgestellt. Danach erfolgt die Ableitung initialer Designvorschläge sowohl mit der entwickelten TopOpt-Methode als auch mit der standardisierten Topologieoptimierung für unterschiedliche Bauteilabmessungen. Anschließend werden die abgeleiteten Designvorschläge analysiert und die sich daraus ergebenden Erkenntnisse bezüglich Einsatzspektrum der entwickelten TopOpt-Methode evaluiert.

Die nachfolgenden Inhalte dieses Kapitels 4.3.3 wurden bereits größtenteils in der Publikation Holoch et al. (2022b) veröffentlicht.

Modellaufbau und Optimierungsparameter

Im Rahmen der Verifikation der entwickelten TopOpt-Methode (siehe Kapitel 4.3.1) wird gezeigt, dass sich die gewonnenen Erkenntnisse aus den Untersuchungen im Zweidimensionalen auf dreidimensionale Problemstellungen übertragen lassen. Daher kommen nachfolgend analog zu Kapitel 4.3.1.1 zweidimensionale Modelle zum Einsatz, um den notwendigen Rechenaufwand zu reduzieren. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit zu den bereits in Kapitel 4.3.1 generierten Ergebnissen wird erneut der 3-Punkt-Biegebalken als Beispieldruckfall herangezogen und entspricht dem Aufbau aus Abbildung 4.19. So handelt es sich ebenfalls um eine Fest-Los-Lagerung mit definierter Verschiebung d mittig auf der oberen Kante des 3-Punkt-Biegebalkens. Der 3-Punkt-Biegebalken repräsentiert, wie bereits in Kapitel 4.3.1.1 ausschließlich eine konsolidierte Schicht in Aufbaurichtung (siehe Abbildung 4.5), wodurch keine gesonderte Filterung entlang der Aufbaurichtung erfolgt (siehe Kapitel 4.3.1.1). Sowohl die Abmessungen des 3-Punkt-Biegebalkens als auch die Verschiebung d werden im weiteren Verlauf des vorliegenden Kapitels variiert, um den Einfluss dieser Variationen auf die entwickelte TopOpt-Methode abzuleiten. Dadurch ergeben sich die drei Optimierungsfälle aus Tabelle 4.20.

Tabelle 4.20: Abmessungen und Verschiebungen der drei Optimierungsfälle zur Analyse des Einsatzspektrums der entwickelten TopOpt-Methode nach Holoch et al. (2022b)

	Abmessungen	Verschiebung d
Optimierungsfall 4.1	20 x 5 mm ²	0,085 mm
Optimierungsfall 4.2	40 x 10 mm ²	0,17 mm
Optimierungsfall 4.3	80 x 20 mm ²	0,34 mm

Für die drei Optimierungsfälle aus Tabelle 4.20 werden die Materialeigenschaften und Bereichsdicken aus Tabelle 4.15 herangezogen sowie das Materialverhalten als isotrop angenommen. Folglich greift der hier gewählte Modellaufbau die in Kapitel 4.3.2.2 gewonnenen Erkenntnisse der experimentellen Untersuchungen auf.

Ziel der drei Optimierungsfälle (siehe Tabelle 4.20) ist erneut die Maximierung der Steifigkeit unter definierter Volumenreduktion auf ein relatives Endvolumen von 60 %. Darüber hinaus kommen die in Kapitel 4.3.2.3 eingeführten Restriktionen einer minimalen Wandstärke und maximal zulässigen Spannung zum Einsatz. Die minimale Wandstärke wird analog zu Kapitel 4.3.2.3 mit 1 mm definiert. Die maximal zulässige Spannung entspricht der Dehngrenze $R_{p0,2}$ und wird mit einem Wert von 230 MPa angegeben (siehe Kapitel 4.3.2.2). Zur Einhaltung der maximal zulässigen Spannung wird erneut eine Festigkeitsrestriktion, wie bereits in Kapitel 4.3.2.3 genutzt. Um die geringen Dicken des Kontur- und Interfacebereichs mit ausreichender Auflösung abzubilden, werden Dreieckelemente mit linearer Ansatzfunktion und einer Elementkantenlänge von 0,05 mm bei der Initialisierung des FE-Modells gewählt. (Holoch et al., 2022b)

Zur quantitativen Bewertung der drei Optimierungsfälle aus Tabelle 4.20 werden sowohl die volumenspezifischen Verzerrungsenergien als auch die vorherrschenden Spannungen in den abgeleiteten Designvorschlägen ausgewertet. Analog zu Kapitel 4.3.1.1 wird hierfür die statische FE-Analyse eingesetzt. Um die quantitative Vergleichbarkeit der abgeleiteten Designvorschläge zu ermöglichen, werden die Zielvolumen der standardisierten Topologieoptimierung wiederum einer geringfügigen Anpassung unterzogen (siehe Kapitel 4.3.1.1). (Holoch et al., 2022b)

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels 4.3.3 werden zunächst die abgeleiteten Designvorschläge für die drei Optimierungsfälle 4.1, 4.2 und 4.3 vorgestellt. Anschließend erfolgt die Evaluation der sich daraus ergebenden Erkenntnisse hinsichtlich des Einsatzspektrums der entwickelten TopOpt-Methode.

Qualitative und quantitative Analyse von Optimierungsfall 4.1

Für Optimierungsfall 4.1 ergeben sich mithilfe der entwickelten TopOpt-Methode und der standardisierten Topologieoptimierung die in Abbildung 4.61 und Abbildung 4.62 dargestellten Designvorschläge inklusive der resultierenden drei porenbehafteten Bereiche.

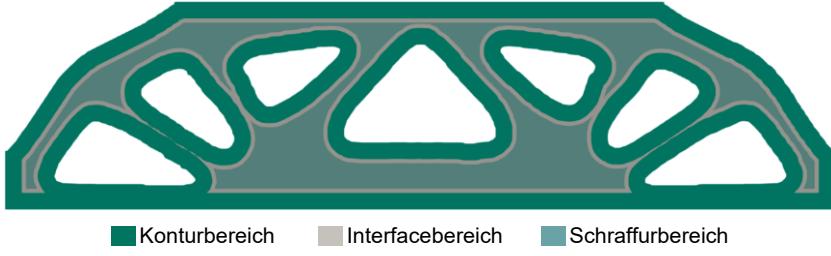


Abbildung 4.61: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 4.1

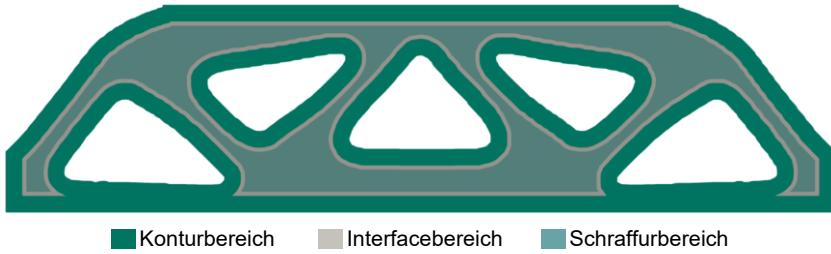


Abbildung 4.62: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 4.1

Wenn die Ergebnisse aus Abbildung 4.61 und Abbildung 4.62 zunächst qualitativ betrachtet werden, ist festzuhalten, dass wie bereits in Kapitel 4.3.1 die entwickelte TopOpt-Methode und die standardisierte Topologieoptimierung eine Art Fachwerkstruktur aufgrund des definierten Biegelastfalls ausbilden. Dabei bestehen beide Designvorschläge aufgrund der minimalen Wandstärke in Kombination mit der vorgegebenen Volumenreduktion aus dicken Streben entlang der Hauptlastpfade und weisen eine recht ähnliche Gestalt auf. Unterschiede fallen vorwiegend durch die veränderte Anzahl an Streben auf. So erzeugt die entwickelte TopOpt-Methode zwei Streben mehr als die standardisierte Topologieoptimierung. Diese zusätzlichen Streben lassen sich auf die vom Optimierungsalgorithmus verfolgte Vergrößerung

des Konturbereichs zur Erhöhung der Steifigkeit zurückführen (siehe Kapitel 4.3.1). (Holoch et al., 2022b) Durch die quantitative Auswertung der prozentual vorliegenden Materialbereiche kann diese Vergrößerung im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung bestätigt werden (siehe Tabelle 4.21).

Tabelle 4.21: Quantitative Auswertung von Optimierungsfall 4.1

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Kontur [%]	53,4	50,0
Interface [%]	20,0	19,7
Schraffur [%]	26,6	30,3
Endvolumen [%]	68,22	68,22
Verzerrungsenergie [mJ]	8,698	8,703
Spez. Verzerrungsenergie [mJ/mm ³]	0,127497	0,127573

Aus Tabelle 4.21 gehen zusätzlich die Endvolumen und Verzerrungsenergien der beiden Designvorschläge hervor, wodurch sich eine um 0,06 % erhöhte volumenspezifische Verzerrungsenergie zugunsten der entwickelten TopOpt-Methode berechnen lässt. Dieser Unterschied ist jedoch vernachlässigbar klein, weshalb die beiden Designvorschläge als gleich steif angesehen werden können. Dadurch wird die qualitativ beobachtete Ähnlichkeit der beiden Designvorschläge auch quantitativ gestützt. (Holoch et al., 2022b)

Deutlichere Unterschiede lassen sich feststellen, wenn die vorherrschenden Spannungen in den Designvorschlägen (siehe Abbildung 4.63 und Abbildung 4.64) betrachtet werden. So weist der Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode lediglich in den Krafteinleitungs- und Lagerungsstellen Regionen auf, welche die maximal zulässige Spannung von 230 MPa überschreiten. Diese Überschreitung ist wie bereits in Kapitel 4.3.2.3 der direkten Verschiebung der Knoten im FE-Modell geschuldet und lässt sich im gewählten Modellaufbau nicht verhindern. Der Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung weist zusätzlich noch an der Unterseite des Balkens zwei Regionen auf, in denen die maximal zulässige Spannung nicht eingehalten wird (siehe schwarze Markierung in Abbildung 4.64). Diese Überschreitung lässt sich darauf zurückführen, dass die standardisierte Topologieoptimierung die drei porenbefüllten Bereiche zur Ableitung eines Designvorschlags nicht berücksichtigt. Werden die drei Bereiche, wie sie im SLM entstehen (siehe Kapitel 4.3.2.2), auf den Designvorschlag übertragen, verursacht dies

die beschriebene Spannungsüberschreitung. Zudem wird eine erhöhte globale Spannung erzeugt, wodurch der Designvorschlag aus Abbildung 4.64 ein um 0,95 % höheres globales Spannungsniveau als jener aus Abbildung 4.63 aufweist.

Folglich kann die Annahme aus Kapitel 4.3.2.3 bestärkt werden, dass durch die iterative Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche die Gestalt des optimierten Balkens derart gewählt wird, dass die maximal zulässige Spannung eingehalten und das globale Spannungsniveau gesenkt werden. (Holoch et al., 2022b)

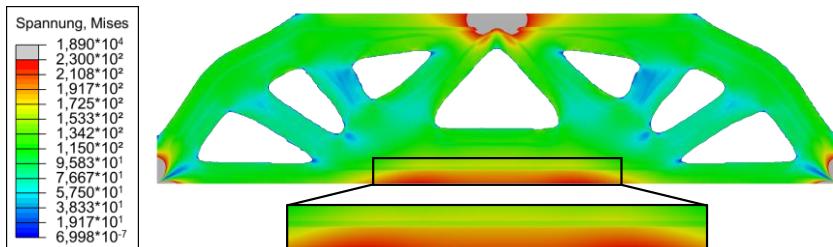


Abbildung 4.63: Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive vorherrschender Spannung für Optimierungsfall 4.1 nach Holoch et al. (2022b)

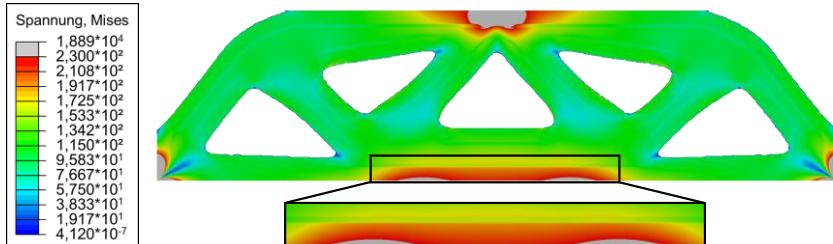


Abbildung 4.64: Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive vorherrschender Spannung für Optimierungsfall 4.1 nach Holoch et al. (2022b)

Qualitative und quantitative Analyse von Optimierungsfall 4.2

Um den Einfluss unterschiedlicher Bauteilabmessungen weiter zu untersuchen, wird als nächstes Optimierungsfall 4.2 analysiert. Die sich aus der entwickelten TopOpt-Methode und standardisierten Topologieoptimierung ergebenden Designvorschläge inklusive der resultierenden drei porenbehafteten Bereiche sind in Abbildung 4.65 und Abbildung 4.66 visualisiert.

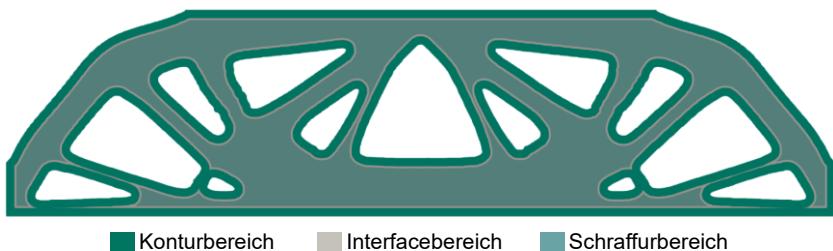


Abbildung 4.65: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 4.2

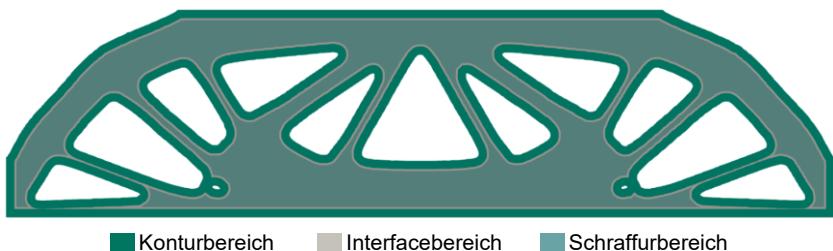


Abbildung 4.66: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive der drei porenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 4.2

Anhand der Designvorschläge für Optimierungsfall 4.2 lässt sich auf qualitativer Betrachtungsebene erkennen, dass erneut eine Art Fachwerkstruktur ausgebildet wird. Wie bereits in Optimierungsfall 4.1 weisen die beiden Designvorschläge eine ähnliche Gestalt auf und unterscheiden sich vorwiegend in der Form des mittleren Loches sowie den Dicken der sich ausbildenden Streben. (Holoch et al., 2022b) Durch die vorliegenden Materialbereiche wird die zu Beginn dieses Kapitels diskutierte Unabhängigkeit der Bereichsdicken von den Bauteilabmessungen ersichtlich. So kann qualitativ bereits festgestellt werden, dass der Schraffurbereich im Vergleich zu Optimierungsfall 4.1 einen deutlich größeren prozentualen Anteil einnimmt. Diese Feststellung wird durch die quantitative Auswertung in Tabelle 4.22 bestätigt. So nimmt der Schraffurbereich prozentual um ca. 22 % im Vergleich zu Optimierungsfall 4.1 zu. Diese Zunahme ist vorwiegend auf die Vergrößerung der Bauteilabmessungen bei gleichbleibenden Bereichsdicken zurückzuführen.

Tabelle 4.22: Quantitative Auswertung von Optimierungsfall 4.2

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Kontur [%]	36,7	37,7
Interface [%]	14,6	15,3
Schraffur [%]	48,7	47,0
Endvolumen [%]	66,01	65,67
Verzerrungsenergie [mJ]	30,496	30,736
Spez. Verzerrungsenergie [mJ/mm ³]	0,115501	0,117011

Aus Tabelle 4.22 geht neben den prozentual vorliegenden Materialbereichen auch die volumenspezifische Verzerrungsenergie hervor. Diese fällt für Optimierungsfall 4.2 zugunsten des Designvorschlags der standardisierten Topologieoptimierung aus und weist einen 1,29 % höheren Wert auf. Werden die vorherrschenden Spannungen in den Designvorschlägen (siehe Abbildung 4.67 und Abbildung 4.68) herangezogen, zeigt sich, dass wie bereits in Kapitel 4.3.2.3 die erhöhte Steifigkeit mit einer verschlechterten Spannungsverteilung einhergeht. So überschreitet der Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung erneut die maximal zulässige Spannung an der Unterseite des Balkens (siehe schwarze Markierung in Abbildung 4.68) im Vergleich zu jenem der entwickelten TopOpt-Methode. Zudem liegt das globale Spannungsniveau im Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung 1,57 % über jenem der entwickelten TopOpt-Methode. (Holoch et al., 2022b)

Folglich lässt sich anhand von Optimierungsfall 4.2 die Annahme aus Kapitel 4.3.2.3 hinsichtlich verbessertem Spannungsniveau und Einhaltung der maximal zulässigen Spannung durch die iterative Berücksichtigung der drei porenbehafteten Bereiche ebenfalls unterstreichen. Darüber hinaus weist Abbildung 4.67 darauf hin, dass im Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode weiteres Potential zur Einsparung von Material ohne wesentliche Steifigkeitseinbußen vorhanden ist. Dies lässt sich anhand der dunkelblauen Stellen erkennen, die Regionen darstellen, die geringe Spannungen aufweisen und somit nur wenig belastet sind. Infolgedessen könnten diese Stellen beispielsweise durch eine stärkere Volumenreduktion entfernt werden, um Material und somit Gewicht einzusparen.

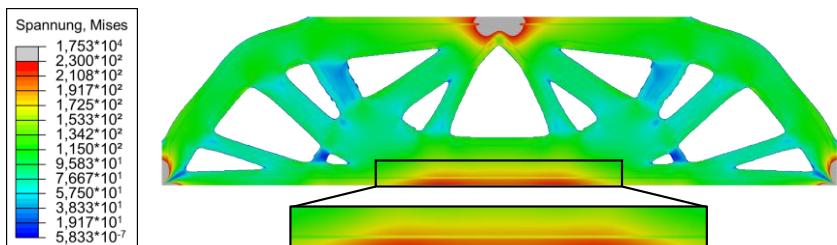


Abbildung 4.67: Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive vorherrschender Spannung für Optimierungsfall 4.2 nach Holoch et al. (2022b)

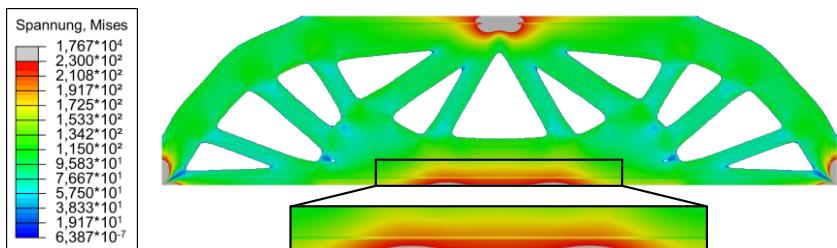


Abbildung 4.68: Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive vorherrschender Spannung für Optimierungsfall 4.2 nach Holoch et al. (2022b)

Qualitative und quantitative Analyse von Optimierungsfall 4.3

Als letztes wird Optimierungsfall 4.3 analysiert, um den Einfluss unterschiedlicher Bauteilabmessungen auf die abgeleiteten Designvorschläge aus der entwickelten TopOpt-Methode und standardisierten Topologieoptimierung zu untersuchen. Abbildung 4.69 und Abbildung 4.70 zeigen die sich für Optimierungsfall 4.3 ergebenen Designvorschläge inklusive der dazugehörigen drei porenbehafteten Bereiche.



Abbildung 4.69: Resultierender Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive der drei porosenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 4.3



Abbildung 4.70: Resultierender Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive der drei porosenbehafteten Bereiche für Optimierungsfall 4.3

Im Vergleich zu den Optimierungsfällen 4.1 und 4.2 lassen sich bereits bei der qualitativen Betrachtung der Designvorschläge anhand von Abbildung 4.69 und Abbildung 4.70 deutliche Unterschiede erkennen. Beide Designvorschläge weisen zwar erneut eine Art Fachwerkstruktur auf, jedoch sind besonders in der sich jeweils ausbildenden Strebenanzahl und -anordnung deutliche Differenzen zu vernehmen. So weist der Designvorschlag aus der entwickelten TopOpt-Methode vor allem in der mittleren Region dickere Streben auf. Zudem bildet sich im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung eine Querstrebe in der Mitte des Balkens aus. (Holoch et al., 2022b)

In Hinblick auf die prozentual vorliegenden Anteile der Materialbereiche lässt sich analog zu Optimierungsfall 4.2 der wachsende Anteil an Schraffurbereich aufgrund der Unabhängigkeit der drei porosenbehafteten Bereiche von den Bauteilabmessungen erkennen (siehe Tabelle 4.23).

Tabelle 4.23: Quantitative Auswertung von Optimierungsfall 4.3

	Entwickelte TopOpt-Methode	Standardisierte Topologieoptimierung
Kontur [%]	21,5	23,2
Interface [%]	8,2	9,7
Schraffur [%]	70,3	67,1
Endvolumen [%]	66,35	66,39
Verzerrungsenergie [mJ]	119,979	124,607
Spez. Verzerrungsenergie [mJ/mm ³]	0,113021	0,117303

Mithilfe der in Tabelle 4.23 aufgeführten Daten lassen sich die volumenspezifischen Verzerrungsenergien für die Designvorschläge berechnen. Daraus resultiert, dass der Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode für die volumenspezifische Verzerrungsenergie einen um 3,65 % niedrigeren Wert aufweist und somit weniger steif ist. Wie bereits in Optimierungsfall 3.2 und 4.2 ist diese geringere Steifigkeit mit einer verbesserten Spannungsverteilung verbunden (siehe Abbildung 4.71 und Abbildung 4.72). So ist das Spannungsniveau beim Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode 3,94 % niedriger als bei jenem der standardisierten Topologieoptimierung. Des Weiteren wird auch bei Optimierungsfall 4.3 die maximal zulässige Spannung von der entwickelten TopOpt-Methode, ausgenommen in den Regionen der Krafteinleitungs- und Lagerungsstellen, stets eingehalten. (Holoch et al., 2022b)

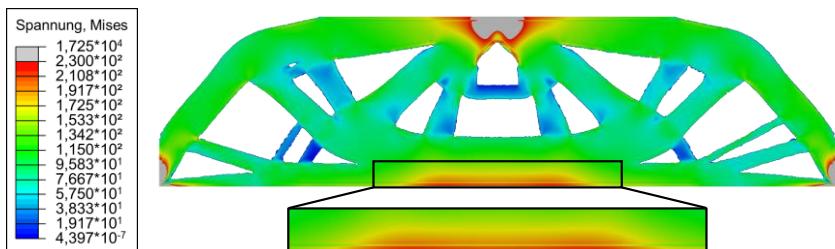


Abbildung 4.71: Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode inklusive vorherrschender Spannung für Optimierungsfall 4.3 nach Holoch et al. (2022b)

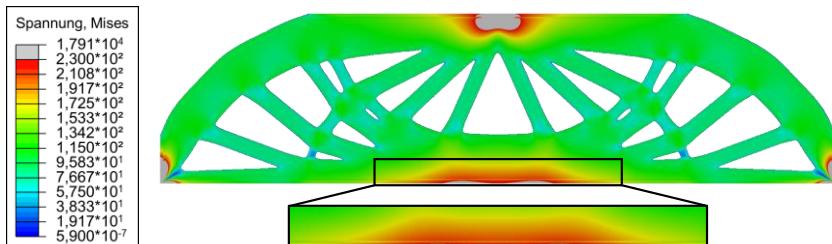


Abbildung 4.72: Designvorschlag der standardisierten Topologieoptimierung inklusive vorherrschender Spannung für Optimierungsfall 4.3 nach Holloch et al. (2022b)

Somit weist auch Optimierungsfall 4.3 darauf hin, dass die iterative Berücksichtigung der drei porenbehafteten Bereiche zu einer besseren Verteilung der Spannung und der Einhaltung der maximal zulässigen Spannung führt. Darüber hinaus lassen sich analog zu Abbildung 4.67 im Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode Regionen erkennen (siehe dunkelblaue Stellen in Abbildung 4.71), die Potential zur weiteren Einsparung von Material und folglich Gewicht ohne wesentliche Steifigkeitseinbußen aufweisen.

Evaluation des Einsatzspektrums der entwickelten TopOpt-Methode anhand der Erkenntnisse aus den drei Optimierungsfällen 4.1, 4.2 und 4.3

Anhand der drei Optimierungsfälle unterschiedlicher Bauteilabmessungen (siehe Tabelle 4.20) wird gezeigt, dass durch die entwickelte TopOpt-Methode im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung stets unterschiedliche Designvorschläge erzeugt werden. Dabei nimmt der Unterschied in den Designvorschlägen mit Vergrößerung der Bauteilabmessungen zu und lässt sich darauf zurückführen, dass der Effekt der minimalen Wandstärke abnimmt, wodurch gleichzeitig die Designfreiheit des Optimierers steigt. Die unterschiedlichen Designvorschläge gehen jedoch auch mit einer Veränderung in den jeweils vorliegenden volumenspezifischen Verzerrungsenergien und somit Steifigkeiten einher. Als Trend lässt sich aus den drei Optimierungsfällen ableiten, dass mit zunehmenden Bauteilabmessungen ebenfalls die Differenzen in den Steifigkeiten der Designvorschläge steigen und diese Differenzen zugunsten der standardisierten Topologieoptimierung ausfallen. Trotz dieses Trends der geringeren Steifigkeit mit zunehmenden Bauteilabmessungen weist die entwickelte TopOpt-Methode einen entscheidenden Vorteil im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung auf. So werden die drei porenbehafteten Bereiche inklusive der damit einhergehenden Materialeigenschaften bereits während der Optimierung berücksichtigt und können folglich direkten Einfluss auf die Anordnung des verfügbaren Materials nehmen. Diese Anordnung ent-

scheidet schlussendlich über die vorherrschenden Spannungen im jeweiligen Designvorschlag und damit verbundenem potentiellen Versagen. Durch die iterative Berücksichtigung des verfügbaren Materials weisen die abgeleiteten Designvorschläge der entwickelten TopOpt-Methode stets ein geringeres globales Spannungsniveau auf und überschreiten die maximal zulässige Spannung von 230 MPa nicht. Vor allem bei Biege- oder Torsionsbelastungen liegen die Bereiche der höchsten Spannung nah an der Oberfläche des gefertigten Bauteils und demnach im Kontur- und Interfacebereich. Daher wird die entwickelte TopOpt-Methode bei derartigen Lastfällen als vorteilhaft eingestuft. Aufgrund der jedoch recht geringen Dicken des Kontur- und Interfacebereichs von lediglich wenigen Zehntelmillimetern und den Einbußen in der Steifigkeit mit zunehmenden Bauteilabmessungen wird die entwickelte TopOpt-Methode unter Nutzung der in Kapitel 4.3.2.1 vorgestellten Prozessparameter besonders für Bauteile mit Abmessungen weniger Zentimeter als gewinnbringend bewertet. (Holoch et al., 2022b)

Abschließend lässt sich anhand der vorgestellten Inhalte der Kapitel 4.3.1, 4.3.2 und 4.3.3 zusammenfassen, dass die entwickelte TopOpt-Methode stets variierende steifigkeitsoptimierte Designvorschläge im Vergleich zu einer standardisierten Topologieoptimierung erzeugt. Dies ist der iterativen Berücksichtigung der drei porenbehafteten Bereiche inklusive der dazugehörigen Materialeigenschaften, wie sie sich aus dem SLM entlang der Aufbaurichtung ergeben, geschuldet. Folglich stellen die erzeugten Optimierungsergebnisse und die sich daraus abgeleiteten Erkenntnisse die Antwort auf die eingangs zu Kapitel 4.3 formulierte vierte Forschungsfrage dar. In Hinblick auf die Validität der Erkenntnisse und Ergebnisse ist festzuhalten, dass diese ausschließlich für Bauteile aus der vorgestellten SLM-Anlage inklusive Prozessparameter und Randbedingungen gelten.

4.4 Fazit

Die in den Kapiteln 4.1, 4.2 sowie 4.3 durchgeföhrten Untersuchungen und daraus abgeleiteten Erkenntnisse zeigen die Komplexität bei der Gestaltung SLM-gefertigter Bauteildesigns auf. So besitzt das SLM zwar einerseits eine hohe Designfreiheit und eignet sich folglich zur Fertigung topologieoptimierter Bauteile. Andererseits bringt das SLM jedoch eine Vielzahl von Einflussfaktoren mit sich, die Auswirkungen auf die resultierende Qualität des gefertigten Bauteils haben. Ein solcher Einflussfaktor ist beispielsweise die Scanstrategie, wodurch sich für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingesetzte Aluminiumlegierung entlang der Aufbaurichtung drei Bereiche unterschiedlicher Porosität einstellen. Folglich sind die resultierenden elastischen, mechanischen Materialeigenschaften stets von der Bau-

teilgestalt abhängig und ergeben sich erst während der Fertigung. Wenn die entstehende Porosität respektive die damit verbundenen Materialeigenschaften erst nach der Gestaltfindung berücksichtigt werden, kann dies zu nicht fertigbaren Strukturen (siehe Kapitel 4.3.2.3) oder Überschätzungen der Festigkeit (siehe Kapitel 4.3.3) führen. Daraus ergeben sich zusätzliche Kosten aufgrund der notwendigen Überarbeitung der Gestalt und machen eine Berücksichtigung derartiger Einflussfaktoren bereits bei der Gestaltfindung unabdingbar. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte TopOpt-Methode stellt hierfür eine Möglichkeit dar und bindet die während des SLM entstehende Porosität inklusive Materialeigenschaften iterativ im Optimierungsprozess mit ein (siehe Kapitel 4.2). Dadurch werden die in der Realität vorliegenden Materialbereiche in den daraus abgeleiteten Designvorschlägen im Vergleich zu jenen aus einer standardisierten Topologieoptimierung besser abgebildet. Darüber hinaus sind die abgeleiteten Designvorschläge der entwickelten TopOpt-Methode ohne größere Einschränkungen fertigbar (siehe Kapitel 4.3.2.3).

Folglich können die Anforderungen an die entwickelte TopOpt-Methode hinsichtlich Abbildung der im SLM entstehenden Materialbereiche und Ableitung fertigbarer Designvorschläge als erfüllt betrachtet werden. Weiterhin weist die entwickelte TopOpt-Methode eine zweckmäßige Balance zwischen Rechenaufwand und Simulationstiefe auf, wodurch sie in frühen Phasen zur initialen Gestaltfindung vom Produktentwickler respektive dem Entwicklungsteam als unterstützendes Werkzeug genutzt werden kann.

Bei der Entwicklung der TopOpt-Methode werden die vier Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit beantwortet, wodurch die in Kapitel 3.1 formulierte Forschungshypothese als verifiziert einzustufen ist. Während die erste und zweite Forschungsfrage dabei mithilfe einer Systemanalyse (siehe Kapitel 4.1) beantwortet werden, erfolgt die Beantwortung der dritten Forschungsfrage in Kapitel 4.2. Durch die Verifikation und Validierung sowie die Analyse des Einsatzspektrums der entwickelten TopOpt-Methode (siehe Kapitel 4.3) wird auch die vierte Forschungsfrage beantwortet.

Die Verifikation und Validierung der Bestandteile der entwickelten TopOpt-Methode konnte im Rahmen des DFG-Forschungsprojekts SLM-Topo durchgeführt werden. Die Validierung umfasst dabei die Modellierung der aus dem SLM resultierenden drei porenbehafteten Bereiche inklusive der damit verbundenen elastischen, mechanischen Materialeigenschaften. Durch diese Validierung kann die Qualität der Modellannahmen verbessert und der Reifegrad der Optimierungsergebnisse gesteigert werden. Eine Validierung jedes einzelnen Zwischenschritts der TopOpt-Methode ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht möglich. Dies ist darauf

zurückzuführen, dass hierzu jegliches Zwischenergebnis der TopOpt-Methode gefertigt und analog zu Kapitel 4.3.2.2 experimentell untersucht werden muss. Dies ist aufgrund der damit verbundenen hohen Anzahl an zu fertigenden Zwischenergebnissen sowohl aus zeitlichen als auch wirtschaftlichen Gründen, trotz des Einsatzes des SLM als additives Fertigungsverfahren, nicht realisierbar. Zudem ist die werkstoffliche Charakterisierung mittels RUS ausschließlich an präparierten Proben einfacher Geometrien möglich. Daher wird die Gesamtmethode anhand eines Vergleichs mit einer standardisierten Topologieoptimierung verifiziert, wodurch gezeigt wird, dass die iterative Anpassung der fiktiven Dichten zweckmäßig ist. Die Kombination aus verifizierter Gesamtmethode und validierter Modellierung der drei porenbehafteten Bereiche in Verbindung mit der Nutzung des validierten MMA-Algorithmus aus Tosca zur Ableitung eines optimierten Designvorschlags lässt Rückschlüsse über die Validität der Gesamtmethode zu. Dadurch kann die entwickelte TopOpt-Methode als zielführendes, unterstützendes Werkzeug für den Produktentwickler respektive das Entwicklungsteam bei der Synthese SLM-gefertigter, steifigkeitsoptimierter Produktdesigns eingestuft werden.

Die Gültigkeit der im Rahmen der vorliegenden Arbeit abgeleiteten Ergebnisse und Erkenntnisse erstreckt sich ausschließlich auf das im Kontext des DFG-Forschungsprojekts SLM-Topo analysierte SLM. Dies ist darauf zurückzuführen, dass lediglich für die vorgestellte Aluminiumlegierung in Kombination mit der SLM-Anlage sowie der Prozessparameter und Randbedingungen die resultierenden Materialeigenschaften ausreichend charakterisiert wurden. Durch den modularen Aufbau der entwickelten TopOpt-Methode ist sie dennoch auch auf weitere additive Fertigungsverfahren inklusive Prozessparameter oder Zielfunktionen adaptierbar. Sofern ein weiteres additives Fertigungsverfahren oder andere Prozessparameter genutzt werden, gilt es, die werkstofflichen Untersuchungen aus Kapitel 4.3.2 hinsichtlich Porenverteilung und dazugehörigen elastischen, mechanischen Materialeigenschaften erneut durchzuführen. Als Grundlage für derartige Adaptionen kann das Kopplungsmodell (siehe Abbildung 4.13) herangezogen werden, um im Sinne der PGE – Produktgenerationsentwicklung Änderungen strategisch vorzubereiten und daraus resultierende Risiken abzuschätzen.

Zur Einordnung der entwickelten TopOpt-Methode in den Produktentstehungsprozess wird das iPeM (siehe Abbildung 2.1) herangezogen. Daraus lässt sich ableiten, dass die entwickelte TopOpt-Methode eine zusätzliche Unterstützung für den Produktentwickler bei der Erzeugung *alternativer Lösungen* in der Kernaktivität *Prinzip und Gestalt modellieren* bereitstellt. Um dabei jedoch belastbare Ergebnisse in Form von Designvorschlägen zu erzeugen, muss die entwickelte TopOpt-Methode iterativ mit der Basisaktivität *Validieren und Verifizieren* durchgeführt werden.

Eine Anforderung an die entwickelte TopOpt-Methode besteht darin, dass nicht nur ein Nutzen für Experten auf dem Gebiet der Simulation und Optimierung besteht, sondern auch Produktentwickler mit geringerem Know-how unterstützt werden. Diese Anforderung wird dadurch bedient, dass die Modellvorbereitungen mit geringem Aufwand verbunden sind und vorwiegend zusammen mit dem Optimierungsschritt automatisiert ablaufen. Nichtsdestotrotz bedürfen die mithilfe der entwickelten TopOpt-Methode erzeugten Ergebnisse einer Interpretation. Hierfür muss der Produktentwickler respektive das Entwicklungsteam (siehe Kapitel 4.2.2) ein gewisses Verständnis sowohl im Kontext der additiven Fertigung als auch Simulation und Optimierung sowie Materialwissenschaften vorweisen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Nachfolgend werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erzeugten Ergebnisse und die damit verbundenen Erkenntnisse zusammengefasst (siehe Kapitel 5.1). Darauf aufbauend wird in Kapitel 5.2 ein Ausblick gegeben, in dem potentielle Weiterentwicklungen der TopOpt-Methode und an die vorliegende Arbeit anknüpfende Forschungsaktivitäten vorgestellt werden.

5.1 Zusammenfassung

Eine der größten Herausforderungen im Produktentstehungsprozess sind die stetig steigenden Anforderungen an Produkte und die damit einhergehende Komplexität bei deren Entwicklung. Ein potentieller Ansatz, um den Produktentwickler bei der Bewältigung dieser Komplexität zu unterstützen, ist der Einsatz von rechnergestützten Simulations- und Optimierungsverfahren. Zu diesen Verfahren zählt beispielsweise die Topologieoptimierung, die eine Möglichkeit zur Ableitung initialer Designvorschläge steifigkeitsoptimierter Bauteile sowie Einsparung von Gewicht und somit Ressourcen darstellt. Die sich dadurch ergebenden Designvorschläge weisen allerdings häufig organische Strukturen auf, die mit konventionellen Fertigungsverfahren (z. B. Gießen) nicht oder nur unter Einschränkungen gefertigt werden können. Abhilfe kann hier die additive Fertigung schaffen, die eine hohe Designfreiheit aufweist und sich in den vergangenen Jahrzehnten von der ausschließlichen Prototypenherstellung hin zum industriellen Einsatz in größerem Maßstab entwickelte. Des Weiteren können durch die Nutzung der additiven Fertigung Kosteneinsparungen erzielt werden, da die Herstellung von Werkzeugen (z. B. Presswerkzeug) entfällt. Aufgrund dieser Aspekte gewinnt die additive Fertigung auch im Kontext der Produktentwicklung stetig an Bedeutung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher die Synergie zwischen Topologieoptimierung und additiver Fertigung genutzt. Infolgedessen wurde eine TopOpt-Methode entwickelt, die den Produktentwickler respektive das Entwicklungsteam bei der Synthese steifigkeitsoptimierter Bauteildesigns für die additive Fertigung unterstützt.

Um eine derartige TopOpt-Methode zu entwickeln, wird in Kapitel 2 zunächst der relevante Stand der Forschung analysiert. Daraus geht hervor, dass die additiven Fertigungsverfahren aufgrund deren diskontinuierlicher Erzeugung von Bauteilen (siehe Kapitel 2.3) die resultierenden Materialeigenschaften maßgeblich beeinflussen. Besonders bei pulverbettbasierten Fertigungsverfahren wie dem SLM (siehe Kapitel 2.3.2) kann es im fertigten Bauteil zu lokal variiierenden Mate-

rialeigenschaften abhängig von den gewählten Prozessparametern wie beispielsweise der Scanstrategie und Aufbaurichtung kommen. Dadurch stellt sich eine direkte Wechselwirkung zwischen Produkt (Bauteildesign) und Produktionssystem (SLM) ein. Diese Wechselwirkung gilt es in der Topologieoptimierung (siehe Kapitel 2.4.3.1) zu berücksichtigen, um die im Fertigungsverfahren entstehenden Materialeigenschaften näher abzubilden und somit für das SLM zugeschnittene Designvorschläge abzuleiten sowie den Produktentwickler bzw. das Entwicklungsteam bei der Gestaltung zu unterstützen. Eine solche gezielte Integration fertigungsbedingter Materialeigenschaften aus dem SLM in einer dichtebebaserten Topologieoptimierung existiert bislang nicht, wodurch eine Forschungslücke besteht. Aus dieser Forschungslücke lässt sich die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit formulieren.

Zielsetzung

Entwicklung einer dichtebebaserten Topologieoptimierungsmethode zur Synthese steifigkeitsoptimierter, initialer Bauteildesigns unter Berücksichtigung der fertigungsbedingten, isotrop linear-elastischen, mechanischen Materialeigenschaften aus dem SLM – Selektives Laserschmelzen.

Diese Zielsetzung wird in Kapitel 3 in eine zu untersuchende Forschungshypothese überführt und anhand der nachfolgenden vier Forschungsfragen operationalisiert. Die wissenschaftliche Vorgehensweise zur Beantwortung dieser vier Forschungsfragen wird dabei an die DRM angelehnt (siehe Abbildung 3.1).

Forschungsfragen

1. Welcher Bedarf besteht hinsichtlich der Berücksichtigung von SLM-verfahrensspezifischen, mechanischen Materialeigenschaften in einer Topologieoptimierung zur Unterstützung des Produktentwicklers bei der initialen Gestaltung?
2. Welche Anforderungen an die zu entwickelnde Topologieoptimierungsmethode leiten sich aus diesem Bedarf ab?
3. Wie kann eine dichtebebaserte Topologieoptimierungsmethode aussehen, um automatisiert einen initialen Designvorschlag für SLM-gefertigte, steifigkeitsoptimierte Bauteile zu generieren?
4. Welche Erkenntnisse zur Synthese SLM-gefertigter, steifigkeitsoptimierter Designvorschläge ergeben sich durch die Anwendung der entwickelten Topologieoptimierungsmethode im Vergleich zu einer standardisierten Topologieoptimierung?

Die Untersuchung der ersten Forschungsfrage erfolgt in Kapitel 4.1.1 im Rahmen einer Systemanalyse. Hierzu wurde in Kooperation mit dem IAM-WK zunächst ein Demonstrator (siehe Abbildung 4.1) entworfen und mithilfe des SLM in mehrfacher Ausführung gefertigt. Anhand der gefertigten Demonstratoren wurden anschließend experimentelle Untersuchungen in Form von μ CT-Aufnahmen durchgeführt, um Rückschlüsse auf die sich im SLM ausbildende Mikrostruktur zu erhalten, die es in der Topologieoptimierung zu berücksichtigen gilt. Aus diesen μ CT-Aufnahmen geht hervor, dass aufgrund der schichtweisen Fertigung drei Bereiche unterschiedlicher Porosität in den Demonstratoren ausgebildet werden (siehe Abbildung 4.3). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die drei Bereiche als Kontur-, Schraffur- und Interfacebereich bezeichnet und entstehen aufgrund der gewählten zweistufigen Scanstrategie. Bei dieser Scanstrategie wird in jeder Schicht zunächst die äußere Kontur (Konturbereich) erzeugt und erst anschließend das eingeschlossene Volumen (Schraffurbereich) konsolidiert. Zwischen diesen beiden Bereichen bildet sich aufgrund der zweistufigen Konsolidierung des Metallpulvers der Interfacebereich aus. Aus den μ CT-Aufnahmen resultiert, dass der Konturbereich annähernd keine Porosität aufweist, während der Schraffurbereich eine mittlere Porosität besitzt. Der Interfacebereich zeigt hingegen eine deutlich erhöhte Porosität auf. Für die unterschiedlichen Porositäten gilt dabei, dass eine erhöhte Anzahl an Poren in der Regel zu verringerten elastischen, mechanischen Materialeigenschaften führt. Folglich ergeben sich in den Demonstratoren drei Bereiche unterschiedlicher elastischer, mechanischer Materialeigenschaften abhängig von der Aufbaurichtung bei der Fertigung und der Gestalt des Demonstrators. Daraus resultiert der konkretisierte Forschungsbedarf als die Berücksichtigung dieser drei porenbehafteten Bereiche inklusive der sich damit ergebenden unterschiedlichen Materialeigenschaften in einer dichtebasierter Topologieoptimierung zur Ableitung steifigkeitsoptimierter Bauteildesigns.

Die zweite Forschungsfrage wird in Kapitel 4.1.2 beantwortet. Dazu werden die Anforderungen an die zu entwickelnde TopOpt-Methode anhand des zuvor konkretisierten Forschungsbedarfs abgeleitet. So stellt die automatisierte und zuverlässige Erfassung der drei porenbehafteten Bereiche basierend auf der Gestalt des zu optimierenden Bauteils und der Aufbaurichtung bei der Fertigung sowie die Integration der sich daraus ergebenden Materialeigenschaften in der dichtebasierter Topologieoptimierung eine solche Anforderung dar. Eine weitere Anforderung liegt in der Implementierung einer geeigneten Schnittstelle, um die aus experimentellen Untersuchungen erfassten elastischen, mechanischen Materialeigenschaften in der Topologieoptimierung automatisiert berücksichtigen zu können. Aus Sicht der Produktentwicklung ergeben sich weitere Anforderungen wie beispielsweise eine einfache und übersichtliche Bedienung der TopOpt-Methode sowie der Einsatz kommerzieller Software. Zudem soll die TopOpt-Methode aus Teilmethoden modular aufgebaut

werden, um diese im Sinne der PGE – Produktgenerationsentwicklung als Referenzsystemelemente für die Entwicklung weiterer Simulations- und Optimierungs-generationen nutzen zu können.

Auf Basis dieser Anforderungen wird in Kapitel 4.2 die TopOpt-Methode zur automatisierten Berücksichtigung der drei porösen Bereiche inklusive der damit verbundenen Materialeigenschaften in einer dichtebasierter Topologieoptimierung entwickelt. Diese entwickelte TopOpt-Methode stellt die Beantwortung der dritten Forschungsfrage dar und ist dabei in zwei Teilmethoden gegliedert: Modellbildung der drei porösen Bereiche (siehe Kapitel 4.2.1) und Ansatz zur iterativen Berücksichtigung der sich ergebenden Materialeigenschaften in der dichtebasierter Topologieoptimierung (siehe Kapitel 4.2.2).

Die Abbildung der drei porösen Bereiche abhängig von der Aufbaurichtung bei der Fertigung und der Gestalt des zu optimierenden Bauteils erfolgt in zwei Schritten anhand eines FE-Modells dieses Bauteils. Im ersten Schritt werden zwei Offsets ausgehend von der Oberfläche des FE-Modells gebildet, wodurch die drei Bereiche zunächst unabhängig von der Aufbaurichtung erzeugt werden. Im zweiten Schritt wird entlang der Aufbaurichtung eine Filterung anhand der FE durchgeführt. Nach dieser Filterung liegen die drei porösen Bereiche, wie sie sich im SLM ausbilden, im FE-Modell vor (siehe Abbildung 4.12). Diesen Bereichen werden abschließend die aus experimentellen Untersuchungen (siehe Kapitel 4.3.2.2) resultierenden Materialeigenschaften unter Zuhilfenahme einer aufgebauten Datenbank zugewiesen.

In Kapitel 4.2.2 wird ein Ansatz zur Berücksichtigung der abgebildeten Materialbereiche in einer dichtebasierter Topologieoptimierung anhand des IPEK-Kopplungsmodells (siehe Abbildung 4.13) bereitgestellt. Als Ausgangspunkt dieses Ansatzes dient eine standardisierte Topologieoptimierung in Abaqus 2019 und Tosca 2019. Diese Topologieoptimierung wird in jeder Iteration direkt vor Start der FE-Analyse kurzzeitig unterbrochen und das aktuell vorliegende Zwischenergebnis der Topologieoptimierung exportiert. Auf Basis dieses exportierten Zwischenergebnisses werden die drei porösen Bereiche inklusive der zugehörigen Materialeigenschaften aus dem SLM bestimmt und der Topologieoptimierung als Eingangsparameter für die nächste Iteration der Optimierung übergeben. Dieses iterative Vorgehen bestehend aus Unterbrechung und Abbildung der Materialbereiche wird so lange wiederholt, bis das Konvergenzkriterium der Topologieoptimierung erreicht ist und folglich dem Produktentwickler ein steifigkeitsoptimierter Designvorschlag vorliegt.

Die vierte Forschungsfrage wird in Kapitel 4.3 beantwortet. Dazu erfolgt zunächst die Verifikation des iterativen Ansatzes aus Kapitel 4.2.2 zur Berücksichtigung von drei Bereichen unterschiedlicher elastischer, mechanischer Materialeigenschaften in der TopOpt-Methode (siehe Kapitel 4.3.1). Für diese Verifikation werden Untersuchungen im Zwei- und Dreidimensionalen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte TopOpt-Methode im Vergleich zu einer standardisierten Topologieoptimierung deutlich variierende und stets steifere Designvorschläge erzeugt. Dies ist auf die Maximierung des Konturbereichs unter gleichzeitiger Reduktion des Interfacebereichs zurückzuführen und ist aus einer rein steifigkeitsorientierten Sicht als plausibel und zielführend anzusehen. Anhand dieser Ergebnisse der Verifikation lässt sich somit bereits der Nutzen der TopOpt-Methode für den Produktentwickler bei der Ableitung SLM-gefertigter Bauteildesigns erkennen. So besitzt das Fertigungsverfahren aufgrund der unterschiedlichen Materialbereiche einen signifikanten Einfluss auf die Bauteilgestalt sowie die damit verbundene Steifigkeit. Folglich gilt es, das Fertigungsverfahren bereits bei der Gestaltfindung einzubeziehen, um dessen volles Potential nutzen zu können. Im Kontext des iPeM (siehe Kapitel 2.1.1) bedeutet dies, das Fertigungsverfahren bereits in den Kernaktivitäten wie beispielsweise *Prinzip und Gestalt modellieren* (siehe Abbildung 2.1) zu berücksichtigen.

Aufbauend auf der Verifikation wird die TopOpt-Methode in Kapitel 4.3.2 validiert. Für diese Validierung wurden in Zusammenarbeit mit dem IAM-WK zunächst ergänzende Probengeometrien im SLM gefertigt (siehe Kapitel 4.3.2.1) und hinsichtlich Mikrostruktur sowie den damit verbundenen elastischen, mechanischen Materialeigenschaften analysiert (siehe Kapitel 4.3.2.2). Diese Analyse anhand von μ CT-Aufnahmen zeigt, dass sich analog zum Demonstrator drei Bereiche unterschiedlicher Porositäten abhängig von der Probengestalt und Aufbaurichtung ausbilden. Dabei weisen sowohl der Kontur- als auch Interfacebereich lediglich eine Dicke von wenigen Zehntelmillimetern auf. Diese geringen Dicken lassen sich auf die gewählten Prozessparameter zurückführen, weshalb bei einer Veränderung dieser Prozessparameter auch eine erneute werkstoffliche Untersuchung der Porenausbildung notwendig ist. Neben den Bereichsdicken lässt sich auch die Porenform anhand der μ CT-Aufnahmen auswerten. Aus dieser Auswertung geht hervor, dass sämtliche Poren eine hohe Sphärität aufweisen, wodurch auf isotropes Materialverhalten in allen drei Bereichen geschlossen werden kann. Um die elastischen, mechanischen Materialeigenschaften zu bestimmen, wurde die RUS eingesetzt. Anhand der Ergebnisse aus der RUS lassen sich die E-Moduln der drei Bereiche (siehe Tabelle 4.14) bestimmen. Diese zeigen, dass, wie bereits aus der Porenverteilung vermutet, der Konturbereich stets den höchsten E-Modul aufweist und somit am steifsten ist. Der Interfacebereich besitzt hingegen den geringsten E-Modul und ist folglich am wenigsten steif. Der Schraffurbereich liegt immerzu zwischen den Werten der beiden anderen Bereiche.

Diese elastischen, mechanischen Materialeigenschaften in Kombination mit den erfassten Bereichsdicken werden in Kapitel 4.3.2.3 als Input für die TopOpt-Methode genutzt, um deren Auswirkungen auf die abgeleiteten Designvorschläge zu analysieren. Die Analyse zeigt, dass auch unter Einsatz der Materialeigenschaften aus den werkstofflichen Untersuchungen die entwickelte TopOpt-Methode einen steiferen Designvorschlag im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung erzeugt. Folglich deckt sich dieses Ergebnis mit den Erkenntnissen der Untersuchungen im Zweidimensionalen zur Verifikation der entwickelten TopOpt-Methode (siehe Kapitel 4.3.1).

Anhand der Designvorschläge lässt sich jedoch feststellen, dass aufgrund der restriktionsfreien Steifigkeitsoptimierung filigrane Strukturen entstehen, die teilweise zu Fehlstellen bei der Fertigung im SLM führen (siehe Abbildung 4.49). Um diese filigranen Strukturen zu verhindern, wird eine minimale Wandstärke als Restriktion in der TopOpt-Methode eingeführt. Des Weiteren wird eine Festigkeitsrestriktion ergänzt, um maximal zulässige Spannungen direkt bei der Ableitung der steifigkeitsoptimierten Designvorschläge zu berücksichtigen. Die sich unter Einsatz dieser beiden Restriktionen ergebenden Designvorschläge zeigen, dass keine filigranen Strukturen ausgebildet werden und somit eine Fertigung ohne Einschränkungen im SLM möglich ist (siehe Abbildung 4.56).

Darüber hinaus kann anhand des Vergleichs der beiden Designvorschläge festgehalten werden, dass aufgrund der Festigkeitsrestriktion der Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode erstmalig eine geringere Steifigkeit besitzt. Diese geringere Steifigkeit lässt sich jedoch anhand der maximal vorherrschenden Spannungen im Designvorschlag erklären. So weist der Designvorschlag der entwickelten TopOpt-Methode eine deutlich geringere globale Spannungsverteilung auf und hält die maximal zulässige Spannung im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung besser ein. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die standardisierte Topologieoptimierung die drei porenbehafteten Bereiche bei der Suche nach einem optimierten Designvorschlag nicht berücksichtigt. Folglich werden auch die sich im SLM einstellenden Materialeigenschaften von der standardisierten Topologieoptimierung bei der Bewertung, ob die maximal zulässige Spannung eingehalten wird, nicht berücksichtigt, wodurch es zu einer Überschätzung des Materialverhaltens kommt. Dadurch ergibt sich zwar ein geometrisch steiferer Designvorschlag im Vergleich zur TopOpt-Methode, allerdings wird die maximal zulässige Spannung deutlich überschritten. Auf Basis dieser Erkenntnisse lässt sich ableiten, dass die entwickelte TopOpt-Methode dem Produktentwickler Designvorschläge bereitstellt, welche die im Einsatz vorherrschenden Last- und Randbedingungen besser einbe-

zieht und die Spannungen homogener verteilt. Dadurch ergibt sich ein Vorteil hinsichtlich verbesserter Materialausnutzung und somit Ressourceneinsparung bei der Synthese.

Um zu prüfen, ob die resultierenden Materialeigenschaften der Probengeometrien auf die beiden Designvorschläge (restriktionsfrei sowie unter Einbeziehung der beiden Restriktionen) der entwickelten TopOpt-Methode übertragbar sind, wurden diese Designvorschläge ebenfalls im SLM gefertigt und einer werkstofflichen Untersuchung unterzogen. Aus dieser Untersuchung geht hervor, dass sich die drei porenbehafteten Bereiche ebenfalls abhängig von der Aufbaurichtung bei der Fertigung und der Gestalt des jeweiligen Designvorschlags ausbilden. Dabei sind die Dicken der drei Bereiche in gleichem Maße wie bei den Probengeometrien zu vernehmen und die Poren weisen ebenfalls eine hohe Sphärität auf, wodurch isotropes Materialverhalten besteht. Lediglich die quantitative Anzahl an Poren in den drei Bereichen variiert in den gefertigten Designvorschlägen im Vergleich zu den Probengeometrien. So besitzt sowohl der Interface- als auch Schraffurbereich in den gefertigten Designvorschlägen eine geringere Porosität als bei den Probengeometrien. Folglich weisen vermutlich auch die elastischen, mechanischen Materialeigenschaften in den beiden Bereichen einen etwas verbesserten E-Modul auf. Nichtsdestotrotz werden weiterhin im Konturbereich am wenigsten Poren erzeugt, gefolgt vom Schraffur- und Interfacebereich, wodurch die getroffenen Annahmen in der TopOpt-Methode als zulässig einzustufen sind.

Als letzter Schritt zur Beantwortung der vierten Forschungsfrage wird in Kapitel 4.3.3 das Einsatzspektrum der entwickelten TopOpt-Methode zur Unterstützung des Produktentwicklers bei der Gestaltfindung analysiert. Dazu werden unterschiedliche geometrische Abmessungen eines zu optimierenden Bauteils herangezogen und Designvorschläge sowohl mit der entwickelten TopOpt-Methode als auch der standardisierten Topologieoptimierung abgeleitet. Die beiden Restriktionen einer minimalen Wandstärke und maximal zulässigen Spannung kommen ebenfalls zum Einsatz. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass die abgeleiteten Designvorschläge der entwickelten TopOpt-Methode unabhängig von den Bauteilabmessungen stets die maximal zulässigen Spannungen im Vergleich zur standardisierten Topologieoptimierung einhalten. Diese Einhaltung der maximal zulässigen Spannung sorgt jedoch dafür, dass die Designvorschläge der entwickelten TopOpt-Methode mit steigenden Bauteilabmessungen zunehmende Steifigkeitseinbußen gegenüber der standardisierten Topologieoptimierung verzeichnen. Folglich stellt die entwickelte TopOpt-Methode besonders bei Bauteilen mit Abmessungen weniger Zentimeter eine gewinnbringende Unterstützung des Produktentwicklers respektive des Entwicklungsteams bei der Gestaltfindung dar. Diese Einschränkung

auf vorwiegend Bauteile geringer Abmessungen ist auf die gewählten Prozessparameter des SLM und den damit verbundenen geringen Bereichsdicken sowie Unterschieden in den Materialeigenschaften zurückzuführen. Die entwickelte TopOpt-Methode beschränkt sich allerdings nicht ausschließlich auf das SLM, sondern kann auf weitere Anwendungsgebiete übertragen werden, um dem Produktentwickler bzw. dem Entwicklungsteam als unterstützendes Werkzeug bei der Ableitung initialer Designvorschläge zur Verfügung zu stehen. Derartige Anwendungsgebiete sowie an die vorgestellten Forschungsergebnisse anknüpfende weitere Forschungsaktivitäten werden nachfolgend im Ausblick (siehe Kapitel 5.2) vorgestellt.

Abschließend lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte TopOpt-Methode einen weiteren Baustein für die KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung im Sinne der Unterstützung des Produktentwicklers bei der rechnergestützten Gestaltfindung im Produktentstehungsprozess bereitstellt.

5.2 Ausblick

Basierend auf der entwickelten TopOpt-Methode zur Ableitung initialer, steifigkeitsoptimierter Designvorschläge SLM-gefertigter Bauteile ergeben sich unmittelbare Anknüpfungspunkte für weiterführende Forschungsarbeiten. Ein möglicher Anknüpfungspunkt besteht darin, neben den in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Prozessparametern weitere Variationen dieser durchzuführen und die damit verbundenen Auswirkungen auf die im SLM resultierenden Materialeigenschaften zu untersuchen sowie in der TopOpt-Methode zu ergänzen. Eine derartige Variation könnte beispielsweise zu größeren Unterschieden in den Bereichsdicken sowie Materialeigenschaften führen, wodurch die mit der entwickelten TopOpt-Methode einhergehenden Vorteile (siehe Kapitel 4.3.1) stärker zum Tragen kommen. Eine weitere Variation könnte ein Wechsel auf ein anderes Leichtbaumaterial wie Titan darstellen, wodurch dem Produktentwickler respektive dem Entwicklungsteam bei der Gestaltfindung weitere Materialsysteme zur Verfügung stehen und somit abhängig vom Anwendungsfall gezielt ein passender Werkstoff ausgewählt werden kann.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 4.3.2.2 kann ein weiterer Anknüpfungspunkt darstellen, die Abhängigkeit der Bereichsdicken vom Überhangwinkel detailliert zu untersuchen. Wird anhand dieser Untersuchungen eine signifikante Abhängigkeit festgestellt, ist die Erweiterung der TopOpt-Methode um die Modellierung der drei porenbefahrteten Bereiche abhängig vom Überhangwinkel als zielführend zu erachten. Durch eine solche Erweiterung werden die Bereichsdicken nicht global mit einer Dicke modelliert, sondern lokal je nach vorherrschendem Überhangwinkel,

wodurch die Realität näher abgebildet wird. Erste Ansätze für eine derartige lokale Modellierung der Bereichsdicken abhängig vom Überhangwinkel wurden bereits in der vom Autor dieser Arbeit co-betreuten Abschlussarbeit von Buck (2020)³² untersucht und können als Basis für weiterführende Arbeiten herangezogen werden.

Auch die detaillierte Untersuchung der lokalen Dehngrenzen in den drei porenbehafteten Bereichen und der damit verbundenen Festigkeitsrestriktion in der TopOpt-Methode bietet eine Möglichkeit für weiterführende Forschungsarbeiten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kommt eine globale Festigkeitsrestriktion zum Einsatz, die zu eher konservativen Designvorschlägen führt. Aufgrund der unterschiedlichen Porositäten in den drei Bereichen ist jedoch auch eine lokal variierende Dehngrenze in den Bereichen nicht auszuschließen. Daher ist eine detaillierte Untersuchung der drei Bereiche hinsichtlich deren lokalen Dehngrenzen sowie die anschließende Weiterentwicklung der TopOpt-Methode um lokale Festigkeitsrestriktionen als weiterer Anknüpfungspunkt zu sehen. Durch die Ergänzung solcher lokaler Festigkeitsrestriktionen in der TopOpt-Methode lassen sich Designvorschläge ableiten, welche die Materialausnutzung gezielt weiter steigern. Ein entsprechender Projektantrag für derartige Untersuchungen und damit verbundenen Weiterentwicklungen der TopOpt-Methode wurde bereits zusammen mit dem IAM-WK bei der DFG eingereicht.

Ergänzend zu der detaillierten Untersuchung der Dehngrenzen ist auch die Analyse der fertigungsbedingt entstehenden Eigenspannungen von SLM-Bauteilen sowie deren Integration in der TopOpt-Methode als weiterführende Forschungsarbeit zu sehen. Durch diese Integration können Designvorschläge abgeleitet werden, welche die fertigungsbedingten Eigenspannungen bereits bei der Gestaltfindung berücksichtigen. Folglich können etwaige Sicherheitsfaktoren zur Absicherung gegen Versagen in der Nutzungsphase aufgrund von fertigungsbedingten Eigenspannungen reduziert werden. Diese Untersuchungen sowie Erweiterungen um Eigenspannungen werden bereits im Rahmen des Technologietransfer-Programms Leichtbau des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz im Projekt CAEAddFert³³ durchgeführt und bauen direkt auf den im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Methoden auf.

Ein weiterer Anknüpfungspunkt für ergänzende Forschungsarbeiten stellt die Weiterentwicklung der TopOpt-Methode im Sinne des Robust Designs auf Basis der Forschungsarbeit von Troll (2015) am IPEK – Institut für Produktentwicklung dar.

³² Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

³³ CAEAddFert – Entwicklung eines virtuellen Prüfstands für Bauteile zur additiven Fertigung; Förderkennzeichen: 03LB1010A

Dadurch werden die fertigungsbedingt schwankenden Materialeigenschaften aus dem SLM der TopOpt-Methode nicht als Mittelwerte bereitgestellt. Vielmehr wird der Einfluss der Prozessparameter direkt im strukturmechanischen FE-Modell abgebildet und von der Topologieoptimierung berücksichtigt. Dadurch werden bei der Ableitung von optimierten Designvorschlägen neben den Mittelwerten auch die best- und worst-case Materialeigenschaften berücksichtigt, wodurch die Wahrscheinlichkeit für ein potentielles Versagen in der Nutzungsphase verringert werden kann.

Darüber hinaus ist auch die Übertragbarkeit der TopOpt-Methode auf weitere Zielfunktionen denkbar, um beispielsweise Designvorschläge mit optimierten Eigenfrequenzen oder verbessertem NVH-Verhalten abzuleiten.

Neben den ergänzenden Untersuchungen und Weiterentwicklungen im Kontext des SLM lässt sich die entwickelte TopOpt-Methode auch als Referenzsystem für weitere Anwendungsgebiete nutzen. So kann die vorgestellte Modellbildung oberflächennaher Bereiche sowohl mit als auch ohne Filterung entlang einer Raumrichtung auf weitere Fertigungsverfahren (z. B. Extrusion) oder Oberflächenbehandlungen (z. B. Kugelstrahlen) übertragen werden, wodurch eine realitätsnahe Abbildung der sich ergebenden Materialeigenschaften ermöglicht wird. Die iterative Unterbrechung der Topologieoptimierung inklusive Anpassung der fiktiven Dichten kann als Basis für die Optimierung von Bauteilen aus weiteren Fertigungsverfahren dienen, solange diese Fertigungsverfahren eine Wechselwirkung zwischen zu fertigender Bauteilgestalt und sich fertigungsbedingt einstellenden Materialeigenschaften aufweisen. Ein solches Fertigungsverfahren, das diesen Zusammenhang aufweist, ist der Spritzguss faserverstärkter Kunststoffe und wird im DFG-Projekt HyTop³⁴ eingesetzt. Dieses DFG-Projekt befasst sich mit der Gestaltungsfundung topologieoptimierter Hybrideinleger aus spritzgegossenem, faserverstärktem Kunststoff. Dazu werden die resultierenden Materialeigenschaften aus einer Formfüllsimulation in einer dichtebehafteten Topologieoptimierung integriert. Für diese Integration wird der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Ansatz zur iterativen Anpassung der fiktiven Dichten (siehe Kapitel 4.2.2) genutzt und stellt somit einen Teil des Referenzsystems für das DFG-Projekt dar.

Zusätzlich zum Spritzguss faserverstärkter Kunststoffe kann auch der Spritzguss geschäumter Materialien als weiteres Anwendungsgebiet für die entwickelte

³⁴ HyTop: Entwicklung einer gekoppelten Topologieoptimierungsmethode für spritzgegossene, kurzfaserverstärkte Thermoplast-Metall-Hybridverbunde zur Unterstützung des Produktentwicklers in der Gestaltsynthese; Projektnummer: 442072701

TopOpt-Methode genannt werden. Bei diesem Fertigungsverfahren werden Bauteile erzeugt, die ähnlich zum SLM Bereiche unterschiedlicher Materialeigenschaften aufweisen: Steife, dichte Außenkontur und weicher, geschäumter Kern. Im Vergleich zum SLM weisen diese Materialeigenschaften einen deutlich größeren Unterschied in ihren absoluten Werten (z. B. E-Modul) auf, weshalb sich durch die entwickelte TopOpt-Methode diese Materialeigenschaften gezielt ausnutzen und somit Ressourcen einsparen lassen würden. Folglich ist ein Einsatz der entwickelten TopOpt-Methode im Kontext geschäumter Bauteile ebenfalls als zielführender Anknüpfungspunkt anzusehen, um den Produktentwickler respektive das Entwicklungsteam in der Gestaltfindung derartiger Bauteile zu unterstützen.

Anhand der in diesem Kapitel 5.2 vorgestellten potentiellen Weiterentwicklungen der TopOpt-Methode und möglichen anknüpfenden Forschungsaktivitäten lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die modular aufgebaute TopOpt-Methode eine geeignete Basis für zahlreiche weiterführende Vorhaben bereitstellt.

Literaturverzeichnis

- Aboulkhair, N., Everitt, N. M., Ashcroft, I. & Tuck, C. (2014). Reducing porosity in AISi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 1-4, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.001>
- Albers, A. (2010). Five Hypotheses and a Meta Model of Engineering Design Processes. In I. Horváth, F. Mandorli & Z. Rusak (Hrsg.), *Proceedings of the eighth International Symposium on tools and methods of competitive engineering* (S. 343–356). Ancona, Italy.
- Albers, A., Alink, T., Thau, S. & Matthiesen, S. (2008). Support of design engineering activity through C&CM - Temporal decomposition of design problems. In I. Horváth & Z. Rusak (Hrsg.), *Proceedings of the seventh International Symposium on tools and methods of competitive engineering* (S. 1–12). Izmir, Türkei.
- Albers, A., Braun, A., Heimicke, J. & Richter, T. (2020). Der Prozess der Produktentstehung. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (2. Aufl., S. 9–35). München: Hanser.
- Albers, A. & Burkhardt, N. (2020). Systemleichtbau - ganzheitliche Gewichtsreduzierung. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (2. Aufl., S. 113–131). München: Hanser.
- Albers, A., Burkhardt, N., Meboldt, M. & Saak, M. (2005). SPALTEN problem solving methodology in the product development. In A. Samuel & W. Lewis (Hrsg.), *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design* (S. 553–564). Melbourne, Australien.
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2017). PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. *Forschung im Ingenieurwesen*, 81(1), 13–31. <https://doi.org/10.1007/s10010-016-0210-0>
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015). Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2015. Entwicklung smarter Produkte für die Zukunft* (S. 1–10). Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.
- Albers, A., Lanza, G., Klippert, M., Schäfer, L., Frey, A., Hellweg, F. et al. (2022). Product-Production-CoDesign: An Approach on Integrated Product and Pro-

- duction Engineering Across Generations and Life Cycles. In N. Anwer (Hrsg.), 32nd CIRP Design Conference (CIRP Design 2022) - Design in a changing world (Bd. 109, S. 167–172). Paris, Frankreich.
- Albers, A., Majic, N., Ottnad, J., Spickenheuer, A., Uhlig, K. & Heinrich, G. (2009). 3-D topology optimisation in combination with fibre alignment for composite structures manufactured by tailored fibre placement. In 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (S. 1–9). Lissabon, Portugal.
- Albers, A., Majic, N., Schmid, A. & Serf, M. (2020). Virtuelle Produktentwicklung. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung (2. Aufl., S. 73–112). München: Hanser.
- Albers, A. & Matthiesen, S. (2002). Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme - Das Elementmodell "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zur Analyse und Synthese technischer Systeme. Konstruktion, 54(7-8), 55–60.
- Albers, A., Matthiesen, S., Revfi, S., Schönhoff, C., Grauberger, P. & Heimicke, J. (2019). Agile Lightweight Design - The Extended Target Weighing Approach in ASD - Agile Systems Design Using Functional Modelling with the C&C²-Approach. In S. Watzack & B. Schleich (Hrsg.), Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED 19, S. 2667–2676). Delft, Niederlande.
- Albers, A. & Meboldt, M. (2007). IPEMM - Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In J.-C. Bocquet (Hrsg.), Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design (ICED 07, S. 1–9). Paris, Frankreich.
- Albers, A. & Nowicki, L. (2003). Neue Möglichkeiten zur Steigerung der Qualität und Effizienz in der Produktentwicklung. In A. Burbilas & J. Sauter (Hrsg.), Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung (S. 141–147). Bremen: Fraunhofer IRB Verlag.
- Albers, A. & Ottnad, J. (2010). Integrated Structural and Controller Optimization in Dynamic Mechatronic Systems. Journal of Mechanical Design, 132(4). <https://doi.org/10.1115/1.4001380>
- Albers, A., Rapp, S., Birk, C. & Bursac, N. (2017). Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2017 (S. 1–10). Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.

- Albers, A., Rapp, S., Fahl, J., Hirschter, T., Revfi, S., Schulz, M. et al. (2020). Proposing A Generalized Description Of Variations In Different Types Of Systems By The Model Of PGE – Product Generation Engineering. In Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference (S. 2235–2244). Dubrovnik, Kroatien.
- Albers, A., Rapp, S., Klippert, M., Lanza, G. & Schäfer, L. (2022). Produkt-Produktions-CoDesign: Ein Ansatz zur integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung über Generationen und Lebenszyklen hinweg. In Newsletter der WiGeP (S. 3). Garbsen: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung.
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F. et al. (2019). The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. In S. Wartzack & B. Schleich (Hrsg.), Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED 19, S. 1693–1702). Delft, Niederlande.
- Albers, A., Reichert, S., Serf, M., Thorén, S. & Bursac, N. (2017). Kopplung von CAE-Methoden zur Unterstützung des Produktentwicklers. Konstruktion, 69(9), 76–82.
- Albers, A., Reiss, N., Bursac, N. & Breitschuh, J. (2016). 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. In C. Boks, J. Sigurjonsson, M. Steinert, C. Vis & A. Wulvik (Hrsg.), Proceedings of NordDesign 2016 (S. 411–420). Trondheim, Norwegen.
- Albers, A., Reiss, N., Bursac, N. & Richter, T. (2016). iPeM - integrated Product engineering Model in context of Product Generation Engineering. In L. Wang & T. Kjellberg (Hrsg.), 26th CIRP Design Conference (Bd. 50, S. 100–105). Stockholm, Schweden.
- Albers, A., Revfi, S. & Spadinger, M. (2020). Funktionsbasierte Entwicklung leichter Produkte. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung (2. Aufl., S. 133–151). München: Hanser.
- Albers, A., Rovira, N. L., Aguayo, H. & Maier, T. (2008). Optimization with Genetic Algorithms and Splines as a way for Computer Aided Innovation. In G. Cascini (Hrsg.), Computer-Aided Innovation (CAI) (The International Federation for Information Processing, Bd. 277, S. 7–18). Boston, USA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-09697-1_1

- Albers, A., Saak, M., Burkardt, N. & Schweinberger, D. (2002). Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode. In 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der Technischen Universität Ilmenau (S. 83–84). Ilmenau.
- Albers, A., Spadinger, M., Serf, M., Reichert, S., Heldmaier, S., Schulz, M. et al. (2017). Coupling of Computer-Aided Methods: Supporting Product Developer During Embodiment Synthesis. In A. Schumacher, T. Vietor, S. Fiebig, K.-U. Bletzinger & K. Maute (Hrsg.), *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization. WCSMO 2017* (S. 536–548). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67988-4_41
- Albers, A., Wagner, D., Ruckpaul, A., Hessenauer, B., Burkardt, N. & Matthiesen, S. (2013). Target weighing - A new approach for conceptual lightweight design in early phases of complex systems development. In U. Lindemann, S. Venkataraman, Y. Kim, S. W. Lee, J. Clarkson & G. Cascini (Hrsg.), *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED 13*, S. 301–310). Seoul, Korea.
- Albers, A. & Wintergerst, E. (2014). The Contact and Channel Approach (C&C²-A): relating a system's physical structure to its functionality. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations* (S. 151–171). London, England: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_8
- Alimardani, M., Toyserkani, E., Huissoon, J. P. & Paul, C. P. (2009). On the delamination and crack formation in a thin wall fabricated using laser solid freeform fabrication process: An experimental-numerical investigation. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(11), 1160–1168.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.06.010>
- Allaire, G., Jouve, F. & Toader, A.-M. (2002). A level-set method for shape optimization. *Comptes Rendus Mathematique*, 334(12), 1125–1130.
[https://doi.org/10.1016/S1631-073X\(02\)02412-3](https://doi.org/10.1016/S1631-073X(02)02412-3)
- Allaire, G., Jouve, F. & Toader, A.-M. (2004). Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *Journal of Computational Physics*, 194(1), 363–393. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2003.09.032>
- Ashby, M. F. (2016). Materials selection in mechanical design (5. Aufl.). Oxford, England: Butterworth-Heinemann.
- Bacciaglia, A., Ceruti, A. & Liverani, A. (2021). Surface smoothing for topological optimized 3D models. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 64(6), 3453–3472. <https://doi.org/10.1007/s00158-021-03027-6>

- Baier, H., Seeßelberg, C. & Specht, B. (1994). Algorithmen zur Lösung von Optimierungsaufgaben. In H. Baier, C. Seeßelberg & B. Specht (Hrsg.), Optimierung in der Strukturmechanik (S. 61–120). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-90700-4_5
- Balletti, C., Ballarin, M. & Guerra, F. (2017). 3D printing: State of the art and future perspectives. *Journal of Cultural Heritage*, 26, 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.010>
- Bendsøe, M. P. (1989). Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 1(4), 193–202. <https://doi.org/10.1007/BF01650949>
- Bendsøe, M. P. & Sigmund, O. (2003). Topology optimization. Theory, methods and applications. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bendsøe, M. P. & Kikuchi, N. (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71(2), 197–224. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2)
- Berger, U., Hartmann, A. & Schmid, D. (2019). 3D-Druck - additive Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing (3. Aufl.). Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel.
- Blessing, L. T. M. & Chakrabarti, A. (2009). DRM, a Design Research Methodology. London, England: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>
- Bourdin, B. & Chambolle, A. (2003). Design-dependent loads in topology optimization. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*, 9, 19–48. <https://doi.org/10.1051/cocv:2002070>
- Brackett, D., Ashcroft, I. & Hague, R. (2011). Topology Optimization for Additive Manufacturing. Loughborough, England: Loughborough University, Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering. <https://doi.org/10.26153/tsw/15300>
- Brand, M. (2013). FEM-Praxis mit SolidWorks (2. Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2234-5>
- Buchbinder, D. & Meiners, W. (2010). Generative Fertigung von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion - AluGenerativ. Abschlussbericht. Aachen: RWTH Aachen, Lehrstuhl für Lasertechnik. <https://doi.org/10.2314/GBV:667761012>

- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2023). Übersicht Leichtbau. Schlüsseltechnologie Leichtbau. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/leichtbau.html>
- Carneiro, B., Silva, C. & Kaufman, A. (1996). Tetra-Cubes: An algorithm to generate 3D isosurfaces based upon tetrahedra. In L. Velho, A. de Albuquerque & R. Lotuto (Hrsg.), *Anais do SIBGRAPI 96. IX Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens* (S. 205–210). Caxambu, Brasilien.
- Carter, L., Martin, C., Withers, P. & Attallah, M. (2014). The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 615, 338–347. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.172>
- Clark, K. B. & Fujimoto, T. (1991). Product development performance. Strategy, organization, and management in the world auto industry. Boston, USA: Harvard Business School Press.
- Clausen, A., Aage, N. & Sigmund, O. (2015). Topology optimization of coated structures and material interface problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 290, 524–541. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2015.02.011>
- Conner, B., Manogharan, G., Martof, A., Rodomsky, L., Rodomsky, C., Jordan, D. et al. (2014). Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. *Additive Manufacturing*, 1-4, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.005>
- Cooper, R. (1990). Stage-gate systems: A new tool for managing new products. *Business Horizons*, 33(3), 44–54. [https://doi.org/10.1016/0007-6813\(90\)90040-I](https://doi.org/10.1016/0007-6813(90)90040-I)
- Czink, S., Dietrich, S. & Schulze, V. (2022). Ultrasonic evaluation of elastic properties in laser powder bed fusion manufactured AlSi10Mg components. *NDT & E International*, 132, 102729. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102729>
- Da Silva de Siqueira, R. (2020). Design and Optimization Method for Manufacturable Multi-Material Components. Dissertation. Leibniz Universität Hannover, Hannover.
- Da Silva de Siqueira, R., Mozgová, I. & Lachmayer, R. (2019). An interfacial zone evolutionary optimization method with manufacturing constraints for hybrid components. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(3), 387–397. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.10.003>

- Dassault Systèmes. (2017). SIMULIA User Assistance 2017. Controller- Versus Sensitivity-Based Topology Optimization. Verfügbar unter: https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/DSSIMULIA_Established.htm
- Dassault Systèmes. (2019a). SIMULIA User Assistance 2019. User Script Entry Points ("Hooks"). Verfügbar unter: https://help.3ds.com/2022/english/dssimulia_established/tsocmdmap/tso-r-cmd-driver-hooks.htm?contextscope=all&highlight=hook&id=551623cc5d7b4bd3ac359822e9827f57&analyticsContext=search-result&analyticsSearch=hook&myapp=false
- Dassault Systèmes. (2019b). SIMULIA User Assistance 2019. Volume Overview. Verfügbar unter: https://help.3ds.com/2022/english/dssimulia_established/TsoUserMap/tso-c-usr-terms-volume.htm?contextscope=all&highlight=id=a5481153c4a946bd8997e6a5b18afa81
- Despeisse, M. & Ford, S. (2015). The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability. In S. Umeda, M. Nakano, H. Mizuyama, H. Hibino, D. Kiritsis & G. von Cieminski (Hrsg.), Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth (Bd. 460, S. 129–136). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22759-7_15
- Deutscher Bundestag. (2019). Bundes-Klimaschutzgesetz. KSG, 1–10. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg>
- Diegel, O., Nordin, A. & Motte, D. (2019). A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing. Singapur: Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8281-9>
- Ehlers, T. (2023). Auslegung partikelgedämpfter Strukturauteile für die Additive Fertigung. Dissertation. Leibniz Universität Hannover, Hannover. <https://doi.org/10.15488/13789>
- Ehlers, T. & Lachmayer, R. (2022). Design Rules for Laser Beam Melted Particle Dampers. Proceedings of the Design Society, 2, 2443–2452. <https://doi.org/10.1017/pds.2022.247>
- Ehlers, T., Tatzko, S., Wallaschek, J. & Lachmayer, R. (2021). Design of particle dampers for additive manufacturing. Additive Manufacturing, 38. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101752>
- Ellenrieder, G., Gänsicke, T., Goede, M. & Herrmann, H. G. (2013). Die Leichtbaustrategien. In H. E. Friedrich (Hrsg.), Leichtbau in der Fahrzeugtechnik (S. 43–118). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2110-2_3

- Ericson, C. (2004). Real-Time Collision Detection. Boca Raton, USA: CRC Press.
- Fastermann, P. (2014). 3D-Drucken. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-40964-6>
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2013). Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung (9. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29569-0>
- Fish, J. & Belytschko, T. (2007). A First Course in Finite Elements. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470510858>
- Fletcher, R. & Reeves, C. M. (1964). Function minimization by conjugate gradients. *The Computer Journal*, 7(2), 149–154. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.2.149>
- Foroozmehr, E. & Kovacevic, R. (2010). Effect of path planning on the laser powder deposition process: thermal and structural evaluation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(5-8), 659–669. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2659-6>
- Francois, M., Sun, A., King, W., Henson, N., Tourret, D., Bronkhorst, C. et al. (2017). Modeling of additive manufacturing processes for metals: Challenges and opportunities. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21(4), 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.12.001>
- Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik. (2023). 3D-Druck und Leichtbaupotenzial. Verfügbar unter: <https://www.emi.fraunhofer.de/de/forschung/forschungsbeispiele/3d-druck-und-leichtbaupotenzial.html>
- Friedrich, H. E. (2017). Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-12295-9>
- Ganter, N. V., Ehlers, T., Oel, M., Behrens, B.-A., Müller, P., Hübner, S., Althaus, P., Bode, B. & Lachmayer, R. (2023). Do Additive Manufacturing Processes Enable More Sustainable Products? Circulation of Metallic Components Through Repair and Refurbishment by the Example of a Deep-Drawing Tool. In R. Lachmayer, B. Bode & S. Kaierle (Hrsg.), Innovative Product Development by Additive Manufacturing. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-27261-5_1
- Gaynor, A. & Guest, J. (2016). Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54(5), 1157–1172. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1551-x>

- Gebhardt, A. (2013). Generative Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion (4. Aufl.). München: Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446436527>
- Gebhardt, A. (2016). Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion (5. Aufl.). München: Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446445390.fm>
- Gibou, F., Fedkiw, R. & Osher, S. (2018). A review of level-set methods and some recent applications. *Journal of Computational Physics*, 353, 82–109. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.10.006>
- Gibson, I., Rosen, D. W. & Stucker, B. (2010). Additive Manufacturing Technologies. New York, USA: Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
- Gieseke, M., Albrecht, D., Nölke, C., Kaierle, S., Suttmann, O. & Overmeyer, L. (2016). Laserbasierte Technologien. In R. Lachmayer, R. B. Lippert & T. Fahlbusch (Hrsg.), 3D-Druck beleuchtet (S. 19–30). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Global Footprint Network. (2023a). Earth Overshoot Day. About Earth Overshoot Day. Verfügbar unter: <https://www.overshootday.org/about-earth-overshoot-day>
- Global Footprint Network. (2023b). Earth Overshoot Day. German Overshoot Day 2023: 4. Mai. Verfügbar unter: <https://www.overshootday.org/newsroom/press-release-german-overshoot-day-2023-de>
- Global Footprint Network. (2023c). Earth Overshoot Day. Past Earth Overshoot Days. Verfügbar unter: <https://www.overshootday.org/newsroom/past-earth-overshoot-days>
- Grauberger, P., Wessels, H., Gladysz, B., Bursac, N., Matthiesen, S. & Albers, A. (2020). The contact and channel approach – 20 years of application experience in product engineering. *Journal of Engineering Design*, 31(5), 241–265. <https://doi.org/10.1080/09544828.2019.1699035>
- Gu, D. (2015). Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46089-4>

- Gu, D., Meiners, W., Wissenbach, K. & Poprawe, R. (2012). Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 57(3), 133–164.
<https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>
- Guest, J., Prévost, J. & Belytschko, T. (2004). Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 61(2), 238–254.
<https://doi.org/10.1002/nme.1064>
- Harzheim, L. (2019). Strukturoptimierung. Grundlagen und Anwendungen (3. Aufl.). Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel.
- Häussler, P. & Albers, A. (2007). Shape optimisation of parts in dynamic mechanical systems with respect to fatigue. *Journal of Engineering Design*, 18(5), 505–523. <https://doi.org/10.1080/09544820701403821>
- Heldmaier, S., Reichert, S., Li, S. & Albers, A. (2018). Integration of production restrictions into the sizing optimization of sheet metal components. In NAFEMS DACH Konferenz (S. 1–4). Bamberg.
- Henderson, R. M. & Clark, K. B. (1990). Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 9–33.
<https://doi.org/10.2307/2393549>
- Holweg, M., Hoberg, K., Heinen, J. & Pil, F. (2016). Making 3D printing work for you: Defining Business Models for Additive Manufacturing. *European Business Review*, 7(8), 73–78.
- Ibhadode, O., Zhang, Z., Rahnama, P., Bonakdar, A. & Toyserkani, E. (2020). Topology optimization of structures under design-dependent pressure loads by a boundary identification-load evolution (BILE) model. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 62(4), 1865–1883. <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02582-8>
- Jacobson, A., Kavan, L. & Sorkine-Hornung, O. (2013). Robust inside-outside segmentation using generalized winding numbers. *ACM Transactions on Graphics*, 32(4), 1–12. <https://doi.org/10.1145/2461912.2461916>
- Jarre, F. & Stoer, J. (2019). Optimierung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58855-0>

- Jiang, J., Xu, X. & Stringer, J. (2018). Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4), 64. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>
- Joerger, A., Reichert, S., Wittig, C., Sistanizadeh Aghdam, N. & Albers, A. (2021). An Approach for the Transfer of Real Surfaces in Finite Element Simulations. *Lubricants*, 9(8), 77. <https://doi.org/10.3390/lubricants9080077>
- Johannknecht, F. & Lippert, R. B. (2016). Nachhaltigkeit und Business-Cases. In R. Lachmayer, R. B. Lippert & T. Fahrbusch (Hrsg.), *3D-Druck beleuchtet* (S. 31–44). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kärger, L. (2019). Designing CoDiCoFRP Structures: Introduction. In T. Böhlke, F. Henning, A. Hrymak, L. Kärger, K. A. Weidenmann & J. T. Wood (Hrsg.), *Continuous-discontinuous fiber-reinforced polymers. An integrated engineering approach* (S. 249–252). München: Carl Hanser Verlag.
- Kasperovich, G., Haubrich, J., Gussone, J. & Requena, G. (2016). Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 105, 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.070>
- Kempen, K., Thijs, L., van Humbeeck, J. & Kruth, J.-P. (2012). Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia*, 39, 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.059>
- Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* (S. 1942–1948). Perth, Australien: IEEE.
- Khoei, A. (2014). *Extended Finite Element Method. Theory and Applications*. New York, USA: John Wiley & Sons Incorporated.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220, 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- Kirsch, U. (1993). *Structural Optimization*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-84845-2>
- Klahn, C. (2017). *Additive Manufacturing Process Principles: Collection of Illustrations on Principles of Additive Manufacturing Processes*. Zürich, Schweiz: ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000181623>

- Klahn, C., Leutenecker, B. & Meboldt, M. (2014). Design for Additive Manufacturing – Supporting the Substitution of Components in Series Products. In G. Moroni & T. Tullio (Hrsg.), 24th CIRP Design Conference (Bd. 21, S. 138–143). Mailand, Italien.
- Klein, B. (2013). Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-02272-3>
- Klein, B. (2015). FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau (10. Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Kohlhuber, M., Kage, M. & Karg, M. (2016). Additive Fertigung. München, Halle (Saale), Mainz: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- Kopp, G. [Gerhard], Wiedemann, B. & Seeliger, W. (2019). Mit Konzeptleichtbau ungenutzte Potenziale heben: Ökonomischer und ökologischer Nutzen. Stuttgart: Leichtbau BW GmbH.
- Kopp, G. [Gundolf], Burkardt, N. & Majic, N. (2020). Leichtbaustrategien und Bauweisen. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung (2. Aufl., S. 53–72). München: Hanser.
- Krause, D., Schwenke, J., Gumpinger, T. & Plaumann, B. (2018). Leichtbau. In F. Rieg & R. Steinhilper (Hrsg.), Handbuch Konstruktion (2. Aufl., S. 485–507). München: Carl Hanser Verlag München.
<https://doi.org/10.3139/9783446456198.017>
- Kumke, M., Watschke, H. & Vietor, T. (2016). A new methodological framework for design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(1), 3–19. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1139377>
- Lachmayer, R., Ehlers, T. & Lippert, R. B. (2022). Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung (2. Aufl.). Berlin: Springer Viewag.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-65924-3>
- Ladewig, A. (2019). Optische Tomographie. Online Prozessüberwachung für das selektive Laserschmelzen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Lang, A., Gazo, C., Segonds, F., Mantelet, F., Jean, C., Guegan, J. et al. (2019). A Proposal for a Methodology of Technical Creativity Mixing TRIZ and Additive Manufacturing. In R. Benmoussa, R. de Guio, S. Dubois & S. Koziolek (Hrsg.), New Opportunities for Innovation Breakthroughs for Developing Countries and Emerging Economies (Bd. 572, S. 106–116). Cham:

- Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32497-1_10
- Lange, F. (2021). Prozessgerechte Topologieoptimierung für die Additive Fertigung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63133-1>
- Langelaar, M. (2018). Combined optimization of part topology, support structure layout and build orientation for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57(5), 1985–2004. <https://doi.org/10.1007/s00158-017-1877-z>
- Leary, M., Merli, L., Torti, F., Mazur, M. & Brandt, M. (2014). Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures. *Materials & Design*, 63, 678–690. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.015>
- Leutenecker-Twelsiek, B., Klahn, C. & Meboldt, M. (2016). Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing. In L. Wang & T. Kjellberg (Hrsg.), 26th CIRP Design Conference (Bd. 50, S. 408–413). Stockholm, Schweden.
- Lindemann, C., Reiher, T., Jahnke, U. & Koch, R. (2015). Towards a sustainable and economic selection of part candidates for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 21(2), 216–227. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2014-0179>
- Lippert, R. B. (2018). Restriktionsgerechtes Gestalten gewichtsoptimierter Strukturauteile für das Selektive Laserstrahlschmelzen. Dissertation. Leibniz Universität Hannover, Hannover. <https://doi.org/10.15488/3489>
- Lippert, R. B. & Lachmayer, R. (2020). Konstruktion für die Additive Fertigung – Methodik auf den Kopf gestellt? In R. Lachmayer, R. B. Lippert & S. Kai-erle (Hrsg.), Konstruktion für die Additive Fertigung 2018 (S. 1–18). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59058-4_1
- Liu, J. (2016). Guidelines for AM part consolidation. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(2), 133–141. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1175154>
- Liu, J., Gaynor, A. T., Chen, S., Kang, Z., Suresh, K., Takezawa, A. et al. (2018). Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57(6), 2457–2483. <https://doi.org/10.1007/s00158-018-1994-3>

- Liu, S., Li, Q., Chen, W., Tong, L. & Cheng, G. (2015). An identification method for enclosed voids restriction in manufacturability design for additive manufacturing structures. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 10(2), 126–137. <https://doi.org/10.1007/s11465-015-0340-3>
- Majic, N., Albers, A., Kalmbach, M. & Clausen, P. M. (2013). Development and statistical evaluation of manufacturing-oriented bead patterns. *Advances in Engineering Software*, 57, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2012.11.018>
- Martin, J. H., Yahata, B. D., Hundley, J. M., Mayer, J. A., Schaedler, T. A. & Pollock, T. M. (2017). 3D printing of high-strength aluminium alloys. *Nature*, 549, 365–369. <https://doi.org/10.1038/nature23894>
- Mass, Y. & Amir, O. (2017). Topology optimization for additive manufacturing: Accounting for overhang limitations using a virtual skeleton. *Additive Manufacturing*, 18, 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.001>
- Mathiak, F. (2002). Die Methode der finiten Elemente (FEM). Einführung und Grundlagen. Neubrandenburg: Fachhochschule Neubrandenburg.
- Matthiesen, S. (2002). Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells Wirkflächenpaare & Leiststützstrukturen zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau* (Bd. 6). Karlsruhe. <https://doi.org/10.5445/IR/12092002>
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung – Prozess und Methoden. In B. Bender & K. Gercke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Aufl., S. 397–465). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_13
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Hölz, K., Nelius, T., Bremer, F., Wettstein, A. et al. (2018). Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung – Techniken zur Analyse und Synthese. In Karlsruher Institut für Technologie (Hrsg.), *KIT Scientific Working Papers* (Bd. 58). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000080744>
- Merkert, S., Hinke, C., Schleifenbaum, H. & Voswinckel, H. (2012). Geometric complexity analysis in an integrative technology evaluation model (ITEM) for selective laser melting (SLM). *The South African Journal of Industrial Engineering*, 23(2), 97–105. <https://doi.org/10.7166/23-2-333>
- Meske, R. (2007). Non-parametric gradient-less shape optimization in solid mechanics. Habilitationsschrift. Aachen: Shaker Verlag.

- Migliori, A., Sarrao, J., Visscher, W. M., Bell, T., Lei, M., Fisk, Z. et al. (1993). Resonant ultrasound spectroscopic techniques for measurement of the elastic moduli of solids. *Physica B: Condensed Matter*, 183, 1–24. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(93\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0921-4526(93)90048-B)
- Mirzendehdel, A. M. & Suresh, K. (2016). Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, 81, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.08.006>
- Misiun, G., van de Ven, E., Langelaar, M., Geijselaers, H., van Keulen, F., van den Boogaard, T. et al. (2021). Topology Optimization for additive manufacturing with distortion constraints. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 386, 114095. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.114095>
- Mlejnek, H. P. (1992). Some aspects of the genesis of structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 5, 64–69. <https://doi.org/10.1007/BF01744697>
- Nisja, G. A., Cao, A. & Gao, C. (2021). Short review of nonplanar fused deposition modeling printing. *Material Design & Processing Communications*, 3(4). <https://doi.org/10.1002/mdp2.221>
- Oettmeier, K. & Hofmann, E. (2019). Additive Fertigung und deren Auswirkungen auf Supply Chains. In R. Obermaier (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation. Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen* (S. 235–245). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-24576-4_10
- Okereke, M. & Keates, S. (2018). *Finite Element Applications*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67125-3>
- Osher, S. & Fedkiw, R. (2003). *Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces* (Bd. 153). New York, USA: Springer New York.
- Pedersen, C., Hessenauer, B., Sigmund, O. & Albers, A. (2009). Topology Optimization of Dynamically Loaded Structures with Respect to Issues of Noise, Vibration and Harshness (NVH). In NAFEMS World Congress (S. 1-13). Kreta, Griechenland.
- Plocher, J. & Panesar, A. (2019). Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. *Materials & Design*, 183, 108164. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108164>
- Ponche, R., Kerbrat, O., Mognol, P. & Hascoet, J.-Y. (2014). A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing

- process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30(4), 389–398. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2013.12.001>
- Poulsen, T. A. (2003). A new scheme for imposing a minimum length scale in topology optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 57(6), 741–760. <https://doi.org/10.1002/nme.694>
- Prager, W. & Shield, R. T. (1968). Optimal design of multi-purpose structures. *International Journal of Solids and Structures*, 4(4), 469–475. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(68\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(68)90050-4)
- Quarti, M., Selzer, M., Da Pandolfo Veiga, A., Gottlieb, A., Bühler, K., Kachel, G. et al. (2013). Topology optimization methods for guided flow - comparison of optimality criteria vs. phase-field method. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 13(1), 579–580. <https://doi.org/10.1002/pamm.201310271>
- Raddatz, L., Austerjost, J. & Beutel, S. (2018). 3D-Druck: Chancen, Möglichkeiten, Risiken. *Chemie in unserer Zeit*, 52(1), 42–50. <https://doi.org/10.1002/ciuz.201700802>
- Reichert, S., Lorentz, B. & Albers, A. (2016). Influence of flattening of rough surface profiles on the friction behaviour of mixed lubricated contacts. *Tribology International*, 93, 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.01.003>
- Reinhart, G., Lindemann, U. & Heinzl, J. (1996). Qualitätsmanagement. Ein Kurs für Studium und Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-80210-2>
- Revfi, S. (2022). An optimization method for the design of beads in long fiber reinforced polymer structures including the manufacturing process as an approach to realize methodically identified lightweight potentials. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 146). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000143064>
- Revfi, S., Mikus, M., Behdinan, K. & Albers, A. (2020). Bead optimization in long fiber reinforced polymer structures: Consideration of anisotropic material properties resulting from the manufacturing process. *Advances in Engineering Software*, 149, 102891. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2020.102891>
- Rieg, F., Hackenschmidt, R. & Alber-Laukant, B. (2019). *Finite Elemente Analyse für Ingenieure. Grundlagen und praktische Anwendungen mit Z88Aurora*. München: Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446460621>

- Ropohl, G. (1975). Einleitung in die Systemtechnik. In G. Ropohl (Hrsg.), Systemtechnik – Grundlagen und Anwendung (S. 1–77). München Wien: Carl Hanser Verlag.
- Rosen, D. W. (2007). Design for Additive Manufacturing: A Method to Explore Unexplored Regions of the Design Space. In 2007 International Solid Freeform Fabrication Symposium (S. 402–415). Austin, USA: The University of Texas at Austin. <https://doi.org/10.26153/tsw/7227>
- Rösler, J., Harders, H. & Bäker, M. (2012). Mechanisches Verhalten der Werkstoffe (4. Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Sander, C. (2014). Ein neuer Prozess für die Produktentwicklung zur Topologieoptimierung bewegter Bauteile unter besonderer Berücksichtigung des Trägheitseinflusses. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse (Bd. 75). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000043682>
- Sander, C., Petrich, D. & Albers, A. (2012). Erweiterte Topologieoptimierung zur Steigerung der Energieeffizienz bei dynamisch bewegten Systemen. In NAFEMS DACH Konferenz (S. 1–4). Bamberg.
- Sauter, J., Mulfinger, F. & Müller, O. (1992). Neue Entwicklungen im Bereich der Gestalt- und Topologieoptimierung. In ANSYS Users' Meeting. Bad Arolsen: CAD-FEM GmbH.
- Schmidt, L. C. (1958). Fully stressed design of elastic redundant trusses under alternative loading systems. Australian Journal of Applied Science, 9, 337–348.
- Schulz, M. & Albers, A. (2018). Parametrische Optimierung auf Komponentenebene als Basis für einen Optimierungsprozess auf Gesamtfahrzeugebene im Thermomanagement. In NAFEMS DACH Konferenz (S. 1-4). Bamberg.
- Schumacher, A. (2020). Optimierung mechanischer Strukturen. Grundlagen und industrielle Anwendungen (3. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60328-4>
- Schumpeter, J. (1912). Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. Berlin: Duncker und Humblot.
- Schwer, L. E. (2007). An overview of the PTC 60/V&V 10: guide for verification and validation in computational solid mechanics. Engineering with Computers, 23, 245–252. <https://doi.org/10.1007/s00366-007-0072-z>

- Si, H. (2015). TetGen, a Delaunay-Based Quality Tetrahedral Mesh Generator. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 41(2), 1–36. <https://doi.org/10.1145/2629697>
- Sigmund, O. & Maute, K. (2013). Topology optimization approaches. A comparative review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(6), 1031–1055. <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6>
- Sigmund, O. & Petersson, J. (1998). Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 16(1), 68–75. <https://doi.org/10.1007/BF01214002>
- Silber, G. & Steinwender, F. (2005). Bauteilberechnung und Optimierung mit der FEM. Materialtheorie, Anwendungen, Beispiele. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-80048-0>
- Sobol, I. M. (1994). A primer for the Monte Carlo method. Boca Raton, USA: CRC Press.
- Sokolowski, J. & Zochowski, A. (1999). On the Topological Derivative in Shape Optimization. *Siam Journal on Control and Optimization*, 37(4), 1251–1272. <https://doi.org/10.1137/S036301299732320>
- Spadinger, M. & Albers, A. (2019). Designing CoDiCoFRP Structures: A Process-Related Topology Optimization Method to Design DiCoFRP Structures. In T. Böhlke, F. Henning, A. Hrymak, L. Kärger, K. A. Weidenmann & J. T. Wood (Hrsg.), *Continuous-discontinuous fiber-reinforced polymers. An integrated engineering approach* (S. 265–276). München: Carl Hanser Verlag.
- Spencer, H. (1864). *The Principles of Biology*. London, England: Williams and Nor-gate.
- Spiess, H., Oeckerath, A. & Landvogt, B. (2018). MapLib Manual. Version 2013.0. Sankt Augustin.
- Stachowiak, H. (1973). Allgemeine Modelltheorie. Wien, Österreich: Springer.
- Suresh, S., Thore, C.-J., Torstenfelt, B. & Klarbring, A. (2020). Topology optimization accounting for surface layer effects. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 62(6), 3009–3019. <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02644-x>
- Svanberg, K. (1987). The method of moving asymptotes – a new method for structural optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24(2), 359–373. <https://doi.org/10.1002/nme.1620240207>

- Svanberg, K. (2002). A Class of Globally Convergent Optimization Methods Based on Conservative Convex Separable Approximations. *SIAM Journal on Optimization*, 12(2), 555–573. <https://doi.org/10.1137/S1052623499362822>
- Tang, M. (2017). Inclusions, Porosity, and Fatigue of AlSi10Mg Parts Produced by Selective Laser Melting. Dissertation. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA. <https://doi.org/10.1184/R1/6720185.v1>
- Thijs, L., Kempen, K., Kruth, J.-P. & van Humbeeck, J. (2013). Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia*, 61(5), 1809–1819. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.052>
- Thorborg, J., Esser, P. & Bayat, M. (2020). Thermomechanical modeling of additively manufactured structural parts – different approaches on the macroscale. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 861(1), 12008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/861/1/012008>
- Troll, D. (2015). Optimierung langfaserverstärkter Strukturen unter Berücksichtigung der streuenden Materialeigenschaften und der Robustheit. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 90). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Troll, D., Marston, M. P. & Albers, A. (2014). Makroskopische Modellierung von langfaserverstärkten Bauteilen mit streuenden Materialeigenschaften – Be- rücksichtigung der Robustheit in der Strukturoptimierung. *NAFEMS Online Magazin*, 29(1), 63–74.
- Ulu, E., Korkmaz, E., Yay, K., Burak Ozdoganlar, O. & Burak Kara, L. (2015). Enhancing the Structural Performance of Additively Manufactured Objects Through Build Orientation Optimization. *Journal of Mechanical Design*, 137(11), 111410. <https://doi.org/10.1115/1.4030998>
- Umetani, N. & Schmidt, R. (2013). Cross-sectional structural analysis for 3D printing optimization. In B. Chen & A. Sharf (Hrsg.), *SIGGRAPH Asia 2013 Technical Briefs* (S. 1–4). New York, USA: Association for Computing Machinery.
- Vajna, S., Weber, C., Zeman, K., Hehenberger, P., Gerhard, D. & Wartzack, S. (2018). CAx für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung (3. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54624-6>

- Van de Ven, E., Ayas, C., Langelaar, M., Maas, R. & van Keulen, F. (2017). A PDE-Based Approach to Constrain the Minimum Overhang Angle in Topology Optimization for Additive Manufacturing. In A. Schumacher, T. Vietor, S. Fiebig, K.-U. Bletzinger & K. Maute (Hrsg.), Advances in Structural and Multi-disciplinary Optimization. WCSMO 2017 (S. 1185–1199). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67988-4_89
- Vásárhelyi, L., Kónya, Z., Kukovecz, Á. & Vajtai, R. (2020). Microcomputed tomography-based characterization of advanced materials: a review. *Materials Today Advances*, 8, 100084. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100084>
- Vatti, B. R. (1992). A generic solution to polygon clipping. *Communications of the ACM*, 35(7), 56–63. <https://doi.org/10.1145/129902.129906>
- Venkayya, V. B., Khot, N. S. & Reddy, V. S. (1968). Optimization of structures based on the study of energy distribution. In L. Berke, R. M. Bader, W. J. Mykytow, J. S. Przemieniecki & M. H. Shirk (Hrsg.), Proceedings of the Second Conference on Matrix Methods in Structural Mechanics (S. 111–153). Ohio, USA: Air Force Flight Dynamics Laboratory.
- VDI-Richtlinie, 2206 (2004). Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI-Richtlinie, 3405 (2014). Additive Fertigungsverfahren: Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI-Richtlinie, 2221 Blatt 1 (2019). Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Wang, M. Y., Wang, X. & Guo, D. (2003). A level set method for structural topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192(1-2), 227–246. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(02\)00559-5](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(02)00559-5)
- Weicker, K. (2015). Evolutionäre Algorithmen (3. Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-09958-9>
- Weiβbach, W., Dahms, M. & Jaroschek, C. (2018). Werkstoffe und ihre Anwendungen. Metalle, Kunststoffe und mehr (20. Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-19892-3>
- Wirth, N., Bayrasy, P., Landvogt, B., Wolf, K., Cecutti, F. & Lewandowski, T. (2017). Analysis and Optimization of Flow Around Flexible Wings and Blades Using the Standard Co-simulation Interface MpCCI. In P. Doerffer, G. N. Barakos & M. M. Luczak (Hrsg.), Recent Progress in Flow Control for

- Practical Flows (S. 283–321). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50568-8_15
- Wong, K. K., Ho, J. Y., Leong, K. C. & Wong, T. N. (2016). Fabrication of heat sinks by Selective Laser Melting for convective heat transfer applications. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 159–165. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1211849>
- Wynn, D. C. & Clarkson, P. J. (2018). Process models in design and development. *Research in Engineering Design*, 29, 161–202. <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0262-7>
- Xie, Y. M. & Steven, G. P. (1993). A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & Structures*, 49(5), 885–896. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(93\)90035-C](https://doi.org/10.1016/0045-7949(93)90035-C)
- Zaretskiy, Y., Geiger, S., Sorbie, K. & Förster, M. (2010). Efficient flow and transport simulations in reconstructed 3D pore geometries. *Advances in Water Resources*, 33(12), 1508–1516. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.08.008>
- Zhang, B., Li, Y. & Bai, Q. (2017). Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30, 515–527. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0121-5>
- Zhou, M. & Rozvany, G. (1991). The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 89(1-3), 309–336. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(91\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(91)90046-9)
- Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S. & Zhang, W. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), 91–110. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020>
- Zuo, K.-T., Chen, L.-P., Zhang, Y.-Q. & Yang, J. (2007). Study of key algorithms in topology optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 787–796. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0387-0>

Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Arbeit am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor co-betreut wurden:

- Buck, T. (2020). Entwicklung einer Methode zur automatisierten Zuweisung SLM-spezifischer Materialeigenschaften in einer Topologieoptimierung auf Basis der Aufbaurichtung. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Glaser, V. (2019). Entwicklung einer Methode zur simulativen Berücksichtigung der durch den SLM-Prozess hervorgerufenen Randschicht innerhalb einer 2D-Topologieoptimierung. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kreissig, M. (2020). Entwicklung einer Methode zur Berücksichtigung des SLM-spezifischen Randbereichs innerhalb einer 3D-Topologieoptimierung. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Lenhardt, S. (2021). Simulative Untersuchung des Einflusses der durch den SLM-Prozess entstehenden inhomogenen Materialeigenschaften auf die Topologieoptimierung in 2D und 3D. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Schiedermair, V. (2020). Entwicklung einer Methode zur computergestützten Quantifizierung des Oberflächeneinflusses auf die Materialeigenschaften im SLM-Verfahren. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Träger, L. (2020). Entwicklung einer Methode zur simulativen Berücksichtigung der durch den SLM-Prozess hervorgerufenen Materialeigenschaften innerhalb einer 2D-Topologieoptimierung. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Wexel, H. (2020). Einfluss der Defektdichte auf das elastische Materialverhalten von additiv gefertigten Bauteilen aus AlSi10Mg. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Wiegert, S. (2020). Computertomografische Mikrostrukturanalyse additiv gefertigter Bauteile aus AlSi10Mg. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Arbeit entstanden sind:

- Albers, A., Haberkern, P., Holoch, J., Joerger, A., Knecht, S., Renz, R. et al. (2022). Strategische Planung des Entwicklungsrisikos gekoppelter CAE-Methoden. Konstruktion, 74(09), 72–77. <https://doi.org/10.37544/0720-5953-2022-09>
- Albers, A., Holoch, J., Dietrich, S. & Spadinger, M. (2018). SLM-Topo – A topology optimization method for additive manufacturing of lightweight design structures using the selective laser melting process. In NAFEMS Nordic Seminar (S. 62–63). Helsinki, Finnland.
- Albers, A., Holoch, J., Revfi, S. & Spadinger, M. (2021). Lightweight design in product development: a conceptual framework for continuous support in the development process. In E. Lutters (Hrsg.), 31st CIRP Design Conference 2021 (Bd. 100, S. 494–499). Eschede, Niederlande.
- Czink, S., Holoch, J., Renz, R., Schulze, V., Albers, A. & Dietrich, S. (2023). Process-Specific Topology Optimization Method Based on Laser-Based Additive Manufacturing of AlSi10Mg Components: Material Characterization and Evaluation. Processes, 11(3), 648. <https://doi.org/10.3390/pr11030648>
- Holoch, J., Czink, S., Spadinger, M., Dietrich, S., Schulze, V. & Albers, A. (2020). SLM-Topo - Prozessspezifische Topologieoptimierungsmethode für im Selektiven Laserschmelzen gefertigte Leichtbaustrukturen. Industrie 4.0 Management, 45–49.
- Holoch, J., Lenhardt, S. & Albers, A. (2022a). Additive Fertigung von Aluminiumstrukturen im SLM-Prozess: Berücksichtigung der Prozesscharakteristiken in einer Topologieoptimierung zur Unterstützung der Designfindung. NAFEMS Online-Magazin, 61(1), 65–73.
- Holoch, J., Lenhardt, S. & Albers, A. (2022b). Einfluss verschiedener Bauteilabmessungen auf eine Topologieoptimierungsmethode zur iterativen Berücksichtigung elastischer Materialeigenschaften aus dem SLM. In NAFEMS DACH Konferenz (S. 495–500). Bamberg.
- Holoch, J., Lenhardt, S., Renz, R. & Albers, A. (2021). Investigation on the Influence of Different Modeling of Multiple Surface Layers on a 3D Topology Optimization. In NAFEMS World Congress (S. 1–14). Online Konferenz.
- Holoch, J., Lenhardt, S., Revfi, S. & Albers, A. (2022). Design of Selective Laser Melting (SLM) Structures: Consideration of Different Material Properties in

Multiple Surface Layers Resulting from the Manufacturing in a Topology Optimization. *Algorithms*, 15(3), 99. <https://doi.org/10.3390/a15030099>

Holoch, J., Träger, L. & Albers, A. (2020). Einfluss unterschiedlicher Modellierung von Randschicht und innerem Volumen auf eine 2D Topologieoptimierung. In NAFEMS DACH Konferenz (S. 106–109). Online Konferenz.

Nöller, M., Holoch, J., Pagel, S., Rombach, J., Legat, J., Bonten, C. et al. (2022). Lightweight Multi-Material-Design of a Liquid Cooled 18650 Cell Holder. In Karlsruher Institut für Technologie (Hrsg.), KIT Scientific Working Papers (Bd. 184). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000144258>

Revfi, S., Albers, A., Holoch, J. & Spadinger, M. (2018). Extended Target Weighing Approach – A system lightweight design approach for new product generations. In P. Ermanni, M. Meboldt, S. Wartzack, D. Krause & M. Zogg (Hrsg.), Symposium Lightweight Design in Product Development (S. 29–31). Zürich, Schweiz. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000283432>

