

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel dient der Darstellung des für die vorliegende Arbeit relevanten Stands der Technik. Im Rahmen der Zusammenfassung der Grundlagen der methodischen Produktentwicklung erfolgt zunächst die Darstellung der grundlegenden Zusammenhänge von Produktentwicklungsmethoden sowie der Gestaltung von Bauteilen. Daran anknüpfend wird die laseradditive Fertigung erörtert. Dabei werden insbesondere Verfahrensgrundlagen, verfahrenstypische Eigenheiten sowie grundlegende Ansätze für die fertigungsgerechte Gestaltung zusammengefasst. Es folgt eine Betrachtung der im Leichtbau angewendeten Konstruktionsstrategien und Prinzipien. Nach den Grundlagen der Strukturoptimierung, insbesondere der Topologieoptimierung, und ihrer Integration in den Konstruktionsprozess schließt das Kapitel mit der Zusammenfassung der wichtigsten Zusammenhänge der gestaltungsbegleitenden Kostenbetrachtung.

2.1 Grundlagen der methodischen Produktentwicklung

Die zentrale Aufgabe des Ingenieurs im Rahmen der Produktentwicklung ist das Entwickeln von Lösungen für technische Probleme. Dabei stützt er sich u.a. auf bereits gewonnene Erkenntnisse und berücksichtigt bestimmte Anforderungen und Einschränkungen [Pah07]. Ein kompliziertes und vielschichtiges Vorgehen ist oft die Folge. Im Ergebnis beinhaltet dieses Vorgehen oft Entscheidungen, die den Erfolg eines Produktes maßgeblich bestimmen können. Ein methodisches Vorgehen kann daher dabei helfen, Denkprozesse zu fördern, um die Intuition, Phantasie und Kreativität des Ingenieurs zielgerichtet auf das vorhandene Problem zu lenken.

Die Ideen, Kenntnisse und Fähigkeiten des Entwicklungsingenieurs bestimmen u.a. maßgeblich die technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Eigenschaften des Produkts. Die frühzeitige und zielgerichtete Identifikation von Lösungen für Probleme im Rahmen der Produktentwicklung kann dazu beitragen, iterative Produktanpassungen und kostenintensive Adaptionen zu vermeiden. Vor diesem Hintergrund ist die erfolgreiche Durchführung von Problemlösungsprozessen durch die Anwendung der methodischen Produktentwicklung von besonderer Bedeutung [Pah07].

Im Rahmen dieses Abschnitts werden zunächst die Begriffe „Methode“ und „Methodik“ erläutert. Nach einer kurzen Abhandlung des Auflösungsgrades des Produktentwicklungsprozesses werden bekannte Produktentwicklungsmethoden vorgestellt. Abgeschlossen wird dieser Abschnitt mit einem Blick auf die Grundlagen der Gestaltung und einer kurzen Einführung in das fertigungsgerechte Gestalten.

2.1.1 Definition von Methode und Methodik

Methoden werden innerhalb des Produktentwicklungsprozesses eingesetzt, um einzelne Schritte zielgerichtet und effizient durchzuführen. Eine Methode beschreibt ein regelbasiertes und planmäßiges Vorgehen, nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen. Überdies ist eine Methode zielorientiert auf die Lösung eines Problems oder Aufgabenstellung fokussiert. Methoden bieten Vorschläge für die Abfolge bestimmter Tätigkeiten an und die Art und Weise, in der diese Tätigkeiten durchzuführen sind [Ehr07, Lin05, Nae09, Pon08].

Eine einzelne Methode kann auch aus einer Kombination und Zusammenfassung verschiedener Einzelmethode bestehen. Für derartige Methodenkombinationen wird oft der Begriff Methodik verwendet [Ehr07, Pon08]. Methoden dienen in diesem Sinne als Hilfsmittel, um die Komplexität der Sachverhalte besser handhaben zu können. Mit ihrer Hilfe können komplexe Probleme in überschaubare Teilprobleme heruntergebrochen werden, Handlungsschwerpunkte und Zielkonflikte einfacher erkannt und herausgearbeitet werden. Des Weiteren können Methoden auch dazu beitragen, Denkbarrieren zu überwinden und die für den Entwicklungsprozess notwendige Kreativität zu fördern [Ehr07, Lin05, Pon08].

2.1.2 Auflösungsgrad von Produktentwicklungsprozessen

Entwicklungsprozesse können je nach Anwendungsfall sehr umfangreich und komplex ausfallen. Daher ist es häufig sinnvoll, die Abläufe der Entwicklung in einzelne logisch abgrenzbare Abschnitte zu unterteilen. Eine wichtige Rolle spielt hier der Auflösungsgrad der Betrachtung. Abbildung 2.1 fasst die typischen Auflösungsgrade des Produktentwicklungsprozesses zusammen. Bei der Prozessbetrachtung auf Ebene der *elementaren Handlungs- und Denkabläufe* handelt es sich um Zyklen aus Analyse, Synthese und Bewertung, die sich in kürzester Zeit im Gehirn des Entwicklers abspielen [Lin05].

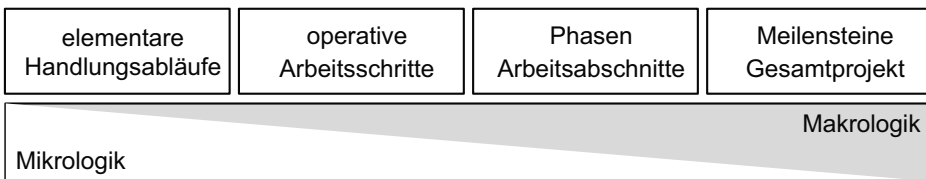


Abbildung 2.1 Auflösungsgrade des Produktentwicklungsprozesses; nach [Lin05]

Daneben ist eine Betrachtung auf der nächst höheren Ebene der *operativen Arbeitsschritte* möglich. Ein Beispiel ist das Münchener Vorgehensmodell (MVM) nach Lindemann et al. [Lin05], welches unter anderen auf Grundlage der erwähnten elementaren Handlungsmodelle entwickelt wurde. Die Ebene der *Phasen* beinhaltet größere Arbeitsschritte. Als Beispiel kann die in Abschnitt 2.1.3 erläuterte VDI-Richtlinie [VDI2221] angeführt werden. Ein niedriger Auflösungsgrad auf der Ebene des *Gesamtprojektes* hilft

schließlich dabei, komplexe Prozesse übersichtlich darzustellen. Die Grenzen zwischen den Stufen sind allerdings fließend und manche Modelle können auf verschiedenen Ebenen angewendet werden [Lin05].

Zu Beginn eines tatsächlichen Produktentwicklungsprojektes kann der gesamte Prozess unmöglich mithilfe von Visualisierungsansätzen im Detail vorausgeplant werden. Das Vorgehen hängt oftmals von spezifischen Rahmenbedingungen und von Zwischenergebnissen ab, sodass sich trotz ähnlicher Aufgabenstellung unterschiedliche Entwicklungssituationen ergeben. Einflussfaktoren wie die Art und Komplexität des zu entwickelnden Produktes, die zur Verfügung stehende Zeit, vorhandene Ressourcen, der Mensch und viele weitere Faktoren spielen hierbei eine maßgebliche Rolle [Lin05, Pah07].

2.1.3 Produktentwicklungsmethoden und -ansätze

Die VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221] schlägt ein Phasenmodell zur Entwicklung und Konstruktion technischer Produkte vor. Sie beinhaltet vier Phasen (*Planen, Konzipieren, Entwerfen, Ausarbeiten*), denen insgesamt sieben Schritte zugeordnet werden. In Abbildung 2.2 ist der allgemeine Ablauf dargestellt. Schritt eins umfasst das *Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung*. Neben einer technischen Definition und Strukturierung der Aufgabe werden in diesem Schritt die erforderlichen Anforderungen geklärt und in einer *Anforderungsliste* festgehalten. Die Definition der Anforderungen sollte vollständig, genau, relevant, unabhängig von spezifischen Lösungen und richtig sein. Jedoch ist es in der Praxis häufig der Fall, dass zu Beginn eines Entwicklungsprojektes nicht sämtliche Anforderungen zur Verfügung stehen. Daher müssen die Anforderungen sowie auch die Aufgabenstellung über alle Phasen hinweg hinterfragt und ggf. präzisiert werden.

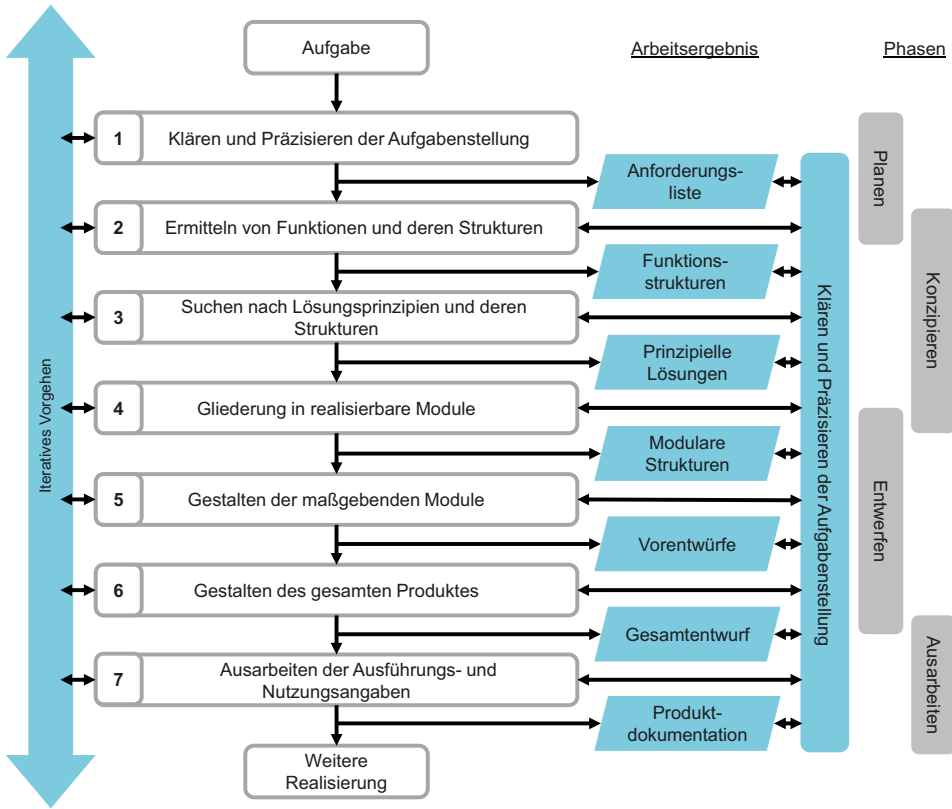


Abbildung 2.2 VDI-Richtlinie für die Entwicklung und Konstruktion technischer Produkte; nach [VDI2221]

In Schritt zwei erfolgt die prinzipielle Festlegung der Funktionen und deren Strukturen. Dabei wird das Produkt durch Gesamt- und Teilfunktion beschrieben. Nach einer Klassifizierung und Strukturierung ist das Ergebnis eine *Funktionsstruktur* des Produktes. Im dritten Schritt wird nach Prinzipien und realisierbaren Wirkelementen für jede Teilfunktion gesucht. Das Ergebnis sind *Prinziplösungen* als Kombination der Wirkelemente in Form von Skizzen und Beschreibungen. In Schritt vier erfolgt eine mögliche Gliederung in Module (*Modulare Strukturen*), welche in Schritt fünf entsprechend ausgestaltet werden. Dies umfasst den *Vorentwurf* sämtlicher Komponenten des Produktes in Form von Skizzen, Zeichnungen oder Beschreibungen. Die Vorentwürfe werden in Schritt sechs unter Berücksichtigung des Gesamtproduktes detailliert ausgearbeitet (*Gesamtentwurf*). Mit inbegriffen sind hier ebenfalls das Vorbereiten und Durchführen von Tests und Erprobungen von Bauteilen sowie des Gesamtsystems. Im letzten Schritt erfolgt die Erstellung der *Produktdokumentation*, was die Erstellung von Fertigungsunterlagen und Nutzungsinformationen beinhaltet [VDI2221].

Zur Unterstützung der Anwendung von Methoden werden methodische Hilfs-Werkzeuge zur Verfügung gestellt. Beispiele hierfür sind unter anderem Rechenprogramme für die

numerische Simulation, Kreativitätstechniken, Bewertungsmethoden oder auch Formblätter und Checklisten [VDI2221]. Nach Pahl und Beitz [Pah07] kann oftmals erst durch die Verfügbarkeit gewisser Werkzeuge der Erfolg einer Methodenanwendung garantiert werden. Ähnliche, eng mit der VDI-Richtlinie verwandte bzw. daran angelehnte Ansätze, sind in der Fachliteratur der Konstruktionsmethodik zu finden [Pah07, Pon08, Kol98, Rod91].

Entwicklungsmethoden verfolgen in jedem Auflösungsgrad in der Regel einen kontinuierlichen Übergang vom Abstrakten zum Konkreten („Top-Down“-Ansatz) [Pul04]. Der tatsächlichen Praxis entsprechend ist über alle Schritte stets ein *iteratives Vorgehen* vorgesehen. Ebenfalls sind eine *parallele Bearbeitung* sowie das Auslassen bestimmter Schritte üblich. Aus Abbildung 2.2 wird nicht ersichtlich, dass grundsätzlich in jedem Schritt *Varianten* erstellt, bewertet, ausgewählt und optimiert werden. Genauso ist die nach jedem Schritt folgende Entscheidungsphase in der Visualisierung des VDI-Standardablaufes nicht dargestellt, siehe Pahl und Beitz [Pah07]. Hierin wird jeweils der Übergang in die nächste Phase anhand einer *technisch-wirtschaftlichen Bewertung* entschieden.

Nach Pahl et al. [Pah07] ist die Produktentwicklung ein Informationsverarbeitungsprozess, in dem Informationen nacheinander gewonnen, verarbeitet und ausgegeben werden. Daher ist es im Sinne des Informations-, Wissens-, und Kommunikationsmanagements wichtig, implizites Wissen durch geeignete Maßnahmen als explizites Wissen bereitzustellen [Krc05, Keu09]. Hierbei handelt es sich oftmals um Informationen, die über die reine Visualisierung nicht transportiert werden bzw. werden können. Daher schlägt der Ansatz nach Krause et al. [Kra13] eine visuell unterstützte Einbindung einer klar definierten Zielstellung des Prozesses, von notwendigem Wissen, von Hinweisen zur Prozessdurchführung sowie von unterstützenden methodischen Hilfs-Werkzeugen vor.

Der vorgestellte methodische Produktentwicklungsansatz aus [VDI2221] legt den Fokus auf die Neuentwicklung technischer Produkte. Ein Großteil der Konstruktionsaufgaben sind jedoch keine Neukonstruktionen. Die anfallenden Konstruktionsaufgaben bestehen zu ca. 90 % aus Anpassungs- und Variantenkonstruktionen [Pah07, Ehr07]. Demnach wird bei der Entwicklung von Produkten oft seltener von einem Konzept, als einem bestehenden Ausgangsbauteil ausgegangen.

Der Ansatz des sogenannten *Reverse-Engineering* (RE) befasst nach der gängigen Auffassung im Wesentlichen mit der Rückführung von Geometriedaten aus einem physischen Bauteil und den dafür erforderlichen optischen und rechnergestützten Technologien, sowie das Zurückverfolgen und Nachvollziehen von Entwicklungswegen einzelner Produkte mit einer Orientierung in Richtung einer angestrebten Neugestaltung [Ott98, Gho04, Pal06, Mon07, Raj08]. Meyer-Eschenbach et al. [Mey14] stellen in diesem Zusammenhang einen Leitfaden zur methodischen Weiterentwicklung von Bauteilen vor. Es werden die Projektschwerpunkte des *Reverse-Engineering* und des, wie eingangs beschrieben, entgegengesetzten Vorgehens (*Forward-Engineering*) gegenübergestellt.

Dabei wird herausgestellt, dass sich *RE-Projekte* durch die folgenden Punkte auszeichnen [Mey14]:

- Vorauswählen von Bauteilen oder Baugruppen anhand von Kriterien
- Analysieren der Bauteile, Rahmenbedingungen und Systemumgebung und Klären von wichtigen Anforderungen sowie Abschätzen der Verbesserungspotenziale
- Prüfen der Anwendbarkeit neuer Technologien für die Bauteilentwicklung und Auswählen von Bauteilen unter Beachtung von Nutzen und Entwicklungsrisiko

Insbesondere die Analyse des Ausgangsbauteils, des Systems und ggf. der Systemumgebung werden als wichtige Bestandteile des Leitfadens angesehen [Mey14]. Ausgehend von dem bestehenden Bauteil werden anschließend verschiedene Lösungsvarianten erarbeitet, wobei im Rahmen der Gestaltung neben einer methodischen Variantenbildung ebenfalls die Topologieoptimierung herangezogen werden kann, siehe Abschnitt 2.4. Aufgrund der Bauteilsubstitution muss eine anschließende Systemintegration der optimierten Bauteile berücksichtigt werden, da sich das Systemverhalten maßgeblich verändern kann. Erfüllt das Gesamtsystem nach Substitution einzelner Komponenten oder Bauteile nicht mehr die Anforderungen, so sind aufwendige und häufig sehr kostspielige Iterationsschritte erforderlich. Umso wichtiger ist daher eine sorgfältige Klärung der Anforderungen und Randbedingungen in den frühen Phasen der Entwicklung.

2.1.4 Grundlagen der Gestaltung

Die Gestalt eines physischen Produktes setzt sich aus der Gesamtheit seiner geometrisch beschreibbaren Merkmale sowie seiner Werkstoffart und -charakteristika zusammen [Pon08]. Die Gestaltung ist Bestandteil der Entwurfsphase, siehe Abschnitt 2.1.3, und kann in der Regel als ein mehrmals zu durchlaufender Optimierungsprozess angesehen werden, bei dem in jedem Durchlauf überprüft werden muss, ob die Anforderungen erfüllt werden [Hab07].

Zur Unterstützung der Gestaltung werden sowohl Gestaltungsgrundregeln und -prinzipien als auch Gestaltungsrichtlinien angewendet. Dabei haben die den Richtlinien zu Grunde liegenden Gerechtigkeiten hinsichtlich der Gestaltung einen eher einschränkenden Charakter. Diese Gestaltungsrichtlinien helfen jedoch, den jeweiligen Hauptanforderungen im Sinne eines „Design for X“ gerecht zu werden [Pul04]. Gestaltungsprinzipien stellen allgemeine Grundsätze dar, die der Optimierung eines Produktes dienen. In Abbildung 2.3 ist eine zusammenfassende Übersicht abgebildet. Ebenso spielen branchen- und unternehmensspezifische Konstruktionsgrundsätze sowie spezielle Sicherheits-, Fertigungs- und Werksnormen eine wesentliche Rolle und müssen ggf. je nach Anwendungsfall bei der Gestaltung ebenso Berücksichtigung finden [Pah07].



Abbildung 1.3 Gestaltungsregeln, -prinzipien und –richtlinien; nach [Pah07, Hab07, Kün03]

Während zu Anfang der Gestaltung eine Vordimensionierung und erste maßstäbliche Darstellungen zur Klärung der räumlichen Verträglichkeit im Vordergrund stehen, gewinnen mit zunehmender Konkretisierung des Entwurfes Gesichtspunkte wie Herstellung, Montage, Gebrauch, Wartung und Entsorgung zunehmend an Bedeutung [Hab07]. Dieses vom Abstrakten zum Konkreten strukturierte Vorgehen entspricht dem allgemein typischen Vorgehen, welches die bekannten Produktentwicklungsmethoden vorgeben, vergleiche Abschnitt 2.1.3. Nach einer Phase der Grobgestaltung folgt üblicherweise eine Feingestaltungsphase. Dafür stehen verschiedene methodische Werkzeuge zur Verfügung. Neben der Gestaltvariation, die eng verwandt mit der GALFMOS-Methode ist, helfen z.B. der morphologische Kasten, Lösungs- und Konstruktionskataloge oder Kreativitätstechniken wie das Brainstorming [Lin05, Pah07, Pon08].

Im Rahmen jeder Gestaltung (insbesondere bei leichtbaugerechter Gestaltung) besteht der „fundamentale Zielkonflikt des Maschinenbaus“ [Pon08]. Aus Sicht der Strukturökonomie müssen einerseits den geforderten Belastungen zuverlässig standgehalten werden. Andererseits soll das Produkt so massearm und kostengünstig wie möglich gestaltet sein. Hier sind insbesondere die Prinzipien der Kaskadierung, das Prinzip des kürzesten Kraftflusses, siehe Abbildung 2.3, und eine belastungsgerechte Werkstoffwahl von Bedeutung [Pon08, Pah07].

Nach Pahl und Beitz [Pah07] kann der Gestaltungs- bzw. Entwurfsprozess sehr komplex sein. So müssen viele Tätigkeiten zeitlich parallel ausgeführt werden und manche Arbeitsschritte sind auf höherer Informationsstufe im Sinne von Iterationsschritten zu wie-

derholen. Ein strenger Ablaufplan des Entwerfens ist daher nur begrenzt aufstellbar. Demnach sollte die Definition eines prinzipiellen Vorgehensplans mit Hauptarbeitsschritten einer detaillierten Prozessbeschreibung vorgezogen werden.

2.1.5 Fertigungsgerechtes Gestalten - Design for Manufacturing

Fertigungsgerechtes Gestalten (DFM – Design For Manufacturing) strebt durch konstruktive Maßnahmen eine Minimierung der Fertigungskosten und -zeiten sowie eine anforderungsgemäße Einhaltung fertigungsabhängiger Qualitätsmerkmale an. Demnach wird präventiv, d.h. in einer möglichst frühen Konstruktionsphase, durch Analyse und Optimierung von Produkten und Prozessen darauf abgezielt, Kosten und Aufwendungen zu reduzieren sowie die Qualität der Produkte zu verbessern bzw. abzusichern [Dfm01, Pah07].

Bei der Gestaltung müssen neben der reinen Funktionserfüllung (DFF – Design For Function) also ebenso die Aspekte der Fertigung (DFM - Design For Manufacturing) und auch der Montage (DFA - Design For Assembly) berücksichtigt werden. Zusammenfassen lassen sich diese drei Gesichtspunkte nach Shipulski [Shi07] insgesamt als *kostengerechtes Gestalten* (DFC – Design For Costs), da eine Kostenreduktion das übergeordnete Ziel beider Ansätze darstellt, siehe auch Abschnitt 2.5.1.

Der Erfolg eines Entwicklungsprozesses kann anhand der Parameter Funktionserfüllung, Kosten- und Termineinhaltung (Qualität, Kosten und Zeit) gemessen werden [Ehr07]. Durch Berücksichtigen von Gestaltungsrichtlinien zur fertigungsgerechten Gestaltung wird, wie oben beschrieben, in erster Linie den Kosten und der Qualität Rechnung getragen. Zudem wird auch die Termineinhaltung (Zeit) positiv beeinflusst, da vorbeugend mögliche Iterationen während der Bauteilentwicklung vermieden werden können.

2.2 Grundlagen der Laseradditive Fertigung

Die Gruppe der additiven Fertigungsverfahren ist gemäß DIN 8580 den urformenden Verfahren zuzuordnen. Aufgrund der Vielfalt der verfahrenstechnischen Varianten, vergleiche auch VDI 3404 *Additive Fertigungsverfahren – Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen* [VDI07], wird sich im Folgenden auf das für diese Arbeit relevante Verfahren der laseradditiven Fertigung mit einem Fokus auf die Leichtbaulegierung TiAl6V4 beschränkt. Die laseradditive Fertigung selbst umfasst alle laserbasierten additiven Fertigungsprozesse. Gegenwärtig verarbeitbare Materialien sind den Gruppen der Polymere, Keramiken sowie Metalle zuzuordnen. Weitere Bezeichnungen und eingetragene Warenzeichen des Verfahrens sind u.a. Direct Metal Laser Sintering, Selective Laser Melting (SLM), Laser Cusing, Laser Freeform Fabrication und Lasergenerieren [Emm13a, Zäh06, Geb07, Sch14]. Für eine umfassendere Übersicht sei an dieser Stelle u.a. auf [Geb07, Sch12, Woh13] verwiesen. Es folgt eine Übersicht über die Verfahrensgrundlagen, wesentlicher Einflussgrößen auf den Fertigungsprozess sowie der Grundla-

gen von im Prozess entstehender Eigenspannungen und dem Werkstoff TiAl6V4. Der Abschnitt schließt mit der Zusammenfassung bislang verfügbarer Ansätze für die fertigungsgerechte Konstruktion sowie die Bauteilgestaltung für die laseradditive Fertigung.

2.2.1 Verfahrensgrundlagen

Die laseradditive Fertigung (auch Laser Additive Manufacturing bzw. LAM) stellt ein Verfahren zur schichtweisen, werkzeuglosen Bauteilfertigung direkt aus einkomponentigen Metallpulvern dar. Im Rahmen des Prozesses erfolgt eine nahezu direkte Umsetzung von 3D-CAD Daten in ein schichtweise aufgebautes, physisches Bauteil [Buc13, Geb07, Sch14, Zäh06].

Die verfahrensbedingte Zerlegung von komplexen dreidimensionalen Fertigungsaufgaben in einfachere zweidimensionale Fertigungsschritte bedingt eine in der Regel gegenüber konventionellen Verfahren höhere geometrische Gestaltungsfreiheit. Insbesondere für Leichtbauanwendungen stellt dies ein großes Potential dar [Bur03, Emm11a, Emm11b, Emm11c, Emm13a, Kra14, Kra15]. Geometrie und Stoffeigenschaften werden seitens des Werkstücks im Prozess geschaffen. Die Fertigung selbst erfolgt werkzeuglos [Buc13, Geb07, Kru05b, Sch14].

Entsprechend Abbildung 2.4 dient als Ausgangsbasis für die Fertigung das Bauteilmmodell eines 3D-CAD-Systems im STL-Format, anhand dessen die Bauteilausrichtung im Bauraum erfolgt. Grundlage des STL-Formates ist die Beschreibung und Approximation einer Bauteiloberfläche mittels Dreiecksfacetten. Je nach Fertigungsaufgabe ist die Anordnung mehrerer Bauteile im Bauraum möglich [Geb07, Zäh06].

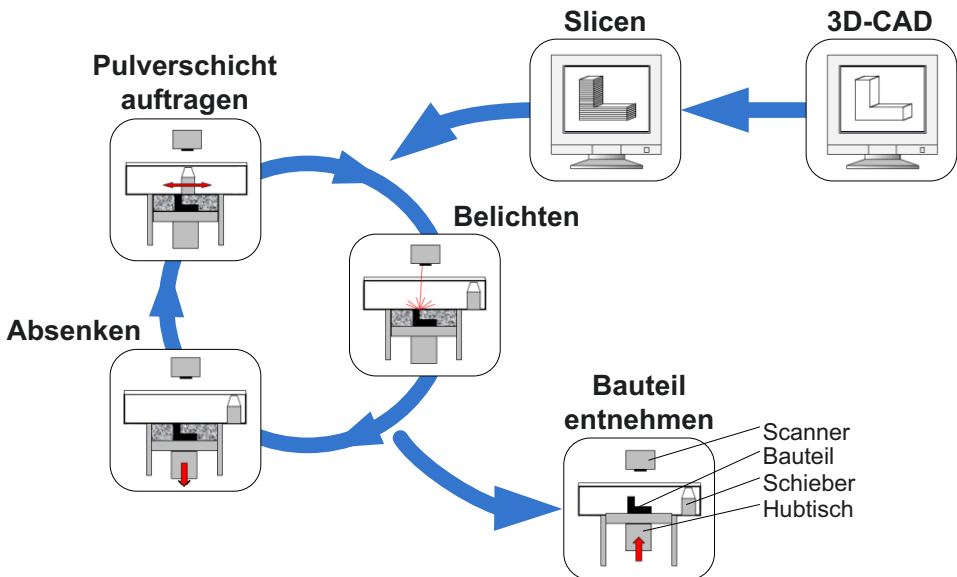


Abbildung 2.4 Verfahrensablauf der laseradditiven Fertigung; nach [Lei04]

Daran anschließend können der vorliegenden Geometrie bei Überhängen automatisch Supportstrukturen, auch Stützstrukturen genannt, aus feinen Gitterelementen hinzugefügt werden, siehe Abbildung 2.5, um hauptsächlich zwei Problemen entgegenzuwirken [Ove03, Zäh06].

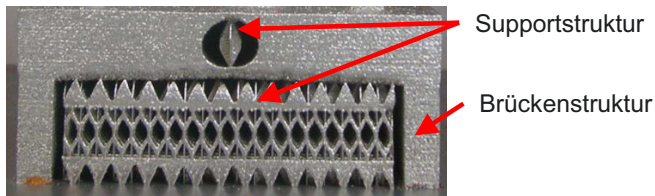


Abbildung 2.5 Supportstrukturen bei einem Überhang und einer Bohrung [Cas05]

Zum einen können bei großen Überhängen durch die schlechte Stützwirkung des Pulvers bedingte Fehler im Bauteilaufbau entstehen, da die aufgeschmolzene Bauteilschicht in die darunter liegenden Pulverschichten fließen kann. Zum anderen führen Temperaturgradienten zwischen der Strahl-Stoff-Wechselwirkungsstelle und den umgebenden bereits aufgeschmolzenen Bereichen beim Abkühlvorgang zu unterschiedlichen Schwindungen und damit Eigenspannungen. Die Folge können eine Verringerung der Formstabilität während des Abkühlungsvorgangs, ein Bauteilverzug und das Ablösen einzelner Schichten sein. Letzteres kann zu einer Kollision des Schiebers, siehe Abbildung 2.4, mit der obersten Bauteilschicht und einer Beschädigung des Bauteils führen. Entsprechend platzierte Supportstrukturen können diese Effekte minimieren [Geb07, Ove03, Zäh06]. Anschließend wird das Bauteil in die für das Verfahren typischen Schichten unterteilt, was auch als „slicen“ bezeichnet wird. Nach der Definition der Prozessparameter, siehe Abschnitt 2.2.2, erfolgt anschließend die eigentliche Fertigung des Bauteils.

Die Bauteilfertigung wird auf einer mit dem Hubtisch verbundenen Bauplattform durchgeführt. Diese fixiert das Bauteil und kann bei Hybridbauteilen in die Bauteilstruktur integriert sein. Zu Beginn wird der Hubtisch zunächst um die Schichtdicke **abgesenkt** und mittels Nivellier- und Pulverauftragssystem eine ebene Pulverschicht **aufgetragen**. Daran anschließend wird das Metallpulver durch die Laser-Scanner-Einheit **belichtet** und entsprechend der Daten aus dem Slice-Prozess vollständig aufgeschmolzen. Dazu finden in der Regel Yb-Faserlaser mit Leistungen von 200-1000 W und Fokusburchmessern von 50 – 500 µm Verwendung [Woh13]. Typische Aufbauraten liegen je nach Werkstoff und Anlagentechnik mit einem Laser zwischen 2 und 20 cm³/h [Aum08, Con08, EOS08]. Die Erstarrung der Schmelze erfolgt durch Wärmeleitung. Eine Inertisierung der Prozesskammer dient der Reduktion der Metallschmelzenoxidation und eine Beheizung des Bauraums zur Verringerung der Temperaturgradienten beim Abkühlen und damit der Verringerung der Eigenspannungen [Geb07, Kru05]. Typische gegenwärtig verfügbare Abmessungen für pulverbettbasierte Maschinenkonzepte liegen

je nach Anlagenkonzept zwischen 250 mm x 250 mm x 250 mm und maximal 630 mm x 400 mm x 500 mm [Woh13].

Durch das Wiederholen dieses Prozesses wird der pulverförmige Ausgangswerkstoff durch lokales Einbringen von Energie schichtweise aufgeschmolzen, verfestigt und verbunden. Der Prozess endet mit der Belichtung der letzten Bauteilschicht. Das während des Prozesses in der Baukammer verbliebene, nicht aufgeschmolzene Pulver wird im Nachgang entfernt und die Bauplattform der Generieranlage entnommen. Nach dem Trennen des Bauteils von der Bauplattform und des Entfernens der Supportstrukturen ist darüber hinaus zusätzlich ggf. eine Endbearbeitung, siehe VDI 3404 [VDI07], nötig, um hohe Oberflächengüten zu erlangen und Bohrungen bzw. Gewinde einbringen zu können. [Geb07, Lei04, Mei99, Ove03, Zäh06].

Übersichten zu den am Markt erhältlichen Systemen zur generativen Fertigung, deren Bezeichnungen und Spezifikationen können Gebhardt u.a. entnommen werden [Geb07, Woh13, Zäh06].

2.2.2 Wesentliche Prozessparameter

Die laseradditive Fertigung von metallischen Werkstoffen ist von einer Vielzahl von Prozessparametern abhängig, die je nach Werkstoff und Maschinenkonzept aufeinander abgestimmt werden müssen. Unzureichende Prozessparameter können u.a. zu einer Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften oder eine erhöhte Bauteilporosität zur Folge haben [Buc14, Reh08]. Insgesamt konnten nach Rehme [Reh08] insgesamt 157 Einflussfaktoren auf die laseradditive Fertigung von metallischen Werkstoffen identifiziert werden. Parameter und grundlegende Konzepte können je nach Maschinenkonzept variieren. Vor diesem Hintergrund erfolgt die Beschreibung mittels generischer Benennungen, um die grundlegenden Zusammenhänge nach Rehme et al. [Geb07, Mei99, Ove03, Reh08, Wag03, Zäh06] aufzuzeigen.

Schichtstärke

Die Schichtstärke bestimmt maßgeblich die Geometrieauflösung eines Bauteils. Ebenfalls hat sie einen starken Einfluss auf die Fertigungszeit und die im Prozess erreichbaren Oberflächengüten. Die schichtweise Fertigung führt bei angewinkelten Oberflächen aufgrund der damit verbundenen Geometrieapproximation, siehe Abbildung 2.6, zu dem sog. Treppenstufeneffekt. Verglichen mit hohen Schichtstärken führen niedrige Schichtstärken zu einer höheren Geometrieauflösung. Bedingt durch die für das Bauteil steigende Anzahl der insgesamt zu belichtenden Schichten bringt eine niedrige Schichtstärke im Vergleich zu einer hohen jedoch eine Steigerung der Bauzeit mit sich. Typische Schichtstärken D_s metallischer Werkstoffe liegen zwischen 20 und 60 μm und hängen von Anlagentyp und Korngrößenverteilung des Pulvers ab [Aum08, Geb08, Mei99, Sch14].

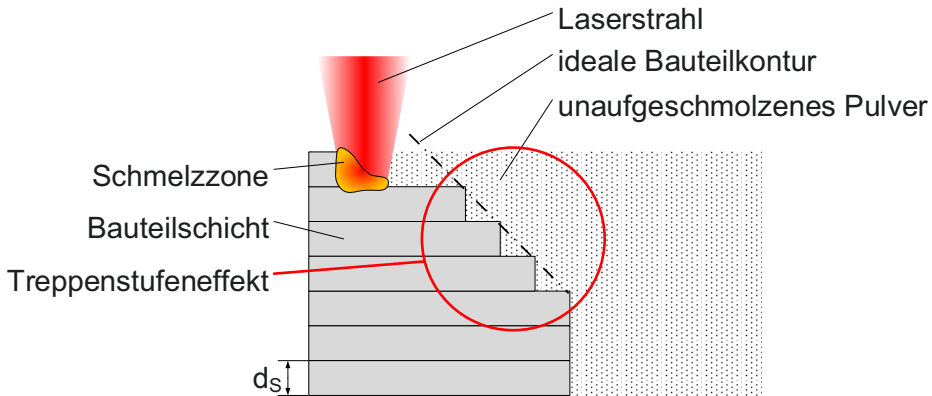


Abbildung 2.6 Veranschaulichung des Treppenstufeneffekts, vereinfacht

Scangeschwindigkeit

Das Aufschmelzen des Pulvers korreliert mit der materialspezifischen Energieeinbringung in der Schmelzzone, die als Streckenenergie E_L oder Energiedichte definiert ist:

$$E_L = \frac{P_L}{v_s}. \quad (2.1)$$

Die Abhängigkeit der Streckenenergie von der Schmelztemperatur, des Absorptionsverhaltens sowie der materialspezifischen Wärmeleitfähigkeit bedingen die Möglichkeit der Optimierung der Pulveraufschmelzung mittels der Prozessgrößen Laserleistung P_L und Scangeschwindigkeit v_s . Eine möglichst hohe Energiedichte bei bevorzugt hohen Scangeschwindigkeiten wird in der Regel angestrebt, um die Fertigungszeiten zu reduzieren. Hierzu gilt es die Laserleistung zu maximieren ohne das Material zu verdampfen und so Fehlstellen durch Spritzer oder ähnliches im Bauteil zu erhalten [Mei99].

Laserstrahlleistung

Die im Prozess nutzbare materialspezifische maximale Laserleistung bei konstantem Laserspotdurchmesser und konstanter Belichtungsgeschwindigkeit wird primär durch den Effekt der Verdampfung eingeschränkt. Eine Verdampfung des Materials im Belichtungsprozess kann zu Spritzerbildung, reduzierter Bauteildichte und einer Erhöhung der Oberflächenrauheit bedingt durch an der Bauteilkontur anhaftende, thermisch aktivierte Pulverpartikel führen. Zum einen schränkt dieser Effekt die kleinstmöglich herstellbaren Bauteilabmessungen ein. Zum anderen führt er bei Nichtbeachtung zu Maßabweichungen bedingt durch mit Laserleistung zunehmender und thermisch bedingter Pulverpartikelanhaftung an der Schichtkontur. Die Intensitätsverteilung der im Rahmen der laseradditiven Fertigung genutzten Laserstrahlquellen weisen typischerweise eine gaußförmige Intensitätsverteilung auf [Mei99, Reh08].

Belichtungs- und Scanstrategie

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, basiert die laseradditive Fertigung auf dem schichtweisen Aufbau von Bauteilen. Die Belichtung einer einzelnen Schicht kann üblicher Weise in drei Schritte eingeteilt werden, siehe Abbildung 2.7. Der erste Belichtungsvorgang beinhaltet zur Erhöhung der Bauteilgenauigkeit eine Konturbelichtung, die einen Versatz S_V des Fokuspunktes zum Bauteilinneren um die Hälfte der Schmelzbadbreite aufweist. Ziel ist es, die Konturvergrößerung durch die geometrische Beschaffenheit des Laserspots durch diesen Versatz zu kompensieren [Eis10, Mei99]. Im zweiten Schritt erfolgt die Belichtung der inneren Schichtfläche. Dieser Vorgang wird üblicherweise als hatching bezeichnet. Daran anschließend erfolgt im dritten Schritt eine finale Konturbelichtung, die durch einen exakt dem halben Fokusedurchmesser entsprechenden Versatz eine hohe Geometriegenauigkeit ermöglicht [Eis10].

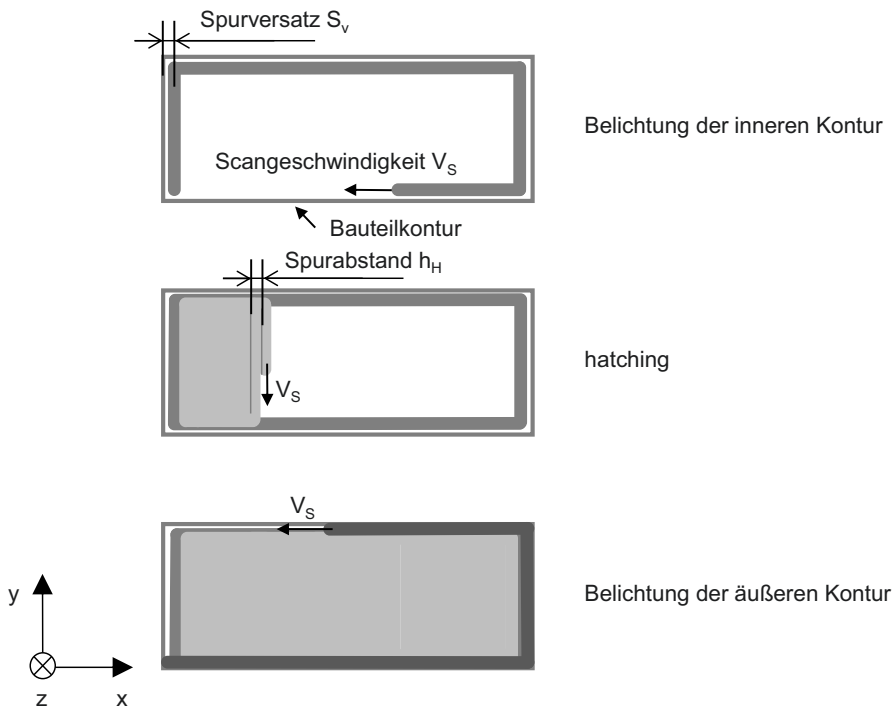


Abbildung 2.7 Typische Belichtungsreihenfolge einer einzelnen Schicht

Die drei typischen für das Hatching genutzten Strategien sind in Abbildung 2.8 dargestellt. Die Standardstrategie füllt die Innenfläche einer Schicht durch das Abfahren von einfachen Vektoren, beginnend in einer Ecke des Baufelds. Die Streifenstrategie teilt die zu belichtende Fläche in einzelne Streifen ein. Die Belichtung beginnt hier auch in einer Schichtecke. Die Schachbrettstrategie teilt die zu belichtende Fläche in einzelne zu belichtende quadratische Untersektionen ein. Anordnung sowie Belichtung dieser können

sowohl definiert als auch stochastisch erfolgen. Bezogen auf die Bauteilschichten kann die Ausrichtung der Scanvektoren gemäß Abbildung 2.8 von Schicht zu Schicht alternierend ausgeführt werden.

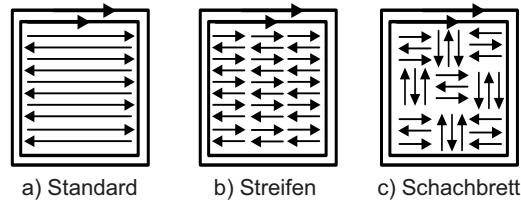


Abbildung 2.8 Typische hatching-Strategien in der laseradditiven Fertigung

Streifen- und Schachbrettbelichtung bringen in der Regel geringere Eigenspannungen als die Standardbelichtung in das Bauteil ein und werden für große Belichtungsflächen empfohlen. Der Hatchabstand h_H , siehe Abbildung 2.7, stellt den Abstand zwischen benachbarten Scanvektoren dar und sorgt für eine optimale Verbindung benachbarter Schmelzspuren. Für weitere Informationen sei an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen [Geb07, Mei99, Mun13, Reh08, Sch14, Zäh06].

2.2.3 Der Werkstoff TiAl6V4 in der laseradditiven Fertigung

Die Leichtbaulegierung TiAl6V4 [EOS08] findet aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit vor allem im Bereich der Luft- und Raumfahrt Anwendung [Geb07, Emm11a, Emm11b, Emm11c, Emm13a, Kle09, Kra14, Kra15]. Neben Aluminium dient bei der Titanlegierung TiAl6V4 das Element Vanadium als weiterer Legierungsbestandteil. Die Verarbeitung des Werkstoffs erfolgt bei der laseradditiven Fertigung als einkomponentiger Pulverwerkstoff. Die Korngrößenverteilung folgt einer Gaussverteilung mit einem leicht höheren Anteil an feinkörnigen Partikeln. Die durchschnittliche Partikelgröße beträgt $37,4 \mu\text{m}$ und die maximale Partikelgröße weist einen Wert von $70 \mu\text{m}$ auf. Der überwiegende Anteil der Pulverpartikel besitzt eine sphärische Form [Sey12].

Tabelle 2.1 Werkstoffkennwerte von laseradditiv verarbeitetem TiAl6V4

Titan - TiAl6V4: Materialkennwerte für die laseradditive Fertigung											
Heraus- geber	Wärme- behandlung (WB)	Streckgrenze [MPa]		Zugfestigkeit [MPa]		Dauerfestigkeit [MPa]		E-Modul [GPa]	Bruchdehnung [%]		Quelle
		0°	90°	0°	90°	0°	90°		0°	90°	
Herstellerangaben:											
Concept Laser	wie gebaut	900 - 1.200	n.v.	1.110 - 1.300	n.v.	n.v.	n.v.	110	4 - 11	n.v.	[Con08]
EOS	wie gebaut	1.030 ± 70	n.v.	1.150 ± 60	n.v.	n.v.	n.v.	110 ± 7	11 ± 2	n.v.	[EOS11]
MTT	geglüht	1.013 ± 40	n.v.	1.091 ± 30	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	10 - 18	n.v.	[MTT09a]
Stand der Forschung:											
ILT	wie gebaut	1.052	1.226	1.183	1.307	n.v.	n.v.	n.v.	5,2	0,4	[Wir05]
ILT	WB 950°C, 0,5 h	841	916	974	1.047	min. 350 - 400	n.v.	n.v.	11,5	8	[Wir05]
DMRC	wie gebaut	1008	n.v.	1080	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	1,6	[Leul3]
DMRC	WB 800 °C, 2 h	962	n.v.	1040	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	5	[Leul3]
DMRC	WB 1050°C, 2 h	798	n.v.	945	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	11,6	[Leul3]
DMRC	HIPed, 920°, 2 h	912	n.v.	1005	n.v.	630	n.v.	n.v.	n.v.	8,3	[Leul3]
TUHH	WB 650°C, 3 h	1140	n.v.	1070	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	10,5	[Wyc12]
TUHH	WB 650°C, 3 h, unbearbeitet	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	220	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	[Wyc12]
TUHH	WB 650°C, 3 h	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	490	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	[Wyc12]
n.v. = nicht verfügbar											

Typische Materialkennwerte der laseradditiv verarbeiteten Legierung TiAl6V4 sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Anhand der unterschiedlichen Aufbauorientierungen (0° - senkrecht auf Bauplattform; 90° - liegend auf Bauplattform) der statischen Zugproben ist eine Anisotropie der Festigkeitskennwerte sowie der Bruchdehnung ersichtlich [Buc13]. Stehend aufgebaute Proben weisen geringere statische Festigkeitskennwerte auf als liegend aufgebaute. Die ermittelten Kennwerte für die Bruchdehnung weisen ein gegenläufiges Verhalten auf. Nach Wirtz [Wir05] sind u.a. Bindefehler zwischen den Bauteilschichten eine Ursache für das anisotrope Verhalten. Kruth et al. [Kru05b, Kru07] konnten aufzeigen, dass die statischen Materialkennwerte eine hohe Reproduzierbarkeit aufweisen. Laseradditiv gefertigte Proben übersteigen die Spezifikationen von konventionell verarbeitetem TiAl6V4 nach DIN 17862 „Stangen aus Titan und Titanlegierungen“ sowie DIN 17865 „Gussstücke aus Titan und Titanlegierungen“ [Wir05, Wyc12].

Nach Kausch [Kau13] besteht jedoch eine Abhängigkeit der statischen und dynamischen Festigkeit von der Wandstärke. Für eine dynamische Bauteilbelastung werden Wandstärken von 1,5 mm empfohlen. Statische Festigkeitskennwerte weisen bereits ab Wandstärken von ca. 0,6 mm mit konventionellen Zugproben vergleichbare Kennwerte auf.

Kausch [Kau13] führt den Abfall der Festigkeitskennwerte insbesondere auf das Verhältnis Oberfläche zu Querschnittsfläche und den damit verbundenen Sekundäreffekten zurück. So werden dünnwandige Strukturen in der Regel nur mit niedriger Intensität konturbelichtet und nicht mit den leistungsstärkeren Schraffurparametern des Kernbereichs, vergleiche auch Abschnitt 2.2.2.

Die maximal erreichbaren dynamischen Festigkeitskennwerte zeigen eine erhebliche Abhängigkeit von der Oberflächengüte der Proben, siehe Tabelle 2.1 und [Kau13, Wir05, Wyc12]. Dabei weisen Proben „wie gebaut“ keine Nachbearbeitung und demnach eine hohe Oberflächenrauheit auf. Insbesondere oberflächennahe Fehler können als Rissinitiatoren wirken und die erreichbare Dauerfestigkeit senken. Eine Möglichkeit zur Steigerung der dynamischen Festigkeit ist unter anderem das Einbringen von Druckeigenspannungen mittels Strahlverfahren [Kau13]. Nach Buchbinder und Wycisk [Buc13, Wyc12] haben überdies die gewählten Verfahrensparameter, wie z.B. Scangeschwindigkeit oder Schichtdicke, Einfluss auf das Gefüge und können somit auch die mechanischen Kennwerte beeinflussen.

2.2.4 Eigenspannungen in der Laseradditiven Fertigung

Als Eigenspannungen werden Spannungen bezeichnet, welche in einem Bauteil ohne von außen auf dieses wirkende Kräfte existieren. Die resultierende Kraft aus den Eigenspannungen ist gleich Null. Das heißt auch wenn Eigenspannungen existieren, befindet sich das Bauteil im mechanischen Gleichgewicht. Durch Eigenspannungen können sowohl Geometrieabweichungen, als auch Risse entstehen [Ove03]. Eigenspannungen werden in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Ausdehnung in drei Arten unterteilt.

- Eigenspannungen erster Art sind über größere Werkstoffbereiche (mehrere Körner) nahezu homogen.
- Eigenspannungen zweiter Art sind über kleinere Werkstoffbereiche (ein Korn oder Kornbereiche) nahezu homogen.
- Als letztes erstrecken sich die Eigenspannungen dritter Art nur noch über kleinste Werkstoffbereiche (wenige Atomabstände). Die Eigenspannungen dritter Art bilden die Grundlage für die anderen beiden Arten der Eigenspannungen.

Im Folgenden werden lediglich Eigenspannungen erster Art betrachtet, da diese zu großen Verformungen von Bauteilen führen können, während die Eigenspannungen zweiter Art und dritter Art nur einen geringen Einfluss auf die Verformung und Belastbarkeit eines Bauteils haben [Mer06].

Thermisch induzierte Eigenspannungen

Thermisch induzierte Eigenspannungen entstehen in einem Bauteil, wenn ein Teil seines Volumens sich aufgrund eines Temperaturunterschiedes nicht frei ausdehnen oder zusammenziehen kann. Flüssiges Material enthält keine thermischen Spannungen [Kru12].

Eigenspannungen, die aufgrund von Temperaturunterschieden entstehen, werden auch als Wärmespannungen bezeichnet und gehören zu den Eigenspannungen erster Art [Ove03]. Eine schematische Betrachtung der Schichtbauweise des LAM zeigt anschaulich, wie Verformungen aufgrund der thermisch induzierten Spannungen entstehen, siehe Abbildung 2.9. Die oberste Schicht hat eine höhere Temperatur als die darunter liegende. Nach der Belichtung durch den Laser kühlen die Schichten auf ein nahezu gleiches Temperaturniveau ab.

Hierbei entsteht eine Kontraktion in jeder Schicht nach [Mei99]:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Δl bezeichnet die Längenänderung, l_0 die Anfangslänge, α den linearen Ausdehnungskoeffizienten und ΔT die Temperaturänderung. Die Längenänderung ist direkt abhängig von der Temperaturdifferenz. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen in den Schichten kommt es zu verschieden stark ausgeprägten Kontraktionen. Da die Schichten jedoch in einem festen Werkstoffverbund existieren, ist keine freie Kontraktion der einzelnen Schichten möglich. Es entstehen deshalb Zugspannungen in den obersten Schichten [Mei99]. Die maximale Spannung, die ohne plastische Verformung erreicht werden kann, wird als Fließspannung bezeichnet und sinkt mit zunehmender Temperatur [Ove03]. Die in Abbildung 2.9 dargestellten Eigenspannungen entstehen sowohl in der Längsachse, als auch in der Querachse eines Bauteils. Für dünne Wandstrukturen bedeutet dies, dass die Eigenspannungen zum einen ein Ablösen der kurzen Seiten der Wände von der Bauplattform und zum anderen eine Biegung um die Verbindungsstellen der langen Seiten mit der Grundplatte verursachen können, siehe auch Zhang [Zha04].

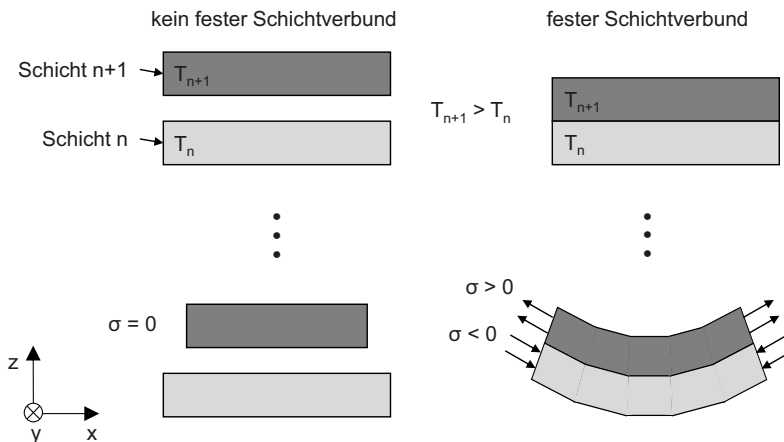


Abbildung 2.9 Verzug infolge von Kontraktion; nach [Mei99]

Temperature gradient mechanism (TGM)

Zur Erklärung der Zusammenhänge von thermisch induzierten Spannungen wurden von Mercelis zwei Modelle entwickelt. Das erste Modell beschreibt den sogenannten „temperature gradient mechanism“ (TGM) [Kru12]. Es besagt, dass sich während des LAM bereits verfestigtes Material durch die Belichtung mit dem Laser erwärmt und anschließend ausdehnt. Die Ausdehnung aufgrund der Erwärmung wird zum Teil durch das umgebende kältere Material gehemmt und führt somit zu einem Druckspannungszustand in dem erwärmten Bereich, siehe Abbildung 2.10. Wenn die erzeugte Druckspannung einen höheren Wert als die Fließspannung annimmt, kommt es zu einer nicht mehr rein elastischen, sondern zu einer elastisch-plastischen Verformung.

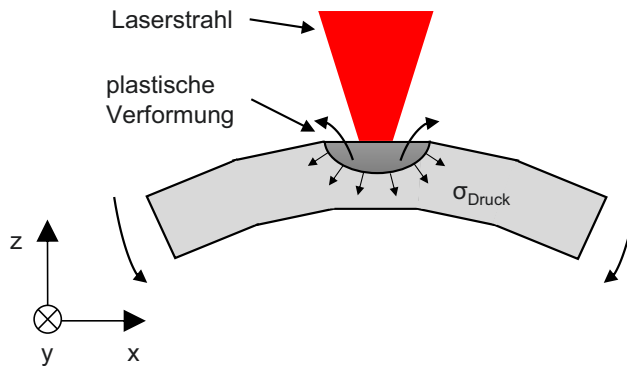


Abbildung 2.10 Spannungen und Dehnungen während des Aufheizens; nach [Kru12]

Cool-down phase model

Das cool-down phase model beschreibt das Verhalten des Werkstoffes, nachdem der Laserspot den betrachteten Bereich verlässt. Da nun keine Energie mehr durch den Laser zugeführt wird, kühlt sich der betrachtete Bereich ab. Durch das Abkühlen kommt es wie in Abbildung 2.9 beschrieben zu einem Zusammenziehen des Bereichs. Die Kontraktion wird jedoch aufgrund der zuvor entstandenen plastischen Verformung des umgebenden Materials behindert. Es bleibt somit ein Bereich von Zugspannungen an der mit dem Laser belichteten Stelle bestehen. Nach dem Kräfte- und Momentengleichgewicht folgt daraus, dass sich in der Umgebung des behandelten Bereichs Druckspannungen ausbilden. Jede neue Schicht steht somit nach dem Abkühlen unter Zugspannungen und verursacht in den darunter liegenden Schichten Druckspannungen. [Kru12]. In Abbildung 2.11 sind die beschriebenen Mechanismen schematisch dargestellt.

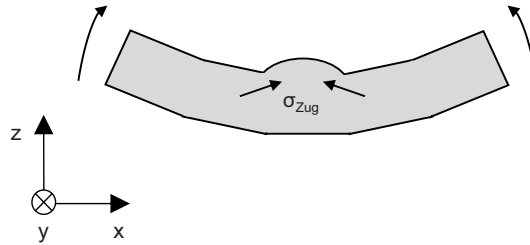


Abbildung 2.11 Verursachte Dehnungen und Spannungen während des Abkühlens; nach [Kru12]

2.2.5 Richtlinien für die fertigungsgerechte Gestaltung

Bislang dienten Studien an laseradditiv gefertigten Testkörpern vornehmlich dazu, grundlegende Aussagen zu Prozessgenauigkeiten, Prozessgrenzen und Vergleiche zwischen verschiedenen additiven Fertigungstechnologien zu ermöglichen [Tho09, Geb07; Kra13, Kra14, Kra15, Ada14, Zim13, Weg12]. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung dieser Arbeit wird sich im Folgenden auf die Darstellung des Stands der Technik in Bezug auf metallische laseradditive Fertigungsverfahren basierend auf einkomponentigen Pulverwerkstoffen beschränkt. Eine umfassendere Übersicht kann [NIS12, VDI07] entnommen werden.

Anfängliche Probekörperentwicklungen hatten vornehmlich das Ziel zunächst die Unterschiede der am Markt verfügbaren additiven Fertigungstechnologien aus gestalterischer Sicht zu ergründen. Der von Castillo et al. [Cas05] entwickelte Probekörper diente der Untersuchung von Überhängen, dem Schrumpfungsverhalten verschiedener einfacher Geometrien, dem Einsatz von Supportstrukturen, dünner Wandstrukturen (dünne Hohlzylinder: 0,5 und 1 mm; Wandungen: 2 mm) sowie minimal herstellbarer Strukturen wie Bohrungen, siehe Abbildung 2.12. Fokus der Untersuchungen war ein Vergleich verfügbarer Fertigungsanlagen für die laseradditive Fertigung und nicht das Erschließen von Prozessgrenzen. Sämtliche Probekörper wurden sicher aufgebaut. Die Untersuchungen beinhalteten eine begrenzte Anzahl an Geometrievariationen der betrachteten Körper, vergleiche Abbildung 2.12. Messungen der Probekörper ermöglichten keine Ableitung einheitlicher Trends. Sowohl positive als auch negative Abweichungen bezüglich der Sollgeometrien konnten festgestellt werden. Die Fertigung erfolgte in Stahl (316L) sowie Titan (TiAl6V4).

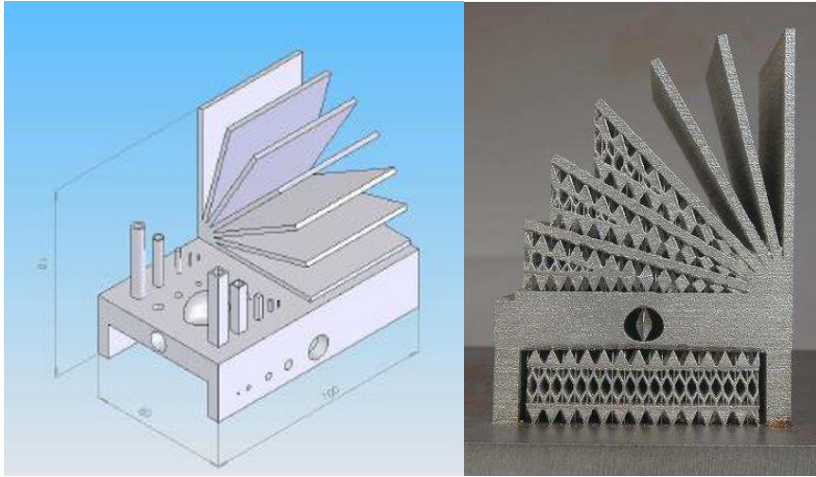


Abbildung 2.12 Probekörper von Castillo et al. [Cas05]; links: CAD-Modell; rechts: gefertigtes Bauteil auf Bauplattform mit Supportstrukturen

Kruth et al. [Kru05b, Kru07] entwickelten Probekörper zur Untersuchung von geometrischen Strukturen wie dünnen Wänden, Überhängen, Bohrungen, dem Einfluss der Bauteilausrichtung zur Bauplattform sowie Radien. Fokus der Untersuchungen war die Bestimmung von Prozessgrenzen sowie der grundlegenden geometrischen Auflösung.

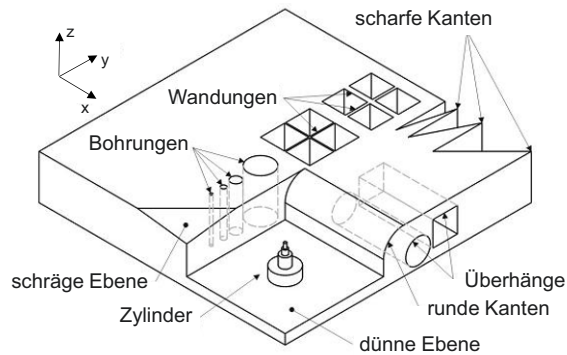


Abbildung 2.13 Prüfkörper zur Erschließung von einfachen Prozessgrenzen; nach [Kru05b]

Abbildung 2.13 zeigt einen der verwendeten Probekörper zur Untersuchung der Herstellbarkeit von filigranen Strukturen für den Stahlwerkstoff 316L. Genutzt wurden laseradditive Fertigungsverfahren der Firmen Concept Laser, Trumpf sowie MCP-HEK. Eine genaue Benennung der verwendeten Anlagentechnik wird nicht getätigt. Der Körper hat eine Höhe von 9 mm. Er weist Bohrungen (0,5 bis 5 mm Durchmesser), Zylinder (0,5 bis 5 mm Durchmesser) sowie dünne Wänden (0,25 bis 1 mm Dicke) auf. Die Analyse der gebauten Prüfkörper ergab einen stabilen Aufbau für Bohrungen ab 2 mm

und für Zylinder ab 1 mm Durchmesser sowie ab einer Wandstärke ab 1 mm. Ebenfalls festgestellt wurde das sog. Curling bei der viereckigen Überhangsektionen. Hierbei handelt es sich um ein Hochbiegen frei ins Pulverbett belichteter Schichten mit dem Ergebnis eines Bereichs hoher Porosität an der Grenze zur Sollgeometrie. Abhilfe konnte die Nutzung von Supportstrukturen schaffen, vergleiche Abschnitt 2.2.1. Überdies wurde festgestellt, dass scharfe Bauteilkanten Abrundungen im Größenbereich des Laserspots aufweisen.

Abbildung 2.14 zeigt zwei der verwendeten Probekörper zur Untersuchung der Prozessgenauigkeit sowie der Herstellbarkeit von filigranen Strukturen aus CoCr sowie TiAl6V4. Die Probenfertigung erfolgte auf einer Concept Laser M3 linear. Die Probekörper dienten einer iterativen Parameteroptimierung mit dem Ziel einer möglichst hohen Oberflächengüte. Die betrachteten Abmessungen spiegelten typische medizinische Anwendungsszenarien, insbesondere in Form von Dentalimplantaten, wider.

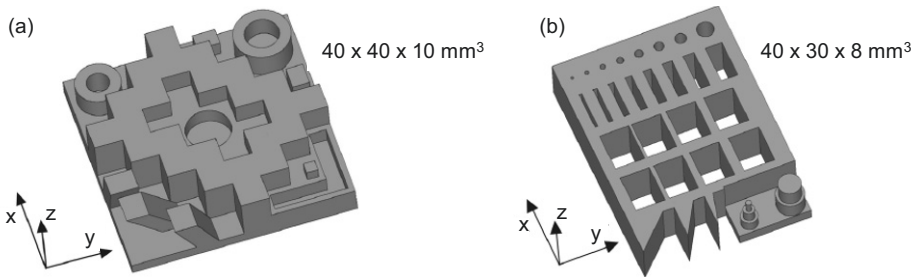


Abbildung 2.14 Probekörper für Prozessgenauigkeit (a) sowie filigrane Strukturen (b); [Kru07]

Probekörper (a) gemäß Abbildung 2.14 diente zur Bestimmung der Prozessgenauigkeiten entlang der drei Raumachsen sowie von Zylindern und zur Bauplattform geeigneten Strukturen. Probekörper (b), siehe Abbildung 2.14, diente zur Untersuchung der Fertigungsgrenzen und -genauigkeit von filigranen Strukturen. Untersucht wurden Bohrungen (0,5 bis 3 mm), Nuten (0,3 bis 3 mm Weite), Zylinder (1 bis 5 mm Durchmesser) sowie dünne Wandungen (0,5 bis 3 mm Dicke). Lediglich Bohrungen bei einem Durchmesser von 0,5 mm konnten aufgrund von thermischer Pulveraktivierung in der Bohrung nicht korrekt aufgebaut werden. Gemäß Messungen liegen erreichbare Abweichungen vom CAD-Modell für die untersuchten Geometrien in den drei Raumachsen unter 40 μm . Rauigkeiten zwischen 18-20 μm R_a ohne Nachbehandlung konnten für TiAl6V4 erzielt werden.

Aumund-Kopp et al. [Aum08] stellten Untersuchungen zu internen Strukturen und grundlegenden Restriktionen der laseradditiven Fertigung an. Die Probenfertigung in Edelstahl (17-4) erfolgte auf einer EOS M270 bei einer Schichtstärke von 20 μm . Die Untersuchungen beinhalteten die Betrachtung von Überhangwinkeln, Bohrungen und

Wandungen. Die abgeleiteten Empfehlungen haben eher qualitativen Charakter. Grundsätzlich werden Strukturen unter 0,7 mm Dicke nicht empfohlen. Dünne Wandungen sollten parallel zur Beschichtungsrichtung orientiert werden, um einen stabilen Bauprozess zu gewährleisten. Dünnere Wandungen können durch senkrecht angebrachte Versteifungswandungen realisiert werden. Bohrungen sollten generell mit Aufmaß aufgebaut und konventionell nachgearbeitet werden. Je größer die Bohrung, desto eher wird der Einsatz von Supports empfohlen. Weitere grundlegende Empfehlungen und Grenzen wurden in erste Richtlinien für die Bauteilgestaltung überführt.

Thomas [Tho09] stellte Untersuchungen zu grundlegenden Fertigungsrestriktionen laseradditiver Verfahren an. Anhand von Fallstudien laseradditiv gefertigter Bauteile erfolgte die Definition von zu untersuchenden Probekörpern. Diese sollten abstrakten und damit allgemeingültigen Charakter haben, um eine breite Übertragbarkeit auf zukünftige Anwendungen zu ermöglichen. Anhand dieser wurden Untersuchungen zur Bauteilorientierung, realisierbarer Oberflächengüten, Kanten, Radien, Überhängen, Bohrungen, minimalen Wandstärken sowie dem Schrumpfungsverhalten durchgeführt. Die Fertigung in Edelstahl (316L) erfolgte auf einer SLM Realizer 250. Abhängig von der Bauteilorientierung konnten Oberflächengüten von 17 – 34 $\mu\text{m Ra}$ festgestellt werden. Insbesondere bei hohen Anforderungen an die Bauteilgenauigkeit wird ein Aufmaß empfohlen, um eine Nacharbeit zu ermöglichen. Wandungen konnten ab Dicken von 0,4 mm, Bohrungen ab Durchmessern von 0,7 mm, erfolgreich aufgebaut werden. Kleinere Bohrungen weisen aufgrund von angesmolzenem Pulver in der Bohrung keine Durchgängigkeit auf. Ähnliche Einschränkungen weisen Spalte auf, die ab Breiten von 0,3 mm erfolgreich gefertigt werden konnten. Überdies wurden grundlegende Strategien zur Vermeidung von Supportstrategien bei großen Bohrungsdurchmessern erarbeitet. Der Einsatz von Supportstrukturen war im Rahmen der Maschinenparameter ab einem Überhangwinkel $\geq 45^\circ$ zur Aufbaurichtung erforderlich.

Cooke et al. [Coo10] stellten Untersuchungen zur Variabilität der Maßgenauigkeit von laseradditiv gefertigten Probekörpern an. Basis der Untersuchungen war die genormte NAS 979 „circle-diamond-square“ Prüfgeometrie zur Evaluierung der Maschinen- und Prozessgenauigkeit von fünf-Achs Fräsmaschinen. Eine Vergleichbarkeit mit Fräsverfahren konnte so sichergestellt werden. Die Testkörperfertigung in Edelstahl 17-4 erfolgte durch Dienstleister. Unterschiede bei den Fertigungsparametern verhinderten direkte Vergleiche zwischen den Proben. Nach Cooke sind die Abweichungen der laseradditiv gefertigten Testkörper signifikant größer als es bei ihren gefrästen Pendants der Fall ist. Aufgrund der offensichtlichen grundlegenden Reproduzierbarkeit der festgestellten Fehler werden Strategien zur Kompensation dieser empfohlen. Obgleich die Bauteile aufgrund unterschiedlicher Parameter und Fertigungsmaschinen in ihren Abmessungen differieren, konnten ähnliche Fehlerverhalten festgestellt werden. Diese werden den ähnlichen Prozessgrundlagen der unterschiedlichen Maschinenhersteller zugeschrieben.

Ziel der Untersuchungen von Adam [Ada14, Zim13] war es, Richtlinien für die fertigungsgerechte Gestaltung für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laser-

strahlschmelzen sowie Fused Deposition Modeling zu erarbeiten. Eine allgemeingültige Übertragbarkeit auf Bauteile verschiedener geometrischer und funktionaler Ausprägung war das Ziel. Untersuchungen zum Laserstrahlschmelzen erfolgten in Edelstahl 316L auf einer SLM 250HL. Die Erarbeitung der Richtlinien erfolgte mit dem Ziel einer möglichst breiten Anwendbarkeit für abstrahierte Standardelemente und nicht für spezifische Bauteiltypen. Standardelemente finden nach Adam bei der Gestaltung von Bauteilen häufig Verwendung und sind in drei grundlegende Gruppen zu unterteilen. Basiselemente stellen hierbei die elementaren geometrischen Grundkörper dar. Elementübergänge sind die Bereiche in denen Basiselemente miteinander kombiniert werden. Aggregierte Strukturen stellen abschließend die Anordnung von zwei oder mehr Basiselementen sowie deren Elementübergänge dar. Attribute definieren wiederum die konkrete Gestalt derartiger Strukturen und Elemente. Die so erarbeiteten Richtlinien wurden in einen Katalog überführt, der nach Hauptgruppen, Typen und Attributen gegliedert ist (z.B. Elementübergang – fest verbundene Elemente - Dicke). Je Richtlinie erfolgt eine Beschreibung des Sachverhalts in schriftlicher Form und in Piktogrammen, die günstige und ungünstige Lösungen aufzeigen. Strukturdicken von 1 mm und Spaltmaße von 0,6 mm sollten nicht unter- bzw. überschritten werden. Überdies werden Aussagen zur grundlegenden Gestaltung von Geometriefeatures wie Kanten und Überhängen getätigt. Generell wird eine zu filigrane Ausgestaltung von Bauteilkanten zugunsten einer Abstrahierung von Geometriefeatures empfohlen. Laut Adam sollten Überhänge generell mit Supports versehen werden und können in ihren Größenordnungen frei gewählt werden.

Parallel zu den beschriebenen Untersuchungen erfolgte durch Kranz [Kra15] die Erarbeitung von Konstruktionsrichtlinien für die laseradditive Fertigung von Leichtbaustrukturen aus TiAl6V4. Im Rahmen der Untersuchungen wurden typische Grundgeometrien des Leichtbaus identifiziert und mittels entsprechender Probekörper etwaige Prozessgrenzen erarbeitet sowie Empfehlungen definiert. Untersucht wurden unter anderem dünne Wandungen, Balkenelemente, Bohrungen sowie Fragen der Bauteilgenauigkeit. Anhand der Versuchsergebnisse erfolgten die Erarbeitung eines Richtlinienkatalogs mit Positiv- und Negativbeispielen, grundlegender Angaben zu zu erwartenden Restriktionen sowie generelle Empfehlungen. Für eine genaue Beschreibung der erarbeiteten Inhalte und deren Aufbereitung sei an dieser Stelle auf die Kapitel 4 und 5 verwiesen.

2.2.6 Gestaltung von laseradditiv zu fertigenden Bauteilen

Der vermehrte Einsatz der laseradditiven Fertigung in der industriellen Praxis steigert aufgrund der Verfahrensneuheit den Bedarf methodischer Ansätze, die den Konstrukteur bei der Planung und Gestaltung von Bauteilen für die laseradditive Fertigung bedarfsgerecht unterstützen. Das durch das Schichtbauprinzip bedingte hohe Gestaltungspotential soll unter Einhaltung von Regelwerken zur fertigungsgerechten Gestaltung, siehe Abschnitt 2.2.5, so weit wie möglich ausgeschöpft werden, sodass ein robuster Bauprozess und eine geforderte Bauteilqualität gewährleistet werden können [Gib10, Pon13, Kla14].

In diesem Zusammenhang wird häufig die Abkürzung DFAM (Design For Additive Manufacturing) verwendet, welche nicht mit der Abkürzung DFMA (Design For Manufacturing and Assembly) zu verwechseln ist, siehe Abschnitt 2.1.5. Gibson et al. [Gib10] hebt dies hervor und stellt heraus, dass die Möglichkeiten der additiven Fertigung eine Gelegenheit bieten, die klassischen DFMA-Ansätze neu zu durchdenken. Als besondere Eigenschaften der laseradditiven Fertigung hebt er vor diesem Hintergrund insbesondere die hohen gestalterischen Freiheiten des Verfahrens, die hohe Flexibilität hinsichtlich vorzunehmender Gestaltänderungen sowie die Möglichkeit der Funktionsintegration hervor. Verglichen zu den klassischen DFM-Ansätzen sollten nach Gibson et al. [Gib10] die Ziele des DFAM die Maximierung der Produktperformance durch die Synthese von Formen, Größen, hierarchische Strukturen und Materialzusammensetzungen mit Bezug auf die Fähigkeiten der additiven Fertigung sein. Der Konstrukteur sollte für die Zielerreichung stets berücksichtigen, dass eine komplexe und individuelle Geometrie keine Mehrkosten oder einen erhöhten Zeitaufwand bedeuten, das integrative Prinzip einfach umsetzbar ist und insbesondere auf die üblichen Fertigungsrestriktionen herkömmlicher Fertigungsverfahren nur bedingt, etwa im Sinne einer möglichen lokalen Nachbearbeitung, geachtet werden muss. Die Fertigungsrestriktionen der additiven Fertigung müssen jedoch berücksichtigt werden, siehe Abschnitt 2.2 sowie Kapitel 4 und 5. Vor dem Hintergrund des DFAM werden im Folgenden kurz einige relevante Ansätze aus dem Stand der Wissenschaft vorgestellt.

Ponche et al. [Pon13] stellen einen DFAM-Ansatz vor, welcher das Ziel verfolgt, gestaltungsrelevantes Wissen über das verwendete Fertigungsverfahren ebenso wie die Erfüllung der funktionalen Anforderungen bereits bei der Gestaltung eines Bauteils zu berücksichtigen, siehe Abbildung 2.15a. Der Ansatz ist in drei Hauptschritte unterteilt. In Schritt eins erfolgt eine Analyse der Ausgangssituation, wobei die Prozesseigenschaften („Processes characteristics“) in Form von maximal fertigbaren Dimensionen mit den zu fertigenden Bauteildimensionen abgeglichen werden. Schritt zwei erlaubt es, die Maß- und Formspezifikationen in Bezug auf die AM-Prozessfähigkeit und der Endbearbeitung zu erfüllen. Hier fließen einerseits wiederum die Prozessspezifikationen in Form von erreichbaren Genauigkeiten, minimal fertigbaren Dimensionen und den erforderlichen Endbearbeitungsschritten mit ein. Andererseits fließen die funktionalen Spezifikationen („Functional specifications“) mit in die Gestaltung ein, siehe Abbildung 2.15a. Funktionale Spezifikationen sind Anforderungen an die Gestalt und Funktion, sowie die Systemumgebung („Empty-Volumes“) und der Kontext (z.B. Gewichtsminimierung). Abbildung 2.15b zeigt die Systemumgebung. Es gilt die Achslagerung („Transmission-Shafting“) mit der Tragstruktur („Arm-Structure“) zu verbinden.

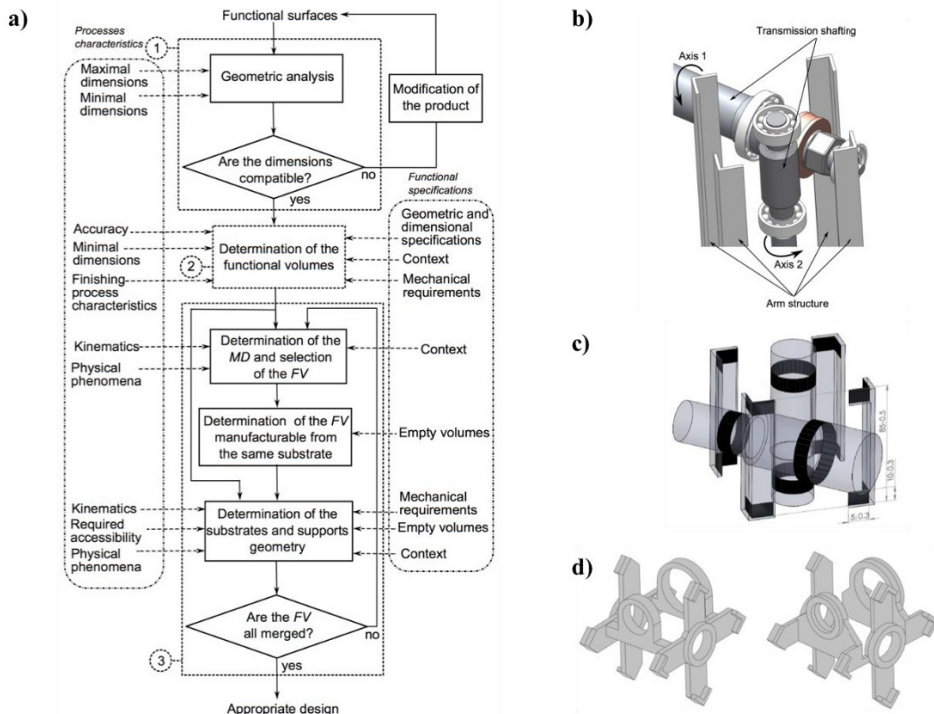


Abbildung 2.15 (a) DFAM-Ansatz (b) System ohne Funktionsvolumen (c) Funktionsflächen „Empty Volumes“ (d) orientierungsabhängige Designvarianten [Pon13]

Ausgehend von den identifizierten Funktionsflächen aus Schritt eins, siehe Abbildung 2.15c, die im Folgenden in Funktionsvolumina (FV) überführt werden (Schritt zwei), erfolgt in Schritt drei unter Berücksichtigung der „Leeren Volumina“, also Bereiche der Systemumgebung, die nicht als Designraum zur Verfügung stehen, siehe Abbildung 2.15c, die Festlegung der Aufbaurichtung sowie die Bestimmung der erforderlichen Supportstrukturen. Dabei werden für verschiedene Aufbaurichtungen („Manufacturing Directions“ - MD) die Funktionsvolumina mit den sogenannten Verbindungsvolumina (Linking-Volumes - LV) fertigungsgerecht verbunden, siehe Abbildung 2.15d. Durch Analyse der Eigenschaften und Bewertung der sich ergebenden Designvarianten mit den jeweiligen Aufbaustrategien wird abschließend eine Designvariante für die Fertigung ausgewählt.

Zhang et.al. [Zha14] liefern ein zweistufiges Rahmenwerk, um Designvarianten aus Sicht der Prozessplanung zu bewerten. Das Rahmenwerk zur Prozessplanung in Abbildung 2.16a zeigt eine Makro- und eine Mikro-Planungsebene. Die Makro-Ebene („Macro Planning“) beinhaltet hauptsächlich die Analyse der Fertigbarkeit, die Auswahl von Fertigungsszenarien und Prozessparametern. Die Auswahl eines Fertigungsszenarios erfolgt unter Berücksichtigung von Anforderungen an die Gestalt, Funktion und die Herstellung der Bauteile. Die Mikro-Ebene („Micro Planning“) fokussiert sich haupt-

sächlich auf technische Detailspekte, wie zum Beispiel die Datenaufbereitung, die Bauteilplatzierung /-orientierung, Supportstrukturen, Slicing-Strategien und die Endbearbeitung. Es wird herausgestellt, dass die Makro-Planungsebene eng mit der Konzeptphase der Gestaltung (Grobgestaltung) und die Mikro-Planungsebene eng mit der detaillierten Gestaltung (Feingestaltung) verbunden sind. Durch ein genaues Verständnis von der Prozessplanung und den Verfahrenseigenschaften soll das gestalterische Potential der laseradditiven Fertigung besser ausgeschöpft werden. Daher stellen Zhang et al. [Zha14] ein von dem beschriebenen Prozessplanungs-Rahmenwerk abgeleitetes Bewertungs-Rahmenwerk vor, welches in der Gestaltungsphase zur Bewertung von Designvarianten herangezogen werden kann, siehe Abbildung 2.16b.

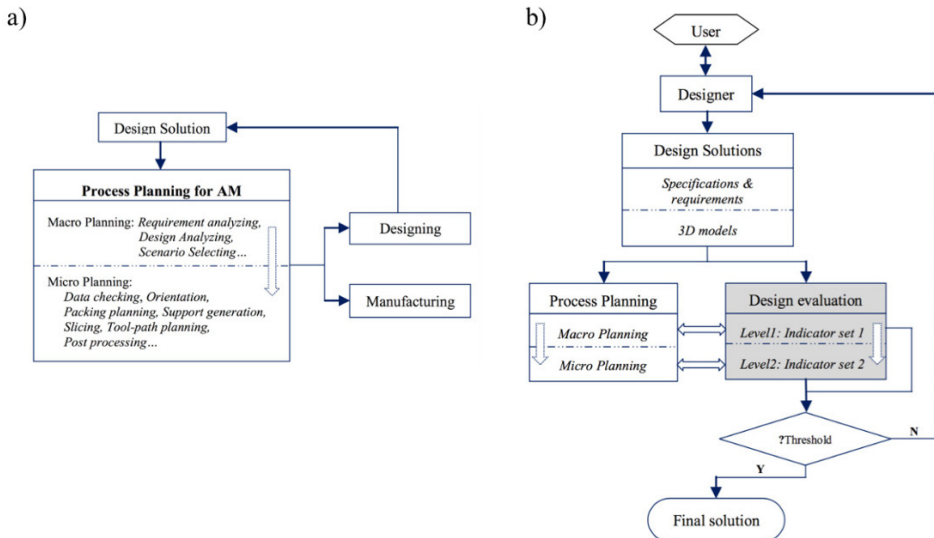


Abbildung 2.16 Rahmenwerk zur Prozessplanung und Gestaltvariantenbewertung [Zha14]

Das vorgeschlagene Vorgehen beinhaltet zwei Stufen („Level 1“ und „Level 2“), die direkt mit der Prozessplanung im Zusammenhang stehen. Für jede Stufe werden quantitative Indikatoren („Indicator set 1“ und „Indicator set 2“) mit entsprechenden Grenzwerten („Threshold“) angeboten. Diese sollen den Anwender bei der Bewertung und Auswahl von Designvarianten unterstützen. Als Indikatoren der ersten Stufe werden zunächst zwei Kennzahlen zur Bewertung der Fertigungseignung aufgeführt. Der AI („Adaptation Indicator“) quantifiziert die Fertigungseignung der Designvarianten für verschiedene Aufbauszenarien unter Einbezug von Fertigungs- und Maschinenrestriktionen. Der DI („Discrimination Indicator“) unterstützt die Festlegung der endgültigen Aufbaustrategie indem er, insbesondere bei vergleichbaren AI-Werten, den maximalen AI-Wert über einen exponentiellen Ansatz in Relation zu dem betrachteten AI-Wert der jeweiligen Designvariante setzt. In der zweiten Stufe werden die folgenden Indikatoren verwendet. Der Indikator DI („Discrimination Indicator“) drückt den Einfluss der Fein-

gestalt auf die Bauteilorientierung in der Prozessplanungsphase aus. Der GI-Indikator („geometry indicator“) beschreibt, inwieweit die Designvariante das Potential der laseradditiven Fertigung ausnutzt. Das Volumen des quaderförmigen Bemessungsvolumens wird hierzu mit dem tatsächlichen Volumen der Designvarianten ins Verhältnis gesetzt. Mit dem Ziel, eine geeignete Designvariante auszuwählen, werden die vorliegenden Designvarianten mithilfe der Indikatoren bewertet. Werden die empirisch bestimmten und auf Erfahrung beruhenden Grenzwerte berücksichtigt, wird der Anwender hinzukommend bei der Entscheidungsfindung unterstützt, sodass ungünstige Designvarianten in einem iterativen Prozess hinsichtlich der Fertigbarkeit gestalterisch optimiert und aussortiert werden.

Arndt et al. [Arn14] betonen ebenfalls die Wichtigkeit der Integration von verfahrensspezifischen Restriktionen der laseradditiven Fertigung in die frühe Gestaltungsphase. Die vorgestellte Methode setzt sich aus der Prüfung der Fertigbarkeit des 3D-CAD-Modells und einer nachgelagerten Entscheidungshilfe für die Auswahl des optimalen Fertigungsverfahrens zusammen. Die grundlegende Motivation besteht in einer zukünftigen rechnergestützten Umsetzung in Form einer Software, eine prototypenhafte Implementierung steht allerdings noch aus. Einen ähnlichen Ansatz zeigen Martha et al. [Mar14] auf, wobei die entsprechenden Software-Tools und CAD-Addons für die additive Fertigung bereits zur Verfügung stehen.

2.3 Leichtbau

Leichtbau ist eine interdisziplinäre Ingenieurswissenschaft, welche mit Erkenntnissen aus der Festigkeitslehre, der Werkstoffkunde, der Fertigungstechnik und der Rechen-technik das Ziel verfolgt, das Gewicht hinsichtlich funktionaler oder ökonomischer Aspekte zu minimieren, ohne dabei die Tragfähigkeit oder Steifigkeit zu reduzieren. Damit soll ein minimales Baugewicht unter maximaler Ausnutzung der Struktur erreicht werden [Kle09, Wie07]. Neue Funktionsanforderungen, Umweltschutzauflagen sowie das Streben nach Benutzerfreundlichkeit und Wirtschaftlichkeit steigern die Attraktivität des Leichtbaus. Hierbei müssen Nutzen und Kosten sorgfältig gegenübergestellt werden, da Leichtbaukonstruktionen in der Entwicklung, Herstellung und Erprobung erheblich aufwendiger und kostenintensiver sind als konventionelle Konstruktionen. Hingegen kann durch die Gewichtsreduzierung eine Nutzlaststeigerung, Geschwindigkeitserhöhung und Verringerung der Massenträgheit erreicht werden, was insbesondere für die Verkehrstechnik eine Emissions-/Energiekostenreduzierung zur Folge hat [Deg09, Wie07, Klei09, Nie05]. Einen Überblick über typische Leichtbaustrukturen, deren Versagensmechanismen sowie den Analyseverfahren geben u.a. Klein und Wiedemann [Klei09, Wie07]. Im Folgenden wird der Leichtbau nach seinen Konstruktionsstrategien differenziert. Danach werden die im Leichtbau verwendeten gestalterischen Konstruktionsprinzipien erläutert.

2.3.1 Konstruktionsstrategien des Leichtbaus

Übliche Herangehensweisen bei der Konstruktion von Leichtbaustrukturen lassen sich nach Klein [Klei09] auf drei grundlegende Strategien unterteilen:

- *Strukturleichtbau*: Ziel ist die maximale Werkstoffausnutzung durch eine optimierte Form. Dazu können u.a. geeignete Profilgeometrien und eindeutige Kraftleitungspfade dienen.
- *Fertigungsleichtbau*: Ziel ist die Ausnutzung sämtlicher zur Verfügung stehender Fertigungstechnologien, um ein möglichst integrales Bauteil bei geringstem Werkstoffeinsatz und minimalen Verbindungsstellen zu erhalten.
- *Stoffleichtbau*: Ziel ist die Substitution spezifisch schwerer Werkstoffe durch leichtere Werkstoffe mit möglichst überlegenen Werkstoffkennwerten.

Leichtbau ist allerdings kein Selbstzweck, sondern muss sich an übergeordneten Zielen, im Allgemeinen an Kosten und am Nutzen, orientieren [SCH04]. Insbesondere der Kostenaspekt kann sich hierbei auf alle Phasen des Produktlebenszyklus auswirken. In der Fertigung werden die Werkstoffkosten, in der Logistik die Transportkosten und bei der Nutzung insbesondere die Energiekosten direkt beeinflusst [Pon08]. Vor diesem Hintergrund gilt es bei jeder Leichtbaukonstruktion gezielt die Strategien zu evaluieren, um zu einer wirtschaftlich realisierbaren Leichtbaukonstruktion zu gelangen.

2.3.2 Konstruktive Gestaltungsprinzipien des Leichtbaus

Ziel dieses Abschnitts ist die Zusammenstellung der Gestaltungsprinzipien für leichtbau- und beanspruchungsgerechtes Konstruieren nach Klein und Schmidt, welche im Folgenden erläutert werden [Kle09, Sch04]. Grenzen der Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit gilt es stets fallspezifisch zu betrachten [Kle09].

1. Regel: Möglichst direkte Krafteinleitung und Kraftausgleich

Kräfte sollten möglichst direkt in die Haupttragstruktur eingeleitet werden. Aufgrund komplizierter Spannungszustände bedeuten Kraftumlenkungen oder –umleitungen höhere Belastungen, die wiederum Einfluss auf die Dimensionierung nehmen und zu einem höheren Bauteilgewicht führen.

Um sich einen inneren Kräfteausgleich zunutze zu machen, sollte an unsymmetrischen Konstruktionen nach Möglichkeit eine Symmetrie hergestellt werden. Auf diese Weise lässt sich bei reinen Stützkonstruktionen (Stäbe, Balken) eine meist besser ausgenutzte Schubfeldkonstruktion erreichen. Dies gilt auch für Profile mit beliebiger Querschnittsgeometrie. Ein offenes Profil ist wesentlich geringer belastbar als ein geschlossenes. Als Konstruktionsprinzip lässt sich festhalten, dass Konstruktionen und Profile geschlossen und gegebenenfalls segmentiert werden sollten.

2. Regel: Möglichst großes Flächenträgheits- bzw. Widerstandsmoment

Für torsions-, biege- und knickgefährdete Strukturen sind stets bei kleinstmöglicher Fläche große Trägheitsmomente bzw. Widerstände anzustreben. Dies kann durch eine Masseumlagerung in die stark belastete Randschicht erreicht werden. Unter einer Reduzierung des Eigengewichts und einer Vergrößerung der Abmessungen können mit Hohlprofilen meist größere Flächenträgheitsmomente erreicht werden als mit Vollquerschnitten.

3. Regel: Feingliederung von Strukturen

Flächentragwerke können bei kleiner Querschnittsfläche durch eine aufgelockerte Bauweise deutlich versteift werden. Tragwerke, die über Unterstützungsrippen oder Untergurte verfügen, und etwa Sandwichkonstruktionen, sind um ein vielfaches steifer als massive Tragwerke bei gleichem Materialaufwand.

4. Regel: Nutzung der natürlichen Stützwirkung durch Krümmung

Mittels einer Vorkrümmung von geraden Platten und Scheiben lässt sich deren Knick-, Biege- und Beulsteifigkeit um ein Vielfaches steigern. Bedingt ist dies durch ein erhöhtes Flächenträgheitsmoment und eine verringerte Neigung zur strukturellen Instabilität.

5. Regel: Konstruktionen gezielt in Hauptbelastungsrichtung versteifen

Die Steifigkeit eines Bauteils lässt sich in den Hauptbelastungsrichtungen, durch die gezielte Verwendung von Ortho- oder Anisotropien, erhöhen. Die Anisotropien können dabei durch konstruktive Maßnahmen, wie Sicken oder Rippen, erreicht werden, oder durch Veränderung der werkstoffmechanischen Eigenschaften, wie das Einbringen von Fasern. Auf diese Weise steigen die Instabilitätsgrenze sowie die Tragfähigkeit in Vorzugsrichtung an.

Eine weitere Möglichkeit zur gezielten Versteifung stellt der Einsatz von unterschiedlichen Blechdicken dar. Außerdem kann die Steifigkeit eines Bauteils durch eine Kombination von verschiedenen Werkstoffen belastungsgerecht ausgelegt werden.

6. Regel: Integralbauweise bevorzugen

Ein wichtiger Leitgedanke im Leichtbau ist die Minimierung von Einzelteilen einer Konstruktion. Das Fügen von Einzelteilen bedeutet einen zusätzlichen Aufwand, der wiederum mit Problemen in der Montage und der Zuverlässigkeit einhergeht. Das integrative Prinzip führt zwar häufig zu einem erhöhten Werkzeugaufwand, dieser lässt sich unter Umständen aber durch die geringere Zahl an Einzelteilen, einen verringerten Materialeinsatz oder eine höhere Sicherheit der Konstruktion rechtfertigen.

7. Regel: Materialeinsparung in Bereichen niedriger Belastung

Um das Gewicht einer Leichtbaukonstruktion bei gleichbleibender Steifigkeit weiter zu reduzieren, kann in Bereichen geringer Belastung Material eingespart werden.

8. Regel: Vollständige Ausschöpfung einer Konstruktion

Zur Realisierung von extremem Leichtbau müssen Sicherheitszuschläge auf ein Minimum reduziert werden. Hierzu ist es erforderlich, die auftretenden Belastungssituationen

genau zu kennen und diese in einer exakten Berechnungsmethode zur Bauteilauslegung zu verwenden.

Zudem ist eine optimierte Bauteilgeometrie und der Einsatz von hochwertigen Werkstoffen mit garantierten Eigenschaften Voraussetzung. Besonders wenn das Versagen einer Leichtbaukonstruktion mit der Gefährdung von Menschenleben zusammenhängt (z.B. Flugzeugbau), ist die Sicherheit von großer Bedeutung.

2.4 Grundlagen der Strukturoptimierung

Als Ergänzung zu den klassischen Leichtbaustrategien, vergleiche Abschnitt 2.3, finden zunehmend numerische Verfahren zur Optimierung mechanischer Strukturen Verwendung [Alt09]. Mit ihnen ist es möglich, bereits frühzeitig im Konstruktionsprozess Strukturen in ihrer Gestalt zu optimieren und so spätere, meist kostspielige Iterationszyklen im Rahmen der Produktentwicklung zu vermeiden. Durch die abstrakte Problemdefinition sind überdies oftmals neuartige, von gängigen Paradigmen der Bauteilgestaltung losgelöste Ansätze das Ergebnis. Neue Lösungen für die Strukturfindung und hinsichtlich Gewicht und Strukturverhalten optimierte Bauteileigenschaften können das Ergebnis sein. Diesen Berechnungsverfahren gemein ist in der Regel ein numerischer Ansatz, um mannigfaltig ausgeprägte mechanische Problemstellungen unter Berücksichtigung zuvor definierter Randbedingungen und Ziele zu lösen. Im Rahmen dieses Abschnitts erfolgt vor diesem Hintergrund zunächst eine Differenzierung der typischen Strategien zur Strukturoptimierung. Im Anschluss daran werden die Grundlagen der Topologieoptimierung und deren Einbettung in den Konstruktionsprozess erörtert.

2.4.1 Differenzierung der Strukturoptimierung

Der Begriff Strukturoptimierung fasst verschiedene numerische und nicht numerische Verfahren zur Optimierung von mechanischen Strukturen zusammen. Ziel dieser Verfahren ist eine, meist im mathematischen Sinne, optimale Auslegung von Bauteilen gemäß definierter Anforderungen. Optimierungsparameter können u.a. das Gewicht, die Verformung, die Lebensdauer, die Steifigkeit oder die Eigenfrequenz sein. Das zu maximierende bzw. zu minimierende Optimierungsziel setzt sich aus diesen Eigenschaften zusammen. Welche Verfahren jeweils geeignet und in welcher Reihenfolge diese anzuwenden sind, muss fallspezifisch entschieden werden [Sau08, Sch13]. Abbildung 2.17 fasst die grundlegenden Disziplinen der Strukturoptimierung am Beispiel einer Brückenkonstruktion zusammen.

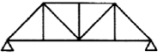
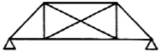
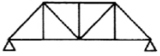
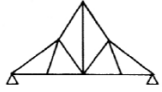
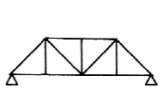
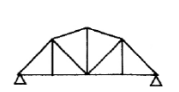
Bauweise			
Topologie			
Material- eigenschaften	Stahl	Aluminium	Verbundwerkstoff
Geometrie / Gestalt			
Querschnitt			

Abbildung 2.17 Klassifizierung der Strukturoptimierung; nach [Sau08]

- Bei der *Wahl der Bauweise* ist die grundlegende Bauweise der Struktur festzulegen. Darüber hinaus müssen u.a. auch Aspekte hinsichtlich der Eignung von Differential- bzw. Integralbauweisen berücksichtigt werden.
- Durch den Einsatz der *Topologieoptimierung* ist es möglich, zu einer frühen Phase des Konstruktionsprozesses einen belastungsgerechten Strukturentwurf zu ermitteln [Hes03]. Ein abstraktes Bauraummodell dient als Ausgangspunkt, auf dessen Grundlage die mechanisch relevanten Bereiche herausdifferenziert und die nicht relevanten Bereiche entfernt werden. Der lokale Elastizitätsmodul oder die lokale Dichte finden dabei als Designvariablen Verwendung [Sau08].
- Durch die sinnvolle Auswahl der Materialien kann über die *Materialeigenschaften* und die Materialstruktur eine Optimierung der Struktur erfolgen [Sau08]. Fallspezifisch müssen die relevanten Werkstoffkennwerte, wie der E-Modul und Festigkeitscharakteristika, als Entscheidungsgrundlage herangezogen werden.
- Bei der *Gestaltoptimierung* findet ein Anpassen einer vorgegebenen Form an die herrschende Belastung statt. Die Kerbspannung kann durch Modifikation der Kerbform reduziert werden und Schalenstrukturen können dadurch versteift werden, dass Sicken eingebracht werden. Als Designvariablen dienen hierbei die Positionen der Knotenpunkte der einzelnen Elemente. Die grundlegende Bauteiltopologie bleibt unverändert [Sau08].
- Bei der *Dimensionierung oder Parameteroptimierung* wird eine Wertbestimmung von Optimierungsvariablen, wie z. B. der Wandstärke, durchgeführt [Sau08]. Grundlage bildet dabei ein parametrisiertes Geometriemodell, welches die Bauteilgeometrie so beschreibt, dass dessen Form von möglichst wenigen Designvariablen abhängt.

Jede Optimierung hat in den Grundzügen den gleichen Aufbau. Die Auswahl bestimmter Designvariablen führt bei Einhaltung gegebener Restriktionen zu einem gewünschten Ziel, welches die Minimierung einer Zielfunktion $f(x)$ in Abhängigkeit vom Vektor der Entwurfsvariablen ist [Sch13]. Ein mathematisches Optimierungsproblem lässt sich nach Harzheim für n Designvariablen, m Ungleichheitsrestriktionen und q Gleichheitsrestriktionen wie folgt definieren [Har08]:

$$\min f(x) \quad (2.2)$$

sodass gilt:

$$\begin{aligned} g_j(\vec{x}) &\leq 0; & j=1,m \\ h_k(\vec{x}) &= 0; & k=1,q \\ x_i^L &\leq x_i \leq x_i^U; & i=1,n \end{aligned} \quad (2.3)$$

Hierbei stellt f die Zielfunktion dar, die zu minimieren ist. Die Ungleichheitsrestriktionen werden mit $g_j(\vec{x})$ und die Gleichheitsrestriktionen mit $h_k(\vec{x})$ bezeichnet. Mit den unteren Grenzen x_i^L (Lower) und oberen Grenzen x_i^U (Upper) werden die expliziten Restriktionen definiert. Als zulässiger Bereich ist der Bereich definiert, für den alle Restriktionen erfüllt werden.

Allgemein ausgedrückt bedeutet eine Optimierung somit die Auswahl möglicher Designvariablen, die bei Einhaltung der Restriktionen ein gewünschtes Ziel erreichen. Das Ziel stellt hierbei eine oder mehrere Eigenschaften dar, die zu minimieren bzw. zu maximieren sind. Dabei sind die Designvariablen Parameter, die eben diese Eigenschaften verändern. Als einzuhaltende Einschränkungen sind schließlich die Restriktionen bei diesem Prozess zu berücksichtigen [Sau08]. Die numerische Lösung der Optimierungsaufgabe erfolgt iterativ durch Algorithmen, für deren Erläuterung an dieser Stelle auf Harzheim u.a. verwiesen sei [Har08, Sch13, Ben03].

2.4.2 Grundlagen der Topologieoptimierung

Ziel der Topologieoptimierung ist die Identifikation einer unter mathematischen Kriterien optimalen Materialverteilung innerhalb eines vorgegebenen Volumens unter Berücksichtigung entsprechender Randbedingungen. Letztere stellen in der Regel aufgebrauchte Lasten, Lagerungen, Bauraumgrenzen und ggf. weitere Randbedingungen, wie beispielsweise Fertigungsrestriktionen, dar [Ben03, Ott09]. Ihr Einsatz ist vor dem Hintergrund der hohen geometrischen Freiheiten der laseradditiven Fertigung im Rahmen der vorliegenden Arbeit daher von besonderem Interesse.

Die Topologieoptimierung lässt sich in die Gruppen der mathematischen und der empirischen Topologieoptimierung einteilen [Har08]. Erstere basiert auf der Lösung eines mathematischen Optimierungsproblems, vergleiche Abschnitt 2.4.1, bei der eine Zielfunktion unter Einhaltung von Restriktionen minimiert wird. Letztere betrachtet kein mathematisches Optimierungsproblem, sondern verwendet eine empirische Iterations-

vorschrift, die beispielsweise adaptive biologische Wachstumsregeln simuliert. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete SIMP-Verfahren (Solid Isotropic Material with Penalization) ist hierbei den Verfahren der mathematischen Topologieoptimierung zuzuordnen. Weitere Verfahren und deren Grundlagen können u.a. Bensoe und Harzheim entnommen werden [Ben03, Har08].

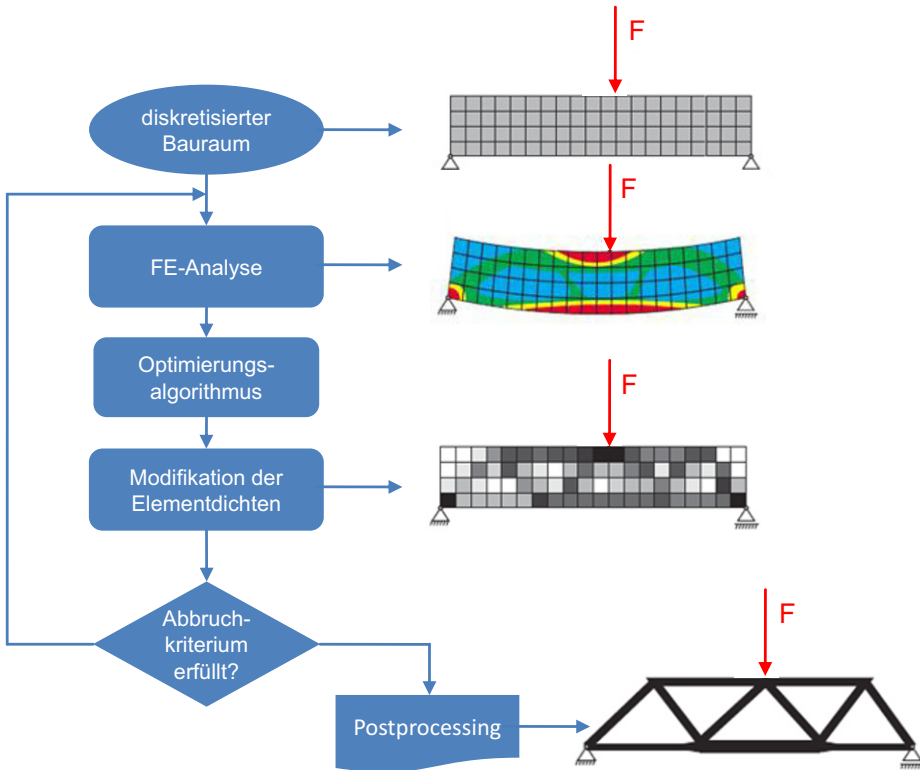


Abbildung 2.18 Optimierungsprozess des SIMP-Verfahrens; nach [Ben03]

Abbildung 2.18 zeigt den iterativen Optimierungsprozess des SIMP-Verfahrens. Ausgehend vom diskretisierten Bauraum erfolgt in jedem Schritt eine FE-Analyse, deren Spannungsverteilung durch den Optimierungsalgorithmus verwertet wird. Bei dem SIMP-Ansatz wird jedem Element i eine Designvariable x_i zugeordnet, die auf die normierte Dichte bezogen wird, siehe Gleichung 2.4. Mit ρ_i^0 und E_i^0 als die Dichte bzw. der E-Modul des massiven homogenen Elements und ρ_i als die dem Element zugewiesene Dichte gilt:

$$x_i = \frac{\rho_i}{\rho_i^0} \quad (2.4)$$

Den Zusammenhang zwischen der Designvariable und dem normierten E-Modul liefert dabei der folgende Potenzansatz:

$$\frac{E_i}{E_i^0} = x_i^p; p \geq 1 \quad (2.5)$$

Entsprechend der Spannungsverteilung der FE-Analyse ist den Elementen idealerweise ein Dichtewert zwischen 0 und 1 zuzuweisen. Dabei entspricht ein Dichtewert von 1 einem hoch beanspruchten Element mit maximalem E-Modul bei voller Masse. Um die numerische Stabilität des Optimierungsproblems zu gewährleisten, wird den Elementen geringer struktureller Relevanz in der Praxis jedoch keine Dichte von 0 zugewiesen, sondern ein geringfügig höherer Wert. Durch den niedrigen E-Modul weisen diese Elemente ein sehr weiches Verhalten auf und simulieren so ein Loch im Bauraum. Im Rahmen des iterativen Prozesses werden aufbauend auf den Ergebnissen der FE-Analyse so Elementen mit geringer Belastung, also geringer struktureller Relevanz, immer niedrigere Dichtewerte zugewiesen [Har08].

Der Exponent p nach Gleichung 2.5 stellt einen Strafexponenten dar, dessen Einfluss in Abbildung 2.19 dargestellt ist. Es ist offensichtlich, dass durch die Nichtlinearität Elemente mit mittleren Dichten als „unökonomisch“ zu betrachten sind, da diese durch die geringe Steifigkeit einen geringen Nutzen, durch ihr Volumen jedoch „hohe Kosten“ verursachen. Mit steigendem Wert des Strafexponenten bewegt sich das Ergebnis somit immer mehr zu einem Design ohne Zwischenwerte, also einer 0-1-Verteilung, und erleichtert so die Interpretation der als Ergebnis gelieferten und belastungsabhängigen Dichteverteilung durch den bearbeitenden Konstrukteur [Har08].

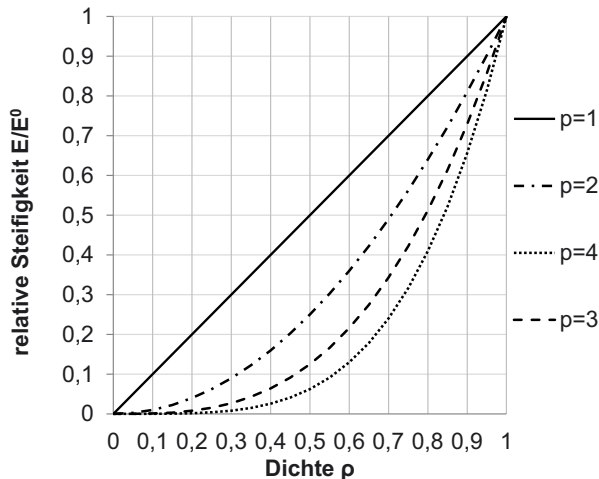


Abbildung 2.19 SIMP-Ansatz für verschiedene Werte von p ; nach [Har08]

Ändern sich die Ergebniswerte der Zielfunktion nach einer zu definierenden Iterationsanzahl nur noch um einen festzulegenden Schwellenwert, so erfolgt der Abbruch der Iterationsschleife und das Ergebnis ist konvergiert. Anschließend können die Ergebnisdaten im Rahmen des Postprocessings ausgewertet werden [Har08], siehe Abschnitt 2.4.2.

Der Vorteil der Topologieoptimierung ist ihre hohe Flexibilität. So können nicht nur Dimensionierungsgrößen, wie z.B. Blechdicken und Radien, oder äußere Konturen modifiziert werden, sondern auch die Ausbildung von Löchern innerhalb der Struktur. Darüber hinaus erfolgt im Rahmen der Berechnungen keine Modifizierung der Vernetzung, sodass Netzverzerrungen oder eine Notwendigkeit zur Neuvernetzung vermieden werden [Har08].

Ein Nachteil der SIMP-Methode ist die Netzabhängigkeit der Ergebnisse. Abbildung 2.20 zeigt die Optimierungsergebnisse exemplarisch für eine Scheibe. Es ist deutlich zu erkennen, dass ohne eine entsprechende Stabilisierung der Lösung durch geeignete Filter die Feingliedrigkeit der Struktur mit steigender Netzfeinheit zunimmt. Die Filterparameter sind entsprechend der geltenden Fertigungsrandbedingungen festzulegen. Darüber hinaus können als weiterer Defekt schachbrettartige Dichteverteilungen, sog. Checkerboard-Moden, auftreten. Hervorgerufen werden diese durch eine ungeeignete numerische Modellierung und dadurch hervorgerufene Überbewertung der Steifigkeit der Schachbrettstrukturen. Letztere können ebenfalls durch entsprechende Filter vermieden werden [Kem04].

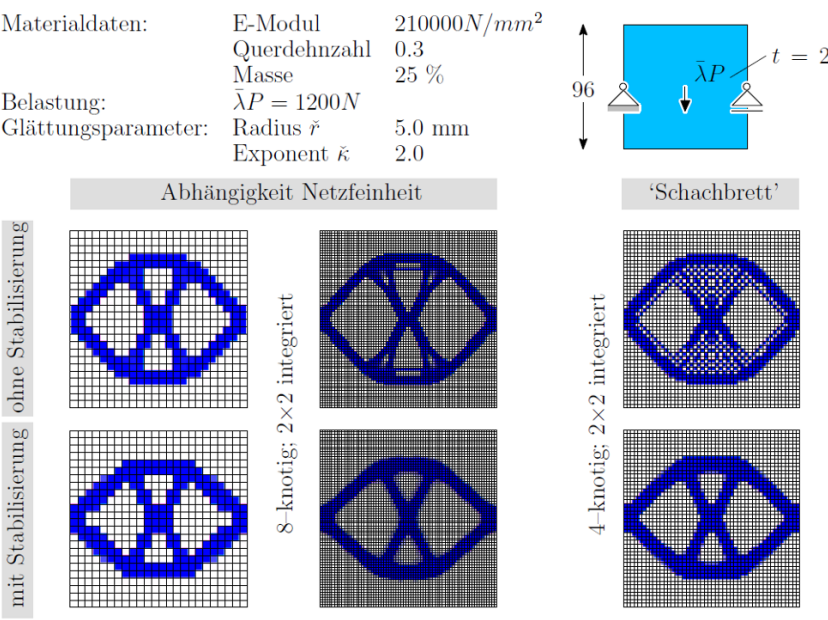


Abbildung 2.20 Mögliche Ergebnisse der SIMP-Methode [Kem04]

2.4.3 Integration in den Konstruktionsprozess

Die Wahl der Bauweise und der Materialeigenschaften sind durch die Anforderungen an das Bauteil bereits im Rahmen der Konzeptphase zu definieren. Beide Optimierungsansätze basieren meist auf empirischen Daten und Erfahrungswissen der Konstrukteure. Die Verfahren der Topologie-, der Gestalt- und der Parameteroptimierung sind aufgrund ihrer mathematisch beschreibbaren Problemstellungen in Softwaretools zur Strukturoptimierung implementiert und für unterschiedliche Stadien der Konstruktionsphase nach VDI 2221 geeignet [Hes03], siehe Abschnitt 2.1.3. Da es das Ziel der Topologieoptimierung ist, dem Konstrukteur Denkanstöße für eine hinsichtlich Gewicht und Beanspruchung optimale Nutzung des Bauraums zu liefern, ist sie in der frühen Entwurfsphase bzw. der späten Konzeptphase anzuwenden. Gestalt- und Parameteroptimierung hingegen finden typischerweise bei Bauteilen Verwendung, die bereits fertigungsgerecht konstruiert sind und noch beanspruchungskritische Bereiche mit hohen Kerbspannungen bzw. nicht optimale Wanddicken oder Querschnitte aufweisen. Sie sind damit vorzugsweise in der späten Entwurfsphase, in jedem Fall nach der Topologieoptimierung, anzuwenden. Insbesondere die Eigenschaft der Topologieoptimierung im Sinne des Strukturleichtbaus, siehe Abschnitt 2.3, überlegene und insbesondere von gängigen Fertigungsrestriktionen losgelöste Strukturlösungen zu schaffen, bietet für die laseradditive Fertigung ein großes Potential zur Erschließung der hohen geometrischen Gestaltungsfreiheit im Rahmen der Entwurfsphase. Neue Denkansätze und ein von gängigen Restriktionen losgelöstes Design können die Folge sein [Emm11a, Emm11b, Emm11c, Hag01, Hop06]. Vor diesem Hintergrund wird sich auf die Betrachtung der Entwurfsphase beschränkt und ein besonderer Fokus auf die Topologieoptimierung gelegt [Con08a, Nic03].

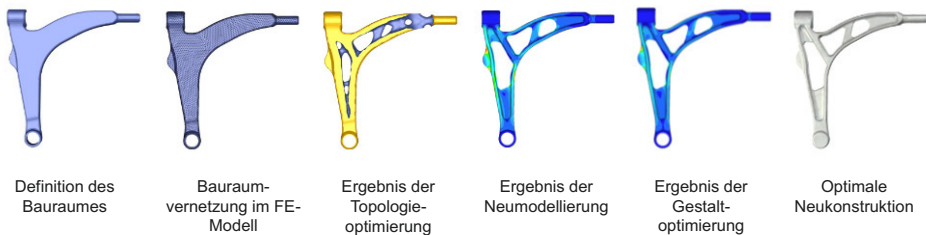


Abbildung 2.21 Strukturoptimierung im Konstruktionsprozess; nach [Tos15]

Nach Hessel und anderen ist die in den Konstruktionsprozess integrierte Topologieoptimierung, siehe Abbildung 2.21, gemäß dem folgenden Schema durchzuführen [Alt09, Hes03, Sau02, Sch13]:

Definition des Bauraums:

Grundlage des Prozesses ist die Festlegung des verfügbaren Bauraums. Bereits in diesem Stadium sind möglichst genaue Definitionen der Schnittstellen anzustreben, um aussage-

kräftige Ergebnisse zu erhalten. Weiterhin hat sich als geeignet herausgestellt, den Bauraum stets zu groß zu wählen, da das Verfahren lediglich Volumen entfernen, jedoch nicht hinzufügen kann. Es gilt bereits hier die Restriktionen des gewählten Fertigungsverfahrens in die Bauraummodellierung mit einfließen zu lassen.

FE-Modell:

Ziel ist die Erstellung eines FE-Modells mit nahezu realitätsnahen Lasten, Randbedingungen und Werkstoffkennwerten. Hier ist das Optimierungsproblem zu erfassen. Der Schritt wird auch Preprocessing genannt und ist wie folgt zusammengesetzt:

- *Definition der Entwurfsvariablen:* Es ist festzulegen, welcher Bereich optimiert werden soll. Um einen realisierbaren Designvorschlag zu erhalten, sind an diesem Punkt ggf. zusätzliche Fertigungsrandbedingungen einzupflegen.
- *Formulierung des Optimierungsproblems:* Hier erfolgt u.a. die Definition der Zielfunktion, wie z.B. maximaler Steifigkeit, Frequenz-Restriktionen, Gewicht sowie oberer und unterer Grenze der Entwurfsvariablen.

Optimierungsrechnung:

Es erfolgt die Lösung des Optimierungsproblems mittels entsprechender Lösungsalgorithmen, auch Solver genannt, siehe Abschnitt 2.4.1.

Ergebnis der Topologieoptimierung:

Im Rahmen des sog. Postprocessings folgt die Ergebnisinterpretation und Überprüfung auf Plausibilität, was ein hohes Maß an mechanischem und fertigungstechnischem Verständnis seitens des Konstrukteurs erfordert, da oftmals nicht eindeutig interpretierbare Modellregionen vorhanden sind. Grundlage für die Weiterverarbeitung sind die Punkt- und Elementinformationen sowie die fiktiven Werkstoffeigenschaften der Elemente. Zur Modellvereinfachung können zusätzliche Glättungsfunktionen verwendet werden.

Neumodellierung:

Es folgt die Neumodellierung und Neukonstruktion mittels eines 3D-CAD-Systems und die Anpassung an die Fertigungsrestriktionen, die maßgeblich die Ausnutzung des Designvorschlags beeinflussen.

Ergebnis der Neumodellierung:

Das neu modellierte 3D-CAD-Modell ist anschließend einer FE-Analyse zur gezielten Überprüfung auf Spannungsspitzen und der restlichen Erfüllung der Anforderungen zu unterziehen. Bei Vorliegen von lokalen Spannungsspitzen ist der Einsatz einer zusätzlichen Gestaltoptimierung, bei nicht optimalen Querschnitten und Wandstärken der Einsatz einer zusätzlichen Parameteroptimierung zu prüfen. Die Definition der Optimierungsprobleme erfolgt analog zur Topologieoptimierung. Ggf. genügen manuelle Anpassungen am Modell.

Nach der Gestalt- bzw. Parameteroptimierung:

Die Ergebnisse der Gestaltoptimierung sind fertigungsgerecht in das bestehende 3D-CAD-Modell einzupflegen. Darauf folgt eine abschließende FE-Analyse.

Optimiertes Bauteil im CAD:

Als Ergebnis des Prozesses liegt ein beanspruchungsoptimiertes Bauteil als Grundlage für weitergehende Prototypentests zur endgültigen Bauteilzulassung vor.

Die Tatsache, dass die Ergebnisse der Optimierungsrechnung in Abhängigkeit von den Restriktionen der gewählten Fertigungsverfahren in der Regel einer Nacharbeit bedürfen zeigt auf, dass es sich bei diesen Ergebnisdaten lediglich um einen Designvorschlag handelt. Die Umsetzung in fertigungstechnisch realisierbare Strukturen bedingt meist eine von der optimalen Lösung leicht abweichende Struktur. Daher ist die Sicherheit oder der Nachweis für das Auffinden des globalen Optimums innerhalb der Strukturoptimierung nicht von zentraler Bedeutung. Die Beurteilung der Ergebnisgüte erfolgt meist auf Basis der Anforderungen oder Vergleichsbauteilen [Ott09].

2.4.4 Verwendete Software

Für die Entwicklung und Erprobung der in dieser Arbeit entwickelten Methodik werden Bauteile mithilfe der Optimierungssoftware Optistruct der Firma Altair optimiert. Zur Erstellung der hierfür erforderlichen FEM-Modelle sowie für die Auswertung der Ergebnisse werden des Weiteren die Programme Hyper-Mesh und Hyper-View verwendet. Die genannten Programme sind Bestandteil des Programmpaketes Altair-Hyperworks Version 12.0.

2.5 Gestaltungsbegleitende Kostenbetrachtung

In allen Phasen des Entwicklungsprozesses spielt das hinreichend richtige und rechtzeitige Erkennen von Kosten eine bedeutende Rolle [Ehr07]. Abbildung 2.22 zeigt die Möglichkeit der Kostenbeeinflussung und die kumulierte Kostenentstehung während der Produktlebensphasen auf. Es ist ersichtlich, dass insbesondere die Kostenbetrachtung (Kostenfrüherkennung und -optimierung) in den frühen Lebensphasen des Produktes von hoher Relevanz ist. So gilt es, eine Optimierung der Kosten insbesondere dann durchzuführen, wenn die Beeinflussbarkeit am größten ist, der aufzuwendende Kostenanteil jedoch am geringsten ausfällt [Ehr07].

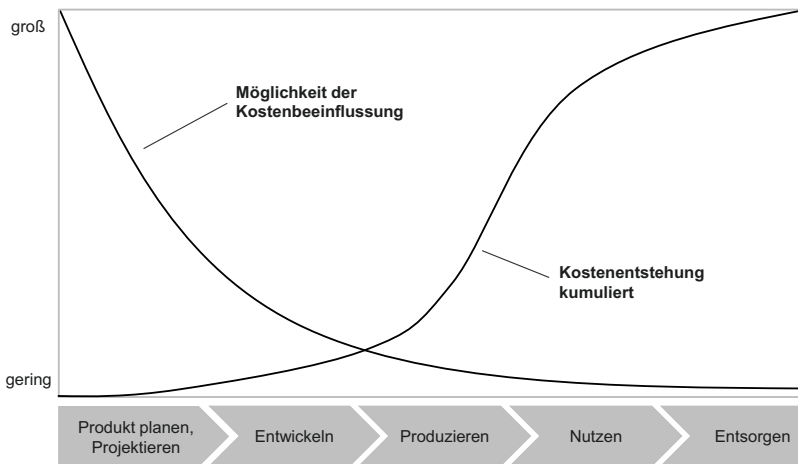


Abbildung 2.22 Möglichkeit der Kostenbeeinflussung und kumulierte Kostenentstehung über den Produktlebenszyklus; nach [Ehr07]

Hinsichtlich der dazu erforderlichen Kostenfrüherkennung besteht in der Anfangsphase das Dilemma, dass nur wenig über die tatsächlich entstehenden Kosten bekannt ist, da das Produkt und die erforderlichen Prozesse in dieser Phase in der Regel nur vage definiert sind [Ehr07]. Nach der Entwicklungsphase ist ein Großteil der Lebenslaufkosten bereits festgelegt. In den folgenden Lebensphasen sind Änderungen aufgrund der abnehmenden Beeinflussbarkeit dann häufig mit hohen Kosten verbunden [Ehr07]. Insbesondere in der Gestaltungsphase kommt der Kostenbetrachtung demnach eine besondere Bedeutung zu.

Vor diesem Hintergrund fasst dieser Abschnitt zunächst die Grundlagen des kostengünstigen Konstruierens sowie der Kostenabschätzung zusammen. Nach der Zusammenstellung von Einflussgrößen auf die wirtschaftliche Nutzung der laseradditiven Fertigung schließt der Abschnitt mit einer Zusammenfassung von Ansätzen zur Berechnung der Bauteilstückkosten für die laseradditive Fertigung.

2.5.1 Grundlagen zum kostengünstigen Konstruieren

Die durch das Produkt verursachten Kosten sind zum einen die Herstellkosten, welche sich im Wesentlichen aus den Materialkosten und den Fertigungskosten zusammensetzen. Diejenigen Kosten, die nicht direkt dem Produkt zugeordnet werden können (z.B. Verwaltungskosten) gehen zusammen mit den Herstellkosten in die Selbstkosten ein. Die Selbstkosten gehen als Teil des Verkaufspreises wiederum mit in die Lebenslaufkosten ein. Die Lebenslaufkosten wiederum sind die Summe aller Kosten, die während der Nutzungszeit für den Produktnutzer entstehen, siehe Abbildung 2.23. Der erzielte Gewinn ist die Differenz aus Verkaufspreis und den Selbstkosten des Unternehmens [Ehr07].

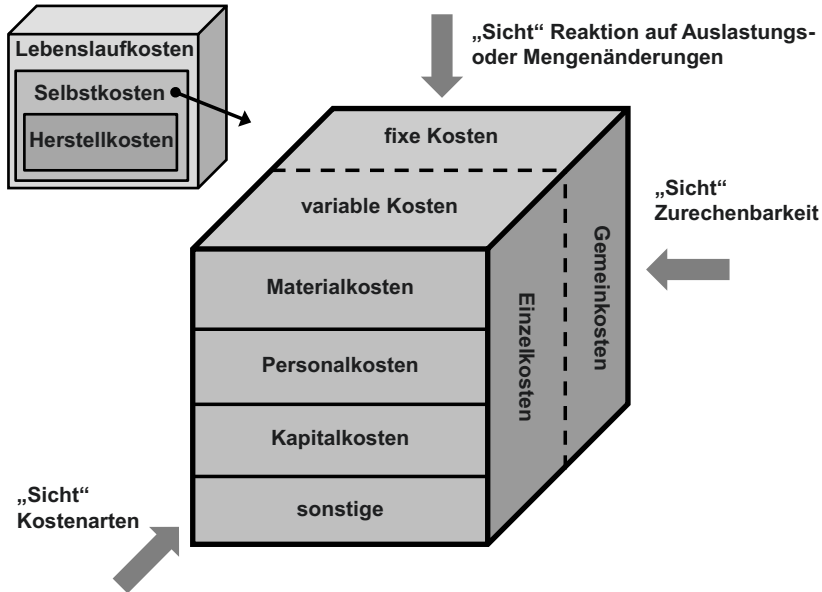


Abbildung 2.23 Einteilung der Kosten und verschiedene Sichten auf die Kosten eines Unternehmens; nach [Ehr07]

Die Selbstkosten eines Unternehmens und Möglichkeiten zu ihrer Senkung können aus einer Vielzahl von Perspektiven heraus betrachtet werden. So kann eine Einteilung anhand der Kostenarten (z.B.: Materialkosten, Personalkosten, Kapitalkosten) vorgenommen werden. Aus Sicht der Zurechenbarkeit lassen sich diese wiederum in Gemein- und Einzelkosten oder aus Sicht der „Reaktion auf Auslastungs- oder Mengenänderungen“ in variable und fixe Kosten einteilen. Einzelkosten sind Kosten, die sich sogenannten Kostenträgern (z.B. Produkte oder Dienstleistungen eines Unternehmens) direkt zuordnen lassen. Dies sind zum Beispiel Kosten für Fertigungsmaterial und -lohn (sofern die Lohnkosten dem Kostenträger direkt zugeordnet werden können). Als Gemeinkosten werden diejenigen Kosten verstanden, die nicht direkt einem Kostenträger zugeordnet werden können. Dies sind zum Beispiel Raum- oder Verwaltungskosten. Beispiele für variable Kosten sind u.a. Materialeinzel- oder Fertigungslohnkosten. Sie fallen an, wenn tatsächlich produziert wird. Die variablen Kosten können oftmals auch den Einzelkosten zugeordnet werden. In der Regel unabhängig von der Auslastung des Unternehmens fallen fixe Kosten an. Dies sind zum Beispiel Mieten, Abschreibungen sowie Gehälter und sind in der Regel den Gemeinkosten zuzuordnen [Ehr07].

Die Lebenslauf-, Selbst- und Herstellkosten, siehe Abbildung 2.23, werden maßgeblich in der frühen Entwicklungsphase beeinflusst, siehe Abbildung 2.22, denn jede technische Festlegung stellt eine Festlegung von Kosten dar [Ehr07]. In der Konstruktion sind hauptsächlich die variablen Kosten von Bedeutung, da diese unmittelbar beeinflusst

werden können [Pah07]. Als konstruktive Hauptkosteneinflüsse werden diesbezüglich zusammengefasst [Ehr07]:

- Aufgabenstellung (Anforderungen)
- Konzept (Funktionsprinzip, Werkstoffwahl, Komplexität)
- Baugröße und Stückzahl
- Fertigungs- und Montagetechnologie

Als eine Methode für die fertigungsgerechte und damit kostengünstige Formgebung von Bauteilen kann die Gestaltvariation hervorgehoben werden, siehe Abschnitt 2.1.4 [Ehr07]. Dies untermauert zudem die Wichtigkeit der Gestaltungsphase für die Kosten. Unter dem Aspekt indirekte Variation wird auch die Variation der stofflichen Eigenschaften eingeschlossen. Demnach werden durch die Gestalt die wesentlichen Kostenparameter wie etwa Baugröße, Material, Fertigungsverfahren, Oberflächenbehandlung und Montage festgelegt [Pah07].

Einige Grundregeln zur Beeinflussung der Kosten durch Materialeinsparung nach Pahl [Pah07] sind identisch mit den in Abschnitt 2.3.1 erläuterten Grundprinzipien des Leichtbaus. Dies verdeutlicht, dass durch eine sachgerechte Werkstoffwahl, durch Bevorzugung von Zug- / Druckbeanspruchungen und beanspruchungsgerechten Querschnitten, durch Lastaufteilung oder -verzweigung sowie durch Integralbauweise Kosteneinsparungen erzielt werden können. Ebenso können Kosten durch die geeignete Auswahl von materialsparenden Fertigungsverfahren reduziert werden. Als ein ideales Beispiel kann hier die laseradditive Fertigung angeführt werden, die im Vergleich zu konventionellen Fertigungstechnologien eine sehr hohe Ressourceneffizienz besitzt. Es wird nur das Material belichtet, welches auch tatsächlich verwendet wird. Die entstehenden Materialverluste sind dabei sehr gering [Geb07]. Für konkrete Maßnahmen, Regeln und Strategien zur Senkung der Herstell-, Selbst-, und Lebenslaufkosten sei an dieser Stelle auf Ehrlenspiel [Ehr07] und Pahl [Pah07] verwiesen.

2.5.2 Grundlagen zur Kostenabschätzung

Im Sinne einer Kostenfrüherkennung ist es wesentlicher, die Kosten abschätzen zu können, als sie im Einzelnen sehr genau zu berechnen [Pah07]. Die umfangreichere konventionelle Kostenrechnung ist für diese Aufgabe oft nur bedingt geeignet. Deshalb wurden sogenannte Kurzkalkulationsverfahren entwickelt, die auf entscheidungsrelevante Parameter der Entwicklung ausgerichtet sind [Ehr07]. Unter Kurzkalkulation versteht man nach DIN 32990 [DIN32990] eine vereinfachte Methode zur Kostenermittlung für einen definierten Kostenträger (auch Schnell-, Ähnlichkeits-, Äquivalenzziffernkalkulation).

Weil das Produkt noch nicht detailliert beschreibbar ist und die entwicklungsbegleitende Kalkulation einfacher sein soll als die übliche Vorkalkulation, sind deren Ergebnisse notwendigerweise ungenauer, als die Ergebnisse einer umfangreicheren Vor- oder Nachkalkulation. Welche Ungenauigkeit zulässig ist, hängt vom Verwendungszweck der

Kalkulation ab. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung dieser Arbeit besteht der Verwendungszweck der angestrebten mitlaufenden Kostenabschätzung vornehmlich in einem Variantenvergleich. Für den Variantenvergleich muss die Genauigkeit nur so hoch sein, dass es möglich ist, sicher zwischen verschiedenen Varianten entscheiden zu können. Wichtig ist, dass richtige Lösungsentscheidungen während der Entwicklung und damit einhergehende geringe Produktkosten nur auf der Grundlage einer zutreffenden Analyse der zur Auswahl stehenden Lösungsvarianten getätigt werden können. Wird der Preis für eine Angebotserstellung aufgrund der vermutlich entstehenden Herstellkosten festgelegt, ist eine hohe Genauigkeit nötig, um eine entsprechende Kostendeckung sicherstellen zu können [Ehr07]. Darüber hinaus ist die Genauigkeit der Kalkulation von der Genauigkeit sowie Verfügbarkeit der Eingangsgrößen abhängig.

2.5.3 Wirtschaftlichkeitsfaktoren der laseradditiven Fertigung

Wie in Abschnitt 2.5.1 erläutert, ist es wichtig, Bauteile bzw. Produkte zu identifizieren, bei welchen eine Substitution durch laseradditiv gefertigte Bauteile mit einem klar erkennbaren technisch-wirtschaftlichen Nutzen einhergeht. Allgemein kann die Eignung eines Bauteils für die laseradditive Fertigung bei Erfüllung einer der folgenden Kriterien als positiv bewertet werden [Gib10, Geb07, Atz12, Kla14]:

- hohe Bauteilkomplexität
- konventionell schwierige Fertigung
- Produktoptimierung durch Ausnutzung der gestalterischen Freiheiten
- Umsetzung der Funktionsintegration
- individuelle Produkte mit hoher Variantenvielfalt und kurzen Produktlebenszyklen
- geringe Produktionsvolumina (Einzelfertigung, Kleinserie)

Die erwähnten Kriterien tragen bei Erfüllung jeweils indirekt zur positiven Wirtschaftlichkeitsbewertung einer möglichen Bauteilsubstitution bei. Ergänzend hierzu können die Einflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit betrachtet werden. Die wichtigsten Charakteristika der laseradditiven Fertigung und deren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit sind:

Bauzeit

Die Bauzeit wird maßgeblich von den Maschinenspezifikationen (Beschichtungszeit, Scangeschwindigkeit, Verzögerung) sowie dem Bauteilvolumen, der Bauteilgeometrie und der Anzahl der Bauteile pro Bauprozess bestimmt. Eng hiermit verbunden ist bei feststehender Bauteilgeometrie und feststehendem Bauteilvolumen die Bauteilorientierung. Sie hat zudem einen Einfluss auf die Festigkeiten, Genauigkeiten und die Oberflächengüte der Bauteile. Neben der Netto-Fertigungszeit der Maschine müssen verfahrensbedingte Nebenzeiten berücksichtigt werden. Dazu gehören die Maschinenvorbereitungs- und Maschineneinrichtungszeit. Ebenso sind neben der Netto-

Nachbearbeitungszeit nachbearbeitungsbedingte Nebenzeiten zu berücksichtigen. Dies sind zum Beispiel das Abkühlen nach der Wärmebehandlung oder auslastungsbedingte Liegezeiten der Bauteile bzw. Rohlinge [Geb07][Gib10].

Bauraumausnutzung und Losgröße

Bei diskontinuierlich produzierenden Maschinen ist eine unvollständige Ausnutzung des Bauraumes in jedem Fall unwirtschaftlich, da die begleitenden Prozessschritte (z.B. Maschinenvorbereitung und Einrichtung) nahezu unabhängig von der Bauraumausnutzung sind. Daher sollte bei diskontinuierlichen Verfahren stets eine vollständige Bauraumausnutzung angestrebt werden. Die Losgröße bezeichnet die Menge von Produkten bzw. Bauteilen pro Fertigungsauftrag. Liegt die mögliche Anzahl der Bauteile pro Bauprozess oberhalb der gesamten zu produzierenden Stückzahl (Produktionsvolumen), ist nur ein Bauprozess zur Auftragsbefriedigung notwendig. Ist die gesamte zu produzierende Stückzahl größer als die Anzahl der möglichen Bauteile pro Fertigungsauftrag, so muss die Produktion mit mehreren Bauprozessen erfolgen. Da im Gegensatz zu vielen konventionellen Verfahren keine Modell- oder Werkzeugherstellung erforderlich ist und nahezu keine Werkzeuge beschafft werden müssen, entfällt bei der laseradditiven Fertigung die Notwendigkeit zur Amortisation bzw. Abschreibung derartiger Mittel. Bei vollständiger Bauraumausnutzung durch gleiche Bauteile über das gesamte Produktionsvolumen folgt daraus, dass die Bauteilstückkosten nahezu unabhängig von dem Produktionsvolumen bzw. der Losgröße sind [Geb07, Atz12, Gib10].

Materialverbrauch

Der tatsächliche Materialverbrauch wird bei der laseradditiven Fertigung aufgrund des additiven Charakters unmittelbar durch das Bauteilvolumen bestimmt. Es kann nahezu ohne Materialverluste gefertigt werden. Der Materialverlust bei der laseradditiven Fertigung besteht zum einen aus dem Material, welches für die ggf. erforderlichen Supportstrukturen verwendet werden muss. Als weitere Verluste sind u.a. das nicht aufgeschmolzene, jedoch durch den Energieeintrag beeinflusste, Pulver, sowie Pulverrückführungsverluste, die im Rahmen der Maschinenvorbereitung und der Pulveraufbereitung auftreten, zu nennen. Im Vergleich dazu entsteht bei den konventionellen, zerspanenden Fertigungsverfahren aufgrund des subtraktiven Charakters häufig ein sehr hoher Verschchnitt, der insbesondere bei Leichtbaustrukturen bis über 90 % des Halbzeugvolumens betragen kann [Emm11a, Geb07, Gib10].

Überdies wird der Materialverbrauch der laseradditiven Fertigung nicht nur durch das Volumen, sondern auch durch die Gestalt des Bauteils beeinflusst. Durch eine verfahrensgerechte Gestaltung kann der Supportbedarf reduziert werden, sodass die tatsächlichen Materialverluste, welche durch die erforderlichen Supportstrukturen entstehen, sehr gering sein können.

Bauteilgeometrie

Die Bauteilgeometrie additiv zu fertigender Bauteile sollte möglichst komplex sein, um gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren Kostenvorteile erzielen zu können. Die gestalterischen Freiheiten des Verfahrens sollten demnach größtmöglich ausgenutzt werden. Besondere Vorteile hat die laseradditive Fertigung aus wirtschaftlicher Sicht dann, wenn die geforderte Bauteilgeometrie durch konventionelle Verfahren nicht umgesetzt werden kann oder die Kosten aufgrund der hohen Komplexität zu hoch sind [Geb07, Gib10].

Prozesssicherheit

Die Bauteilgestaltung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Prozesssicherheit und -reproduzierbarkeit des Fertigungsergebnisses. Die Nichtbeachtung von Prinzipien der fertigungsgerechten Bauteilkonstruktion kann zu Prozessabbrüchen führen und dadurch zusätzliche Kosten bedingen. Der Beachtung von Prinzipien der fertigungsgerechten Bauteilkonstruktion im Rahmen der Gestaltungsphase kommt demnach eine hohe Bedeutung zu [Geb07, Gib10].

2.5.4 Abschätzung der Kosten laseradditiv gefertigter Bauteile

Während bei etablierten Fertigungsverfahren Methoden und (rechnergestützte) Werkzeuge existieren, um die Bauteilkosten zu bestimmen, sind diese für die additive Fertigung bislang nur eingeschränkt verfügbar und nutzbar [Kra11]. Gibson [Gib10] et al. führen ein vereinfachtes Kostenmodell für die laseradditive Fertigung an. Als Annahmen werden festgelegt, dass alle Bauteile eines Baujobs annähernd die gleiche Größe und Form besitzen, der Anschaffungspreis auf jedes Jahr gleich verteilt wird und die Nutzungszeit 95% des Jahres beträgt. Für die Bauteilkosten K in [€] wird die Gleichung 2.6 herangezogen. Dabei sind N die Anzahl der Bauteile pro Bauprozess, P in [€] die Abschreibung der Anschaffungskosten der Maschine, O in [€] die Betriebskosten der Maschine, M in [€] die Materialkosten und L in [€] die Arbeitslohnkosten.

$$K = \frac{1}{N} \cdot (P + O + M + L) \quad (2.6)$$

Die auf den Bauprozess verteilte Maschinenabschreibung kann unter den oben genannten Annahmen durch Gleichung 2.7 ausgedrückt werden. Mit K_{masch} in [€] für die Anschaffungskosten der Maschine, T_b in [h] für die Bauzeit und Y in [Jahre] für die Dauer der Abschreibung. Der Faktor n in [h/Jahr] entspricht der Anzahl der Stunden pro Jahr (8760 [h/Jahr]).

$$P = \frac{K_{masch} \cdot T_b}{0,95 \cdot n \cdot Y} \quad (2.7)$$

Die Betriebskosten der Maschine O in [€] lassen sich mit Gleichung 2.8 berechnen. Hierbei entspricht C_o in [€/h] der Betriebskostenrate. Sie ist unter anderem abhängig von der Maschinenwartung, den allgemeinen Betriebskosten und den Raumkosten.

$$O = T_b \cdot C_o \quad (2.8)$$

Die Materialkosten M in [€] setzen sich zusammen aus den gewichtsbezogenen Materialkosten C_m in [€/kg], dem Bauteilvolumen V in [m³] und der Materialdichte ρ in [kg/m³] zusammen. Multipliziert mit der Anzahl der Bauteile N ergeben sich die Materialkosten des Baujobs. Gleichung 2.9 gibt den formellen Zusammenhang wieder. Die Faktoren k_r und k_s stellen Zuschlagsfaktoren dar. Durch den Faktor k_r werden Pulverrückführungsverluste berücksichtigt. Durch den Faktor k_s wird des Weiteren das erforderliche Bauvolumen der Supportstrukturen mit in die Materialkosten aufgenommen.

$$M = k_s \cdot k_r \cdot N \cdot C_m \cdot V \cdot \rho \quad (2.9)$$

Die Arbeitslohnkosten L in [€] beinhalten im Wesentlichen die Zeit, die das Personal zur Vorbereitung des Bauprozesses, zur Abtrennung und Säuberung der Bauteile sowie zur Reinigung der Maschine benötigt. Zusammengefasst wird die Summe dieser Zeiteile zur Arbeitszeit T_l in [h]. Die Arbeitslöhne werden mit C_l in [€/h] bezeichnet. Mit Gleichung 2.10 lassen sich die Arbeitslohnkosten L in [€] berechnen.

$$L = T_l \cdot C_l \quad (2.10)$$

Die Bauzeit T_b in [h] besteht neben möglichen Verzögerungszeiten aus der Beschichtungszeit T_B in [s] und der Belichtungszeit T_S in [s]. Gibson et al. [Gib10] stellen einen Ansatz vor, der auf einer Berechnung der Scanlängen und -geschwindigkeiten basiert. Alternativ kann die Bauzeit T_b in [h] näherungsweise über die maschinenspezifische Schmelzrate $\dot{S}$ in [cm³/h], die Schichtdicke d_s in [μm] und auch die Beschichtungszeit t_B in [s] errechnet werden. Dies wird durch Gleichung 2.11 ausgedrückt. H in [mm] ist die Höhe des Bauteils.

$$T_b = T_B + T_S + T_D = \frac{H \cdot (t_B + t_D)}{3,6 \cdot d_s} + \frac{N \cdot V}{1000 \cdot \dot{S}} \quad (2.11)$$

Die Verzögerungszeit T_D in [h] wird durch Multiplikation der Anzahl der zu belichtenden Schichten mit der schichtweisen *Verzögerungsdauer* t_D in [s] bestimmt. Die beiden erwähnten Alternativen zur Bestimmung der Bauzeit nach Gibson [Gib10] et al. sowie nach Gleichung 2.11 stellen nur grobe Näherungen dar, sodass die berechnete Bauzeit weit von der tatsächlichen Bauzeit abweichen kann. Genauere Bauzeiten können in der Regel über die Maschinensoftware des Anlagensystems bestimmt werden.

Atzeni et al. [Atz12] führen unter gleichen Annahmen u.a. eine Kostenuntersuchung eines laseradditiv gefertigten Bauteils durch. Anders als bei Gibson et al. [Gib10] werden die Bauteilkosten in *Materialkosten*, *Prä-Prozesskosten*, *Prozesskosten* und in *Post-Prozesskosten* eingeteilt [Atz12]. Zudem werden die Materialkosten über das Bauteilvolumen und einem Zuschlag von 10% bestimmt. Der Ansatz von Gibson et al. [Gib10] differenziert an dieser Stelle in Zuschlagsfaktoren für Materialverluste und Supportstrukturen. Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass die Bauzeit bei der Kostenuntersuchung von Atzeni et al. [Atz12] mithilfe der Maschinensoftware bestimmt wird. Ebenso werden bei Gibson et al. [Gib10] die Abschreibungen der Maschine (Gleichung 2.7) und die

Betriebskosten (Gleichung 2.8) nicht zu einem Maschinenstundensatz zusammengefasst. Atzeni et al. [Atz12] berücksichtigen zudem Montagekosten. Dies ist hauptsächlich darin zu begründen, dass die Montagekosten aufgrund einer integralen Bauweise erheblich gesenkt werden konnten und damit für diesen speziellen Anwendungsfall der Kostenabschätzung von hoher Relevanz sind.

Als einen letzten Beitrag zur Kostenbetrachtung werden relevante Aspekte der modellgestützten und hierarchischen Prozesskettenbetrachtung für die additive Fertigung von Krauss [Kra11] erläutert. Das Modell ist in Form einer Software umgesetzt worden und basiert auf mathematischen Formulierungen zur Prozesskosten und -zeitberechnung. Abbildung 2.24 zeigt Auszüge aus dem Modell. Der vorgestellte Ansatz erlaubt die Berechnung der Prozesskosten und -zeiten auf unterschiedlichen Detaillierungsstufen über die gesamte Prozesskette hinweg. Die Kosten- und Zeitanteile einzelner Schritte werden in diesem Aufbau durch die Elemente wiedergegeben. Auf der hierarchisch tiefsten Ebene eines beliebigen Elementes befinden sich die sogenannten Workflow-Elemente, siehe Abbildung 2.24. Die Kosten- und Zeitblöcke für übergeordnete Elemente ergeben sich anschließend durch Addition über alle Elemente der jeweils tiefer liegenden Hierarchieebene. Die erforderlichen Eingangsgrößen unterteilen sich in Parameter die das Bauteil beschreiben, technische und wirtschaftliche Maschinendaten wie herstellerabhängige Prozessparameter, Materialdaten und -preise sowie unternehmensspezifische Rahmenbedingungen (z.B. Kosten für Strom).

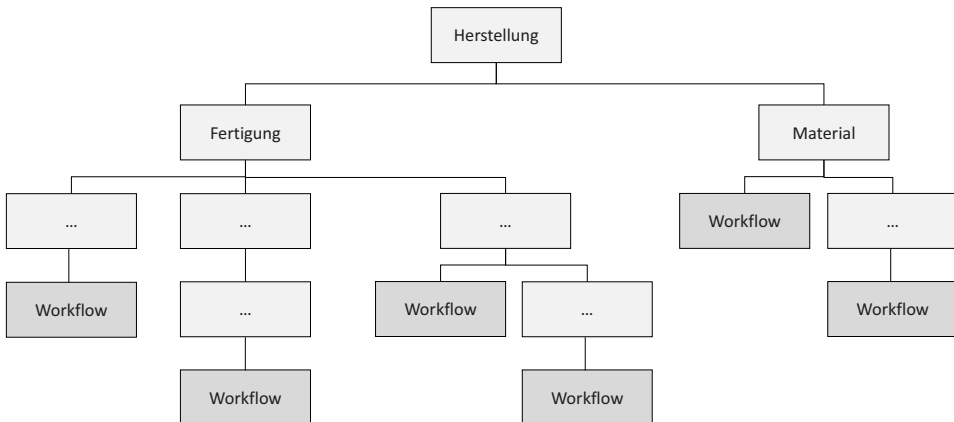


Abbildung 2.24 Hierarchischer Aufbau der Herstellkosten [Kra11]

Durch den hierarchischen Aufbau sind eine Kostenberechnung auf einer beliebigen Detaillierungsstufe sowie eine einfache Erweiterung des Modells möglich. So werden in dem Model z.B. die Dauer und Kosten der spanenden Nachbearbeitung in einem Workflow-Element als mathematisches Modell hinterlegt. Ebenso wird die Fertigung von unterschiedlichen Bauteilen behandelt.

Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von
laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen

Kranz, J.

2017, XVII, 262 S. 176 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-662-55338-1