



Institut für Konstruktionstechnik
und Technisches Design
Universität Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. H. Binz

Florian Weiss

**Untersuchung des Entwicklungsprozesses
für additiv gefertigte Bauteile mittels Bereit-
stellung einer elementaren Informations-
struktur**

Bericht Nr. 687

Untersuchung des Entwicklungsprozesses für additiv gefertigte Bauteile mittels Bereitstellung einer elementaren Informationsstruktur

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der
Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Abhandlung

von

Dipl.-Ing. Florian Weiss

geboren in Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer

Tag der mündlichen Prüfung: 26.04.2019

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Universität Stuttgart

2019

D 93

ISBN-13: 978-3-946924-11-1

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

D-70569 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-66055

Telefax: +49 (0)711 685-66219

E-Mail: mail@iktd.uni-stuttgart.de

Für meine Familie

„Die Praxis sollte das Ergebnis des Nachdenkens sein, nicht umgekehrt.“

(Hermann Hesse)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Konstruktions-technik und Technisches Design (IKTD) der Universität Stuttgart unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz. Ihm gilt besonderer Dank für die Betreuung dieser Arbeit, das mir entgegengebrachte Vertrauen in der Zusammenarbeit und die Freiheit in der Forschung, die diese Arbeit ermöglicht und entscheidend zu ihrer Entstehung beigetragen haben.

Für die Übernahme des Mitberichts und die fachliche Unterstützung möchte ich Herrn Prof. Dr. Detmar Zimmer danken.

Für das bereitwillige und gewissenhafte Korrekturlesen der Arbeit gilt mein Dank meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Alexander Laukemann und Herrn Enno Garrelts M. Sc. sowie dem Leiter meiner Arbeitsgruppe, Herrn Dipl.-Ing. Daniel Roth.

Weiterhin möchte ich mich bei meiner langjährigen wissenschaftlichen Hilfskraft Herrn Markus Kesper B. Sc. für die tatkräftige Unterstützung bei der Programmierung der Onlinenplattform bedanken.

Insbesondere die Diskussion mit meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Alexander Laukemann, Herrn Clemens Honold M. Sc., Herrn Thorsten Herrmann M. Sc. und Herrn Enno Garrelts M. Sc. trugen maßgeblich zur Entstehung der vorliegenden Arbeit bei. Der hervorragende Zusammenhalt und freundliche Umgang unter allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts wird mir fortan in guter Erinnerung bleiben. Nach meiner Tätigkeit am Institut bleibe ich noch durch zahlreiche Freundschaften mit der Zeit hier verbunden.

All meinen Freunden danke ich für die Ermutigung und den Beistand in kritischen Phasen und die Relativierung der Probleme.

Der größte Dank gilt meiner Frau Verena und meiner Tochter Cleo, ohne deren Zutun die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Sie waren mir zugleich eine wunderbare Ablenkung und Motivator zur Arbeit an diesem Manuskript und räumten mir zudem die notwendige Zeit zu seiner Fertigstellung ein. Großer Dank gilt meiner Frau Verena außerdem für das Lektorat der vorliegenden Arbeit.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, deren Vorbild mein Handeln stets beeinflusst. Sie haben mich während meines bisherigen Werdegangs allzeit unterstützt und mir immer Rückhalt gegeben.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abkürzungsverzeichnis..... | V |
| Abstract | IX |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Problemstellung und Zielsetzung..... | 2 |
| 1.2 Struktur der Arbeit..... | 3 |
| 2 Entwicklungsprozesse..... | 7 |
| 2.1 Produktentwicklungsprozesse – kreative und systematische Problemlösung..... | 8 |
| 2.2 Produktentwicklungsprozess (PEP) nach VDI 2221 | 10 |
| 2.3 Begriffliche Abgrenzung von Wissen, Information und Daten..... | 12 |
| 2.4 Einflussfaktoren auf den Entwicklungsprozess | 13 |
| 2.5 Unterstützungsmöglichkeiten von Arbeitsvorgängen | 13 |
| 2.6 Einfluss von Konstrukteuren auf das Entwicklungsvorgehen..... | 14 |
| 2.6.1 Untersuchungen von Dylla | 14 |
| 2.6.2 Untersuchungen von Fricke | 15 |
| 2.6.3 Untersuchungen von Günther | 16 |
| 2.6.4 Eigenschaften guter Problemlöser nach [VDI 2221-1, 2018]..... | 17 |
| 2.7 Informationsumsatz in Entwicklungsprozessen | 17 |
| 2.8 Unterstützung durch Konstruktionsinformationen | 18 |
| 3 Additive Fertigungsverfahren als Produktionstechnologie..... | 21 |
| 3.1 Prinzipielle Aufbaumechanismen additiver Fertigungsverfahren | 22 |
| 3.2 Datenprozesse der additiven Fertigung | 25 |
| 3.3 Kosten additiver Fertigungsverfahren | 26 |
| 3.4 Oberflächen additiv gefertigter Bauteile..... | 28 |
| 3.5 Konstruktionsrestriktionen additiver Fertigungsverfahren | 29 |
| 3.5.1 Konstruktionsrestriktionen in Bezug auf Schicht- und Bahnapproximation | 30 |
| 3.5.2 Konstruktionsrestriktionen zur Reduktion von Ungenauigkeiten durch Unschärfen des räumlichen Energieeintrags..... | 32 |
| 3.5.3 Konstruktionsrestriktionen in Bezug auf notwendige Nachbearbeitung..... | 35 |
| 3.6 Erfolgsfaktoren der additiven Fertigung | 36 |
| 3.7 Entwicklungsmethodik als Forschungsfeld im Bereich AM | 38 |
| 3.8 Produktvorteil von AM durch geänderte / geringere Konstruktionsrestriktionen | 40 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 3.8.1 | Produktvorteile durch konstruktive Freiheit zum Leichtbau | 42 |
| 3.8.2 | Produktvorteile durch konstruktive Freiheit zur Funktionsintegration | 43 |
| 3.8.3 | Checkliste AM-gerechte Gestaltung | 47 |
| 3.9 | Informationssysteme zur Unterstützung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile | 49 |
| 3.10 | AM-spezifische Beschreibungen von Entwicklungsprozessen | 50 |
| 3.10.1 | Teilprozesse der Entwicklung von AM-Bauteilen | 51 |
| 3.10.2 | AM-Entwicklungsprozesse in Anlehnung an die VDI 2221 | 54 |
| 3.11 | Konkretisierung der Aufgabenstellung | 60 |
| 4 | Inhalte der Unterstützung zur Entwicklung additiv gefertigter Bauteile | 61 |
| 4.1 | Notwendige Informationen zum Konstruieren für AM | 61 |
| 4.2 | Elementare Informationsstruktur zur Entwicklung von AM-Bauteilen | 64 |
| 4.2.1 | Informationsbereitstellung auf einer Onlineplattform | 68 |
| 4.2.2 | Nutzungsfunktionen der Onlineplattform | 70 |
| 4.3 | Inhaltliche Ausarbeitung der Informationsstruktur | 71 |
| 4.4 | Datenerhebung über Nutzertätigkeiten auf der Onlineplattform | 79 |
| 5 | Evaluation der Informationsstruktur | 81 |
| 5.1 | Versuchsaufbau | 81 |
| 5.2 | Versuchsergebnisse zur Entwurfsqualität | 88 |
| 5.3 | Ergebnisse der Evaluation mit Fragebogen | 92 |
| 5.4 | Versuchsergebnisse zu AM-spezifischer Informationsnutzung | 97 |
| 5.4.1 | Häufigkeit der Informationsnutzung | 99 |
| 5.4.2 | Abfolge der Informationsnutzung | 102 |
| 6 | Zeitliche Einordnung der Informationsgruppen | 111 |
| 6.1 | Ableitung der zeitlichen Informationsstrukturierung | 111 |
| 6.2 | Evaluation der zeitlichen Informationsstrukturierung | 116 |
| 7 | Diskussion der Erkenntnisse aus den Versuchen | 119 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 123 |
| | Literaturverzeichnis | 127 |

| | |
|---|-----|
| Anhang | 141 |
| A.1 Katalog: a. Allgemeine Grundlagen additiver Fertigungstechnologien.... | 143 |
| A.2 Katalog: b. Grundlagen zu Oberflächen und Fertigungsgenauigkeiten additiver Fertigungsverfahren | 144 |
| A.3 Katalog: c. Funktionsintegration / Bauteilintegration bei der additiven Fertigung | 145 |
| A.4 Katalog: d.1 Additive Fertigungsverfahren | 146 |
| A.5 Katalog: d.2 Additive Fertigungsverfahren | 147 |
| A.6 Katalog: d.3 Additive Fertigungsverfahren | 148 |
| A.7 Katalog: d.4 Additive Fertigungsverfahren | 149 |
| A.8 Katalog: d.5 Additive Fertigungsverfahren | 150 |
| A.9 Katalog: d.6 Additive Fertigungsverfahren | 151 |
| A.10 Katalog: d.7 Additive Fertigungsverfahren | 152 |
| A.11 Katalog: d.8 Additive Fertigungsverfahren | 153 |
| A.12 Katalog: d.9 Additive Fertigungsverfahren | 154 |
| A.13 Katalog: d.10 Additive Fertigungsverfahren | 155 |
| A.14 Katalog: d.11 Additive Fertigungsverfahren | 156 |
| A.15 Katalog: d.12 Additive Fertigungsverfahren | 157 |
| A.16 Katalog: f. Grundlagen zu Entwicklungskosten und Entwicklungszeiten bei der additiven Fertigung | 158 |
| A.17 Katalog: g. Checkliste zweckmäßiger (wirtschaftlicher) Einsatz | 159 |
| A.18 Katalog: h. Checkliste AM-gerechte Gestaltung | 160 |
| A.19 Katalog: j. Bauteilorientierung im Bauraum der Fertigungsanlage | 162 |
| A.20 Katalog: k.1 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen | 163 |
| A.21 Katalog: k.2 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen | 164 |
| A.22 Katalog: k.3 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen | 165 |
| A.23 Katalog: k.4 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen | 166 |
| A.24 Katalog: k.5 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen | 167 |
| A.25 Katalog: k.6 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen | 168 |
| A.26 Katalog: k.7 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen | 169 |
| A.27 Katalog: k.8 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen | 171 |
| A.28 Katalog: l.a Konstruktionsrestriktionen /-regeln allgemein mit Erläuterung | 172 |
| A.29 Katalog: l.b Konstruktionsrestriktionen nach Fertigungsverfahren für FLM, LS, LBM..... | 174 |
| A.30 Katalog: m. Grundlagen der Softwareanwendung für die Bauteiloptimierung / Fertigungsoptimierung | 175 |

| | | |
|------|--|-----|
| A.31 | Katalog: n. Vorgehen zur Topologieoptimierung - Anpassung von Lösungsprinzipien an bauteilspezifische Randbedingungen..... | 176 |
| A.32 | Katalog: o. Grundlagen zu Produktindividualisierung und -personalisierung bei der additiven Fertigung..... | 179 |
| A.33 | Katalog: p.1 Werkstoffe und deren Eigenschaften | 180 |
| A.34 | Katalog: p.2 Werkstoffe und deren Eigenschaften | 181 |
| A.35 | Katalog: p.3 Werkstoffe und deren Eigenschaften | 182 |
| A.36 | Katalog: p.4 Werkstoffe und deren Eigenschaften | 183 |
| A.37 | Katalog: p.5 Werkstoffe und deren Eigenschaften | 184 |
| A.38 | Katalog: q. Übersicht Nachbearbeitung (Post-processing) | 185 |
| A.39 | Katalog: r. Datenprozesse der additiven Fertigung | 186 |
| A.40 | Katalog: s. Ökologische Betrachtungen der additiven Fertigung..... | 187 |
| A.41 | Katalog: t. Dienstleister additive Fertigung..... | 188 |
| A.42 | Katalog: u. Konventionen und geometrische Grundlagen..... | 189 |
| A.43 | Katalog: Quellen | 190 |
| A.44 | Verteilungstests der informationsgruppenbezogenen Zugriffe | 195 |
| A.45 | Ergebnisse der Evaluation der zeitlichen Informationsunterstützung aus Kapitel 6.2 | 196 |

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

| | |
|--------------|--|
| 2½D | Zweieinhalbdimensional |
| 3D | Dreidimensional |
| 3DP | 3D-Drucken |
| AM | Additive Fertigung (Additive Manufacturing) |
| CAD | Computer-Aided Design |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| DfA | Design for Assembly |
| DfAM | Design for Additive Manufacturing |
| DfM | Design for Manufacturing |
| DfRM | Design for Rapid Manufacturing |
| DfX | Design for X |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e. V. |
| DLP | Digital Light Processing |
| DRM | Design Research Methodology |
| E | Energie |
| EBM | Elektronen-Strahlschmelzen (Electron Beam Melting) |
| EN | Europäische Norm |
| FDM | Fused Deposition Modelling |
| FE | Finite Elemente |
| FLM | Fused Layer Modelling |
| I | Information |
| IPE-Methodik | Integrierte Produkterstellungsmethodik |
| iPeM | Integriertes Produktentstehungs-Modell |
| ISO | Internationale Organisation für Normung |
| LBM | Laser-Strahlschmelzen (Laser Beam Melting) |

| | |
|------|--|
| LCVD | Laser Chemical Vapor Deposition |
| LLM | Layer-Laminated-Manufacturing |
| LMD | Laser Metal Deposition |
| LS | Laser-Sintern |
| MJM | Multi-Jet Modelling |
| MKM | Münchner Produktkonkretisierungsmodell |
| PEP | Produktentwicklungsprozess |
| PJM | Poly-Jet Modelling |
| RP | Rapid Prototyping |
| SL | Stereolithographie |
| SLS | Selektives Laser-Sintern |
| SOP | Start Of Production |
| SPSS | IBM® SPSS® Statistics (Version 24) |
| St | Stoff |
| stl | Dateinamenserweiterung der Surface Tessellation Language |
| TOTE | Test-Operate-Test-Exit |
| TTS | Thermotransfer-Sintern |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure e. V. |
| wrl | Dateinamenserweiterung der Virtual Reality Modeling Language |

Formelzeichen

| Symbol | Einheit | Erläuterung |
|---------------|----------------|--------------------|
| b_B | m | Bahnbreite |
| b_S | m | Spurabstand |
| F | N | Kraft |
| M | Nm | Moment |
| n | | Anzahl |
| r | m | Radius |
| r_i | m | Innerer Radius |
| δ | ° | Downskin-Winkel |
| ν | ° | Upskin-Winkel |
| \varnothing | m | Durchmesser |

Abstract

Additive manufacturing technologies produce solid components from a wide variety of formless starting materials according to a layer-by-layer building principle. In the last few years, their use in the manufacture of end components has become increasingly important. Even if additive manufacturing processes will not replace established, conventional manufacturing processes as a production technology in most areas, they can still supplement their portfolio, open up production fields that cannot be adequately served by those technologies and enable the production of final components with new realizations of known component functions.

Since designs are generally influenced by the limitations and possibilities of the manufacturing processes used, the field of application of additive manufacturing technologies as an independent production technology results in the need for designs that have been specifically tailored to additive manufacturing. Due to the changed boundary conditions and process restrictions, products developed for additive manufacturing have different attributes than products developed for conventional manufacturing processes. The changed process-related restrictions and freedoms also necessitate an adapted procedure for obtaining suitable designs. Due to the relatively new additive manufacturing technologies compared to conventional production processes (such as casting or machining), there are still no sufficient scientific investigations into the procedure and the information processed during the design phase with regard to the development of components for additive manufacturing. These aspects of the development of components for additive manufacturing are dealt with in this thesis, which addresses the procedure for the design of additively manufactured final components and the support of the design in terms of information content. The general research question on which the work is based is as follows: How is the design of additively manufactured end components carried out and how can it be supported? The thesis addresses the continuous support of the development of additively manufactured components through the provision of information, starting from the decision to use additive manufacturing technologies. Examinations of, firstly, the importance of specific information and, secondly, appropriate procedures for the development of additively manufactured components are described. Furthermore, the way in which information is made available forms an integral part of the analysis. The information is made available on an online platform.

The basic chapters of the thesis describe general fundamentals of development processes and their investigation within the design sciences, and deal with the basics of additive manufacturing and boundary conditions for adapted AM development processes. Building on this, the following specific research questions are derived from the overarching research question:

- Which information is relevant for the development of additively manufactured components?
- How should information be prepared to support a development process for additively manufactured components?
- What is the sequence by which information is used in the development of additively manufactured components?

In order to answer the research questions, an elementary information structure is derived which serves to support the development of AM components and can be used for the investigation of the development procedure in a test. The elementary information structure for this is comprised of information that is relevant for the development of additively manufactured components. The information is arranged into 21 information groups, consisting of 46 information catalogues. The creation of the information structure, its contents and structure are explained in detail. The information structure is provided on an online platform, whose usage functions and evaluation functions are also described.

The test setup, the execution of the test and the evaluation of the test data are outlined in detail. The test was conducted with students, academic staff and designers from the mechanical engineering industry. The recording of evaluable test data took place firstly while conducting testing by recording usage data and, secondly, after the test by recording the subject's perspective with a questionnaire. The evaluation of the two data sets provides insights into various aspects of the development of AM components. Statements can be made on the sequence of information use, the importance of different information and on the way in which the information is provided on an online platform. A ranking of the importance of different information for the development of additively manufactured components can thus be determined.

An adapted provision of the information is derived from the findings concerning the temporal sequence of information usage from the evaluation of the usage data. The temporal sequence of the information use is given by a changed representation of the information structure on the basis of the phases of the product development and the changed representation is re-evaluated.

1 Einleitung

Unter additiven Fertigungsverfahren werden Herstellungsverfahren verstanden, die aus unterschiedlichsten formlosen Ausgangsmaterialien mit einem schichtweisen Bauprinzip feste Bauteile generieren. Die verarbeiteten Materialien und damit auch die entstehenden Bauteileigenschaften können dem jeweiligen Verfahrensprinzip entsprechend – von Kunststoffen über Metalle bis hin zu Verbundwerkstoffen – variiert werden.

Das Schichtbauprinzip der additiven Fertigung (AM = Additive Manufacturing) ist nichts gänzlich Neues. Es wurde zum Beispiel schon 1890 in einem Patent angemeldet, um damit Höhenprofile in Landschaftsmodellen abzubilden (vgl. Bild 1.1). Dabei werden Plattenwerkstoffe der Topografie des Geländes entsprechend zugeschnitten und anschließend aufeinandergeschichtet.

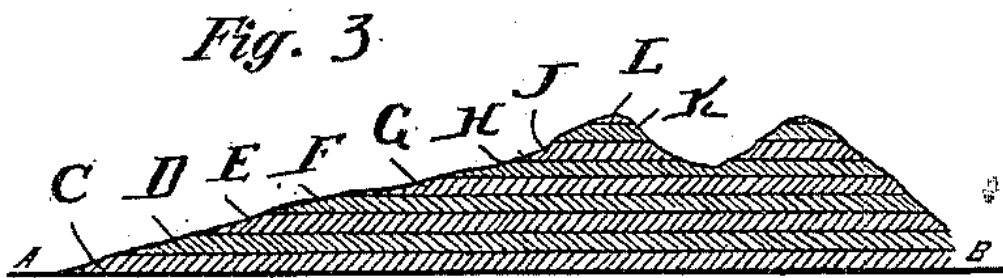


Bild 1.1: Höhenprofil in Schichtbauweise nach Patent [BLANTHER92]

Die erste automatisierte Anwendung der Schichtbauweise mithilfe von Computern wurde allerdings erst 1987 patentiert [MASTERS87]. Seither werden die Prozesse immer leistungsstärker, zuverlässiger und genauer. Additive Fertigungsverfahren konnten sich seit Beginn ihrer Automatisierung im Laufe der Jahre zunächst zur Herstellung von Anschauungsmustern und funktionellen Prototypen etablieren [KLAHN18, S. 5]. Dieses Einsatzfeld wird als Rapid Prototyping bezeichnet. Als Produktionstechnologie für die Fertigung von Endbauteilen sind die AM-Verfahren bereits in einigen Fällen wirtschaftlich im Einsatz. Ihre Anwendung birgt allerdings noch weiteres Potenzial [ACATECH16, S. 7 f.].

Die allgemeine Wahrnehmung der additiven Fertigungsverfahren als Produktionstechnologie und nicht nur als Möglichkeit zur Prototypenfertigung findet sich auch in den gebräuchlichen Begriffen wieder. Die Herstellung von Endbauteilen, als erweitertes Einsatzfeld der additiven Fertigungstechnologien, erklärt, warum sich die gängige Bezeichnung der Nutzung der Verfahren von Rapid Prototyping zu Additive Manufacturing gewandelt hat [GIBSON15, S. 4]. Ein Indiz für den Wandel des Einsatzfeldes von additiven

Fertigungsverfahren ist die Häufigkeit der Suchanfragen für „Rapid Prototyping“ und „Additive Manufacturing“ auf der Suchmaschine Google über der Zeit. In Bild 1.2 sind die weltweiten Suchanfragen für den Zeitraum Januar 2004 bis August 2018 in Relation zueinander dargestellt. Während die Suchanfragen nach Rapid Prototyping einen abfallenden Trend aufweisen, nimmt die Anzahl für das Additive Manufacturing zu.

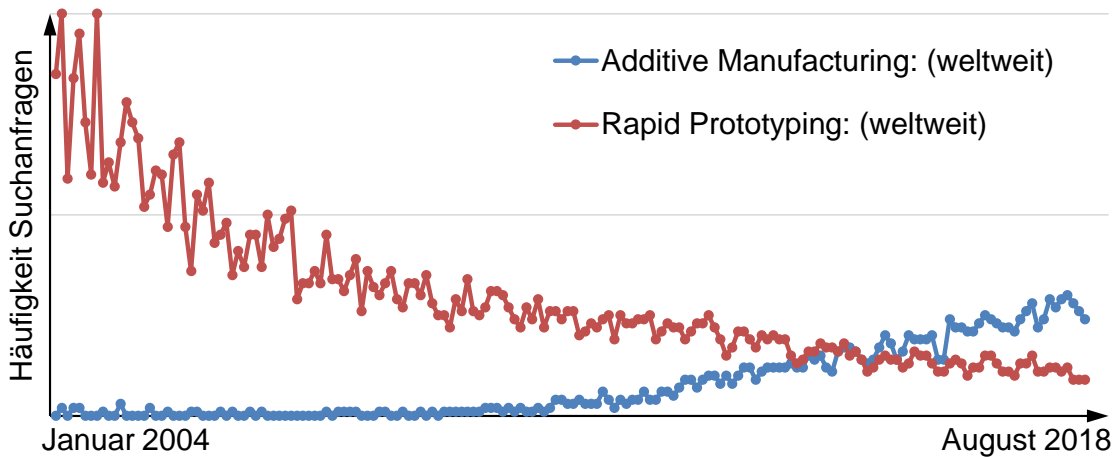


Bild 1.2: Trends der Suchanfragen nach Rapid Prototyping und Additive Manufacturing

Auch wenn die additiven Fertigungsverfahren die etablierten konventionellen Fertigungsverfahren als Produktionstechnologie in den meisten Bereichen nicht ablösen werden, so ergänzen sie doch deren Portfolio, erschließen Produktionsfelder, die durch diese Technologien nicht hinreichend bedient werden können und ermöglichen die Herstellung von Endbauteilen mit neuen Realisierungen bekannter Bauteilfunktionen.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Da Konstruktionen im Allgemeinen durch die Einschränkungen und Möglichkeiten der genutzten Fertigungsverfahren beeinflusst werden [ROTH00a, S. 29 f.], ergibt sich mit dem Einsatzfeld additiver Fertigungstechnologien als eigenständige Produktionstechnologie der Bedarf nach Konstruktionen, die gezielt für die additive Fertigung entwickelt wurden. Die geänderten verfahrensgegebenen Beschränkungen und Freiheiten bedingen dabei auch ein angepasstes Vorgehen zur Erstellung von geeigneten Konstruktionen. Verglichen mit konventionellen Produktionsverfahren, wie beispielsweise dem Gießen oder der spanenden Bearbeitung, sind die additiven Fertigungsverfahren noch relativ jung. Für die Entwicklung additiv gefertigter Bauteile existiert aufgrund dessen noch keine breite wissenschaftliche Basis. Hier leistet die vorliegende Dissertation einen Beitrag. Sie befasst sich mit der Unterstützung der Konstruktion additiv gefertigter End-

bauteile mittels der Bereitstellung von Informationen und dem Vorgehen bei der Konstruktion additiv gefertigter Bauteile für die Anwendung beim Endkunden. Die übergeordnete Forschungsfrage, die der Arbeit zu Grunde liegt, lautet: Wie erfolgt die Konstruktion additiv gefertigter Endbauteile und wie kann sie durch gezielte Informationsbereitstellung unterstützt werden? Es werden zum einen die Wichtigkeit spezifischer Informationen und zum anderen zweckmäßige Vorgehensweisen zur Entwicklung additiv gefertigter Bauteile untersucht. Weiterhin ist die Art und Weise der Informationsbereitstellung Bestandteil der Betrachtung, wobei die Bereitstellung auf einer Onlineplattform erfolgt. Der Aufbau der Arbeit wird im Folgenden vorgestellt.

1.2 Struktur der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in acht Kapitel. Die Darstellung in Bild 1.3 gibt die inhaltliche Struktur der Arbeit wieder.

Die Grundlagenkapitel 2 und 3 beschreiben den Stand der Technik der beiden Forschungsfelder „Konstruktionsmethodik“ und „additive Fertigung“, auf dem die Untersuchungen dieser Arbeit gründen. Kapitel 2 beschreibt allgemeine Grundlagen zu Entwicklungsprozessen und deren Untersuchung innerhalb der Konstruktionswissenschaften. Kapitel 3 behandelt die Grundlagen der additiven Fertigung und Randbedingungen für angepasste AM-Entwicklungsprozesse. Aus den Grundlagen der Konstruktionsmethodik (Kapitel 2) und den in Kapitel 3 vorgestellten Beschreibungen der AM-Entwicklung konkretisiert sich die Untersuchung für die nachfolgenden Kapitel 4 bis 6 zu einer deskriptiven, umfassenden Analyse der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile.

In Kapitel 4 wird präskriptiv eine elementare Informationsstruktur hergeleitet, die zur Unterstützung der Entwicklung von AM-Bauteilen dient und mithilfe derer die deskriptive Untersuchung der Entwicklung für AM in den Kapiteln 5 und 6 erfolgt. Die Informationsstruktur ist hierfür aus Informationen aufgebaut, welche für die Entwicklung additiv gefertigter Bauteile relevant sind. Bei der Erstellung werden zunächst literaturbasiert 22 Themenfelder zur Unterstützung der Entwicklung von AM-Bauteilen identifiziert. Anschließend werden diese Themenfelder zur Untersuchung der Entwicklung von AM-Bauteilen in die Informationsstruktur überführt, wobei sich eine Gliederung der Informationen in 21 Informationsgruppen, bestehend aus 46 Informationskatalogen ergibt. Die Erstellung der Informationsstruktur sowie ihre Inhalte und ihr Aufbau werden eingehend erläutert. Die Bereitstellung der Informationsstruktur erfolgt auf einer Onlineplattform. Die

Beschreibung der Onlineplattform sowie deren Nutzungsfunktionen und Auswertefunktionen sind ebenfalls Bestandteil von Kapitel 4.

Die erarbeitete Informationsstruktur und ihre Bereitstellung auf einer Onlineplattform dienen der Untersuchung des Vorgehens bei der Entwicklung von AM-Bauteilen in einem Versuch. Ziel des Versuchs ist es, das Vorgehen von Konstrukteuren während der Entwicklung von additiv gefertigten Bauteilen und die dabei verarbeiteten Informationen zu untersuchen. Den Versuchsaufbau, die Durchführung des Versuchs und die Auswertung der Versuchsdaten beschreibt Kapitel 5. Die Aufnahme von auswertbaren Versuchsdaten erfolgt zum einen während der Versuchsdurchführung durch die Aufzeichnung von Nutzungsdaten und zum anderen im Anschluss an den Versuch durch die Aufnahme der Probandenperspektive¹ mit einem Fragebogen. Die Auswertung der beiden Datensätze bringt Erkenntnisse zu verschiedenen Aspekten der Entwicklung von AM-Bauteilen. Aus den Nutzungsdaten der Onlineplattform werden Aussagen zur Abfolge der Informationsnutzung und zur Wichtigkeit verschiedener Informationen abgeleitet. Die Auswertung der Fragebögen trägt einerseits ebenfalls zu den Erkenntnissen zur Wichtigkeit verschiedener Informationen bei der Entwicklung von AM-Bauteilen bei und lässt andererseits Aussagen zur Art und Weise der Bereitstellung der Informationen auf einer Onlineplattform zu.

Aus den Erkenntnissen zur zeitlichen Abfolge der Informationsnutzung aus der Auswertung der Nutzungsdaten wird in Kapitel 6 eine geänderte Bereitstellung der Informationen abgeleitet. Die zeitliche Reihenfolge der Informationsnutzung wird durch eine geänderte Darstellung der Informationsstruktur anhand der Phasen der Produktentwicklung vorgeschlagen. Diese Änderung der Informationsbereitstellung wird mithilfe der Onlineplattform erneut in einem Versuch evaluiert. Die Erkenntnisse aus dem Versuch mit zeitlicher Strukturierung der Informationen werden vorgestellt.

In Kapitel 7 findet die Diskussion der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln statt, wobei Abhängigkeiten zwischen den Versuchsergebnissen und deren Gültigkeit erörtert werden.

Kapitel 8 fasst die Inhalte der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick für mögliche zukünftige Forschung.

¹ Die weibliche Form ist der männlichen Form in dieser Dissertation gleichgestellt; lediglich aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wurde in Teilen die männliche Form gewählt.

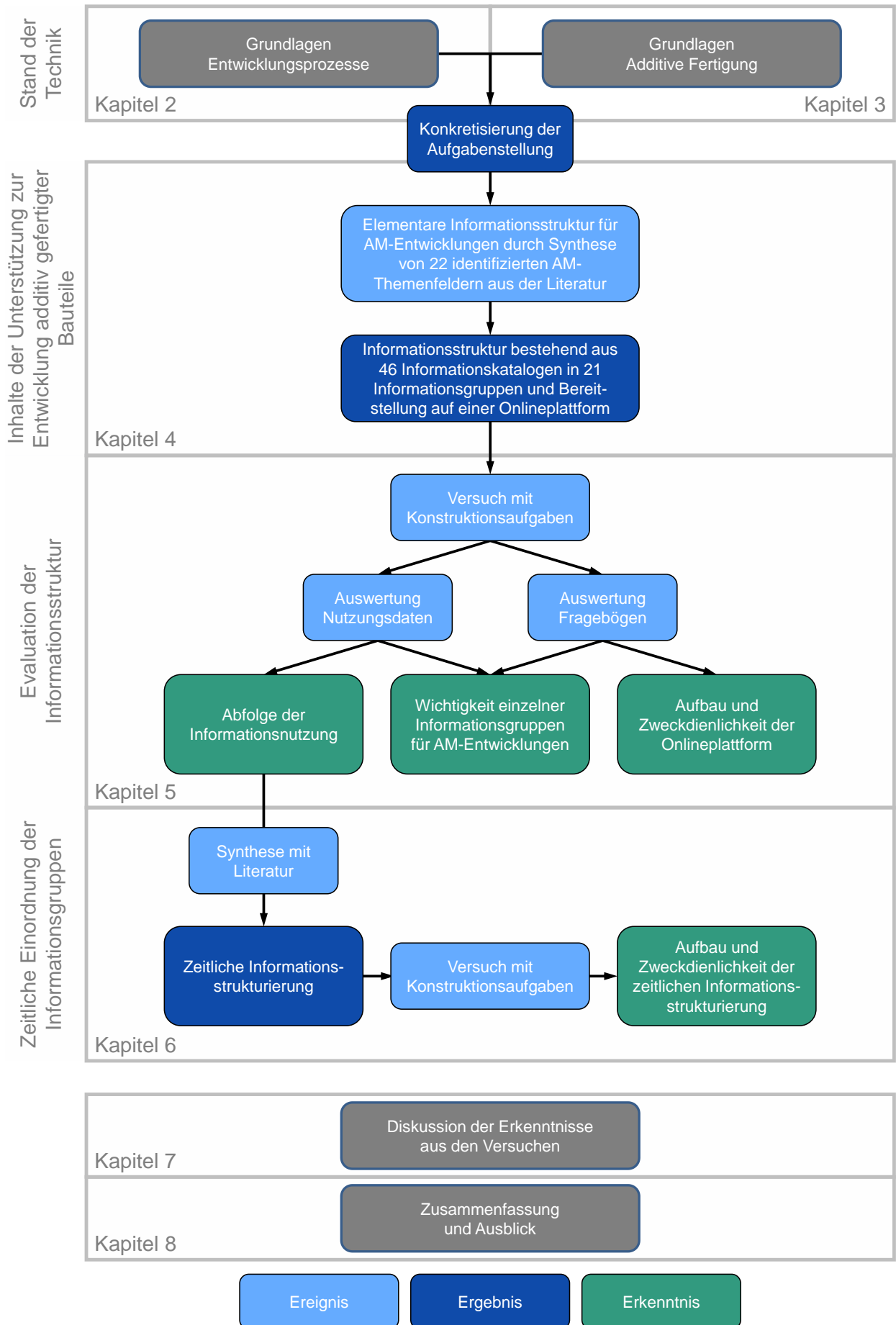


Bild 1.3: Struktur der Arbeit

2 Entwicklungsprozesse

Dieses Kapitel führt Entwicklungsprozesse zur Erstellung von Produkten allgemein ein und beschreibt ihre Untersuchung in den Konstruktionswissenschaften sowie Möglichkeiten zu ihrer Unterstützung. Gleichbedeutend zu Entwicklungsprozess findet oftmals der Begriff Konstruktionsprozess Anwendung. In der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit Entwicklungsprozessen wird zwischen den Konstruktionswissenschaften und der Konstruktionsmethodik unterschieden.

„Die Konstruktionswissenschaft strebt an, mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden den Aufbau technischer Systeme und deren Beziehungen zu ihrem Umfeld so zu analysieren, dass aus den erkannten Zusammenhängen und Systemkomponenten Regeln zu deren Entwicklung abgeleitet werden können. Unter Konstruktionsmethodik versteht man ein geplantes Vorgehen mit konkreten Handlungsanweisungen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme, die sich aus den Erkenntnissen der Konstruktionswissenschaft und der Denkpsychologie, aber auch aus den Erfahrungen in unterschiedlichen Anwendungen ergeben haben.“ [PAHL07, S. 10]

Die Konstruktionswissenschaften befassen sich demnach mit der Erforschung des Wesens von Entwicklungsprozessen und dessen Unterstützung. Die Konstruktionsmethodik ist Gegenstand der Konstruktionswissenschaften.

Hubka und Eder [HUBKA92] beschreiben die Bestandteile der Konstruktionswissenschaft nach der Darstellung in Bild 2.1.

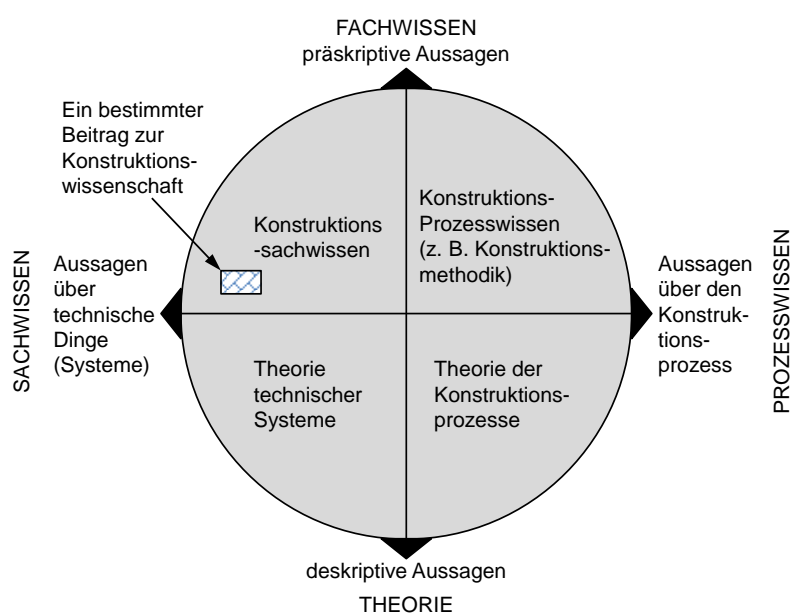


Bild 2.1: Hauptkategorien konstruktionswissenschaftlicher Aussagen nach [HUBKA92, S. 70]

Die Vierteilung des Kreisinhalts in Bild 2.1 entsteht durch die vertikale Trennung in das Wissen über konstruierte Objekte (links) und das Wissen über Konstruktionsprozesse (rechts), sowie die horizontale Trennung in deskriptive Aussagen / Theorie (unten) und präskriptive Aussagen (oben). Präskriptive Aussagen geben vor, wie ein Sachverhalt realisiert werden könnte. Deskriptive Aussagen hingegen beschreiben, wie ein Sachverhalt erscheint und wie er erklärt / begründet werden kann. [HUBKA92, S. 68 ff.]

Die Unterscheidung in deskriptive und präskriptive Untersuchungen ist auch Bestandteil des Vorgehens der Design Research Methodology (DRM) nach [BLESSING09], wobei präskriptive und deskriptive Betrachtungen wechselweise erfolgen. Es gibt auch Aussagen in den Konstruktionswissenschaften, die weder deskriptiven noch präskriptiven Untersuchungen eindeutig zugeordnet werden können [HUBKA92, S. 68].

In den nachfolgenden Teilkapiteln wird der Stand der Technik der Konstruktionswissenschaften hinsichtlich der Entwicklungsprozesse und der Einflüsse auf den Konstruktionsvorgang aufgezeigt.

2.1 Produktentwicklungsprozesse – kreative und systematische Problemlösung

Produktentwicklungsprozesse (kurz Entwicklungsprozesse) sind dadurch charakterisiert, dass sie ausgehend von einer Problemstellung in mehreren Konkretisierungsstufen eine Lösung hervorbringen. Das Vorgehen hierbei wird in der Literatur [GERHARD88, S. 4; PAHL07, S. 64; VDI 2221-1, 2018, S. 8] auch als Problemlösung bezeichnet.

Die Abgrenzung einer Problemlösung gegenüber einer reinen Aufgabenbearbeitung ergibt sich aus der Komplexität der dabei auszuführenden Tätigkeit. Eine Aufgabe ist dadurch gekennzeichnet, dass der Weg zu ihrer Bearbeitung bekannt ist. Die Lösung eines Problems hingegen bedarf der Findung eines bislang nicht bekannten Wegs. Die Unterscheidung zwischen Aufgabe und Problem hängt demnach auch vom Vorwissen des jeweiligen Individuums ab. [DÖRNER76, S. 10 ff.]

Die Lösung von „Problemen“ in einem Konstruktions- oder Entwicklungsprozess impliziert somit, dass der Weg zur Lösungsfindung nicht bekannt ist. Der Wortbestandteil „Prozess“ hingegen beinhaltet die Strukturierbarkeit und Steuerbarkeit des Vorgehens bei der Entwicklung. Diese Diskrepanz schon innerhalb des Begriffs Entwicklungsprozess findet sich auch in seiner Deutung und führt oft zu Missverständnissen (vgl. [GERHARD88, S. 4 f.]). Die Diskussion über die Planbarkeit von Entwicklungen wird z. B. schon 1895 von Capitaine [CAPITAINE95, S. 4] beschrieben: „Verfolgt man die bezügliche Literatur, so findet

man eine Reihe von Äußerungen sowohl gegen, wie für die Möglichkeit planmäßiger Gestaltung der schöpferischen Tätigkeit.“

Auch wenn Entwicklungsprozesse iterativ erfolgen [PAHL07, S. 21; EHRENSPIEL17, S. 113; PONN11, S. 293], lassen sich abhängig von der Ähnlichkeit der Entwicklungsprojekte musterhafte Prozesse auf verschiedenen Abstraktionsebenen beschreiben. Aus Erfahrungen vorangegangener Entwicklungen können dabei Vorgehensweisen und Entscheidungen abgeleitet werden (z. B. in der Produktgenerationsentwicklung) ([VDI 2221-2, 2018, S. 8 f.]. Für Projekte geringer Ähnlichkeit lassen sich die Vorgehensweisen nur bedingt übertragen, aber auf einer höher abstrahierten Ebene dennoch durch ähnliche Prozessbeschreibungen abbilden [FELDHUSEN13, S. 13; GERICKE12, S. 178 f.]. Prozessbeschreibungen geringen Abstraktions- und damit hohen Konkretisierungsgrads haben beispielsweise den Vorteil, dass Rollen und Zuständigkeiten benannt werden können, höher abstrahierte Beschreibungen können dagegen durch bekannte Begrifflichkeiten förderlich für die Kommunikation des Entwicklungsfortschritts sein (vgl. [BROWNING06, S. 110 ff.]). Auf einem hohen Abstraktionsgrad, der nahe an der Allgemeingültigkeit ist, haben sich mehrere Beschreibungen von Entwicklungsprozessen etabliert, wie z. B. die Integrierte Produkterstellungsmethodik (IPE-Methodik) [EHRENSPIEL17, S. 396], das Münchner Produktkonkretisierungsmodell (MKM) [PONN11, S. 26], das integrierte Produktentstehungs-Modell (iPeM) [ALBERS16, S. 101] und das Allgemeine Modell der Produktentwicklung nach Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221-1, 2018] (siehe Kapitel 2.2).

Prozessbeschreibungen bestehen aus verschiedenen Aktivitäten, die in einer Abfolge kleinerer Problemlösezyklen durchgeführt werden. Problemlösezyklen bestehen ihrerseits wiederum aus verschiedenen Operationen, also Handlungen die zur Lösung des Problems durchgeführt werden. Zwischen den Aktivitäten und auch zwischen den jeweiligen Operationen innerhalb der Problemlösezyklen wird während der Produktentwicklung mehrfach gewechselt.

Als kleinste Einheit der Untergliederung des Vorgehens bei der Produktentwicklung wird von Dörner sowie von Ehrlenspiel und Meerkamm die TOTE-Einheit genannt (siehe Bild 2.2) [DÖRNER76, S. 40; EHRENSPIEL17, S. 109]. Das Akronym TOTE steht für die Bestandteile des Schemas Test-Operate-Test-Exit. Zunächst wird nach dem Schema das Erreichen eines Zielzustands überprüft. Sofern dieser nicht erreicht ist, findet anschließend eine Operation statt. Wenn der Zielzustand (schließlich) erreicht ist, wird die Handlung abgebrochen (Exit).

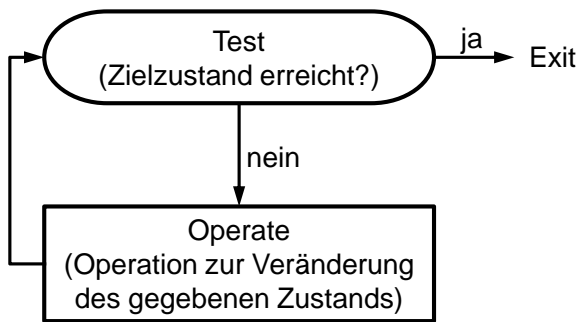


Bild 2.2: TOTE-Einheit in Anlehnung an [DÖRNER76, S. 40] nach [MILLER60]

Die Richtlinie VDI 2221 Blatt 1 [VDI 2221-1, 2018] behandelt die Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Sie beschreibt sowohl ein allgemeines Modell der Produktentwicklung auf einem hohen Abstraktionsgrad als auch den Aspekt des Wechsels („Pendeln“) zwischen verschiedenen Aktivitäten und zwischen den Operationen der jeweils zugehörigen Problemlösezyklen. Aufgrund ihres Richtliniencharakters bietet sich das beschriebene allgemeine Modell der Produktentwicklung als Referenzprozess für Untersuchungen an. Es wird im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

2.2 Produktentwicklungsprozess (PEP) nach VDI 2221

Nach Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221-1, 2018, S. 13] ist der „Produktentwicklungsprozess (PEP) (...) Bestandteil der Produktentstehung und damit Grundlage des Produktlebenszyklus“. Die Begriffshierarchie ist in Bild 2.3 dargestellt.

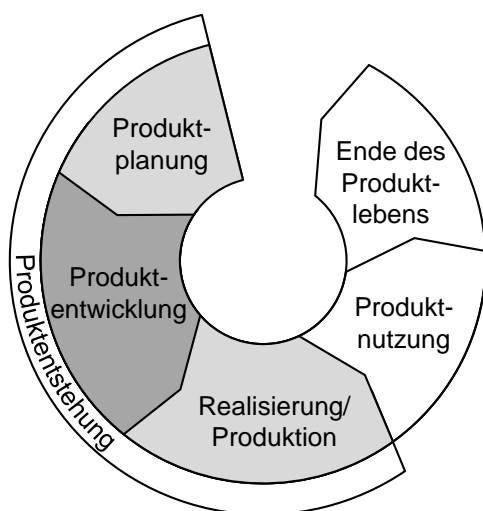


Bild 2.3: Technischer Produktlebenszyklus nach [VDI 2221-1, 2018, S. 13]

Der Produktentwicklung vorgelagert erfolgt die Produktplanung. Nachgelagert erfolgt die Realisierung des Produkts durch dessen Produktion.

Die Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221-1, 2018] beschreibt ein allgemeines Modell der Produktentwicklung, wie in Bild 2.4 dargestellt. Ausgangspunkt des Modells stellen Ziele

dar, die in einem Entwicklungsauftrag formuliert werden und oftmals durch eine Produktplanung entstehen. Das Gesamtverfahren bei der Produktentwicklung zur Konzeptentwicklung, Detaillierung und Ausarbeitung ist in dem Modell in acht namentlich benannte Aktivitäten untergliedert (siehe Bild 2.4). Die Anforderungen an das Produkt und deren fortlaufende Konkretisierung begleiten den Entwicklungsprozess (Bild 2.4 links). Das Erfüllen der Anforderungen wird über den gesamten Prozess hinweg durch virtuelle oder reale Absicherung der Ergebnisse der verschiedenen Aktivitäten (Bild 2.4 unten) überprüft. Sowohl die Liste der durchzuführenden Aktivitäten als auch die Liste der zugeordneten Ergebnisse ist erweiterbar.

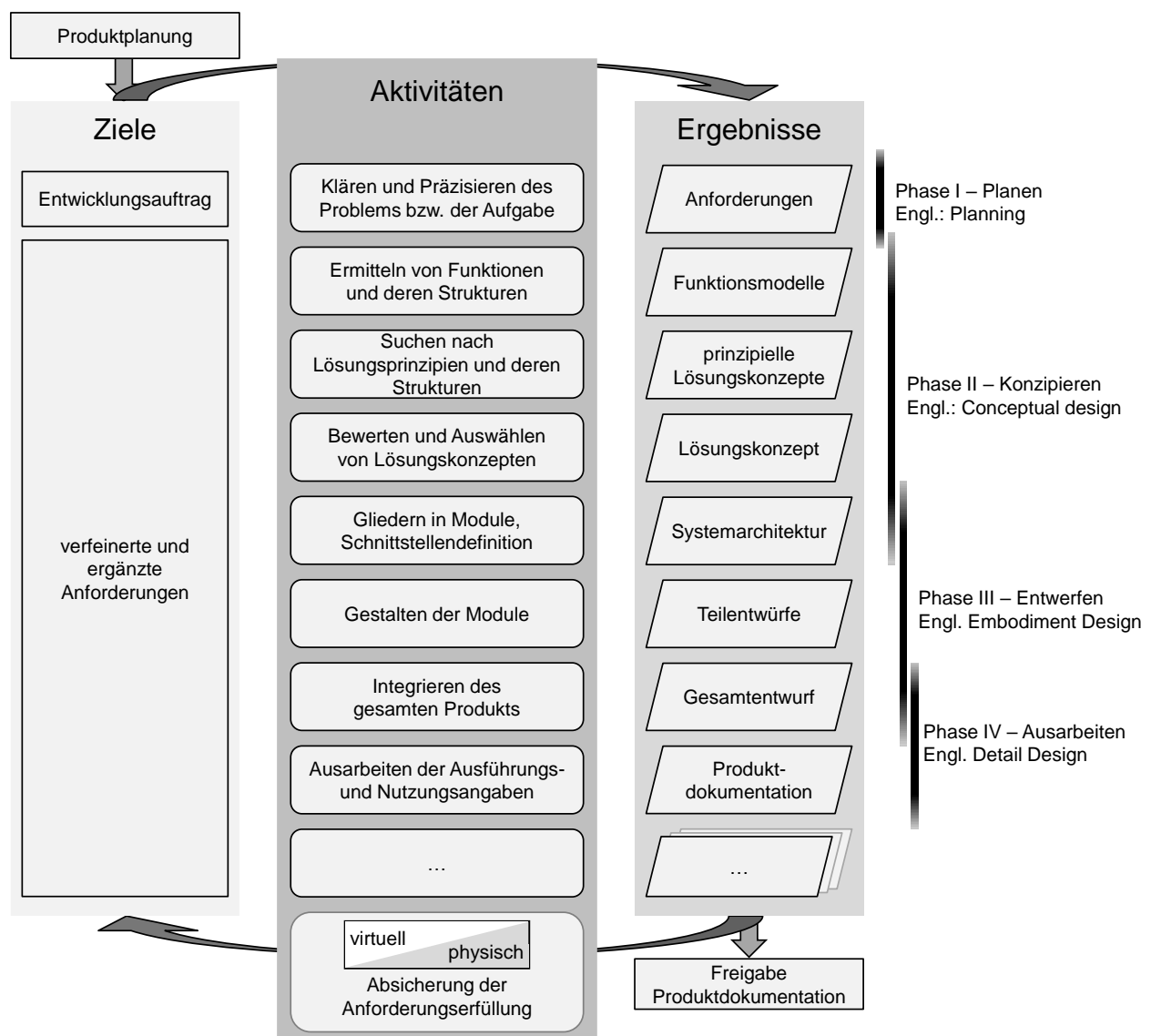


Bild 2.4: Allgemeines Modell der Produktentwicklung nach [VDI 2221-1, 2018, S. 16]

Die Reihenfolge der acht benannten Aktivitäten entspricht von oben nach unten ihrer Abfolge in einem idealisierten Entwicklungsprozess, der ohne Iterationen und unter Durchführung genau dieser Aktivitäten ablaufen würde. In realen Entwicklungsprojekten sind

die Aktivitäten allerdings sowohl iterativ als auch in unterschiedlicher Intensität und unterschiedlicher Reihenfolge notwendig [VDI 2221-1, 2018, S. 18].

Oftmals werden die verschiedenen Aktivitäten in der Produktentwicklung in vier Phasen gegliedert (siehe bspw. [PAHL07, S. 194]). Diese Gliederung der Aktivitäten in die vier Phasen und deren Bezeichnung sind der Darstellung nach der Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221-1, 2018] in Bild 2.4 rechts hinzugefügt.

In Blatt 2 der Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221-2, 2018] wird die Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse behandelt. Auch hier werden unterschiedliche Phasen eingeführt, die allerdings die verschiedenen Entwicklungsstufen eines Produkts hinsichtlich dessen Reifegrads bzw. dessen Organisationsstruktur innerhalb eines Unternehmens abbilden. In einer Matrixdarstellung lassen sich die durchzuführenden Aktivitäten der Produktentwicklung den Phasen zugehörig darstellen.

In dieser Dissertation wird der Begriff der Phasen im Sinne der gliedernden Darstellung der Produktentwicklungsaktivitäten gemäß Bild 2.4 verwendet.

2.3 Begriffliche Abgrenzung von Wissen, Information und Daten

In Entwicklungsprozessen werden Wissen, Informationen und Daten verarbeitet. Zur Abgrenzung dieser oftmals synonym verwendeten Begriffe und zur Präzisierung des Verständnisses des Titels der vorliegenden Dissertation werden die Definitionen nach der Richtlinie VDI 5610 verwendet [VDI 5610-1, 2009, S. 4]:

- „*Daten* sind objektive Fakten; sie sind ohne Zusammenhang und weitere Hintergründe nicht deutbar und als „Rohmaterial“ zu verstehen.“
- „*Informationen* sind strukturierte Daten mit Relevanz und Zweck, die in einen Kontext gebracht, kategorisiert, kalkuliert und korrigiert werden können.“
- „*Wissen* ist vernetzte Information, die in die Lage versetzt, Vergleiche anzustellen, Verknüpfungen herzustellen und Entscheidungen zu treffen.“

Die genannte Definition von Wissen wird für die Verwendung in dieser Dissertation außerdem um den Personenbezug ergänzt (vgl. [PROBST13, S. 23]). Eine Bedienungsanleitung ist also beispielsweise als Information zu kategorisieren. Durch das Lesen der Anleitung können sich Personen das entsprechende Wissen zur Bedienung aneignen. Umgekehrt ist es teils auch möglich, Wissen beispielsweise durch Schrift, Bilder oder Sprachaufnahmen in Information zu externalisieren und es somit weiteren Personen zur Verfügung zu stellen. [GRONAU09, S. 4 ff.; HEISIG05, S. 10 f.]

2.4 Einflussfaktoren auf den Entwicklungsprozess

Der Entwicklungsprozess unterliegt neben problemspezifischen Randbedingungen auch verschiedenen allgemeinen Einflussfaktoren. Hubka und Eder beschreiben in diesem Zusammenhang die folgenden Einflussfaktoren auf den Konstruktionsprozess [HUBKA92, S. 126 ff.]:

- *Konstrukteur*: Unterschiede in der Anzahl der Konstrukteure, ihrer Spezialisierung, ihrem Einsatz, ihrer Qualifikation und ihrer Kenntnisse
- *Fachinformationen*: Bspw. Naturgesetzmäßigkeiten, Werkstoffe und deren Eigenschaften / Verarbeitung, Normen, Patente usw.
- *Konstruktionsmethoden*
- *Arbeitsmittel*: Qualität und Art der Mittel
- *Führung des Konstruktionsprozesses*: Bspw. Aufgaben der Führung, Organisationsarten und Führungsstrategie
- *Arbeitsbedingungen / Umgebung*: Beeinflussung durch die aktive Umwelt
- *Darstellungstechnik*: Art und Weise der Modellierung technischer Systeme

Die Liste der genannten Einflussfaktoren ist nicht für jeden Entwicklungsprozess als vollständig anzusehen. Sie liefert jedoch mögliche Parameter zur Beeinflussung von Entwicklungsprozessen und zeigt etwaige Elemente zur Unterstützung von Entwicklungsprozessen auf.

Um eine auf additive Fertigungsverfahren angepasste Entwicklung zu verbessern, werden für die in den Kapiteln 4 bis 6 dargelegten Untersuchungen von den acht genannten Einflussfaktoren die drei Faktoren „Fachinformationen“, „Konstruktionsmethode“ und „Arbeitsmittel“ beeinflusst. Die Beeinflussung der Faktoren ist auf verschiedene Arten denkbar. Im nachfolgenden Kapitel 2.5 werden Möglichkeiten zur Unterstützung der Arbeitsvorgänge in Entwicklungsprozessen vorgestellt.

2.5 Unterstützungsmöglichkeiten von Arbeitsvorgängen

Für die Unterstützung von Arbeitsvorgängen beschreiben Jablonski und Böhm die folgenden Möglichkeiten [JABLONSKI99, S. 92 ff.]:

- *Unterstützung durch Informationen*: Die Unterstützung besteht in der Bereitstellung von Informationen. Sie erfolgt somit passiv.

- *Unterstützung durch Überwachung:* Die Unterstützung erfolgt durch Überwachung der Aktivitäten von Personen und verhindert beispielsweise unzulässige Vorgänge. Sie erfolgt reaktiv [LEUTSCH02, S. 30].
- *Unterstützung durch Steuerung und Kontrolle:* Die Ausführung der Arbeitsvorgänge wird überwacht, wobei die Aktivitätsausführung aktiv beeinflusst wird.
- *Unterstützung durch Assistenz und Planung:* Die Unterstützung erfolgt im Hinblick auf zukünftige Tätigkeiten und bietet beispielsweise Vorschläge alternativer Abläufe zur Erreichung unterschiedlicher Ziele.

Die genannten Möglichkeiten sind nach Jablonski und Böhm nicht so zu verstehen, dass sie sich gegenseitig ausschließen, sondern eher als parallel anwendbar [JABLONSKI99, S. 93]. Für den Kontext des kreativen Problemlöseprozesses zur Entwicklung additiv gefertigter Bauteile wird in dieser Dissertation die „Unterstützung durch Informationen“ für die in Kapitel 2.4 beschriebenen Einflussfaktoren auf den Konstruktionsprozess „Fachinformationen“, „Konstruktionsmethode“ und „Arbeitsmittel“ bereitgestellt.

2.6 Einfluss von Konstrukteuren auf das Entwicklungsvorgehen

Innerhalb des Entwicklungsprozesses operieren Konstrukteure als Problemlöser. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, beeinflusst beispielsweise ihre Qualifikation und Spezialisierung das Vorgehen bei der Entwicklung. Bezüglich des Einflusses von Konstrukteuren auf den Produktentwicklungsprozess sind vor allem die Untersuchungen von Dylla [DYLLA91], Fricke [FRICKE93] und Günther [GÜNTHER98] bekannt, bei denen Konstruktionsprozesse mittels Videotechnik beobachtet wurden. Aus der späteren Analyse der Konstruktionsprozesse und deren Ergebnisse konnten konstruktionswissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen werden. Die Erkenntnisse der Studien werden im Folgenden vorgestellt.

2.6.1 Untersuchungen von Dylla

Dylla [DYLLA91] beobachtet sechs Versuchspersonen bei der Bearbeitung einer Konstruktionsaufgabe und analysiert deren jeweiliges Vorgehen. Aus den Beobachtungen werden individuelle zeitliche Entwicklungsabläufe abgeleitet und diese miteinander verglichen. Die Ergebnisse werden anhand der Übereinstimmung mit Ergebnissen anderer empirischer Untersuchungen vorgestellt.

Ergebnisse von Dylla, die gemäß dem Autor [DYLLA91, S. 144] durch die Gegenüberstellung mit anderen Untersuchungen „voll bestätigt“ werden, sind [DYLLA91, S. 144 f.]:

- Ziele werden im Verlauf des gesamten Problemlöseprozesses formuliert.
- Aufgenommene Information „verblasst“ im Gehirn.
- Das Konzipieren konzentriert sich zuerst auf die kritischen Bereiche.
- Die Endgestalt der Lösung (...) entwickelt sich in sukzessiver Konkretisierung.
- Konstrukteure nutzen ihr Wissen, um die Generierung und Beurteilung von Ideen zu beeinflussen.
- Die Zeichentätigkeit spielt beim Konstruieren eine wichtige Rolle.
- Die Rolle externer Repräsentationen ist bedeutend.
- Gute Problemlöser gehen bei der Analyse mehr in die Tiefe.
- Konstruieren ist manchmal mehr opportunistisch als systematisch.

Durch die Bestätigung der Aussagen in der Gegenüberstellung mit den Ergebnissen anderer Arbeiten können die aufgezählten Aussagen als weitgehend gesichert angesehen werden. Die weiteren Ergebnisse aus [DYLLA91], die nach dem Autor in anderen Arbeiten nur „zum Teil bestätigt“ werden oder diesen „(...) zum Teil auch widersprechen“, werden an dieser Stelle nicht aufgeführt.

2.6.2 Untersuchungen von Fricke

Fricke untersucht durch Beobachtung des Konstruktionsprozesses mit 13 Versuchspersonen den Einfluss verschiedener Personenmerkmale auf den Prozess und das Ergebnis [FRICKE93]. Die untersuchten Personenmerkmale sind räumliches Vorstellungsvermögen, zeichentechnische Fertigkeit, Intelligenz, konstruktives Sachwissen, Methodikkenntnisse, heuristische Kompetenz sowie Motivation und Emotion [FRICKE93, S. 68 ff.].

Die entstehenden Konstruktionen werden auf die Erfüllung von Forderungen aus der Aufgabenstellung überprüft und daraus eine Lösungsgüte ermittelt [FRICKE93, S. 60 ff.]. Hinsichtlich der Lösungsgüte werden folgende Personeneigenschaften als statistisch signifikant erfolgsfördernd beschrieben [FRICKE93, S. 80]:

- gutes räumliches Vorstellungsvermögen
- solides Konstruktionswissen und mehrjährige Konstruktionserfahrung
- hohe heuristische Kompetenz

Die übrigen Personenmerkmale konnten nicht als erfolgsfördernd identifiziert werden, oder werden als nur tendenziell erfolgsfördernd klassifiziert [FRICKE93, S. 80].

Bei der Konstruktionsstrategie, also der Vorgehensweise beim Konstruieren, lässt sich ein Einfluss der Methodikkenntnisse erkennen. Die methodisch vorgebildeten Versuchspersonen folgen einer „stufenweise-ablauforientierten Konstruktionsstrategie“ [FRICKE93, S. 88]. Dies bedeutet, dass sie häufiger zwischen verschiedenen Regionen der Konstruktion wechseln und somit alle Bereiche auf einer Abstraktionsstufe bearbeiten, bevor sie in die nächste Konkretisierungsstufe übergehen [FRICKE93, S. 163]. Drei von vier methodisch nicht vorgebildeten Versuchspersonen gehen hingegen „bereichsorientiert“ vor [FRICKE93, S. 88]. Unter der „bereichsorientierten Konstruktionsstrategie“ versteht Fricke, dass jeder Bereich einzeln nacheinander in allen Konkretisierungsstufen auskonstruiert wird [FRICKE93, S. 87].

2.6.3 Untersuchungen von Günther

Auch von Günther werden mit 20 Versuchspersonen individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess untersucht, wobei hier der Schwerpunkt auf praxiserfahrene Konstrukteure (P-Konstrukteure) mit einer beruflichen Ausbildung zum technischen Zeichner, Techniker oder Meister gelegt wird [GÜNTHER98]. Die Untersuchung baut auf der zuvor beschriebenen Forschung von Dylla [DYLLA91] und Fricke [FRICKE93] auf, nutzt also auch die Beobachtung mit Videotechnik und leitet Zusammenhänge zwischen Person und Prozess her. Die wesentlichen Unterschiede der Entwicklungsprozesse von P-Konstrukteuren gegenüber Konstrukteuren mit Hochschulausbildung und mit konstruktionsmethodischer Ausbildung sind nach Günther folgende [GÜNTHER98, S. 141]:

- die Tendenz zu kürzeren Prozessen mit geringerer Dokumentation
- die schnellere Konkretisierung im Prozess durch ein teilproblem-orientiertes Vorgehen
- eine Tendenz zur Aufgabenklärung anhand bereits vorliegender Lösungen
- weniger umfangreiche Konzeptarbeit
- eine geringere Zahl an Varianten im Prozess

Die vorgestellten Untersuchungen des Einflusses von Konstrukteuren auf den Produktentwicklungsprozess nach [DYLLA91], [FRICKE93] und [GÜNTHER98] stellen Grundlagenforschung auf diesem Gebiet dar. Die Studien können als Vorbild dienen, wie durch die Beobachtung von Konstruktionsprozessen Erkenntnisse über diese zu gewinnen sind. Mithilfe neuerer computergestützter Methoden lässt sich die Versuchsauswertung teilautomatisieren und es sind Untersuchungen mit größeren Personengruppen vereinfacht durchführbar.

Aus den Studien können Eigenschaften guter Problemlöser abgeleitet werden, die zwischenzeitig auch in Standardwerke der Produktentwicklung aufgenommen wurden (vgl. [EHRENSPIEL17, S. 145 ff.], [PAHL07, S. 64ff.]). Auch die Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221-1, 2018] führt vorteilhafte Eigenschaften von Problemlösern auf, welche im Folgenden vorgestellt werden.

2.6.4 Eigenschaften guter Problemlöser nach [VDI 2221-1, 2018]

In Richtlinie VDI 2221 werden Personenmerkmale guter Problemlöser bzw. Entwickler beschrieben [VDI 2221-1, 2018, S. 11]. Es wird eine gute Selbstreflexion, also die Überprüfung des eigenen Denkens innerhalb des Problemlöseprozesses, herausgestellt, eine dem Problem angepasste Wahl der Abstraktionsstufe (vgl. [FRICKE93]) sowie die von Dylla [DYLLA91] beschriebene Konzentration auf die kritischen Bereiche. Weiterhin zeichnen sich gute Problemlöser durch die genaue Analyse und Beurteilung von Lösungen und ein flexibles Entscheidungsverhalten aus. Sie besitzen ein gutes Vorstellungsvermögen für Lösungen, eine hohe heuristische Kompetenz und ein gutes Fakten- und Methodenwissen. Ein weiterer Punkt, der als wichtig herausgestellt wird, ist die Kreativität der Problemlöser. [VDI 2221-1, 2018, S. 11 f.]

2.7 Informationsumsatz in Entwicklungsprozessen

Das Problemlösen in Entwicklungsprozessen ist durch einen hohen Informationsumsatz charakterisiert. Der Informationsumsatz ist so hoch, dass die Begriffe des Problemlösens und der Informationsverarbeitung nach Pahl et al. [PAHL07, S. 67] und Dörner [DÖRNER76, S. 8] teils sogar synonym verwendet werden können. Der Informationsumsatz in Problemlöseprozessen kann nach Pahl et al. in drei Schritte untergliedert werden [PAHL07, S. 67]:

- Informationsgewinnung: Sie stellt beim Lösen von Aufgaben einen wesentlichen Tätigkeitsanteil dar und geht von der Analyse der Randbedingungen für den Problemlöseprozess bis zu technischen Realisationsmöglichkeiten. „Bei der Produkterstellung wird ein wesentlicher Zeitanteil für die Informationsgewinnung eingesetzt. Je nach Quelle beträgt dieser 8 % bis 50 % der Konstruktionszeit“ [EHRENSPIEL17, S. 659].
- Informationsverarbeitung: z. B. Analyse und Synthese der Informationen durch Überlegungen und Kombinationen

- Informationsausgabe (evtl. mit Informationsspeicherung): Festhalten des Ergebnisses der Informationsverarbeitung

Die drei genannten Schritte des Informationsumsatzes werden iterativ mehrmals durchlaufen, wobei die Lösung verbessert und somit „höherwertig gemacht wird“ [PAHL07, S. 68].

Der hohe Zeitanteil zur Informationsgewinnung unterstreicht die Wichtigkeit effizienter Vorgehensweisen und die Bedeutung eines guten Informationsaustauschs, bzw. der Informationsbereitstellung. Eine schnelle Bereitstellung wichtiger Informationen entscheidet über die Effizienz des Konstruktionsprozesses [HUBKA92, S. 130].

2.8 Unterstützung durch Konstruktionsinformationen

Die Bereitstellung von Informationen zur Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses (PEP) kann nach Ehrlenspiel und Meerkamm durch Personen als Informationsträger, visuelle Informationsträger oder auch Tonträger erfolgen [EHRENSPIEL17, S. 659]. Für die visuelle und auditive Informationsbereitstellung sind analoge Medien, wie beispielsweise Richtlinien und Normen in Papierform oder Bücher sowie digitale Medien, wie CAD-Modelle, E-Mails, Datenbanken oder Videos möglich. [EHRENSPIEL17, S. 659]

Für die Unterstützung von Konstruktionsprozessen hat sich die Bereitstellung von Informationen in Konstruktionskatalogen etabliert [ROTH00b, S. 1]. Da „Kataloge, die einen schnellen Zugriff zu den vom Konstrukteur benötigten Informationen gewährleisten, (...) eine große Hilfe bei der Rationalisierung im Konstruktionsbüro sein“ können [VDI 2222-2, 1982, S. 4], wird in der Richtlinie VDI 2222 das Erstellen und Anwenden von Konstruktionskatalogen behandelt [VDI 2222-2, 1982]. Beispiele für die umfangreiche Aufbereitung von Informationen in Konstruktionskatalogen zur Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses sind die „Lösungssammlungen für das methodische Konstruieren“ von Ewald [EWALD75] oder die „Konstruktionskataloge in der Antriebstechnik“ von Schneider [SCHNEIDER86].

Entwicklungsprozesse laufen heutzutage vermehrt unter Nutzung von Computern ab. Sie werden beispielsweise zur Kommunikation, zur Darstellung und Speicherung von Informationen, zur Prozesssteuerung, zur Berechnung von Konstruktionen und zur Generierung von Konstruktionsvorschlägen genutzt. Durch die Vernetzung bietet der Computereinsatz mit digitalen Medien, im Gegensatz zur Nutzung analoger Medien, die Möglichkeit einer zentralisierbaren Informationsbereitstellung.

Der in diesem Kapitel beschriebene Stand der Technik zu Entwicklungsprozessen, Einflüssen auf die Entwicklung und zum Informationsumsatz während der Entwicklung erfolgt ohne eine Einschränkung des zur Herstellung genutzten Produktionsverfahrens. In der vorliegenden Dissertation wird der spezifische Entwicklungsprozess für additiv gefertigte Bauteile untersucht. Hierfür werden entsprechende Informationen zur Unterstützung eines AM-Entwicklungsprozesses bereitgestellt. Die Grundlagen der additiven Fertigung und ihre Einsatzfelder werden in den folgenden Kapiteln 3.1 bis 3.8 beschrieben. Aufbauend auf den Grundlagen der additiven Fertigung und auf den Grundlagen von Entwicklungsprozessen aus diesem Kapitel (2) stellt Kapitel 3.10 bestehende AM-spezifische Beschreibungen von Entwicklungsprozessen vor.

3 Additive Fertigungsverfahren als Produktionstechnologie

Der Überbegriff „additive Fertigungsverfahren“ bezeichnet Herstellungsverfahren, bei denen aus unterschiedlichsten formlosen Ausgangsmaterialien feste Bauteile hergestellt werden. In Bezug auf die mögliche Gestalt von Bauteilen ergeben sich dadurch, abhängig vom technologischen Grundprinzip des Verfahrens, andere Möglichkeiten als bei konventionell hergestellten Bauteilen.

Die Bauprinzipien additiver Fertigungsverfahren beruhen auf einer Phasenumwandlung, bei der Material örtlich gezielt verfestigt wird und somit schrittweise Bauteile erstellt werden. Das Ausgangsmaterial kann hierfür fest, flüssig oder gasförmig vorliegen und die Phasenumwandlung dementsprechend durch unterschiedlichste Effekte angeregt werden. Die verarbeiteten Materialien und damit auch die Eigenschaften der entstehenden Bauteile variieren von Kunststoffen über Metalle bis hin zu Verbundwerkstoffen. Gemeinsam mit dieser Vielfalt an verwendeten Materialien existiert eine große Anzahl an unterschiedlichen Fertigungstechnologien. In Bild 3.1 sind verschiedene Verfahren nach ihrem Ausgangsmaterial und Schichtbildungsmechanismus klassifiziert.

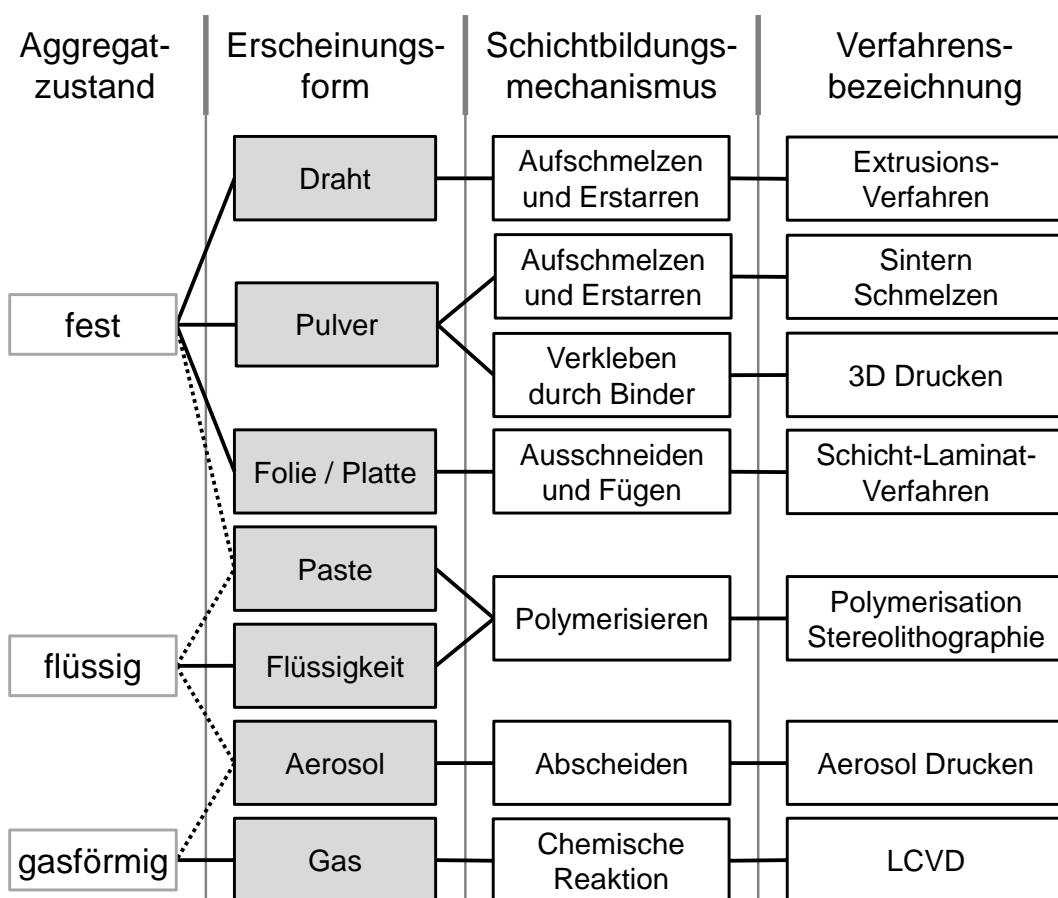


Bild 3.1: Klassifizierung verschiedener additiver Fertigungsverfahren nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials in Anlehnung an [GEBHARDT16a, S. 94]

Additive Fertigungsverfahren haben klassischerweise ihren Haupteinsatzbereich im Prototypenbau, werden aber auch zunehmend zur Herstellung von Endprodukten eingesetzt. Dieses Anwendungsfeld der additiven Fertigung, als Produktionstechnologie für Endbauteile, wird zur Abgrenzung gegenüber dem Rapid Prototyping (Prototypenbau) auch als Rapid Manufacturing bezeichnet. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Konstruktion von Endbauteilen liegt, steht der Begriff „additive Fertigung / Additive Manufacturing“ (AM) in den nachfolgenden Kapiteln synonym zu „Rapid Manufacturing“. Im Anwendungsbereich von AM als Produktionstechnologie kann nochmals zwischen der Herstellung von Werkzeugen (Tooling) und der direkten Herstellung von Endprodukten unterschieden werden (vgl. [ADAM15, S. 4]). Eine Klassifizierung der Anwendungsbereiche additiver Fertigungsverfahren ist in Bild 3.2 dargestellt.

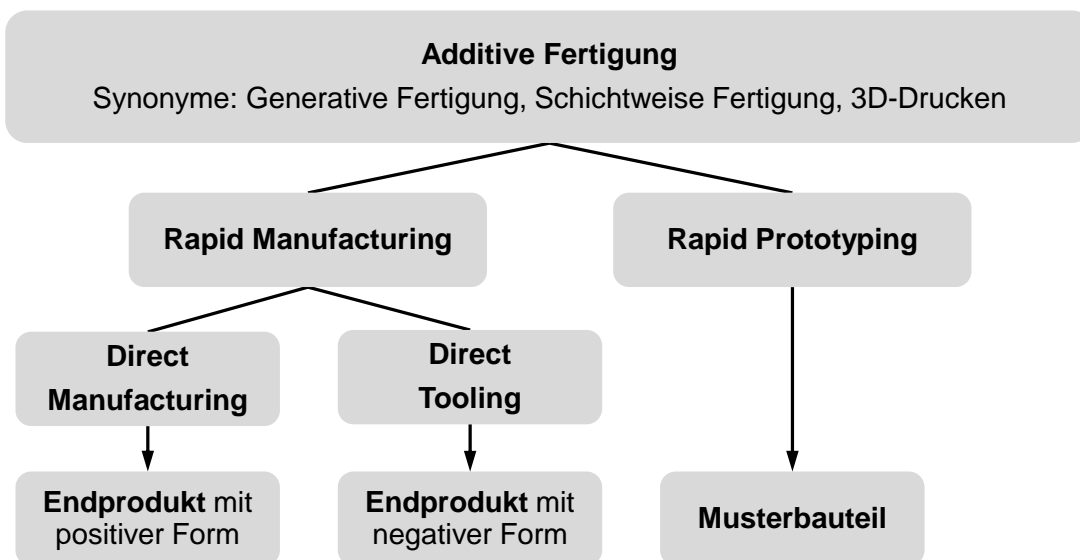


Bild 3.2: Struktur der Anwendungsbereiche additiver Fertigungsverfahren in Anlehnung an [ADAM15, S. 3]

Unabhängig vom Anwendungsbereich basiert die Herstellung von Endbauteilen mittels AM auf den gleichen Aufbaumechanismen wie auch das Rapid Prototyping. Diese werden nachfolgend erläutert.

3.1 Prinzipielle Aufbaumechanismen additiver Fertigungsverfahren

Die folgenden Inhalte (Kapitel 3.1 - 3.5) sind bereits in das Kapitel Gestaltung - Additiv gefertigte Bauteile des Skripts Konstruktionslehre I [BINZ17] eingeflossen, das unter maßgeblicher Mitwirkung des Autors dieser Dissertation entstanden ist.

Bei additiven Fertigungsverfahren erfolgt der Aufbau der Bauteile in der Regel schichtweise. Durch die Entstehung der Bauteile aus Schichten wird eine der drei Dimensionen

des Bauteils nicht vollwertig abgebildet. Um dies zu verdeutlichen, kann auch von einem Aufbauprinzip in 2½D gesprochen werden (zweieinhalbdimensional).

Der Aufbauvorgang von Bauteilen erfolgt durch sukzessives Addieren von Material, welches durch Energieeintrag aktiviert wird. Dabei muss der bereits gefertigte Teil des (gedruckten) Bauteils mit dem additiv hinzugefügten Material verbunden werden. Hierzu werden die angrenzenden Bereiche erneut oberflächlich aktiviert (siehe Bild 3.3 „Randbereich“).

Schichten setzen sich bei vielen additiven Fertigungsverfahren aus einzelnen Bahnen zusammen. Es wird zwischen den äußeren Konturbahnen in den Randbereichen einer Bauteilschicht und den Rasterbahnen unterschieden, welche die inneren Bereiche der Bauteilschicht ausfüllen [ADAM15, S. 12]. Die Bahnen eines ausgefüllten Bereichs überlappen sich in der Regel und sind dann jeweils um den Spurbabstand gegeneinander versetzt (siehe Bild 3.3).

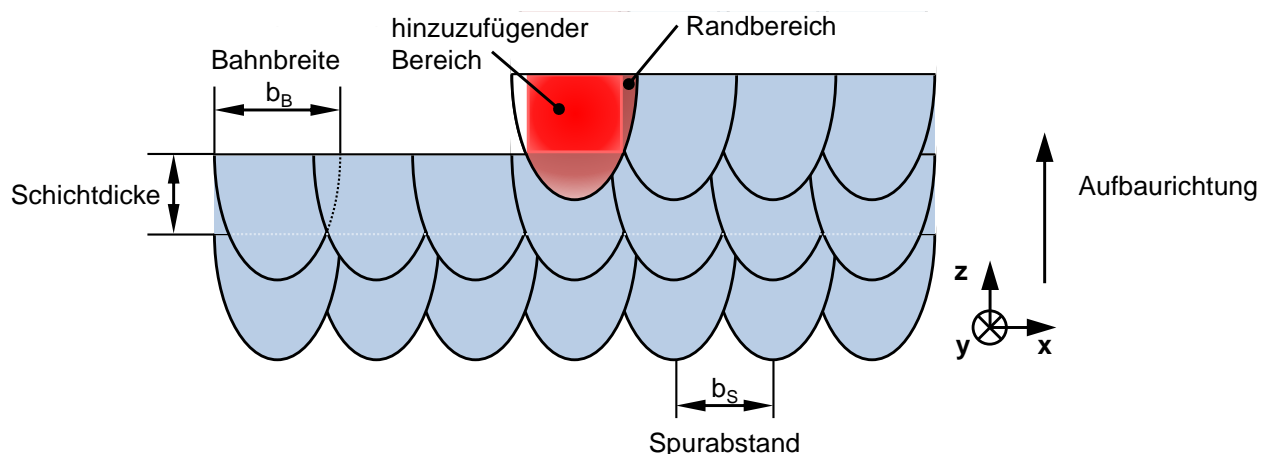


Bild 3.3: Schichtaufbau additiver Fertigungsverfahren (vgl. [ADAM15, S. 12 f.]

Der schichtweise Aufbau verlangt das Vorhandensein von stützendem Material für das aktuell hinzugefügte Material. Diese Funktion erfüllen entweder die Bauteile selbst, disperse (z. B. pulverförmige Strukturen) oder auch solide Stützstrukturen. Diese sind in der Regel während des Fertigungsprozesses zusätzlich mitzufertigen. Die Konstruktion der soliden Stützstrukturen erfolgt meist automatisiert durch eine entsprechende Software.

Aus dem schichtweisen Aufbau resultiert ein nicht isotropes Materialverhalten. Die Abweichung der Materialkennwerte im dreidimensionalen Raum kann variieren. Im Allgemeinen ist für eine Belastung der Bauteile in Aufbaurichtung (z-Richtung in Bild 3.3) mit geringeren Festigkeiten zu rechnen als in Schichtrichtung (x-y-Ebene). (vgl. [VDI 3405-1, 2013; VDI 3405-2, 2013])

Durch Temperaturunterschiede zwischen den Schichten und Wärmedehnungen kommt es zu Eigenspannungen im Bauteil (siehe Bild 3.4). Diese fallen je nach Verfahren und Material unterschiedlich stark aus. Zur Vermeidung von thermischem Verzug der Bauteile können während des Bauprozesses solide Stützstrukturen zur Fixierung notwendig sein. Auch thermische Nachbehandlungen der Bauteile zur Reduktion der auftretenden Spannungen sind möglich.

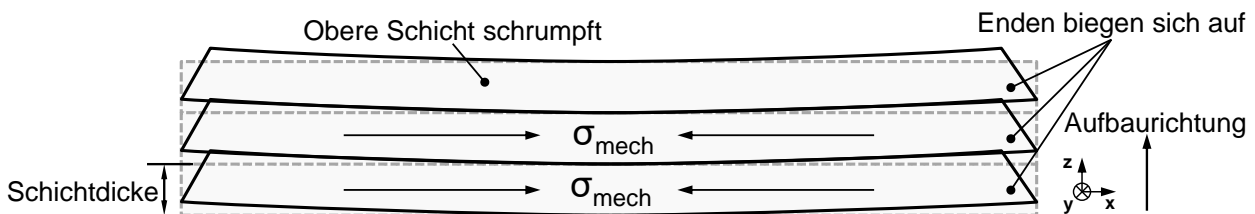


Bild 3.4: Entstehung thermisch induzierter mechanischer Spannungen in den Bauteilen in Anlehnung an [MEINERS99, S. 82]

Übersicht etablierter additiver Fertigungsverfahren

Aus der Vielzahl der verfügbaren additiven Verfahren haben einige Technologien schon seit mehreren Jahren auf dem Markt ihre Nützlichkeit und Anwendbarkeit unter Beweis gestellt [DIN EN ISO 17296-2, 2016, S. 5]. Deren Grundsätze und Prozesskategorien sind in der Norm DIN EN ISO 17296 beschrieben [DIN EN ISO 17296-2, 2016]. Darüber hinaus gibt es prinzipielle Verfahrensbeschreibungen in der Richtlinie VDI 3405 [VDI 3405, 2014]. Diese beschränkt sich ebenfalls auf eine Auswahl kommerziell erhältlicher additiver Fertigungsverfahren [VDI 3405, 2014, S. 3]. Die Prozesskategorien nach [DIN EN ISO 17296-2, 2016] und die Bezeichnungen nach [VDI 3405, 2014] sowie die hierin enthaltenen Angaben zur verarbeitbaren Werkstoffe der Verfahren sind in Tabelle 3.1 gegenübergestellt.

Es ist zu beachten, dass die Zuordnung der verarbeitbaren Werkstoffe nach Richtlinie VDI 3405 [VDI 3405, 2014] zu den verschiedenen Verfahren in Tabelle 3.1 sich nicht in allen Fällen auf die primär verarbeitbaren Werkstoffe bezieht. In einigen Fällen sind zur Verarbeitung der zugeordneten Werkstoffe Prozessketten mit mehreren Schritten notwendig, so zum Beispiel bei der Verarbeitung von Keramik mittels Stereolithographie (SL). In der Prozesskette wird ein mit Keramikpartikeln versetztes Photopolymer zu einem Grünling verarbeitet und anschließend in einem Ofen gesintert [KLAHN18, S. 30].

| Prozesskategorien nach [DIN EN ISO 17296-2, 2016] | Verfahren nach [VDI 3405, 2014] | Werkstoffe | | | | |
|--|---|------------|------------|---------|----------|--------|
| | | Metall | Kunststoff | Keramik | Formsand | Papier |
| Pulverbettbasiertes Schmelzen (Laser-/ Elektronenstrahl) | Laser-Sintern (LS) Synonym: Selektives Laser-Sintern (SLS®) | X | X | X | X | |
| | Laser-Strahlschmelzen (LBM) | X | | | | |
| | Elektronen-Strahlschmelzen (EBM) | X | | | | |
| Photopolymerisation im Bad (Laser-/ Flächenlicht) | Stereolithographie (SL) | | X | X | | |
| | Digital Light Processing (DLP) | X | X | X | | |
| Werkstoffextrusion | Fused Layer Modelling (FLM) Synonyme: Fused Deposition Mo- delling (FDM), Strangablegeverfahren, Materialextrusion | | X | | | |
| Werkstoffauftrag | Multi-Jet Modelling (MJM) | | X | | | |
| | Poly-Jet Modelling (PJM) | | X | | | |
| Bindemittelauftrag | 3D-Drucken (3DP) | X | X | X | X | |
| Gerichtete Energieeinbrin- gung | Nicht in VDI 3405 enthalten Vertriebsnamen: Laser Metal Deposi- tion, Laserauftragsschweißen | X | | | | |
| Schichtlaminierung | Layer-Laminated-Manufacturing (LLM) | X | X | X | | X |

Tabelle 3.1: Prozesskategorien nach [DIN EN ISO 17296-2, 2016] und Bezeichnungen additiver Fertigungsverfahren nach [VDI 3405, 2014]

3.2 Datenprozesse der additiven Fertigung

Die Datengrundlage für den Fertigungsprozess kann bei der additiven Fertigung entweder durch die generische CAD-Modellierung ausgehend von einer Produktidee oder durch die Rückführung bestehender physischer Modelle durch Reverse Engineering auf Basis 3D-gescannter Punktwolken erfolgen. Das CAD-Modell wird für die Weiterverarbeitung durch die Fertigungssoftware in der Regel nochmals umgewandelt. Unterstützte Formate unterscheiden sich in den übermittelbaren Informationen wie Farbe oder Prozessparameter und sind oftmals polygonisierte Facettenmodelle. Da die Aufbaurichtung maßgeblich die entstehenden Oberflächen, die Belastbarkeit des Bauteils sowie die notwendigen Stützstrukturen und den Nachbearbeitungsaufwand beeinflusst, kann die Orientierung des Bauteils im Bauraum nochmals angepasst werden, wie in Bild 3.5 dargestellt. Nach der Zerlegung des virtuellen Modells in einzelne Fertigungsschichten,

dem „Slicen“, erfolgt die Fertigung in der Anlage mittels maschinenspezifischer Fertigungsdaten.

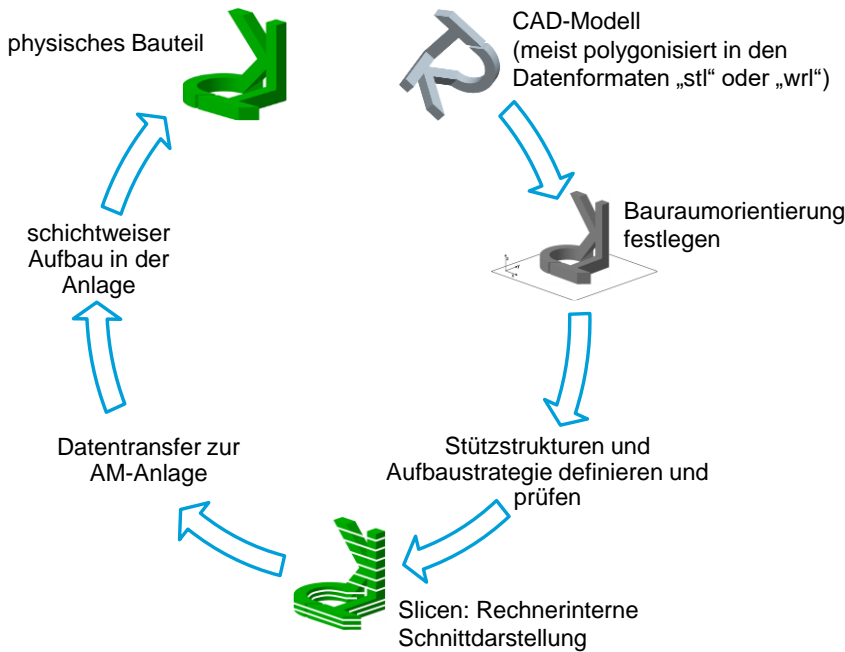


Bild 3.5: Datenprozess vom CAD-Modell zum Bauteil

3.3 Kosten additiver Fertigungsverfahren

Alle additiven Fertigungsverfahren haben gemeinsam, dass die Herstellkosten maßgeblich vom Materialverbrauch und nicht von der Bauteilkomplexität abhängen. Dies steht im Gegensatz zu konventionell gefertigten Bauteilen, bei denen die Stückkosten maßgeblich von der Komplexität der Bauteile beeinflusst werden. Der Skaleneffekt, der bei der konventionellen Massenproduktion von Produkten die Kosten pro Stück reduziert, tritt bei additiven Fertigungsverfahren dagegen nur begrenzt auf (siehe Bild 3.6).

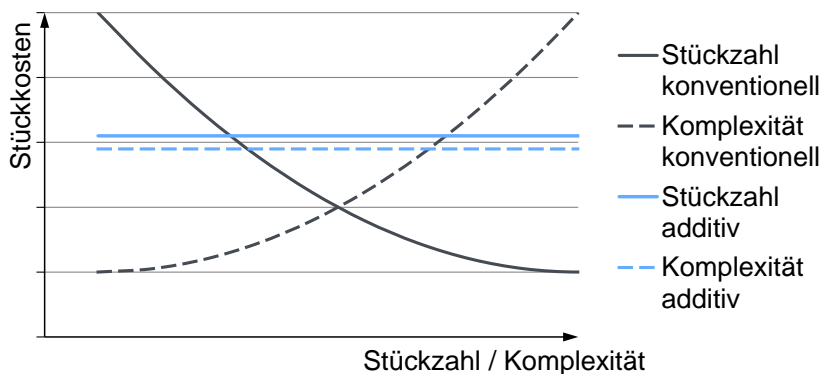


Bild 3.6: Stückkosten in Abhängigkeit der Stückzahl und der Komplexität in Anlehnung an [HOPKINSON01, S. 199 f.; HOPKINSON06, S. 5 ff.]

Die unterschiedlichen Zusammenhänge zwischen Kosten und Stückzahl lassen sich mit der Zusammensetzung der Kosten pro Bauteil erklären. Die Fixkosten für Werkzeuge und

die Entwicklungskosten haben bei additiven Fertigungsverfahren nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten pro Bauteil, wodurch der Skaleneffekt gering ausfällt. In Bild 3.7 sind die Kostenstrukturen verschiedener Herstellungsverfahren für die Fallstudie eines dynamisch beanspruchten Bauteils eines Kraftfahrzeugs mit einer Masse von einem Kilogramm und einer Losgröße von 1000 Stück dargestellt. Verglichen werden das Direct Manufacturing mit Laser-Strahlschmelzen (LBM), das Direct Tooling einer Sandgussform mit 3D-Drucken (3DP) sowie die konventionellen Verfahren Sandguss und Druckguss. Die Werte der Fallstudie sind der Masterarbeit von Kranert [Kranert16] entnommen, die vom Autor der vorliegenden Dissertation betreut wurde. Die Kosten für notwendige Nachbearbeitungen sind in der Darstellung in den Teilkosten enthalten.

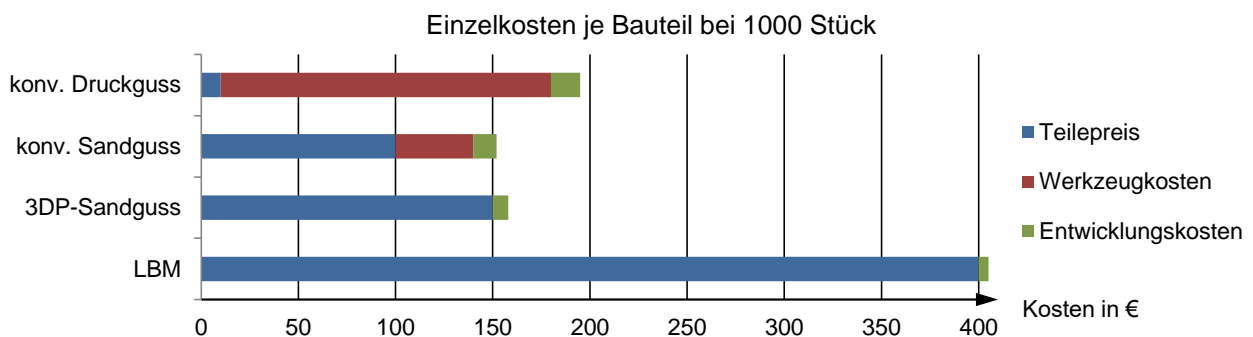


Bild 3.7: Zusammensetzung der Kosten additiv gefertigter Bauteile im Vergleich in Anlehnung an [Kranert16, S. 77]

Die Entwicklungskosten stehen in Zusammenhang mit der Entwicklungsdauer. Die anteiligen Entwicklungszeiten bis zum Beginn der eigentlichen Teilefertigung (SOP) für die verschiedenen Herstellungsverfahren der Fallstudie sind in Bild 3.8 dargestellt. Vor allem der Zeitanteil der Konstruktion und Berechnung sowie die Werkzeugerstellung fallen für die Nutzung additiver Fertigungsverfahren deutlich kürzer aus. Für LBM entfällt die Werkzeugerstellung naturgemäß vollständig.

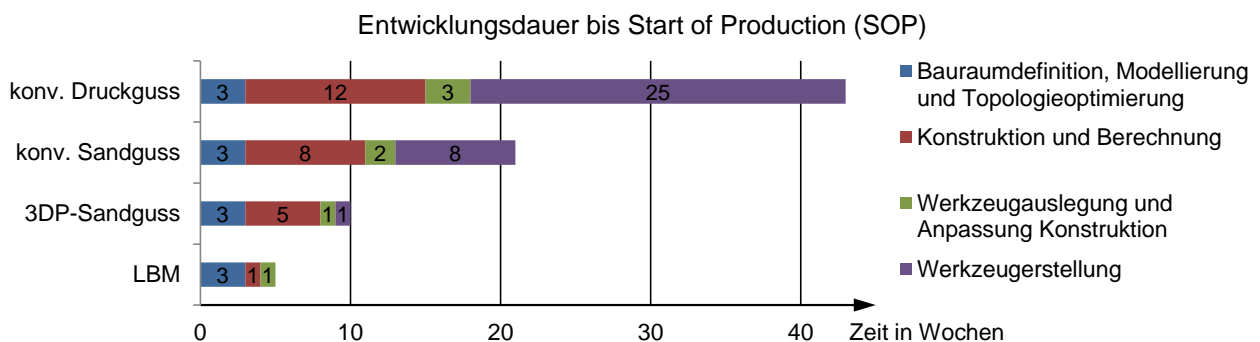


Bild 3.8: Zusammensetzung der Entwicklungszeiten für additiv gefertigte Bauteile im Vergleich in Anlehnung an [Kranert16, S. 77]

3.4 Oberflächen additiv gefertigter Bauteile

Durch die Approximation von Körpern durch Schichten entstehen Abbildungsfehler. In Bild 3.9 ist dies für einen Körper mit rundem Querschnitt und dreieckigem Ausschnitt für zwei verschiedene Schichtdicken gegenübergestellt. Größere Schichtdicken (linke Körperhälfte) verursachen größere Approximationsfehler als kleinere Schichtdicken (rechte Körperhälfte). Die Schichtdicke beeinflusst somit die entstehende Oberflächenrauheit. Es wird zwischen Oberflächen mit in Aufbaurichtung orientiertem Normalenvektor (Upskin-Winkel ν) und Oberflächen mit entgegengesetzt zur Aufbaurichtung orientiertem Normalenvektor (Downskin-Winkel δ) unterschieden.

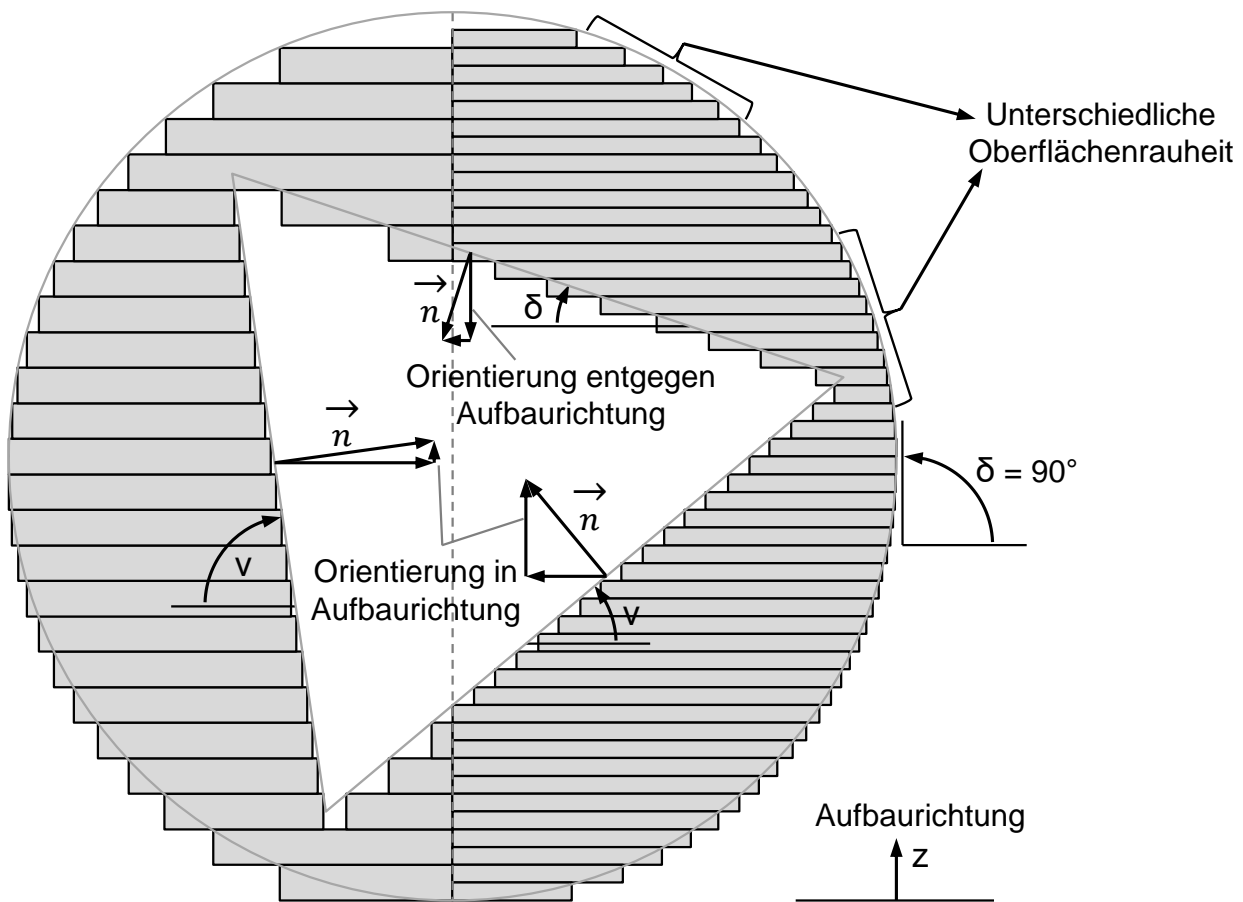


Bild 3.9: Schichtapproximation und Oberflächenbeschreibung bei der additiven Fertigung

Die entstehende Oberflächenrauheit wird neben der Schichtdicke auch vom Orientierungswinkel der Oberfläche beeinflusst. Die Orientierung beeinflusst die Rauheit, je nach additivem Fertigungsverfahren, durch die Stützstrukturen, durch die Mechanismen des Energieeintrags oder durch den Materialauftrag. Es ergeben sich durch diese Zusammenhänge Regeln für die Konstruktion additiv gefertigter Bauteile. Ebenso wie sich durch

die Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit von der Bauraumorientierung Konstruktionsregeln für AM ergeben, haben weitere Einschränkungen der additiven Fertigung einen Einfluss auf den Konstruktionsvorgang. Diese Restriktionen werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

3.5 Konstruktionsrestriktionen additiver Fertigungsverfahren

Häufig wird im Zusammenhang mit der Gestaltung von Bauteilen nicht von Konstruktionsrestriktionen, sondern von Konstruktionsregeln gesprochen. In der Richtlinie VDI 2223 werden Konstruktionsregeln als „[...] Anweisungen zur zweckmäßigen Gestaltung technischer Produkte [...]“ beschrieben, in denen Lösungen und Vorgehensweisen dokumentiert sind, die sich in früheren Entwicklungsaufgaben bewährt haben [VDI 2223, 2004, S. 66]. Vor allem die Bedeutung von Konstruktionsregeln als Hilfsmittel für unerfahrene Konstrukteure wird von Richtlinie VDI 2223 herausgestellt [VDI 2223, 2004]. Konstruktionsregeln können nach der Definition von Richtlinie VDI 2223 beispielsweise auch Beschreibungen von Handlungsempfehlungen hinsichtlich einer umweltgerechten oder kostengerechten Gestaltung beinhalten [VDI 2223, 2004, S. 66]. In dieser Dissertation wird der Begriff Konstruktionsrestriktionen zur begrifflichen Abgrenzung der verfahrensbedingten Einschränkungen der Gestaltungsmöglichkeiten als Teilbereich der Konstruktionsregeln verwendet. Die überwiegende Mehrzahl der in der Literatur beschriebenen Konstruktionsregeln für die additive Fertigung (AM) beschreibt Limitierungen der herstellbaren Geometrien und Dimensionen [SEEPERSAD17, S. 310]. Diese stellen im Verständnis des Autors dieser Arbeit Konstruktionsrestriktionen dar.

Die maßgebliche Gestaltungseinschränkung bei additiven Fertigungsverfahren resultiert aus der Stabilität der entstehenden Struktur während des Fertigungsprozesses. Um eine ausreichende Stabilität zu gewährleisten, können verfahrensabhängig solide Stützstrukturen notwendig sein. Die nachträgliche Entfernbarkeit der Stützstrukturen (solide und dispers) muss möglich sein. Die Notwendigkeit von Stützstrukturen ist abhängig von der Aufbaurichtung des Bauteils, welche somit im direkten Zusammenhang mit der Gestaltung der Bauteile steht. Abhängig vom jeweiligen Aufbauprinzip des additiven Fertigungsverfahrens ergeben sich spezifische Konstruktionsrestriktionen, welche zumeist mit den Stützmechanismen oder dem Energieeintrag während des Fertigungsprozesses in Korrelation stehen.

Konstruktionsregeln für additive Fertigungsverfahren werden teils von Anlagenherstellern und Dienstleistungsunternehmen erstellt (vgl. hierzu [3D SYSTEMS16; CRUCIBLE14; EOS15; FKM17; STRATASYS15]), teils werden sie in akademischer Forschung entwickelt (vgl. hierzu [ADAM15; GERBER08; GOVETT12; KRANZ15; MEISEL15; SAMPER14; SCHÄFER08; SÜß16; THOMAS09; WEGNER12; YANG14]) und teils sind sie in Lehrbüchern (vgl. hierzu [BREUNINGER13, S. 124–128; ZÄH06, S. 110–115]) und Richtlinien (vgl. hierzu [VDI 3405-3, 2015]) zu finden. Nur wenige der Konstruktionsrestriktionen decken mehr als ein additives Fertigungsverfahren ab. Zumeist sind die Restriktionen verfahrens- und sogar anlagenspezifisch formuliert. Viele der Regeln haben eine Richtungsabhängigkeit. Die Analyse der Regeln für das Laser-Sintern (LS) nach Adam [ADAM15] zeigt beispielsweise, dass über 55 % der Regeln eine direkte oder indirekte Abhängigkeit zur Bauteilorientierung haben. Für das Laser-Strahlschmelzen (LBM) und das Fused Layer Modelling (FLM) beträgt die Abhängigkeit von der Aufbaurichtung sogar ca. 70 %. [LEUTENECKER-TWELSIEK16, S. 409]

Aus den bekannten Konstruktionsrestriktionen wurden vom Verfasser dieser Dissertation allgemeine Konstruktionsrestriktionen für AM abgeleitet, welche bereits in das Kapitel Gestaltung - Additiv gefertigte Bauteile des Skripts Konstruktionslehre I [BINZ17] eingeflossen sind. Im Folgenden sind diese allgemein einschränkende Restriktionen für die Konstruktion additiv gefertigter Bauteile aufgeführt. Die angegebenen Zahlenwerte sind gemittelte anlagenspezifische Näherungswerte aus der Literatur und daher nicht allgemeingültig übertragbar.

3.5.1 Konstruktionsrestriktionen in Bezug auf Schicht- und Bahnapproximation

Der Energieeintrag in das entstehende Bauteil erfolgt notwendigerweise mit einer räumlichen Ausdehnung. Dies wird bei der Approximation des Bauteils durch Schichten und Bahnen berücksichtigt und resultiert in minimal möglichen Abmessungen der entstehenden Bauteile und diskreten fertigmöglichen Abmaßen (Auflösung der Verfahren).

Minimale Bauteilstärke in Aufbaurichtung (minimale Bauteilabmessungen in z-Richtung):

Allgemein sollten die Bauteilabmessungen in Aufbaurichtung mehrere Schichtdicken betragen, um mögliche Fehler innerhalb einzelner Schichten zu kompensieren und homogenere Materialeigenschaften zu erhalten. Richtwerte für die Bauteilstärke (vgl. [ADAM15, S. 61; SÜß16, S. 288; WEGNER12, S. 261]): $\geq 0,6$ mm oder ≥ 3 Schichtdicken.

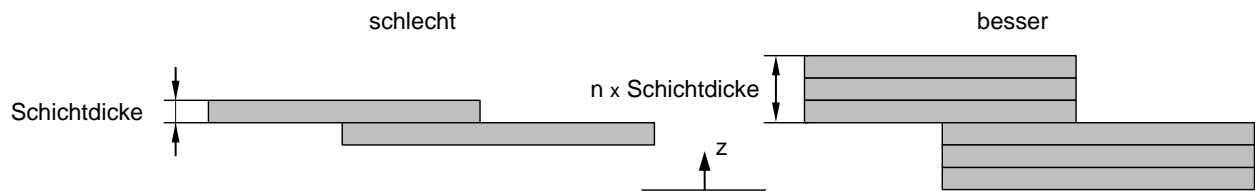


Bild 3.10: Minimale Bauteilstärken

Diskrete Bauteilstärke in Aufbaurichtung (mögliche Bauteilabmessungen in z-Richtung):

Die Schichtapproximation ermöglicht nur die Herstellung diskreter Abmessungen. Zwischenwerte werden für den Fertigungsverfahren durch die erreichbaren diskreten Werte approximiert und es entstehen Maßabweichungen. Die Abmessungen des Bauteils in Aufbaurichtung sollten daher ein Vielfaches der Schichtdicke betragen (vgl. [KRANZ15, S. 7; SCHÄFER08, S. 54]).

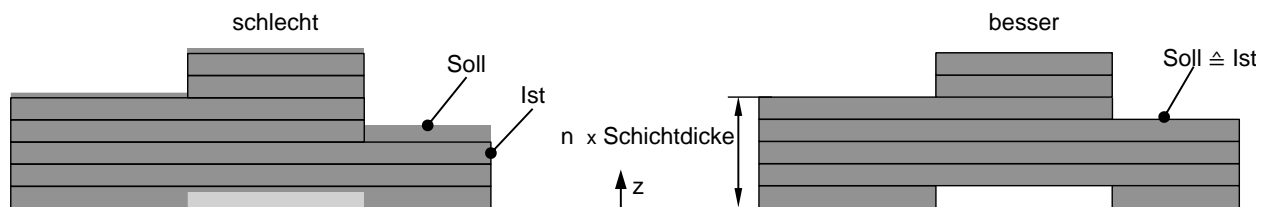


Bild 3.11: Diskrete Bauteilstärken

Minimale Wandstärken (minimale Bauteilabmessungen senkrecht zur z-Richtung):

Die Bahnweite b_B des Fertigungsverfahrens (Strahl- bzw. Strangdurchmesser) bestimmt die minimal mögliche Wandstärke. Kleiner modellierte Wände werden je nach Software entweder nicht gefertigt oder zu groß gefertigt. Teilweise werden von der Software auch mehrere Bahnweiten für eine vollständige Fertigung vorausgesetzt. Richtwerte für die Wandstärke (vgl. [ADAM15, S. 60; GOVETT12, S. 17; KRANZ15, S. 9; SÜß16, S. 288; WEGNER12, S. 261]): $\geq 0,6 \text{ mm}$ oder ≥ 2 Bahnweiten.

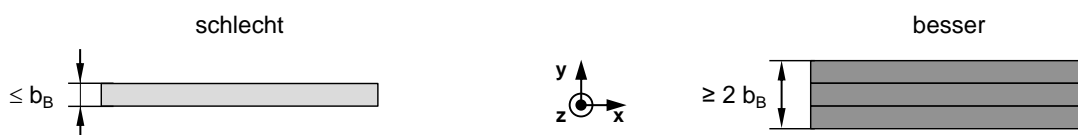


Bild 3.12: Minimale Wandstärke

Diskrete Wandstärken (mögliche Bauteilabmessungen senkrecht zur z-Richtung):

Die Approximation der Bauteilstärke durch Bahnen ermöglicht nur die Herstellung diskreter Abmessungen. Zwischenwerte werden für den Fertigungsverfahren durch die erreichbaren diskreten Werte approximiert und es entstehen Maßabweichungen. Bei größeren Wandstärken kann der Effekt der Diskretisierung durch angepasste Rasterbahnen zur

Füllung der Fläche umgangen werden (dies erfolgt in der Regel durch Software). Die Abmessungen des Bauteils senkrecht zur Aufbaurichtung sollten daher für kleine Wandstärken ein Vielfaches der Bahnen betragen (Vielfaches der Spurbreite b_s + Überlappung) (vgl. [ADAM15, S. 56 ff.; SCHÄFER08, S. 78]).

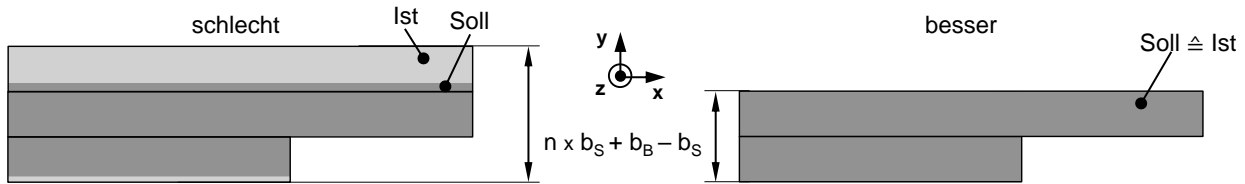


Bild 3.13: Diskrete Wandstärken

Konturauflösung (mögliche Auflösung von Konturen senkrecht zur z-Richtung):

Der Strahl- bzw. Strangdurchmesser beschränkt die Auflösung an Ecken/Kanten und Radien in der Bauteilebene. Fehlstellen können vermieden werden, indem die Außenradien größer als der Radius des Energieeintrags ausgeführt werden (vgl. [KRANZ15, S. 8; SCHÄFER08, S. 76]).

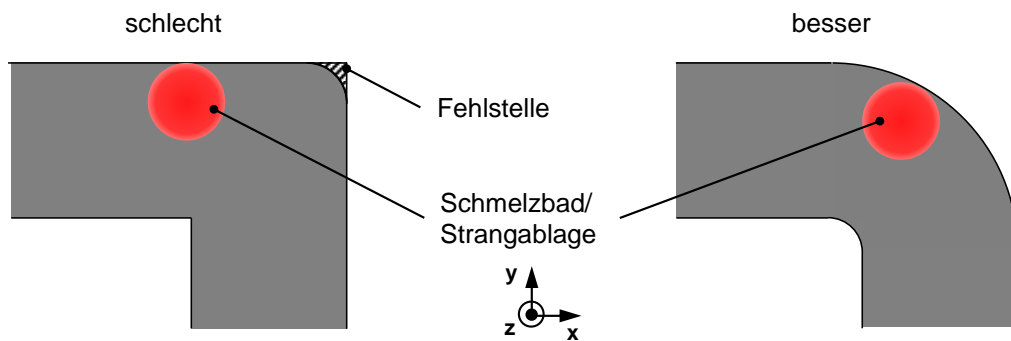


Bild 3.14: Konturauflösung in Schichtebene

3.5.2 Konstruktionsrestriktionen zur Reduktion von Ungenauigkeiten durch Unschärfen des räumlichen Energieeintrags

Der Energieeintrag in das entstehende Bauteil ist räumlich nicht scharf begrenzt. Dies muss konstruktiv beachtet werden.

Bauteilmaß in Schichtrichtung (minimal fertigbare Spaltmaße in x-y-Richtung):

Durch die Unschärfe des Energieeintrags in Schichtrichtung kommt es zu Anhaftungen von Material an den Rändern des Bauteils. Die Ausprägung dieses Effekts ist maßgeblich vom Gesamtenergieeintrag in die Schicht, also der Schichtfläche abhängig. Die Anhaftungen können bei kleinen Spaltmaßen zum Verschluss der Spalte oder gar zur Verschmelzung angrenzender Bauteilelemente führen. Spaltmaße sind deshalb ausreichend

zu dimensionieren. Richtwert für Spaltmaße (vgl. [ADAM15, S. 117; SCHÄFER08, S. 73; THOMAS09, S. 92]): $\geq 0,5$ mm.

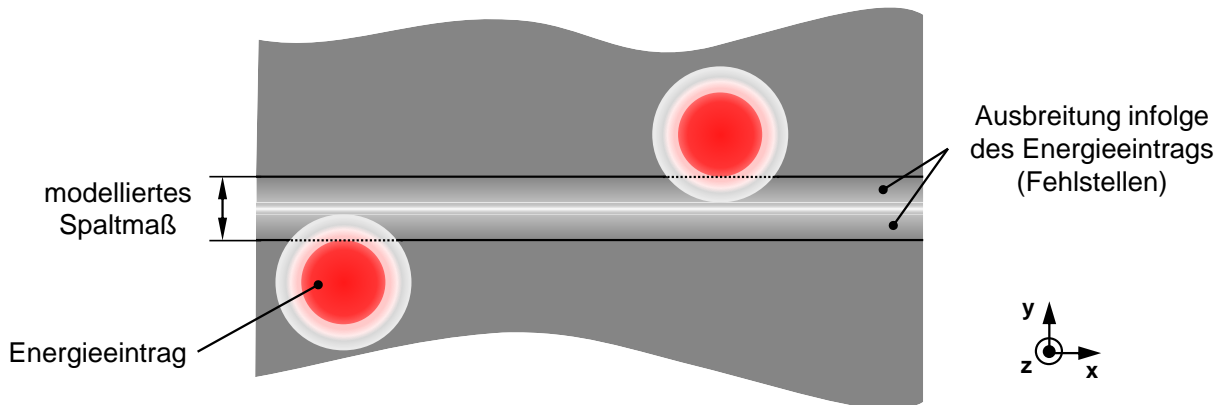


Bild 3.15: Minimales Spaltmaß in Schichtrichtung

Bauteilmaß in Aufbaurichtung (minimal fertigbare Spaltmaße in z-Richtung):

Durch die Unschärfe des Energieeintrags in Aufbaurichtung kommt es zu Anhaftungen von Material unterhalb der gewollten Verfestigungszone. Dieser Effekt tritt vornehmlich in der untersten Schicht pulver- oder fluidbasierter Verfahren auf und überlagert sich mit dem Treppenstufeneffekt. Die Anhaftungen resultieren in einem Übermaß in z-Richtung und können zum Verschluss von Spalten oder zur Verschmelzung angrenzender Bauteilelemente führen. Aufmaße sind durch eine angepasste Konstruktion zu kompensieren oder durch Nachbearbeitung zu entfernen. Spaltmaße sind ausreichend zu dimensionieren. Richtwert für Aufmaß (vgl. [ADAM15, S. 60]): 0,1 - 1,5 mm. Richtwert für Spaltmaße (vgl. [ADAM15, S. 118; SCHÄFER08, S. 73]): $\geq 0,5$ mm.

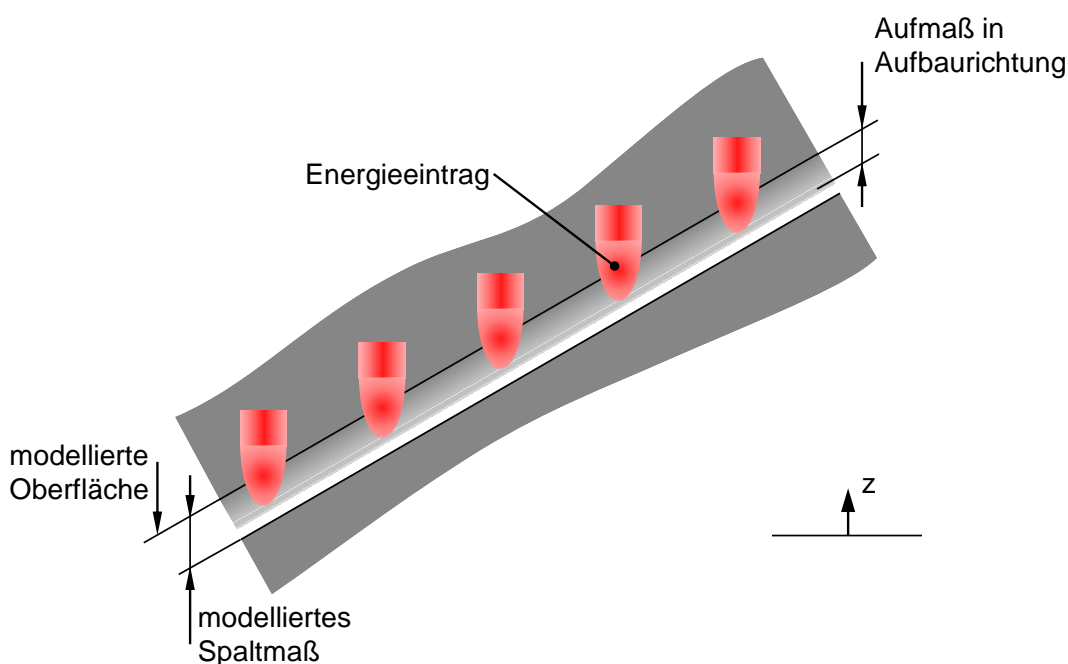


Bild 3.16: Minimales Spaltmaß in Aufbaurichtung

Bauteilmaß in Aufbaurichtung (Formabweichungen in z-Richtung):

Anhaftungen in z-Richtung, die durch die Unschärfe des Energieeintrags entstehen, führen bei Formelementen zu Formabweichungen (vgl. [ADAM15, S. 76 ff.; THOMAS09, S. 112 ff.; WEGNER12, S. 262 f.]). In Bild 3.17 sind Formabweichungen runder Geometrien zum einen für eine Bohrung (links) und zum anderen für eine Welle (rechts) dargestellt. Die Form der Bohrung wird durch Anhaftungen im oberen Bereich beeinträchtigt und der Bohrungsquerschnitt verkleinert sich insgesamt, während die Form der Welle durch Anhaftungen im unteren Bereich beeinträchtigt wird und sich der Wellenquerschnitt insgesamt vergrößert. Auf der jeweils gegenüberliegenden Seite sind Einflüsse des Treppenstufeneffekts zu erkennen. Der relative Einfluss der Anhaftungen auf die Formabweichungen sinkt mit zunehmender Größe der Geometrien. Die Formabweichungen können durch eine angepasste Konstruktion kompensiert oder durch Nachbearbeitung ausgeglichen werden.

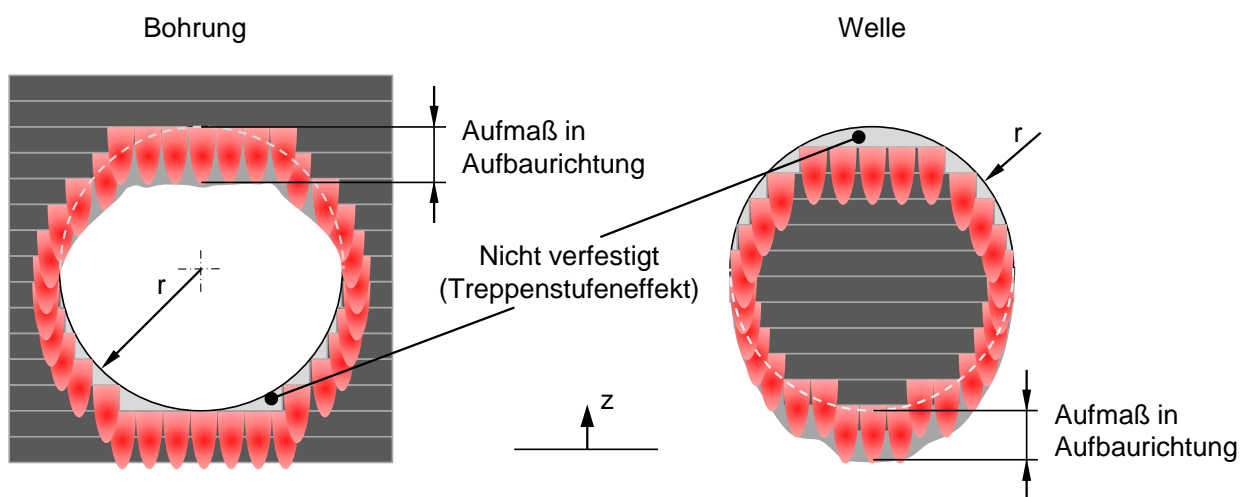


Bild 3.17: Formabweichungen in z-Richtung

Innenliegende Ecken und Kanten:

Unschärfen des Energieeintrags können orientierungsunabhängig an inneren Körperkanten und in Ecken zu Materialanhaftungen führen. Dem kann entgegengewirkt werden, indem Ecken gerundet oder gefast werden. Richtwert für innere Radien (vgl. [ADAM15, S. 111 ff.]): $r_i \geq 0,5 \text{ mm}$.

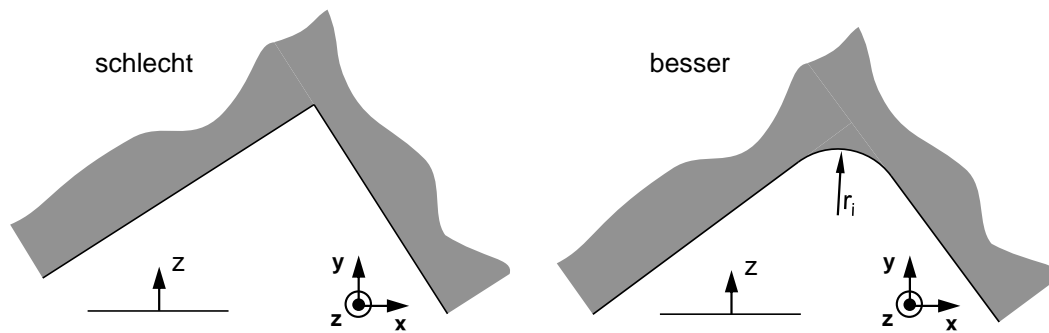


Bild 3.18: Innenliegende Ecken und Kanten

3.5.3 Konstruktionsrestriktionen in Bezug auf notwendige Nachbearbeitung

Maximaler freitragender Überhangwinkel (Notwendigkeit von Stützstrukturen)

Bei Verfahren, die solide Stützstrukturen verwenden, kann deren Notwendigkeit durch den Überhangwinkel charakterisiert werden. Der Überhangwinkel spiegelt bei gegebener Schichtdicke den Überstand der einzelnen Fertigungsschichten zueinander wider. Flächen mit kleinem Downskin-Winkel δ (Orientierungen nahe der Schichtrichtung) bedürfen eher solider Stützstrukturen als Flächen mit großem Downskin-Winkel δ (Orientierung nahe der Aufbaurichtung). Überhänge mit der Notwendigkeit von soliden Stützstrukturen können auch durch Formelemente, wie z. B. Bohrungen, entstehen. Falls die Funktion es zulässt, kann durch eine angepasste Konstruktion die Notwendigkeit von Stützstrukturen vermieden werden (Beispiel siehe Bild 3.19). Richtwert für freitragender Überhangwinkel (Downskin-Winkel) (vgl. [ADAM15, S. 135 ff.; KRANZ15, S. 3 ff.; MEISEL15, S. 7 f.; SÜß16, S. 288; THOMAS09, S. 192 ff.; VDI 3405-3, 2015, S. 24]): $\delta \geq 45^\circ$.

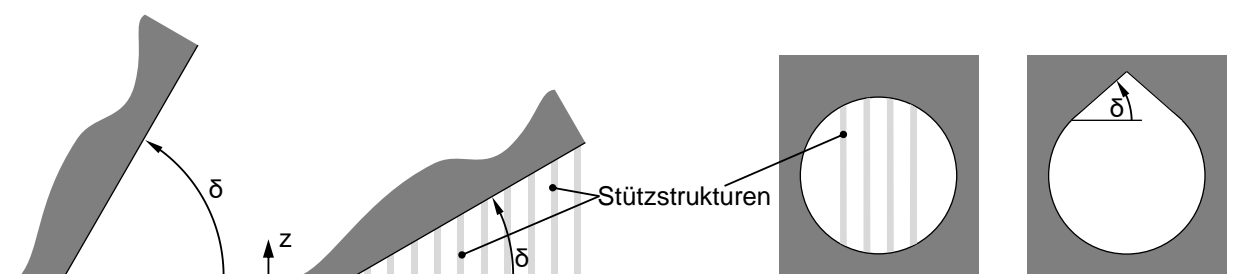


Bild 3.19: Maximaler freitragender Überhangwinkel

Entfernbarkeit von soliden Stützstrukturen (Zugänglichkeit zur Entfernung)

Stützstrukturen müssen nach dem Bauprozess entfernt werden. Dies erfolgt meist mechanisch oder chemisch. Für die Entfernung der Stützstrukturen muss die entsprechende Zugänglichkeit gewährleistet sein (vgl. [KRANZ15, S. 12; SCHÄFER08, S. 73]).

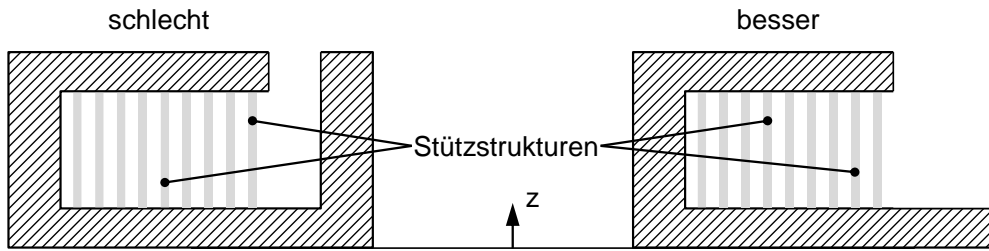


Bild 3.20: Zugänglichkeit zur Nachbearbeitung

Entfernbarkeit von dispersen Stützstrukturen (Zugänglichkeit zur Entfernung)

Auch disperse Stützstrukturen können beim Bauprozess im Bauteil eingeschlossen werden, wie z. B. bei Hohlkörpern oder langen Kavitäten, und müssen nachträglich entfernt werden. Die Reinigung erfolgt meist unter Zuhilfenahme von Druckluft oder anderen Fluiden. Für die Entfernung müssen bei Hohlräumen Öffnungen vorgesehen werden und Kavitäten dürfen eine kritische Länge nicht übersteigen (vgl. [KRANZ15, S. 8; VDI 3405-3, 2015, S. 15]).

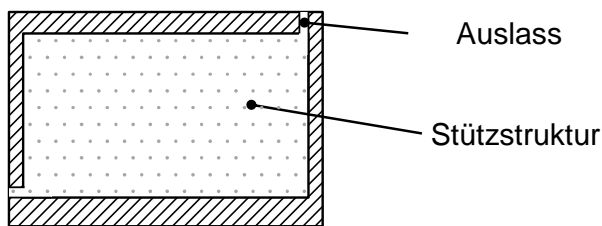


Bild 3.21: Entfernbarekeit disperser Stützstrukturen

Gestaltungsregeln in Bezug auf die Nachbearbeitung von Funktionsflächen

Bei Funktionsflächen mit höheren Anforderungen an die Genauigkeit oder die Oberflächengüte, als es das jeweilige additive Fertigungsverfahren ermöglicht, sind (oftmals zerspanende) Nachbearbeitungen notwendig. Die anzuwendenden Regeln für die Anordnung und Stärke der Bearbeitungsflächen und -zugaben entsprechen im Allgemeinen den Regeln, die auch für Gusswerkstücke bekannt sind.

3.6 Erfolgsfaktoren der additiven Fertigung

Additive Fertigungsverfahren haben sich in den vergangenen Jahren ausgehend von einer Technologie zur Herstellung von Prototypen zu einer Technologie entwickelt, welche die Möglichkeit bietet, auch Endprodukte zu generieren [GEBHARDT16a, S. 8]. Ihr zweckmäßiger Einsatz kann bei ersten marktreifen Produkten beobachtet werden (siehe [MAPAL14]). Ein wirtschaftlicher Einsatz der Technologien für Endprodukte geht oftmals mit einem hierdurch realisierbaren Produktvorteil einher. Aktuell weisen additive Verfah-

ren gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren noch Nachteile auf, wie z. B. geringere Genauigkeiten [GEBHARDT16a, S. 22] oder höhere Fertigungskosten bei großen Stückzahlen. Wird die Bauteilgestalt jedoch dem jeweiligen additiven Fertigungsverfahren angepasst, indem die aus dem „addierenden“ Bauprozess resultierende Gestaltungsfreiheit ausgeschöpft wird, kann die ökonomische Konkurrenzfähigkeit durch einen resultierenden Produktvorteil oder geringere Fertigungskosten verbessert werden. Ein Beispiel hierfür stellen Spritzgusswerkzeuge dar, die durch die additive Fertigung auch an komplexen Freiformflächen konturnah gekühlt werden können [GEBHARDT16b, S. 374].

Potenzialfelder der additiven Fertigung

Additive Fertigungsverfahren ergänzen das bestehende Portfolio möglicher Herstellungsprozesse. Szenarien ihres zweckmäßigen Einsatzes werden beispielsweise in [HOLMSTRÖM10; MELLOR14; LINDEMANN15; LEY17] untersucht. In einer Studie der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) von Dezember 2016 [ACATECH16] sind Potenzialfelder aufgeführt, die für einen wirtschaftlichen Einsatz der additiven Fertigung sprechen. Diese Potenzialfelder sind im Folgenden in Form einer Checkliste zusammengestellt (Tabelle 3.2). Die Reihenfolge repräsentiert die Priorität der Punkte und wurde vom Autor dieser Dissertation durch einen paarweisen Vergleich bestimmt. Treffen ein oder mehrere der Potenzialfelder auf ein Entwicklungsprojekt zu, kann ein wirtschaftlicher Einsatz von AM gegeben sein.

| | <u>Potenzialfeld</u> | <u>Beschreibung</u> |
|----|--|--|
| 1. | Bauteilabmessungen | Hat das Bauteil kleine Abmessungen? / Ist der Bauraum von AM-Anlagen ausreichend zur Herstellung des Bauteils? (Mit additiven Fertigungsverfahren hergestellte Bauteile überschreiten typischerweise nicht die Größendimensionen eines Fußballs) |
| 2. | Stückzahlen | Wird das Bauteil in geringen Stückzahlen benötigt? (derzeit etwa maximal 1000 Stück pro Jahr) |
| 3. | Leichtbau | Besteht ein Leichtbaupotenzial? / Sind bisherige Bauteile oder Komponenten zu schwer? |
| 4. | Konstruktive Freiheit | Bestehen Einschränkungen der Konstruktion durch konventionelle Fertigungstechnologien (vgl. Wärmetauscher)? / Gibt es Geometrien, die anders nicht herzustellen sind? |
| 5. | Kundenindividuelle Sachleistungen | Bringt die Personalisierbarkeit / Individualisierbarkeit von Produkten einen Vorteil? |
| 6. | Produktentwicklungszeiten | Bestehen sehr lange Produktentwicklungszeiten (z. B. durch Werkzeugentwicklung)? / Handelt es sich um ein Bauteil, welches häufige Änderungen durchläuft und/oder innerhalb sehr kurzer Zeit entwickelt werden muss? |
| 7. | Fertigungsaufwand | Bestehen konventionell aufwändige mehrstufige Fertigungsprozesse? / Sind bei konventioneller Fertigung beispielsweise viele Umrüst- und Umspannprozesse notwendig? |

| | | |
|-----|-----------------------------|--|
| 8. | Montage | Bestehen mehrstufige Montageoperationen von Einzelteilen aus demselben Werkstoff? / Lassen sich durch Funktions- und Bauteilintegration Montageschritte einsparen? |
| 9. | Bauteilbetrieb | Entstehen hohe Betriebskosten im Verhältnis zu den Anschaffungskosten? / Zeichnet sich der Einsatzort durch anteilig hohe entstehende variable Kosten aus? (Z. B. Einsatz von Leichtbauteilen in Luft- und Raumfahrt zur Minimierung des Treibstoffverbrauchs.) |
| 10. | Fertigungsstillstand | Entstehen hohe Kosten durch (geplante und ungeplante) Stillstandszeit von komplexen Produktionsanlagen? (Z. B. Technologie zur Überbrückung von Zeiten der Markteinführung, bis die Marktdurchsetzung den Einsatz von Produktionssystemen mit höheren Werkzeugkosten erfordert.) |
| 11. | Werkstoff | Erfordert ein Bauteil den Einsatz teurer oder konventionell schwer zu verarbeitender Werkstoffe? |
| 12. | Ersatzteile | Besteht dezentraler Ersatzteilbedarf? (Z. B. Ersatzteilbereitstellung für ältere Kleinserienfahrzeuge) |
| 13. | Zerspanungsgrad | Besteht ein hoher Zerspanungsgrad bei konventioneller Konstruktion? |

Tabelle 3.2: Checkliste für den zweckmäßigen Einsatz von AM

3.7 Entwicklungsmethodik als Forschungsfeld im Bereich AM

In diesem Kapitel werden verschiedene Forschungsrichtungen und Forschungsbestrebungen in der Entwicklungsmethodik für AM aufgezeigt. Ebenso wie die zuvor beschriebenen Potenzialfelder der additiven Fertigung, sind die Forschungsfelder hinsichtlich der Nutzung additiver Fertigungsverfahren vielfältig und in unterschiedlichsten Bereichen der Technologieprozessketten, der Bauteilentwicklung und unterschiedlicher Anwendungsszenarien von AM angesiedelt. Einen Überblick über die verschiedenen Facetten der additiven Fertigung geben Standardwerke (vgl. hierzu bspw. [GEBHARDT16b; GIBSON15]). In Bezug auf die Entwicklungsmethodik für AM zeigen die Literaturanalysen von Yang und Zhao [YANG15], Thompson et al. [THOMPSON16], Kumke et al. [KUMKE16] und Pradel et al. [PRADEL18] den Stand der Forschung auf.

Die Literaturlauswertung von Pradel fasst die Forschungsaktivitäten im Hinblick auf die Entwicklung von AM-Bauteilen in elf gestaltungsbezogene und neun fertigungsbezogene Schwerpunkte zusammen [PRADEL18]. Insgesamt werden die aktuellen Forschungsgebiete aus 81 Veröffentlichungen synthetisiert und gemäß ihrem Fokus den verschiedenen Phasen der Produktentwicklung zugeordnet. Die Forschungsfelder und deren Zuordnung zu den Phasen sind in Bild 3.22 dargestellt.

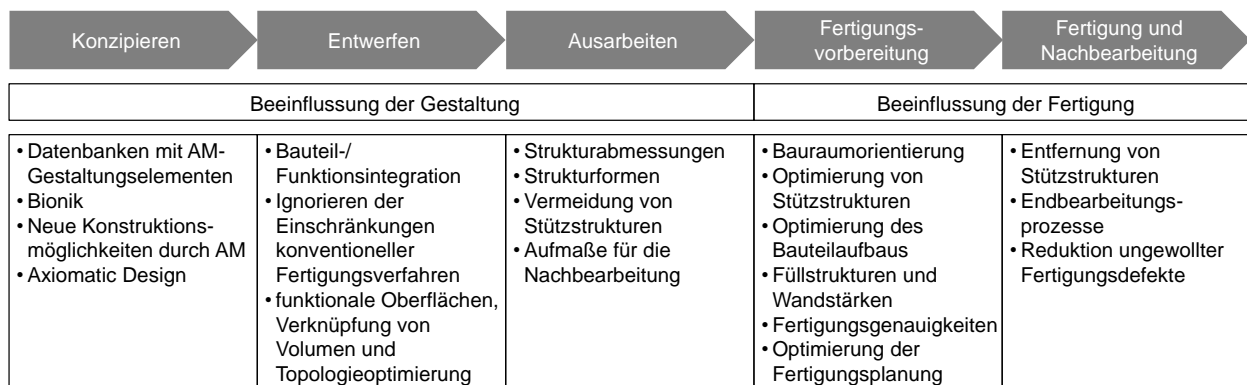


Bild 3.22: Forschungsfelder in der Entwicklung von AM-Bauteilen in Anlehnung an [PRADEL18, S. 311] aus dem Englischen

Die aufgeführten Forschungsfelder der Konzeptphase können der kreativen Lösungsfindung zugeordnet werden. Die Entwurfsphase wird hinsichtlich der Verbesserung von Konstruktionen unterstützt. In der Ausarbeitungsphase sind die aufgeführten Forschungsfelder technologiebezogen und gehen fließend in die Beeinflussung der Fertigung über. Das Konstruktionsvorgehen als solches ist in der Darstellung nicht enthalten. Verschiedene AM-spezifische Vorgehensmodelle, die ein solches abbilden, werden in Kapitel 3.10 vorgestellt. Im nachfolgenden Absatz erfolgt die Klärung des Begriffs „DfAM“.

Design for Additive Manufacturing (DfAM)

Entwicklungsprozesse und -methoden, welche speziell für den Nutzungskontext der additiven Fertigungsverfahren entwickelt wurden, werden häufig unter dem Begriff Design for Additive Manufacturing (DfAM) zusammengefasst. Die Hauptzielsetzung des DfAM ist die Gestaltung für additive Fertigungsverfahren. Wie bei anderen DfX-Kriterien üblich, kann auch von der „Gerechtigkeit“ für additive Fertigungsverfahren gesprochen werden. Der Ausdruck „Design for Additive Manufacturing“ wird in der Literatur extensiv genutzt, wobei es nur wenige Bemühungen gibt, ihn zu definieren [THOMPSON16, S. 740]. Nach der Definition von Gibson et al. ist das Ziel des DfAM die „Maximierung der Produktleistung durch die Synthese von Formen, Größen, hierarchischen Strukturen und Materialzusammensetzungen, innerhalb der Möglichkeiten von AM-Technologien“ [GIBSON15, S. 411]. Rosen gibt eine ähnliche Definition, allerdings mit dem Ziel der „bestmöglichen Nutzung der Möglichkeiten des Fertigungsprozesses, um die gewünschte Produktleistung und andere Lebenszyklusziele zu erreichen“ [ROSEN07b, S. 403]. Ähnlich den beiden genannten Definitionen soll in der vorliegenden Dissertation das DfAM als die Optimierung der Bauteilgestalt innerhalb der Möglichkeiten der genutzten additiven Fertigungsverfahren verstanden werden. Methoden, Werkzeuge und Entwicklungsprozesse,

die bei der Gestaltung additiv gefertigter Bauteile Verwendung finden, sind demnach nicht im Begriff des DfAM enthalten, sondern dienen zu dessen Unterstützung.

3.8 Produktvorteil von AM durch geänderte / geringere Konstruktionsrestriktionen

Innerhalb der zweckmäßigen Einsatzfelder von AM (Kapitel 3.6 – Unterkapitel Potenzialfelder der additiven Fertigung) kann zwischen strategischen, technologischen und konstruktiven Potenzialen unterschieden werden. Dem konstruktiven Potenzial lässt sich der Leichtbau, die konstruktive Freiheit und die Montage zuordnen. Auch wenn additive Fertigungsverfahren durch den 2½D-Aufbau einigen Konstruktionsrestriktionen unterliegt (siehe Kapitel 3.5), bieten sie eine große gestalterische Freiheit. Sofern keine Stützstrukturen erforderlich sind, ergeben sich durch den additiven Aufbaumechanismus nur wenige gestalterische Beschränkungen. „Der schichtweise Aufbau eliminiert prinzipiell Einschränkungen konventioneller Verfahren, wie zum Beispiel die Zugänglichkeit für abtragende Werkzeuge oder die Entnehmbarkeit aus einer Form“ [ACATECH16, S. 42]. Die funktions- und montagegerechte Konstruktion steht daher im Gegensatz zu konventionellen Fertigungsverfahren mehr im Vordergrund als die fertigungsgerechte Gestaltung [WEGNER12, S. 254].

AM ermöglicht die Realisierung von Freiformgeometrien, wie sie in bionischen oder topologisch optimierten Strukturen vorkommen, und kann genutzt werden, um durch Bauteil- und Funktionsintegration den Montageaufwand zu reduzieren.

Es lassen sich Hinterschnitte und große Aspektverhältnisse (Verhältnis der größten zur kleinsten Ausdehnung eines Bauteils) realisieren, was beispielsweise die Integration von Waben-, Sandwich- oder Gitterstrukturen in Bauteile ermöglicht. Diese Strukturen werden auch als Mesostrukturen bezeichnet. Darunter werden Geometrien mit Abmaßen im Millimeterbereich verstanden [ROSEN07a, S. 585].

Die verschiedenen Türme in Bild 3.23 zeigen die Möglichkeiten der Gestaltung mit Hinterschnitten. Im Inneren der Türme lassen sich eine Wendeltreppe und eine Doppelhelix integrieren.



Bild 3.23: Hinterschnitte in FDM, SL und LS nach [FORMLABS18]

In Bild 3.24 ist die mögliche Ausnutzung der Gestaltungsfreiheit anhand eines topologieoptimierten, luftgekühlten Kühlkörpers als CAD-Modell (links) und als mittels LBM gefertigtes Bauteil aus AlSi12 (rechts) dargestellt. Das Bauteil besteht ausschließlich aus Freiformgeometrien und wäre mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht fertigbar.

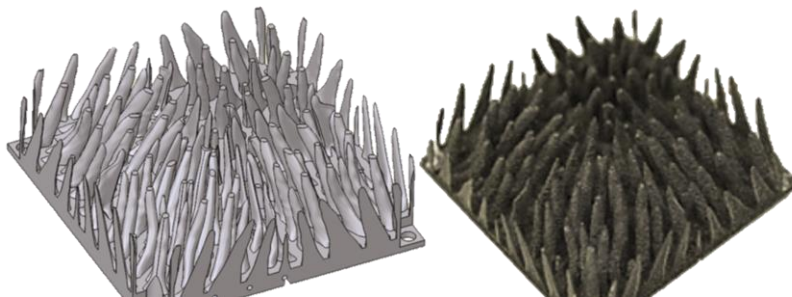


Bild 3.24: Luftgekühlter Kühlkörper aus AlSi12 nach [DEDE15, S. 5]

In Bild 3.25 ist die Möglichkeit der Fertigung großer Aspektverhältnisse mittels LBM anhand von Stabelementen unterschiedlicher Durchmesser dargestellt. Die Stabelemente wurden aus TiAl6V4 gefertigt und weisen ein Aspektverhältnis von bis zu 80 mm / 0,5 mm) auf.

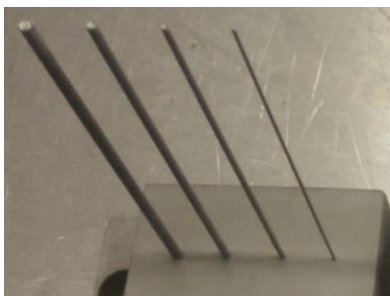


Bild 3.25: Probekörper mit großen Aspektverhältnissen nach [KRANZ17, S. 71]

3.8.1 Produktvorteile durch konstruktive Freiheit zum Leichtbau

Bei additiven Fertigungsverfahren besteht im Gegensatz zu konventionellen Verfahren nur eine geringe Abhängigkeit zwischen der Komplexität von Bauteilen und den Herstellkosten (siehe Kapitel 3.3). Die Herstellkosten werden neben der Beeinflussung durch weitere Faktoren, wie beispielsweise dem Aufwand für die Nachbearbeitung, maßgeblich vom benötigten Bauraum in der Fertigungsanlage und dem Volumen der Bauteile bestimmt. Je weniger Material verbaut wird, desto geringer auch die Herstellkosten. Diese Randbedingungen führen zu einer obligatorischen Massereduktion der Bauteile. Die geringen Konstruktionsrestriktionen ermöglichen zudem die einfache Fertigung leichtbaugerechter Strukturen. Ein Einsatzfeld der additiven Fertigung bei dem der Zusammenhang zwischen Kosten und Masse als Vorteil zum Tragen kommt, sind Leichtbauprodukte für die Luft- und Raumfahrt. Beispiel für ein additiv gefertigtes Endprodukt, bei dem die Umsetzung eines Produktvorteils durch Gewichtseinsparung gelungen ist, ist der in Bild 3.26 gezeigte Kabinenhalter der Crew Rest Compartments im Airbus A350 XWB [WOHLERS15, S. 187].



Bild 3.26: Optimierter Kabinenhalter nach [KRANZ17, S. 237] und [BAUER16, S. 9]

Die bereits zuvor beschriebene Möglichkeit der Fertigung von Hinterschnitten kann genutzt werden, um hohle, nahezu vollständig geschlossene Strukturen herzustellen, die eine lastoptimierte Geometrie darstellen. So können für Biege- und Torsionsbelastungen optimierte Strukturen mit einem hohen Materialnutzungsgrad gefertigt werden. Im Beispiel einer Strukturoptimierung einer Fünfsterntretkurbel für ein Fahrrad wurde dies genutzt, um die Tretkurbel hohl zu gestalten und zusätzlich mit innenliegenden Fachwerkstrukturen zu versteifen [BRÜGGEMANN17, S. 56].



Bild 3.27: Optimierte Fahrradtrittkurbel für AM nach [BRÜGGEMANN17, S. 50, 56]

Der Aufbauprozess von AM ermöglicht die Kombination von optimierten Makro- und Mesostrukturen in einem Bauteil, wie z. B. durch periodische Gitterstrukturen [THOMPSON16, S. 744].

Gitterstrukturen stellen in Bezug auf die Festigkeit für einen einzelnen, definierten Lastfall allerdings nicht immer eine gute Lösung dar, da sich für diese Strukturgrößen der Einfluss der schlechten Oberflächenrauheit, von Mikrorissen und von Fehlstellen auf die spezifische Festigkeit auswirkt [NOVIELLO16, S. 8 ff.]. Auch die Ausrichtung der Gitterstäbe kann bei einem periodischen Aufbau nicht im kompletten Bauteil der optimalen Richtung der Kraftleitung entsprechen. Dennoch können gradierte Gitterstrukturen und die Kombination verschiedener Gitterstrukturen bei komplexeren und zusammengesetzten Bauteilbeanspruchungen vorteilhaft sein [JOSUPEIT16, S. 2082].

3.8.2 Produktvorteile durch konstruktive Freiheit zur Funktionsintegration

Maßgeblich für eine AM-gerechte Gestaltung ist die Funktionsintegration. Der Begriff der Funktion ist in Richtlinie VDI 2221 als „allgemeiner und gewollter Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen“ definiert [VDI 2221-1, 2018, S. 4]. Er wird in Gesamt- und Teilfunktionen unterschieden (vgl. [VDI 2221-1, 2018, S. 19]). Die Funktionen eines Bauteils lassen sich „so aufgliedern, dass die unterste Ebene der Funktionsstruktur nur aus Funktionen besteht, die sich hinsichtlich allgemeiner Anwendbarkeit nicht weiter unterteilen lassen [PAHL07, S. 47].“ Nach Roth sind beispielsweise die allgemeinen Funktionen Speichern, Leiten, Umformen, Wandeln und Verknüpfen zu unterscheiden [ROTH00a].

Durch die gegebene Gestaltungsfreiheit von AM ist es möglich, verschiedenste Funktionen in einem Bauteil zu integrieren und somit die Anzahl der Bauteile, die notwendigen Montageoperationen und die Summe der anfallenden Kosten zu reduzieren [YANG15, S. 329 ff.].

Im Gegensatz zum Funktionsbegriff ist der Begriff der Funktionsintegration, welcher in der Literatur in unterschiedlichstem Kontext genutzt wird, in Richtlinien nicht näher spezifiziert. Er wird in der Literatur oftmals synonym zu Integralbauweise, integrierte Bauweise oder integrale Funktionsausnutzung verwendet und beinhaltet dann nicht nur Funktionen der Definition nach der Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221-1, 2018], sondern auch Aspekte der Bauteilintegration / -vereinigung. Von Roth wird die Funktionsintegration beschrieben als „die Vereinigung verschiedener Funktionsträger zu einem Wirkraum, einer Wirkfläche, zwecks Verbilligung der Fertigung, so dass die von ihnen ausgehenden Funktionen erhalten bleiben und die dabei gegebenenfalls auftretenden Störfunktionen in erträglichen Grenzen bleiben“ [ROTH00a, S. 412 f.]. Der angeführte Hauptgrund für eine Funktionsintegration ist die Kostenersparnis bei der Fertigung. Dieser Aspekt kann auch im Kontext der additiven Fertigungsverfahren als Hauptmotiv zur Funktionsintegration angesehen werden, da hier die Komplexität der Bauteile von den Kosten entkoppelt ist.

In der vorliegenden Arbeit wird für den Kontext des AM die Definition von Roth verwendet, allerdings mit dem Zusatz, dass durch die Funktionsintegration der Funktionsumfang auch erweitert werden kann.

Da sich additive Fertigungsverfahren durch geringere erzielbare Genauigkeiten, dafür aber durch eine höhere wirtschaftlich realisierbare Bauteilkomplexität auszeichnen als konventionelle Fertigungsverfahren, wie beispielsweise Guss- oder Zerspanungsverfahren, unterscheiden sich die geeigneten Lösungsprinzipien zur Erfüllung der Funktionen häufig (vgl. [KLAHN18, S. 122]). Oftmals ist eine gute Konstruktion für AM daher mit der Nutzung angepasster Lösungsprinzipien verbunden. Durch AM lassen sich zwar die möglichen physikalischen Effekte, die durch technische Bauteile umgesetzt werden können, im Allgemeinen nicht ändern, dennoch können die hohe geometrische und stoffliche Komplexität genutzt werden, um Lösungsprinzipien umzusetzen, die zu einem hohen Maß an Funktions- und Bauteilintegration führen. Durch eine angepasste Gestalt können die einzelnen Funktionselemente eines Bauteils derart ausgeführt werden, dass verfahrensspezifische Einschränkungen umgangen werden und die Gesamtfunktion des Bauteils gegeben ist.

Als ein Ansatz zur Funktionsintegration ist beispielhaft die „Strategie der einteiligen Maschine“ nach Ehrlenspiel und Meerkamm zu nennen [EHRLENSPIEL17, S. 604 f.]. Das Vorgehen der Autoren ist unabhängig von der Fertigungstechnologie anwendbar, also auch bei AM. Es wird zunächst gedanklich davon ausgegangen, dass die zu entwickelnde Ma-

schine nur aus einem Teil besteht. Dieses wird anschließend nach vordefinierten Gesichtspunkten stufenweise durch Auftrennen wieder in die „minimal notwendige Teilezahl“ zerlegt. Die einteilige Maschine umfasst auch bewegte Teile oder Montagetreppenstellen. „Alles ist ein Teil, selbst wenn es verrückt anmutet“ [EHRENSPIEL17, S. 604]. Es existieren noch zahlreiche weitere Ansätze zu Funktionsintegration, über die beispielsweise Ziebart in [ZIEBART12, S. 15 ff.] einen Überblick gibt und die an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden sollen.

Schumacher et al. nutzen den Funktionsbegriff zur Definition verschiedener Stufen der Umsetzung von AM nach der Ausnutzung der AM-spezifischen Potenziale (siehe Bild 3.28) [SCHUMACHER17].

| Stufe 1: Substitution | Stufe 2: AM-Konstruktion | Stufe 3: AM-Konzeption |
|--|---|--|
| <p><u>Vorgehen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Gleichbleibende Gestalt durch AM fertigen <p><u>Potenziale:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Werkzeuglose Fertigung, Zeiteinsparung | <p><u>Vorgehen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • AM-optimierte Anpassung der Gestalt (z. B. Topologieoptimierung, Vereinigung von Bauteilen) <p><u>Potenziale:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Gewicht, Bauraum, mechanische Eigenschaften, Montageerleichterung | <p><u>Vorgehen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Realisierung neuer Funktionen oder neuer Lösungen bestehender Funktionen <p><u>Potenziale:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Neue Funktionen, neue gestalterische Lösungen für bestehende Funktionen |

Ausnutzung AM-spezifischer Potenziale

Bild 3.28: Umsetzungsstufen von Additive Manufacturing in der Automobilindustrie in Anlehnung an [SCHUMACHER17, S. 132]

- Als erste Stufe wird die reine Substitution der Fertigungstechnologie mit AM beschrieben. Es entstehen neben möglichen technologiebezogenen Vorteilen keine weiteren Potenziale durch eine Produktverbesserung.
- In der zweiten Stufe, der AM-Konstruktion, können Vorteile durch geänderte Produkteigenschaften generiert werden. [SCHUMACHER17, S. 132]

Dies entspricht zum Beispiel dem Produktvorteil durch Leichtbau im vorherigen Kapitel 3.8.1 oder dem Beispiel in Bild 3.29, das ein funktionsintegriertes Design eines Luftkanals in Militärflugzeugen zeigt. Zusätzlich zur Vermeidung von Montageoperationen und der damit einhergehenden Kostenreduktion ist hier eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit gelungen. Das Bauteil kann nicht konventionell gefertigt werden. [GIBSON15, S. 403]



Bild 3.29: Beispiel für funktionsintegriertes Design mit AM nach [GIBSON15, S. 404]

- In der dritten Stufe der Ausnutzung der AM-spezifischen Potenziale steht die AM-Konzeption. Durch Hinterfragen bestehender technischer Lösungen werden dabei neue Realisierungsmöglichkeiten für Funktionen und neue Bauteilfunktionen erarbeitet. [SCHUMACHER17, S. 132f.]

Ein Beispiel für Funktionsintegration der dritten Umsetzungsstufe ist die in Bild 3.30 gezeigte Mischdüse, bei der gezielt eine Porosität in die Wandung eingebracht wurde und die in einem Stück gefertigt wird. Die Flüssigkeit vermischt sich im Bereich der porösen Struktur mit einem zugeführten Gas und das Gemisch strömt durch den nachfolgenden Diffusor wieder aus.

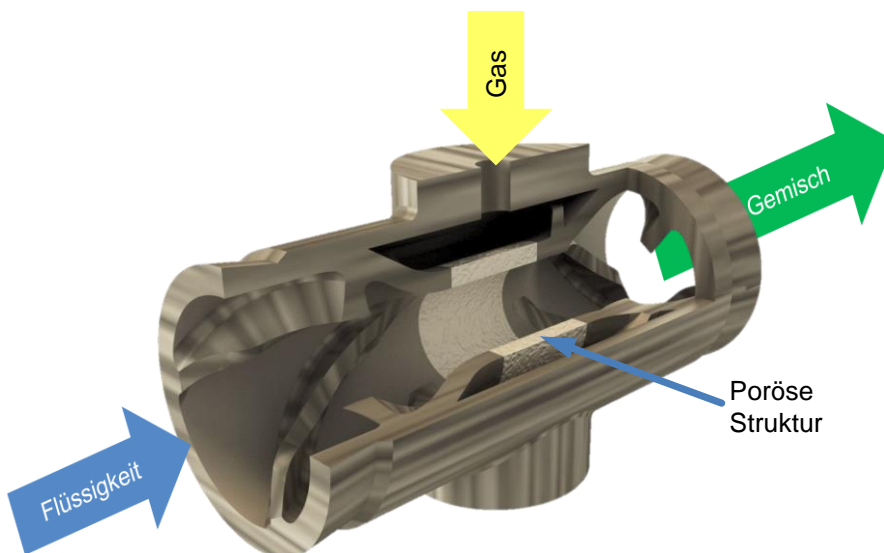


Bild 3.30: Mischdüse mit integrierter Porosität nach [REINEMUTH17]

Ein weiteres Beispiel für ein funktionsintegriertes Bauteil stellt der Ölkühler in Bild 3.31 dar. Die wärmeübertragenden Fluide strömen durch einen Hüllkörper, der sowohl mit versteifenden Mesostrukturen versehen ist als auch mit einer gewichtsoptimierten Anbindestruktur.

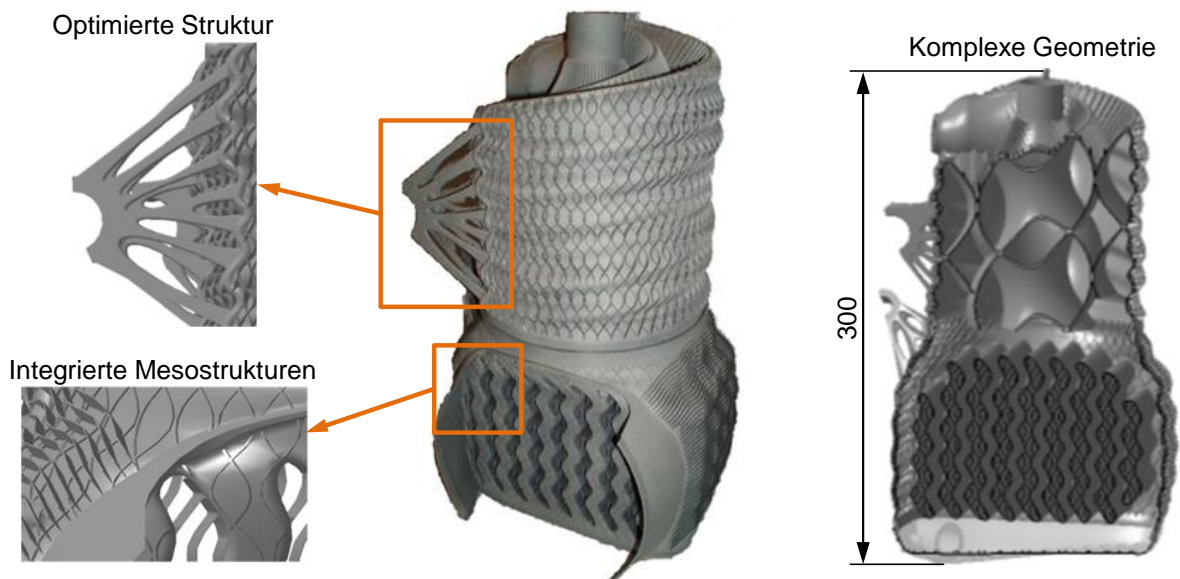


Bild 3.31: Funktionsintegrierter Ölkühler mit optimierter Tragstruktur und integrierter Mesostruktur nach [Löw17, S. 17]

3.8.3 Checkliste AM-gerechte Gestaltung

Um der Zielsetzung eines DfAM zu entsprechen und eine AM-gerechte Konstruktion zu erzielen, sind vielfältige Randbedingungen zu beachten, Gestaltungsmöglichkeiten auszuschöpfen, Tätigkeiten auszuführen und verschiedene Merkmale des Bauteils zu realisieren. Da die Merkmale eines DfAM auf Bauteilebene umzusetzen sind, unterscheiden sie sich von den zuvor dargestellten Potenzialfeldern der additiven Fertigung (Kapitel 3.6), welche zweckmäßige Einsatzszenarien von AM aus einer übergeordneten Planungssicht beschreiben. Die Merkmale können konkreter als die Potenzialfelder formuliert werden. Die wichtigsten Merkmale eines DfAM sind in der Checkliste in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Sie kann bei der Entwicklung von AM-Bauteilen genutzt werden, um eine AM-gerechte Konstruktion zu erzielen. Die Inhalte bauen auf der Studienarbeit von Schüler auf [SCHÜLER17], welche vom Verfasser dieser Dissertation betreut wurde. Sie wurden vom Verfasser der vorliegenden Arbeit in mehreren Iterationsschleifen angepasst und dabei auf eine Liste mit 18 Ausgangsfragen auf die hier dargestellten 10 Fragen reduziert. Die 10 erfragten Merkmale mit ihren zugehörigen Unterpunkten wurden so gewählt, dass trotz der hohen Interaktion der verschiedenen Bestandteile eines DfAM eine möglichst scharfe Trennung der Merkmale möglich ist. Die Reihenfolge der Merkmale entspricht ihrer Relevanz für ein DfAM und wurde über einen paarweisen Vergleich ermittelt. Sie spiegelt nicht die Reihenfolge der Bearbeitung / Erfüllung der enthaltenen Merkmale während des Entwicklungsvorgehens wider.

| | <u>Frage (Merkmal)</u> | <u>Beschreibung Konstruktionsaspekt / Handlungsmaßnahmen</u> |
|----|--|--|
| 1. | Sind das additive Fertigungsverfahren und der Werkstoff des Bauteils definiert? | <p>AM ermöglicht prinzipiell ein großes Spektrum verfügbarer Materialien. Das Angebot der Materialien ist allerdings aufgrund des hohen Aufwands zur Umrüstung und durch die Notwendigkeit werkstoffspezifisch angepasster Prozessparameter eingeschränkt.</p> <p>Die Konstruktion sollte unter Beachtung des Materials erfolgen. Die Bauteileigenschaften werden z. B. durch die Dichte und die Verteilung der Porosität beeinflusst.</p> <p>Vor allem die Integration mehrerer Funktionen innerhalb eines Bauteils erfordert eine konstruktive Anpassung der Funktionselemente an den gewählten Werkstoff.</p> |
| 2. | Wurde Bauteil- / Funktionsintegration betrieben und die Gestaltungsfreiheit von AM ausgenutzt? | <p>Die Gestaltungsfreiheit lässt die Vereinigung mehrerer Bauteile zu einem Bauteil zu. Es können dadurch Montageoperationen reduziert und Bauteileigenschaften verbessert werden.</p> <p>Die Gestaltungsfreiheit additiver Fertigungsverfahren lässt die Integration zusätzlicher Funktionen zu und kann dadurch einen Mehrwert schaffen.</p> |
| 3. | Ist der Bauraum der AM-Anlage ausreichend? | <p>Die Bauteilgröße kann durch z. B. räumliche Variation der Funktionselemente des Bauteils reduziert werden.</p> <p>Funktionselemente können getrennt und durch bewegliche Verbindungselemente kann die einfache Montage ermöglicht werden.</p> <p>Bauteile können in Einzelteile zerlegt und separat gefertigt werden.</p> |
| 4. | Ist die Bauraumorientierung festgelegt und konstruktiv beachtet? | <p>Die Bauteilstabilität / Notwendigkeit zusätzlicher Stützstrukturen während der Fertigung hängt von der Orientierung im Bauraum ab. → Möglichst wenig Flächen unterhalb des kritischen Überhangwinkels orientieren.</p> <p>Bei pulverbettbasierten Verfahren sind größere Abmaße in Aufbaurichtung zu vermeiden, da sie zu längeren Fertigungszeiten und somit höheren Kosten führen.</p> <p>Der schichtweise Aufbau führt zu anisotropem Materialverhalten. Die Hauptlastrichtung der Bauteile sollte daher in der Ebene der Schichten verlaufen und nicht in Aufbaurichtung.</p> <p>Die Schicht- und Bahnapproximation des Bauteils ist maßgeblich von der Orientierung im Bauraum beeinflusst. Der entstehende Treppenstufeneffekt beeinflusst auch die Oberflächengüten.</p> |
| 5. | Sind zusätzliche Stützstrukturen konstruktiv vermieden? – Ist die Bauteilstabilität während der Fertigung gewährleistet? | <p>Bei einigen AM-Verfahren sind Zwischenzustände der Bauteile bei der Fertigung nicht ausreichend stabil und es sind zusätzliche Stützstrukturen notwendig. Diese Stützstrukturen wirken der Schwerkraft und thermisch induzierten Eigenspannungen entgegen, befestigen das Bauteil auf der Bauplattform und leiten Wärme vom Bauteil ab. Stützstrukturen können konstruktiv vermieden werden.</p> <p>Die Notwendigkeit von Stützmaterial ist maßgeblich von der Bauraumorientierung (Punkt 4) abhängig.</p> <p>Überhänge können selbsttragend gestaltet werden. → Kritischen Überhangwinkel nicht unterschreiten.</p> |
| 6. | Sind die Konstruktionsrestriktionen beachtet? | <p>Minimal fertigbare Geometrieabmessungen sind einzuhalten, wie z. B. Wandstärken und Außenradien oder Spaltmaße und Innenradien.</p> <p>Maximal fertigbare Geometrieabmessungen sind einzuhalten, wie z. B. Wandstärken und Innenradien.</p> |

| | | |
|-----|---|---|
| 7. | Sind Nachbearbeitungsschritte konstruktiv einbezogen? | Nachbearbeitungsschritte können konstruktiv vermieden werden. |
| | | Für die Entfernung von Stützmaterialien sind ausreichende Öffnungen an Hohlräumen vorzusehen und die Zugänglichkeit zur Entfernung zu gewährleisten. |
| | | Durch spanende Nachbearbeitung lassen sich höhere Genauigkeiten z. B. an Funktionsflächen erzielen. Die Nachbearbeitung ist konstruktiv einzubeziehen und es sind dafür bspw. Spannmöglichkeiten vorzusehen. |
| | | Oberflächengüten und Materialeigenschaften können in der Nachbehandlung verbessert werden. Die Handhabung des Bauteils ist hierbei konstruktiv einzubeziehen. |
| 8. | Wurde das Bauteil im Sinne von Leichtbau optimiert? | Optimierte Leichtbaugeometrien mit Freiformflächen lassen sich bei AM ohne erhöhten Mehraufwand fertigen und tragen zu einem verbesserten Bauteilverhalten bei. |
| | | Die Masse der Bauteile sollte reduziert werden, da sie direkt mit der Fertigungszeit und den Herstellkosten verknüpft ist. |
| 9. | Wurden Approximationsfehler konstruktiv beachtet? | Die Schichtapproximation führt abhängig vom Überhangwinkel zu einem Treppenstufeneffekt . Ihr Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit sollte beachtet werden. |
| | | Die Schichtapproximation lässt nur die Fertigung diskreter Werte zu und sollte konstruktiv beachtet werden. |
| | | Die Bahnapproximation lässt (bei kleinen Abmessungen) nur die Fertigung diskreter Werte zu und sollte konstruktiv beachtet werden. |
| 10. | Wurde die positionsabhängige Maßhaltigkeit konstruktiv beachtet? | Die Fertigungsgenauigkeit ist von der Position im Bauraum und der Orientierungsrichtung abhängig. Tendenziell sind äußere Bereiche ungenauer als innere Bereiche. Bei großen Bauteilen ist dies konstruktiv zu beachten. |

Tabelle 3.3: Checkliste zur AM-gerechten Gestaltung

3.9 Informationssysteme zur Unterstützung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile

Wie in Kapitel 2.5 ausgeführt, können die Arbeitsvorgänge bei der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile durch die Bereitstellung von Informationen unterstützt werden.

Von Kirchner [KIRCHNER11] und Bin Maidin [BIN MAIDIN11] werden Informationssysteme zur Unterstützung von AM-Entwicklungen beschrieben.

Durch das von Kirchner entwickelte Informationssystem wird der effiziente Einsatz generativer Fertigungsverfahren zur Prototypenfertigung im Produktentwicklungsprozess unterstützt [KIRCHNER11]. Hierbei liegt der Fokus auf der Nutzung additiver Fertigungstechnologien zur Herstellung von Prototypen und der Nutzung der auf diese Weise hergestellten Prototypen entlang des Entwicklungsprozesses. Die angepasste Gestaltung für additive Fertigungsverfahren wird aufgrund der Nutzung der Technologien für die Herstellung von Prototypen nicht genauer untersucht. Die bereitgestellten Informationen sollen vor allem die „Auswahl einer am besten geeigneten Anlage für den Rapid-

Prototyping-Einsatz im Produktentwicklungsprozess (PEP), die Beschaffung und Anwendung von RP-Bauteilen und die Konstruktion, Beschaffung und Einsatz von RP-Anlagen“ unterstützen [KIRCHNER11, S. 89]. Die mögliche Anwendung des Informationssystems wird an drei Fallstudien aufgezeigt. Eine prozessuale Betrachtung der Unterstützung findet nicht statt.

In Bezug auf die Gestaltung additiv gefertigter Bauteile definiert Bin Maidin in der „Design feature database to support design for additive manufacturing“ insgesamt 106 Gestaltungsmerkmale nach Vorbildern existierender additiv gefertigter Bauteile und ordnet diese, in Abhängigkeit ihrer möglichen Anwendung, Gründen zur Nutzung additiver Fertigungsverfahren zu [BIN MAIDIN11]. Hierzu erarbeitet Bin Maidin ein Klassifikationschema bestehend aus vier Gründen zur Nutzung der Verfahren (Individualisierung, Funktionsverbesserung, Bauteilintegration und Ästhetik). Zur Verbesserung der Funktionalität durch geänderte Oberflächenreibung werden beispielsweise die Gestaltungsmerkmale einer texturierten Oberfläche, einer kreisförmigen Anordnung kleinerer Oberflächenelemente und die Strukturierung der Oberfläche als Wabenstruktur genannt [BIN MAIDIN11, S. 310]. Die einzelnen Gestaltungsmerkmale sind durch wenige Bilder illustriert und die zugehörigen Quellen angegeben. Der Grund, warum diese Gestaltungsmerkmale die Funktionalitäten der Bauteile verbessern sollen, wird dabei nicht ausgeführt und die Auswahl sowie die Systematik der Gestaltungsmerkmale werden nicht näher erläutert. Für das genannte Beispiel der Oberflächengestaltung als Wabenstruktur lassen die Beschreibung und auch die Primärquelle inhaltlich nicht erkennen, ob hierdurch mit einer Erhöhung oder Herabsetzung des Reibkoeffizienten zu rechnen ist oder ob die Kraftleitung über den Reibkontakt hierdurch überhaupt beeinflusst wird. Die exakte Beschreibung der Funktionsweise von AM-gerechten Gestaltungsmerkmalen durch die Liste der 106 Gestaltungsmerkmale wird in dem Ansatz von Bin Maidin [BIN MAIDIN11] allerdings auch nicht angestrebt. Die definierten Merkmale dienen viel mehr zur Inspiration im Kontext von Konstruktionen für additive Fertigungsverfahren.

3.10 AM-spezifische Beschreibungen von Entwicklungsprozessen

Das Entwicklungsvorgehen für additiv gefertigte Bauteile hat gemäß den unterschiedlichen Potenzialfeldern der Nutzung der Verfahren viele Facetten. Dem jeweiligen Einsatzfeld entsprechend unterscheiden sich die Prozessbeschreibungen auch in ihrem Umfang und ihrem Fokus. Es finden sich daher in der Literatur Prozessbeschreibungen unter-

schiedlicher Detaillierungstiefe. Teilweise orientieren sich die Beschreibungen an bestehenden Modellen der Produktentwicklung, teilweise decken sie nur Teilbereiche des Entwicklungsvorgehens nach Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221-1, 2018] ab oder vertiefen dieses partiell. Im Folgenden werden einige AM-spezifische Prozessbeschreibungen vorgestellt, wobei zwischen Prozessen unterschieden wird, die nur Teile des Entwicklungsvorgehens nach Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221-1, 2018] abdecken, und solchen, die alle vier Phasen der Produktentwicklung umfassen (siehe Kapitel 2.2).

3.10.1 Teilprozesse der Entwicklung von AM-Bauteilen

Beispielhaft für die Beschreibung von Teilbereichen der AM-Produktentwicklung werden nachfolgend sechs Prozesse vorgestellt, wobei die beiden Prozesse nach Yang und Zhao [YANG15] und Leutenecker-Twelsiek et al. [LEUTENECKER-TWELSIEK16] genauer erläutert werden:

Yang und Zhao beschreiben die Prozessdarstellung nach Bild 3.32 als eine durch AM ermöglichte Entwicklungsmethode, welche von ihrem Umfang her als Überarbeitung einer bestehenden Konstruktion mittels einer Optimierungsschleife im Kontext von AM angesehen werden kann [YANG15, S. 338 f.].

Zunächst wird ausgehend von einer Analyse eines bestehenden CAD-Modells Funktionsintegration betrieben, wobei Anforderungen an die Leistung und die Funktionen einbezogen werden. Im zweiten Schritt werden Methoden zur Strukturoptimierung angewandt, um bessere Leichtbau- und Wärmeleitungseigenschaften sowie dynamische Eigenschaften zu erreichen. Die beiden Schritte müssen die Prozessrestriktionen, bestehend aus den Fertigungs-, Montage- und Standardisierungsrestriktionen, einhalten. Die so entstehenden Lösungen werden überprüft und gegebenenfalls die Schleife noch einmal durchlaufen. [YANG15, S. 338 f.]

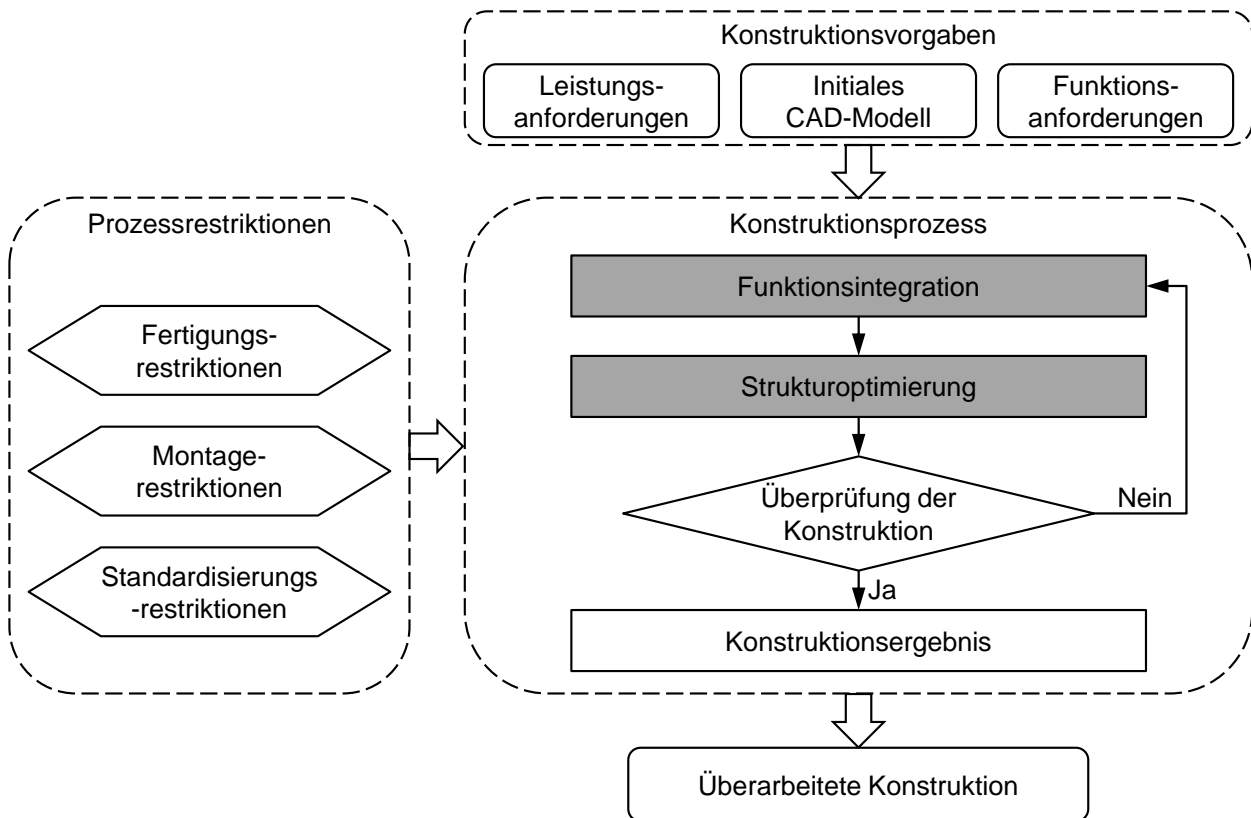


Bild 3.32: Vorschlag einer durch AM ermöglichten Entwicklungsmethode nach [YANG15, S. 339] aus dem Englischen

An der Prozessbeschreibung ist zu monieren, dass die Darstellung durch Hervorheben der Relevanz der Funktionsintegration zwar einen Fokus auf AM setzt, allerdings soweit abstrahiert ist, dass ihre Anwendung nicht nur auf diesen Kontext begrenzt ist. Fasst man die beiden Schritte Funktionsintegration und Strukturoptimierung als Operationen zusammen, erinnert die Darstellung an das TOTE-Schema (vgl. Kapitel 2.1) und vermittelt damit den Eindruck einer sehr unspezifischen Beschreibung.

Leutenecker-Twelsiek et al. schlagen den in Bild 3.33 dargestellten Prozess zur frühzeitigen Bestimmung der Bauteilorientierung vor, bei dem ein Gestaltungskonzept in verschiedene Gestaltungselemente zerlegt wird und diese separat analysiert werden [LEUTENECKER-TWELSIEK16, S. 410].

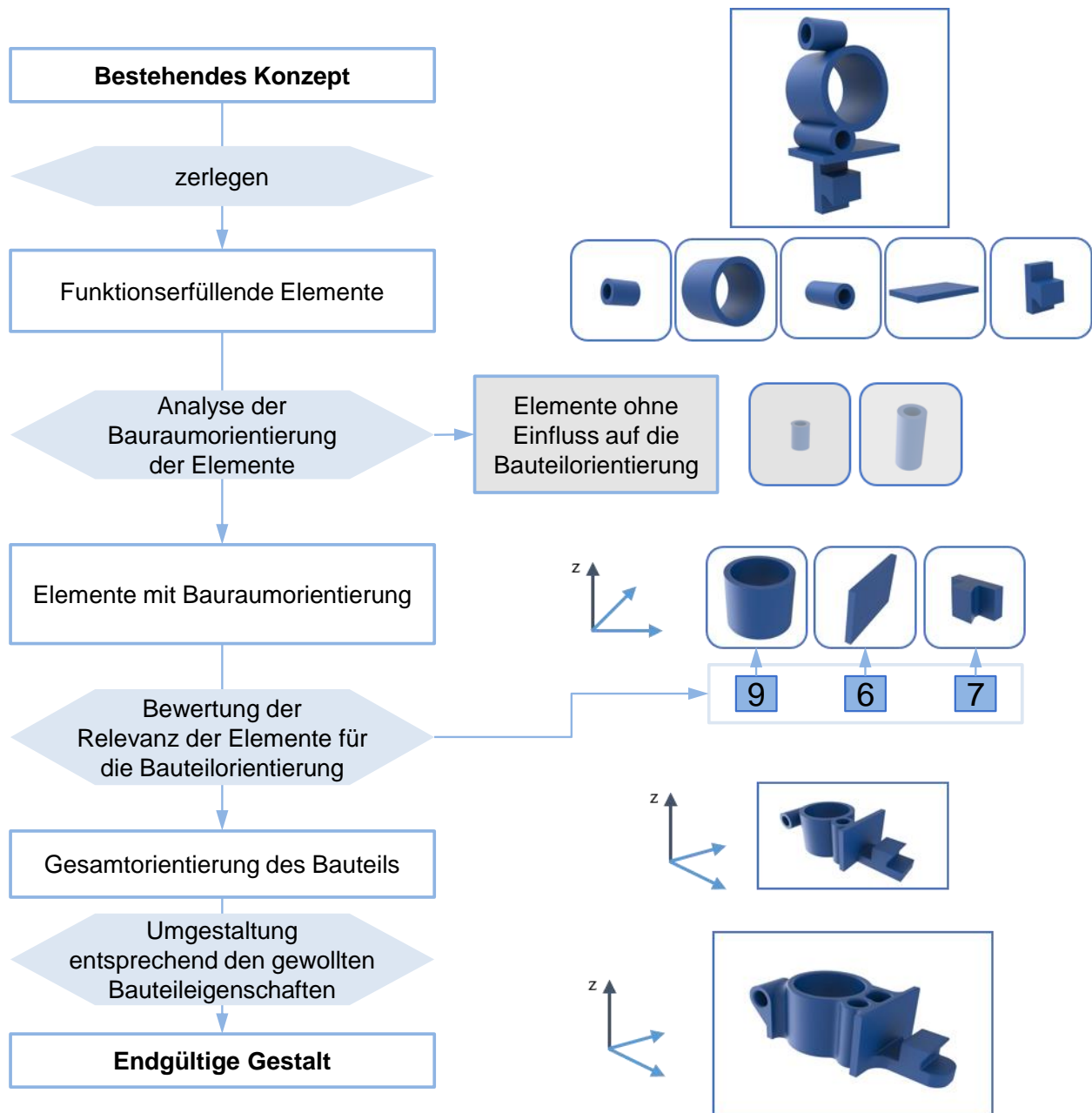


Bild 3.33: Prozess zur frühzeitigen Bestimmung der Bauteilorientierung nach [LEUTENECKER-TWELSIEK16, S. 411] aus dem Englischen

Im ersten Schritt des Vorgehens wird ein bestehendes Konzept in seine einzelnen funktionserfüllenden Elemente zerlegt. Anschließend wird überprüft, ob die gewünschten Eigenschaften der Elemente durch ihre Orientierung zur Aufbaurichtung beeinflusst werden. Für die Elemente, die einen Zusammenhang mit der Bauraumorientierung aufweisen, wird deren optimale Ausrichtung bestimmt. Da die so gewonnenen anzustrebenden Orientierungen im Gegensatz zueinander stehen können, werden sie jeweils priorisiert. Aus den Einzelorientierungen der funktionserfüllenden Elemente wird die Gesamtorientierung abgeleitet. Hierbei kann auch eine Umgestaltung einzelner Elemente erfolgen. [LEUTENECKER-TWELSIEK16, S. 410 f.]

AM-spezifische Beschreibungen von Teilprozessen der Produktentwicklung in der Literatur behandeln beispielsweise auch die folgenden Gestaltungsaspekte:

- Rodrigue et al. beschreiben einen einfachen Prozess zur Neugestaltung für AM in fünf Schritten. Aufbauend auf einer Problemdefinition erfolgt eine Funktionsintegration und anschließend eine Optimierung sowohl unter dem Gesichtspunkt des Bauteilversagens als auch der Nutzeranforderungen. [RODRIGUE11]
- Kranz stellt eine Methodik zur Optimierung bestehender Bauteile hinsichtlich leichtbautypischer Anforderungen vor [Kranz17]. Er beschreibt dazu ein Vorgehen, welches die Entwurfsphase der Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221, 1993] hervorhebt und verzichtet dagegen auf vorgelagerte Aktivitäten, wie beispielsweise die Erarbeitung einer Funktionsstruktur und die Modularisierung [KRANZ17, S. 168].
- Boyard et al. leiten aus den Bereichen Design for Assembly (DfA) und Design for Manufacturing (DfM) ein Design for Rapid Manufacturing (DfRM) ab [BOYARD13]. Aufbauend auf einer Funktionsanalyse teilen sie dazu das Vorgehen in die beiden genannten Teilbereiche auf. Die zwei Teilstränge werden parallel durchlaufen, wobei jeweils eine Überprüfung des Stands der Technik erfolgt. Anschließend werden die Ergebnisse wieder vereint und es entsteht ein fertigbares Produkt.
- Ponche et al. stellen einen Prozess zur Gestaltung von AM-Produkten unter Berücksichtigung der Aufbaurichtung vor. Aufbauend auf der Festlegung von Funktionsflächen werden Kraftleitungsvolumen zwischen diesen Funktionsflächen unter Veränderung der Aufbaurichtung systematisch variiert. [PONCHE12]

Die vorgestellten Prozessbeschreibungen, die Teilbereiche des Entwicklungsprozesses nach [VDI 2221-1, 2018] abdecken, zeigen die Vielfalt der möglichen Betrachtungen der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile auf. Sie unterstützen alle ein DfAM, legen dabei allerdings die Schwerpunkte unterschiedlich. Aufgrund der voneinander abweichenden Ebenen der Prozessbeschreibungen lassen sich die vorgestellten Prozesse nur partiell miteinander vergleichen oder miteinander verknüpfen und somit auch nicht zu einem Gesamtprozess kombinieren. AM-spezifische Beschreibungen von Entwicklungsprozessen, die alle vier Phasen der Produktentwicklung – von der Planung bis zur Ausarbeitung – (vgl. Kapitel 2.2) umfassen, werden im folgenden Kapitel 3.10.2 vorgestellt.

3.10.2 AM-Entwicklungsprozesse in Anlehnung an die VDI 2221

In der Literatur sind die AM-spezifischen Beschreibungen von Entwicklungsprozessen von Kumke et al. [KUMKE16], Zhu et al. [ZHU17] und Künneke et al. [KÜNNEKE18] bekannt,

die in ihrer Beschreibung hinsichtlich der Detaillierungstiefe und des Umfangs vergleichbar mit der Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221-1, 2018] sind.

In [KUMKE16] wird ein Rahmenwerk vorgestellt, das auf der Richtlinie VDI 2221 von 1993 [VDI 2221, 1993] aufbaut (siehe Bild 3.34).

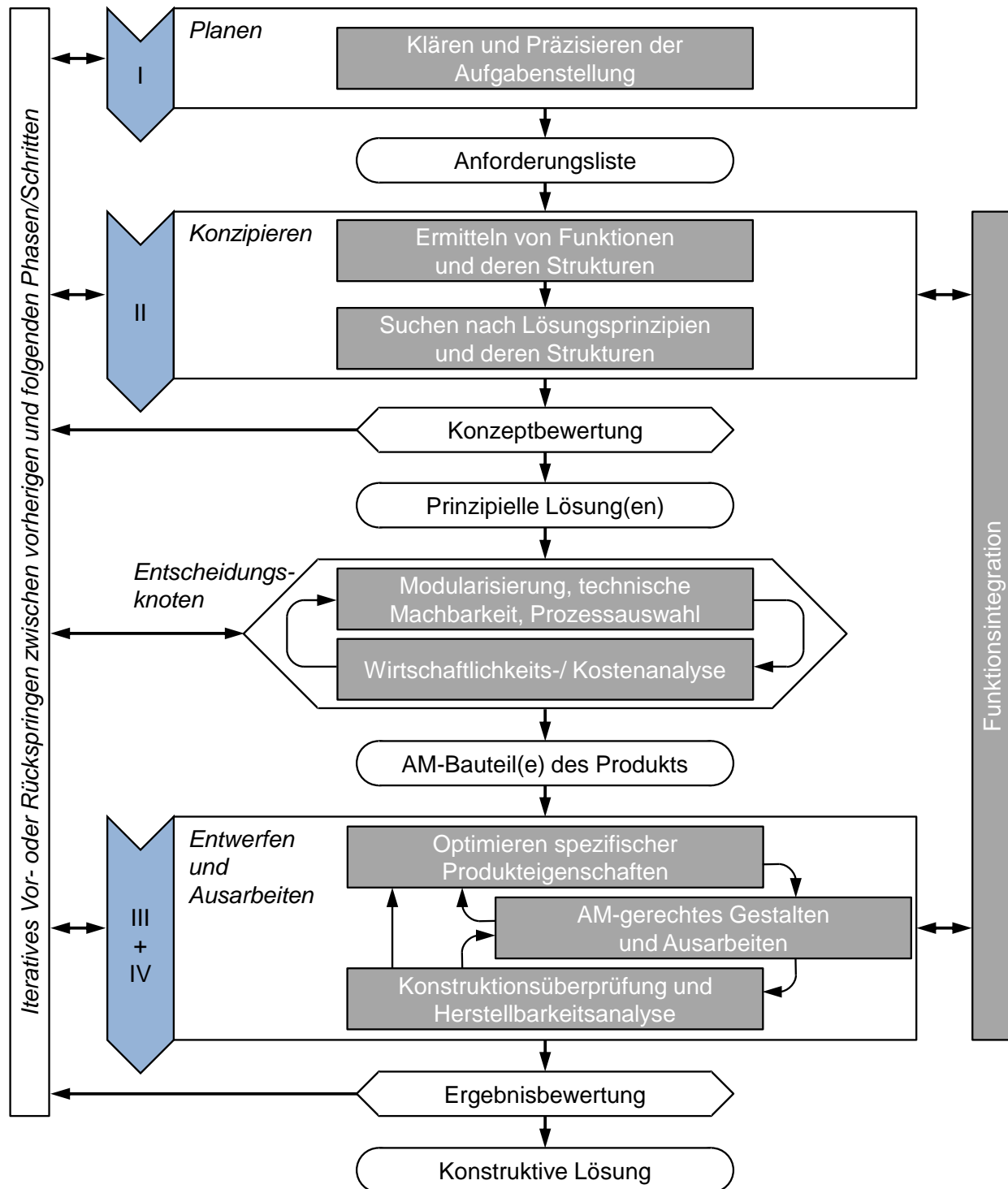


Bild 3.34: Vorgehensmodell zum DfAM nach [KUMKE18, S. 92] (in Anlehnung an [KUMKE16])

Das Rahmenwerk besteht aus Entscheidungs- und Anpassungsschleifen und ordnet Methoden und Hilfsmittel verschiedenen Schritten zu. Die Methoden und Hilfsmittel werden in [KUMKE18, S. 97 ff.] weiter ausgeführt, wobei sie ein weites Feld – von starkem Bezug zu AM, wie spezifischen Checklisten, bis hin zu allgemein bekannten Methoden, wie der Walt-Disney-Methode – abdecken. Das Vorgehensmodell beinhaltet einen iterativen Gedanken und unterscheidet sich bis zur Phase des Konzipierens nicht von der in Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221, 1993] beschriebenen Darstellung [KUMKE18, S. 91]. Vor der Entwurfsphase wird ein Entscheidungsknoten eingeführt, der aus einer iterativen technischen Bewertung und einer Wirtschaftlichkeits-/Kostenanalyse besteht. Dies entspricht dem Arbeitsschritt „Beurteilen von Vorentwürfen“ der Richtlinie VDI 2223 [VDI 2223, 2004, S. 23]. Das Entwerfen und Ausarbeiten wird zu einer Phase zusammengefasst, in der iterativ die „Optimierung der Produkteigenschaften“, das „AM-gerechte Gestalten und Ausarbeiten“ und die „Konstruktionsüberprüfung und Herstellbarkeitsanalyse“ erfolgen [KUMKE18, S. 94]. Mögliche Anpassungen der Abfolge der Arbeitsschritte des Vorgehensmodells gemäß der jeweiligen Aufgabenstellung (Neu- oder Anpassungskonstruktion) sind Bestandteil der Beschreibung [KUMKE18, S. 139 f.]. Eine zeitliche Abfolge der Methoden und Hilfsmittel oder eine Zuordnung zum Vorgehensmodell werden in [KUMKE18] nicht thematisiert. Die Prozessbeschreibung erfolgt rein präskriptiv, wobei die Prozessdarstellung und die zugeordneten Inhalte in [KUMKE18, S. 177 ff.] durch einen Fragebogen evaluiert werden.

Zhu et al. beschreiben aufbauend auf Befragungen von 17 Konstrukteuren ein Rahmenwerk zur Entwicklung additiv gefertigter Endbauteile (siehe Bild 3.35) [ZHU17]. Es weist den Phasen des Produktentwicklungsprozesses (PEP) Konstruktionsrichtlinien und -regeln, Einflussfaktoren, Wissen von Konstrukteuren und wirtschaftliche Überlegungen zu. Die Pfeile mit Volllinie stellen den Haupteinfluss und die gestrichelten Pfeile den Sekundäreinfluss auf die jeweiligen Phasen dar. Die Reihenfolge der Konstruktionsschritte ist leicht unterschiedlich zu der von Kumke et al. [KUMKE16] beschriebenen Abfolge. Die Auswahl des spezifischen Fertigungsverfahrens geschieht beispielsweise vor der Konzeptphase. Es wird eine Unterscheidung zwischen allgemeinen Richtlinien, wie der Funktionsbetrachtung und Material- / Oberflächeneigenschaften, verfahrensspezifischen AM-Gestaltungsregeln auf Ebene der Bauteilmerkmale, wie Wandstärken und Stützstrukturen, und den Regeln, welche bei der Fertigung beachtet werden müssen, getroffen.

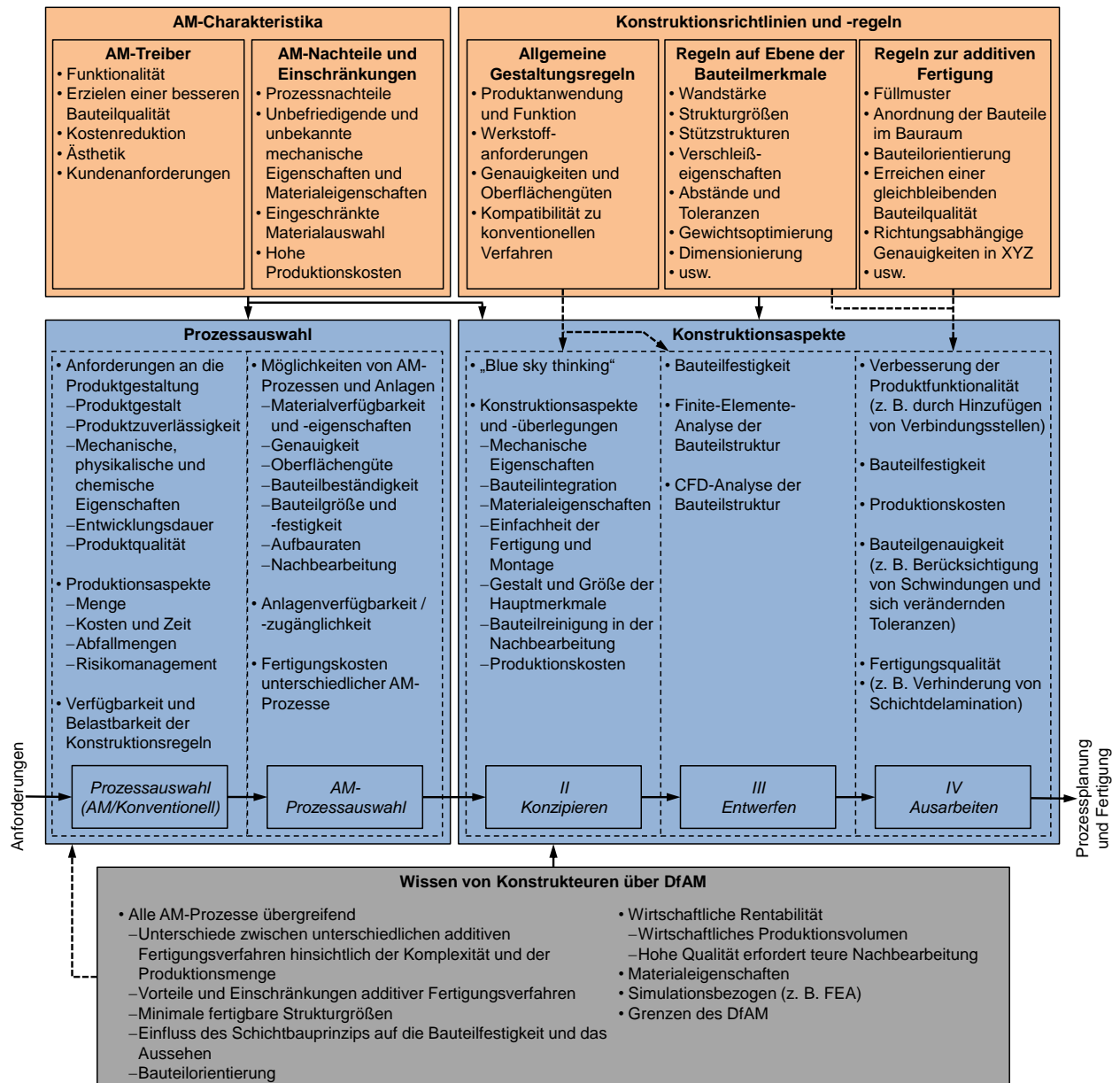


Bild 3.35: Rahmenwerk zum Entwickeln für AM in Anlehnung an [ZHU17, S. 330] aus dem Englischen

Die spezifischen AM-Gestaltungsregeln auf Ebene der Bauteilmerkmale und die Regeln zur additiven Fertigung müssen in dem aufgezeigten Schema später als die allgemeinen Gestaltungsregeln in die Entwicklung einbezogen werden. Die Verfahrensauswahl und das Vorgehen bei der Entwicklung werden dabei vom Wissen der Konstrukteure über die Entwicklung additiv gefertigter Bauteile beeinflusst (vgl. Bild 3.34 unten).

Künneke et al. beschreiben als AM-Konstruktionsmethodik ein weiteres Vorgehens zur Entwicklung additiv gefertigter Bauteile (siehe Bild 3.36) [Künneke18]. Die Beschreibung setzt den Fokus auf die Integration einer Bewertungsmethodik in den PEP.

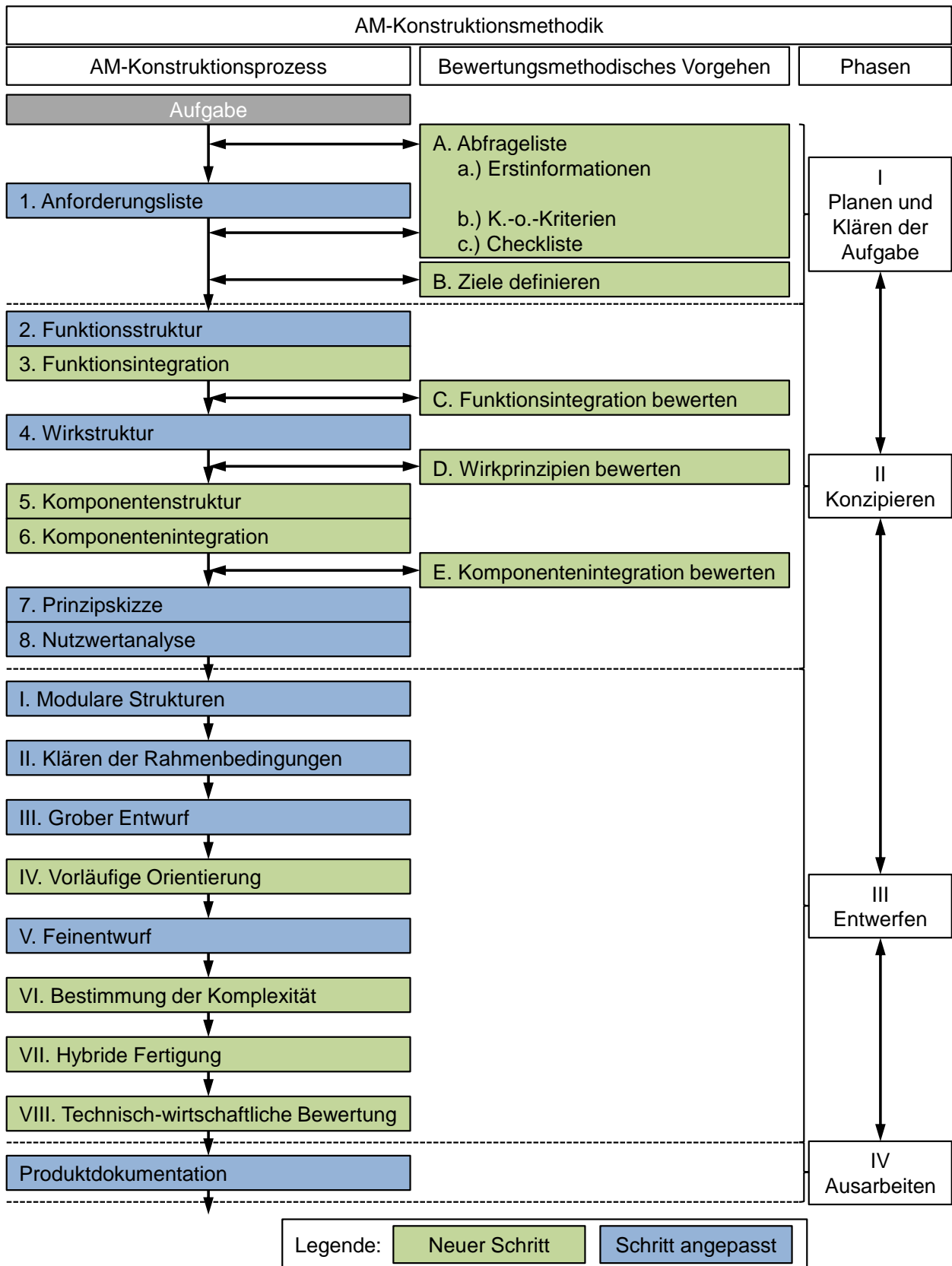


Bild 3.36: AM-Konstruktionsmethodik nach [KÜNNEKE18, S. 135]

Die vorgestellte AM-Konstruktionsmethodik ist in den angepassten AM-Konstruktionsprozess und das bewertungsmethodische Vorgehen gegliedert. „Der AM-Konstruktionsprozess basiert auf dem Vorgehen nach [VDI 2221, 1993] und wurde nicht

grundlegend verändert“ [KÜNNEKE18, S. 136]. Die Anpassung der Schritte des Vorgehens (blaue Felder in Bild 3.36) spiegelt die spezielle Ausrichtung der Schritte auf die additive Fertigung wider [KÜNNEKE18, S. 134 ff.]. Zudem sind die grün dargestellten Schritte neu in die AM-Konstruktionsmethodik aufgenommen worden. Um eine Eignung von AM zu überprüfen, ist in der Konzeptphase den Arbeitsschritten drei, vier und sechs jeweils ein Bewertungsschritt nachgeordnet. [KÜNNEKE18]

Die größten Änderungen des AM-Konstruktionsprozesses nach [KÜNNEKE18] in Bild 3.36 gegenüber der Beschreibung in [VDI 2221, 1993] stellt die explizite Benennung der Funktionsintegration auf Funktionsebene (Schritt 3) und Komponentenebene (Schritt 6) sowie die zeitliche Einordnung der Festlegung der vorläufigen Bauteilorientierung (Schritt IV) und der Bestimmung der Komplexität (Schritt VI) dar.

Die vorgestellten Prozesse unterscheiden sich hinsichtlich der eingeordneten Bestandteile und der zeitlichen Einordnung bestimmter Unterstützungsgegenstände. Dies kann auf den unterschiedlichen Fokus der Unterstützung, die sie bieten sollen, zurückgeführt werden. Die Informationen, die während des Entwicklungsprozesses verarbeitet werden, bekommen in Folge dessen unterschiedliche Gewichtungen.

Alle dargestellten Prozesse sind präskriptive Studien, die mit dem Fokus auf die Integration einzelner Bestandteile in den Entwicklungsprozess entwickelt wurden. Die angegebenen Arbeitsschritte der Prozessdarstellungen bauen auf den vier Phasen der Produktentwicklung der Richtlinie VDI 2221 von 1993 [VDI 2221, 1993] und teils sogar auf deren genaueren Beschreibung der sieben Arbeitsschritte auf. Aufgrund der fast gleichen Aktivitäten der überarbeiteten Richtlinie VDI 2221 von 2018 [VDI 2221-1, 2018] (siehe Kapitel 2.2) lassen sich die Prozessbeschreibungen auch hierauf übertragen.

Die Arbeitsschritte der Richtlinie VDI 2221 von 1993 [VDI 2221, 1993] als solche werden in den oben ausgeführten Prozessbeschreibungen nicht in Frage gestellt oder deren Reihenfolge geändert. Sie werden zwar hinsichtlich ihrer Formalisierung oder Detaillierung teilweise angepasst, dies geschieht aber immer in Bezug auf die Zuordnung einer AM-spezifischen Unterstützung gemäß dem Schwerpunkt der jeweiligen Veröffentlichung. Da die Aktivitäten der Richtlinie VDI 2221 von 2018 [VDI 2221-1, 2018] fast identisch sind, kann davon ausgegangen werden, dass auch diese für die Entwicklung additiv gefertigter Bauteile Gültigkeit besitzen.

3.11 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Das vorhergehende Kapitel 3.10 zeigt auf, dass es verschiedene Betrachtungen des Entwicklungsprozesses für additiv gefertigte Bauteile gibt, wobei die fokussierten Bestandteile vielfältig sind. Die abgeleiteten Prozessschaubilder zeigen unterschiedliche Facetten der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile auf und sind nur partiell miteinander vergleichbar. Alle vorgestellten Prozessbeschreibungen wurden präskriptiv erstellt. Da keiner der dargestellten Prozesse durch eine repräsentative Evaluation validiert wurde oder die Ergebnisse der durchlaufenen Prozesse verifiziert wurden, können auch Schlussfolgerungen aus dem Vergleich der Prozesse nicht als hinreichender Beweis für eine Gesamt- oder Teilgültigkeit angesehen werden.

Aufgrund des rein präskriptiven Charakters und aus den unterschiedlichen Informationsgewichtungen und den fokusspezifisch differenten Prozessbeschreibungen der in Kapitel 3.10 vorgestellten AM-Entwicklungsprozesse konkretisiert sich die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit. Um Entwicklungen additiv gefertigter Bauteile gezielt unterstützen zu können, sollen einerseits die notwendigen Informationen für eine durchgehende Unterstützung eines Entwicklungsprozesses für additiv gefertigte Bauteile erforscht werden, wobei auch die Art der Aufbereitung und ihrer Bereitstellung betrachtet wird. Andererseits soll die Vorgehensweise während der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile aus einer prozessualen Sicht untersucht werden.

Die übergeordnete Forschungsfrage – „Wie erfolgt die Konstruktion additiv gefertigter Endbauteile und wie kann sie durch gezielte Informationsbereitstellung unterstützt werden?“ – die in der Einleitung (Kapitel 1) aufgeworfen wird, gliedert sich in die konkretisierten Forschungsfragen, die den folgenden Kapiteln dieser Dissertation zugrunde liegen:

- Welche Informationen sind bei der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile relevant?
- Wie sollten Informationen zur Unterstützung eines Entwicklungsprozesses für additiv gefertigte Bauteile aufbereitet sein?
- Nach welchem Ablauf werden Informationen bei der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile genutzt?

Im nachfolgenden Kapitel 4 wird die Erstellung der elementaren Informationsstruktur beschrieben, die zur Beantwortung der Forschungsfragen genutzt wird.

4 Inhalte der Unterstützung zur Entwicklung additiv gefertigter Bauteile

In diesem Kapitel werden die Inhalte der elementaren Informationsstruktur zur Unterstützung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile hergeleitet sowie die Aufbereitung der Informationen zur Bereitstellung auf einer Onlineplattform erläutert.

4.1 Notwendige Informationen zum Konstruieren für AM

Um eine durchgehende Unterstützung des Entwicklungsprozesses zu gewährleisten, wird literaturbasiert zusammengetragen, welche spezifischen Informationen hierfür notwendig sind und dabei Themenfelder abgeleitet. Bei der Recherche kann auf einer bestehenden Literatursammlung des Autors der vorliegenden Dissertation für das Forschungsfeld AM (ca. 250 Veröffentlichungen) aufgebaut werden. Diese wird zunächst auf Bezüge zur AM-Entwicklung bzw. den AM-Entwicklungsprozess überprüft. Die so entstehende Auswahl (ca. 100 Veröffentlichungen) wird durch die in diesen Quellen genannten Literaturstellen nach dem Schneeballsystem erweitert. Anschließend wird die Literatursammlung noch einmal mit einer systematischen Recherche vervollständigt (ca. 130 Veröffentlichungen). Diese erfolgt mittels Bibliotheksverbänden über das Bibliothekssystem der Universität Stuttgart sowie durch Onlinerecherche mit Google Scholar, ResearchGate und der Fachdatenbank DOMA. Die Literatursammlung wird letztlich durch deren Sichtung auf Veröffentlichungen eingeschränkt, die sich durch eine übergeordnete Betrachtung der genutzten Informationen während eines AM-Entwicklungsprozesses auszeichnen. Es ergeben sich daraus 21 verwendete Quellen zur Festlegung relevanter Themenfelder zum Konstruieren für AM: [ACATECH16; ADAM15; ADAM17; CAMPBELL13; HAGUE05; HÄLLGREN16; KIRCHNER11; KUMKE16; KUMKE17; LAVERNE14; LEUTENECKER-TWELSIEK16; MANI17; PONCHE12; SEEPERSAD17; TANG16; THOMPSON16; VAYRE12; WEISS15; YANG15; ZHU17; ZIMMER17].

Diese 21 Quellen wurden auf Hinweise und Aussagen untersucht, die explizit die Notwendigkeit bestimmter Informationen während der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile herausstellen, aber auch auf Informationen, die als selbstverständlich für die Unterstützung vorausgesetzt und deshalb nicht ausdrücklich benannt sind. Durch das Sammeln der Quellenaussagen entsteht eine Liste mit 22 Themenfeldern, deren Inhalte für die durchgehende Unterstützung von AM-Entwicklungsprozessen notwendig sind. In Tabelle 4.1 sind die 22 identifizierten Themenfelder und die 21 Quellen dargestellt, aus

deren Aussagen sie abgeleitet wurden. Die Liste der 22 Themenfelder wurde erstellt, indem die Literaturquellen nacheinander ausgewertet und die zu Beginn der Auswertung festgelegten Themenfelder fortlaufend erweitert und angepasst wurden. Bei der Literatursichtung wurden neben der fortlaufenden Erweiterung der Liste auch Quellaussagen zu bereits identifizierten Themenfeldern vermerkt. Da die entstehende Liste der Themenfelder gegen Ende ihrer Erarbeitung kaum noch Änderungen und Erweiterungen unterworfen war, kann davon ausgegangen werden, dass sie annähernd alle, für die Konstruktion additiver Fertigungsverfahren relevanten, Themenfelder abdeckt.

Die Vollständigkeit der in den Themenfeldern beinhalteten Informationen zur Unterstützung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile ergibt sich erst durch deren inhaltliche Ausformulierung. Das Ziel der Vollständigkeit kann dabei nie ganz erreicht werden, da zum einen durch die fortlaufende Erweiterung mit Randthemen die enthaltene Informationsmenge stetig anwachsen würde, und zum anderen eine zu große Informationsfülle von den Konstrukteuren nicht mehr zu beherrschen wäre und somit der gezielten Unterstützung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile entgegenstünde. Es gilt daher, für den Anwendungsfall der Unterstützung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile einen Informationsumfang zu wählen, welcher noch handhabbar ist, aber dennoch die „notwendigen“ Informationen für diesen Zweck bereitstellt. Um dies zu erreichen wird im nachfolgenden Kapitel 4.2 die inhaltliche Ausarbeitung der Informationen in einer „elementaren“ Informationsstruktur erläutert.

Die erarbeiteten Themenfelder in Tabelle 4.1 zeigen, dass die Autoren der 21 hierfür ausgewerteten Literaturquellen durch ihre spezifische Ausrichtung der Forschung unterschiedliche Schwerpunkte der unterstützenden Informationen als notwendig erachten. Eine Schwierigkeit bei der Literatursichtung stellen die voneinander abweichenden Abstraktionsgrade in den Quellen dar. Beispielsweise sind Gitterstrukturen ein mehrfach genanntes Beispiel hinsichtlich der Gestaltungsmöglichkeiten im Bereich der additiven Fertigung. Diese werden in der Auflösung der Liste mit den 22 Themenfeldern allerdings nicht explizit aufgeführt, sondern werden im Rahmen der hier erarbeiteten Klassifizierung der notwendigen Informationen zur Entwicklung von AM-Bauteilen den Wirkprinzipien zum Lösen von Teilfunktionen zugeordnet.

Für die weiteren Untersuchungen der vorliegenden Arbeit werden die identifizierten Themenfelder umstrukturiert und in einer elementaren Informationsstruktur aufbereitet. Diese Strukturierung und die Bereitstellung der ausgearbeiteten Informationen auf einer Onlineplattform ist in Kapitel 4.2 beschrieben.

4.2 Elementare Informationsstruktur zur Entwicklung von AM-Bauteilen

Zur Untersuchung des Vorgehens bei der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile werden AM-spezifische, unterstützende Informationen in einer elementaren Informationsstruktur aufbereitet. Die Erstellung der unterstützenden Informationsstruktur baut auf den in Kapitel 4.1 ermittelten Themenfeldern auf. Bei der inhaltlichen Ausformulierung der unterstützenden Informationen wird allerdings die Struktur der Themenfelder angepasst, um für die weitere Untersuchung Einheiten ähnlichen Informationsgehalts zu schaffen. Diese werden als Informationsgruppen bezeichnet. Während der Erstellung der elementaren Informationsstruktur wird außerdem darauf geachtet, den gesamten Informationsumfang so zu wählen, dass er für Konstrukteure handhabbar ist und gleichzeitig möglichst alle notwendigen Informationen zur Entwicklung additiv gefertigter Bauteile beinhaltet. Die 22 Themenfelder aus Kapitel 4.1 werden in 21 Informationsgruppen umstrukturiert. Nach der Umstrukturierung besitzen die Themenfelder für die nachfolgenden Untersuchungen keine weitere Relevanz. Die abgeleiteten Informationsgruppen werden jeweils durch Informationskataloge in Form verschiedener Seiten einer Onlineplattform repräsentiert. Vier der Informationsgruppen bestehen aus mehreren Informationskatalogen, die übrigen aus jeweils nur einem. Die Gliederung der Informationsgruppen in Informationskataloge (insgesamt 46 Stück) wird auf Seite 67 anhand von Bild 4.1 genauer beschrieben. Tabelle 4.2 zeigt, welche Themenfelder von welchen Informationsgruppen abgedeckt werden. Kreuze (X) bedeuten, dass die Informationen des Themenfeldes maßgeblich durch die jeweilige Informationsgruppe abgedeckt sind. Ein „B“ bedeutet, dass eine Informationsgruppe einen Bezug zu dem jeweiligen Themenfeld herstellt, dieses allerdings in einer anderen Informationsgruppe abgedeckt ist. Um inhaltliche Doppelungen innerhalb der entstehenden Informationsstruktur zu vermeiden, folgt die Ableitung der 21 Informationsgruppen aus den 22 Themenfeldern folgenden Regeln:

- Informationsgruppen sind inhaltlich so getrennt, dass jedes Themenfeld in nur einer Informationsgruppe maßgeblich abgebildet ist.
- Informationsgruppen können mehrere Themenfelder umfassen.

| Legende: X = Themenfeld maßgeblich in Informationsgruppe ← B = Bezug zum Themenfeld durch Informationsgruppe → | | Themenfelder (aus Kapitel 4.1) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Katalog: Kurzbeschreibung | | | | |
|--|---|--|--------------------|-------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------|------------------|-------------------|----------------|-------------------|------------------|---------------------------|-----------------|------------------|---|---|
| | | (1) Funktionsin- | (2) Konstruktions- | (3) Betrachtungen | (4) Checkliste für | (5) Fertigungs- | (6) Datenformate / | (7) AM-spezifische | (8) FE- oder CFD - | (9) Methoden der | (10) Berechnungs- | (11) Methoden der | (12) Materialdaten | (13) Wirkprinzipien | (14) Beispiele ad- | (15) Allgemeine | (16) spezifische | (17) Nachbearbei- | (18) Kostenbe- | (19) Zeitbetrach- | (20) Verfahrens- | | (21) Vorgehens- | (22) Ökologische | | |
| Informationsgruppen der Plattform, welche die unterstützenden Informationen beinhalten | a. | Allgemeine Grundlagen additiver Fertigungstechnologien | | B | B | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | B | |
| | b. | Grundlagen zu Oberflächen und Fertigungsgenauigkeiten additiver Fertigungsverfahren | | | B | X | | | | | | | | | | | B | | B | | | | | | | B |
| | c. | Funktionsintegration / Bauteilintegration bei der additiven Fertigung | | X | | | | | | | | | | | B | | | | | | | | | | | B |
| | d. | Additive Fertigungsverfahren | | | B | B | | | | | | | B | | | | X | B | | | | | | | | B |
| | e. | Indirekte Fertigungsprozessketten mit AM | | B | | B | | | | | | | | | | B | | B | | | | | | | | B |
| | f. | Grundlagen zu Entwicklungskosten und Entwicklungszeiten bei der additiven Fertigung | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | | | | | B |
| | g. | Checkliste zweckmäßiger (wirtschaftlicher) Einsatz | | B | | | | | | B | | | B | B | B | B | B | B | B | B | B | B | B | B | B | B |
| | h. | Checkliste AM-gerechte Gestaltung | | B | B | B | X | B | | | B | | B | B | B | | | B | B | B | B | B | B | B | B | B |
| | i. | Methodik zur Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens | | | | | B | | | | | | B | | | | | B | B | B | B | B | | | | B |
| | j. | Bauteilorientierung im Bauraum der Fertigungsanlage | | B | X | | | | | | | | | | | | | | | B | | | | | | B |
| | k. | Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen | | B | B | B | | | | | | | | | X | X | | | | | | | | | | B |
| | l.a | Konstruktionsrestriktionen /-regeln allgemein mit Erläuterung | | X | B | B | | | | | | | | | | | B | B | | | | | | | | B |
| | l.b | Konstruktionsrestriktionen nach Fertigungsverfahren für FLM, LS, LBM | | X | B | B | | | | | | | | B | | B | | | | | | | | | | B |
| | m. | Grundlagen der Softwareanwendung für die Bauteiloptimierung / Fertigungsoptimierung | | | B | | | B | X | B | B | X | X | B | | | | | | | | | | | | B |
| | n. | Vorgehen zur Topologieoptimierung – Anpassung von Lösungsprinzipien an bauteilspezifische Randbedingungen | | B | B | B | | | X | X | B | | B | | | | B | | | B | B | | | | | B |
| | o. | Grundlagen zu Produktindividualisierung und -personalisierung bei der additiven Fertigung | | | | | | | | | | | | | | B | | | | | | | | X | | B |
| | p. | Werkstoffe und deren Eigenschaften | | | B | | | | | | | | | X | | | B | | | | | | | | | B |
| | q. | Übersicht Nachbearbeitung (Post-processing) | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | B |
| | r. | Datenprozesse der additiven Fertigung | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | B |
| | s. | Ökologische Betrachtungen der additiven Fertigung | | | | | | | | | | | | B | | | | | | | | | | | X | B |
| t. | Dienstleister additive Fertigung | | | | | | | | | | | | | | | | | | B | B | X | | | | B | |
| u. | Konventionen und geometrische Grundlagen | | B | B | B | | | | | | | | | | | B | B | | | | | | | | B | |
| | Quellen (Literaturverzeichnis) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | B | |

Tabelle 4.2: Informationsgruppen zur Unterstützung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile

Um einen möglichst vergleichbaren Informationsgehalt jeder Informationsgruppe und somit der Informationsgruppen untereinander zu schaffen, wurden teilweise Themenfelder in Informationsgruppen zusammengefasst. Dies führt dazu, dass einige der Informationsgruppen mehrere Themenfelder maßgeblich beinhalten. Durch die Zusammenfassung wird eine ähnliche Darstellung der Informationen in den Katalogen der verschiedenen Informationsgruppen ermöglicht. Beispielsweise werden so die Grundlagen der Kosten- und Zeitbetrachtungen in einer Informationsgruppe zusammengeführt.

Nach dem Schema in Tabelle 4.2 existieren auch Informationsgruppen, welche kein Themenfeld maßgeblich beinhalten. Diese sind die Informationsgruppen „e. Indirekte Fertigungsprozessketten mit AM“, „g. Checkliste zweckmäßiger (wirtschaftlicher) Einsatz“, „i. Methodik zur Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens“ und „u. Konventionen und geometrische Grundlagen“. Sie enthalten Informationen, die nicht direkt aus den Themenfeldern abgeleitet werden und deren Inhalte deshalb keine andere Informationsgruppe abdeckt, die aber dennoch für eine Gestaltung für AM hilfreich sind. Die vier Kataloge werden der Informationsstruktur hinzugefügt, da ihre Inhalte während der Ausgestaltung der übrigen Informationsgruppen als hilfreich identifiziert wurden. Sie stellen Werkzeuge dar und bilden Schnittstellen zwischen den anderen Katalogen, indem sie jeweils Bezüge zu mehreren anderen Katalogen beinhalten.

Zusätzlich zu den Katalogen der 21 Informationsgruppen, die Informationen für eine AM-gerechte Gestaltung beinhalten, sind zwei Kataloge hinzugefügt, die keine Informationen zur Gestaltung beitragen, sondern zur Orientierung innerhalb der Informationsstruktur dienen. Zum einen ist dies der Katalog „Quellen“ mit den Angaben zur Literatur, die bei der Ausgestaltung der Inhalte der Informationskataloge genutzt wurde. Zum anderen ist dies der Katalog „Kurzbeschreibung Informationsplattform“, der zur Orientierung zwischen den verschiedenen Informationsgruppen dient und der die Bereitstellung der Informationen auf einer Onlineplattform erläutert. Er fungiert als Schnittstellenkatalog zwischen den 21 Informationsgruppen (a. bis u.) und ist in Tabelle 4.2 (rechts) in einer gesonderten Spalte mit Bezügen (B) zu den anderen Katalogen dargestellt. Die Bezüge (B) können mittels Rechnerunterstützung als Links ausgeführt werden. (Genauere Beschreibung des Katalogs siehe Kapitel 4.2.1.)

Zur besseren Übersichtlichkeit sind den verschiedenen Informationsgruppen Kurznamen zugeordnet, die ihren Inhalt prägnant widerspiegeln (vgl. „fette“ Schriftart in Tabelle 4.2). Die Gliederung der Informationsgruppen in Informationskataloge ist in Bild 4.1 auszugsweise dargestellt.

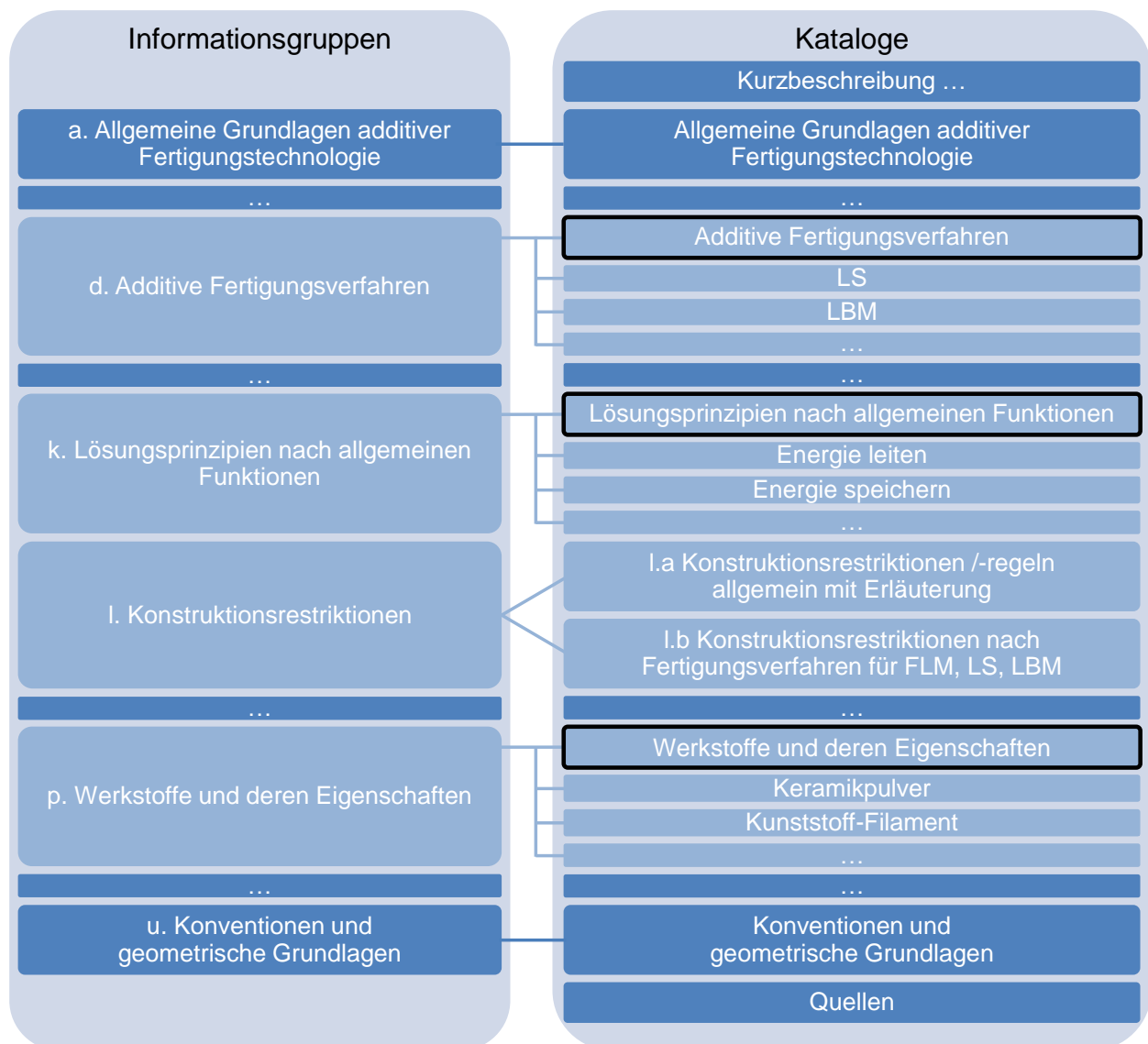


Bild 4.1: Gliederung der Informationsgruppen in Informationskataloge (Auszug)

Die Darstellung in Bild 4.1 zeigt, wie die Informationsgruppen durch Informationskataloge repräsentiert werden. Vier der Informationsgruppen sind in mehrere Kataloge unterteilt, um ihre Inhalte in weitere logische Untereinheiten zu gliedern. Bei Informationsgruppen mit mehreren Unterkatalogen fungiert einer der Kataloge als Übersichtskatalog (siehe schwarze Umrandung in Bild 4.1 rechts). Für die Informationsgruppe „l. Konstruktionsrestriktionen“ existiert kein Übersichtskatalog, da sie nur aus zwei Katalogen besteht.

Die Kataloge „Quellen“ und „Kurzbeschreibung Informationsplattform“ existieren nicht als Informationsgruppen, sondern nur als Kataloge, da sie, wie oben beschrieben, ausschließlich zur Orientierung innerhalb der Informationsstruktur dienen.

Zusammenfassend ist die erarbeitete elementare Informationsstruktur zur Unterstützung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile durch folgende Aspekte gekennzeichnet:

- Handhabbarkeit des inhaltlichen Gesamtumfangs der enthaltenen Informationen für Konstrukteure und gleichzeitig Beinhaltung möglichst aller notwendiger Informationen
- Einheitliche Darstellungsform der Informationen ohne Redundanzen
- Gliederung der Informationen in Informationsgruppen und Informationskataloge
- Vergleichbarkeit des Informationsgehalts der einzelnen Informationsgruppen

Die inhaltliche Ausgestaltung der Informationsstruktur wird in Kapitel 4.3 anhand exemplarischer Kataloge erläutert. Die Bereitstellung der Informationsstruktur erfolgt mithilfe einer Onlineplattform, die in den nachfolgenden Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 vorgestellt wird.

4.2.1 Informationsbereitstellung auf einer Onlineplattform

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird die erarbeitete Informationsstruktur auf einer Onlineplattform bereitgestellt. Die Plattform dient der visuellen Darstellung der bereitgestellten Informationen und ermöglicht den Zugriff auf die Inhalte über verschiedene Nutzungsfunktionen. Durch diese Darstellungsform wird ein einfacher Zugriff auf die Inhalte und eine bequeme Handhabung der Informationsbereitstellung gefördert (vgl. Kapitel 2.7 und 2.8). Die Onlinebereitstellung wird im Folgenden anhand der Startseite der Plattform vorgestellt. In Bild 4.2 ist eine Bildschirmdarstellung der Plattform abgebildet. Die Inhalte der Kataloge werden im „Informationsbereich“ der Onlineplattform dargestellt. Die weiteren Bereiche der Plattfordarstellung und die Nutzungsfunktionen der Plattform sind im nachfolgenden Kapitel 4.2.2 beschrieben. Da der Katalog „Kurzbeschreibung Informationsplattform“, der als Startseite der Plattform dient, inhaltlich die möglichen Nutzungsfunktionen und die enthaltenen Informationsgruppen der Plattform behandelt, sind diese hier im Informationsbereich dargestellt (vgl. Bild 4.2).

Die Darstellung der Kataloginhalte im Informationsbereich erfolgt mittels einzelner Zellen, die Text, Grafiken oder auch beides enthalten können. Die Zellen können in ihrer Größe und Position variabel angepasst werden. Durch den Aufbau der Inhalte aus einzelnen Zellen lassen sich sowohl abschnittsweise strukturierte Texte als auch Tabellen oder deren Kombinationen darstellen. Dies hat den Vorteil, dass zum einen Informationen im Stil der bekannten tabellarischen Abbildung von Konstruktionskatalogen aufgebaut werden können, zum anderen aber auch Fließtext untergliederbar ist. Die Seitengröße ist je nach Inhalt variabel und das Layout der enthaltenen Informationen kann abhängig von jeweiligen Inhalt durch Freiflächen gegliedert werden.

Kurzsname des Katalogs

Funktionsbereich

Kurzbeschreibung Informationsplattform

Zugriff über die Zugriffsleiste (links)

Suchfunktion

Verlinkungen zwischen den Inhalten

Zoomfunktion

Druckfunktion

Folgende Inhalte sind auf der Plattform aktuell verfügbar:

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| <p style="font-size: small;">Allgemeine Grundlagen additiver Fertigungstechnologien</p> | <p style="font-size: small;">Additive Fertigungsverfahren (Verfahrensübersicht und Steckbriefe spezifischer Verfahren)</p> | <p style="font-size: small;">Grundlagen zu Entwicklungskosten und Entwicklungszeiten bei der additiven Fertigung</p> | <p style="font-size: small;">Checkliste zweckmäßiger (wirtschaftlicher) Einsatz</p> | <p style="font-size: small;">Bauteilorientierung im Bauraum der Fertigungsanlage</p> |
| <p style="font-size: small;">Konventionen und geometrische Grundlagen</p> | <p style="font-size: small;">Dienstleister additive Fertigung</p> | <p style="font-size: small;">Datenprozesse der additiven Fertigung</p> | <p style="font-size: small;">Checkliste AM-gerechte Gestaltung</p> | <p style="font-size: small;">Konstruktionsrestriktionen nach Fertigungsverfahren für FLM, LS, LBM</p> |
| <p style="font-size: small;">Übersicht Nachbearbeitung (Post-processing)</p> | <p style="font-size: small;">Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen</p> | <p style="font-size: small;">Werkstoffe und deren Eigenschaften</p> | <p style="font-size: small;">Methodik zur Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens</p> | <p style="font-size: small;">Vorgehen zur Topologieoptimierung - Anpassung von Lösungsprinzipien an bauteilspezifische Randbedingungen</p> |
| <p style="font-size: small;">Grundlagen zu Oberflächen und Fertigungsgenauigkeiten additiver Fertigungsverfahren</p> | <p style="font-size: small;">Funktionsintegration / Bauteilintegration bei der additiven Fertigung</p> | <p style="font-size: small;">Grundlagen zu Produktindividualisierung und -personalisierung bei der additiven Fertigung</p> | <p style="font-size: small;">Grundlagen der Softwareanwendung für die Bauteiloptimierung / Fertigungsoptimierung</p> | <p style="font-size: small;">Konstruktionsrestriktionen / -regeln allgemein mit Erläuterung</p> |
| <p style="font-size: small;">Indirekte Fertigungsprozessketten mit AM</p> | <p style="font-size: small;">Ökologische Betrachtungen der additiven Fertigung</p> | <p style="font-size: small;">Quellen</p> | <p style="font-size: small;">Zelle</p> | |

Zugriffsleiste

Link

Informationsbereich

Kurzbeschreibung Informationsplattform


- Allgemeine Grundlagen additiver Oberflächen und Fertigungsger
- Funktionsintegration / Bauteilint
- Additive Fertigungsverfahren
- LS - Laser-Sintern
- LBM - Laser-Strahlschmelzer
- EBM - Elektronen-Strahlschr
- SL - Stereolithographie
- DLP - Digital Light Processin
- FLM - Fused Layer Modellin
- MJM - Multi-Jet Modelling
- PJM - Poly-Jet Modelling
- 3DP - 3D-Drucken
- LMD - Gerichtete Energielein
- LLM - Layer-LaminatedMan
- Indirekte Fertigungsprozesskeit
- Entwicklungskosten und Entwic
- Checkliste zweckmäßiger (wirts
- Checkliste AM-gerechte Gestal
- Auswahl eines geeigneten Fert
- Bauteilorientierung im Bauraum
- Lösungsprinzipien nach allgem
- Energie leiten
- Energie speichern
- Energie umformen
- Energie wandeln
- Energie verknüpfen
- Stoff - alle Funktionen
- Information - alle Funktionen
- Konstruktionsrestriktionen /-reg
- Konstruktionsrestriktionen nach
- Vorgehen Topologieoptimieru
- Produktindividualisierung/-pers
- Werkstoffe und deren Eigensch
- Keramikpulver
- Kunststoff-Filament
- Kunststoff-Pulver
- ...


Bild 4.2: Katalog zur Kurzbeschreibung der Inhalte der Informationsplattform

Die Zellen im Informationsbereich der Kataloge sind bei einem inhaltlichen Bezug zu einem anderen Katalog jeweils mit Links zu den betreffenden Zellen versehen. Links dienen außerdem dazu, Beziehungen zwischen den Katalogen abzubilden. Da der Katalog „Kurzbeschreibung Informationsplattform“ zur Übersicht über alle Inhalte der Plattform dient, lassen sich über die in Bild 4.2 dargestellten einzelnen Zellen in seinem Informationsbereich alle übergeordneten Kataloge der Informationsgruppen mit Verlinkungen erreichen. Die einzelnen Kataloge sind umgekehrt ebenfalls dem Katalog „Kurzbeschreibung ...“ zugeordnet und über Links mit diesem verknüpft. Es sind auf diesem Weg alle Kataloge der Informationsstruktur gemäß der Gliederung der Informationsgruppen in Übersichtskataloge und Unterkataloge (vgl. Bild 4.1) miteinander verlinkt.







4.2.2 Nutzungsfunktionen der Onlineplattform

In diesem Kapitel werden die implementierten Nutzungsfunktionen der Informationsplattform vorgestellt. Die softwaretechnische Programmierung der Plattform baut auf der vom Autor der vorliegenden Arbeit betreuten Studienarbeit von Kesper [KESPER16] auf und wurde für die in dieser Dissertation vorgestellten Untersuchungen angepasst und erweitert. Die implementierten Nutzungsfunktionen orientieren sich an den bekannten Möglichkeiten, wie sie beispielsweise in Wikis zur Verfügung stehen. Durch die digitale Repräsentation der Informationen zur Unterstützung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile ergibt sich die Möglichkeit des Informationszugriffs auf der Onlineplattform auf die folgenden Arten:

- **Zugriffsleiste** (siehe Bild 4.2):
 - In der Zugriffsleiste sind alle Kataloge der Informationsplattform anhand ihrer Kurznamen aufgelistet. Sie ermöglicht somit die Navigation zu sämtlichen Inhalten der Plattform.
 - Die Kataloge einer Informationsgruppe werden gemäß der Klassifizierung in Bild 4.1 in übergeordnete und untergeordnete Kataloge eingerückt dargestellt.
- **Suchfunktion** 
 - Bei Nutzung der Suchfunktion werden alle Texte, für die der Nutzer Zugriffsrechte hat, auf Übereinstimmung überprüft. Kataloge mit übereinstimmenden Inhalten werden in einer Vorschau zusammengefasst dargestellt und können ausgehend von dieser geöffnet werden.

- **Verlinkungen** :
 - Bei inhaltlichen Bezügen zwischen den verschiedenen Informationskatalogen kann über die Verlinkungen auf die jeweiligen Zellen mit weiterführenden Informationen zugegriffen werden.
 - Alle Kataloge sind über die oberste Zelle mit dem übergeordneten Katalog verbunden. Auf diesem Weg lassen sich somit übergeordnete Informationen einheitlich finden.

Für die Bereitstellung und Verwaltung der Plattforminhalte sind weitere Nutzungsfunktionen implementiert. Diese sind jedoch für die Untersuchung des Vorgehens bei der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile, die ab Kapitel 5 beschrieben ist, nicht für die Nutzer, sondern nur für den Administrator zugänglich:

- **Druckfunktion** : Der Hintergrund wird aus der Darstellung entfernt und die Informationskataloge sind auf verschiedene DIN-Papierformate skalierbar.
- **Nutzer- / Rechteverwaltung** : Nutzerspezifische Beschränkung der Zugriffs- und Administrationsrechte.
- **Individuelle Startseite**  und **individuelle Sortierung der Zugriffsleiste** 
- **Grafischer Editor für den Informationsbereich**: Bearbeitungen der Zellengröße und Position sowie das Hinzufügen, Löschen und Verschieben ganzer Zeilen und Spalten erfolgen über eine grafische Oberfläche direkt auf der Plattform.
- **Bearbeitungsmodus** : Kataloge können durch den Administrator zur Bearbeitung freigegeben, gesperrt oder auch ganz deaktiviert werden. Um die Qualität der Informationen langfristig sicherzustellen, können Nutzer Änderungen in freigegebenen Katalogen vornehmen und neue Kataloge anlegen. Die Übernahme der Änderungen für andere Nutzer muss durch den Administrator freigegeben werden.
- **Sektionen** : Informationskataloge können übergeordneten Sektionen zugeordnet werden, für die jeweils nutzerspezifische Zugriffsrechte bestimmbar sind. Beispielsweise kann der Zugriff auf bestimmte Informationen personen- oder projektspezifisch eingeschränkt werden.

4.3 Inhaltliche Ausarbeitung der Informationsstruktur

Die Zielgruppe, für die die Inhalte der Informationsstruktur ausgearbeitet wurden, sind Produktentwickler / Konstrukteure mit geringem bis mittlerem Fachwissen im Bereich der additiven Fertigung. Die Detaillierungstiefe der Informationsausarbeitung ist so gewählt,

dass sie zwar ein gewisses technisches Vorwissen, aber keine vertieften Kenntnisse in AM voraussetzt und somit einem großen Personenkreis einen schnellen Zugang zu den relevanten Informationen für die Entwicklung additiv gefertigter Bauteile bietet. Um den Umgang mit der Informationsstruktur zu erleichtern, wird bei der Ausarbeitung der Inhalte besonderen Wert auf einen einheitlichen Sprachgebrauch gelegt.

Die Inhalte mancher Informationsgruppen stellen Grundlagen der additiven Fertigung dar und wurden als solche auch in den Stand der Technik der vorliegenden Dissertation (in Kapitel 3) aufgenommen. Einige Informationsgruppen konnten aufbauend auf Veröffentlichungen des Autors dieser Dissertation erstellt werden [WEISS15; WEISS16; WEISS17; WEISS18], die übrigen Kataloge wurden literaturbasiert verfasst. Im Folgenden werden exemplarisch vier Informationsgruppen als nachmodellerte Screenshots vorgestellt, die aufbauend auf Veröffentlichungen des Autors dieser Dissertation erstellt wurden. Die Angaben zu den Stellen, an denen die weiteren Informationskataloge innerhalb dieser Arbeit zu finden sind, befinden sich am Ende des vorliegenden Kapitels.

Katalog: Indirekte Fertigungsprozessketten mit AM (e.)

Ein Einsatzfeld der additiven Fertigung ist die Herstellung von Zwischenbauteilen für Gussprozesse. In indirekten Prozessketten entsteht vor dem tatsächlich gewollten Endnutzerbauteil eine Form und davor evtl. noch ein Modell. Je nach Anzahl der Schritte der Prozesskette können das Modell oder die Form additiv gefertigt werden. Vorgelagerte Schritte der Prozesskette werden als „indirekter“ Einsatz von AM bezeichnet. Da einerseits das Endnutzerbauteil, andererseits aber auch die Gussform als gewollter Output der additiven Fertigung gesehen werden kann (siehe Bild 3.2), ergeben sich die beiden Bezeichnungsmöglichkeiten der vorgelagerten Prozesse nach Bild 4.3. Führt man die Reihung des vorangestellten „indirect“ fort, kann das indirect Tooling entsprechend auch als indirect indirect Manufacturing bezeichnet werden.

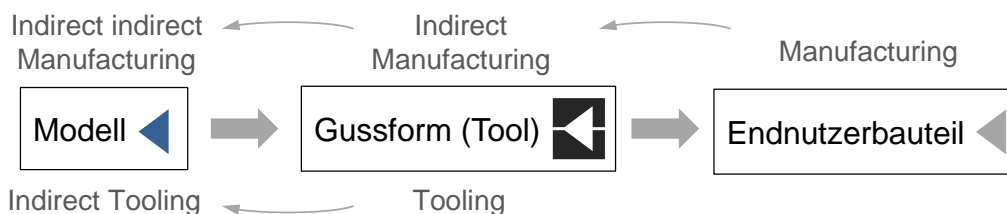


Bild 4.3: Prozessschritte und Bezeichnungen des indirekten AM

Der Katalog, der die Informationen zu indirekten Fertigungsprozessketten beinhaltet, ist in Bild 4.4 abgebildet. Er stellt die indirekte Fertigung mit AM anhand einer zusammengesetzten Prozesskette aus FLM und Feinguss vor.

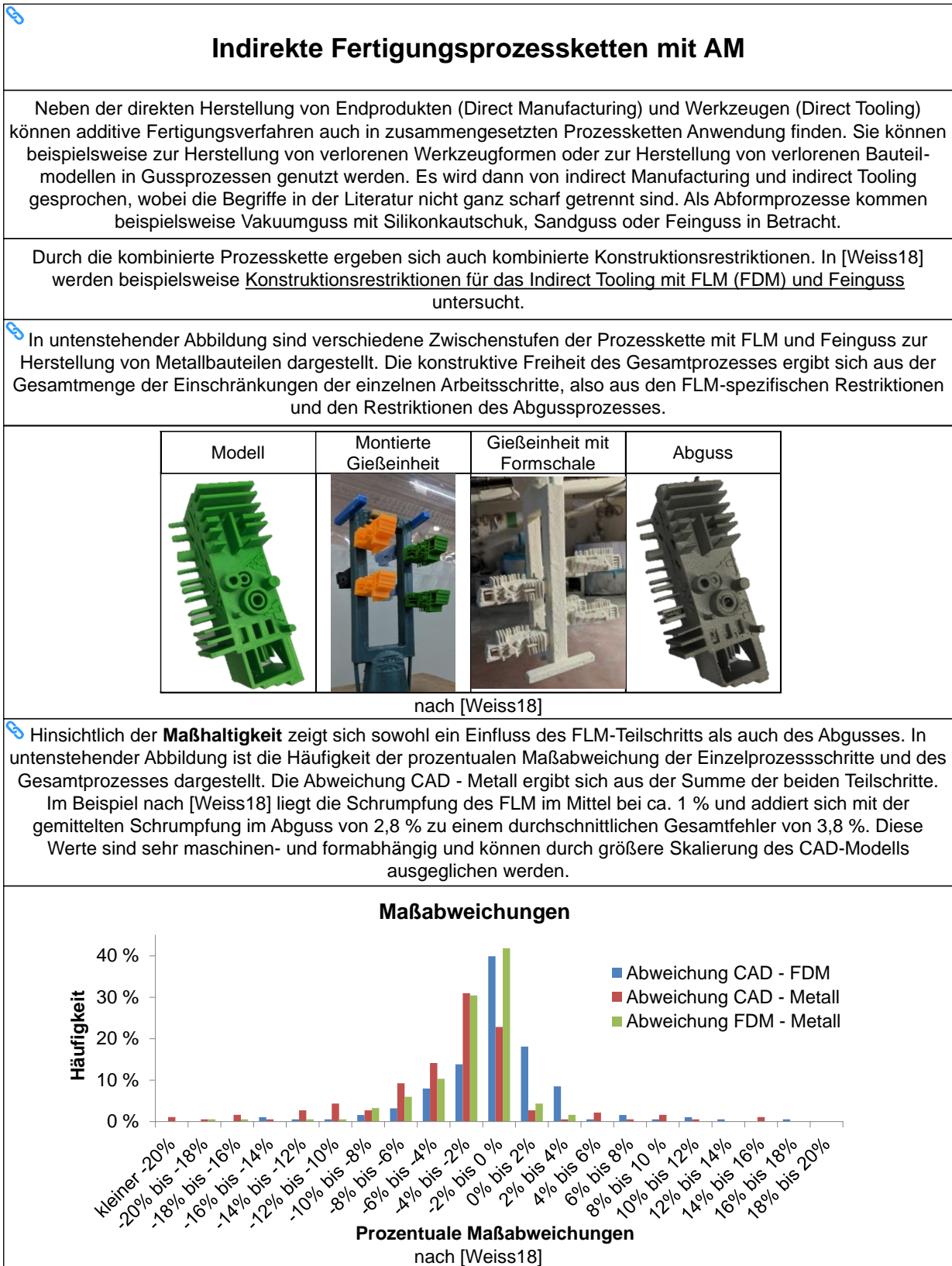


Bild 4.4: Katalog: e. Indirekte Fertigungsprozessketten mit AM nach [WEISS18]

Katalog: Methodik zur Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens (i.)

Für die Herstellung von Endbauteilen ist aufgrund der Vielzahl an möglichen Kombinationen aus verfügbaren additiven Fertigungsverfahren und verarbeitbaren Materialien eine methodische Auswahl des genutzten Fertigungsverfahrens notwendig. Die Auswahl wird von vielen Faktoren beeinflusst, wie beispielsweise durch die Verfahrensverfügbarkeit, Materialeigenschaften, maximalen und minimalen Abmessungen, Toleranzen, Rauheiten, Bauteilanzahl und die Kosten. In [WEISS15] wird ein Ansatz für die methodische Auswahl eines zu nutzenden Fertigungsverfahrens vorgeschlagen. Das Vorgehen besteht aus mehreren Schritten und konkretisiert die Verfahrensauswahl je nach Fortschritt des Entwicklungsstands. Für die Aufbereitung in einem Informationskatalog wird das Vorgehen auf vier Schritte spezifiziert und diese wie in Bild 4.5 dargestellt beschrieben. Die Konkretisierung und Beschreibung der vier Arbeitsschritte ist so gewählt, dass die weiteren Inhalte der Informationsstruktur genutzt werden können. Auf der Onlineplattform sind Bezüge über Links abgebildet. Die Darstellung ist als druckbare Checkliste gestaltet.

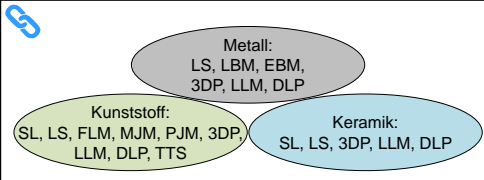
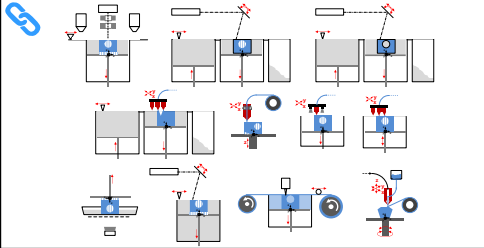
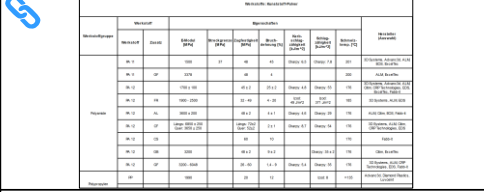

| <p>Im Folgenden ist eine mögliche Abfolge der Entscheidungen beschrieben, welche von einer bereits bestehenden Einschränkung auf die Nutzung additiver Fertigungsverfahren ausgeht und die enthaltenen Informationen der Informationsplattform nutzt.</p> | | | |
|--|---|--|---------|
| Nr. | Beschreibung | Bild | Auswahl |
| 1. | <p>Im ersten Schritt der Entscheidung wird eine Materialgruppe ausgewählt, die die grundlegenden Materialanforderungen hinsichtlich chemischer, thermischer und mechanischer Belastung prinzipiell erfüllen kann.</p> |  | |
| 2. | <p>Im zweiten Schritt wird das Prinzip des additiven Fertigungsverfahrens festgelegt. Hier werden Stützmechanismen während der Fertigung, prinzipiell erreichbare Genauigkeiten und Bauraumgrößen in die Entscheidung einbezogen.</p> |  | |
| 3. | <p>Im dritten Schritt wird der Werkstoff spezifiziert, wobei die genauen Werkstoffkennwerte festgelegt werden. Die verfügbaren Materialien ähneln sich bei den verschiedenen Anlagenherstellern.</p> |  | |
| 4. | <p>Im vierten Schritt wird die spezifische Anlage ausgewählt, wobei beispielsweise der tatsächliche Bauraum und Lieferzeiten beachtet werden. Es können dabei eigene Anlagen und Dienstleistungen in Betracht gezogen werden.</p> |  | |

Bild 4.5: Katalog: i. Methodik zur Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens (Ausschnitt) in Anlehnung an [WEISS15]

Katalog: Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen (k.)

Die Lösungsprinzipien werden in Form einer tabellarisch strukturierten Lösungsbibliothek dargestellt und nach allgemeinen Funktionen sortiert. Die Bibliothek beinhaltet prinzipielle Lösungen, die in additiv gefertigten Bauteilen bereits eingesetzt wurden und ist literaturbasiert erstellt. Sie soll den Einsatz geänderter Lösungsprinzipien und somit die AM-gerechte Gestaltung unterstützen (siehe Kapitel 3.8). Die Sammlung erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, kann aber zur Inspiration während eines Entwicklungsprozesses dienen und Fixierungen von Konstrukteuren auf bekannte Gestaltungen (Designfixierung) entgegenwirken. Eine Erweiterung der Lösungsbibliothek ist mithilfe der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Nutzungsfunktionen der Onlineplattform möglich.

Die Struktur der Lösungsbibliothek entspricht der von Konstruktionskatalogen (vgl. Kapitel 2.8). Sie baut auf der Beschreibung in [WEISS16] auf und ist nach allgemein anwendbaren Funktionen (siehe Kapitel 3.8.2) gegliedert. Übergeordnet findet eine Gliederung in die allgemeinen Größen – Stoff, Energie und Information – statt, welche von technischen Systemen umgesetzt werden können. Durch diesen Aufbau kann der Zugriff auf die Lösungsprinzipien problemneutral erfolgen. Für die Navigation zu den Lösungsprinzipien wird, wie in Bild 4.6 dargestellt, ein übergeordneter Katalog mit zweidimensionaler Gliederung eingeführt.

| Allgemeine Funktionen technischer Produkte und ihre Symbole | | | | | | | |
|---|-------------|------------------------|--------|----------|---------|------------|-------------|
| | | Allgemeine Operationen | | | | | |
| | | Speichern | Leiten | Umformen | Wandeln | Verknüpfen | |
| | | | | | | Summativ | Distributiv |
| Allgemeine Größen | Energie | | | | | | |
| | Stoff | | | | | | |
| | Information | | | | | | |

Bild 4.6: Übergeordneter Katalog der Informationsgruppe k. Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen (Ausschnitt)

In den Lösungskatalogen ist dem Lösungsprinzip für die additive Fertigung (AM-Design) im Zugriffsteil der Darstellung jeweils eine Gestaltung für konventionelle Fertigungsverfahren gegenübergestellt (konventionelles Design). Dies soll die schnellere Verständlichkeit und den Gedanken eines Konstruktionstransfers fördern. Außerdem ist die

Funktionsweise des Lösungsprinzips erläutert (Funktionsbeschreibung AM-Lösung). Sofern möglich, sind im Zugriffsteil weiterhin Konstruktionshinweise ausgeführt und diese verfahrensgenau beschrieben.

Die Kataloge der Informationsgruppe k. „Lösungsprinzipien ...“ sind im Anhang (A.20 bis A.27) dargestellt. In Bild 4.7 ist ein enthaltenes Lösungsprinzip des Lösungskatalogs zum „Energie leiten“ abgebildet (Ausschnitt zusammengefügt).


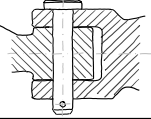
| Gliederungsteil | | | | Hauptteil | Zugriffsteil | | | |
|-----------------|---------------------|-----------|-----|---|---|---|---|--|
| | | | | AM-Design | Konventionelles Design | Funktionsbeschreibung AM-Lösung | Allgemeine Konstruktionshinweise | Anmerkungen / konstruktive Hinweise nach Fertigungsverfahren |
| 1 | 2 | 3 | Nr. | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| ENERGIE LEITEN | Mechanische Energie | Scharnier | 2 |  |  | Limitierung auf einen rotatorischen Freiheitsgrad | Seitlich lassen sich Anschläge integrieren, die den Bewegungsraum einschränken. | |

Bild 4.7: Beispielhaftes Lösungsprinzip aus der Informationsgruppe k. „Lösungsprinzipien ...“

Das dargestellte Lösungsprinzip beruht auf der Verschränkung von Biegebalken zur Verbindung zweier Bauteilelemente. Es kann damit eine rotatorische Relativbewegung zwischen den beiden Elementen ermöglicht werden, wobei durch die Biegebalken eine Rückstellkraft aufgebracht wird. Die Anzahl der Biegebalken und ihre Dimensionierung beeinflussen die Größe der Rückstellkraft. Ein Beispiel für den Einsatz dieses Lösungsprinzips ist in Bild 4.8 dargestellt. Die abgebildete Drehhandhabe ändert ihre Form je nach aufgebraachter Handkraft. Im Ausgangszustand hat sie eine annähernd runde Form und ermöglicht damit eine schnelle Drehbewegung. Wird nun von der Hand eine höhere Anpresskraft auf die seitlichen Wippen aufgebracht, ermöglichen die verschränkten Biegebalken ein Verkippen der seitlichen Wippen relativ zum Grundkörper. Es entsteht ein Formschluss zwischen Hand und Drehhandhabe (vgl. auch Kapitel 5.1).

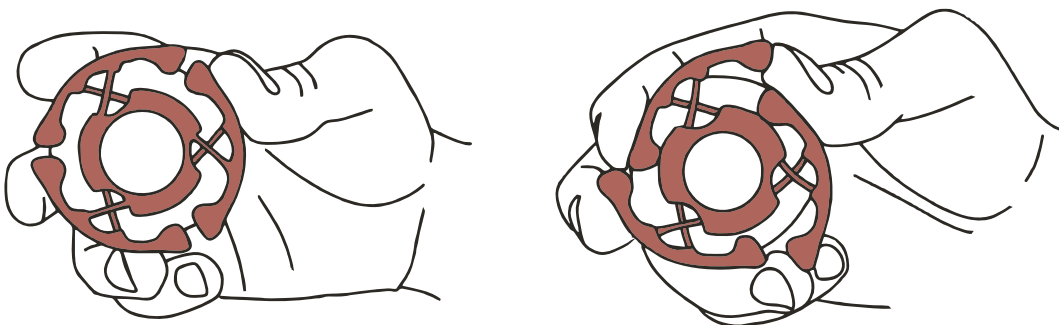


Bild 4.8: Anwendung des Lösungsprinzips verschränkter Biegebalken der Lösungsbibliothek in einer Drehhandhabe nach Patent [Universität Stuttgart17]

Katalog: Vorgehen zur Topologieoptimierung ... (n.)

Auch wenn die Topologieoptimierung durch viele Tools unterstützt werden kann, sind für ein gutes Ergebnis das Vorgehen und die Entscheidungen des Konstrukteurs ausschlaggebend. Die Beschreibung eines Vorgehens erfolgt in der Informationsstruktur in Anlehnung an [WEISS17] und wird in neun Schritten beschrieben (siehe Bild 4.9). Die Arbeitsschritte sind jeweils mit einem erwarteten Ergebnis beschrieben und in ihrer Abfolge Iterationen unterworfen. In der Ausführung der Schritte wird Bezug zu den Randbedingungen der additiven Fertigung wie z. B. der Auflösung der Fertigungsverfahren, Strukturgrößen, einzuhaltenden Konstruktionsregeln und der Anisotropie genommen.

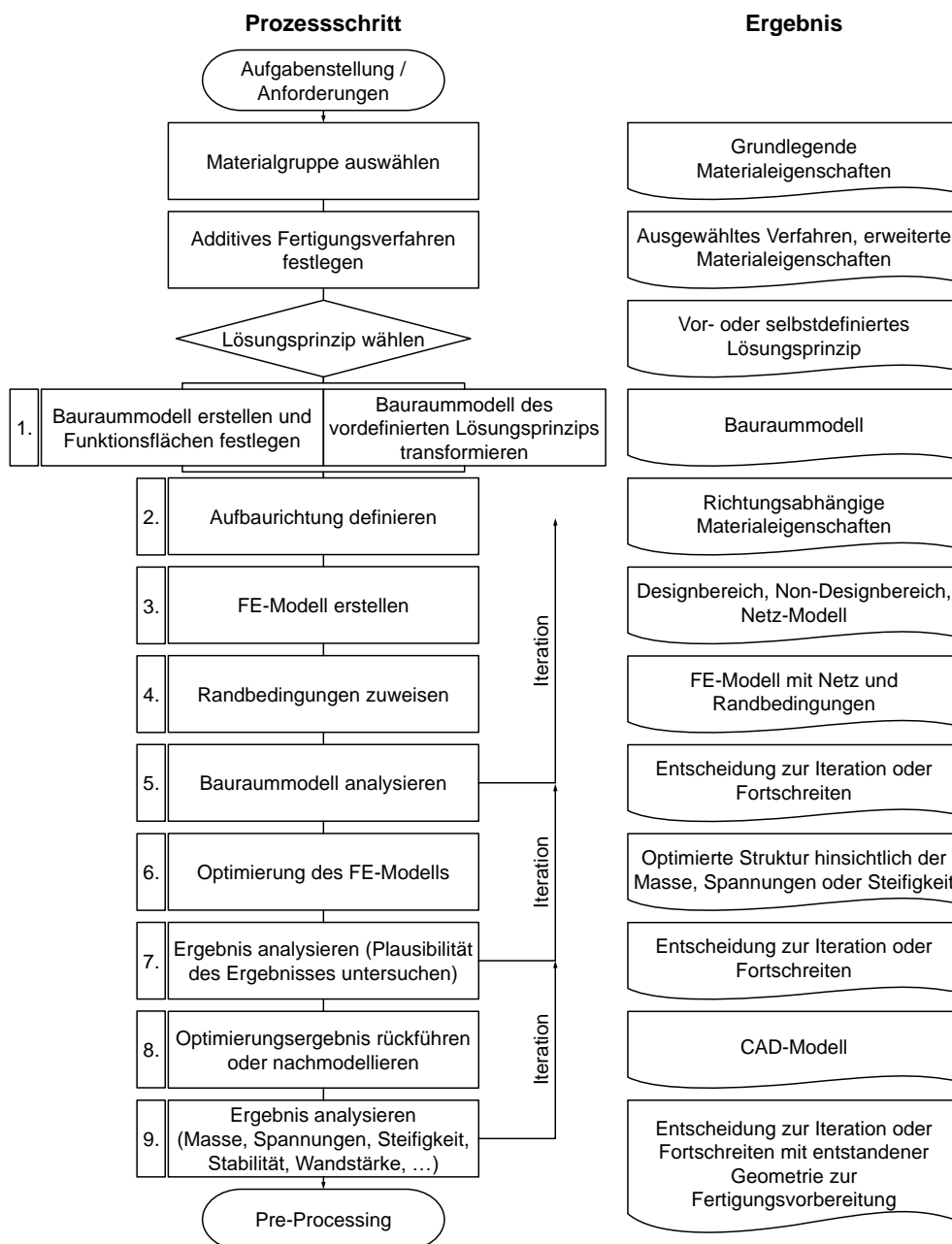


Bild 4.9: Katalog: n. Vorgehen zur Topologieoptimierung ... (Ausschnitt des Katalogs) nach [WEISS17]

Stellenangaben der weiteren Informationsgruppen

Die Informationsgruppen, die nicht in diesem Kapitel beschrieben wurden, sind im Anhang nochmals als Screenshot der Plattform abgebildet. In Tabelle 4.3 ist zusammengefasst, an welchen Stellen die Inhalte der Informationsgruppen innerhalb dieser Dissertation aufgeführt sind.

| | Informationsgruppen | Abgebildet in Anhang | Auszüge in Kapitel |
|-----------|--|----------------------|--------------------|
| | Kurzbeschreibung Informationsplattform | --- | 4.2.1 |
| a. | Allgemeine Grundlagen additiver Fertigungstechnologien | A.1 | 3 und 3.1 |
| b. | Grundlagen zu Oberflächen und Fertigungsgenauigkeiten additiver Fertigungsverfahren | A.2 | 3.4 |
| c. | Funktionsintegration / Bauteilintegration bei der additiven Fertigung | A.3 | 3.8.2 |
| d. | Additive Fertigungsverfahren | A.4 - A.15 | 3.1 |
| e. | Indirekte Fertigungsprozessketten mit AM | --- | 4.3 |
| f. | Grundlagen zu Entwicklungskosten und Entwicklungszeiten bei der additiven Fertigung | A.16 | 3.3 |
| g. | Checkliste zweckmäßiger (wirtschaftlicher) Einsatz | A.17 | 3.6 |
| h. | Checkliste AM-gerechte Gestaltung | A.18 | 3.8.3 |
| i. | Methodik zur Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens | --- | 4.3 |
| j. | Bauteilorientierung im Bauraum der Fertigungsanlage | A.19 | --- |
| k. | Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen | A.20 - A.27 | 4.3 |
| l.a | Konstruktionsrestriktionen /-regeln allgemein mit Erläuterung | A.28 | 3.5 |
| l.b | Konstruktionsrestriktionen nach Fertigungsverfahren für FLM, LS, LBM | A.29 | --- |
| m. | Grundlagen der Softwareanwendung für die Bauteiloptimierung / Fertigungsoptimierung | A.30 | --- |
| n. | Vorgehen zur Topologieoptimierung - Anpassung von Lösungsprinzipien an bauteilspezifische Randbedingungen | A.31 | 4.3 |
| o. | Grundlagen zu Produktindividualisierung und -personalisierung bei der additiven Fertigung | A.32 | --- |
| p. | Werkstoffe und deren Eigenschaften | A.33 - A.37 | --- |
| q. | Übersicht Nachbearbeitung (Post-processing) | A.38 | --- |
| r. | Datenprozesse der additiven Fertigung | A.39 | 3.2 |
| s. | Ökologische Betrachtungen der additiven Fertigung | A.40 | --- |
| t. | Dienstleister additive Fertigung | A.41 | --- |
| u. | Konventionen und geometrische Grundlagen | A.42 | --- |
| | Quellen | A.43 | --- |
| Farbcode: | in diesem Kapitel (Abschnitt 4.3) | | |
| | Auszüge im Stand der Technik (Kapitel 3) | | |
| | nur im Anhang | | |

Tabelle 4.3: Stellenangaben der Informationsgruppen in dieser Dissertation

4.4 Datenerhebung über Nutzertätigkeiten auf der Onlineplattform

Da Produktentwicklungsprozesse in hohem Maße durch ihren Informationsumsatz charakterisiert sind (siehe Kapitel 2.7), ergibt sich die Möglichkeit, aus dem Informationszugriff auf die erstellte Informationsstruktur Rückschlüsse auf das Vorgehen innerhalb des Entwicklungsprozesses zu ziehen. Die Onlineplattform bietet hierzu innerhalb der durchgeführten Versuche die Möglichkeit der Aufzeichnung der Nutzertätigkeiten. Mit den so gewonnenen Daten lassen sich Erkenntnisse hinsichtlich der Nutzung der Informationen während der Versuche ableiten und auch die bereitgestellten Funktionen der Plattform selbst evaluieren.

Zum einen werden die Nutzungsfunktionen für den Informationszugriff nach Kapitel 4.2.2 aufgezeichnet, also die Benutzung der Zugriffsleiste, die Suchfunktion und die Nutzung von Verlinkungen. Zum anderen werden Daten über die Betrachtung der Informationen auf der Plattform erhoben. Hierbei werden die Betrachtungen der einzelnen Informationszellen anhand der Position des Mauszeigers erfasst. Die Validität dieser Aufzeichnungsmethode wurde vor Durchführung der Versuche zur Plattformnutzung (Beschreibung erfolgt in Kapitel 5) erprobt und ihre Gültigkeit innerhalb der Versuchsdurchführung bestätigt. Der Aufbau der Informationskataloge aus einzelnen Zellen verleitet Plattformnutzer dazu, den aktuell betrachteten Inhalt jeweils mit der Computermaus zu fixieren. Der Prozess des Fixierens des aktuell betrachteten Bereichs mit der Maus wird durch die farbliche Hervorhebung der anvisierten Zelle unterstützt. Die aufgezeichneten Daten spiegeln mit genügender Genauigkeit das Nutzerverhalten wider, um dieses aus den Daten kataloggenau rekonstruieren zu können.

Ein Betrachtungsvorgang wird erst ab einer Verweildauer der Computermaus über einer Zelle von über 1000 ms aufgezeichnet. Es werden dadurch Fehlauzeichnungen bei schnellen Zeigerbewegungen verhindert. Dieser untere zeitliche Schwellenwert für die Betrachtung von Informationen wurde für die Onlineplattform durch Vorversuche ermittelt. Die Datenaufnahme erfolgt für den Zeitpunkt und die Dauer der Informationsbetrachtung. Die aufgezeichneten Daten können für einzelne Personen oder Gruppen sowie für einzelne Zellen, einzelne Kataloge, einzelne Informationsgruppen oder auch auf die komplette Informationsstruktur bezogen ausgewertet werden.

In Bild 4.10 sind exemplarisch die aufgezeichneten Daten eines Plattformnutzers anhand eines Ausschnitts des bereits in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Katalogs „Kurzbeschreibung ...“ visualisiert. Insgesamt entfallen 157 aufgezeichnete Daten auf den abgebildeten

Bereich. Die Färbung der Zellen spiegelt die relative Häufigkeit der Zugriffe wieder. Die Zellen mit dem höchsten Blauanteil weisen die häufigsten Zugriffe auf, die hellgrauen Zellen die wenigsten.

| Folgende Inhalte sind auf der Plattform aktuell verfügbar: | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Allgemeine Grundlagen additiver Fertigungstechnologien | Additive Fertigungsverfahren (Verfahrensübersicht und Steckbriefe spezifischer Verfahren) | Grundlagen zu Entwicklungskosten und Entwicklungszeiten bei der additiven Fertigung | Checkliste zweckmäßiger (wirtschaftlicher) Einsatz | Bauteilorientierung im Bauraum der Fertigungsanlage |
| Konventionen und geometrische Grundlagen | Dienstleister additive Fertigung | Datenprozesse der additiven Fertigung | Checkliste AM-gerechte Gestaltung | Konstruktionsrestriktionen nach Fertigungsverfahren für FLM, LS, LBM |
| Übersicht Nachbearbeitung (Post-processing) | Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen | Werkstoffe und deren Eigenschaften | Methodik zur Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens | Vorgehen zur Topologieoptimierung - Anpassung von Lösungsprinzipien an bauteilspezifische Randbedingungen |
| Grundlagen zu Oberflächen und Fertigungsgenauigkeiten additiver Fertigungsverfahren | Funktionsintegration / Bauteilintegration bei der additiven Fertigung | Grundlagen zu Produktindividualisierung und -personalisierung bei der additiven Fertigung | Grundlagen der Softwareanwendung für die Bauteiloptimierung / Fertigungsoptimierung | Konstruktionsrestriktionen / -regeln allgemein mit Erläuterung |
| | Indirekte Fertigungsprozessketten mit AM | Ökologische Betrachtungen der additiven Fertigung | Quellen | |

Farbcode: keine Zugriffe häufigste Zugriffe

Bild 4.10: Visualisierte Anzahl erhobener Daten eines Plattformnutzers anhand eines Ausschnitts des Katalogs „Kurzbeschreibung ...“

Die Darstellung in Bild 4.10 zeigt, dass eine Unterscheidbarkeit zwischen benachbarten Zellen gewährleistet ist, da blaue und graue Zellen direkt aneinander angrenzen. Weiterhin weisen die beiden Zellen ohne Inhalt auch den geringsten Blauanteil auf (keine Zugriffe). Dieses Muster bestätigt sich auch bei anderen Nutzern und anderen Katalogen. Die Auswertung der aufgenommenen Nutzungsdaten erfolgt in der weiteren Untersuchung nicht zellgenau, sondern auf Ebene der Informationsgruppen. Auch wenn das Verhalten hinsichtlich der Führung des Mauszeigers nutzerspezifisch variiert, reicht die Datengenauigkeit aus, um Aussagen zur Informationsnutzung auf Ebene der Informationsgruppen zu treffen.

5 Evaluation der Informationsstruktur

Die aus dem Stand der Technik in Kapitel 3.11 hergeleiteten Fragestellungen werden in einem Versuch erforscht. Es werden hierbei die Wichtigkeit der Inhalte der Informationsstruktur und das Vorgehen bei der Entwicklung eines additiv zu fertigenden Bauteils analysiert sowie die Informationsstruktur und ihre Bereitstellung auf einer Onlineplattform evaluiert. Der Versuch erfolgt unter Aufzeichnung von Nutzungsdaten, deren Interpretation in Kapitel 5.4 erläutert wird. Zudem erfolgt eine Umfrage zu den Inhalten der Informationsstruktur und zu den Nutzungsfunktionen der Plattform.

5.1 Versuchsaufbau

Die nachfolgenden Untersuchungen beruhen auf der Bearbeitung von Konstruktionsaufgaben unter Nutzung der Informationsstruktur auf der Onlineplattform. Der Versuch wurde zunächst mit 44 Studierenden, mit 13 akademischen Mitarbeitern und mit fünf Konstrukteuren aus dem industriellen Umfeld durchgeführt. Kapitel 6.2 beschreibt einen weiteren Schritt der Evaluation mit 18 Konstrukteuren aus dem industriellen Umfeld für eine geänderte Informationsdarbietung. Für die Versuchsdurchführung wurden zwei Problemstellungen erarbeitet, die im Folgenden mit A und B bezeichnet sind. Die Studierenden bearbeiten bei der Versuchsdurchführung beide Problemstellungen, die akademischen Mitarbeiter und die Konstrukteure aus der Industrie nur die Problemstellung A. Der Ablauf des Versuchs für die Studierenden ist in Bild 5.1 dargestellt. Die Versuchsbestandteile, die von den übrigen Versuchsteilnehmern durchgeführt wurden, sind grau eingefärbt.

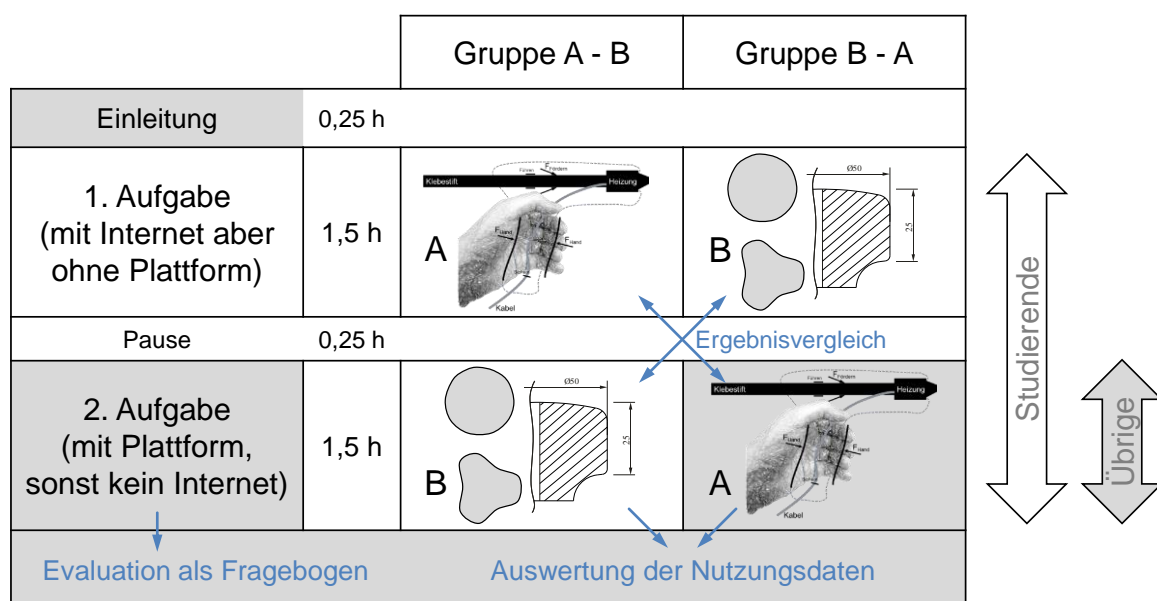


Bild 5.1: Ablauf des Versuchs und Auswertungsmöglichkeiten für die verschiedenen Probandengruppen

Vor Bearbeitungsbeginn werden sowohl die Problemstellungen als auch die Nutzungsfunktionen der Onlineplattform und die enthaltenen Informationsgruppen in einer ca. 15-minütigen Vorstellung kurz erläutert.

Alle Versuche finden an einem PC-Arbeitsplatz statt. Die Zeichnungen werden mit Zeichenmaterial auf einem DIN A3-Papier angefertigt. Die Zeichenmaterialien sowie die Problemstellungen werden den Teilnehmern zu Versuchsbeginn zur Verfügung gestellt.

Alle Studierenden haben zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung eine Grundausbildung in Konstruktionslehre und größtenteils auch eine Vertiefung im methodischen Entwickeln von Produkten durchlaufen. Sie führen beide Konstruktionsaufgaben (A und B) nacheinander durch, wobei nur die zweite Problemstellung mithilfe der Informationsstruktur auf der Onlineplattform gelöst wird. Bei der Bearbeitung der ersten Problemstellung ist freier Internetzugang verfügbar, der Zugriff auf die Informationsstruktur der Onlineplattform ist allerdings nicht freigeschaltet. Dies hat den Zweck, dass ein Vergleich zur sonst häufig genutzten Informationssuche über Suchmaschinen im Internet erfolgen kann. Durch die Bildung von zwei Versuchsgruppen (Gruppe A - B und Gruppe B - A), welche die beiden Problemstellungen in umgekehrter Reihenfolge bearbeiten, wird zudem ein Vergleich zwischen dem Einfluss der Nutzung der elementaren Informationsstruktur auf der Plattform und Internetsuchmaschinen auf die Konstruktionsergebnisse möglich (siehe Kapitel 5.2).

Im Anschluss an die Bearbeitung der Konstruktionsaufgaben wird von den Versuchsteilnehmern ein Fragebogen ausgefüllt, mit dem die Unterstützung der Entwicklung durch die Plattform allgemein, die Wichtigkeit der verschiedenen Informationsgruppen und die Struktur der Inhalte evaluiert werden. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5.3 vorgestellt.

Die aufgezeichneten Nutzungsdaten, die während der Versuche mithilfe der Plattform aufgenommen wurden, lassen sich sowohl für die Studierenden- als auch für die Mitarbeiterversuche auswerten. Die Versuche in der Industrie wurden zwar unter den gleichen Voraussetzungen durchgeführt, allerdings stand hier die umfängliche Betrachtung der Inhalte der erarbeiteten Informationsstruktur und weniger das Lösen der Problemstellung in Form einer Zeichnung im Vordergrund. Aus diesem Grund und der vergleichsweise geringeren Teilnehmeranzahl werden die Versuchsdaten der Industrieteilnehmer nicht in die Auswertung der Entwurfsqualität in Kapitel 5.2 und in die Auswertung der erhobenen Nutzungsdaten in Kapitel 5.4 einbezogen.

Die Studierenden führen den Versuch im Rahmen eines Praktikums durch, dessen Teilnahme bestätigt wird. Es wird vor der Versuchsdurchführung eindeutig kommuniziert,

dass weder die Zeichnungsergebnisse, noch der Anteil der Plattformnutzung für das Bestehen des Versuchs relevant sind, sondern nur die Teilnahme am Versuch und die Tatsache, dass die Konstruktionsaufgabe bearbeitet wird.

Zur Förderung einer einheitlichen Zeichnungsgüte aller Probanden wird in der Vorstellung der Aufgabenstellungen zusätzlich die Darstellung in Bild 5.2 gezeigt.

Entwurfszeichnung - Zeichnungsgüte

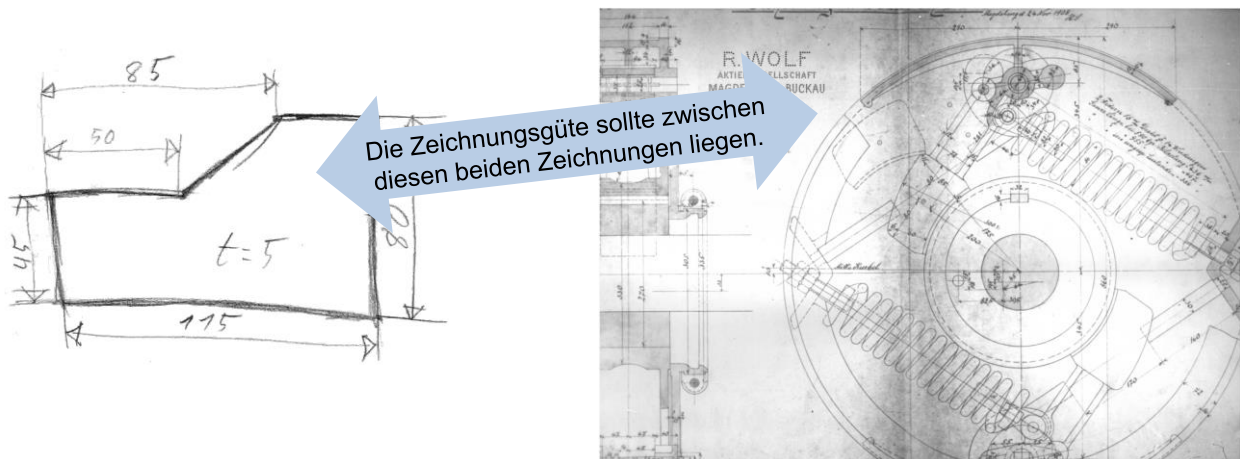


Bild 5.2: Darstellung zur Zeichnungsgüte

Anforderungen an die Problemstellungen

Um mit dem zuvor beschriebenen Versuchsaufbau die Informationsstruktur und die Bereitstellung auf der Onlineplattform evaluieren zu können, müssen die Problemstellungen einige Anforderungen erfüllen. Es werden folgende Randbedingungen für die Problemstellungen festgelegt:

- **Zeitliche Begrenzung:** Zum einen ist der Gesamtumfang der Bearbeitungszeit der Problemstellung begrenzt, um eine Evaluation mit einer Vielzahl von Probanden durchführen zu können. Zum anderen sollten beide Konstruktionsaufgaben in der gleichen Zeit bearbeitet werden können, um eine parallele Aufgabenbearbeitung zu ermöglichen, bzw. die Plattformnutzung während der Bearbeitung vergleichbar zu machen. Die Bearbeitung der Problemstellung sollte daher in einem zeitlichen Umfang von ca. 1,5 Stunden so erfolgen können, dass die verfügbare Zeit für die Mehrheit der Probanden knapp ausreicht.
- **Neuheit:** Mögliche Lösungen der Problemstellung sollten nicht allgemein bekannt sein. Stattdessen sollte die Problemlösung ein gewisses Maß an Eigenleistung erfordern. Dies umgeht die Gefahr der Aufgabenlösung durch die Probanden mit allgemein bekannten Lösungen, also solchen, wie sie für konventionelle Fertigungsverfahren geeignet wären. Weiterhin kann damit verhindert werden, dass

mögliche AM-spezifische Lösungen bereits in Austauschplattformen für CAD-Modelle, wie beispielsweise thingiverse.com oder libre3d.com gefunden werden können.

- **Problemkomplexität:** Die Aufgaben müssen einen gewissen Schwierigkeitsgrad für die Bearbeitung aufweisen, sodass ihre Lösung eines kreativen Vorgehens bedarf. Da die Versuche zur Evaluation der Plattform in Bezug auf Produktentwicklungsprojekte genutzt werden und diese sich zumeist durch eine hohe Komplexität auszeichnen, müssen auch die Problemstellungen diese Komplexität widerspiegeln. Der Schwierigkeitsgrad der Problemstellung sollte die Lösung durch die Probanden ermöglichen, dabei allerdings die Verarbeitung vieler Informationen, gemäß realer Entwicklungsprojekte, anregen.
- **Ähnlicher AM-Kontext:** Beide Problemstellungen sollten in einem ähnlichen Kontext der additiven Fertigung eingebettet sein. Sie sollten beispielsweise ungefähr gleiche Größendimensionen aufweisen und durch ähnliche kinematische Beziehungen zwischen ihren funktionserfüllenden Teilelementen gekennzeichnet sein.
- **Unabhängigkeit der Problemstellung:** Die Problemstellungen sollten unabhängig von der evaluierten Informationsplattform bearbeitet werden können, also so formuliert und dargestellt sein, dass keine Nutzung der Informationsplattform oder anderer Hilfsmittel zu deren Verständlichkeit notwendig ist. Weiterhin sollte die Informationsstruktur auch keine Inhalte bereitstellen, die speziell auf die Problemstellung zugeschnitten sind, also genau deren Bearbeitung im besonderen Maße unterstützt, und somit die Lösungen implizit schon vorgibt.
- **Eindeutigkeit der Problemstellung:** Die Problemstellung sollte in dem Maße eindeutig sein, dass keine Fehlinterpretation auftreten kann, bzw. keine zusätzlichen Informationen von der versuchsdurchführenden Person benötigt werden.

Problemstellungen

Zur Durchführung der Versuche nach dem in Bild 5.1 beschriebenen Ablauf wurden die beiden im Folgenden beschriebenen Problemstellungen verwendet. Die Konstruktionsaufgaben werden jeweils durch einen Titel und eine grafische Darstellung definiert und durch Anforderungen konkretisiert. Die Ziele, die während der Bearbeitung erreicht werden sollen, sind für beide Problemstellungen gleich. Es soll eine Entwurfszeichnung erstellt werden, die durch eine kurze Beschreibung zusätzlich erläutert wird. Zudem soll ein additives Fertigungsverfahren zur Herstellung definiert und die Aufbaurichtung angegeben werden. Die Dimensionen der Lösungen sind durch die Zukaufteile und Maßangaben bekannt, werden allerdings zusätzlich noch durch einen Ausdruck der grafischen Darstellung im Maßstab 1:1 vermittelt.

Problemstellung A: Heißklebepistole

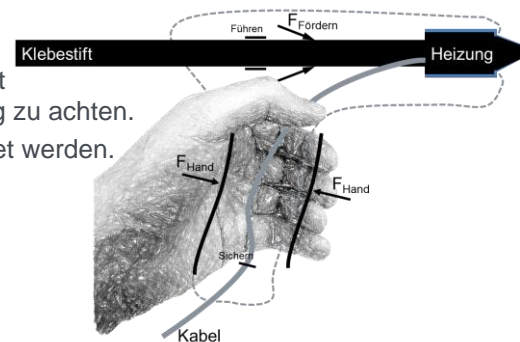
In Bild 5.3 ist die Beschreibung der Konstruktionsaufgabe dargestellt, wie sie für die Vorstellung vor Beginn des Versuchs verwendet und den Probanden jeweils ausgeteilt wurde.

Problemstellung A

ENTWICKLUNG EINER ERGONOMISCH PERSONALISIERBAREN HEIßKLEBEPISTOLE ZUR FERTIGUNG MITTELS ADDITIVER FERTIGUNGSVERFAHREN

- Anforderungen:

- Der Klebestift soll durch Handkraft in das Heizelement gefördert werden. Dabei ist auf ausreichende Führung zu achten.
- Das Stromkabel soll durch eine Sicherung zugentlastet werden.
- Integration aller Elemente in einem Gehäuse.
- Zukaufteile:
 - Heizeinheit mit Düse, Abmaße: \varnothing 20 mm, Länge 40 mm
 - Kabel: \varnothing 4 mm
 - Klebestifte \varnothing 11 mm, Länge 200 mm



- Ziele:

- Handskizzierte Lösung mit definierter Form und angegebenen Dimensionen aller Geometriemerkmale, sodass eine Überführung in CAD und anschließende Fertigung möglich ist.
- Kurze Beschreibung der Funktionsweise der Lösung.
- Wahl des genutzten additiven Fertigungsverfahrens.
- Angabe der Aufbaurichtung der Konstruktion mittels Koordinatensystem.

Bild 5.3: Problemstellung A: Heißklebepistole

Die abstrakte grafische Darstellung der Problemstellung ist vergrößert nochmals in Bild 5.4 dargestellt. Die Probanden entwickeln das Gehäuse einer Heißklebepistole, wobei die Gestaltung „AM-gerecht“ erfolgen soll und einige Zukaufteile vorgegeben sind. Der

Fokus bei der Bearbeitung liegt auf der Ausgestaltung des Mechanismus zur Förderung des Klebestifts in die Heizung. Dies wird in der Vorstellung der Aufgabenstellung betont. Die Personalisierung des Handgriffs ist nachgeordnet zu betrachten und in der Lösung nur prinzipiell vorzusehen. Die Temperatur der äußeren Fläche der Heizung ist kleiner als 100°C anzunehmen.

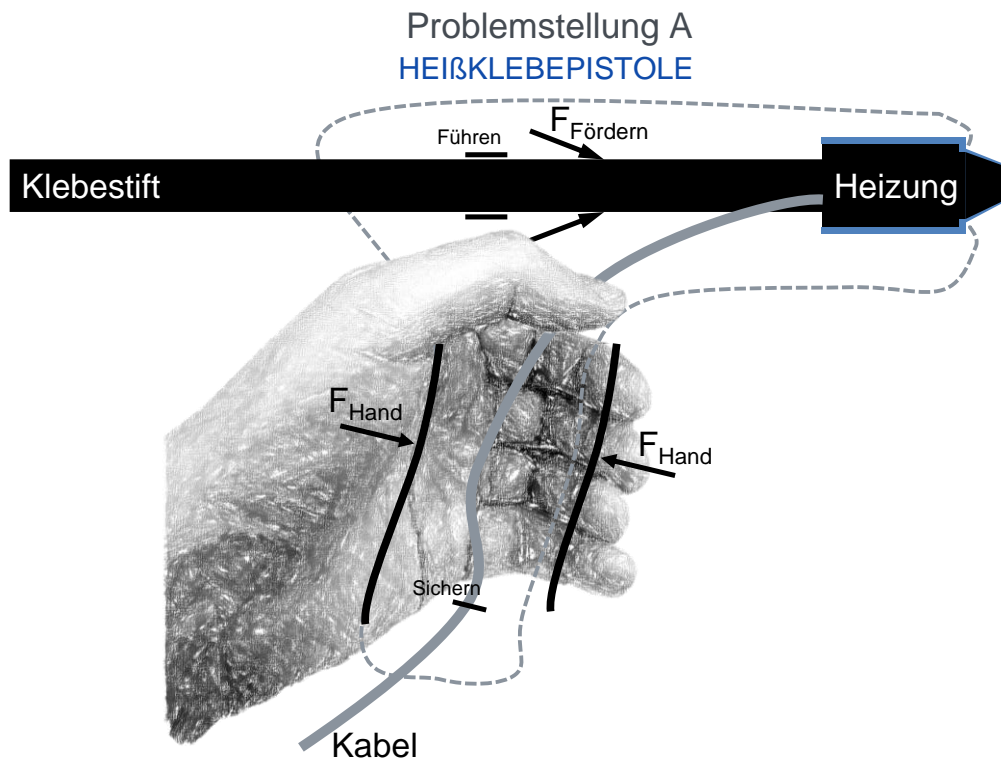


Bild 5.4: Problemstellung A – grafische Darstellung

Problemstellung B: Drehsteller

Die Beschreibung der Konstruktionsaufgabe Drehsteller ist in Bild 5.5 dargestellt. Auch die Problemstellung B wurde für die Vorstellung vor Beginn des Versuchs verwendet und den Probanden jeweils ausgeteilt.

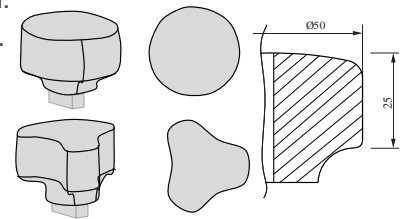
Es soll ein Drehsteller konstruiert werden, der je nach Nutzungsszenario seine Gestalt ändert. Für schnelle Drehaufgaben mit kleinen Kräften und Momenten soll der Drehsteller eine annähernd runde Form annehmen. Für Stellaufgaben mit einer hohen Momentübertragung, wie dies zum Beispiel beim Lösen von Klemmverbindungen mit Schraubmechanismus der Fall ist, soll der Drehsteller durch Gestaltveränderung eine formschlüssige Kraftübertragung der Hand ermöglichen.

Problemstellung B

ENTWICKLUNG EINES ERGONOMISCH PERSONALISIERBAREN, ADAPTIVEN DREHSTELLERS ZUR FERTIGUNG MITTELS ADDITIVER FERTIGUNGSVERFAHREN

- Anforderungen:

- Für schnelle Drehaufgaben und kleine Übertragungskräfte soll die Gestalt des Drehstellers annähernd rund sein.
- Bei höheren Griffkräften auf den Drehsteller soll ein Formschluss ermöglicht werden, also die Gestalt des Drehstellers in ein abgerundetes Dreieck übergehen.
- Die Formänderung soll durch ein passives Prinzip erfüllt werden.
- Hauptmaße:
 - Außendurchmesser: $\varnothing 50$ mm, Griffhöhe: 25 bis 30 mm
 - Abtrieb des Drehmoments unten über Formteil



- Ziele:

- Handskizzierte Lösung mit definierter Form und angegebenen Dimensionen aller Geometriemerkmale, sodass eine Überführung in CAD und anschließende Fertigung möglich ist.
- Kurze Beschreibung der Funktionsweise der Lösung.
- Wahl des genutzten additiven Fertigungsverfahrens.
- Angabe der Aufbaurichtung der Konstruktion mittels Koordinatensystem.

Bild 5.5: Problemstellung B: Drehsteller

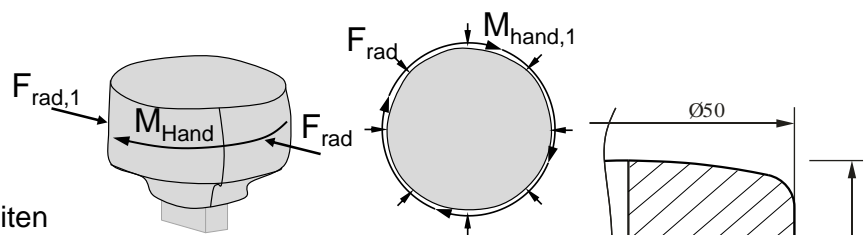
Die abstrakte grafische Darstellung der Problemstellung B ist vergrößert in Bild 5.6 dargestellt. Es werden hier die beiden Gestalten, die durch den Drehsteller für die Funktionserfüllung angenommen werden sollen, noch einmal anhand der vorherrschenden Kräfteverhältnisse genauer erläutert.

Problemstellung B

GESTALTVERÄNDERLICHER DREHSTELLER

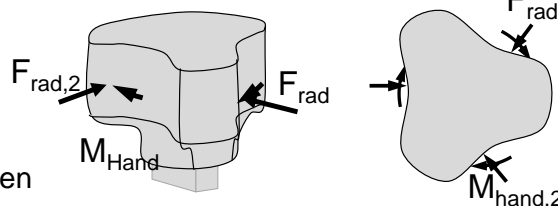
Runde Form:

- kleine Kräfte
- kleine Momente
- große Drehwinkel
- große Drehgeschwindigkeiten



Unrunde Form:

- große Kräfte
- große Momente
- kleine Drehwinkel
- kleine Drehgeschwindigkeiten



$$F_{\text{rad},2} > F_{\text{rad},1}$$

$$M_{\text{hand},2} > M_{\text{hand},1}$$

Bild 5.6: Problemstellung B – grafische Darstellung

Die Anforderung an die Unabhängigkeit der Problemstellung von den Inhalten der Plattform ist für beide Aufgabenstellungen gegeben. Auch wenn eine Lösung der Problemstellung B in Kapitel 4.3 (Bild 4.8) als Beispiel für die Anwendung eines Lösungsprinzips aus der Lösungsbibliothek (k. „Lösungsprinzipien ...“) vorgestellt wird, ist die Drehhandhabe aus Bild 4.8 nicht als Ganzes auf der Plattform enthalten. Der Konstruktionstransfer ist hier so groß, dass keiner der Probanden in den Versuchen eine ähnliche Lösung entwickelt hat.

Beide beschriebenen Problemstellungen wurden in Vorversuchen mit akademischen Mitarbeitern auf Erfüllung der zuvor beschriebenen Anforderungen überprüft. In der Versuchsdurchführung zeigt sich, dass sowohl der Umfang der Problemstellungen als auch die Komplexität der Probleme den zuvor beschriebenen Anforderungen genügen und die Evaluation der Informationsstruktur in dem beschriebenen Versuchsaufbau gut durchführbar ist. Nur wenige Versuchsteilnehmer (< 10 %) haben nach den 1,5 Stunden Bearbeitungszeit entweder ein unzureichendes Ergebnis erbracht oder waren schon vor der angesetzten Zeit mit der Konstruktion fertig.

5.2 Versuchsergebnisse zur Entwurfsqualität

Als Ergebnis des Konstruktionsprozesses entstanden Zeichnungen unterschiedlicher Güte. Die Durchsicht der Zeichnungen zeigt, dass alle Probanden die Problemstellung sowohl verstanden, also auch eingehend bearbeitet haben. Sie weisen allerdings starke Schwankungen in der Ergebnisgüte auf. Im Folgenden sind zwei Lösungen für die Problemstellung A abgebildet. Die Zeichnung in Bild 5.7 ist ohne die Plattform, die Zeichnung in Bild 5.8 mit der Plattform entstanden.

Beide Lösungen bestehen aus vollständigen Entwurfszeichnungen und einer zugehörigen Beschreibung. Sie zeigen einen Detaillierungsgrad auf, der die Funktionsweise vollständig erkennen lässt. Im ersten Beispiel (Bild 5.7), das ohne Plattform entstanden ist, lässt sich allerdings der Einfluss der Suche im Internet erkennen. Die Gestaltung ist nicht AM-gerecht. Es wurde kaum Funktionsintegration betrieben oder auf Einhaltung der Konstruktionsrestriktionen geachtet. Vielmehr erinnert die Darstellung an eine Konstruktion für den Spritzguss, die aus vielen zu montierende Einzelteilen besteht. Die Konstruktion ähnelt stark einem Bild, das online zu finden ist, und kann somit als ein Beispiel für Designfixierung auf konventionelle Fertigungsverfahren angesehen werden.

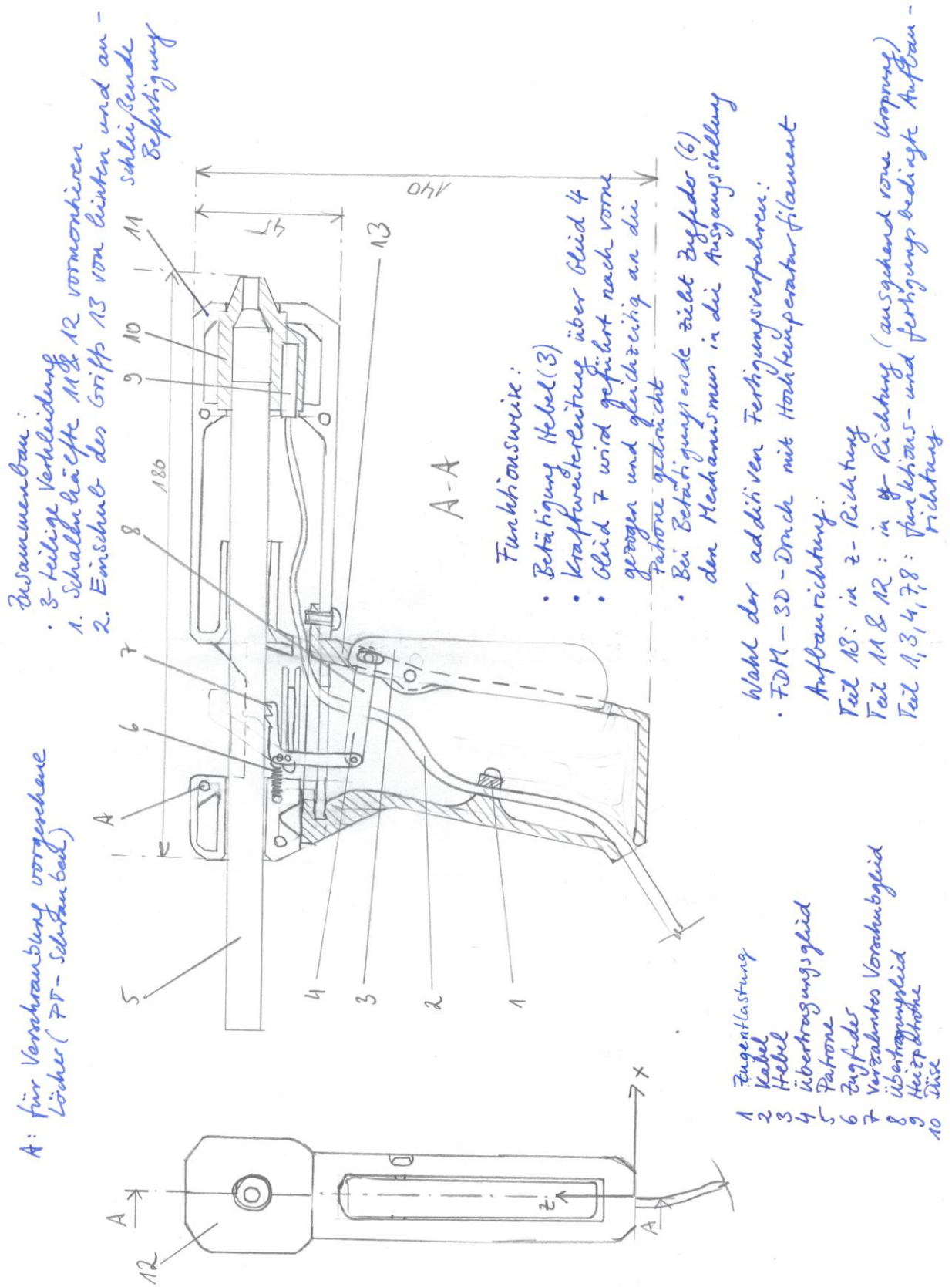


Bild 5.7: Beispielhafte Lösung ohne Nutzung der Informationen der Onlineplattform

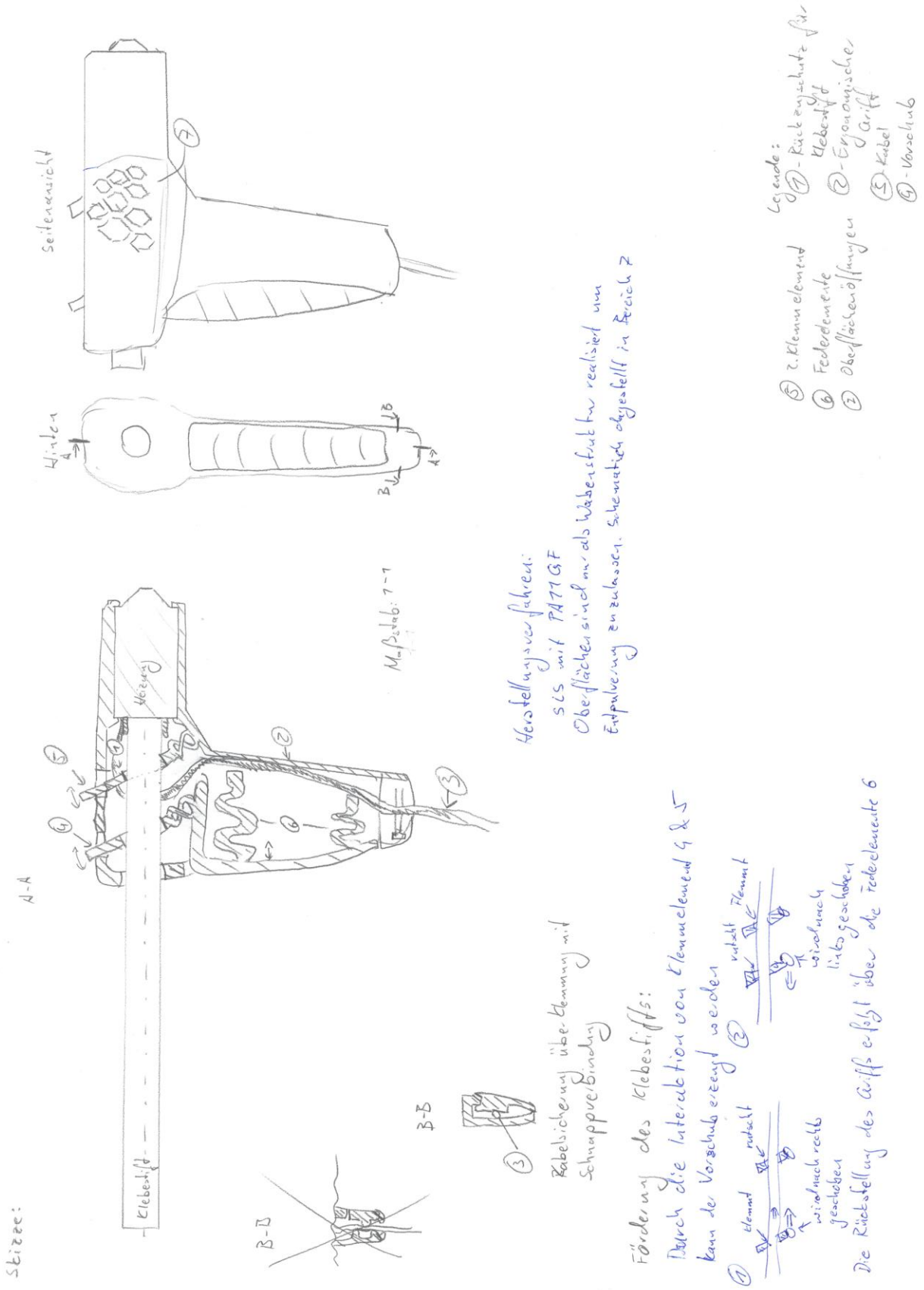


Bild 5.8: Beispielhafte Lösung mit Nutzung der Informationen der Onlineplattform

Die Lösung in Bild 5.8, die unter Zuhilfenahme der Informationen der Plattform erstellt wurde, stellt in den Punkten Funktionsintegration und Fertigbarkeit eine deutlich bessere Gestaltung für AM dar. Die komplette Konstruktion kann als ein Bauteil gefertigt werden. Die Montage der Heizung und des Kabels erfolgt von vorne, wobei das Kabel nach erfolgter Durchführung im unteren Abschnitt durch Verklebungen fixiert wird. Die Einleitung der Förderkraft erfolgt über Verschiebung des hinteren Teils des Griffs. Dieser ist mittels federnder Zwischenelemente am Rest des Gehäuses gelagert. Im oberen Bereich verklebt sich der Klebestift bei Betätigung des Hebels in einer Art mitgedruckten Schlaufe und wird somit in die Heizung gefördert. Ein Rückfördern wird durch eine zweite Schlaufe, die weiter vorne angebracht ist, verhindert. Die Schlaufen sind über verschränkte Biegebalken an den anderen Bauteilen drehbar gelagert. Durch die aus dem Gehäuse herausragenden Verlängerungen der Schlaufen kann der Klebestift freigegeben werden. Auch wenn die Drehpunkte der beiden Schlaufen für die volle Funktionsfähigkeit der Lösung leicht nach links versetzt angeordnet werden müssten, stellt die Lösung doch ein gutes Konzept einer Heißklebepistole für die additive Fertigung dar. Wie bei dem Ergebnis ohne Plattformnutzung sind auch in diesem Konzept Einflüsse der genutzten Informationen erkennbar.

Genau wie in den beiden beschriebenen Beispielen zeigt die qualitative Analyse der anderen hier nicht vorgestellten Zeichnungen Bestandteile einer Designfixierung. Die Abbildung von Lösungsbestandteilen, die durch das jeweilige Medium zur Informationssuche gefunden werden (Internetsuche oder Informationsstruktur), sind in Zeichnungen beider Versuchsteile zu erkennen. Es lässt sich daraus allerdings nur schließen, dass das jeweils genutzte Medium zur Informationssuche einen Einfluss auf die entstehende Lösung hat. Unter der Voraussetzung, dass die Inhalte der in dieser Dissertation vorgestellten Informationsstruktur speziell auf eine AM-gerechte Gestaltung zugeschnitten sind, spiegeln somit auch die Versuchsergebnisse, die unter Nutzung der Informationsstruktur entstehen, bessere Lösungen für AM wider, als die Ergebnisse ohne die Informationsstruktur. Da sich aus dem Ergebnisvergleich keine Aussagen hinsichtlich der Güte der Unterstützung durch die Informationsstruktur ableiten lassen, wird an dieser Stelle auf die Beschreibung einer quantitativen Analyse der Unterschiede der Ergebnisse verzichtet.

5.3 Ergebnisse der Evaluation mit Fragebogen

Durch die Auswertung der Fragebögen, die nach der Versuchsdurchführung ausgefüllt wurden, lassen sich die Unterstützung der Entwicklung allgemein sowie die Struktur der Inhalte und die Wichtigkeit verschiedener Informationsgruppen evaluieren. Für die Studierenden sind die Ergebnisse vor dem Hintergrund einzuordnen, dass sie vorab eine Problemstellung ohne die Unterstützung der Informationsplattform, dafür aber mit der Möglichkeit zur Internetrecherche, gelöst haben. Für die Konstrukteure aus dem industriellen Umfeld und die akademischen Mitarbeiter ist bei der Beantwortung der Fragen hingegen kein Vergleich zu der vorhergehenden Bearbeitung einer Konstruktionsaufgabe möglich. Die Einschätzung zur Beantwortung der Fragen für den Versuch bezieht sich hier rein auf ihr Vorwissen und ihre Erfahrungen aus anderen Entwicklungsaufgaben.

Zunächst werden die Berufserfahrung und die Expertise der Probanden (44 Studierende, 13 akademische Mitarbeiter und fünf Konstrukteuren aus dem industriellen Umfeld) im Bereich AM erfragt (siehe Bild 5.9).

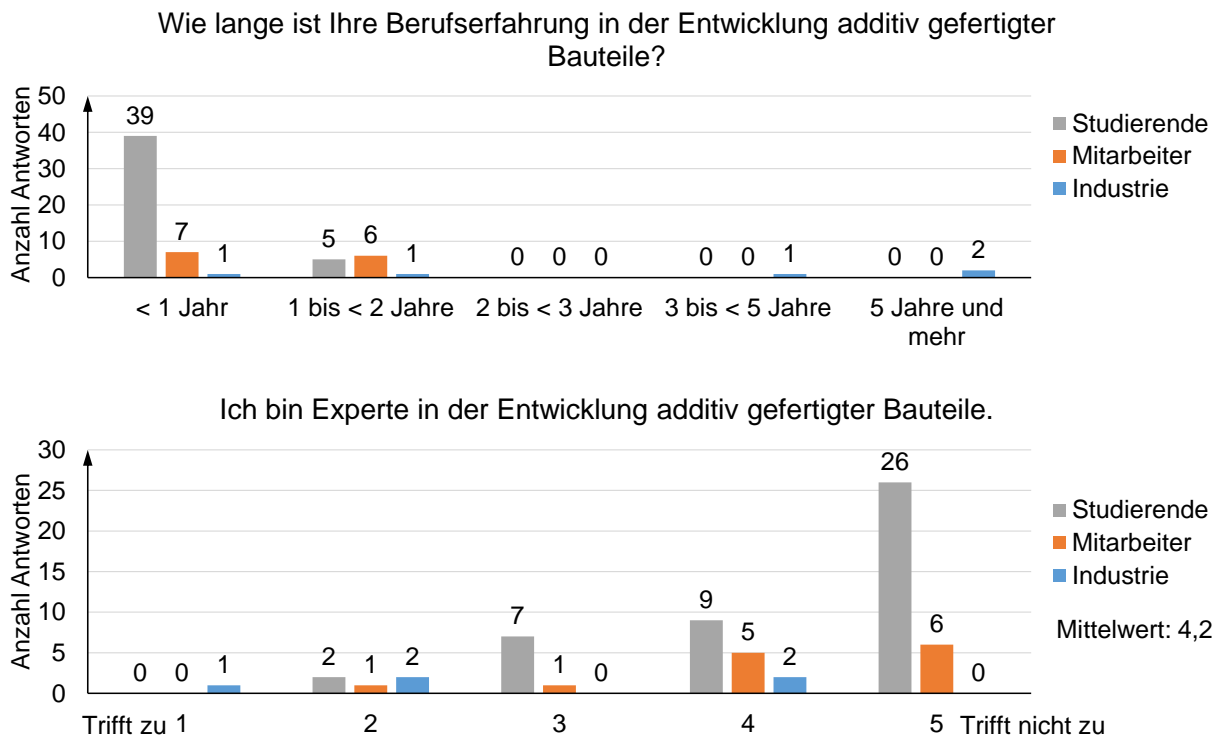


Bild 5.9: Berufserfahrung und Expertise der Probanden in der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile

Nur zwei der Probanden haben eine Berufserfahrung im Bereich der additiven Fertigung von mehr als 5 Jahren. Die Mehrzahl der Probanden gibt eine Berufserfahrung von unter einem Jahr an. Dies spiegelt sich auch in der Selbsteinschätzung der Expertise wider.

Weitere Fragen beziehen sich auf die Unterstützung des Entwicklungsprozesses (siehe Bild 5.10).

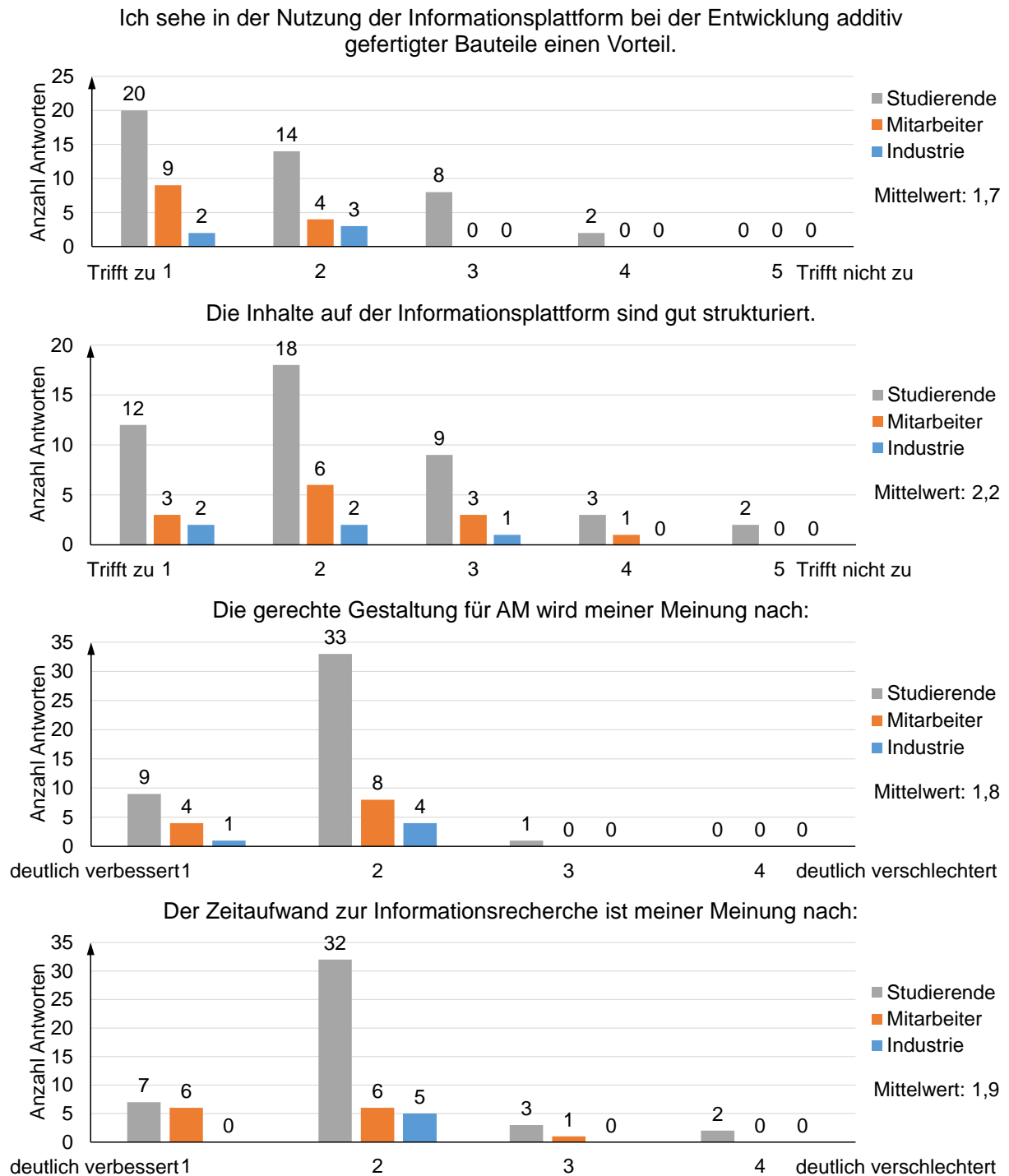


Bild 5.10: Evaluationsergebnisse zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses

Es zeigt sich, dass die Mehrzahl der Probanden einen Vorteil in der Nutzung der Informationsplattform sieht und auch die Strukturierung der Informationen eher als gut einschätzt. Sowohl die gerechte Gestaltung für AM als auch der Zeitaufwand zur Informationsrecherche werden durch den Einsatz der Informationsplattform als verbessert wahrgenommen.

Die Einschätzung der Probanden hinsichtlich der Aufbereitung der Informationen in der elementaren Informationsstruktur zeigt die Darstellung in Bild 5.11.

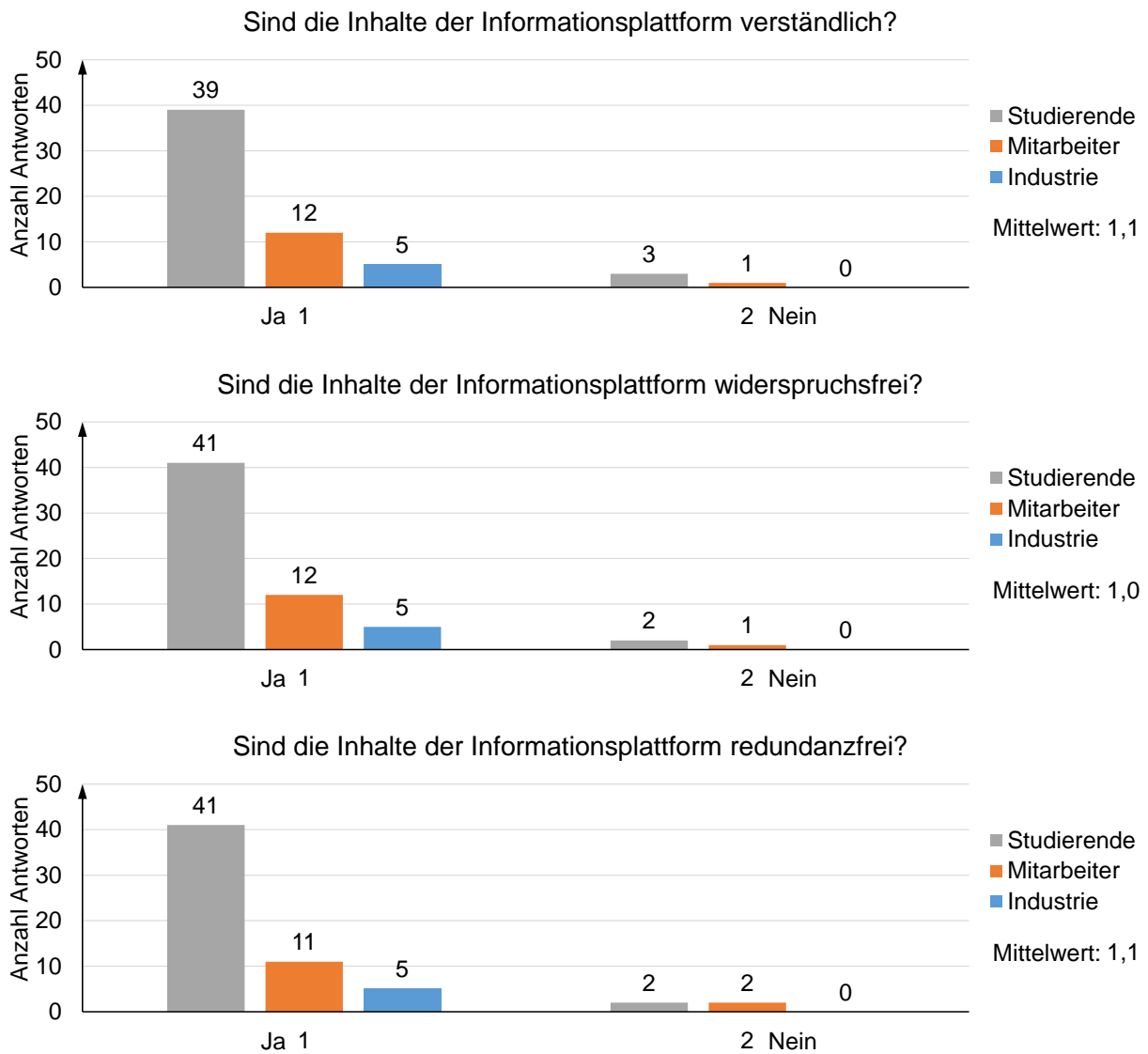


Bild 5.11: Evaluationsergebnisse zur Aufbereitung der Informationen in der elementaren Informationsstruktur

Die Fragen nach der Verständlichkeit, Widerspruchsfreiheit und Redundanzfreiheit der Informationen, die während des Versuchs bereitgestellt wurden, werden von den Probanden überwiegend mit „Ja“ beantwortet. Durch die eindeutige Tendenz der Probandenantworten kann davon ausgegangen werden, dass die inhaltliche Aufbereitung der elementaren Informationsstruktur in den genannten Punkten kaum Verbesserungsbedarf aufweist.

Die nächsten Fragen beziehen sich direkt auf die Informationsbereitstellung über die Onlineplattform (siehe Bild 5.12).

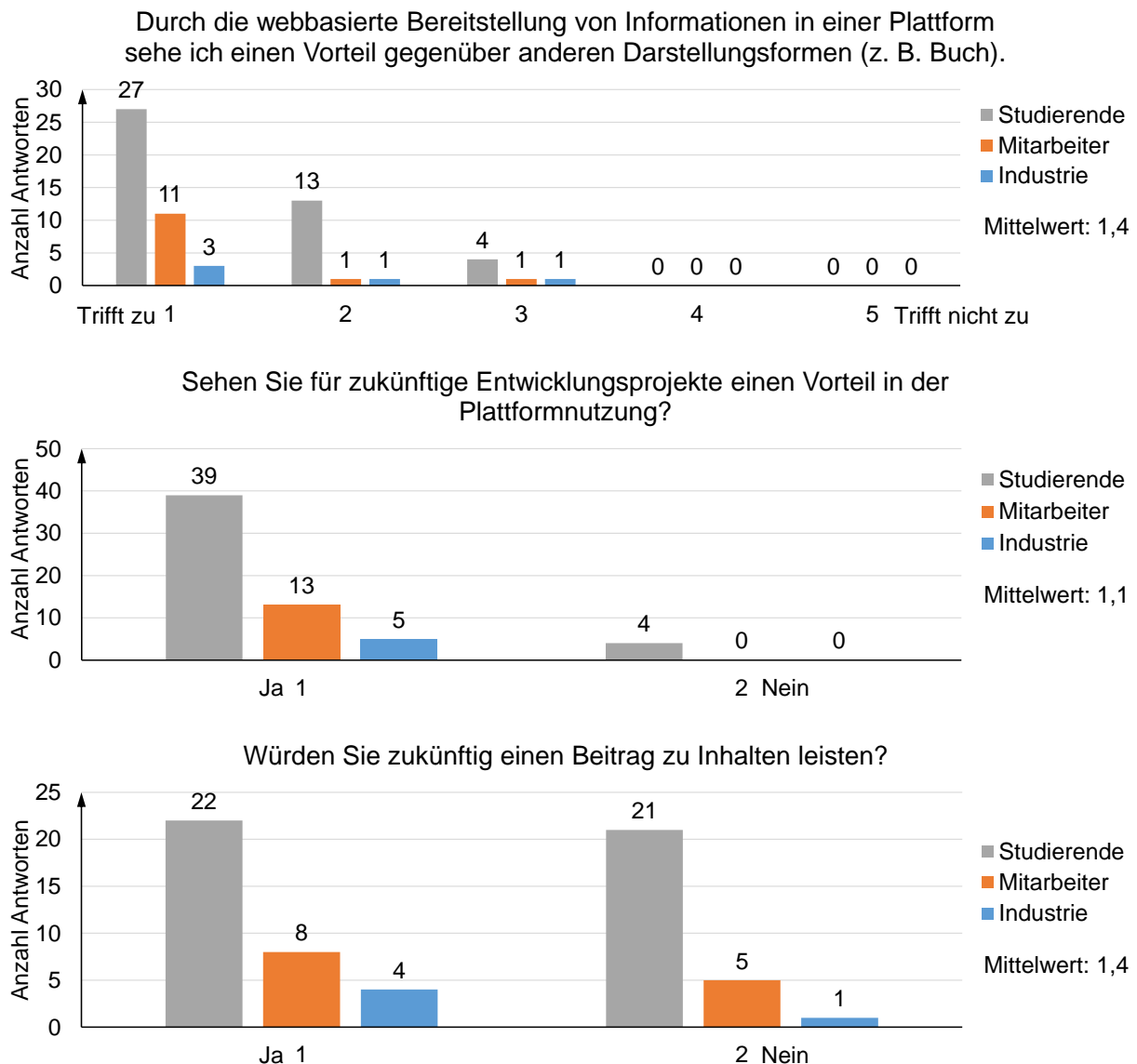


Bild 5.12: Evaluationsergebnisse zur Bereitstellung der Informationsstruktur auf einer Onlineplattform

Das Darstellungsmedium einer Onlineplattform für die unterstützenden Informationen wird als sehr positiv bewertet. Auch in Bezug auf die mögliche zukünftige Nutzung der Plattform in Entwicklungsprojekten gibt es einen hohen Zustimmungsanteil. Die Einbringung von Inhalten in die Plattform bzw. deren Aktualisierung wird hingegen nur von der Hälfte bejaht.

In Bezug auf die Wichtigkeit der Nutzungsfunktionen der Onlineplattform ergibt sich aus den Fragebögen die Auswertung in Bild 5.13.

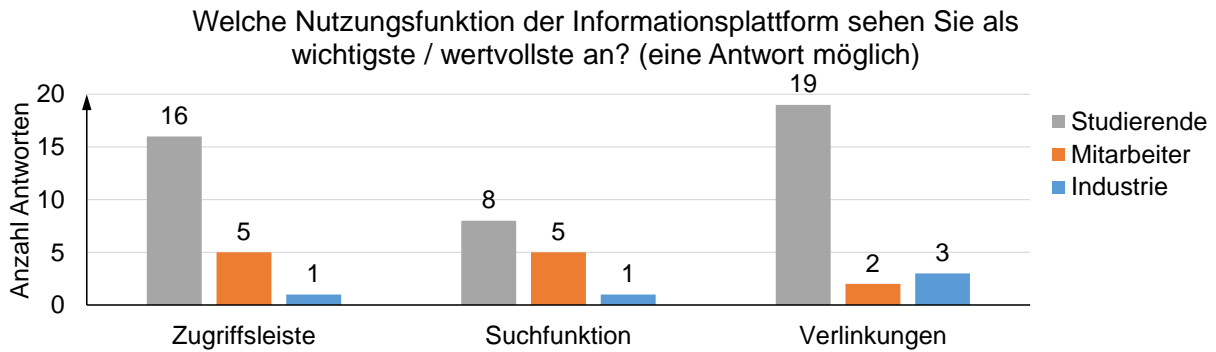


Bild 5.13: Evaluationsergebnisse zur Wichtigkeit der Nutzungsfunktionen der Plattform

Die Zugriffsleiste und die Verlinkungen werden hier als wichtiger wahrgenommen als die Suchfunktion.

Unter der Annahme, dass die Wichtigkeit der Zugriffsfunktionen mit der Häufigkeit ihrer Nutzung zusammenhängt, kann die Einschätzung der Wichtigkeit in Bild 5.13 mit den aufgezeichneten Nutzungsdaten in Bild 5.14 verglichen werden. Mithilfe dieses Vergleichs lässt sich bestätigen, dass die Suchfunktion tatsächlich weniger häufig genutzt wurde und somit am wenigsten wichtig ist. Das Verhältnis zwischen Zugriffsleiste und Verlinkungen erscheint hier allerdings anders und ist zu Gunsten der Zugriffsleiste verschoben.

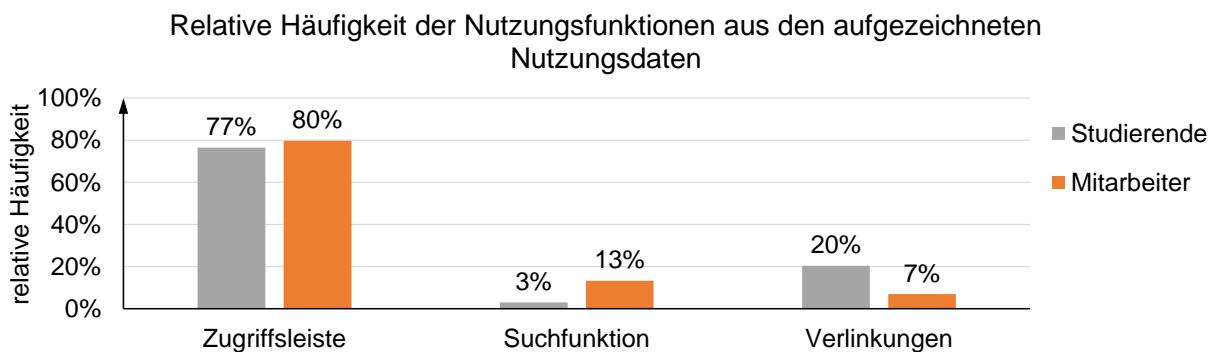


Bild 5.14: Auswertung der Nutzungsdaten zur Wichtigkeit der Nutzungsfunktionen der Plattform

Weiterhin wird über den Fragebogen die Wichtigkeit einzelner Informationsgruppen erfasst. Bild 5.15 gibt die Ergebnisse der Umfrage in sortierter Reihenfolge wieder.

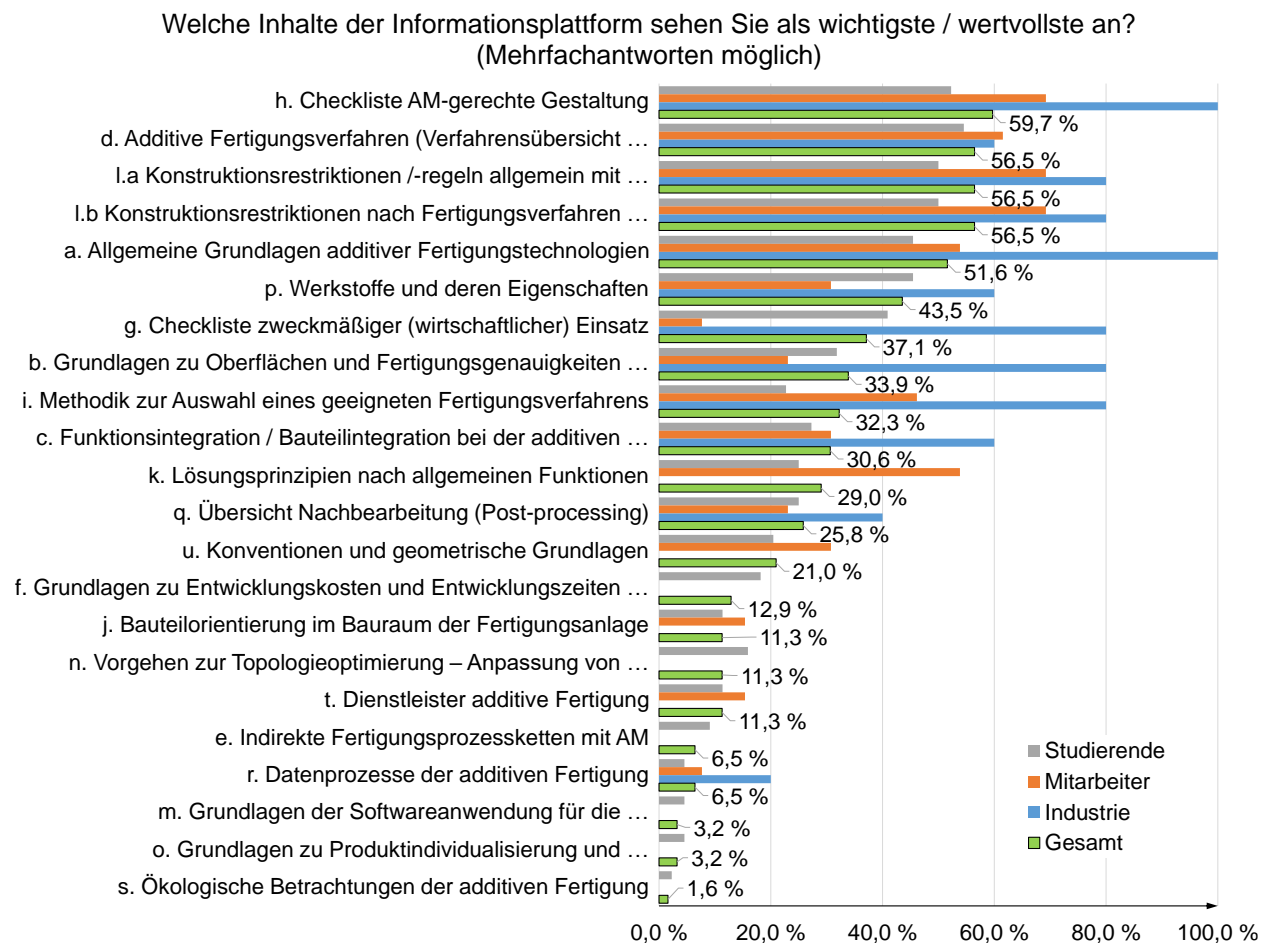


Bild 5.15: Evaluationsergebnisse zur Wichtigkeit der einzelnen Informationsgruppen

Die Sortierung erfolgt anhand der zusammengeführten Daten von Studierenden, akademischen Mitarbeitern und Konstrukteuren aus der Industrie. Die Darstellung in Bild 5.15 lässt erkennen, dass die Tendenz für alle Gruppen übereinstimmt. Die überzeichnete Abbildung der Tendenz für die Konstrukteure aus der Industrie ist auf deren geringe Anzahl zurückzuführen. Ein Vergleich der Wichtigkeit der Informationsgruppen mit den aufgezeichneten Nutzungsdaten der Informationsgruppen erfolgt in Kapitel 5.4.

5.4 Versuchsergebnisse zu AM-spezifischer Informationsnutzung

Die aufgezeichneten Nutzungsdaten werden hinsichtlich der Personenabhängigkeit, Häufigkeiten, Abfolgen und der Dauer diskutiert. Die Auswertung erfolgt für die Versuche mit Studierenden und akademischen Mitarbeitern. Die Versuche mit Industrievertretern fanden zwar unter den gleichen Grundvoraussetzungen statt, durch ihre geringere Anzahl

sind die nutzungsbezogenen Auswertungsmöglichkeiten dieser Versuche allerdings limitiert. Der Fokus lag während der Durchführung auf den unter Kapitel 5.3 behandelten Punkten und war nicht ergebnisorientiert.

Insgesamt wurden während der Versuche mit Studierenden und Mitarbeitern 14.084 Zugriffsdaten aufgezeichnet, wobei 10.462 Zugriffe auf die 44 Studierenden und 3.622 Zugriffe auf die 13 Mitarbeiter entfallen. In Bild 5.16 ist die Anzahl der erhobenen Daten pro Proband dargestellt.

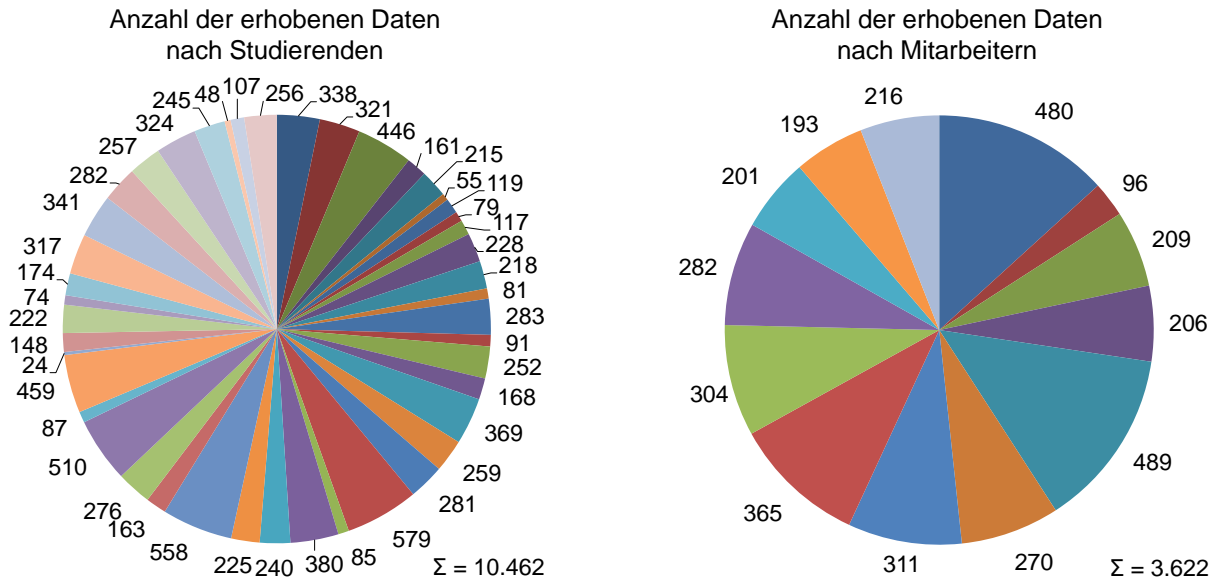


Bild 5.16: Verteilung der erhobenen Daten pro Proband

Bei den Studierendenversuchen liegt die Anzahl der aufgezeichneten Werte je nach Proband zwischen 24 und 579 (Mittelwert 238), bei den Mitarbeiterversuchen liegt sie zwischen 96 und 489 (Mittelwert 279). Die meisten Werte liegen im mittleren Bereich zwischen diesen Grenzen. In Bild 5.17 ist exemplarisch die Verteilung der Informationszugriffe auf die verschiedenen Informationsgruppen für einen Probanden dargestellt.

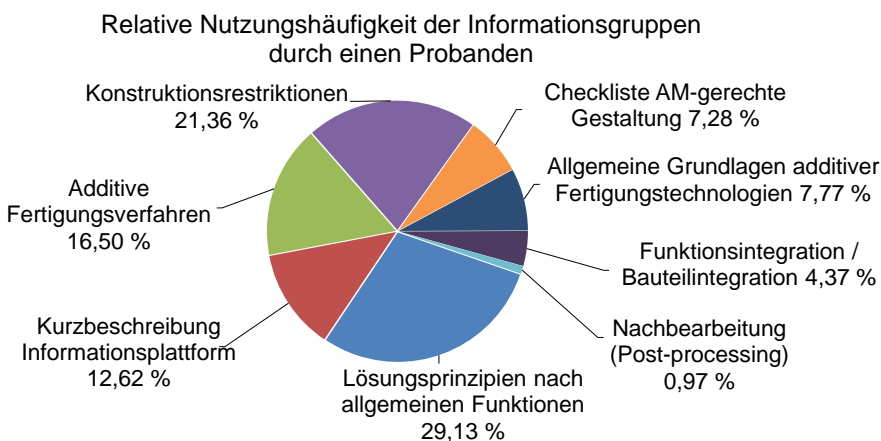


Bild 5.17: Exemplarische Verteilung der anteiligen Informationsnutzung durch einen Probanden

Der Proband hat während der Bearbeitungszeit acht verschiedene Informationsgruppen genutzt, wobei die „Kurzbeschreibung Informationsplattform“ mit ca. 13 % Nutzungsanteil zur Orientierung auf der Plattform Verwendung findet. Es sind allerdings auch Nutzungsmuster bei den Probanden zu finden, bei denen die Zugriffsleiste zur Orientierung verwendet wurde und bei denen daher der Nutzungsanteil der „Kurzbeschreibung Informationsplattform“ deutlich geringer ausfällt.

5.4.1 Häufigkeit der Informationsnutzung

Die aufgezeichneten Daten während der Versuchsdurchführung entfallen auf die verschiedenen Informationsgruppen der Plattform. Die Anzahl der genutzten Informationsgruppen pro Proband ist in Bild 5.18 dargestellt. Die Kataloge „Quellen“ und „Kurzbeschreibung Informationsplattform“ sind in der Darstellung enthalten, womit sich der Maximalwert der Darstellung von 23 ergibt.

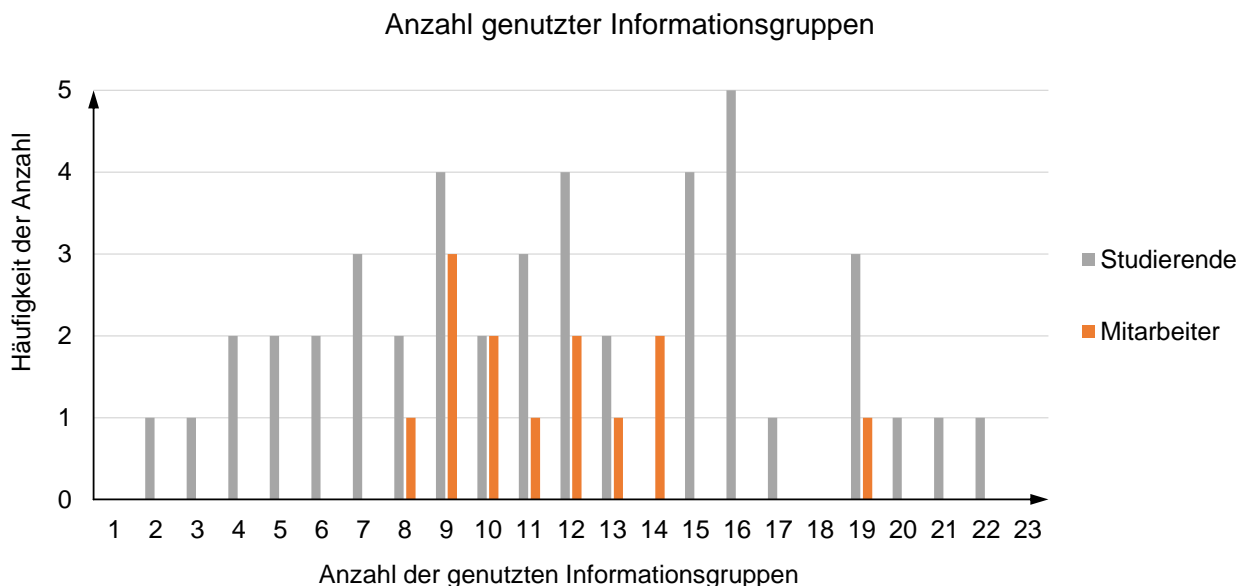


Bild 5.18: Anzahl der genutzten Informationsgruppen im Versuch

Nur ca. 10 % der Probanden in der Darstellung nutzen weniger als sechs Informationsgruppen, aber auch nur wenige Probanden (ca. 5 %) nutzen mehr als 19 Informationsgruppen. Die meisten Probanden zeigen eine Nutzung auf, die im mittleren Bereich liegt. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Informationsmenge, die insgesamt über die Plattform verfügbar ist, in einem guten Bereich liegt. Wäre die Anzahl der Informationsgruppen oder die enthaltene Informationsmenge deutlich zu hoch, würde sich die Mehrzahl der dargestellten Balken am linken Rand der Skala wiederfinden. Für eine zu geringe Anzahl an Gruppen oder einen zu geringen Informationsgehalt wäre eine Häufung der Balken im oberen Bereich der Skala zu erkennen.

Um die Nutzungshäufigkeit einzelner Informationsgruppen zu bewerten, wird für jeden Probanden die relative Häufigkeit der zugehörigen erhobenen Daten in Bezug auf die gesamt aufgenommenen Daten pro Proband berechnet. Aus diesen Werten kann, bei gleicher Gewichtung aller Probanden, der relative Anteil der jeweiligen Informationsgruppe an der Nutzung aller bereitgestellter Informationen ermittelt werden. In Bild 5.19 sind die relativen Anteile der verschiedenen Informationsgruppen für die Probandengruppen Studierende und Mitarbeiter der durchschnittlichen relativen Gesamtnutzung gegenübergestellt. Der Informationsgehalt der jeweiligen Informationsgruppe, in Form einer Zeichenanzahl oder enthaltenen Zellenfeldern, wird hierbei nicht berücksichtigt, da der Fokus auf der Nutzungshäufigkeit der definierten Gruppen als Elementarbestandteile der Konstruktionsunterstützung liegt.

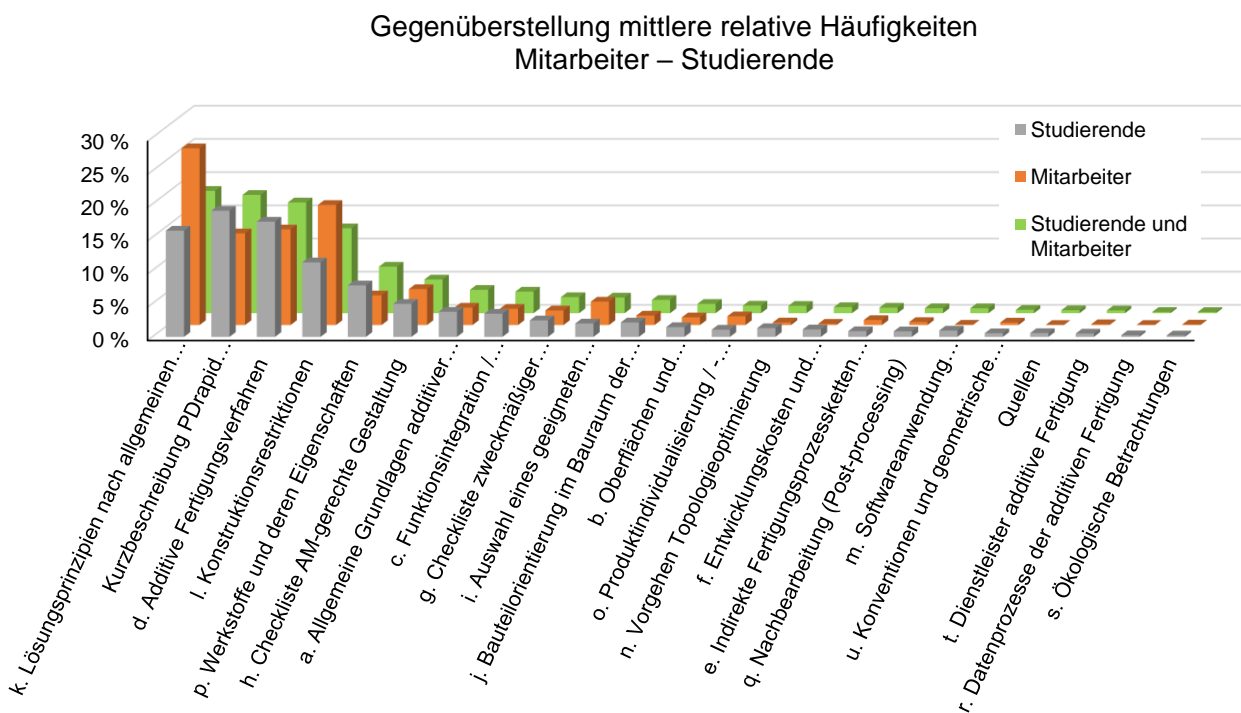


Bild 5.19: Nutzungsanteile verschiedener Informationsgruppen

Es ist zu sehen, dass sich die Nutzungshäufigkeiten einzelner Informationsgruppen zwischen den beiden Probandengruppen geringfügig unterscheiden, insbesondere bei den Informationsgruppen „k. Lösungsprinzipien ...“ und „l. Konstruktionsrestriktionen ...“. Insgesamt zeigen die Nutzungshäufigkeiten aber eine ähnliche Verteilung auf.

Ausgehend von der aufgezeigten Verteilung, lassen sich die verschiedenen Informationsgruppen in einer ABC-Analyse hinsichtlich ihrer Nutzungsanteile im Rahmen der Problemstellung kategorisieren (Tabelle 5.1). Es werden dazu die kombinierten Nutzungsdaten herangezogen, wobei die Kataloge „Kurzbeschreibung ...“ und „Quellen“

unbeachtet bleiben, da diese hauptsächlich zur Orientierung auf der Plattform und nicht als Unterstützung der Entwicklungstätigkeit dienen.

Die Informationsgruppen sind ihrer Nutzungshäufigkeit entsprechend sortiert, wobei durch die nachgestellte Zahl „(X)“ der Rang der Wichtigkeit der Informationsgruppen, welcher sich aus der Auswertung der Fragebögen (Bild 5.15 in Kapitel 5.3) ergibt, ersichtlich ist. Bei gleicher prozentualer Wichtigkeit in Bild 5.15 wird den Informationsgruppen der höhere Rang nachgestellt.

| Klasse A mit ca. 82 % des Nutzungsanteils: | | Klasse B mit ca. 14 % des Nutzungsanteils: | | Klasse C mit ca. 4 % des Nutzungsanteils: | |
|--|--------------|--|--|---|--------------|
| k. Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen (10.) | 1. Kategorie | g. Checkliste zweckmäßiger (wirtschaftlicher) Einsatz (6.) | 1. Kategorie | e. Indirekte Fertigungsprozessketten mit AM (17.) | 2. Kategorie |
| d. Additive Fertigungsverfahren (2.) | | i. Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens (8.) | | q. Nachbearbeitung (Post-processing) (11.) | |
| l. Konstruktionsrestriktionen (2.) | | j. Bauteilorientierung im Bauraum der Fertigungsanlage (14.) | | m. Softwareanwendung Bauteiloptimierung / Fertigungsoptimierung (19.) | |
| p. Werkstoffe und deren Eigenschaften (5.) | | b. Oberflächen und Fertigungsgenauigkeiten (7.) | | u. Konventionen und geometrische Grundlagen (12.) | |
| h. Checkliste AM-gerechte Gestaltung (1.) | | o. Produktindividualisierung / -personalisierung (19.) | t. Dienstleister additive Fertigung (14.) | | |
| a. Allgemeine Grundlagen additiver Fertigungstechnologien (4.) | | n. Vorgehen Topologieoptimierung (14.) | r. Datenprozesse der additiven Fertigung (17.) | | |
| c. Funktionsintegration / Bauteilintegration (9.) | | f. Entwicklungskosten und Entwicklungszeiten (13.) | s. Ökologische Betrachtungen (21.) | | |
| | | | 2. Kategorie | | |

Tabelle 5.1: ABC-Analyse der Nutzungsanteile und Kategorisierung der Wichtigkeit der Informationsgruppen

Das Ergebnis hinsichtlich der Nutzungsanteile der Informationen deckt sich größtenteils mit dem Ergebnis der Wichtigkeit des Evaluationsfragebogens aus Kapitel 5.3. Würde die ABC-Analyse auf Basis des Fragebogens erfolgen, ergeben sich zwar an mehreren Stellen geringfügige Unterschiede, es besteht aber lediglich bei den Informationsgruppen „q. Nachbearbeitung (Post-processing)“ und „o. Produktindividualisierung / -personalisierung“ eine größere Abweichung zwischen den prozentualen Zahlenwerten des Nutzungsanteils und der Nutzerbewertung der Wichtigkeit.

Durch eine Unterscheidung der Wichtigkeit der Informationen in nur zwei anstelle von drei Kategorien, ergibt sich eine Gruppierung, die sowohl der Auswertung der Nutzungshäufigkeit als auch der Nutzerbewertung der Wichtigkeit aus Kapitel 5.3. entspricht. Einzige Ausnahme stellt hier die Informationsgruppe „j. Bauteilorientierung im Bauraum der Fertigungsanlage“ dar. Es wird fortin die Kategorisierung der Wichtigkeit der Informationsgruppen mit Kategorie 1: „wichtige Informationen“ und Kategorie 2: „weniger wichtige Informationen“ verwendet, da diese Einordnung mit der Nutzerbefragung und auch mit der Auswertung der Nutzungsdaten konform ist.

5.4.2 Abfolge der Informationsnutzung

Der zeitliche Umfang der Informationsnutzung ist von den Randbedingungen der Konstruktionsaufgabe abhängig. Für jeden Probanden lässt sich die Nutzungsabfolge aus den aufgenommenen Daten auswerten. In Bild 5.20 ist für einen einzelnen Probanden exemplarisch die Abfolge der Zugriffe auf der Plattform auf verschiedene Kataloge dargestellt. Die 20 Kataloge im abgebildeten Fall gehören 13 Informationsgruppen an.

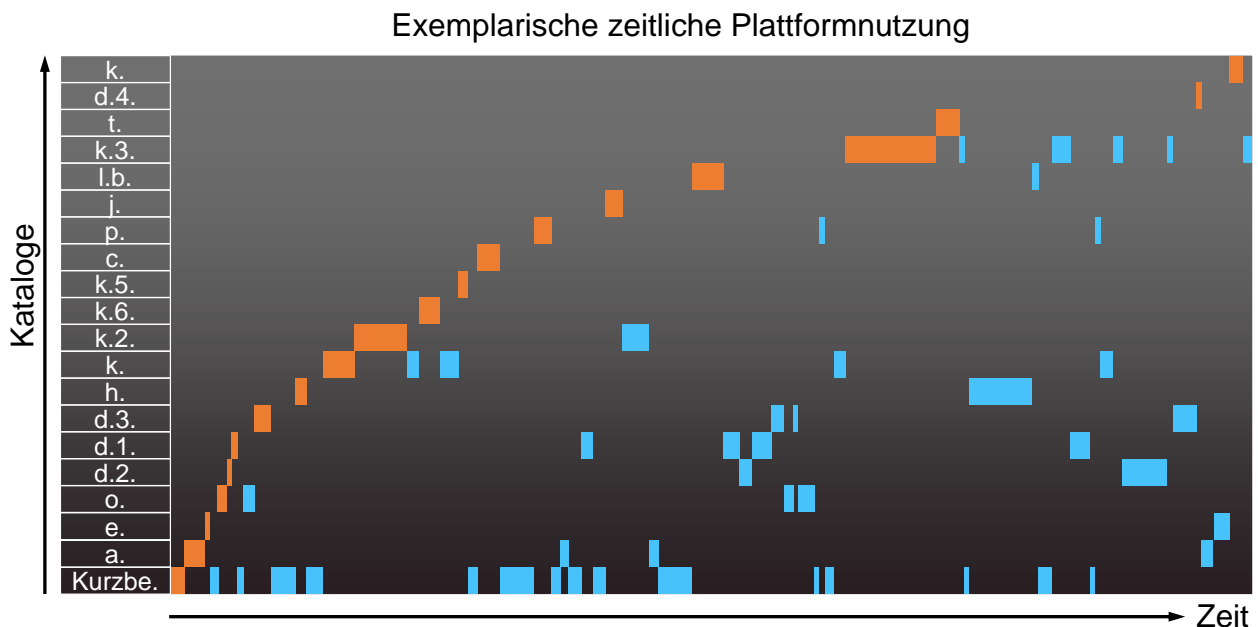


Bild 5.20: Exemplarische Plattformnutzung eines Probanden

Auf der vertikalen Achse sind die genutzten Kataloge des Probanden in der Reihenfolge des Erstzugriffs abgebildet. Die horizontale Achse gibt die Bearbeitungszeit während des Versuchs wieder. Es sind in der Darstellung nur Zeiten der Plattformnutzung aufgetragen. Zeitanteile, in denen andere Tätigkeiten ausgeführt wurden, wie zum Beispiel das Zeichnen, sind nicht berücksichtigt. Der oberste markierte Katalogzugriff zum jeweiligen Zeitpunkt (orange) gibt die Erstnutzung von Informationen wieder und begrenzt eine darin

eingeschlossene Fläche. Die Punkte innerhalb dieser Fläche stellen damit Iterationen in der Informationsnutzung dar. Der zuerst genutzte Katalog (unterste Zeile) ist in diesem Beispiel die Übersichtsseite über die Plattform „Kurzbeschreibung Informationsplattform“. Der Katalog „Kurzbeschreibung ...“ wurde vom Proband wiederkehrend genutzt, um auf weitere Informationen zuzugreifen. Die Darstellung visualisiert die Häufigkeit der Sprünge zwischen verschiedenen Katalogen. Die Frequenz der Informationszugriffe und die Häufigkeit der Informationszugriffe innerhalb der jeweiligen Katalognutzung sind nicht ersichtlich.

Die Häufigkeiten des Informationszugriffs innerhalb der Bearbeitungszeit der Problemstellung können für die generierten Daten der Probandengruppen Studierende und Mitarbeiter ausgewertet werden. In Bild 5.21 ist die Nutzungshäufigkeit der Informationsgruppen auf der Plattform über die Bearbeitungsdauer aufgetragen. Die Bearbeitungsdauer wird dazu für alle Probanden auf 1 normiert und die gemittelten Zugriffszeitpunkte auf die Inhalte der verschiedenen Informationsgruppen für jeden Probanden bestimmt. Für alle Probanden entsteht somit für jede genutzte Informationsgruppe ein Zeitpunkt zwischen 0 und 1. Alle so ermittelten Zugriffszeitpunkte auf die Informationsgruppen werden weiterhin gleichgewichtet behandelt und ihre Häufigkeit über die Bearbeitungszeit aufgetragen. Dies geschieht für die Zugriffszeitpunkte der Studierenden, für die der Mitarbeiter und der gemeinsamen Zugriffsdaten beider Probandengruppen. Von einer Gewichtung der Zugriffszeitpunkte nach Anzahl der genutzten Informationsgruppen wird aufgrund des ähnlichen Ergebnisses infolge der gleichmäßigen Verteilung ihrer Anzahl (siehe Bild 5.18) abgesehen.

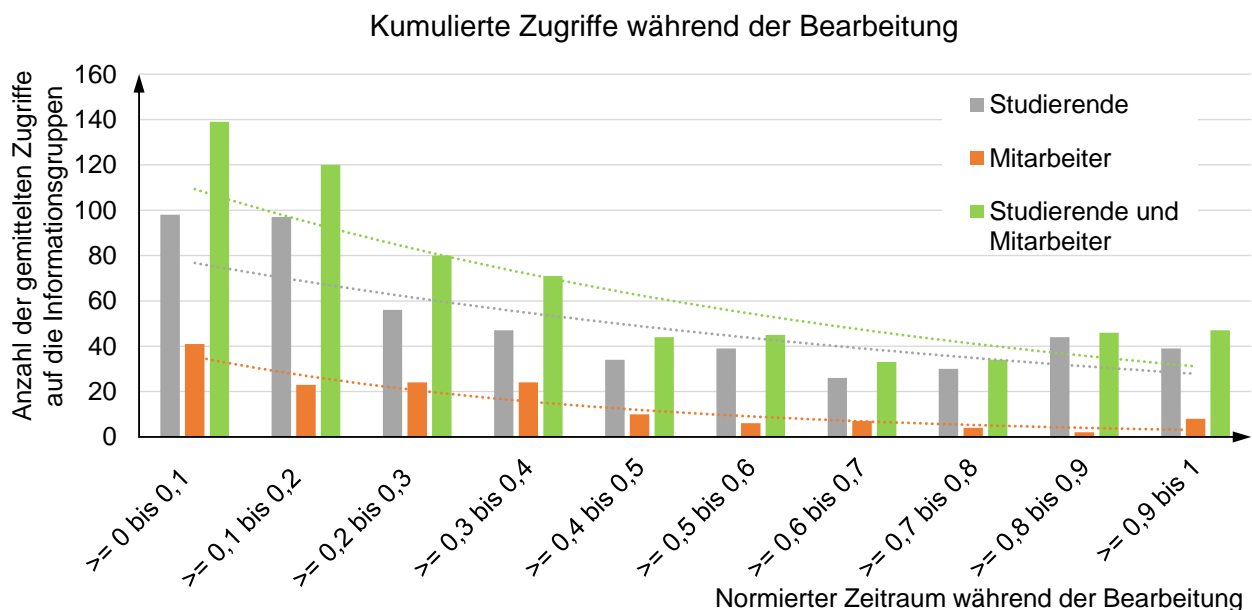


Bild 5.21: Zugriffe auf Informationen über der Bearbeitungsdauer der Problemstellung

Wie in der Abbildung zu sehen ist, ergibt sich für die Nutzungshäufigkeit der Informationsplattform über der Bearbeitungszeit im Rahmen der durchgeführten Versuche insgesamt eine abfallende absolute Häufigkeit der Zugriffe. Gegen Ende der Bearbeitungszeit steigt diese nochmals leicht an.

Dies entspricht auch den Beobachtungen während der Versuchsdurchführung:

- Zu Beginn der Bearbeitungszeit wird zunächst ein Überblick über die verschiedenen Informationen innerhalb der Plattform gewonnen. Hierbei wird diese vermehrt genutzt.
- Die Orientierungsphase geht fließend in die Planung und Konzeptionierung der Konstruktion über, wobei weiterhin viele Informationen gesammelt werden.
- Nach etwa einem Drittel der Zeit sind die meisten Probanden dabei das Konzept zu Papier zu bringen und die Informationszugriffe nehmen ab.
- Gegen Ende der Bearbeitungszeit wird während der Ausarbeitung die Konstruktion nochmals überprüft und optimiert, wobei ein leichter Anstieg der Informationsnutzung zu beobachten ist.

Zur weiteren Auswertung der Nutzungsdaten ist die mathematische Beschreibung ihrer Verteilung relevant. Die Verteilung der Informationszugriffe über der Bearbeitungszeit kann dafür mit Hilfe des Kolmogorow-Smirnow-Tests auf die Güte der Anpassung an verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen überprüft werden (vgl. [FIELD18, S. 248 ff.]). Die Nullhypothese hierbei ist, dass die Zugriffshäufigkeit einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung folgt. In Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung, Gleichverteilung und exponentieller Verteilung der Daten mithilfe der Statistiksoftware IBM® SPSS® Statistics 24 aufgeführt.

| Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest | | | | |
|--|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---|
| | <u>Verteilung</u> | <u>Studierende</u> | <u>Mitarbeiter</u> | <u>Studierende und Mitarbeiter</u> |
| p-Werte | <u>Normalverteilt</u> | 2,2357E-24 | 0,000005 | 2,059E-29 |
| | <u>Gleichverteilt</u> | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | <u>Exponentialverteilt</u> | 0,001690 | 0,319935 | 0,004820 |
| Signifikanzniveau (α) 0,05 | <u>Normalverteilt</u> | - | - | - |
| | <u>Gleichverteilt</u> | - | - | - |
| | <u>Exponentialverteilt</u> | - | + | - |
| Nullhypothese: Die Daten entsprechen der jeweiligen Verteilung | | | Legende: | |
| | | | - | Die Nullhypothese wird abgelehnt |
| | | | + | Die Nullhypothese wird beibehalten |

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Verteilungstests der Informationszugriffe

Die Ergebnisse der Tests in Tabelle 5.2 zeigen, dass die Informationszugriffe weder einer Normal-, noch einer Gleichverteilung folgen. Die p-Werte für die beiden Verteilungen sind bei allen Probandengruppen sehr klein ($p \leq 5E-6$). Auf dem häufig gewählten Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ [HEINRICH18, S. 202] kann aber auch die Exponentialverteilung ausschließlich für die Informationszugriffe der Mitarbeiterversuche verwendet werden. Verglichen mit den anderen beiden Verteilungen sind die p-Werte für die Exponentialverteilung allerdings auch für die Daten der Studierendenversuche ($p = 0,001690$) und die gemeinsamen Versuchsdaten aus Studierenden und Mitarbeitern ($p = 0,004820$) am höchsten. Auch wenn der Anstieg der Informationszugriffe gegen Ende der Bearbeitungszeit dieser nicht entsprechen, wird ferner von einer Exponentialverteilung ausgegangen, da sich die Daten hiermit auch grafisch am besten beschreiben lassen.

Die exponentielle Verteilung der gemittelten Zugriffe pro Proband über alle Informationsgruppen kann sich auf unterschiedliche Weise zusammensetzen. Zum Beispiel können zu Beginn der Bearbeitungszeit eine größere Anzahl verschiedener Informationsgruppen genutzt werden und gegen Ende weniger, oder die Zugriffsrates für jede einzelne Informationsgruppe kann einer exponentiellen Verteilung folgen und die Zugriffshäufigkeiten addieren sich zu dieser Gesamtverteilung. Zudem sind auch Mischformen denkbar. Zur Untersuchung der Frage, ob nur die zeitlich gemittelten und normierten Informationszugriffe über alle Informationsgruppen hinweg einer exponentiellen Verteilung folgen, oder ob auch die Zugriffshäufigkeiten der einzelnen Informationsgruppen mit einer bestimmten Verteilung beschreibbar sind, können die informationsgruppenspezifischen Zugriffsdaten ausgewertet werden.

Die Auswertung der informationsgruppenbezogenen Daten zeigt ein ähnliches Bild, wie die Auswertung der Gesamtdaten. Mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ lassen sich alle Daten der einzelnen Probandengruppen als exponentialverteilt beschreiben, wohingegen die Normalverteilung und Gleichverteilung nicht hinreichend genau an die Daten angepasst werden können. Lediglich für die kombinierten Nutzungsdaten der Studierenden und Mitarbeiter wird die Nullhypothese auf Anpassung an die Exponentialverteilung für den Informationskatalog „Kurzbeschreibung Informationsplattform“ und die Informationsgruppen, „I. Konstruktionsrestriktionen“ und „d. Additive Fertigungsverfahren“ abgelehnt. In Anhang A.44 sind die Ergebnisse der Verteilungstests ersichtlich, wobei die Inhalte nach ihrer Nutzungshäufigkeit sortiert sind.

Aus der Auswertung der zeitlichen Verteilung der gemittelten Zugriffszeitpunkte auf die Informationsgruppen ergibt sich die Darstellung in Bild 5.22. Hier sind die Mediane und

die 20 %, bzw. 80 % Quantile der Zugriffszeitpunkte auf die Informationsgruppen abgebildet. Als Datenbasis dienen die gemittelten Zugriffszeitpunkte pro Proband. Die Darstellung zeigt also, wann die Informationsgruppen im Mittel über alle Probanden genutzt wurden und wie weit die Nutzungszeitpunkte der Probanden streuen. Die Kataloge „Kurzbeschreibung Informationsplattform“ und „Quellen“, die zur Orientierung dienen, sind hier wieder ausgenommen.

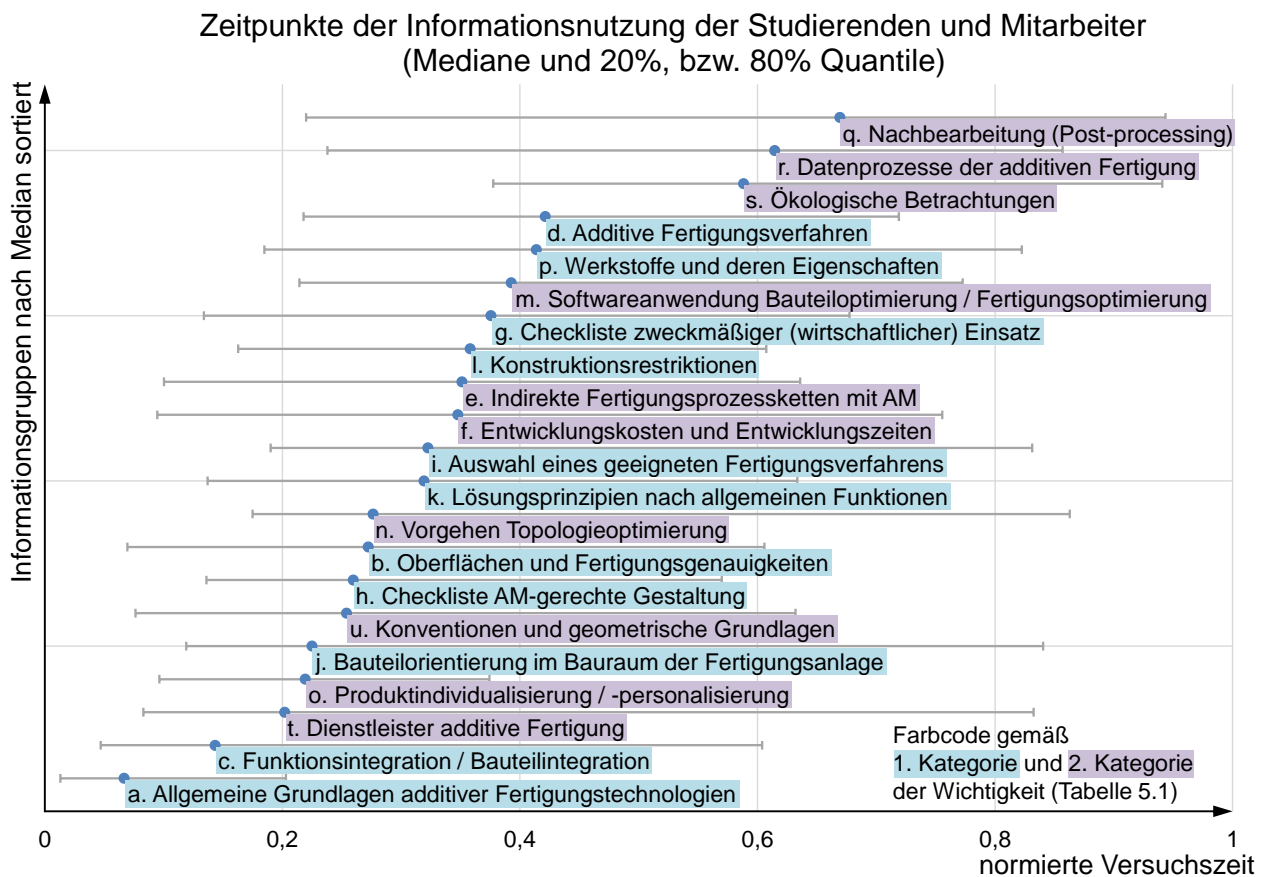


Bild 5.22: Mediane und 20 %, bzw. 80 % Quantile der Zugriffszeitpunkte auf die verschiedenen Informationsgruppen

Obwohl die dargestellten 20 % und 80 % Quantile nur jeweils 60 % der erhobenen Daten der Informationsgruppen umfassen, haben sie für sich genommen eine große Ausdehnung über der Versuchszeit und weisen eine hohe Überlappung auf. Die Bereiche zwischen den 20 % und 80 % Quantilen decken für fast alle Informationsgruppen die Zeitpunkte der Mediane der übrigen Informationsgruppen mit ab. Es lässt sich daher keine Aussage zu einer Systematik der zeitlichen Reihenfolge der Informationsnutzung treffen. Der Katalog „a. Allgemeine Grundlagen ...“ stellt durch den relativ kleinen Bereich zwischen den 20 % und 80 % Quantilen eine Ausnahme dar, wird allerdings auch als erster Katalog auf der Plattform angeführt und daher vermehrt frühzeitig angeklickt. Bei

Betrachtung der 10 % und 90 % Quantile stellt sich auch hier eine große Überdeckung mit den anderen Informationsgruppen dar.

Unter Vernachlässigung der Exponentialverteilung lassen sich die Standardabweichungen der Zugriffszeitpunkte auf die Informationsgruppen und deren Mittelwerte auf eine Systematik prüfen. Wie auch die Quantile in Bild 5.22 sind die Standardabweichungen in diesem Fall derart groß, dass sie keine Aussage über die Reihenfolge der mittleren Zugriffszeitpunkte auf die Informationsgruppen zulassen. Für die Informationsgruppen „a. Allgemeine Grundlagen ...“ und „c. Funktionsintegration ...“ reicht die berechnete Standardabweichung sogar ins Negative. Mithilfe der Box-Cox-Transformation können die Daten an die Normalverteilung angenähert werden, um die Zugriffszeitpunkte miteinander vergleichen zu können (vgl. [FIELD18, S. 268 ff.]). Allerdings zeigt sich auch nach der Transformation bei allen Informationsgruppen eine derart große Standardabweichung, dass eine eindeutige Aussage über die Reihenfolge der Informationsnutzung ausgeschlossen ist. Da die Betrachtung der Daten unter Vernachlässigung ihrer exponentiellen Verteilung sowohl ohne als auch mit Transformation nicht mehr Aussagekraft besitzt als die Darstellung in Bild 5.22, wird auf deren Abbildung verzichtet.

Ein möglicher Einflussfaktor auf die Nutzungsreihenfolge ist die Reihenfolge der Darstellung der Informationsgruppen auf der Plattform. Die Nummerierung der Informationsgruppen in Bild 5.22 entspricht der Reihenfolge ihrer Sortierung auf der Plattform, wie sie auch in Kapitel 4.2 dargestellt ist. Die Reihenfolge der gemittelten Zugriffszeitpunkte zeigt mit einem Korrelationskoeffizienten nach Pearson (vgl. [FIELD18, S. 338 ff.]) von 0,271 einen schwachen linearen Zusammenhang zur Reihenfolge der Informationsgliederung in der Zugriffsleiste der Plattform. Das bedeutet, dass die Nutzungsreihenfolge von der Darstellung auf der Plattform beeinflusst wird. Diese Tatsache schmälert weiterhin die Möglichkeiten der Deutung der zeitlichen Nutzungsdaten hinsichtlich eines ableitbaren allgemeinen Vorgehens zur Lösung von Problemstellungen.

Die individuell verschiedenen Nutzungszeitpunkte der einzelnen Informationsgruppen und die daraus resultierende hohe Streuung können anhand der Informationsgruppe „I. Konstruktionsrestriktionen“ exemplarisch dargestellt werden (Bild 5.23). Während der Versuche haben 49 der Probanden auf diese Informationsgruppe zugegriffen.

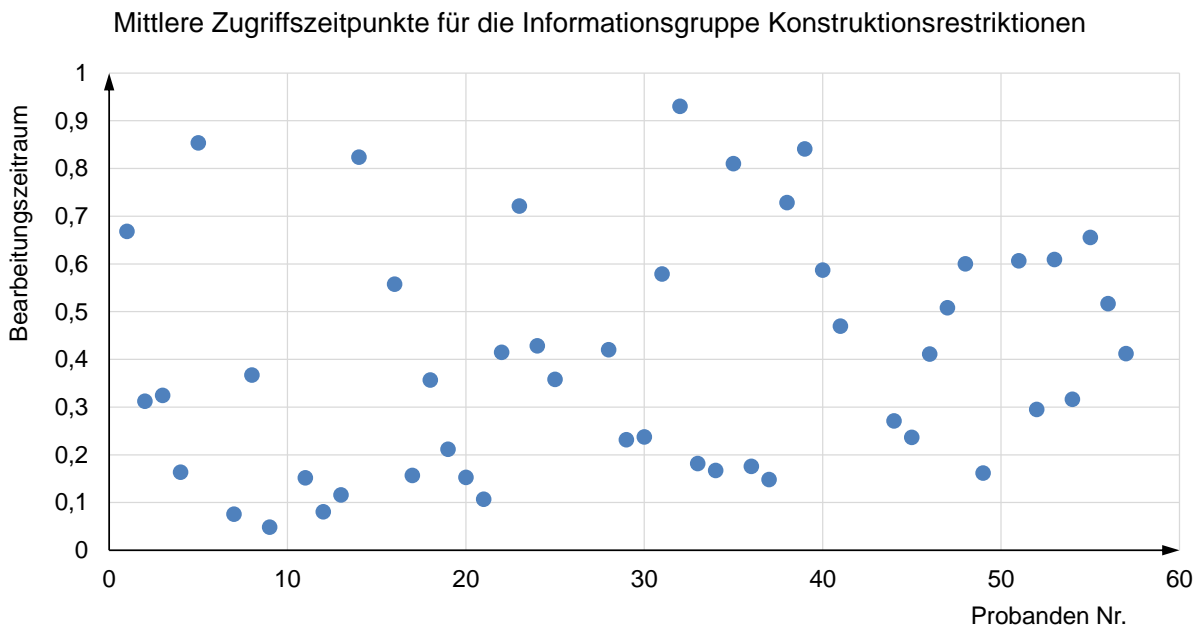


Bild 5.23: Mittlere Zugriffszeitpunkte einer exemplarischen Informationsgruppe

Die Zugriffszeitpunkte für die beispielhafte Informationsgruppe „I. Konstruktionsrestriktionen“ variieren erheblich. Zum Teil wurde sie direkt zu Beginn der Aufgabenbearbeitung genutzt, zum Teil erst kurz vor Beendigung der Aufgabe und größtenteils ergibt sich der mittlere Nutzungszeitpunkt entsprechend der Exponentialverteilung im mittleren Bereich. Die Auswertung der Einzelgruppen Studierende und Mitarbeiter zeigen ähnlich große Standardabweichungen der Zugriffszeitpunkte wie deren kombinierte Daten in Bild 5.22. Eine Varianzanalyse mit dem Kruskal-Wallis-Test (vgl. [FIELD18, S. 307 ff.]) behält hier bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ die Nullhypothese identischer Verteilungen der Zugriffszeitpunkte der Studierenden und der Mitarbeiter bei. Es kann kein signifikanter Unterschied zwischen den Nutzungszeitpunkten der Studierenden und der Mitarbeiterversuche gefunden werden.

Auf Basis der untersuchten Daten kann keine eindeutige Unterscheidung zwischen den Nutzungszeitpunkten der Informationsgruppen gefunden werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Vorgehensweisen während der Bauteilentwicklung dem individuellen Vorgehen während eines Problemlösezyklus entsprechend originär sind.

Die Sprünge in der Informationsnutzung auf der Plattform und die große zeitliche Varianz in der Informationsnutzung sprechen dafür, dass das Konstruktionsvorgehen der Probanden innerhalb der Versuche am besten als iterativer Prozess beschrieben werden kann. Dies entspricht auch der Darstellung nach [VDI 2221, 1993] und [VDI 2221-1, 2018] (vgl. Kapitel 2.2).

Trotz des iterativen Charakters von Konstruktionsaufgaben haben sich Beschreibungen des aktuellen Konstruktionsfortschritts innerhalb des Konstruktionsprozesses durch namentlich benannte Arbeitsschritte etabliert (vgl. Kapitel 2.1). In Kapitel 6 sollen die verschiedenen Informationsgruppen den Arbeitsschritten eines generischen Vorgehens während der Produktentwicklung zugeordnet werden, um damit die Unterstützung dieser Phasen durch die Informationen zu verdeutlichen.

6 Zeitliche Einordnung der Informationsgruppen

Obwohl die in Kapitel 5.4.2 untersuchten Nutzungsschemata der Informationsgruppen alle unter Bearbeitung der gleichen Problemstellung entstanden sind, lassen sie aufgrund der großen Varianz der Nutzungszeiten keine klare Prozessinterpretation zu. Somit ist auch keine Ableitung eines allgemeinen Vorgehens zur Entwicklung additiv gefertigter Bauteile im Sinne eines Bottom-Up-Ansatzes möglich. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass die Ergebnisse vor dem Hintergrund von für AM eher unerfahrenen Konstrukteuren entstanden sind, die keinen vorgeprägten Mustern in der Bauteilentwicklung folgen.

6.1 Ableitung der zeitlichen Informationsstrukturierung

Auch wenn das Entwicklungsvorgehen iterativ erfolgt, ergeben sich für die Nutzungsabfolge der einzelnen Informationsgruppen der elementaren Informationsstruktur logische Zusammenhänge. Wie aus dem schwachen linearen Zusammenhang zwischen der Sortierung der Zugriffsliste und der Nutzung der Informationen in Kapitel 5.4.2 zu sehen ist, lässt sich zudem der Informationsgebrauch durch die Informationsdarstellung beeinflussen. Dies soll genutzt werden, um mittels einer zeitlich geordneten Darstellung, die auf den logischen Zusammenhängen zwischen den verschiedenen Informationsgruppen aufbaut, die Entwicklung additiv gefertigter Bauteile zu unterstützen. Hierfür ist eine zeitliche Zuordnung der Informationsgruppen zu den in Kapitel 2.2 eingeführten Phasen des allgemeinen Modells der Produktentwicklung nach der Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221-1, 2018] möglich. Da die existierenden Beschreibungen des Konstruktionsvorgehens nach Kumke et al. [KUMKE16], Künneke et al. [KÜNNEKE18] und Zhu et al. [ZHU17] (Kapitel 3.10.2) jeweils logische Bestandteile der Entwicklung von AM-Produkten widerspiegeln, wird aufbauend auf diesen Beschreibungen eine Visualisierung der zeitlichen Relevanz der Informationsgruppen erstellt. Diese Darstellung soll einen zeitlichen Bezug zwischen den verschiedenen Informationsgruppen herstellen sowie die Zugänglichkeit der Informationsgruppen durch Verknüpfung mit bekanntem Vokabular erhöhen und dabei die Wichtigkeit der Informationsgruppen gemäß den Kapiteln 5.3 und 5.4.1 wiedergeben.

In Bild 6.1 sind zeitliche Zuordnungen der verschiedenen Informationsgruppen zu den Phasen der Produktentwicklung nach Aussagen der Literaturquellen und eine daraus abgeleitete zeitliche Abfolge dargestellt. Die deduzierte Zuordnung erfolgt zum einen aufgrund der in den Quellen genannten Inhalte der Informationsgruppen und einem anschließenden Abgleich der Quellenangaben, zum anderen aufgrund der Kausalzusammenhänge ihrer Inhalte.

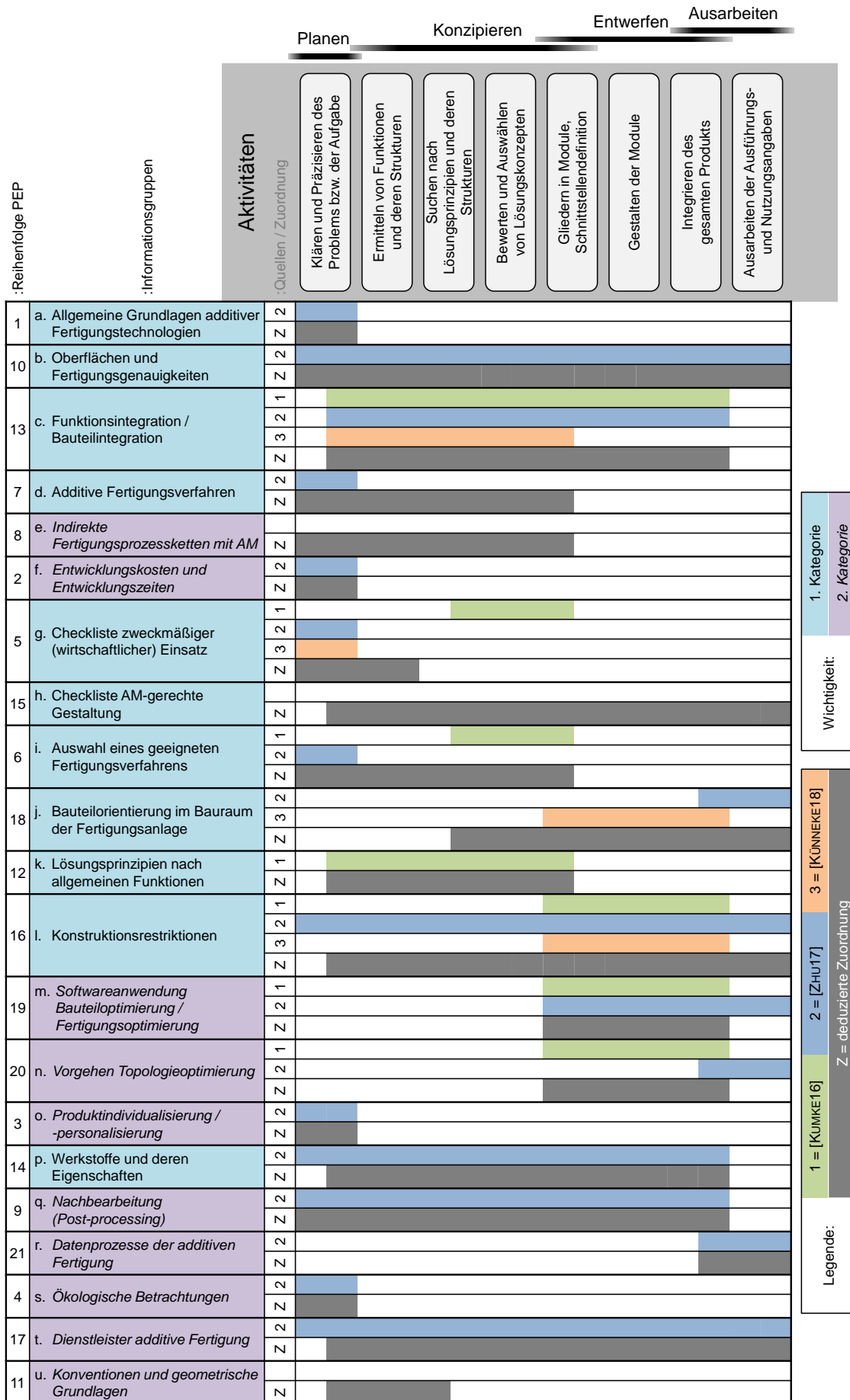


Bild 6.1: Zeitliche Einordnung der Informationsgruppen in den AM-Entwicklungsprozess

Die Zuordnung der Informationsgruppen zu Aktivitäten in Bild 6.1 erfolgt im Regelfall auf Basis der kumulierten Angaben der Quellen, in einigen Fällen wird jedoch aus folgenden Gründen davon abgewichen:

- Die Informationsgruppen „d. Additive Fertigungsverfahren“, „e. Indirekte Fertigung...“ und „i. Auswahl ... Fertigungsverfahren“ stehen in gegenseitiger Wechselwirkung. Daher werden sie anhand der längsten Zeitspanne dieser drei Informationsgruppen, nämlich der Gruppe „i. Auswahl ... Fertigungsverfahren“, eingeordnet.
- Die Informationsgruppe „g. Checkliste ...“ wird nur bis zur Suche nach Lösungsprinzipien zugeordnet, da in späteren Arbeitsschritten zwar eine kontinuierliche Bewertung der Lösung erforderlich ist, hierfür allerdings die Informationsgruppe „h. Checkliste ...“ besser geeignet ist.
- Für die Einordnung der Informationsgruppe „j. Bauteilorientierung ...“ wurde zusätzlich die Quelle [LEUTENECKER-TWELSIEK16] (vgl. Kapitel 3.10.1) zu Rate gezogen, die eine frühzeitige Beachtung der Bauteilorientierung nahelegt. Der Beginn wurde daher vor dem Bewerten und Auswählen von Lösungskonzepten gewählt.
- Der Beginn der Informationsgruppen „l. Konstruktionsrestriktionen“, „p. Werkstoffe...“ und „t. Dienstleister...“ wurde etwas später angesetzt, da diese im Normalfall auf Bauteilebene angewandt werden und beim Klären des Problems noch nicht relevant sind.
- Das Ende der Informationsgruppe „n. ... Topologieoptimierung“ wurde früher gelegt, da diese mit der Informationsgruppe „m. Softwareanwendung...“ einhergeht und normalerweise vor dem Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben beendet ist.

Aus der abgeleiteten Zuordnung ergibt sich eine geänderte Reihenfolge der Informationsgruppen auf der Plattform. Die Informationsgruppen werden anhand des Beginns und des Endes ihrer Unterstützung umsortiert. Die Zuordnung nach dem zeitlichen Beginn der Unterstützung bekommt dabei Vorrang, die Zuordnung nach dem Ende erfolgt nachgelagert. Bei exakt gleicher zeitlicher Zuordnung wird die Reihenfolge zunächst nach den beiden Kategorien der Wichtigkeit abgeleitet und im nächsten Schritt nach ihrem Abstraktionsgrad, d. h. vom Übergeordneten zum Konkreten. Die abgeleitete Reihenfolge (Reihenfolge PEP) ist in Bild 6.1 in der linken Spalte vermerkt und der Ablauf der neu sortierten Informationsgruppen ist in Bild 6.2 abgebildet.

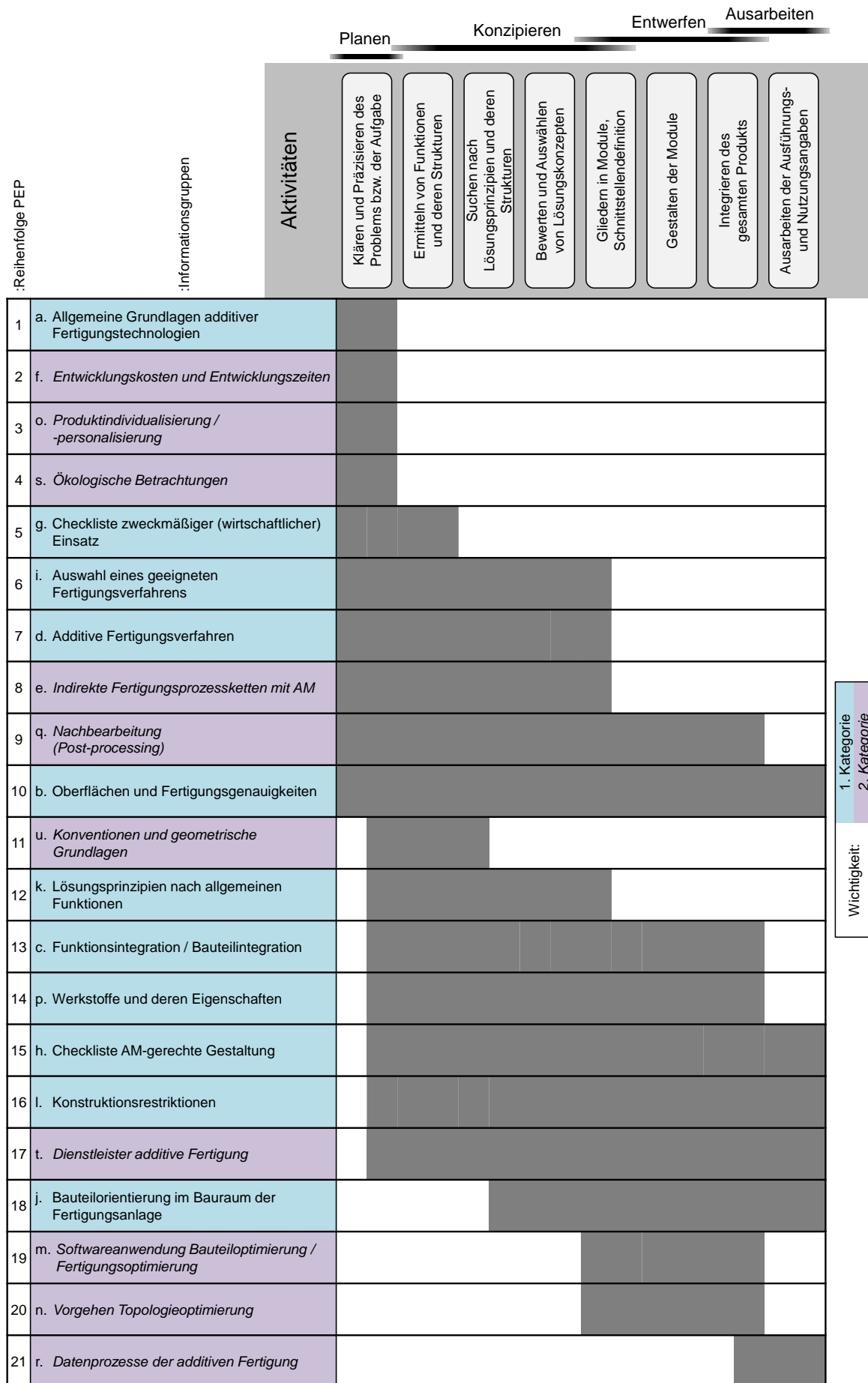


Bild 6.2: Ablauf der zeitlichen Informationsunterstützung des AM-PEP

Zur Bereitstellung der Informationen auf der Plattform wird die Übersichtsseite gemäß dem hergeleiteten Ablauf, wie in Bild 6.3 dargestellt, umstrukturiert und in einem weiteren Versuch evaluiert (siehe Kapitel 6.2).

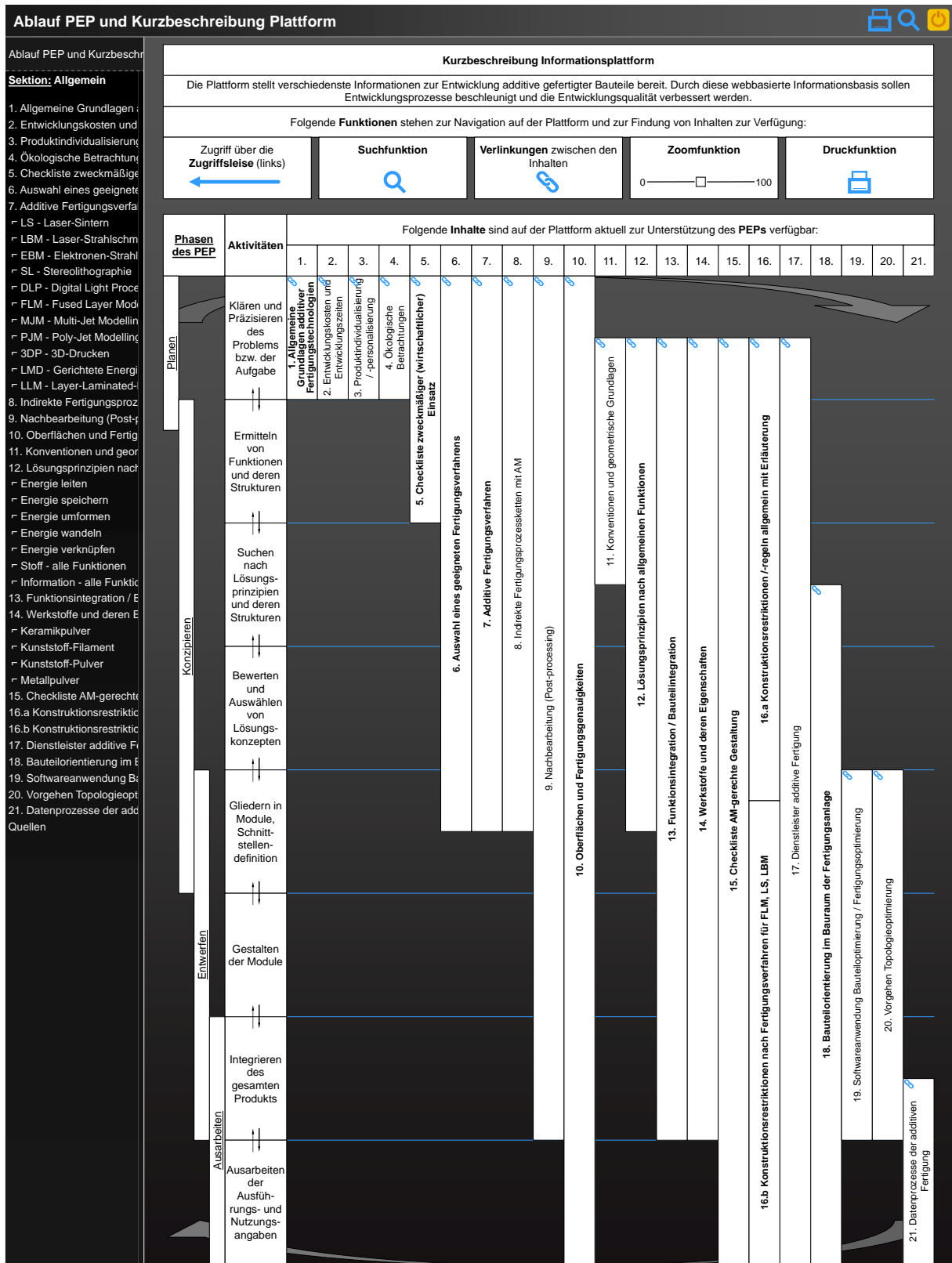


Bild 6.3: Ablauf Produktentwicklungsprozess und Zuordnung der Informationsgruppen zum Zugriff auf der Plattform

6.2 Evaluation der zeitlichen Informationsstrukturierung

Die Evaluation der Strukturierung erfolgt mit 18 Teilnehmern mit dem gleichen Versuchsaufbau wie in Kapitel 5.1 beschrieben. Die Teilnehmer sind Konstrukteure aus der Industrie im Bereich des Maschinenbaus. Der Versuch beinhaltet nur Problemstellung A. Nach dem Versuch findet eine Erhebung mittels eines Fragebogens statt. Dieser besteht zum großen Teil aus denselben Fragen, die auch der Auswertung in Kapitel 5.3 zugrunde liegen. Da die Teilnehmer die Evaluationsfragen zum Teil gemeinsam ausfüllen, entstehen zwölf Fragebögen. Es werden in diesem Kapitel nur die personenbezogenen Daten und die relevanten Fragen zur zeitlichen Informationsstrukturierung vorgestellt. Der übrige Teil der Evaluationsergebnisse ist in Anhang A.45 abgebildet.

Zunächst wird die Berufserfahrung der Probanden in der Entwicklung/Konstruktion erfragt (siehe Bild 6.4).

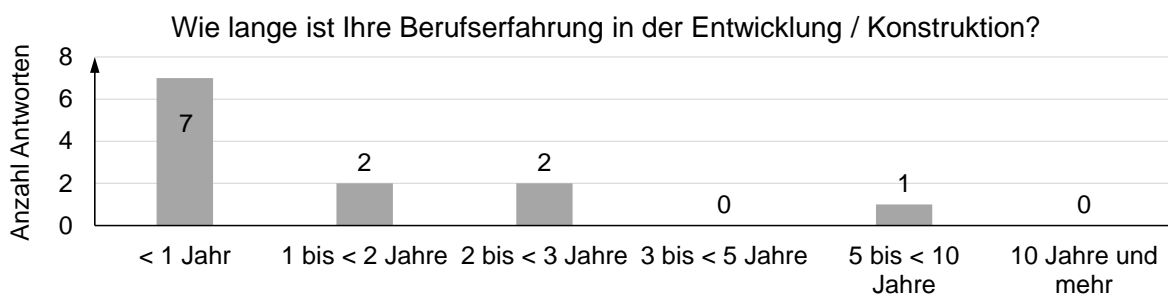


Bild 6.4: Berufserfahrung der Versuchsteilnehmer in der Entwicklung / Konstruktion

Die meisten Teilnehmer haben trotz ihrer Tätigkeit in der Industrie eine Berufserfahrung in der Entwicklung / Konstruktion von weniger als zwei Jahren. In einem der Fragebögen wird eine Tätigkeit zwischen fünf und zehn Jahren in diesem Bereich angegeben.

Die Berufserfahrung der Teilnehmer in Bezug auf die Entwicklung additiv gefertigter Bauteile setzt sich wie in Bild 6.5 dargestellt zusammen.

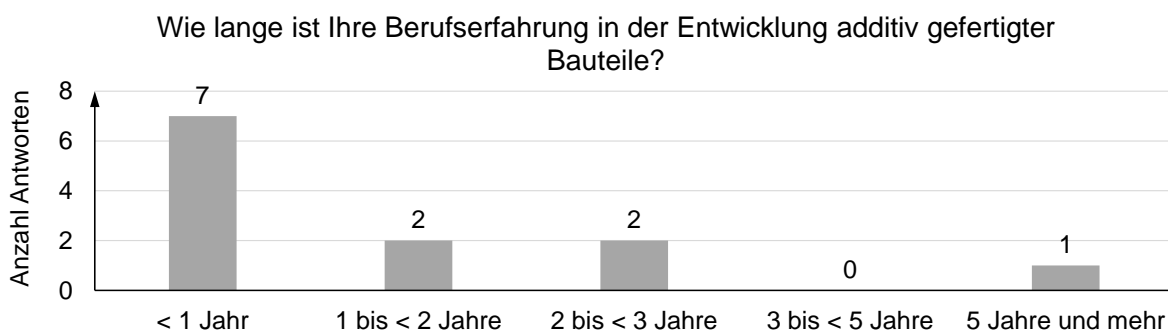


Bild 6.5 Berufserfahrung der Versuchsteilnehmer in der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile

Die Frage in Bezug auf die Erfahrung mit AM spiegelt das gleiche Bild wider, wie die allgemeine Berufserfahrung in der Entwicklung / Konstruktion. Auch hier wird in einem Fragebogen eine Berufserfahrung in der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile von über fünf Jahren angegeben.

Die Expertise in der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile stellt sich für die Versuchsteilnehmer wie in Bild 6.6 gezeigt dar.

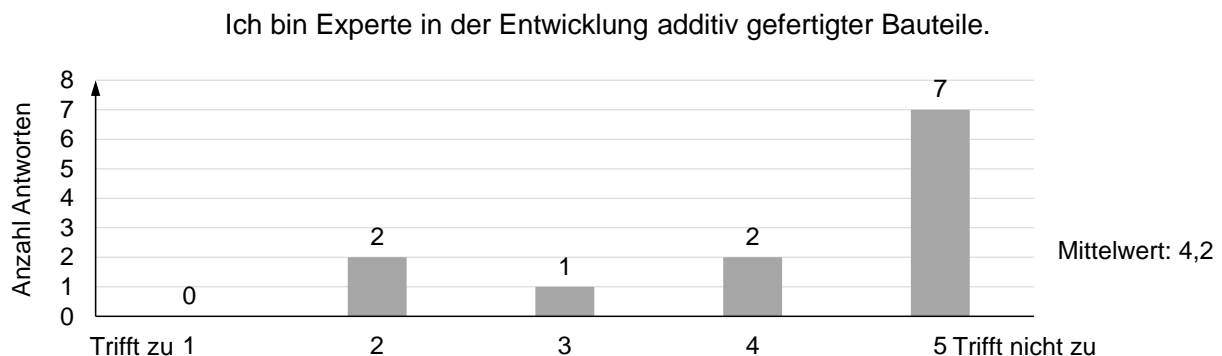


Bild 6.6: Expertise der Versuchsteilnehmer

Die Selbsteinschätzung der Expertise zeigt, dass sich die Versuchsteilnehmer tendenziell eher nicht als Experten in der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile sehen. Lediglich in zwei Fragebögen wird angegeben, dass sich die Teilnehmer in der Tendenz eher als Experten ansehen.

Für die Evaluation der zeitlichen Informationsstrukturierung wird bei diesem Versuch der Orientierungskatalog „Kurzbeschreibung Informationsplattform“ gemäß der in Kapitel 6.1 abgeleiteten Reihenfolge (siehe Bild 6.2) umgestaltet. Die Reihenfolge der Informationsgruppen in der Zugriffsleiste ist der Reihenfolge von Beginn und Ende der Informationsnutzung entsprechend sortiert (siehe Bild 6.3).

Um die Probanden für die relevanten Fragestellungen zu sensibilisieren, werden sie vor Versuchsbeginn über die Ergebnisse des Evaluationskapitels 5.4 informiert und mit der neuen Informationsstrukturierung nach Bild 6.2 vertraut gemacht. Es wird zudem vor Bearbeitung der Aufgabenstellung erläutert, dass die folgenden Sachverhalte evaluiert werden sollen:

- Ist die zeitliche Strukturierung der Informationsgruppen verständlich und logisch aufgebaut?
- Hat die Strukturierung der Informationsgruppen anhand der zeitlichen Komponente der bekannten Phasen der Produktentwicklung einen Einfluss auf ihre Nutzung?

Nach der Versuchsdurchführung werden den Versuchsteilnehmern die in Bild 6.7 abgebildeten Fragen gestellt, um die zeitliche Informationsstrukturierung zu evaluieren.

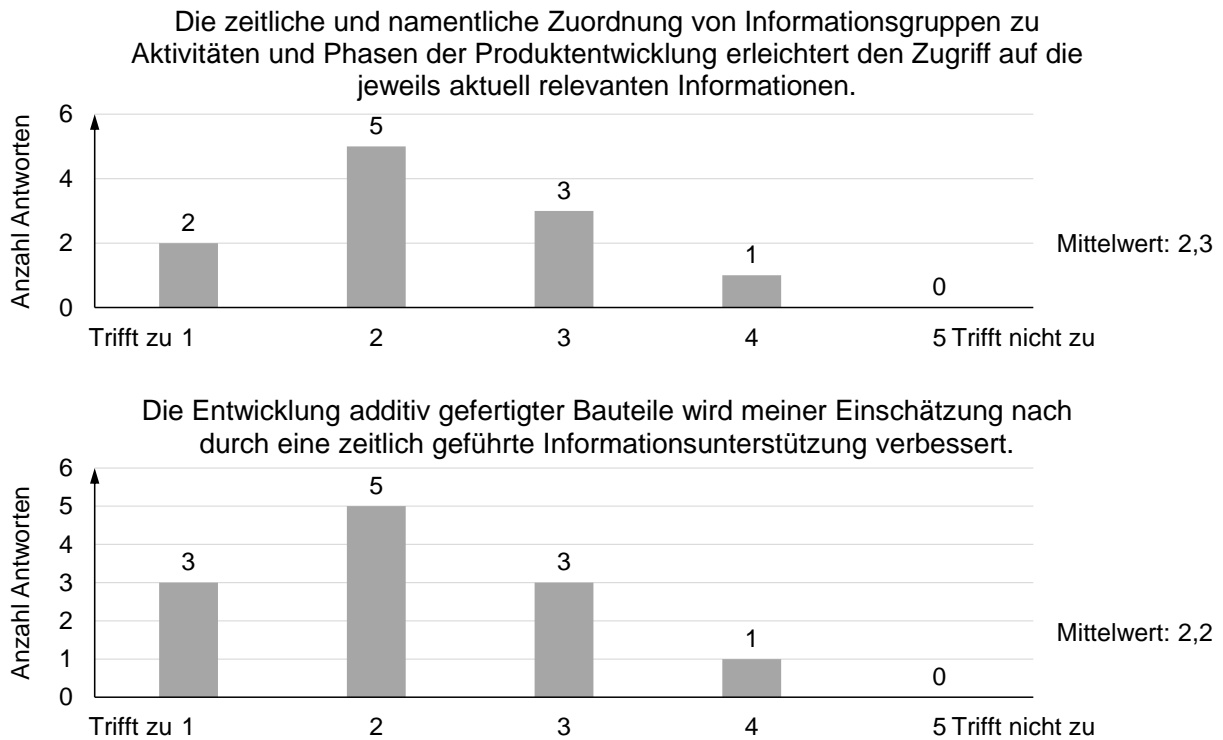


Bild 6.7: Evaluationsergebnisse zur Unterstützung des Vorgehens durch die zeitliche Einordnung der Informationsgruppen in den AM-Entwicklungsprozess

Bis auf eine Enthaltung im oberen Bereich der Auswertung in Bild 6.7 zeigen die Ergebnisse beider Fragen genau die gleichen Werte. Die zeitliche Einordnung der Informationsgruppen in den Produktentwicklungsprozess wird als förderlich für einen leichten Informationszugriff gesehen. Außerdem wird durch die zeitliche Strukturierung der Informationsgruppen nach Angabe der Versuchsteilnehmer auch die Entwicklung additiv gefertigter Bauteile verbessert.

7 Diskussion der Erkenntnisse aus den Versuchen

In diesem Kapitel werden die Methoden zur Untersuchung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile diskutiert und die hiermit gewonnenen Erkenntnisse bewertet.

Einen wichtigen Einflussfaktor innerhalb der Studien stellt die bereitgestellte Informationsstruktur dar. Die Gliederung der Informationen und die Art und Weise der Aufbereitung der Informationen beeinflussen die Informationsnutzung durch die Probanden und somit auch die Aufzeichnung der später ausgewerteten Daten.

Durch die Gliederung aller enthaltenen Informationen in Informationsgruppen ähnlichen Informationsgehalts wurde versucht, dem entstehenden Fehler in der Bestimmung der Informationswichtigkeit entgegenzuwirken. Auch wenn die Informationsgruppen der Informationsstruktur so gewählt sind, dass sie alle einen ähnlichen Informationsgehalt aufweisen, ist eine exakte Trennung der Inhalte unter diesem Aspekt nicht möglich. Je weiter der Informationsgehalt einer einzelnen Informationsgruppe vom Durchschnitt über alle Gruppen abweicht, desto stärker wird die Aussagekraft der Nutzungsdaten verzerrt. Diese Unschärfe wird beispielsweise bei der Informationsgruppe k. „Lösungsprinzipien ...“ vermutet, die aus verhältnismäßig vielen Bildern und Text besteht. Werden nur die erhobenen Nutzungsdaten aus den Versuchen ausgewertet, wird ihr die höchste Wichtigkeit aller Informationsgruppen zugeschrieben. Der Abgleich mit der Umfrage ordnet sie allerdings nur dem zehnten Rang zu. Diese Unschärfe ist jedoch für die übrigen Informationsgruppen geringer einzuschätzen, da ihre Informationsumfänge gleichartiger sind.

Ein weiterer Einfluss auf die Ergebnisse zur Wichtigkeit der Informationsgruppen, die aus der aufgezeichneten Häufigkeit der Informationszugriffe abgeleitet wird, ergibt sich aus der Reihenfolge ihrer Nutzung. Da den Häufigkeiten der Informationszugriffe insgesamt eine exponentielle Verteilung zugrunde liegt, könnten Informationsgruppen, die früher genutzt werden, einen höheren Nutzungsanteil im Vergleich mit später genutzten Informationsgruppen aufweisen. Aufgrund des schwachen linearen Zusammenhangs zwischen der Reihenfolge der Informationsgruppen und deren zeitlicher Nutzung (siehe Kapitel 5.4.2) wäre in diesem Fall auch ein Einfluss der Darstellungsreihenfolge auf die ermittelte Wichtigkeit der Informationsgruppen denkbar. Auch die Ergebnisse der Umfrage würden in diesem Fall durch die Reihenfolge der Darstellung beeinflusst, da die Probanden nicht alle Kataloge genutzt haben und bekannte Informationsgruppen tendenziell häufiger als wichtig angegeben werden als unbekannte Informationsgruppen. Da die Zugriffsdaten für alle Informationsgruppen keiner eindeutigen zeitlichen Reihenfolge unterliegen und eine

hohe zeitliche Streuung aufweisen, kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die ermittelte Wichtigkeit der Informationsgruppen auch nicht im hohen Maße durch die Reihenfolge ihrer Nutzung beeinflusst wird. Auch kann durch die hohe Streuung der Zugriffszeitpunkte der Effekt, der durch die Reihenfolge der Sortierung verursacht würde, als vernachlässigbar angesehen werden. Um die Fehlerquelle auszuschließen, müssten jedoch Versuche mit geänderter / umgekehrter Reihenfolge der Darstellung der Informationsgruppen durchgeführt werden.

Die systematischen Unsicherheiten in der Aussagekraft der erhobenen Nutzungsdaten, vor allem diejenigen, die aufgrund des Informationsumfangs entstehen, sind nicht vollständig zu verhindern. Ihr Einfluss kann allerdings über den Abgleich mit den Umfragedaten weitestgehend ausgeschlossen werden. Durch diese Absicherung der Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass hinsichtlich der Wichtigkeit der Informationsgruppen zumindest die Klassifizierung in die beiden Kategorien „wichtig“ und „weniger wichtig“ nach Tabelle 5.1 in Kapitel 5.4.1 begründet ist.

Die ausgewerteten Fragen zur zeitlichen Strukturierung der Informationen beschränken sich auf die Einschätzungen hinsichtlich der Erleichterung des Zugriffs und der Verbesserung der Entwicklung durch die zeitliche Komponente in der Informationsdarstellung. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die zeitliche Komponente in diesen beiden Punkten einen Vorteil bringt. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist durch die geringere Anzahl an Teilnehmern eingeschränkt, sie sind dennoch aufgrund der klaren positiven Tendenz der Angaben relevant.

Die größte Einschränkung der Aussagekraft der durchgeführten Untersuchungen ergibt sich aus dem Umfang und Aufbau der Versuche. Da die Evaluation der Informationsstruktur und der Plattform mittels Fragebogen allgemein gehalten ist, sind die Erkenntnisse nicht nur für die spezifischen Problemstellungen gültig. Sowohl die Wichtigkeit verschiedener Informationen bei der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile als auch die Untersuchung der zeitlichen Komponente und der daraus abgeleitete zeitliche Ablauf der Unterstützung des Entwicklungsprozesses können auf andere Entwicklungsprojekte übertragen werden. Da die Erprobung der Informationsstruktur innerhalb eines Versuchs von 1,5 Stunden Umfang erfolgte, ist sie allerdings nicht ohne Weiteres auf Entwicklungsprozesse übertragbar, die mehrere Monate bis hin zu Jahren dauern und eine dementsprechend höhere Problemkomplexität mit sich bringen. Es kann hier zu Verschiebungen der Wichtigkeit der Informationen entsprechend dem Projektfortschritt und dem gewon-

nenen Wissen der Konstrukteure kommen. Für gesicherte Aussagen zum Zusammenhang des zeitlichen Umfangs von Entwicklungen und der Informationswichtigkeit bedürfte es mehrerer Langzeitversuche in der industriellen Praxis.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegenden Arbeit liegt die folgende übergeordnete Forschungsfrage zugrunde: Wie erfolgt die Konstruktion additiv gefertigter Endbauteile und wie kann sie durch gezielte Informationsbereitstellung unterstützt werden? Die Betrachtung beinhaltet durch die Einschränkung auf Endbauteile ausschließlich Bauteile, die als Ergebnis eines Entwicklungsprozesses entstehen und durch einen Endnutzer Anwendung finden. Die Nutzung additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von Prototypen während Entwicklungsprozessen ist nicht Teil dieser Arbeit. Die Dissertation behandelt das Vorgehen bei der Konstruktion additiv gefertigter Endbauteile und die inhaltliche Unterstützung der Konstruktion mit spezifischen Informationen für die additive Fertigung.

Aus der übergeordneten Fragestellung werden drei konkretisierte Forschungsfragen abgeleitet:

1. Welche Informationen sind bei der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile relevant?
2. Wie sollten Informationen zur Unterstützung eines Entwicklungsprozesses für additiv gefertigte Bauteile aufbereitet sein?
3. Nach welchem Ablauf werden Informationen bei der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile genutzt?

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage wird eine elementare Informationsstruktur erstellt, die aufbauend auf Themenfeldern aus der Literatur die notwendigen Informationen zur Entwicklung additiv gefertigter Bauteile in 21 Informationsgruppen ordnet, die wiederum durch 46 Informationskataloge repräsentiert werden. Die Relevanz der Informationsgruppen wird in Versuchen mit einer Konstruktionsaufgabe evaluiert (Kapitel 5.1), wobei einerseits die Informationsnutzung durch die Probanden (Kapitel 5.4.1) und andererseits Fragebögen zur Wichtigkeit der Informationsgruppen ausgewertet werden (Kapitel 5.3). Aus den Ergebnissen der beiden Auswertungen erfolgt eine Klassifizierung in „wichtige“ und „weniger wichtige“ Informationsgruppen. Die Erkenntnisse zur Relevanz der verschiedenen Informationsgruppen sind in Kapitel 5.4.1 in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Die zweite Forschungsfrage wird anhand einer präskriptiven Aufbereitung der elementaren Informationsstruktur untersucht. Die Informationsgruppen werden zur Beantwortung der Forschungsfrage in einer einheitlichen Form auf einer Onlineplattform bereitgestellt.

Aus den Nutzungsdaten der durchgeführten Versuche können Erkenntnisse zur Untergliederung der Informationen (Kapitel 5.4.1) und zu den Zugriffsarten auf die Informationen gewonnen werden (Kapitel 5.3). Die Wichtigkeit der verschiedenen Zugriffsarten sowie die Bereitstellung der Informationen auf der Onlineplattform und der erforderliche Zeitaufwand zur Informationsfindung werden zudem mit einem Fragebogen evaluiert (Kapitel 5.3). Es zeigt sich, dass die erarbeitete Informationsstruktur mit ihren 21 Informationsgruppen und 46 Informationskatalogen eine angemessene Untergliederung der Informationen zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses für additiv gefertigte Bauteile darstellt. Auch die Darstellung auf einer Onlineplattform ist gegenüber anderen Darstellungsformen den Versuchsteilnehmern zufolge von Vorteil. Die Zugriffe auf die Informationen erfolgen innerhalb der Versuche weniger über die Suchfunktion, sondern eher mittels Übersichtsdarstellungen und Verlinkungen zwischen den Inhalten.

Die Beantwortung der dritten Forschungsfrage erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird mithilfe der elementaren Informationsstruktur auf der Onlineplattform untersucht, ob sich ohne Vorgabe einer zeitlichen Komponente zur Nutzung der Informationen ein zeitliches Muster in den Nutzungsdaten der Probanden ergibt. Dies konnte im Rahmen der Untersuchung nicht beobachtet werden. Im zweiten Schritt wird unter Zuhilfenahme bestehender Beschreibungen von Entwicklungsprozessen für die additive Fertigung eine zeitliche Zuordnung der Informationsgruppen zu Aktivitäten in der Produktentwicklung getroffen. Diese wird wiederum in einem Versuch evaluiert, wobei ein Fragebogen mit Einschätzungen der Probanden ausgewertet wird. Es zeigt sich, dass eine zeitliche Führung der Informationsnutzung von den Probanden als positiv wahrgenommen wird.

In zukünftiger Forschung kann die erarbeitete Informationsstruktur und die Onlineplattform forthin genutzt und die beschriebene Evaluationsmethodik weiterentwickelt werden. Hierbei sind sowohl inhaltliche Vertiefungen als auch die Integration weiterer interaktiver Elemente zur Untersuchung des Konstruktionsprozesses denkbar, wie etwa die Blickfassung während des Konstruktionsvorgangs oder die aktive Informationsunterstützung. Ansatzpunkte hierfür bietet zum Beispiel das Forschungsfeld der Neurowissenschaften. Die elementare Informationsstruktur, die für die Untersuchungen in dieser Dissertation bereitgestellt wird, bezieht sich zwar auf die Entwicklung additiv gefertigter Bauteile im Allgemeinen und ist nicht verfahrensspezifisch eingeschränkt, behandelt allerdings ausschließlich die Entwicklung rein mechanischer Bauteile und schließt mechatronische Komponenten aus. Hier könnte sich ein zukunftssträchtiges Forschungsfeld ergeben, da

gerade die additive Fertigung, mit dem Gedanken der Funktionsintegration, mit der Veränderung zu Multimaterialanwendungen und mit der Möglichkeit 3-dimensionaler Gestaltung, hochintegrierte mechatronische Komponenten hervorzubringen vermag. Die Anforderungen an die Entwicklungsmethodik steigen mit der hierbei entstehenden Komplexität und durch die Zusammenarbeit mit anderen Fachdisziplinen.

Bei der Erstellung der Lösungsbibliothek mit AM-Lösungsprinzipien hat sich gezeigt, dass der Einsatz von Lösungsprinzipien, die in der additiven Fertigung eingesetzt werden, oftmals nicht ausreichend begründet ist. Ihre Anpassung an AM und vor allem die Erweiterung der funktionellen Möglichkeiten sollten vorangetrieben werden. Eine systematische Untersuchung von Lösungsprinzipien und ihre Klassifizierung nach der Ausnutzung verschiedener AM-Potenziale bietet ein Feld für zukünftige Forschungstätigkeit.

Literaturverzeichnis

- 3D SYSTEMS16 3D Systems: *Rapid Manufacturing: SLS® Design Guide*. Applications and Technologies of Selective Laser Sintering. URL <https://de.3dsystems.com/resources/sls-plastics-design-guide> – Aktualisierungsdatum: 2016 – Überprüfungsdatum 03.07.2018.
- ACATECH16 acatech- Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften: *Additive Fertigung*. München, 2016.
- ADAM15 Adam, G.: *Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling*. Aachen: Shaker, 2015.
- ADAM17 Adam, G.: *Konstruktion für additive Fertigungsverfahren: Möglichkeiten und Restriktionen* (1. VDI-Strategiekongress "Additive Manufacturing"). Stuttgart, 22.03.2017.
- ALBERS16 Albers, A.; Reiss, N.; Bursac, N.; Richter, T.: *iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering*. In: *Procedia CIRP* 50 (2016), S. 100–105.
- BAUER16 Bauer, D.; Borchers, K.; Burkert, T.; Ciric, D.; Cooper, F.; Ensthaler, J.; Gaub, H.; Gittel, H.; Grimm, T.; Hillebrecht, M.; Kluger, P.; Klöden, B.; Kochan, D.; Kolb, T.; Löber, L.; Lenz, J.; Marquardt, E.; Munsch, M.; Müller, A.; Müller-Lohmeier, K.; Müller-ter Jung, M.; Schaefflein, F.; Seidel, C.; Schwandt, H.; van de Vrie, R.; Witt, G.; Zäh, M.: *Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren*. 1. Auflage. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2016.
- BIN MAIDIN11 Bin Maidin, S.: *Development of a design feature database to support design for additive manufacturing (DfAM)*: Loughborough University, 2011.
- BINZ17 Binz, H.: *Konstruktionslehre I: Umdruck zur Vorlesung*. Skript. – Stuttgart. 2017.
- BLANTHER92 Blanthier, J.: *Manufacture of countour relief maps*, United States. 03.05.1892. Anmeldung: 24.04.1890. US, Patentschrift US473901.

- BLESSING09 Blessing, L.; Chakrabarti, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. 1. Aufl. Guildford, Surrey: Springer London, 2009.
- BOYARD13 Boyard, N.; Rivette, M.; Christmann, O.; Richir, S.: A design methodology for parts using Additive Manufacturing. In: da Silva Bártolo, P.; Lemos, A. de; Pereira, A.; Mateus, A.; Ramos, C.; Santos, C.; Oliveira, D.; Pinto, E.; Craveiro, F.; da Rocha Terreiro Galha Bártolo, H.; Amorim Almeida, H. de; Sousa, I.; Matias, J.; Durão, L.; Gaspar, M.; Fernandes Alves, N.; Carreira, P.; Ferreira, T.; Marques, T. (Hrsg.): *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*: CRC Press, 2013, S. 399–404.
- BREUNINGER13 Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, A.; Rommel, S.; Verl, A.: *Generative Fertigung mit Kunststoffen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- BROWNING06 Browning, T.; Fricke, E.; Negele, H.: *Key concepts in modeling product development processes*. In: *Systems Engineering* 9 (2006), Nr. 2, S. 104–128.
- BRÜGGEMANN17 Brüggemann, J.-P.; Risse, L.; Riemer, A.; Reschetnik, W.; Kullmer, G.; Richard, H.: Entwicklung von Fahrradreturbelsystemen mittels additiver Fertigung. In: Richard, H. A.; Schramm, B.; Zipsner, T. (Hrsg.): *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017, S. 41–60.
- CAMPBELL13 Campbell, R. I.; Jee, H.; Kim, Y. S.: Adding Product Value through Additive Manufacturing. In: Lindemann, U.; Venkataraman, S.; Kim, Y. S.; Lee, S. W.; Clarkson, J.; Cascini, G. (Hrsg.): *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED 13)*: The Design Society, 2013.
- CAPITAINE95 Capitaine, E.: *Das Wesen des Erfindens: Eine Erklärung der schöpferischen Geistesthätigkeit an Beispielen planmässiger Aufstellung und Lösung erfinderischer Aufgaben*. Leipzig: Fock, 1895.

- CRUCIBLE14 Crucible: *3D printing for manufacture: a basic design guide*. URL <https://www.crucible-design.co.uk/images/uploaded/guides/3d-printing-for-manufacture-a-basic-design-guide-download-original.pdf> – Aktualisierungsdatum: 2014 – Überprüfungsdatum 03.07.2018.
- DEDE15 Dede, E.; Joshi, S.; Zhou, F.: *Topology Optimization, Additive Layer Manufacturing, and Experimental Testing of an Air-Cooled Heat Sink*. In: *Journal of Mechanical Design* 137 (2015), Nr. 11.
- DIN EN ISO 17296-2, 2016 DIN EN ISO 17296 Blatt 2. Dezember 2016. *Additive Fertigung – Grundlagen – Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DÖRNER76 Dörner, D.: *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. 1. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer, 1976.
- DYLLA91 Dylla, N.: *Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren*. München: Carl Hanser Verlag, 1991.
- EHRENSPIEL17 Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2017.
- EOS15 EOS GmbH: *Design Rules for DMLS*. URL http://www.3dimpuls.com/sites/default/files/download/dmls_design-rules_en.pdf – Aktualisierungsdatum: 2015 – Überprüfungsdatum 03.07.2018.
- EWALD75 Ewald, O.: *Lösungssammlungen für das methodische Konstruieren*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1975.
- FELDHUSEN13 Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Der Produktentstehungsprozess (PEP). In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- FIELD18 Field, A.: *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. 5th edition. Los Angeles: Sage, 2018.
- FKM17 FKM Sintertechnik GmbH: *Konstruktionsempfehlungen*. URL <http://fkm-lasersintering.de/images/pdfdaten/prospekte/FKM-Technikbroschuere.pdf> – Aktualisierungsdatum: November 2017 – Überprüfungsdatum 03.07.2018.

- FORMLABS18 Formlabs: *Ultimativer Leitfaden für Stereolithografie (SLA) 3D-Druck*. URL <https://formlabs.com/de/blog/leitfaden-stereolithografie-sla-3d-druck/> – Überprüfungsdatum 02.07.2018.
- FRICKE93 Fricke, G.: *Konstruieren als flexibler Problemlöseprozess: Empirische Untersuchung über erfolgreiche Strategien und methodische Vorgehensweisen beim Konstruieren*. Zugl.: Darmstadt, Technische Hochschule, Dissertation. als Manuskript gedruckt. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.
- GEBHARDT16a Gebhardt, A.: *Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion*. München: Carl Hanser Verlag, 2016.
- GEBHARDT16b Gebhardt, A.; Hötter, J.-S.: *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Munich, Cincinnati: Hanser Publishers; Hanser Publications, 2016.
- GERBER08 Gerber, G.; Barnard, L.: *Designing for laser sintering*. In: *Journal for New Generation Sciences* 6 (2008), Nr. 2, S. 47–59.
- GERHARD88 Gerhard, E.: *Entwickeln und Konstruieren mit System: Wege zur rationalen Lösungsfindung*. 2. Aufl. Ehningen bei Böblingen: Expert Verlag, 1988.
- GERICKE12 Gericke, K.; Blessing, L.: An analysis of design process models across disciplines. In: *Design Conference Proceedings: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia; The Design Society, Glasgow, Scotland, 2012*, S. 171–180.
- GIBSON15 Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.: *Additive Manufacturing Technologies*. New York, NY: Springer New York, 2015.
- GOVETT12 Govett, T.; Kim, K.; Lundin, M.; Pinero, D.: *Design Rules For Selective Laser Sintering*. Austin, University of Texas, Mechanical Engineering Department, Senior Design Project Report, 2012.
- GRONAU09 Gronau, N.: *Wissen prozessorientiert managen: Methode und Werkzeuge für die Nutzung des Wettbewerbsfaktors Wissen in Unternehmen*. München: Oldenbourg Verlag, 2009.

- GÜNTHER98 Günther, J.: *Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess: Eine empirische Untersuchung unter besonderer Berücksichtigung von Konstrukteuren aus der Praxis*. Als Manuskript gedruckt. Aachen: Shaker, 1998.
- HAGUE05 Hague, R.; Campbell, I.; Dickens, P.: *Implications on design of rapid manufacturing*. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 217 (2005), Nr. 1, S. 25–30.
- HÄLLGREN16 Hällgren, S.; Pejryd, L.; Ekengren, J.: *(Re)Design for Additive Manufacturing*. In: *Procedia CIRP* 50 (2016), S. 246–251.
- HEINRICH18 Heinrich, G.: *Basiswissen Mathematik, Statistik und Operations Research für Wirtschaftswissenschaftler*. 6., überarbeitete Auflage. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2018.
- HEISIG05 Heisig, P.: *Integration von Wissensmanagement in Geschäftsprozesse*. Zugl.: Berlin, Technische Universität, Dissertation. Berlin: Produktionstechnisches Zentrum Berlin (PTZ), 2005.
- HOLMSTRÖM10 Holmström, J.; Partanen, J.; Tuomi, J.; Walter, M.: *Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment*. In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 21 (2010), Nr. 6, S. 687–697.
- HOPKINSON01 Hopkinson, N.; Dickens, P.: *Rapid prototyping for direct manufacture*. In: *Rapid Prototyping Journal* 7 (2001), Nr. 4, S. 197–202.
- HOPKINSON06 Hopkinson, N.; Hague, R. J. M.; Dickens, P.: *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2006.
- HUBKA92 Hubka, V.; Eder, W.: *Einführung in die Konstruktionswissenschaft: Übersicht, Modell, Anleitungen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1992.
- JABLONSKI99 Jablonski, S.; Böhm, M.: *Workflow-Management: Entwicklung von Anwendungen und Systemen: Facetten einer neuen Technologie*. Korr. Nachdr. Heidelberg: Dpunkt-Verlag, 1999.

- JOSUPEIT16 Josupeit, S.; Delfs, P.; Menge, D.; Schmid, H.-J.: *Manufacturability and mechanical characterization of laser sintered lattice structures*. Solid Freeform Fabrication 2016. In: *Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference (2016)*.
- KESPER16 Kesper, M.: *Entwicklung eines webbasierten Tools zur Sammlung von Konstruktionen für additiv gefertigte Bauteile*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Bachelorarbeit, 2016.
- KIRCHNER11 Kirchner, K.: *Entwicklung eines Informationssystems für den effizienten Einsatz generativer Fertigungsverfahren im Produktentwicklungsprozess*. München: Dr. Hut, 2011.
- KLAHN18 Klahn, C.; Meboldt, M.; Fontana, F.; Leutenecker-Twelsiek, B.; Jansen, J.: *Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung: Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten*. 1. Auflage. Würzburg: Vogel Business Media, 2018.
- KRANERT16 Kranert, T.: *Mechanische und akustische Optimierung einer Motorstütze für die additive Fertigung*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Masterarbeit, 2016.
- KRANZ15 Kranz, J.; Herzog, D.; Emmelmann, C.: *Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4*. In: *Journal of Laser Applications* 27 (2015), S1.
- KRANZ17 Kranz, J.: *Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017.
- KUMKE16 Kumke, M.; Watschke, H.; Vietor, T.: *A new methodological framework for design for additive manufacturing*. In: *Virtual and Physical Prototyping* 11 (2016), Nr. 1, S. 3–19.

- KUMKE17 Kumke, M.; Watschke, H.; Hartogh, P.; Bavendiek, A.-K.; Vietor, T.: *Methods and tools for identifying and leveraging additive manufacturing design potentials*. In: *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 21 (2017), Nr. 6, S. 662.
- KUMKE18 Kumke, M.: *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. Zugl.: Braunschweig, Technische Universität, Dissertation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- KÜNNEKE18 Künneke, T.; Bücker, S.; Lieneke, T.; Lammers, S.; Zimmer, D.: Ein Beitrag zur Anpassung bestehender Konstruktionsmethodiken an die additiven Fertigungsverfahren. In: Kynast, M.; Eichmann, M.; Witt, G. (Hrsg.): *Rapid.Tech + FabCon 3.D – International Trade Show + Conference for Additive Manufacturing: Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference, Erfurt, Germany, 5–7 June 2018*. München: Carl Hanser Verlag, 2018, S. 128–143.
- LAVERNE14 Laverne, F.; Segonds, F.; Anwer, N.; Le Coq, M.: *DfAM in the design process: a proposal of classification to foster early design stages*. Sibenik, Kroatien: Confere 2014, 2014.
- LEUTENECKER-TWELSIEK16 Leutenecker-Twelsiek, B.; Klahn, C.; Meboldt, M.: *Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing*. In: *Procedia CIRP* 50 (2016), S. 408–413.
- LEUTSCH02 Leutsch, M.: *Unterstützung des Konstruktionsprozesses durch Integration von prozeduralem Wissen*. Aachen: Shaker, 2002.
- LEY17 Ley, M.; Hilbert, K.; Buschhorn, N.; Stephan, N.: *Obsoleszenzmanagement unterstützt durch additive Fertigung – Von der Bauteilidentifikation bis zum fertigen Ersatzteil*. In: Binz, H.; Bertsche, B.; Bauer, W.; Spath, D.; Roth, D. (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017: Stuttgart, 29. Juni 2017, Wissenschaftliche Konferenz*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 2017.

- LINDEMANN15 Lindemann, C.; Reiher, T.; Jahnke, U.; Koch, R.: *Towards a sustainable and economic selection of part candidates for additive manufacturing*. In: *Rapid Prototyping Journal* 21 (2015), Nr. 2, S. 216–227.
- LÖW17 Löw, Y. M.: *Verbesserungen von Software zur Strukturoptimierung für additiv hergestellte Bauteile*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Masterarbeit, 2017.
- MANI17 Mani, M.; Witherell, P.; Jee, H.: Design Rules for Additive Manufacturing: A Categorization. In: *ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference: August 6-9, 2017, Cleveland, Ohio, USA*. New York, N.Y.: American Society of Mechanical Engineers, 2017, V001T02A035.
- MAPAL14 Mapal: *Gewichts- und Geometrieoptimierung durch 3D-Lasersintern: Erste serienreife Anwendungen im Werkzeugbereich*. In: *VDI-Z II* (2014), S. 20–21.
- MASTERS87 Masters, W.: *Computer automated manufacturing process and system*. 12.05.1987. Anmeldung: 02.06.1984. US, Patentschrift US4665492.
- MEINERS99 Meiners, W.: *Direktes selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe*. Als Manuskript gedruckt. Aachen: Shaker, 1999.
- MEISEL15 Meisel, N.; Williams, C.: *An Investigation of Key Design for Additive Manufacturing Constraints in Multimaterial Three-Dimensional Printing*. In: *Journal of Mechanical Design* 137 (2015), Nr. 11.
- MELLOR14 Mellor, S.; Hao, L.; Zhang, D.: *Additive manufacturing: A framework for implementation*. In: *International Journal of Production Economics* 149 (2014), S. 194–201.
- MILLER60 Miller, G.; Galanter, E.; Pribram, K.: *Plans and the structure of behavior*. New York, NY: Henry Holt and Co Inc, 1960.

- NOVIELLO16 Noviello, D.: *Understanding the Mechanical Properties of Additively Manufactured Lattice Structures with Testing and Simulation*. Autodesk University, 2016.
- PAHL07 Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007.
- PONCHE12 Ponche, R.; Hascoet, J.; Kerbrat, O.; Mognol, P.: *A new global approach to design for additive manufacturing*. In: *Virtual and Physical Prototyping* 7 (2012), Nr. 2, S. 93–105.
- PONN11 Ponn, J.; Lindemann, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- PRADEL18 Pradel, P.; Zhu, Z.; Bibb, R.; Moultrie, J.: *A framework for mapping design for additive manufacturing knowledge for industrial and product design*. In: *Journal of Engineering Design* 29 (2018), Nr. 6, S. 291–326.
- PROBST13 Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: *Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*. 7. Aufl. 2012, korr. Nachdruck 2013. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2013.
- REINEMUTH17 Reinemuth, J.: *Additiv gefertigte Komponenten für verfahrenstechnische Anwendungen (Additive Fertigung: Chancen und Herausforderungen durch 3D-Druck)*. Pfalzbau Ludwigshafen, 16. März 2017. URL <http://www.transferinitiative-rlp.de>.
- RODRIGUE11 Rodrigue, H.; Rivette, M.; Calatoru, V.; Richir, S.: *Une méthodologie de conception pour la fabrication additive*. In: *9e Congrès International de Génie Industriel: Ecole polytechnique Montréal*, Québec, Kanada, 2011.
- ROSEN07a Rosen, D.: *Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures*. In: *Computer-Aided Design and Applications* 4 (2007), Nr. 5, S. 585–594.

- ROSEN07b Rosen, D.: Design for additive manufacturing: A method to explore unexplored regions of the design space. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): *Eighteenth Annual Solid Freeform Fabrication Symposium: August 6-8, 2007*. Austin: University of Texas, 2007, S. 402–415.
- ROTH00a Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band I Konstruktionslehre*. 3., wesentlich erw. Aufl. Berlin: Springer, 2000.
- ROTH00b Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band II Konstruktionskataloge*. 3., wesentlich erw. Aufl. Berlin: Springer, 2000.
- SAMPERI14 Samperi, M.: *Development of Design Guidelines for Metal Additive Manufacturing and Process Selection*. Pennsylvania, USA, The Pennsylvania State University, Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Masterthesis, 2014.
- SCHÄFER08 Schäfer, R.: *Design Guidelines for Rapid Prototyping - Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien für ein fertigungsgerechtes Gestalten anhand des Fused Deposition Modeling*. Hochschule Bremen, Fakultät Natur und Technik, Abteilung Maschinenbau, Master Thesis, 2008.
- SCHNEIDER86 Schneider, J.: *Konstruktionskataloge als Hilfsmittel bei der Entwicklung von Antrieben*. Zugl.: Darmstadt, Technische Hochschule, Dissertation, 1985. Darmstadt: Hoppenstedt, 1986.
- SCHÜLER17 Schüler, K.: *Kriterien einer additive-manufacturing-gerechten Gestaltung*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktions-technik und Technisches Design, Studienarbeit, 2017.
- SCHUMACHER17 Schumacher, F.; Richter, T.; Vietor, T.: *Ein Rahmenwerk zur Wissensbereitstellung für die Nutzung von Potentialen additiver Fertigung in der Produktentwicklung*, 2017.
- SEEPERSAD17 Seepersad, C.; Allison, J.; Sharpe, C.: The need for effective design guides in additive manufacturing. In: Maier, A.; Škec, S.; Kim, H.; Kokkolaras, M.; Oehmen, J.; Fadel, G.; Salustri, F.; van der Loos, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17)*. Glasgow, Scotland: The Design Society, 2017.

- STRATASYS15 Stratasys: *Laser Sintering design guidelines*. URL <https://www.stratasysdirect.com/resources/design-guidelines/selective-laser-sintering> – Aktualisierungsdatum: 2015 – Überprüfungsdatum 03.07.2018.
- SÜß16 Süß, M.; Klöden, B.; Kirchner, A.; Weißgärber, T.; Hofmann, D.; Schöne, C.; Stelzer, R.; Kieback, B.: Untersuchung zu Konstruktionsempfehlungen für kleine Strukturen beim Elektronenstrahlschmelzen. In: Kniffka, W.; Eichmann, M.; Witt, G. (Hrsg.): *Additiv denken!: Proceedings of the 13th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany*. München: Carl Hanser Verlag, 2016, S. 279–289.
- TANG16 Tang, Y.; Zhao, Y.: *A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance*. In: *Rapid Prototyping Journal* 22 (2016), Nr. 3, S. 569–590.
- THOMAS09 Thomas, D.: *The Development of Design Rules for Selective Laser Melting*: University of Wales; National Centre for Product Design & Development Research, 2009.
- THOMPSON16 Thompson, M.; Moroni, G.; Vaneker, T.; Fadel, G.; Campbell, R.; Gibson, I.; Bernard, A.; Schulz, J.; Graf, P.; Ahuja, B.; Martina, F.: *Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65 (2016), Nr. 2, S. 737–760.
- Universität
Stuttgart17 Universität Stuttgart: *Drehhandhabe*. Erfinder: Weiss, F.; Janny, B., Deutschland. 30.11.2017. Anmeldung: 21.09.2016. DE, Patentschrift DE102016117756B3.
- VAYRE12 Vayre, B.; Vignat, F.; Villeneuve, F.: *Designing for Additive Manufacturing*. In: *Procedia CIRP* 3 (2012), S. 632–637.
- VDI 2221, 1993 VDI 2221 1993. Mai 1993. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 2221-1, 2018 VDI 2221 Blatt 1 - Entwurf. März 2018. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

-
- VDI 2221-2, 2018 VDI 2221 Blatt 2 - Entwurf. März 2018. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 2222-2, 1982 VDI 2222 Blatt 2. Februar 1982. *Konstruktionsmethodik - Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 2223, 2004 VDI 2223. Januar 2004. *Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 3405, 2014 VDI 3405. Dezember 2014. *Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 3405-1, 2013 VDI 3405 Blatt 1. Oktober 2013. *Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing - Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen - Güteüberwachung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 3405-2, 2013 VDI 3405 Blatt 2. August 2013. *Additive Fertigungsverfahren - Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 3405-3, 2015 VDI 3405 Blatt 3. Dezember 2015. *Additive Fertigungsverfahren - Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 5610-1, 2009 VDI 5610 Blatt1. März 2009. *Wissensmanagement im Ingenieurwesen - Grundlagen, Konzepte, Vorgehen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- WEGNER12 Wegner, A.; Witt, G.: *Konstruktionsregeln für das Laser-Sintern*. In: *Zeitschrift Kunststofftechnik* 3 (2012), S. 225–277.
- WEISS15 Weiss, F.; Binz, H.; Roth, D.: Approach to consider rapid manufacturing in the early phases of product development. In: Weber, C.; Husung, S.; Cascini, G.; Cantamessa, M.; Marjanovic, D.; Rotini, F. (Hrsg.): *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15)*. Glasgow, Scotland: The Design Society, 2015.

- WEISS16 Weiss, F.; Binz, H.; Roth, D.: Conception of a design catalogue for the development of functionalities with additive manufacturing. In: Boks, C.; Sigurjonsson, J.; Steinert, M.; Vis, C.; Wulvik, A. (Hrsg.): *Proceedings of NordDesign 2016: 10-12 August 2016, Trondheim, Norway*. Bristol, United Kingdom: The Design Society, 2016.
- WEISS17 Weiss, F.; Ahlgrimm, L.; Binz, H.; Roth, D.: Prozess zur computer-gestützten Anpassung AM-gerechter Lösungsprinzipien an produktspezifische Randbedingungen. In: Binz, H.; Bertsche, B.; Bauer, W.; Spath, D.; Roth, D. (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017: Stuttgart, 29. Juni 2017, Wissenschaftliche Konferenz*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 2017.
- WEISS18 Weiss, F.; Garrelts, E.; Roth, D.; Binz, H.; Brunetti, M.; Karcher, T.: Konstruktionsrestriktionen für das Indirect Tooling mit FDM und Feinguss. In: Kynast, M.; Eichmann, M.; Witt, G. (Hrsg.): *Rapid.Tech + FabCon 3.D – International Trade Show + Conference for Additive Manufacturing: Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference, Erfurt, Germany, 5–7 June 2018*. München: Carl Hanser Verlag, 2018, S. 111–127.
- WOHLERS15 Wohlers, T.: *Wohlers Report 2015: 3D printing and additive manufacturing state of the industry; annual worldwide progress report*. Fort Collins, Colo: Wohlers Associates, 2015.
- YANG14 Yang, L.; Anam, M.: An investigation of standard test part design for additive manufacturing. In: *Solid Freeform Fabrication Symposium, 2014*.
- YANG15 Yang, S.; Zhao, Y.: *Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: A critical review*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 80 (2015), 1-4, S. 327–342.
- ZÄH06 Zäh, M.: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*. München: Carl Hanser Verlag, 2006.

- ZHU17 Zhu, Z.; Pradel, P.; Bibb, R.; Moultrie, J.: A framework for designing end use products for direct manufacturing using additive manufacturing technologies. In: Maier, A.; Škec, S.; Kim, H.; Kokkolaras, M.; Oehmen, J.; Fadel, G.; Salustri, F.; van der Loos, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17)*. Glasgow, Scotland: The Design Society, 2017.
- ZIEBART12 Ziebart, J.: *Ein konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration*. 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut, 2012.
- ZIMMER17 Zimmer, D.: *Nutzbar machen, was denkbar ist*. In: *Konstruktion* (2017), 11/12, S. 3.

Anhang

Der Transparenz und Vollständigkeit halber sind in Anhang A.1 bis A.43 alle Kataloge, die nicht in Kapitel 4.3 vorgestellt werden, in der Form abgebildet, die für die Versuche bereitgestellt wurde. Da die Kataloge für die Anzeige auf Computermonitoren im Querformat, mit einem Seitenverhältnis von 16:9, optimiert sind, ergeben sich beim Druck auf Papier teils Auflösungsprobleme. Für eine bessere Lesbarkeit wird daher auf die digitale Version dieser Dissertation verwiesen.

A.1 Katalog: a. Allgemeine Grundlagen additiver Fertigungstechnologien

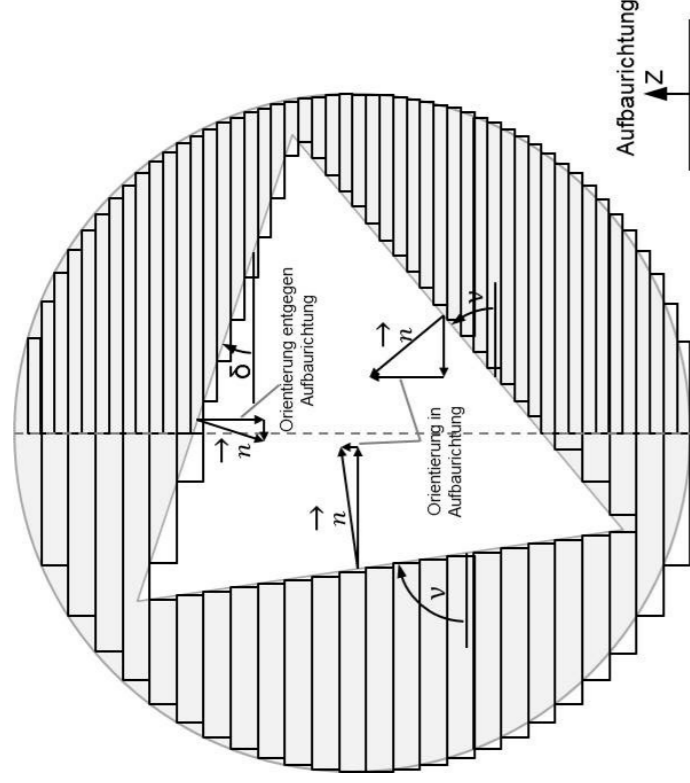
| | | | | | | | |
|--|---|---|--|--|--|---|---|
| <p>Allgemeine Grundlagen additiver Fertigungstechnologien</p> <p>Die Inhalte dieses Katalogs sind zum großen Teil dem Kapitel Gestaltung - Additiv gefertigte Bauteile des Skripts Konstruktionslehre I von Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz [Binz17] aus dem Wintersemester 2017/2018 entlehnt.</p> | <p>Der Überbegriff „Additive Fertigungsverfahren“ bezeichnet Herstellungsverfahren, bei denen aus unterschiedlichsten formlosen Ausgangsmaterialien feste Bauteile hergestellt werden. In Bezug auf die mögliche Gestalt von Bauteilen ergeben sich dadurch, abhängig vom technologischen Grundprinzip des Verfahrens, andere Möglichkeiten als bei konventionell hergestellten Bauteilen.</p> <p>Die Bauprinzipien additiver Fertigungsverfahren beruhen auf einer Phasenumwandlung, wobei Material örtlich gezielt verfestigt wird und somit schrittweise Bauteile erstellt werden. Das Ausgangsmaterial kann hierfür fest, flüssig oder gasförmig vorliegen und die Phasenumwandlung dementsprechend durch unterschiedlichste Effekte angeregt werden. Die verarbeiteten Materialien und damit auch die Eigenschaften der entstehenden Bauteile variieren verfahrensbedingt von Kunststoffen über Metalle bis hin zu Verbundwerkstoffen. Aufgrund dieser Vielfalt an verwendeten Materialien und Effekten existiert eine große Anzahl an unterschiedlichen Fertigungstechnologien.</p> | <p>Anwendungsmöglichkeiten additiver Fertigungsverfahren</p> <p>Additive Fertigungsverfahren haben klassischerweise ihren Haupteinsatzbereich im Prototypenbau, werden aber auch zunehmend zur Herstellung von Endprodukten eingesetzt. Prinzipiell ist hier zwischen der Herstellung von Werkzeugen (Tooling) und der direkten Herstellung von Endprodukten zu unterscheiden.</p> | <p style="text-align: center;">Additive Fertigung</p> <p style="text-align: center;">Synonyme: Generative Fertigung, Schichtweise Fertigung, 3D-Drucken</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Rapid Manufacturing</p> <p>Direct Manufacturing → Endprodukt mit positiver Form</p> <p>Direct Tooling → Endprodukt mit negativer Form</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Rapid Prototyping</p> <p>→ Musterbauteil</p> </div> </div> <p style="text-align: right;">nach [Adam15]</p> | <p>Aufbaumechanismen additiver Fertigungsverfahren</p> <p>Der Aufbau der Bauteile erfolgt in der Regel schichtweise, wobei der bereits gefertigte Teil des (gedruckten) Bauteils mit dem additiv hinzugefügten Material verbunden werden muss. Hierzu werden diese angrenzenden Bereiche erneut oberflächlich aktiviert (siehe Bild unterhalb). Schichten setzen sich bei vielen additiven Fertigungsverfahren aus einzelnen Bahnen zusammen. Es wird oftmals zwischen den äußeren Konturbahnen und den inneren Rasterbahnen unterschieden. Die Bahnen überlappen sich in der Regel und sind dann jeweils um den Spurbestand gegeneinander versetzt (siehe Bild unterhalb).</p> | | <p>Der schichtweise Aufbau verlangt das Vorhandensein von stützendem Material für das aktuell hinzugefügte Material. Diese Funktion erfüllen entweder die Bauteile selbst, disperse (z. B. pulverförmige Strukturen) oder auch solide Stützstrukturen. Diese sind in der Regel während des Fertigungsprozesses zusätzlich mit zu fertigen. Die Konstruktion der soliden Stützstrukturen erfolgt meist automatisiert durch eine entsprechende Software.</p> <p>Aus dem schichtweisen Aufbau resultiert ein nicht isotropes Materialverhalten. Die Abweichung der Materialkennwerte im dreidimensionalen Raum kann dabei variieren. Im Allgemeinen ist für eine Belastung der Bauteile in Aufbaurichtung (z-Richtung in der Abbildung) mit geringeren Festigkeiten zu rechnen als in Schichtrichtung (x-y-Ebene). Durch Temperaturunterschiede zwischen den Schichten und Wärmedehnungen kommt es zu Eigenspannungen im Bauteil. Diese fallen je nach Verfahren und Material unterschiedlich stark aus. Zur Vermeidung von thermischem Verzug der Bauteile können solide Stützstrukturen zur Fixierung der Bauteile während des Bauprozesses und ggf. thermische Nachbehandlungen notwendig sein.</p> | <p style="text-align: center;">in Anlehnung an [Meiners99, S. 82]</p> |
|--|---|---|--|--|--|---|---|

A.2 Katalog: b. Grundlagen zu Oberflächen und Fertigungsgenauigkeiten additiver Fertigungsverfahren

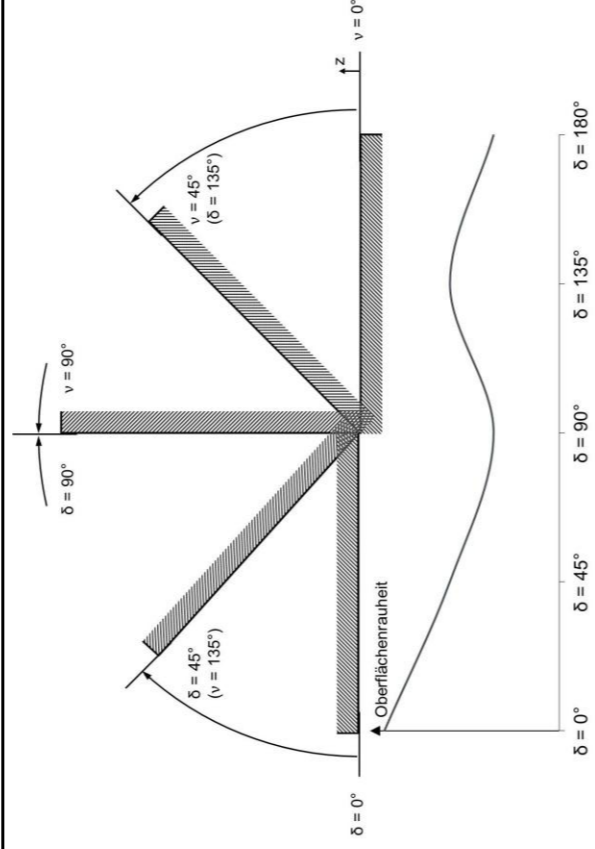
Grundlagen zu **Oberflächen** und **Fertigungsgenauigkeiten** additiver Fertigungsverfahren

Die Inhalte dieses Katalogs sind zum großen Teil dem Kapitel Gestaltung - Additiv gefertigte Bauteile des Skripts Konstruktionslehre I von Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz [Binz17] aus dem Wintersemester 2017/2018 entlehnt.

Durch die Approximation von Körpern durch Schichten entstehen **Abbildungsfehler**. In der Abbildung ist dies für verschiedene Schichtdicken gegenübergestellt. Größere Schichtdicken (linke Körperhälfte) verursachen größere Approximationsfehler als kleinere Schichtdicken (rechte Körperhälfte). Auch die entstehende Oberflächenrauheit wird durch die Schichtdicke beeinflusst. Es wird zwischen Oberflächen mit einem Normalenvektor, der gleich wie die Aufbaurichtung orientiert ist (Upskin-Winkel v), und Oberflächen mit einem Normalenvektor, der entgegengesetzt zur Aufbaurichtung orientiert ist (Downskin-Winkel δ), unterschieden.



Entgegen der Baurichtung orientierte **Oberflächen** haben in der Regel eine höhere Rauheit als gleichorientierte Oberflächen, da die Phasenumwandlung hier nicht durch eine untere Grenzfläche beschränkt wird, was bei vielen Aufbauprinzipien nach oben hin gegeben ist. Eine Ausnahme hiervon stellen z. B. Downskin-Flächen beim Werkstoffextrusions-Verfahren an der Grenzschicht zur Bauplattform dar. In der Nähe der 45°-Winkel steigt für beide Orientierungen der Einfluss des **Treppenstufeneffekts** auf die Oberflächengüte. Die Abbildung zeigt qualitativ den Zusammenhang zwischen Rauheit und Orientierung von Oberflächen.

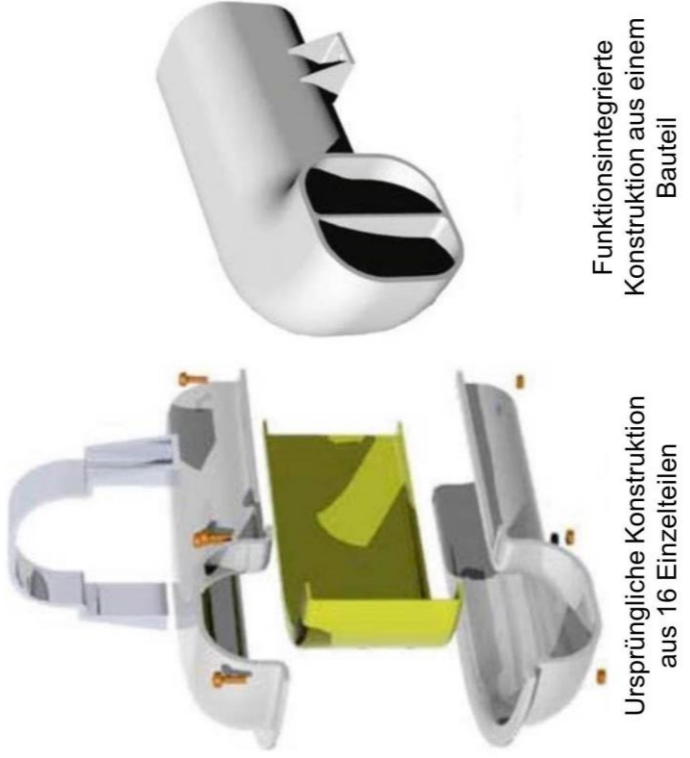


Die Schicht- und Bahnapproximation beschränken auch die erzielbaren **Genauigkeiten**, welche zudem durch die Maschinengenauigkeit und thermische Einflüsse reduziert werden. In der Abbildung sind Fertigungsgenauigkeiten der Verfahren FLM (FDM), LS und LBM einigen konventionell erreichbaren Fertigungsgenauigkeiten gegenübergestellt. Das Spektrum der Genauigkeiten additiver Fertigungsverfahren ist der Vielzahl der Verfahren gemäß sehr hoch. Viele Verfahren erreichen **auch höhere Genauigkeiten**, als die dargestellten. Einen Anhaltspunkt für die Genauigkeit gibt die Schichtstärke. Die Fertigungsgenauigkeiten von FDM sind nach [Lieneke16] beispielsweise in den Toleranzklassen 9 bis 14 nach DIN EN ISO 286-1 angesiedelt und entsprechen somit den Genauigkeiten von Sintern, Schneiden oder Bohren. Die Angaben x, y und z beziehen sich auf die erreichbaren Genauigkeiten der Bauteile in diesen Richtungen in der Baukammer der Fertigungsanlage.

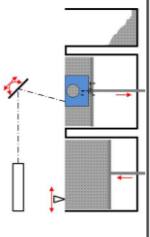
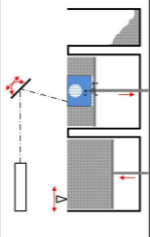
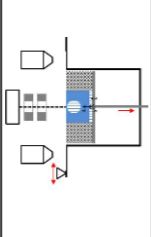
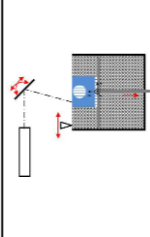
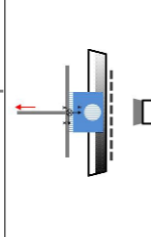
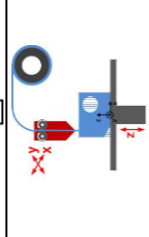
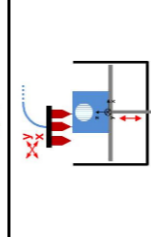
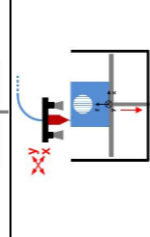
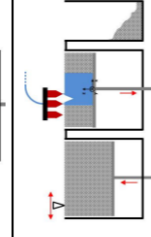
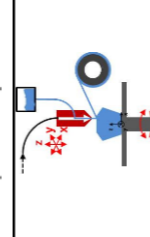
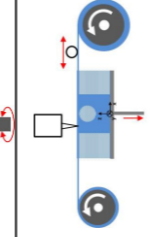
| Fertigungsverfahren | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|----------------------|---|---|---|---|---|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| Gießen | | | | | | | | | | | | |
| Sintern | | | | | | | | | | | | |
| Gesenkschmieden | | | | | | | | | | | | |
| Präzisions Schmieden | | | | | | | | | | | | |
| Kaltfließpressen | | | | | | | | | | | | |
| Walzen | | | | | | | | | | | | |
| Schneiden | | | | | | | | | | | | |
| Drehen | | | | | | | | | | | | |
| Bohren | | | | | | | | | | | | |
| Planfräsen | | | | | | | | | | | | |
| Hobeln | | | | | | | | | | | | |
| Räumen | | | | | | | | | | | | |
| Rundscheifeln | | | | | | | | | | | | |
| FDM nach [Lieneke16] | | | | | | | | | | | | |
| FDM nach [Lieneke15] | | | | | | | | | | xyz | xyz | z |
| LS nach [Lieneke15] | | | | | | | | | | xyz | xyz | xyz |
| LBM nach [Lieneke15] | | | | | | | | | | xy | xy | xy |
| Additive Fertigung | | | | | | | | | | | | |

nach [Fritz10] und [Lieneke15, Lieneke16]

A.3 Katalog: c. Funktionsintegration / Bauteilintegration bei der additiven Fertigung

| Funktionsintegration / Bauteilintegration bei der additiven Fertigung | |
|--|--|
| <p>Die Funktionsintegration ist bei der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile maßgeblich für eine AM-gerechte Konstruktion. Durch die gegebene Gestaltungsfreiheit ist es möglich, verschiedenste Funktionen in einem Bauteil zu integrieren und somit die Anzahl der Bauteile, die notwendigen Montageoperationen und die Summe der anfallenden Kosten zu reduzieren. In einer angepassten Konstruktion können die einzelnen Funktionselemente eines Bauteils derart ausgeführt werden, dass verfahrensspezifische Einschränkungen umgangen werden und die Gesamtfunktion des Bauteils gegeben ist.</p> <p>Der Begriff der Funktionsintegration wird häufig synonym zu Integralbauweise, integrierte Bauweise oder integrale Funktionsausnutzung verwendet. Er umfasst dann auch Aspekte der Bauteilintegration / -vereinigung. Die Funktionsintegration dient zur Verbilligung der Fertigung.</p> | |
| <p>Methoden der Funktionsintegration nach [Ehrlenspiel17]:</p> | <p>1.</p> |
| | <p>Strategie der einteiligen Maschine: Das zu entwickelnde Produkt wird zunächst in der entstehenden Konstruktion als ein einziges Bauteil ausgedacht. Dies umfasst auch bewegte Teile oder Montagetreppenstellen. „Alles ist ein Teil, selbst wenn es verrückt anmutet“. Anschließend wird die einteilige Maschine stufenweise in die minimal notwendige Teilezahl aufgetrennt. Gesichtspunkte dabei:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sind unterschiedliche Werkstoffe notwendig? • Liegen Relativbewegungen vor (Achtung: Elastische Verbindungen können manchmal Lagerungen ersetzen)? • Montage- / Demontagevorgänge? • Ersatzteilaustausch? • Teilungen aufgrund des Transports? • Zugänglichkeiten beim Gebrauch des Produkts? |
| | <p>2.</p> |
| | <p>Analyse des Bauteils: Bauteile werden systematisch dahingehend analysiert, inwieweit sie mit den jeweils benachbarten Bauteilen einer Baugruppe vereinigt werden können. Dabei werden der Werkstoff und das Fertigungsverfahren innerhalb der Möglichkeiten der additiven Fertigung variiert.</p> |
| <p>Das Beispiel zeigt ein funktionsintegriertes Design eines Luftkanals in Militärflugzeugen. Zusätzlich zur Vermeidung von Montageoperationen und der damit einhergehenden Kostenreduktion ist eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit gelungen. Das Bauteil kann nicht konventionell gefertigt werden.</p> |  <p>Ursprüngliche Konstruktion aus 16 Einzelteilen</p> <p>Funktionsintegrierte Konstruktion aus einem Bauteil</p> <p>nach [Gibson15]</p> |

A.4 Katalog: d.1 Additive Fertigungsverfahren

| Verfahrensübersicht | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--|---|---|-------------------------|---------------------------|------------|---------|----------|-----------|---|--|--|
| Nr. | Prozesskategorien nach DIN EN ISO 17296-2 | Verfahren nach VDI 3405 | Skizze | Ausgangsform Werkstoffe | verarbeitbare Materialien | | | | Bemerkung | | | |
| | | | | | Metall | Kunststoff | Keramik | Formsand | | Papier | | |
| 1 | | Laser-Sintern (LS) Synonym: Selektives Laser-Sintern (SLS®) |  | Pulver | X | X | X | X | X | lokale Versinterung von Metallen, Polymeren oder Keramiken | | |
| 2 | Pulverbasiertes Schmelzen (Laser-/ Elektronenstrahl) | Laser-Strahlschmelzen (LBM) |  | Pulver | X | | | | | Verarbeitung metallischer Werkstoffe unter vollständigem Aufschmelzen des Pulvers | | |
| 3 | | Elektronen-Strahlschmelzen (EBM) |  | Pulver | X | | | | | | | |
| 4 | | Stereolithographie (SL) |  | flüssig bis pastös | | X | | | | | | |
| 5 | Photopolymerisation im Bad (Laser-/ Flächenlicht) | Digital Light Processing (DLP) |  | flüssig bis pastös | X | X | | | | | | |
| 6 | Werkstoffextrusion | Fused Layer Modelling (FLM) Synonyme: Fused Deposition Modelling (FDM), Strangablegeverfahren, Materialextrusion |  | fest (Filament) | | X | | | | | | |
| 7 | | Multi-Jet Modelling (MJM) |  | pastös bis fest | | X | | | | | | |
| 8 | Werkstoffauftrag | Poly-Jet Modelling (PJM) |  | flüssig bis pastös | | X | | | | | | |
| 9 | Bindemittelauftrag | 3D-Drucken (3DP) |  | Pulver | X | X | X | X | | | | |
| 10 | Gerichtete Energieeinbringung | Nicht in VDI 3405 enthalten Vertriebsnamen: Laser Metal Deposition, Laserauftragsschweißen |  | Pulver oder Draht | X | | | | X | andere Bezeichnungen: (Laser-) Auftragsschweißen, Direct-Metal-Deposition (DMD), Laser Metal Deposition (LMD) | | |
| 11 | Schichtlaminiierung | Layer-Laminated-Manufacturing (LLM) |  | fest | | | | | | | | |

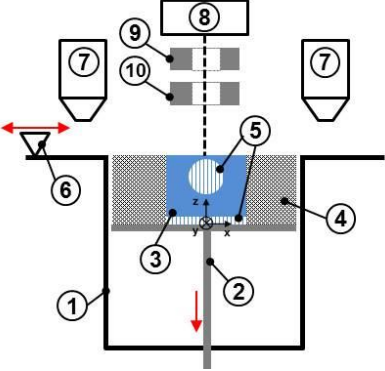
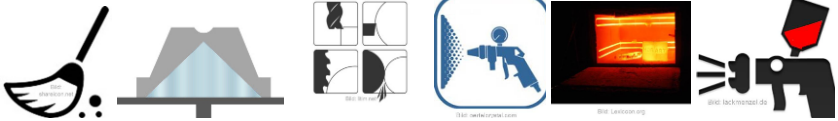
A.5 Katalog: d.2 Additive Fertigungsverfahren

| <p style="text-align: center;">Laser-Sintern (LS) Synonym: Selektives Laser-Sintern (SLS®)</p> | | | |
|--|---|--|--|
| Verfahrensskizze | <ol style="list-style-type: none"> 1 Pulverbeschickungssystem mit Rake (alternativ: bewegter Pulverbehälter oberhalb der Bauebene) 2 Baukammer 3 Überlaufbehälter 4 Bauplattform (beheizt) 5 Laser 6 Fliegende Optik (x-y-Scanner) 7 Produkt 8 Disperse Stützstruktur | | |
| Prozessbeschreibung | Kurzbeschreibung | Selektives Aufschmelzen (Sintern) der obersten Pulverschicht durch Laserstrahlung. Um thermischen Verzug im Bauteil zu verringern und die benötigte Aktivierungsenergie zum Aufschmelzen zu reduzieren, wird die komplette Baukammer vorgeheizt. | |
| | Werkstoffe und Bindungsmechanismus | Meist pulverförmige Metalle, <u>Keramiken</u> und <u>Thermoplaste</u> , die durch thermische Reaktion einen Verbund ausbilden. | |
| | Nachbearbeitung | | |
| Konstruktionshinweise | Typische Schichtdicken und Aufbautraten | <ul style="list-style-type: none"> • maximale Bauraumgröße: 550 x 550 x 750 mm • kleinste mögliche Strukturgröße: 0.15 mm • Genauigkeit: 0.25 mm • kleinste Schichtdicke: 0.1 mm [Gebhardt16] | |
| | Eignung / Anwendung | <ul style="list-style-type: none"> • Prototypen • Kleinserienteile bis Unikate | |
| | Einschränkungen | <ul style="list-style-type: none"> • langsamer Prozess unter Schutzgasatmosphäre | |
| Verwandte Verfahren | Elektronen-Strahlschmelzen (EBM) | Laser-Strahlschmelzen (LBM) | |

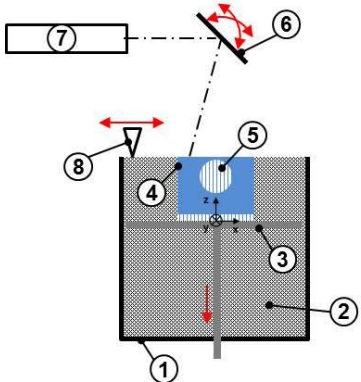

A.6 Katalog: d.3 Additive Fertigungsverfahren

| <p style="text-align: center;">Laser-Strahlschmelzen (LBM) Eng.: Laser-Beam-Melting auch Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Pulverbettbasiertes Schmelzen bzw. Sintern oder Laser Cusing</p> | | | |
|--|---|---|--|
| Verfahrensskizze | <ol style="list-style-type: none"> 1 Pulverbeschickungssystem mit Rake (alternativ: bewegter Pulverbehälter oberhalb der Bauebene) 2 Baukammer 3 Überlaufbehälter 4 Bauplattform (beheizt) 5 Laser 6 Fliegende Optik (x-y-Scanner) 7 Produkt 8 Solide Stützstruktur | | |
| Prozessbeschreibung | Kurzbeschreibung | <p>Selektives Aufschmelzen der obersten Pulverschicht durch Laserstrahlung.</p> <p>Um thermischen Verzug im Bauteil zu verringern und die benötigte Aktivierungsenergie zum Aufschmelzen zu reduzieren, wird die komplette Baukammer vorgeheizt.</p> | |
| | Werkstoffe und Bindungsmechanismus | <p>Pulverförmiges <u>Metall</u>, das durch thermische Aktivierung vollständig verschmilzt.</p> | |
| | Nachbearbeitung | | |
| Konstruktionshinweise | Typische Schichtdicken und Aufbauraten | <ul style="list-style-type: none"> • maximale Bauraumgröße: 630 x 400 x 500 mm • kleinste mögliche Strukturgröße: 0,04 - 0,2 mm • Genauigkeit: 0,05 - 0,2 mm • kleinste Schichtstärke: 0,03 mm [Gebhardt16] | |
| | Eignung / Anwendung | <ul style="list-style-type: none"> • Dichte) 99% • Prototypen • Kleinserienteile bis Unikate • Werkzeuge und Werkzeugeinsätze (konturnahe Kühlkanäle) | |
| | Einschränkungen | <ul style="list-style-type: none"> • solide Stützkonstruktionen zur Bauteilbefestigung gegen thermischen Verzug und zur Abfuhr des Wärmeeintrags erforderlich • langsamer und teurer Prozess unter Schutzgasatmosphäre | |
| Verwandte Verfahren | <p>Elektronen-Strahlschmelzen (EBM)</p> | <p>Laser-Sintern (LS)</p> | |

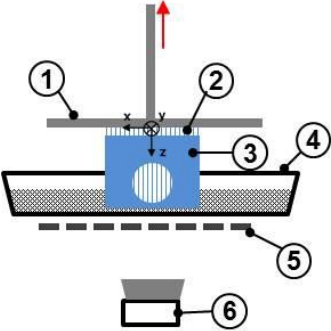



A.7 Katalog: d.4 Additive Fertigungsverfahren

| | | |
|-----------------------------------|--|--|
| | Elektronen-Strahlschmelzen (EBM) Eng.: Elektro-Beam-Melting auch Pulverbettsschmelzen durch Elektronenstrahl | |
| Verfahrensskizze |  <ul style="list-style-type: none"> 1 Baukammer 2 Bauplattform mit Hubtisch 3 Produkt 4 Pulverbett 5 Stützstruktur 6 Rakel 7 Pulvervorratsbehälter 8 Elektronenstrahlerzeuger 9 Fokussierspule 10 Ablenkspule | |
| Prozessbeschreibung | Kurzbeschreibung | Selektives Aufschmelzen der obersten Pulverschicht durch Elektronenstrahl. Um thermischen Verzug im Bauteil zu verringern und die benötigte Aktivierungsenergie zum Aufschmelzen zu reduzieren, wird die komplette Baukammer (mit defokussiertem Elektronenstrahl) vorgeheizt |
| Werkstoff und Bindungsmechanismus | Pulverförmige Metalle, die durch die Bewegungsenergie der Elektronen lokal aufgeschmolzen werden (thermische Reaktion). | |
| Nachbearbeitung |  | |
| Konstruktionshinweise | Typische Schichtdicken und Aufbautaten | <ul style="list-style-type: none"> • maximale Bauraumgröße: 200 x 200 x 300 mm • kleinste mögliche Strukturgröße: 0,1 mm • Genauigkeit: 0,13 – 0,2 mm [Gebhardt16] |
| Eignung / Anwendung | <ul style="list-style-type: none"> • Kleinserienteile, auch Unikate • Prototypen, Hilfsteile • Medizintechnik und Luftfahrt • hohe Dichte (bis zu 99,9%); gute mechanische Eigenschaften, • geringe thermische Spannungen | |
| Einschränkungen | <ul style="list-style-type: none"> • solide Stützkonstruktionen zur Bauteilbefestigung gegen thermischen Verzug und zur Abfuhr des Wärmeeintrags erforderlich • wenige zertifizierte Materialien • langsamer und teurer Prozess unter Vakuum (schneller als LBM) | |
| Verwandte Verfahren | Laser-Strahlschmelzen (LBM) | Laser-Sintern (LS) |

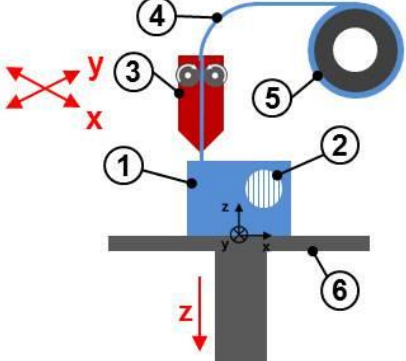

A.8 Katalog: d.5 Additive Fertigungsverfahren

| | | |
|-----------------------------------|--|---|
| | Stereolithographie (SL) oder SLA | |
| Verfahrensskizze |  <ol style="list-style-type: none"> 1 Baukammer 2 Flüssiges Harz (Polymerbad) 3 Bauplattform mit Hubtisch 4 Produkt 5 Stützstruktur 6 Fliegende Optik (x-y-Scanner) 7 Lichtquelle (Laser) 8 Rakel zur Neubeschichtung und Einebnung | |
| Prozessbeschreibung | Kurzbeschreibung | Additives Fertigungsverfahren, bei dem ein flüssiges Photopolymer in einem Bad selektiv durch lichtaktivierte Polymerisation ausgehärtet wird. |
| Werkstoff und Bindungsmechanismus | Photoreaktives Harz mit oder ohne Füllstoff flüssig bis pastös, das durch UV-Strahlung aktiviert eine chemische Verbindung mit dem Bauteil ausbildet | |
| Nachbearbeitung |  | |
| Konstruktionshinweise | Typische Schichtdicken und Aufbauraten | <ul style="list-style-type: none"> • maximale Bauraumgröße: 2100 x 700 x 800 mm • kleinste mögliche Strukturgröße: 0,1 mm <ul style="list-style-type: none"> • Genauigkeit: 0,15 mm • kleinste Schichtstärke: 0,01 mm [Gebhardt16] |
| Eignung / Anwendung | <ul style="list-style-type: none"> • Prototypen (visuelle Tests, Form- und Passtest) • Urmodelle für konventionelle Prozesse, Medizintechnik • hohe Oberflächengüten und feine Details darstellbar | |
| Einschränkungen | <ul style="list-style-type: none"> • Verlust der mechanischen Eigenschaften und der Geometrie durch Alterung • Anbindung Bauplattform nur über Stützkonstruktion <ul style="list-style-type: none"> • nur photoreaktive Werkstoffe möglich | |
| Verwandte Verfahren | Digital Light Processing (DLP) | Poly-Jet-Modelling (PJM) |

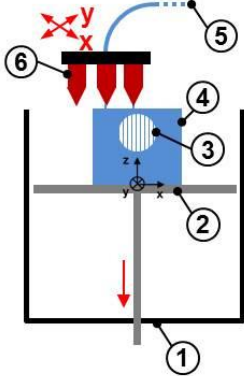

A.9 Katalog: d.6 Additive Fertigungsverfahren

| Digital Light Processing (DLP) oder Photopolymerisation im Bad durch kontrollierte Flächenleuchte oder Stereolithographie im Maskenverfahren | | |
|--|---|--|
| Verfahrensskizze |  <ol style="list-style-type: none"> 1 Bauplattform mit Hubtisch 2 Stützstruktur 3 Produkt 4 Wanne (transparent) mit Photopolymer 5 Fotomaske 6 UV-Belichtungsmodul | |
| Prozessbeschreibung | Kurzbeschreibung | Lokale Polymerisation durch UV-Licht von unten mit Hilfe einer Lichtmaske oder eines Digital Micromirror Device (~Analogie Beamer). |
| | Werkstoffe und Bindungsmechanismus | Photoreaktives Harz (flüssig bis pastös) mit oder ohne Füllstoffe, das durch UV-Strahlung chemisch vernetzt wird (Polymerisation). |
| | Nachbearbeitung |  |
| Konstruktionshinweise | Typische Schichtdicken und Aufbautaten | <ul style="list-style-type: none"> • maximale Bauraumgröße: 140 x 140 x 180 mm • kleinste mögliche Strukturgröße: 0,1 mm • kleinste Schichtstärke: 0,01 mm [Gebhardt16] |
| | Eignung / Anwendung | <ul style="list-style-type: none"> • kleine Bauteile, schneller Materialwechsel • Medizintechnik • Prototypenbau, Urformen [Gebhardt16] |
| | Einschränkungen | <ul style="list-style-type: none"> • Verlust der Geometrie und der mechanischen Eigenschaften durch Alterung |
| Verwandte Verfahren |  Stereolithographie (SL)  Poly-Jet-Modelling (PJM) | |

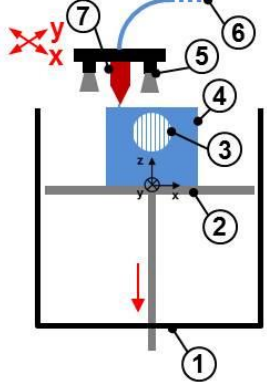

A.10 Katalog: d.7 Additive Fertigungsverfahren

| | | |
|-----------------------------------|---|--|
| | <p align="center">Fused Layer Modelling (FLM) auch Fused Deposition Modelling (FDM), Fused Filament Fabrication (FFF) oder Fused Layer Manufacturing (FLM)</p> | |
| Verfahrensskizze |  | <ol style="list-style-type: none"> 1 Produkt 2 Stützstruktur 3 Beheizte Düse 4 Kunststoff-Filament 5 Materialvorrat in Drahtform 6 Bauplattform (beheizt) |
| Prozessbeschreibung | <p>Kurzbeschreibung</p> | Aufschmelzen und lokales Auftragen thermoplastischen Materials mittels einer beheizten Düse; unmittelbare Verfestigung des extrudierten Materials |
| Werkstoff und Bindungsmechanismus | <p>Werkstoff und Bindungsmechanismus</p> | Thermoplaste mit oder ohne Füllstoff, die durch thermische Reaktion einen Verbund herstellen. Multimaterialanwendung möglich |
| Nachbearbeitung | <p>Nachbearbeitung</p> |  |
| Konstruktionshinweise | <p>Typische Schichtdicken und Aufbauraten</p> | <ul style="list-style-type: none"> • maximale Bauraumgröße: 914 x 610 x 914 mm • typische Strangdurchmesser: 0,1 - 0,25 mm <ul style="list-style-type: none"> • Genauigkeit: 0,09 mm • kleinste Schichtstärke: 0,01 mm [Gebhardt16] |
| Eignung / Anwendung | <p>Eignung / Anwendung</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Konzeptmodelle, Funktionsprototypen • Hilfsteile (Schablonen, Lehren) • Kleinserien (meist Standardmaterialien) [Gebhardt16] |
| Einschränkungen | <p>Einschränkungen</p> | <ul style="list-style-type: none"> • feine Details nicht abbildbar • Stufensichtbarkeit auf der Oberfläche • starke Anisotropie in z-Richtung • Stabilität des Bauteilfundaments beachten |
| <p>Verwandte Verfahren</p> | Material-Jetting-Verfahren | Gerichtete Energiedisposition |

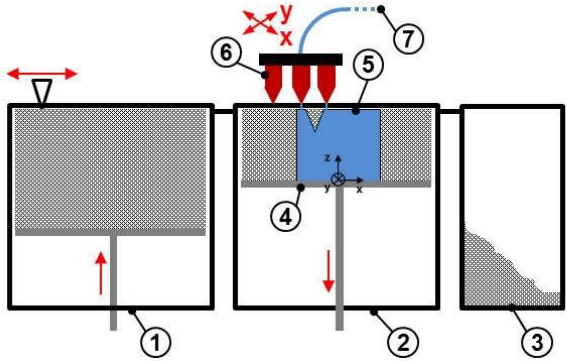

A.11 Katalog: d.8 Additive Fertigungsverfahren

| | | |
|-----------------------|---|--|
| | Multi-Jet Modelling (MJM) oder Material-Jetting-Verfahren (MJ) oder Drop on Demand, Thermojet, Inkjet printing | |
| Verfahrensskizze |  | <ol style="list-style-type: none"> 1 Baukammer 2 Bauplattform mit Hubtisch 3 Stützstruktur 4 Produkt 5 Materialzufuhr (vorgewärmt) 6 Dosiereinrichtung mit Druckköpfen (beheizt) |
| Prozessbeschreibung | Kurzbeschreibung | Schichtweises, lokales Auftragen und unmittelbares Verfestigen des Werkstoffs |
| Prozessbeschreibung | Werkstoff und Bindungsmechanismus | Thermoplastische Wachse, Multimaterial-Anwendungen möglich; Verflüssigen erst im Druckkopf, thermischer Bindungsmechanismus |
| Prozessbeschreibung | Nachbearbeitung |  |
| Konstruktionshinweise | Typische Schichtdicken und Aufbauraten | <ul style="list-style-type: none"> • maximale Bauraumgröße: 300 x 185 x 200 mm • kleinste mögliche Strukturgröße: 0,1 mm <ul style="list-style-type: none"> • Genauigkeit: 0,025 mm • kleinste Schichtstärke: 0,013 mm [Gebhardt16] |
| Konstruktionshinweise | Eignung / Anwendung | <ul style="list-style-type: none"> • hohe Genauigkeit, gute Oberflächen <ul style="list-style-type: none"> • Wachs-Prototypen • Gussmodelle (Medizin, Dental, Schmuck) |
| Konstruktionshinweise | Einschränkungen | <ul style="list-style-type: none"> • geringe Einsatztemperaturen • Stützstrukturen erforderlich <ul style="list-style-type: none"> • fragile Bauteile (Wachs) • langsamer Bauprozess |
| | Verwandte Verfahren | Fused Layer Modelling (FLM) |
| | | Gerichtete Energiedisposition (LMD) |

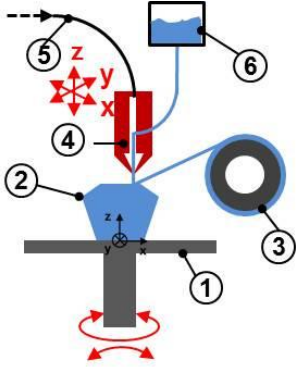

A.12 Katalog: d.9 Additive Fertigungsverfahren

| | | |
|------------------------------|---|---|
| | <p>Poly-Jet Modelling (PJM) oder Photopolymer Jetting (PJ)</p> | |
| <p>Verfahrensskizze</p> |  | <ol style="list-style-type: none"> 1 Baukammer 2 Bauplattform mit Hubtisch 3 Stützstruktur 4 Produkt 5 UV-Strahler 6 Materialzufuhr 7 Druckkopf (mehrere möglich) |
| <p>Prozessbeschreibung</p> | <p>Kurzbeschreibung</p> | <p>Schichtweises, linienförmiges Auftragen von flüssigen Fotopolymer-Harzen mit unmittelbarem Aushärten</p> |
| | <p>Werkstoff und Bindungsmechanismus</p> | <p>Flüssige/pastöse <u>photoreaktive Harze</u>, die durch UV-Strahlung unmittelbar ausgehärtet werden (chemische Bindung); Multimaterialmischungen möglich</p> |
| <p>Nachbearbeitung</p> | <p>Nachbearbeitung</p> |  |
| <p>Konstruktionshinweise</p> | <p>Typische Schichtdicken und Aufbauraten</p> | <ul style="list-style-type: none"> • maximale Bauraumgröße: 1000 x 800 x 500 mm • kleinste mögliche Strukturgröße: 0,15 mm <ul style="list-style-type: none"> • Genauigkeit: 0,025 mm • kleinste Schichtdicke: 0,016 mm [Gebhardt16] |
| | <p>Eignung / Anwendung</p> | <ul style="list-style-type: none"> • sehr genaue Teile mit guten Oberflächen • Prototypen (visuelle Test, Form- und Passtests) • Urmodelle, Werkzeug(einsätze) für Kleinstserien (Spritzguss) |
| | <p>Einschränkungen</p> | <ul style="list-style-type: none"> • nur UV-vernetzbar Monomere • Verlust der mechanischen Eigenschaften durch Alterung • langsamer Bauprozess durch geringe Schichtdicke |
| | <p>Verwandte Verfahren</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="497 1648 845 1778"> <p>Stereolithographie</p> </div> <div data-bbox="845 1648 1396 1778"> <p>Digital-Light-Processing (DLP)</p> </div> </div> | |



A.13 Katalog: d.10 Additive Fertigungsverfahren

| <p style="text-align: center;">3D-Drucken (3DP) Eng.: 3D-Printing auch Binder-Jetting-Verfahren (BJ)</p> | | | |
|---|---|---|--|
| Verfahrensskizze |  <p>The diagram illustrates the 3D printing process in three stages. Stage 1 shows a powder bed being leveled by a rake (1). Stage 2 shows a layer of powder being deposited (6) onto a platform (4) within a chamber (2), with a binder being applied (5) to form a product (5). Stage 3 shows the finished product (5) being removed from the chamber (2) and the powder being collected in a container (3). A legend on the right identifies the components: 1. Pulverbeschickungssystem mit Raket, 2. Baukammer, 3. Überlaufbehälter, 4. Bauplattform, 5. Produkt, 6. Dosiereinrichtung mit Druckköpfen, 7. Bindemittelzufuhr.</p> | | |
| Prozessbeschreibung | Kurzbeschreibung | Tröpfchenweises Auftragen von Bindemittel oder Polymerisationsaktivator (Copolymerisation) auf pulverförmiges Material | |
| | Werkstoffe und Bindungsmechanismus | Pulvergemische (Polymere, Gips), <u>Keramiken</u> , <u>Metalle</u> , die mit Hilfe eines Bindemittels chemisch aktiviert werden und einen Verbund ausbilden | |
| | Nachbearbeitung |  <p>Sintern (Keramik, Metalle)</p> | |
| Konstruktionshinweise | Typische Schichtdicken und Aufbauraten | <ul style="list-style-type: none"> • maximale Bauraumgröße: 4000 x 2000 x 1000 mm • kleinste mögliche Strukturgröße: 0,1 mm • Genauigkeit: 0,13 mm • kleinste Schichtstärke: 0,09 mm [Gebhardt16] | |
| | Eignung / Anwendung | <ul style="list-style-type: none"> • Grünteile (anschließend Sintern) • Gussformen- und kerne (Gusssand) • Urmodelle für den Guss • Prototypen (Konzeptmodelle, Form- und Passtests) [Gebhardt16] | |
| | Einschränkungen | <ul style="list-style-type: none"> • ohne Weiterverarbeitung fragil und geringe mechanische Belastbarkeit | |
| | Verwandte Verfahren | | |

A.14 Katalog: d.11 Additive Fertigungsverfahren

| | | | | |
|------------------------------------|---|--|------------------------------------|---|
| | <p>Gerichtete Energieeinbringung oder (Laser-) Auftragsschweißen oder Direct-Metal-Deposition (DMD) oder Laser-Metal-Deposition (LMD)</p> | | | |
| <p>Verfahrensskizze</p> |  | <p>Meist entweder Pulver (6) oder Draht (3)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Bauplattform 2 Produkt 3 Drahtspule 4 Pulverdüse mit gerichtetem Energiestahl (Laser, Elektronenstrahl, Plasmabogen) 5 Schutzgasversorgung 6 Pulvervorrat | | |
| <p>Prozessbeschreibung</p> | <p>Kurzbeschreibung</p> | <p>Lokales Auftragen und Verschmelzen mit existierendem Bauteil (ähnlich Auftragsschweißen)</p> | | |
| | <p>Werkstoff und Bindungsmechanismus</p> | <p><u>Metallpulver</u> oder <u>Metalldraht</u> (selten beides in derselben Anwendung) Bindung durch lokales Aufschmelzen mit Hilfe eines Lasers, Elektronenstrahls oder Plasmabogens (thermische Reaktion)</p> | | |
| | <p>Nachbearbeitung</p> |  | | |
| <p>Konstruktionshinweise</p> | <p>Typische Schichtdicken und Aufbauraten</p> | <ul style="list-style-type: none"> • kleinste Schichtstärke: 0,5 mm (einige Zehntel mm) • Aufbauraten: 20 - 150 mm³/h [Gebhardt16] | | |
| | <p>Eignung / Anwendung</p> | <ul style="list-style-type: none"> • hohe Aufbauraten • Wartung und Reparatur • komplexe, zumeist rotationssymmetrische Geometrien mit Hinterschnitten | | |
| | <p>Einschränkungen</p> | <ul style="list-style-type: none"> • nur zusammenhängende Geometrien möglich • größere minimale Wandstärken im Vergleich zu pulverbettbasierten Verfahren | | |
| | <p>Verwandte Verfahren</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;"> <p>Fused Layer Modelling (FLM)</p> </td> <td style="width: 50%; text-align: center;"> <p>Material-Jetting-Verfahren (MJM)</p> </td> </tr> </table> | | <p>Fused Layer Modelling (FLM)</p> | <p>Material-Jetting-Verfahren (MJM)</p> |
| <p>Fused Layer Modelling (FLM)</p> | <p>Material-Jetting-Verfahren (MJM)</p> | | | |

A.15 Katalog: d.12 Additive Fertigungsverfahren

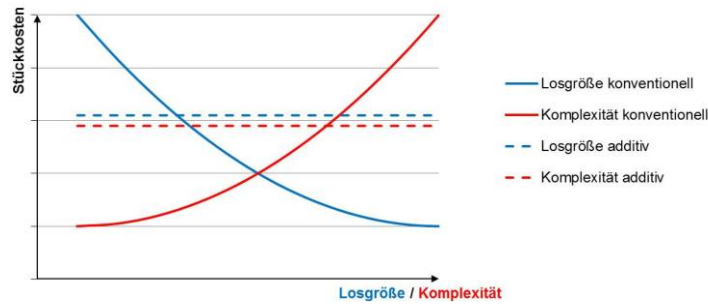
| | | |
|-----------------------------------|---|--|
| | Layer-Laminated-Manufacturing (LLM) auch Sheet-Lamination (Schichtlaminiierung) | |
| Verfahrensskizze |  | |
| Prozessbeschreibung | Kurzbeschreibung | Bauteil aus aufeinander gefügten Folienausschnitten Lokales Ausschneiden der Schichtkontur durch Laser, Messer oder Wasserstrahl |
| Werkstoff und Bindungsmechanismus | Folien aus <u>Papier, Metall, Kunststoff, Keramik</u> Verkleben oder Fügen durch Ultraschall, Lötten, Diffusionsschweißen d. h. chemischer oder thermisch-chemischer Bindungsmechanismus | |
| Nachbearbeitung |  | |
| Konstruktionshinweise | Typische Schichtdicken und Aufbauraten | <ul style="list-style-type: none"> • maximale Bauraumgröße 1180 x 730 x 550 mm • Genauigkeit (x/y): 0.025 mm • kleinste Schichtstärke: 0.05 – 0.2 mm [Gebhardt16] |
| Eignung / Anwendung | <ul style="list-style-type: none"> • schnelle Fertigung massiver Bauteile • große Materialvielfalt [Gebhardt16] | |
| Einschränkungen | <ul style="list-style-type: none"> • hohe Schichtdicke • hohe Stufenausbildung • hohe Anisotropie in z-Richtung | |
| | Verwandte Verfahren | --- |

A.16 Katalog: f. Grundlagen zu Entwicklungskosten und Entwicklungszeiten bei der additiven Fertigung

Grundlagen zu **Entwicklungskosten** und **Entwicklungszeiten** bei der additiven Fertigung

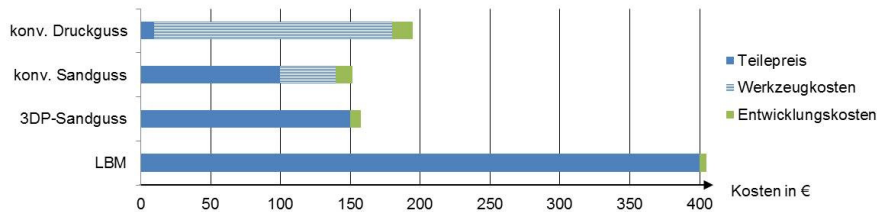
Die Inhalte dieses Katalogs sind zum großen Teil dem Kapitel Gestaltung - Additiv gefertigte Bauteile des Skripts Konstruktionslehre I von Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz [Binz17] aus dem Wintersemester 2017/2018 entlehnt.

Alle additiven Fertigungsverfahren haben gemeinsam, dass die Fertigungskosten maßgeblich vom Materialverbrauch und nicht von der Bauteilkomplexität abhängen. Dies steht im Gegensatz zu konventionell gefertigten Bauteilen, bei denen die Stückkosten maßgeblich von der Komplexität der Bauteile beeinflusst werden. Der Skaleneffekt, der bei der konventionellen Massenproduktion von Produkten die Kosten pro Stück reduziert, tritt bei additiven Fertigungsverfahren dagegen nur begrenzt auf (siehe Abbildung).



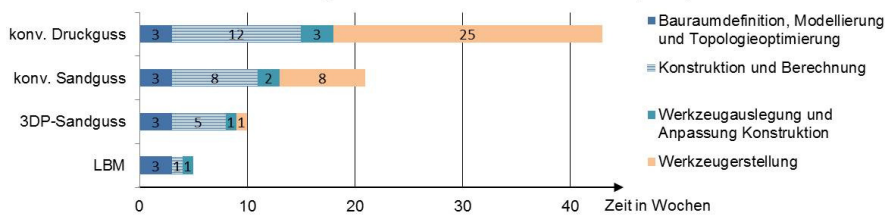
Die unterschiedlichen Zusammenhänge zwischen Kosten und Losgröße lassen sich mit der Zusammensetzung der Kosten pro Bauteil erklären. Die Fixkosten für Werkzeuge und die Entwicklungskosten haben bei additiven Fertigungsverfahren nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten pro Bauteil, wodurch der Skaleneffekt gering ausfällt. In der Abbildung sind die Kostenstrukturen für verschiedene Herstellungsverfahren für ein exemplarisches Bauteil mit einer Losgröße von 1000 Stück dargestellt. Verglichen werden das direct manufacturing mit Laser-Strahlschmelzen (LBM), das direct tooling einer Sandgussform mit 3D-Drucken (3DP) sowie die konventionellen Verfahren Sandguss und Druckguss. Die Kosten für die Nachbearbeitung sind in der Darstellung in den Teilekosten enthalten.

Einzelkosten je Bauteil bei 1000 St.

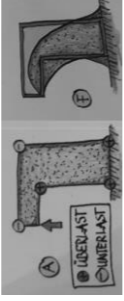
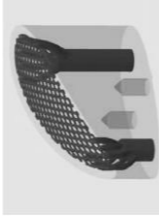
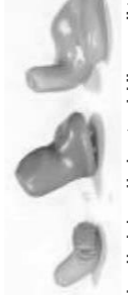



Die Entwicklungskosten stehen in Zusammenhang mit der Entwicklungsdauer. Die anteiligen Entwicklungszeiten bis zum Beginn der eigentlichen Teilefertigung (SOP) für die verschiedenen Herstellungsverfahren sind in nachfolgender Abbildung dargestellt. Vor allem die Phase der Konstruktion und Berechnung sowie die Werkzeugerstellung fallen für die Nutzung additiver Fertigungsverfahren deutlich kürzer aus. Für LBM entfällt die Werkzeugerstellung naturgemäß vollständig.

Entwicklungsdauer bis Start of Production (SOP)



A.17 Katalog: g. Checkliste zweckmäßiger (wirtschaftlicher) Einsatz

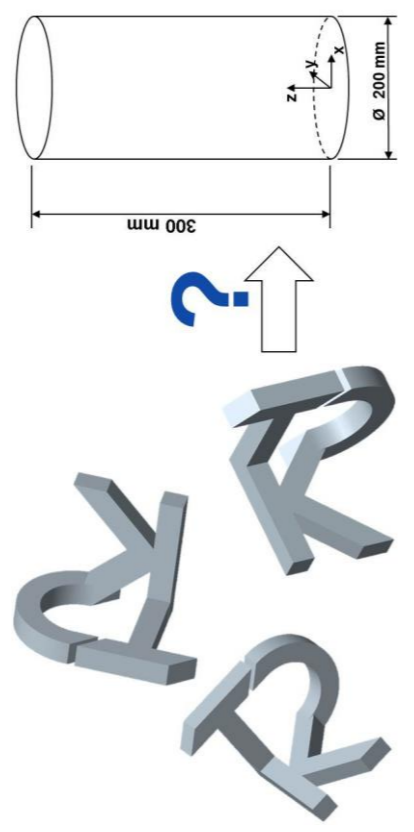
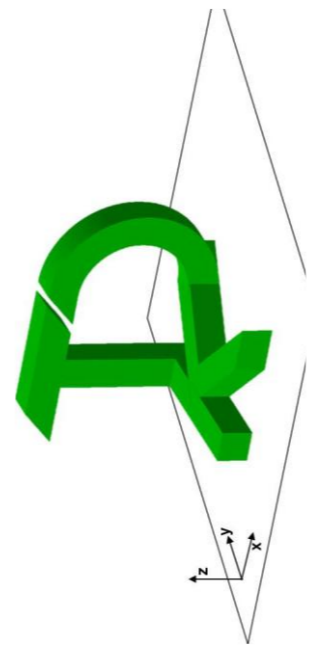
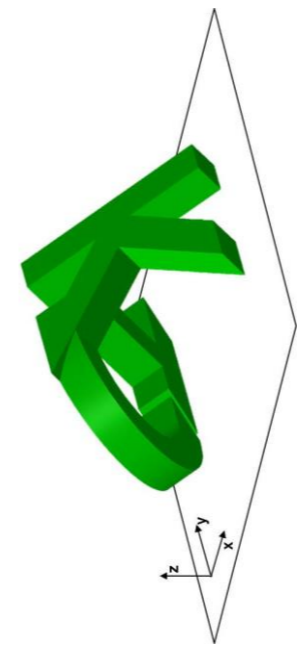
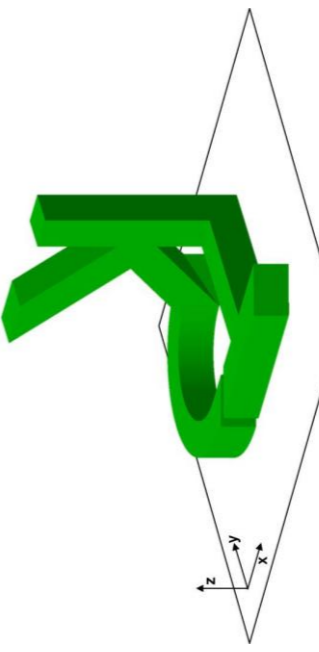
| Checkliste zweckmäßiger (wirtschaftlicher) Einsatz | | Additive Fertigungsverfahren ergänzen das bestehende Portfolio möglicher Herstellungsprozesse. In einer Studie der acatech aus dem Dezember 2016 [acatech16] sind Charakteristika aufgeführt, die für einen wirtschaftlichen Einsatz der additiven Fertigung sprechen. Diese Charakteristika sind im Folgenden als Checkliste ausgeführt und durch ihre Reihenfolge priorisiert. Treffen ein oder mehrere der Punkte auf ein Entwicklungsprojekt zu, kann ein wirtschaftlicher Einsatz von AM gegeben sein. | |
|---|--|--|---------|
| Legende: ✓ = erfüllt - = nicht erfüllt ? = Informationsmangel | | Beispiel / Quantifizierung | Erfüllt |
| Entwicklungscharakteristik | | | |
| 1. Das Bauteil hat kleine Abmessungen . – Ist der Bauraum von AM-Anlagen ausreichend zur Herstellung des Bauteils? | | Mit additiven Fertigungsverfahren hergestellte Bauteile überschreiten typischerweise nicht die Größendimensionen eines Fußballs | |
| 2. Wird das Bauteil in geringen Stückzahlen benötigt? | | derzeit etwa 1000 Stück pro Jahr | |
| 3. Es besteht Leichtbaupotenzial . – Sind Bauteile oder Komponenten zu schwer? | |  [Mattheck06, S.107] | |
| 4. Einschränkungen der Konstruktion durch konventionelle Fertigungsverfahren (vgl. Wärmetauscher) – Geometrien, die anders nicht herzustellen sind? | |  [GEBHARDT16, S. 121] | |
| 5. Kundenindividuelle Sachleistungen – Bringt die Personalisierbarkeit / Individualisierbarkeit von Produkten einen Vorteil? | |  Bsp.: individualisierte Hörgeräte [VDI 3405, S. 19] | |
| 6. Sehr lange Produktentwicklungszeiten durch z. B. Werkzeugbau – Handelt es sich um ein Bauteil, welches häufige Änderungen durchläuft und/oder innerhalb sehr kurzer Zeit entwickelt werden muss? | |  [GEBHARDT16, S. 104] | |
| 7. Konventionell aufwändige mehrstufige Fertigungsprozesse – Sind bei konventioneller Fertigung beispielsweise viele Umrüst- und Umspannprozesse notwendig? | | | |
| 8. Mehrstufige Montageoperationen von Einzelteilen aus demselben Werkstoff (vgl. General Electric Einspritzdüse) – Lassen sich durch Funktions- und Bauteilintegration Montageschritte einsparen? | | | |
| 9. Hohe Betriebskosten im Verhältnis zu den Anschaffungskosten – Zeichnet sich der Einsatzort durch anteilig hohe entstehende variable Kosten aus? | | Einsatz von Leichtbauteilen in Luft- und Raumfahrt zur Minimierung des Treibstoffverbrauchs | |
| 10. Hohe Kosten durch (geplante und ungeplante) Stillstandszeit von komplexen Produktionsanlagen ? | | Technologie zur Überbrückung von Zeiten der Markteinführung, bis die Marktdurchsetzung den Einsatz von Produktionssystemen mit höheren Werkzeugkosten erfordert. | |
| 11. Einsatz teurer oder konventionell schwer zu verarbeitender Werkstoffe ? | | Herstellung von Leichtbauteilen mit komplexer geometrischer Struktur aus hochfesten Werkstoffen. | |
| 12. Dezentraler Ersatzteilbedarf ? | | Ersatzteilbereitstellung für ältere Kleinserienfahrzeuge | |
| 13. Hoher Zerspanungsgrad bei konventioneller Konstruktion? | | | |

A.18 Katalog: h. Checkliste AM-gerechte Gestaltung

| Checkliste AM-gerechte Gestaltung | |
|---|--|
| <p>Durch die Nutzung additiver Fertigungstechnologien (AM) ergeben sich einerseits neue Möglichkeiten, andererseits sind einige Beschränkungen einzuhalten. Bei der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile sind daher verschiedenste Aspekte zu beachten, um eine AM-gerechte Konstruktion zu erlangen.</p> <p>Diese Checkliste gibt einen Überblick über die wichtigsten Aspekte und priorisiert diese durch ihre Reihenfolge. Sie begleitet den kompletten Entwicklungsprozess, um die AM-gerechte Konstruktion zu unterstützen.</p> <p>Legende: ✓ = erfüllt - = nicht erfüllt ? = Informationsmangel</p> | |
| Frage | Beschreibung Konstruktionsaspekt / Handlungsmaßnahmen |
| <p>1. Sind das additive Fertigungsverfahren und der Werkstoff des Bauteils definiert?</p> | <p>AM ermöglicht prinzipiell ein großes Spektrum verfügbarer Materialien. Das Angebot der Materialien ist allerdings aufgrund des hohen Aufwands zur Umrüstung und durch die Notwendigkeit werkstoffspezifisch angepasster Prozessparameter eingeschränkt.</p> <p>Die Konstruktion sollte unter Beachtung des Materials erfolgen.</p> <p>Vor allem die Integration mehrerer Funktionen innerhalb eines Bauteils erfordert eine konstruktive Anpassung der Funktionselemente an den gewählten Werkstoff.</p> |
| <p>2. Wurde Bauteil- / Funktionsintegration betrieben und die Gestaltungsfreiheit von AM ausgenutzt?</p> | <p>Die Gestaltungsfreiheit lässt die Vereinigung mehrerer Bauteile zu einem Bauteil zu. Es können dadurch Montageoperationen reduziert und Bauteileigenschaften verbessert werden.</p> <p>Die Gestaltungsfreiheit additiver Fertigungsverfahren lässt die Integration zusätzlicher Funktionen zu und kann dadurch einen Mehrwert schaffen.</p> |
| <p>3. Ist der Bauraum der AM-Anlage ausreichend?</p> | <p>Die Bauteilgröße kann z. B. durch räumliche Variation der Funktionselemente des Bauteils reduziert werden.</p> <p>Funktionselemente können getrennt und durch bewegliche Verbindungselemente die einfache Montage ermöglicht werden.</p> <p>Bauteile können in Einzelteile zerlegt und separat gefertigt werden.</p> |
| <p>4. Ist die Bauraumorientierung festgelegt und konstruktiv beachtet?</p> | <p>Die Bauteilstabilität / Notwendigkeit zusätzlicher Stützstrukturen während der Fertigung hängt von der Orientierung im Bauraum ab. → Möglichst wenig Flächen unterhalb des kritischen Überhangwinkels orientieren.</p> <p>Bei pulverbettbasierten Verfahren sind größere Abmaße in Aufbaurichtung zu vermeiden, da sie zu längeren Fertigungszeiten und somit höheren Kosten führen.</p> <p>Der schichtweise Aufbau führt zu anisotropem Materialverhalten. → Die Hauptlastrichtung der Bauteile sollte daher in der Ebene der Schichten verlaufen und nicht in Aufbaurichtung.</p> <p>Die Schicht- und Bahnapproximation des Bauteils ist maßgeblich von der Orientierung im Bauraum beeinflusst. Der entstehende Treppenstufeneffekt beeinflusst auch die Oberflächengüten.</p> |

| | | |
|-----|--|--|
| 5. | <p>Wurden zusätzliche Stützstrukturen konstruktiv vermieden? – Ist die Bauteilstabilität während der Fertigung gewährleistet?</p> | <p>Bei einigen AM-Verfahren sind Zwischenzustände der Bauteile bei der Fertigung nicht ausreichend stabil und es sind zusätzliche Stützstrukturen notwendig. Diese Stützstrukturen wirken der Schwerkraft und thermisch induzierten Eigenspannungen entgegen, befestigen das Bauteil auf der Bauplattform und leiten Wärme vom Bauteil ab. Stützstrukturen können konstruktiv vermieden werden.</p> <p>Die Notwendigkeit von Stützmaterial ist maßgeblich von der Bauraumorientierung (Punkt 4) abhängig.</p> <p>Überhänge können selbsttragend gestaltet werden. → Kritischen Überhangwinkel nicht unterschreiten.</p> |
| 6. | <p>Sind die Konstruktionsrestriktionen beachtet?</p> | <p>Minimal fertigmessbare Geometrieabmessungen sind einzuhalten, wie z. B. Wandstärken und Außenradien oder Spaltmaße und Innenradien.</p> <p>Maximal fertigmessbare Geometrieabmessungen sind einzuhalten, wie z. B. Wandstärken und Innenradien.</p> |
| 7. | <p>Sind Nachbearbeitungsschritte konstruktiv einbezogen?</p> | <p>Nachbearbeitungsschritte können konstruktiv vermieden werden.</p> <p>Für die Entfernung von Stützmaterialien sind ausreichende Öffnungen an Hohlräumen vorzusehen und die Zugänglichkeit zur Entfernung zu gewährleisten.</p> <p>Durch spanende Nachbearbeitung lassen sich höhere Genauigkeiten erzielen. z. B. an Funktionsflächen erzielen. Die Nachbearbeitung ist konstruktiv einzubeziehen und es sind dafür bspw. Spannmöglichkeiten vorzusehen.</p> <p>Oberflächengüten und Materialeigenschaften können in der Nachbearbeitung verbessert werden. Die Handhabung des Bauteils hierbei ist konstruktiv einzubeziehen.</p> |
| 8. | <p>Wurde das Bauteil im Sinne von Leichtbau optimiert?</p> | <p>Optimierte Leichtbaugeometrien mit Freiformflächen lassen sich bei AM ohne erhöhten Mehraufwand fertigen und tragen zu einem verbesserten Bauteilverhalten bei.</p> <p>Die Masse der Bauteile sollte reduziert werden, da sie direkt mit der Fertigungszeit und den Herstellkosten verknüpft ist.</p> |
| 9. | <p>Wurden Approximationsfehler konstruktiv beachtet?</p> | <p>Die Schichtapproximation führt abhängig vom Überhangwinkel zu einem Treppenstufeneffekt. Ihr Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit sollte beachtet werden.</p> <p>Die Schichtapproximation lässt nur die Fertigung diskreter Werte zu und sollte konstruktiv beachtet werden.</p> <p>Die Bahnapproximation lässt (bei kleinen Abmessungen) nur die Fertigung diskreter Werte zu und sollte konstruktiv beachtet werden.</p> |
| 10. | <p>Wurde die positionsabhängige Maßhaltigkeit konstruktiv beachtet?</p> | <p>Die Fertigungsgenauigkeit ist von der Position im Bauraum und der Orientierungsrichtung abhängig. Tendenziell sind äußere Bereiche ungenauer als innere Bereiche. Bei großen Bauteilen ist dies konstruktiv zu beachten.</p> |

A.19 Katalog: j. Bauteilorientierung im Bauraum der Fertigungsanlage

| <p style="text-align: center;">Bauteilorientierung im Bauraum der Fertigungsanlage</p> | |
|---|---|
| <p>Bei additiven Fertigungsverfahren werden Bauteile in Schichten approximiert. Diese werden in Aufbaurichtung (z-Richtung) miteinander verbunden und ergeben das Gesamtbauteil. Die Orientierung der Bauteile im Bauraum bestimmt also die Lage der einzelnen Schichten innerhalb des Bauteils. Sie hat somit einen Einfluss darauf, ob das Bauteil während der Fertigung instabile Zustände durchläuft und ob die stützenden Elemente während der Fertigung ausreichen oder durch zusätzliche solide Stützstrukturen verstärkt werden müssen.</p> | <p>Theoretisch sind beliebige Orientierungen der Bauteile im Bauraum herstellbar. Allerdings unterscheiden sich die notwendigen Stützstrukturen, die entstehenden Materialeigenschaften, Form- und Maßgenauigkeiten und die Oberflächenqualitäten der entstehenden Bauteile. Die spätere Orientierung der Bauteile im Bauraum muss daher bereits in der Bauteilentwicklung berücksichtigt werden.</p> |
| <p>Der Einfluss verschiedener Orientierungen der Bauteile im Bauraum auf die entstehenden Ergebnisse wird hier beispielhaft aufgezeigt. Die Orientierung des dreidimensionalen Körpers, bestehend aus "K", "T" und "D" ist unter anderem durch die Abwägung folgender Faktoren gegeneinander beeinflusst:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geringe Bauhöhe, da diese oftmals mit Fertigungszeit und Fertigungskosten korreliert. • Flächige Abstützung, da diese für die Wärmeleitung und Stabilität während des Bauprozesses notwendig ist. • Stützstrukturen minimieren bzw. vermeiden, um die notwendige Nachbearbeitung und die Bauzeit zu reduzieren. |  |
| <p>Beispiele:</p> | |
| <p><u>Variante A</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Bauhöhe maximal hoch • Flächige Abstützung vorhanden • Überhang am Buchstaben „D“ und 90°-Winkel am Buchstaben „T“ → Stützstruktur nötig |  |
| <p><u>Variante B</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Geringste realisierbare Bauhöhe • Anbindung an Bauplattform nicht ausreichend ohne Stützstrukturen • 45°-Winkel der Buchstabenflächen → hohe Rauheiten und unscharfe Kantenabbildung |  |
| <p><u>Variante C</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Bauhöhe maximal hoch • Flächige Abstützung vorhanden • 45°-Winkel am Buchstaben „K“ → lokal höhere Rauheit der Oberflächen • Vorwiegend 90°-Winkel zwischen Oberflächen → scharfe Kantenabbildung |  |
| <p>Die Wahl der geeigneten Ausrichtung im Bauraum ist abhängig vom verwendeten Fertigungsverfahren und den gewünschten Bauteileigenschaften.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beim Laser-Sintern beispielsweise kann Variante B vorteilhaft sein, da hier die benötigte Bauraumhöhe am geringsten ist, und das Verfahren ohnehin keine soliden Stützstrukturen benötigt. • Beim FLM ist Variante C zu bevorzugen, da hier keine Stützstrukturen notwendig sind und die Anbindung an der Bauplattform trotzdem gewährleistet ist. | |


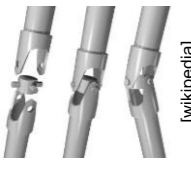

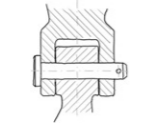
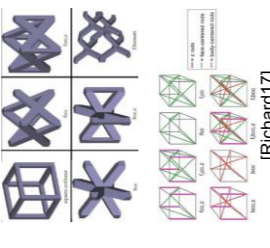
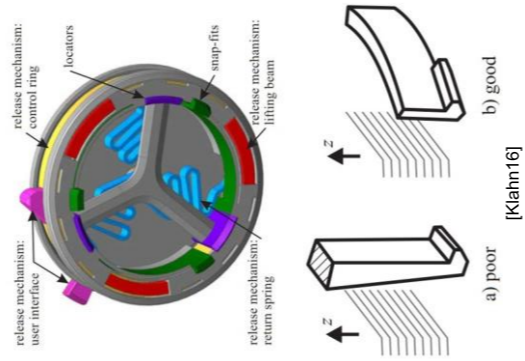
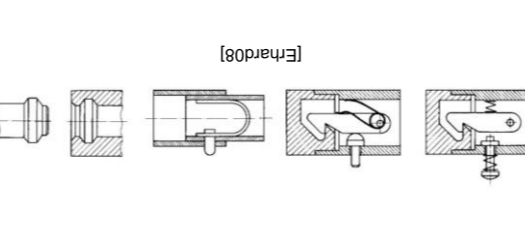
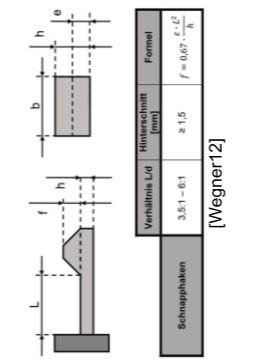
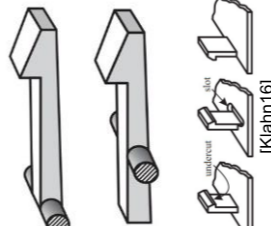
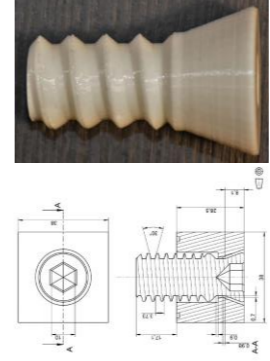
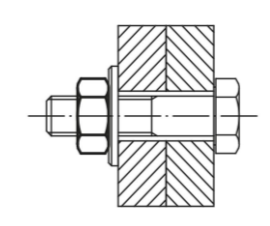
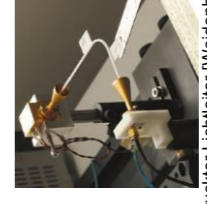
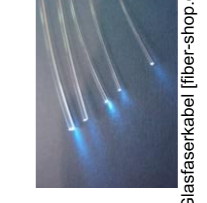
A.20 Katalog: k.1 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen

| Allgemeine Funktionen technischer Produkte und ihre Symbole | | | | | | | |
|---|-------------|------------------------|--------|----------|---------|------------|-------------|
| | | Allgemeine Operationen | | | | | |
| | | Speichern | Leiten | Umformen | Wandeln | Verknüpfen | |
| | | | | | | Summativ | Distributiv |
| Allgemeine Größen | Energie | | | | | | |
| | Stoff | | | | | | |
| | Information | | | | | | |

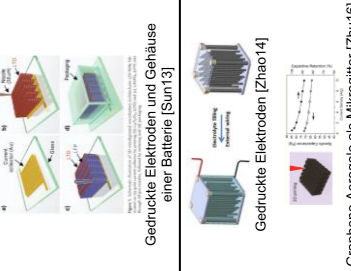


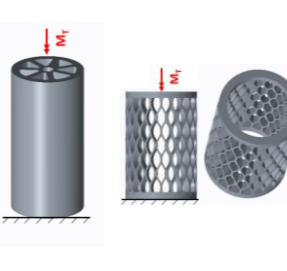
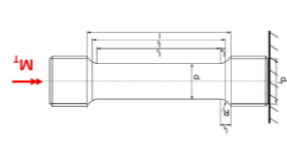
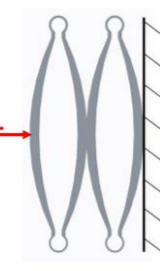
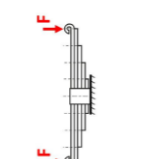
Funktionsbegriff:

Eine Funktion ist eine lösungsneutral beschriebene Beziehung zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems [VDI2221] und wird in Gesamt- und Teilfunktionen sowie in Haupt- und Nebenfunktionen unterschieden. Die Funktionen eines Bauteils lassen sich theoretisch so aufgliedern, dass die unterste Ebene der Funktionsstruktur nur aus Funktionen besteht, die sich hinsichtlich allgemeiner Anwendbarkeit praktisch nicht weiter unterteilen lassen. Da sich additive Fertigungsverfahren im Allgemeinen durch geringere erzielbare Genauigkeiten, dafür aber durch eine höhere wirtschaftlich realisierbare Bauteilkomplexität auszeichnen als konventionelle Fertigungsverfahren, wie bspw. Guss- oder Zerspanungsverfahren, unterscheiden sich die geeigneten Lösungsprinzipien zur Erfüllung der Funktionen oftmals.

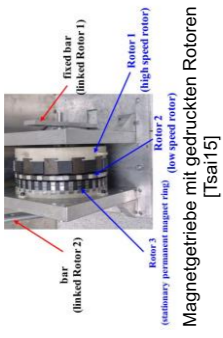
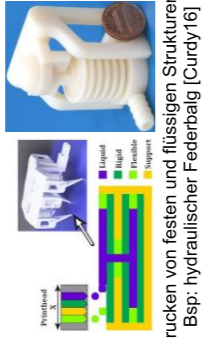
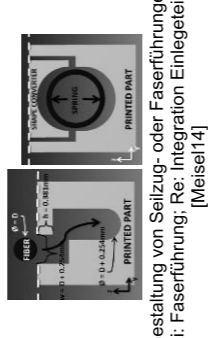
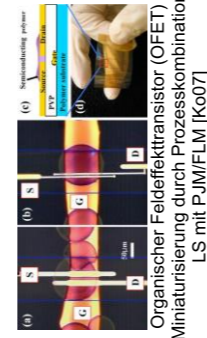
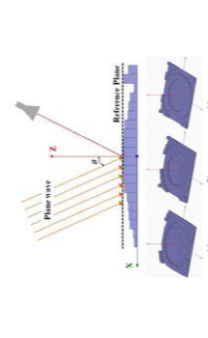
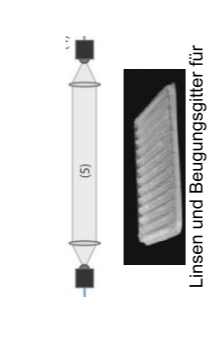
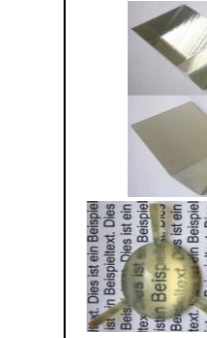
A.21 Katalog: k.2 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen

| Gliederungsteil | | Hauptteil | | | Zugriffsteil | | |
|-----------------|---------------------|--|--|---|--|--|---|
| | | AM-Design | Konventionelles Design | Funktions-beschreibung AM-Lösung | Allgemeine Konstruktionshinweise | Anmerkungen / konstruktive Hinweise nach Fertigungsverfahren | |
| 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| ENERGIE LEITEN | Mechanische Energie | 3 |  <p>Kardan-Kupplung</p> |  <p>Links: Bauteilintegration durch Einsparung des Kuppelkreuzes Rechts: mit Gitterstrukturen montagefrei</p> | <p>Links: Bauteilintegration durch Einsparung des Kuppelkreuzes Rechts: mit Gitterstrukturen montagefrei</p> | <p>kostenpflichtiger Beitrag: [Koppenecker12]: How to Design and Create a Cardan Shaft for a Single Port Robot by Selective Laser Sintering</p> | |
| | | 2 |  <p>Scharnier</p> |  <p>Limitierung auf einen rotatorischen Freiheitsgrad</p> | <p>Seitlich lassen sich Anschläge integrieren, die den Bewegungsraum einschränken.</p> | | |
| | | 3 |  <p>Gitterstrukturen</p> | <p>nicht möglich - topologieoptimierte Makrostrukturen</p> | <p>Gitterstrukturen ermöglichen es, Hohlräume zwischen kraftleitenden Strukturen zu schließen und dadurch ein robustes Design zu erlangen. Sie können auch durch schalenartige Strukturen nach außen hin verschlossen sein. Durch die räumliche Anordnung der Gitterstäbe ergibt sich makroskopisch ein anisotropes Materialverhalten.</p> | <p>Gitterstrukturen werden vor allem in Pulverbetrieften hergestellt. Auf ausreichende Entfernung der Pulverreste ist zu achten - ausreichend Entpulverungsstellen vorsehen.</p> | <p>FLM: stabilarige Gitterstrukturen kleiner Zellengrößen sind nicht fertigbar, dafür allerdings wabenartige Strukturen.</p> |
| | | 4 |  <p>Schnappverbindungen</p> |  <p>Schnapphaken sind auf vielfältige Weise einsetzbar. Der Biegebalken kann räumlich variiert werden, wobei eine Belastung in Schichtrichtung zu bevorzugen ist. Auch sind Kugel- oder Ringclipverbindungen einsetzbar.</p> | <p>Schnapphaken sind auf vielfältige Weise einsetzbar. Der Biegebalken kann räumlich variiert werden, wobei eine Belastung in Schichtrichtung zu bevorzugen ist. Auch sind Kugel- oder Ringclipverbindungen einsetzbar.</p> | <p>Biegebelastungen entgegen der Aufbaurichtung sind möglichst zu vermeiden. Die Kräfte für das Fügen und Trennen der Verbindung hängen von den Winkelverhältnissen an der Fügestelle ab. Die Spannungsverteilung von Biegebalken kann optimiert werden.</p> | |
| | | 5 |  <p>Schraubverbindungen</p> |  <p>Schnapphaken sind auf vielfältige Weise einsetzbar. Der Biegebalken kann räumlich variiert werden, wobei eine Belastung in Schichtrichtung zu bevorzugen ist. Auch sind Kugel- oder Ringclipverbindungen einsetzbar.</p> | <p>Schnapphaken sind auf vielfältige Weise einsetzbar. Der Biegebalken kann räumlich variiert werden, wobei eine Belastung in Schichtrichtung zu bevorzugen ist. Auch sind Kugel- oder Ringclipverbindungen einsetzbar.</p> | <p>Biegebelastungen entgegen der Aufbaurichtung sind möglichst zu vermeiden. Die Kräfte für das Fügen und Trennen der Verbindung hängen von den Winkelverhältnissen an der Fügestelle ab. Die Spannungsverteilung von Biegebalken kann optimiert werden.</p> | |
| | | 6 |  <p>Schraubverbindungen</p> |  <p>Optimierte Schraubengestalt nach [Hetzer16]</p> | <p>Homogene Kräfte-einleitung, höhere Abstreifbarkeit; Bauteilintegration; Funktionsintegration; Verdrehung, Zentrierung, Hemmung gegen Lockerung</p> | <p>Homogenisierte Kräfteeinleitung durch Zugmutter und variablen Gewindefuerschnitt • Höhere Abstreifbarkeit durch breitere Schraubengewindegänge im Vergleich zum Muttergewinde • zusätzlicher Formschluss durch eine Nut zur Aufnahme der Querkräfte • Erhaltung der Vorspannkraft, Vergrößerung der Scherfläche und Reduzierung der Kerbwirkung durch kegelförmigen Schraubenkopf • Verliersicherung, Zentrierung und Montagefreiheit integrierbar [Hetzer16]</p> | <p>LS: • Metrische ISO-Gewinde sind ohne Stützstruktur realisierbar • Größere Spaltmaße vorsehen als bei FLM LBM: • Montageverhalten abh. von Oberflächenqualität → Druck-/Schraubrichtung beachten • Kurzzeit-Tragfähigkeit Muttergewinde ist unabh. von Dichte (AM-Teil) Druckrichtung • Vorspannkraft-Relaxation ist bei reduzierter Dichte und hohen Rauheiten größer → Druckrichtung und Auflösung bereits in der Auslegung berücksichtigen [Richard17] • Metrische ISO-Gewinde sind nicht ohne Stützstruktur realisierbar</p> |
| | 7 |  <p>Lichtleiter</p> |  <p>Gedruckter Lichtleiter [Weidenbach17]</p> | <p>FLM strahlführender Elemente aus PS: akzeptable Propagationsverluste bei 120 GHz</p> | <p>Beispiel https://www.luxexcel.com/ophthalmic-prototyping/showcases/12-tu-delft-students-created-innovative-product-designs</p> | <p>FLM: • PS: Krümmungsradius 20 mm für minimale Krümmungsverluste bei 90°-Kurve</p> | |

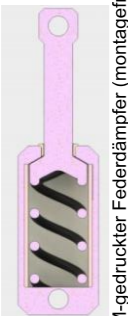
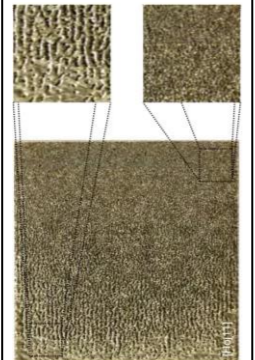
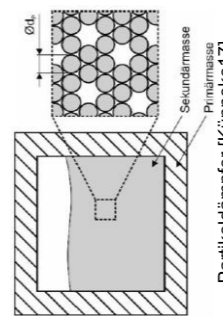
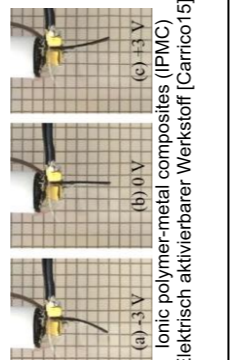
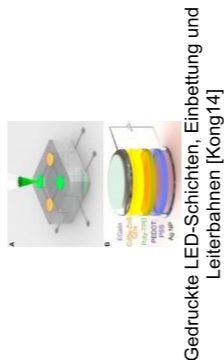

A.22 Katalog: k.3 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen

| Gliederungsteil | | Hauptteil | Konventionelles Design | Funktions- beschreibung AM-Lösung | Allgemeine Konstruktionshinweise | Zugriffsteil | Ammerkungen / konstruktive Hinweise nach Fertigungsverfahren |
|--------------------------|----------------------------|---|--|--|--|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| ENERGIE SPEICHERN | | | | | | | |
| Elektrische Energie | Superkondensatoren |  <p>Gedruckte Elektroden und Gehäuse einer Batterie [Sun13]</p> <p>Gedruckte Elektroden [Zhao14]</p> <p>Graphene Aerogele als Mikroglitter [Zhu16]</p> |  <p>Miniatürisierung, Bauteilintegration: gedruckte Elektroden mit großer Oberfläche und Gehäuse für Mikroanwendungen (Inkjet-Printing)</p> |  <p>Massen- und Spannungsreduzierung durch belastungsgerechte Gestaltung</p> | <ul style="list-style-type: none"> • gleichmäßige Spannungsverteilung • Bereiche hoher Spannung vergrößern • Bereiche geringer Spannung verkleinern - Kerbspannungen vermeiden - Anschlüsse verdrängen - spannungsneutrale Bereiche entfernen | <ul style="list-style-type: none"> • FLM: • Masseneinsparung ist einfacher durch Hoch-/Gitterstrukturen realisierbar • Ablegerichtung nur entlang der Bauteilachse sinnvoll (Anisotropie) • liegende Fertigung ist zu bevorzugen • min. Radien und Wandsläkigkeit durch Spurbreite eingeschränkt LS: • in jeder Orientierung ohne Stützstrukturen fertigbar • Anisotropie in z-Richtung beachten | <ul style="list-style-type: none"> • Mikrosäulen min. Durchmesser 0,2 mm (bei mehreren mm Höhe) • Mikrosäulen min. Abstand 0,3 mm [Zhao14] |
| | | | | | | | |
| Mechanische Energie | Federn für Torsionsmomente |  <p>Federung der axialen Belastung durch in Reihe und parallel geschaltete Biegeelemente</p> |  <p>Federung der axialen Belastung durch in Reihe und parallel geschaltete Biegeelemente</p> | <ul style="list-style-type: none"> • FLM: • Stützstrukturen ab Neigungswinkel $\leq 35^\circ$ erforderlich, führt zu großen Bauteilhöhen • geringe mechanische Eigenschaften, weil Strangablagung in Hauptspannungsrichtung unmöglich ist LS: • keine Stützstrukturen notwendig • Überhanglänge und Fundamentstabilität irrelevant • Starke Anisotropie in z-Richtung reduziert Werkstoffeigenschaften • Oberflächenqualität der Downskin-Flächen gering LBM: • Curf-Effekt berücksichtigen (freier Abstand z-Ri, Max. 7 mm) • Stützstrukturen ab 45° - hohe Bauteile • geringe Oberflächenqualität der Downskin-Flächen | <ul style="list-style-type: none"> • FLM: • Stützstrukturen ab Neigungswinkel $\leq 35^\circ$ erforderlich, führt zu großen Bauteilhöhen • geringe mechanische Eigenschaften, weil Strangablagung in Hauptspannungsrichtung unmöglich ist LS: • keine Stützstrukturen notwendig • Überhanglänge und Fundamentstabilität irrelevant • Starke Anisotropie in z-Richtung reduziert Werkstoffeigenschaften • Oberflächenqualität der Downskin-Flächen gering LBM: • Curf-Effekt berücksichtigen (freier Abstand z-Ri, Max. 7 mm) • Stützstrukturen ab 45° - hohe Bauteile • geringe Oberflächenqualität der Downskin-Flächen | | |
| | | | | | | Mechanische Energie | Zug- / Druckfedern |
| Mechanische Energie | Zug- / Druckfedern |  <p>In Reihe geschaltete Biegeelemente mit Ausnahme der axialen Zug-/Druckkräfte</p> |  <p>In Reihe geschaltete Biegeelemente mit Ausnahme der axialen Zug-/Druckkräfte</p> | <ul style="list-style-type: none"> • FLM: • geschlossene Strukturen möglich • bei liegender Fertigung optimale Werkstoffausnutzung • max. Abstand ohne Stützstrukturen beachten (z-Richtung max. 10 mm) • Filmschichtere durch Spornbreite beschränkt LS: • in jeder Orientierung mit Hinterschneidungen • Wärmetransport im Prozess zu vernachlässigen • bei geschlossenen Strukturen Pulverentfernung ermöglichen • min. Radius beachten (abhängig von Federbreite) LBM: • Hinterschneidungen unabhängig von Orientierung • bei geschlossenen Strukturen Pulverentfernung • Curf-Effekt berücksichtigen (freier Abstand z-Ri, max. 7 mm) • Entfernbare der Stützstrukturen sicherstellen • liegende Fertigung ist zu bevorzugen • großer Radius für Filmschichtere erforderlich • Oberflächenqualität der Downskin-Flächen gering | <ul style="list-style-type: none"> • FLM: • geschlossene Strukturen möglich • bei liegender Fertigung optimale Werkstoffausnutzung • max. Abstand ohne Stützstrukturen beachten (z-Richtung max. 10 mm) • Filmschichtere durch Spornbreite beschränkt LS: • in jeder Orientierung mit Hinterschneidungen • Wärmetransport im Prozess zu vernachlässigen • bei geschlossenen Strukturen Pulverentfernung ermöglichen • min. Radius beachten (abhängig von Federbreite) LBM: • Hinterschneidungen unabhängig von Orientierung • bei geschlossenen Strukturen Pulverentfernung • Curf-Effekt berücksichtigen (freier Abstand z-Ri, max. 7 mm) • Entfernbare der Stützstrukturen sicherstellen • liegende Fertigung ist zu bevorzugen • großer Radius für Filmschichtere erforderlich • Oberflächenqualität der Downskin-Flächen gering | | |
| | | | | | | Mechanische Energie | Zug- / Druckfedern |


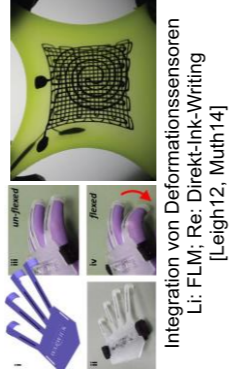

A.23 Katalog: k.4 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen

| Gliederungsteil | | Hauptteil | | | Zugriffsteil | | |
|------------------|---------------------|-----------|--|---|-------------------------------------|--|--|
| | | AM-Design | Konventionelles Design | Funktions- beschreibung AM-Lösung | Allgemeine Konstruktionshinweise | Anmerkungen / konstruktive Hinweise nach Fertigungsverfahren | |
| ENERGIE UMFORMEN | Mechanische Energie | 1 |  Magnetgetriebe [Tsat15] | 5 | 6 | 8 | |
| | | 2 |  Drucken von festen und flüssigen Strukturen - Bsp: hydraulischer Federbalg [Curdy16] | 5 | 6 | | |
| | | 3 |  Gestaltung von Seilzug- oder Faserführungen Li: Faserführung; Re: Integration Einlegeleiste [Meisel14] | 5 | 6 | | |
| | Elektrische Energie | 4 |  Organischer Feldeffekttransistor (OFET) Miniaturisierung durch Prozesskombination LS mit PJM/FLM [Ko07] | 5 | 6 | | |
| | | 5 |  Reflektorantenne (THz-Anwendung) [Nayer14] | 5 | 6 | | |
| | Strahlungsenergie | 6 |  Linsen und Beugungsgitter für Anwendung im THz-Bereich [Weidenbach17] | 5 | 6 | | |
| | | 7 |  Li: Linse mit Stützstrukturen gefertigt Re: Prisma mit und ohne Stützstrukturen [Kloppenburg17] | 5 | 6 | | |

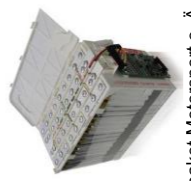
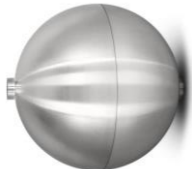
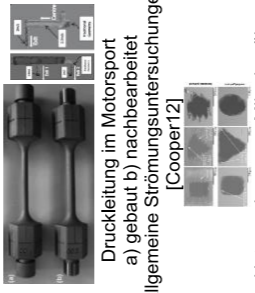

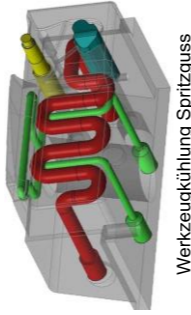
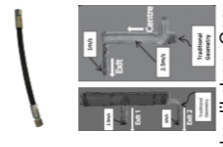
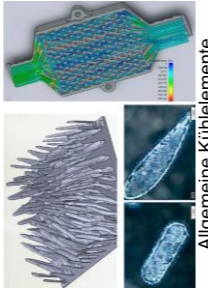
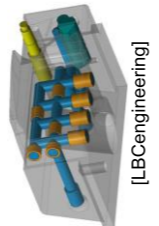

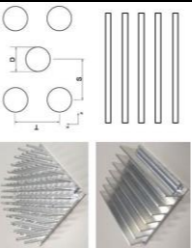
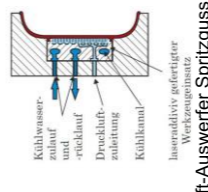
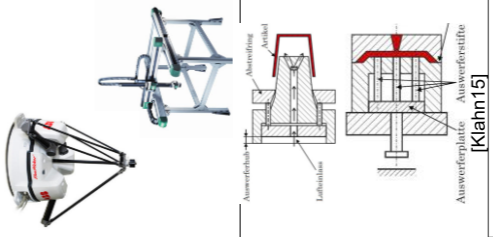
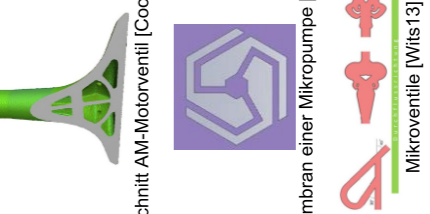
A.24 Katalog: k.5 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen

| Gliederungsteil | | Hauptteil | | | Zugriffsteil | | | | |
|-----------------|--|---|---|---|---|--|--|--|--|
| | | AM-Design | Konventionelles Design | Funktionsbeschreibung AM-Lösung | Allgemeine Konstruktionshinweise | Anmerkungen / konstruktive Hinweise nach Fertigungsverfahren | | | |
| 1 | MECHANISCHE ENERGIE |  FLM-gedruckter Federdämpfer (montagefrei) https://markforged.com/blog/part-of-the-week-3d-printed-shock-absorber/ | 5 | 6 | 7 | 8 | | | |
| 2 | | |  Dämpfersysteme | In porösem und gradiertem Material werden Schwingungen durch Körperschalldämpfung reduziert. [Adam17] | • Bauteilintegration Funktionsintegration • Führungs- und Dichtungselemente einlegbar • Federelemente variabel gestaltbar | • Hohlraumteilung oder Gittersstruktur nicht förderlich (Bewegung der Partikel eingeschränkt) • großes Hohlraumvolumen ansprechen • große Hohlraumlänge u. -breite förderlich (größere Anzahl Kontaktstellen) [Künneke17] | FLM: • nicht möglich LS: • Gefahr der Agglomeration durch Wärmeeintrag (vor allem bei dicken Wänden und kleinen Volumen) LBM: • Anwendung möglich | | |
| 3 | | | | | | | |  Partikeldämpfer [Künneke 17] | Partikel Dämpfer – Schwingungsbeeinflussung durch verteilte Dissipation über komplexe Partikelformen |
| ENERGIE WANDELN | |  Aktuatoren Ionic polymer-metal composites (IPMC) Elektrisch aktivierbarer Werkstoff [Carrico15] | 5 | 6 | 7 | 8 | | | |
| 2 |  LEDs Gedruckte LED-Schichten, Einbettung und Leiterbahnen [Kong14] | | Schema konv. hergestellte IMPCs [wikipedia] | Funktionsintegration durch FLM-gedruckte IPMCs (elektrisch aktivierbares Material) [Carrico15]: • Performance ähnlich wie konventionell • Miniaturisierung möglich (Anwendung: Aktuatoren oder Sensoren wie Filimmerhärchen) | • Bauteil- und Funktionsintegration durch FLM-gedruckte OD-LEDs, ohne manuellen Eingriff, Druck auf gekrümmte Flächen möglich; Inkl. Druck von Anschlüssen und einbettende Matrix [Kong14] | | | | |
| 3 | | |  LED-Scheinwerfermodul [leds24.com] | Funktionsintegration durch FLM-gedruckte IPMCs (elektrisch aktivierbares Material) [Carrico15]: • Performance ähnlich wie konventionell • Miniaturisierung möglich (Anwendung: Aktuatoren oder Sensoren wie Filimmerhärchen) | Bauteil- und Funktionsintegration durch FLM-gedruckte OD-LEDs, ohne manuellen Eingriff, Druck auf gekrümmte Flächen möglich; Inkl. Druck von Anschlüssen und einbettende Matrix [Kong14] | | | | |


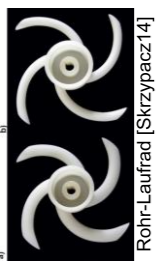

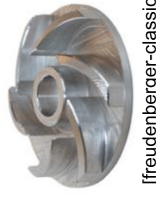
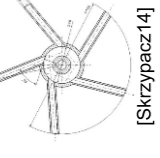
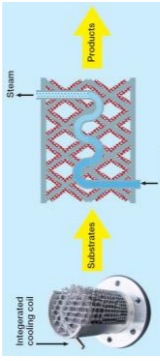

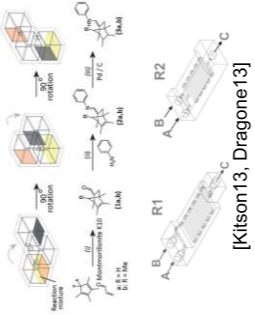
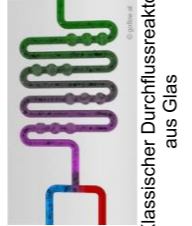

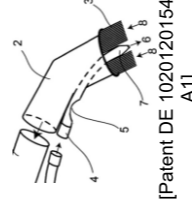
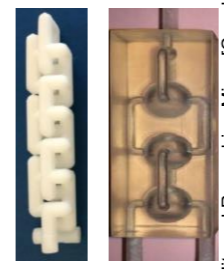

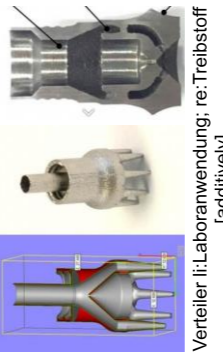
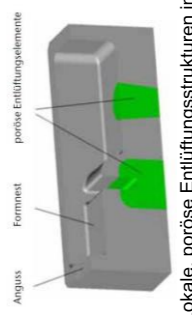
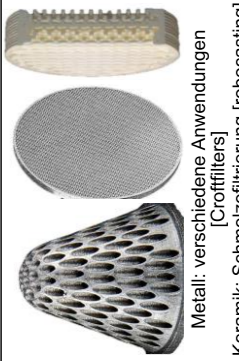

A.25 Katalog: k.6 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen

| Gliederungsteil | Hauptteil | | | Zugriffsteil | | |
|--------------------|-----------|---------------------|------------------------|--|---|--|
| | Nr. | AM-Design | Konventionelles Design | Funktionsbeschreibung AM-Lösung | Allgemeine Konstruktionshinweise | Anmerkungen / konstruktive Hinweise nach Fertigungsverfahren |
| ENERGIE VERKNÜPFEN | 1 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | 2 | Summativ | 1 | Rotatorische Relativbewegungen zwischen den drei Elementen sind möglich, das aufgebracht Moment jedes Elements wird auf die beiden anderen Elemente weitergeleitet. | | |
| | 3 | Verschiedene Größen | 2 | 2 | | |
| | 4 | Gleiche Größen | 3 |  <p>Gedruckte und metallisch bedampfte Elektrode [Salvo11]</p> | PUM mit Bedampfung Funktionsintegration, Miniaturisierung, Prozessvereinfachung bei gleicher Messqualität | Nadelabstand und Nadeldurchmesser als Kompromiss zwischen Festigkeit, Eindringungsgefahr (Haut), Zugänglichkeit und Auflösung des Lasers [Salvo11] |
| | 5 | Verschiedene Größen | 4 |  <p>Integration von Deformationssensoren Li: FLM; Re: Direkt-Ink-Writing [Leigh12, Muth14]</p> | Bauteil- und Funktionsintegration Leigh12: FLM Deformationssensoren Muth14: embedded 3DP mit hochviskoser leitender Tinte | Weitere Arbeiten: [Kesner11] Design Principles for Rapid Prototyping Forces Sensors using 3D Printing |
| | | | 5 |  <p>[wikipedia]</p> | Bauteil- und Funktionsintegration durch FLM Kapazitive Sensoren Füllstandsanzeige | FLM: • max. Abstand des Sensorelements von Oberfläche 1778 µm für ideales Messergebnis • bei Kupfer-Netzen sind 762-1778 µm ideal [Shemelya 13] |

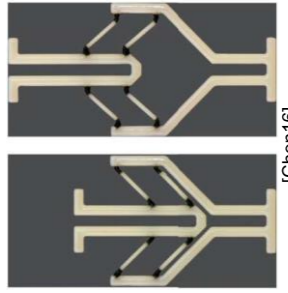
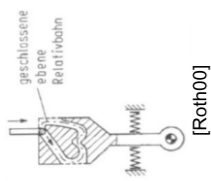
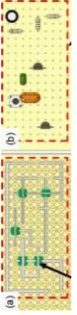
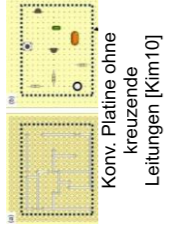
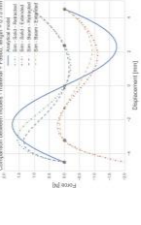
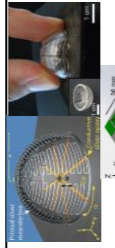

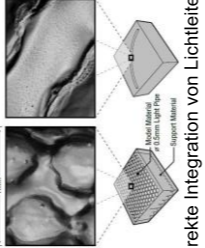
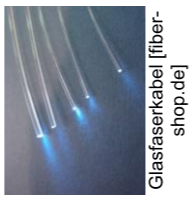
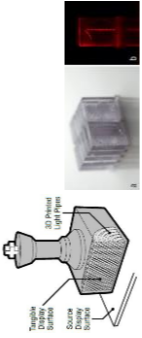



A.26 Katalog: k.7 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen

| Gliederungsteil | | Hauptteil | | Konventionelles Design | | | Zugriffsteil | |
|-----------------|---|--|--|---|---|---|--------------|--|
| | | AM-Design | | Funktionsbeschreibung AM-Lösung | Allgemeine Konstruktionshinweise | Anmerkungen / konstruktive Hinweise nach Fertigungsverfahren | | |
| Nr. | | | | | | | | |
| 1 | 2 |  Batteriepaket Motorsport o. Ä. [EOS] |  Tank [Lockheed Martin, Sciaky] | keine Angabe | Volumenreduzierung Gewichtseinsparung Funktionsintegration Erleichterter Service | Anwendungsbeispiel EOS mit Global Formula Racing: • 50 % Volumeneinsparung • 40 % Gewichtsreduzierung • vereinfachte Wartung und Kühlkanälen | 8 | |
| 3 | 1 | | | | | | | |
| 2 | 3 |  Druckleitung im Motorsport a) gebaut b) nachbearbeitet Allgemeine Strömungsuntersuchungen [Cooper12] Untersuchung von Mikrokanälen [OConnor15] |  Tank | Kosten-, Material- und Zeiteinsparung durch gleichmäßige Beanspruchung (Geometrie) und direkte Fertigung Optimierte Wartung und Reinigung | Anwendungsbeispiel: Lockheed Martin mit Sciaky • 80 % Fertigungszeitsparung • 55 % Kostenreduzierung • 75 % Abfallreduzierung | | | |
| 3 | 2 | | | | | | | |
| 3 | 4 |  Werkzeugkühlung Spritzguss [LBCengineering] |  [Hydraulikshop, Cooper12] | Druckleitung (Motorsport): • dünnwandig (0,5 mm) • Härte und Maßhaltigkeit Anforderungen erfüllt Strömungsuntersuchungen • 100-250 % höherer Durchfluss durch optimierte Geometrien | Allgemeine Hinweise [Cooper12]: • Scharfe Winkel und Ecken abrunden • Geometrien mit geringem Widerstand verwenden • Wände müssen nicht stärker ausgeführt werden als sonst (Dichtheit vorausgesetzt) Mikrokanäle [OConnor15]: • horizontal: sehr schlechte Auflösung • vertikal: bessere Auflösung • geätzte Strukturen am besten | | | |
| 4 | 3 | | | | | | | |
| 4 | 5 |  Wärmeübertragung Allgemeine Kühlelemente [Dede15, Wong16, Neugebauer11] |  [LBCengineering] | Case studies in der Literatur: • Spritzgießen • Extrusion (Alu) • Blasformen | • Toträume vermeiden • konturnahe Kühlung möglich • Gleiche Strömung bei Verzweigungen gewährleisten • definierte Strömungsrichtung anstreben • turbulente Strömung anstreben • Nur oben abgerundete Kanäle möglich [LBCengineering] | | | |
| 5 | 4 | | | | | | | |
| 5 | 6 |  Pneumatisch gesteuerte Greifer [Festio] |  [Dede15, Wong08] | Erhöhte Kühlleistung und geringerer Druckverlust durch strömungsgerechte Gestaltung und Oberflächen (Elektronik, LR, Motorsport) | • Vergrößerte Kühlfläche durch Gitterstruktur nur bedingt wirksam [Wong08] • Kühlelemente strömungsgerecht gestalten [Wong08] • Raue Oberflächen erhöhen die Kühlleistung [Ventola14] • Verschmutzung und Korrosionsgefahr beachten [Neugebauer11] | | | |
| 6 | 5 | | | | | | | |
| 6 | 7 |  Druckluft-Auswerfer Spritzguss [Klahn15] |  Motorventil [Cooper15] Schema Mikroventil [Wits13] | Pneumatische Bewegung des Greifers Reduzierung der Einzelteile | • Abdruck der Gitterstruktur beachten • Verstopfungen vermeiden • Druckverlust minimieren • Kombination mit konturnaher Kühlung | | | |
| 7 | 6 | | | | | | | |
| 7 | 8 |  Membran einer Mikropumpe [Wits13] Mikroventile [Wits13] | Schema Rückschlagventil | Funktionsintegration des Auswerfersystems in den Werkzeugeinsatz | Mikroanwendungen [Wits13]: • Leckagefrei durch vollständige Schließung der Membran • Pumpwirkung durch Bauteilsteifigkeit nicht reduzieren • Toträume und unnötige Verwirbelungen vermeiden um Strömungsverluste zu minimieren | | | |
| 8 | 7 | | | | | | | |

STOFF

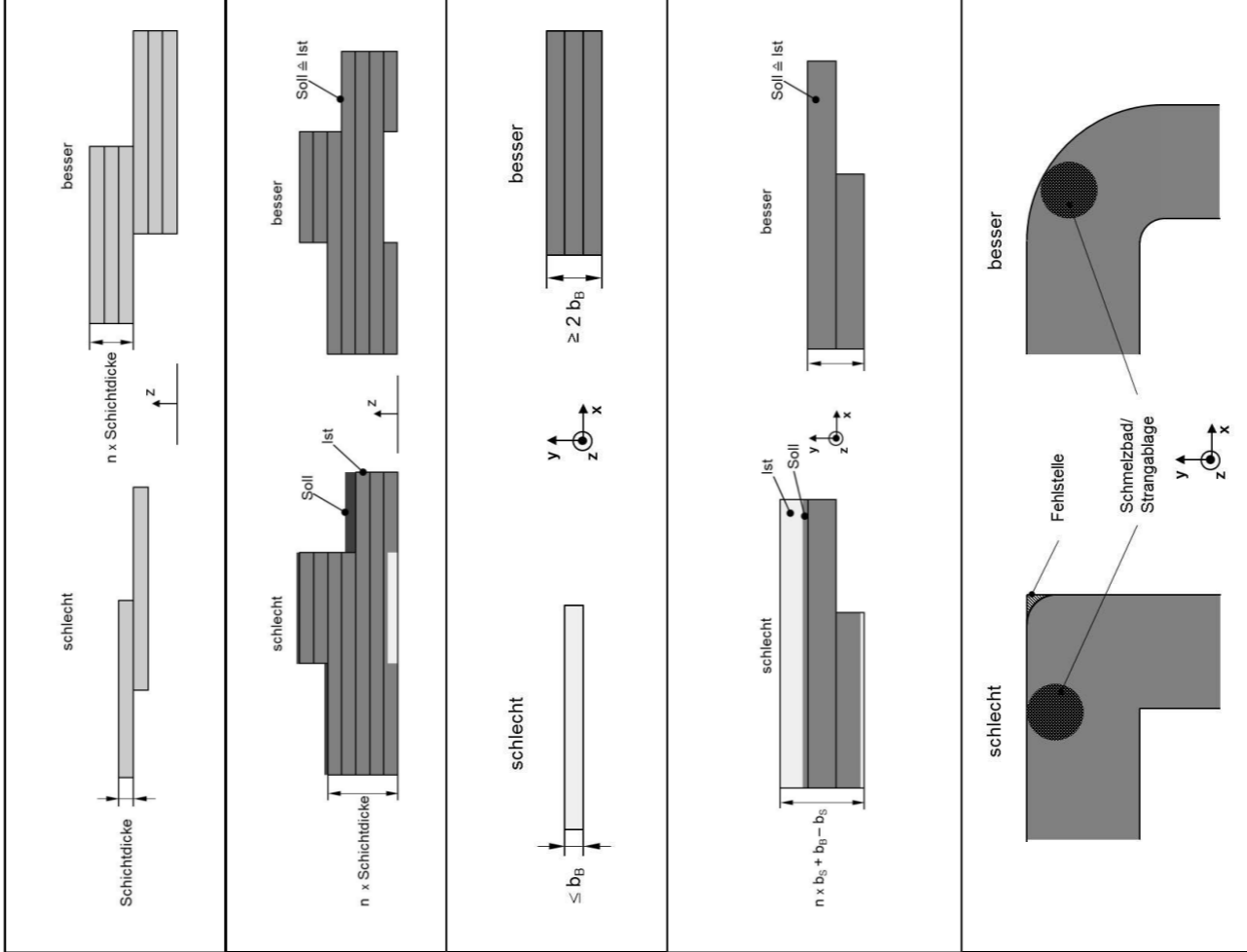
| STOFF | | Stoff umformen | | Stoff verknüpfen (summativ) | | Stoff verknüpfen (distributiv) | |
|-------|---|--|--|--|---|--------------------------------|--|
| 9 |  <p>Laufblätter, Flügelräder [BMW, TRUMPF]</p>  <p>Rohr-Laufrad [Skrzypacz14]</p> |  <p>Austrittsdüse [additively]</p> |  <p>[freudenberger-classic]</p>  <p>[Skrzypacz14]</p> | <p>Meistens Laufblätter: strömungsoptimierte Geometrie kein Werkzeug- und Formaufwand Gewichtsreduzierung dadurch höhere Drehzahlen</p> <p>- Durch Optimierung des Gehäuses kann Performance zusätzlich gesteigert werden [Skrzypacz14]</p> | <p>Zahlreiche Untersuchungen zu durch RP • beschleunigte Pumpenentwicklung • komplexe Gussformen aus Kunststoff oder Sand-AM (voexjet.com) Rohr-Laufblätter: [Skrzypacz14] • 4=Optimale Anzahl der Zwischenräume (gleich wie gebohrte Laufblätter) • Rohrkrümmung erhöht Effizienz • Elliptische Außenform der Rohre besitzt geringsten Strömungswiderstand, bewirkt signifikante Effizienzsteigerung</p> | Pumpen (Laufblätter) | |
| 10 | | keine Angabe | keine Angabe | <p>• Strömungsoptimiert • Hinterschneidungen • Werkzeuglose Montage</p> | | Düse / Drossel | |
| 11 |  <p>Schema Minireaktor mit integrierter Kühlung und reaktiver Beschichtung [CRT Erlangen]</p> |  <p>Katalysator Kfz [Wikipedia]</p> | <p>Optimierte: • Strömungsmechanik • Wärmemanagement • Massentransport • Oberflächen • Reaktionskontrolle • Energieeffizienz</p> | <p>Gleichmäßige Wärmeverteilung und Strömungsgeschwindigkeiten beachten • Toträume vermeiden • Integration von Kühlung bzw. Dampf-erzeugung möglich • Raue/poröse Oberflächen einstellbar</p> | <p>Chemische und thermische Stabilität des Werkstoffs beachten • hermetisch dicht konstruieren</p> | Chemische Reaktoren | |
| 12 |  <p>[Kitson13, Dragone13]</p> |  <p>Klassischer Durchflussreaktor aus Glas</p> | <p>Chemischer Test auf kleinem Raum optimierter Reaktionsverlauf bei Integration in bestehende Laboreinrichtungen</p> | <p>Stützstrukturen im Inneren vermeiden (notfalls wasserlöslich ausführen) • Dichtheit vor Betrieb testen (Schwachstellen durch Anisotropie in z-Richtung) • Ester-Bindungen im Kunststoff sind anfällig für chemische Zersetzung (PC, PEI bzw. ULTEM) [Capel13] LS: • Entfernung des Pulvers im Reaktorrinnen umständlich • Röhrendurchmesser ausreichend groß gestalten • Amid-Bindungen sind anfällig für starke Basen und Nukleophile (bsp. Nylon-12) [Capel13] LBM: • Oberflächenrauheiten in Abhängigkeit vom Neigungswinkel beachten, um Nacharbeit zu vermeiden. • höchste thermische und chemische Stabilität • chemische Stabilität einzelner Legierungselemente berücksichtigen</p> | | Reactionware | |
| 13 |  <p>Saugdüse mit Integration ESD-Ionisorator [additively]</p> |  <p>[Patent DE 102012015486 A1]</p> | | | | Partikel aufnehmen | |
| 14 |  <p>Split- and Recombine Mixer [Capel13]</p> |  <p>[Wikipedia]</p> | <p>Mischen durch Aufteilen und Zusammenführen eines Fluids (nach unterschiedlichen Fließwegen)</p> | <p>• Kompaktes Design anstreben • Druckverluste minimieren • Anschlüsse integrieren</p> | <p>Dichtheit vor Betrieb testen (Schwachstellen durch Anisotropie in z-Richtung)</p> | Mischen | |
| 15 |  <p>Verteiler ii: Laboranwendung; re: Treibstoff [additively]</p> | keine Angabe | <p>Genau Verteilen und Dosieren durch beliebig gestaltbare Leitungen</p> | | | Verteiler | |
| 16 |  <p>Angus Formnet poröse Entlüftungselemente</p> <p>Lokale, poröse Entlüftungsstrukturen im Werkzeugbau [Siemann07, Furomoto15]</p> | <p>- Entlüftungsspalt im Werkzeug - Poröse Keramikinsätze</p> | <p>• Porosität oder Gitterstruktur zur Entlüftung in konventionell nicht zu entlüftenden Bereichen möglich • Porosität v. a. abhängig von Fertigungsparameter Belichtungsstrategie</p> | <p>FLM: nicht möglich LS: bedingt möglich LBM: Laserstrategie und Fertigungsparameter beachten</p> | | Entlüftung | |
| 17 |  <p>Metall: verschiedene Anwendungen [Croffilters] Keramik: Schmelzfiltrierung [robocasting]</p> |  <p>Feinheit genau einstellbar • Maschenweite über gesamte Lebensdauer konstant • Robuste Reinigung, da keine Nähte/Toträume • geringere Druckverluste durch strömungsoptimierte Gestalt</p> | <p>Keinheit genau einstellbar • Maschenweite über gesamte Lebensdauer konstant • Robuste Reinigung, da keine Nähte/Toträume • geringere Druckverluste durch strömungsoptimierte Gestalt</p> | <p>Keramische Schmelzfilter: http://christyrefractories.com/3d-printed-ceramic-filters-for-molten-metal/ https://www.robocasting.net/ https://3dprint.com/33462/3d-printed-filters-cam/ https://3dprint.com/33462/3d-printed-filters-cam/</p> | | Filterelemente | |

A.27 Katalog: k.8 Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen

| Gliederungsteil | Hauptteil | | | | Zugriffsteil | | | | |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------|---|---|--|--|--|--|--|
| | Nr. | AM-Design | Konventionelles Design | Funktionsbeschreibung AM-Lösung | Allgemeine Konstruktionshinweise | Anmerkungen / konstruktive Hinweise nach Fertigungsverfahren | | | |
| INFORMATION | Information speichern | 1 |  [Chen16] |  [Roth00] | Die bistabile Struktur behält den eingestellten Zustand bis zur weiteren Aktivierung. Die Gelenke sind dafür als Filmschirmare ausgeführt. | 7 | 8 | | |
| | | Information leiten | 2 |  Schaltungen |  Konv. Platine ohne kreuzende Leitungen [Kim10] | Prozessintegration Miniaturisierung [Kim10]: - Kombiniertes FLM mit Lot und PC - 34 % verkleinerte Leiterplatte durch kreuzende Leiterbahnen | Ähnliche Arbeiten: Espalim13, 3D Printing multi-functionality structures with electronics: FLM kombiniert mit Mikrofräsen und leitenden SLA-Tinten (Kupfer) und elektrischen Einlegeteilen | Die Konstruktion besteht aus Filmschirmaren und Stäben. Ähnliche Konstruktionen sind auch dreidimensional ausführbar.  | <ul style="list-style-type: none"> • Mit PJM Filmschirmare und Stäbe in Multimaterialbauweise fertigbar • Mit anderen Verfahren Filmschirmare konstruktiv anpassen |
| | | | 3 |  Bedruckte Platine [Kim10] |  Gedruckte Antennen flach Oben: Mini, gekrümmt; Unten: Standard, flach [Adams11, Deffenbaugh13] | FLM gefertigte Antennen Reichweite und Übertragungsqualität vergleichbar mit konv. gefertigten Antennen Vorteil: Bauteil- und Funktionsintegration, Miniaturisierung, 3D-Gestaltung möglich | | | |
| | Information wandeln | 4 |  Direkte Integration von Lichtleitern zur Informationsübertragung [Willis12] |  Glasfaserkabel [fiber-shop.de] | <ul style="list-style-type: none"> • horizontal oder vertikal gedruckte Lichtleiter (PJM) • Übertragungsqualität nimmt rapide ab bei Längen über 50 mm • Grund sind unregelmäßige Oberflächen und der reduzierte Brechungsindex der Werkstoffe [Willis12] | PJM: mm [Willis12] • Durchmesser Lichtleiter min. 0,25 mm | | | |
| | | 5 | -- | -- | -- | -- | | | |
| | | 6 |  Informationsanzeige durch Hohlkammern [Willis12] Li: projiziertes Bild; Re: Lichtbrechung in Hohlkammern [Willis12] |  LED-Display [embeddedadventures.com] | <ul style="list-style-type: none"> - Hohlstrukturen im Bauteil als Lichtbrecher - Oberflächen-Bildschirm durch Lichtleiter als LED-Ersatz [Willis12] | PJM [Willis12] • Hohlkammern realisierbar durch Überhangwinkel von max. 14° • Rohrgestalt besser geeignet als Flächen und Punkte • min. Rohrdurchmesser 0,6 mm • min. Rohrabstand 0,6 mm | | | |
| | Information verknüpfen (summativ) | 7 |  Gedruckter Resonanzkörper mit Integration eines Dielektrikums für taktile, interaktive Lautsprecher [Ishiguro14] |  [wikipedia] | PJM [Ishiguro 14]: - Resonanzkörper für Lautsprecher beliebig gestalten - taktile Beeinflussung der Soundqualität - Definierte Schallausbreitung möglich | | | | |
| | | 8 | -- | -- | -- | -- | | | |
| | | 9 | -- | -- | -- | -- | | | |

A.28 Katalog: I.a Konstruktionsrestriktionen /-regeln allgemein mit Erläuterung

| Konstruktionsrestriktionen /-regeln allgemein mit Erläuterung | |
|---|--|
| <p>Die Inhalte dieses Katalogs sind zum großen Teil dem Kapitel Gestaltung - Additiv gefertigte Bauteile des Skripts Konstruktionslehre I von Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz [Binz17] aus dem Wintersemester 2017/2018 entlehnt.</p> <p>Die maßgebliche Gestaltungseinschränkung bei additiven Fertigungsverfahren resultiert aus der Stabilität der entstehenden Struktur während des Fertigungsprozesses. Um eine ausreichende Stabilität zu gewährleisten, können verfahrensabhängig solide Stützstrukturen notwendig sein. Die nachträgliche Entfernbarekeit der Stützstrukturen (solide und dispers) muss möglich sein. Die Notwendigkeit von Stützstrukturen ist abhängig von der Aufbaurichtung des Bauteils, welche somit im direkten Zusammenhang mit der Gestaltung der Bauteile steht.</p> <p>Sofern keine Stützstrukturen erforderlich sind, ergeben sich durch den additiven Aufbaumechanismus nur wenige gestalterische Beschränkungen. Es lassen sich etwa Hinterschnitte und große Aspektverhältnisse (Verhältnis der größten zur kleinsten Ausdehnung eines Bauteils) realisieren, was beispielsweise die Integration von Waben-, Sandwich- oder Gitterstrukturen in Bauteile ermöglicht. Das Entfallen typischer fertigungstechnischer Restriktionen und die hohe gestalterische Freiheit ermöglicht z. B. auch die Realisierung von Freiformgeometrien, wie sie etwa in bionischen oder topologisch optimierten Strukturen vorkommen. Einsatzfelder der additiven Fertigung, bei der diese Vorteile zum Tragen kommen, sind Leichtbauprodukte für die Luft- und Raumfahrt oder Spritzgusswerkzeuge mit strömungsoptimierten hinterschnittigen Kühlkanälen.</p> <p>Abhängig vom jeweiligen Aufbauprinzip des additiven Fertigungsverfahrens ergeben sich spezifische Konstruktionsregeln, welche zumeist mit den Stützmechanismen oder dem Energieeintrag während des Fertigungsprozesses in Korrelation stehen. Im Folgenden sind allgemein einschränkende Konstruktionsregeln für die Konstruktion additiv gefertigter Bauteile aufgeführt. Die angegebenen Zahlenwerte sind gemittelte anlagenspezifische Näherungswerte aus der Literatur und daher nicht allgemeingültig übertragbar.</p> | <p style="text-align: center;">Konstruktionsregeln in Bezug auf Schicht- und Bahnapproximation</p> <p>Der Energieeintrag in das entstehende Bauteil erfolgt notwendigerweise mit einer räumlichen Ausdehnung. Dies wird bei der Approximation des Bauteils durch Schichten und Bahnen berücksichtigt und resultiert in minimal möglichen Abmessungen der entstehenden Bauteile und diskreten fertigeren Abmaßen (Auflösung der Verfahren).</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Minimale Bauteilstärke in Aufbaurichtung (minimale Bauteilabmessungen in z-Richtung):</p> <p>Allgemein sollten die Bauteilabmessungen in Aufbaurichtung mehrere Schichtdicken betragen, um mögliche Fehler innerhalb einzelner Schichten zu kompensieren und homogenere Materialeigenschaften zu erhalten. Anhaltswerte für die Bauteilstärke: $\geq 0,6$ mm oder ≥ 3 Schichtdicken.</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Diskrete Bauteilstärke in Aufbaurichtung (mögliche Bauteilabmessungen in z-Richtung):</p> <p>Die Schichtapproximation ermöglicht nur die Herstellung diskreter Abmessungen. Zwischenwerte werden für den Fertigungsvorgang durch die erreichbaren diskreten Werte approximiert und es entstehen Maßabweichungen. Die Abmessungen des Bauteils in Aufbaurichtung sollten daher ein Vielfaches der Schichtdicke betragen.</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;"> <p>Minimale Wandstärken (minimale Bauteilabmessungen senkrecht zur z-Richtung):</p> <p>Die Bahnweite b_B des Fertigungsverfahrens (Strahl- bzw. Strangdurchmesser) bestimmt die minimal mögliche Wandstärke. Kleiner modellierter Wände werden je nach Software entweder nicht gefertigt oder zu groß gefertigt. Teilweise werden von der Software auch mehrere Bahnweiten für eine vollständige Fertigung vorausgesetzt. Anhaltswerte für die Wandstärke: $\geq 0,6$ mm oder ≥ 2 Bahnweiten.</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Diskrete Wandstärken (mögliche Bauteilabmessungen senkrecht zur z-Richtung):</p> <p>Die Approximation der Bauteilstärke durch Bahnen ermöglicht nur die Herstellung diskreter Abmessungen. Zwischenwerte werden für den Fertigungsvorgang durch die erreichbaren diskreten Werte approximiert und es entstehen Maßabweichungen. Bei größeren Wandstärken kann der Effekt der Diskretisierung durch angepasste Rasterbahnen zur Füllung der Fläche umgangen werden (dies erfolgt in der Regel durch Software). Die Abmessungen des Bauteils senkrecht zur Aufbaurichtung sollten daher für kleine Wandstärken ein Vielfaches der Bahnen betragen (Vielfaches der Spurbreite b_S Überlappung).</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <p>Konturauflösung (mögliche Auflösung von Konturen senkrecht zur z-Richtung):</p> <p>Der Strahl- bzw. Strangdurchmesser beschränkt die Auflösung an Ecken/Kanten und Radien in der Bauteilebene. Fehlstellen können vermieden werden, indem die Außenradien größer als der Radius des Energieeintrags ausgeführt werden.</p> </div> |



| | |
|---|--|
| <p>Konstruktionsregeln zur Reduktion von Ungenauigkeiten durch Unschärfen des räumlichen Energieeintrags</p> <p>Der Energieeintrag in das entstehende Bauteil ist räumlich nicht scharf begrenzt. Dies muss konstruktiv beachtet werden.</p> | |
| <p>Bauteilaufmaß in Schichtrichtung (minimal fertigtbare Spaltmaße in x-y-Richtung):</p> <p>Durch die Unschärfe des Energieeintrags in Schichtrichtung kommt es zu Anhaftungen von Material an den Rändern des Bauteils. Die Ausprägung dieses Effekts ist maßgeblich vom Gesamtenergieeintrag in die Schicht, also der Schichtfläche abhängig. Die Anhaftungen können bei kleinen Spaltmaßen zum Verschluss der Spalte oder gar zur Verschmelzung angrenzender Bauteilelemente führen. Spaltmaße sind deshalb ausreichend zu dimensionieren. Anhaltswert für Spaltmaße: $\geq 0,5 \text{ mm}$.</p> | |
| <p>Bauteilaufmaß in Aufbaurichtung (minimal fertigtbare Spaltmaße in z-Richtung):</p> <p>Durch die Unschärfe des Energieeintrags in Aufbaurichtung kommt es zu Anhaftungen von Material unterhalb der gewollten Festigungszone. Dieser Effekt tritt vornehmlich in der untersten Schicht pulver- oder fluidbasierter Verfahren auf und überlagert sich mit dem Treppenstufeneffekt. Die Anhaftungen resultieren in einem Übermaß in z-Richtung und können zum Verschluss von Spalten oder zur Verschmelzung angrenzender Bauteilelemente führen. Aufmaße sind durch eine angepasste Konstruktion zu kompensieren oder durch Nachbearbeitung zu entfernen. Spaltmaße sind ausreichend zu dimensionieren. Anhaltswert für Aufmaß: $0,1 - 1,5 \text{ mm}$. Anhaltswert für Spaltmaße: $\geq 0,5 \text{ mm}$.</p> | |
| <p>Bauteilaufmaß in Aufbaurichtung (Formabweichungen in z-Richtung):</p> <p>Die Anhaftungen in z-Richtung führen bei Formelementen außerdem zu Formabweichungen. In der Abbildung sind Formabweichungen runder Geometrien zum einen für eine Bohrung (links) und zum anderen für eine Welle (rechts) dargestellt. Die Form der Bohrung wird durch Anhaftungen im oberen Bereich beeinträchtigt und ihr Querschnitt verkleinert sich insgesamt, während die Form der Welle durch Anhaftungen im unteren Bereich beeinträchtigt wird und ihr Querschnitt sich insgesamt vergrößert. Auf der jeweils gegenüberliegenden Seite sind Einflüsse des Treppenstufeneffekts zu erkennen. Der relative Einfluss der Anhaftungen auf die Formabweichungen sinkt mit zunehmender Größe der Geometrien. Die Formabweichungen können durch eine angepasste Konstruktion kompensiert oder durch Nachbearbeitung ausgeglichen werden.</p> | |
| <p>Innenliegende Ecken und Kanten (Formabweichungen in z-Richtung):</p> <p>Unschärfen des Energieeintrags können orientierungsunabhängig an inneren Körperkanten und in Ecken zu Materialanhaftungen führen. Dem kann entgegengewirkt werden, indem Ecken gerundet oder gefast werden. Anhaltswert für innere Radien: $r_i \geq 0,5 \text{ mm}$.</p> | |
| <p>Konstruktionsregeln in Bezug auf notwendige Nachbearbeitung</p> | |
| <p>Maximaler freitragender Überhangwinkel (Notwendigkeit von Stützstrukturen):</p> <p>Bei Verfahren, die solide Stützstrukturen verwenden, kann deren Notwendigkeit durch den Überhangwinkel charakterisiert werden. Der Überhangwinkel spiegelt bei gegebener Schichtdicke den Überstand der einzelnen Fertigungsschichten zueinander wider. Flächen mit kleinem Downskin-Winkel δ (Orientierungen nahe der Schichtrichtung) bedürfen eher solider Stützstrukturen als Flächen mit großem Downskin-Winkel δ (Orientierung nahe der Aufbaurichtung). Überhänge mit der Notwendigkeit von soliden Stützstrukturen können auch durch Formelemente, wie z. B. Bohrungen, entstehen. Falls die Funktion es zulässt, kann durch eine angepasste Konstruktion die Notwendigkeit von Stützstrukturen vermieden werden.</p> <p>Anhaltswert für freitragende Überhangwinkel (Downskin-Winkel): $\delta \geq 45^\circ$.</p> | |
| <p>Entfernbarkeit von soliden Stützstrukturen (Zugänglichkeit zur Entfernung):</p> <p>Stützstrukturen müssen nach dem Bauprozess entfernt werden. Dies erfolgt meist mechanisch oder chemisch. Für die Entfernung der Stützstrukturen muss die entsprechende Zugänglichkeit gewährleistet sein.</p> | |
| <p>Entfernbarkeit von dispersen Stützstrukturen (Zugänglichkeit zur Entfernung):</p> <p>Auch disperse Stützstrukturen können beim Bauprozess im Bauteil eingeschlossen werden, wie z. B. bei Hohlkörpern oder langen Kavitäten, und müssen nachträglich entfernt werden. Die Reinigung erfolgt meist unter Zuhilfenahme von Druckluft oder anderen Fluiden. Für die Entfernung müssen bei Hohlräumen Öffnungen vorgesehen werden und Kavitäten dürfen eine kritische Länge nicht übersteigen.</p> | |

A.29 Katalog: I.b Konstruktionsrestriktionen nach Fertigungsverfahren für FLM, LS, LBM

| Gruppe | Nr. | Konstruktionsrestriktionen (Konstruktionsregeln, Konstruktionsrichtlinien) nach Fertigungsverfahren für FLM, LS, LBM | |
|-----------------|-----|---|--|
| | | Fertigungsverfahren | Kategorie |
| Grobgestalt | 1 | Fused Layer Modelling (FLM) Bei direkter Anbindung: Angebundene Struktur min. 2-3 * d, um geschlossene Flächen zu garantieren [Schäfer08] | Laser-Sintern (LS) keine Anbindung |
| | 2 | Indirekt über Stützstrukturen oder direkte Anbindung des Bauteils Bauteilfundament muss ausreichend stabil sein. [Adam15] | Laser-Strahlschmelzen (LBM) nur über Stützstrukturen [Adam15] |
| | 3 | Ab $\delta \leq 35^\circ$ [Adam15] | nicht zu beachten [Adam15] |
| | 4 | freitragende Struktur längen (ohne Stützstrukturen) $\delta = 0^\circ$ max. 1,6 mm $\delta = 45^\circ$ max. 10"t $\delta = 90^\circ$ max. 20"t [Adam15] | nicht erforderlich unbegrenzt [Adam15] |
| Feingestalt | 5 | Minimale Wandstärke t vertikal ($\delta = 90^\circ$) 2-3 * bs [Schäfer08] 1,5 mm [Adam15] horizontal ($\delta = 0^\circ$) 0,8 mm [Adam15] | vertikal ($\delta = 90^\circ$) 0,5 mm [Wegner12]; 1,0 mm [Adam15]; 0,8 mm [Seepersad14]; für PA12: 0,5 mm [VDI3405-3] horizontal ($\delta = 0^\circ$) 1,0 mm [Adam15]; 0,7 mm [Wegner12]; 1,5 mm [EOS]; 0,6 mm [Seepersad14]; für PA12: 0,3 mm [VDI3405-3] |
| | 6 | Auflösung vertikal: z-Höhe des Bauteils sollte ein Vielfaches der Schichtdicke betragen [Schäfer08, Kranz15, et al.] horizontal: Strahl-/Strangdurchmesser beschränkt die Auflösung an Ecken/Kanten und Radien in Bauteilebene [Kranz15] | $r_a \geq 0,6$ mm; $r_i \geq 0,8$ mm bzw. r_i) d [Adam15]; $r/d = \text{min. } 0,6$ [Gerber08] |
| | 7 | Ecken, Kanten und Fasen $r_a \geq 1,5$ mm; $r_i \geq 0,3$ mm bzw. r_i) d [Adam15] | $r_a \geq 0,3$ mm; $r_i \geq 0,3$ mm bzw. r_i) d [Adam15] 45°-Fase ist kürzeste Lösung bzgl. z-Richtung vor konvex oder konkaven Radien [Thomas09] |
| | 8 | Oberflächen $R_z \approx 25 - 150 \mu\text{m}$ (ULTEM) [Adam15]; $R_z \approx 80 - 250 \mu\text{m}$ (ABS) [Schäfer08] | Stufensichtbarkeit bei $\alpha \leq 20^\circ$ [EOS] $R_z \approx 75 - 150 \mu\text{m}$ [Adam15]; $R_z \approx 40 - 120 \mu\text{m}$ bei PA12 [VDI3405-3] |
| Grundlegendes | 9 | Bohrungen und Zylinder vertikal ($\delta = 90^\circ$) $r \geq 1,5$ mm [Adam15] horizontal ($\delta = 0^\circ$) r_i) d [Adam15]; $r \geq 1$ mm [Schäfer08]; $r_i \geq 5,0$ mm Stützstrukturen erforderlich [Adam15] | Vertikal ($\delta = 90^\circ$) $r \geq 0,6$ mm [Adam15]; $r \geq 0,55 - 1$ mm [Seepersad14]; $r \geq 0,6$ mm [Wegner12] Horizontal ($\delta = 0^\circ$) r_i) d [Adam15]; $r \geq 0,3 - 0,75$ mm [Seepersad14]; $r \geq 1$ mm [Wegner12] seitliche Restwandstärke: min. 1,2 * r [Gerber08] bzw. $\geq 0,8 - 1$ mm [Govett12] |
| | 10 | minimale Spaltmaße (ohne Verkleben) $\geq 0,6$ mm [Adam15] | Abhängig von der Wandstärke bzw. Bohrungstiefe [EOS u. a.] Vertikal ($\delta = 90^\circ$) $r \geq 0,6$ mm [Adam15]; $r \geq 0,3 - 0,75$ mm [Seepersad14]; $r \geq 1$ mm [Wegner12] Horizontal ($\delta = 0^\circ$) r_i) d [Adam15]; $r \geq 0,3 - 0,75$ mm [Seepersad14]; $r \geq 1$ mm [Wegner12] |
| Fortgeschritten | 11 | Aufmaße / Genauigkeiten -- | Abhängig von der Wandstärke und Spalttiefe [EOS u. a.] Vertikal ($\delta = 90^\circ$) $\geq 1,6$ mm [Adam15]; $\geq 0,7 - 1,4$ mm [Govett12]; $\geq 0,7 - 0,9$ mm [Wegner12] Horizontal ($\delta = 0^\circ$) $\geq 1,6$ mm [Adam15]; $\geq 0,5 - 1,2$ mm [Govett12]; $\geq 0,4 - 0,7$ mm [Wegner12] |
| | 12 | Anisotropie Dehnungs- und Festigkeitseigenschaften sind quer zur Ablagerung drastisch reduziert [Klahn16] Bsp: R_m in z-Richtung nur 46 % (ABS) [Schäfer08] | Generell: Belastung in Schichtebene / entgegen Aufbaurichtung / $\delta=0^\circ$ ist zu bevorzugen [VDI3405-3] geringe Anisotropie der mech. Kennwerte in z-Richtung Reduzierung der Anisotropie durch anschließende Wärmebehandlung möglich Bsp. für 1.2709 und AISI10Mg in VDI3405-2 [VDI3405-3] |
| | 13 | Positionierung und Orientierung im Bauraum bevorzugt in der Mitte des Bauraums aufgrund eventueller Ungenauigkeiten der Achsantriebe in den Randbereichen | Belichtung großer Flächen vermeiden um Curt-Effekt vorzubeugen [VDI3405-3] |
| MehrkompONENTEN | 14 | Gelenke (integrierte Fertigung) $s \geq 0,2$ mm [Adam15]; $s \geq 0,2$ mm (unabhängig von Bauraumorientierung) [Schäfer08] | vertikal ($\delta = 90^\circ$) $s \geq 0,6$ mm [Adam15]; $s = 0,5 - 0,6$ mm [EOS] horizontal ($\delta = 0^\circ$) $s \geq 0,6$ mm (Übermaß in z-Richtung bei $\delta = 0^\circ$) [Adam15]; $s \geq 0,3 - 0,5$ mm [EOS] Filmscharnier: Scharnierdicke $\approx 0,5$ * t; min. 0,125 mm; Scharnierlänge + Scharnierdicke ≥ 3 [Gerber08] |
| | 15 | Gitterstrukturen standardisierte Füllstrukturen realisierbar, meist in der Software mittels weniger Parameter einstellbar | Herstellbarkeit abhängig von: - Pulverentfernung, eingeschlossene Volumina - vorzeitiges Versagen beim Postprocessing Grenzwerte: 6 % \leq Raumauffüllung ≤ 35 % Mindeststrebendicke 0,7 mm Richtlinien: - spezifische Biegefestigkeit Gitterstruktur (Vollkörper streben parallel zur Schichtebene erhöhen Biegefestigkeit) - Bei Druckbeanspruchung ist ein Vollkörper zu bevorzugen - 12cc-Zelle = robuster Allrounder [Menge17] |
| Fortgeschritten | 16 | Stabilität Bauteilfundament muss ausreichend stabil sein. [Adam15] | [Taubert17]: 12cc-Zelle dehnungsdominierte Beanspruchung → strukturelle Funktionen 12cc-Zelle biegedominierte Beanspruchung → energieabsorbierende Funktionen |
| | 17 | Stützstrukturen ab $\delta \leq 45^\circ$ [Adam15, VDI3405-3, Thomas09]; Titan: δ (40° Stützstrukturen empfohlen, bei δ (10° Stützstrukturen erforderlich) [Kranz15]) $\delta = 0^\circ$ max. 2,0 mm [Adam15]; $\delta = 0^\circ$ mit konvexem Radius max. 3 mm [Thomas09]; $\delta = 0^\circ$ mit konkavem Radius max. 2 mm [Thomas09] Titan: $\delta = 0^\circ$ max. 0,3 mm, $\alpha = 60^\circ$ max. 66"t [Kranz15] | • Je größer die Zellen, desto geringer die Streckgrenze und das E-Modul der Struktur [Yan12] Bsp: 316L, gyroid cell, 2-8mm, Abnahme um 36 bzw. 27 % • Durchmesser der Gitterelemente bestimmt das Festigkeitsverhalten der Struktur Probleme: - Starke Pulveranhaftungen und schlechte Oberflächen - Mechanische Festigkeitswerte stammen von großen Proben, Kennwerte für kleine Durchmesser fehlen [Noviello16] |

A.30 Katalog: m. Grundlagen der Softwareanwendung für die Bauteiloptimierung / Fertigungsoptimierung

Grundlagen der Softwareanwendung für die Bauteiloptimierung / Fertigungsoptimierung

AM-spezifische CAD-Funktionen
angelehnt an [Weiss17] und [Ahlgimm17]

| | Hyperworks OptiStruct | 3DS Simulia TOSCA | Inspire 2017 | Catia | Inventor 2017 | Z88 |
|--|--------------------------|-------------------------|-----------------|-------|------------------|-----|
| Netzherstellung | ++ | ++ | + | + | + | ++ |
| FE-Analyse Formoptimierung/ Dimensionsierung | ++ | ++ | + | + | + | ++ |
| Topologie-Optimierung | ++ | ++ | - | - | - | - |
| Geometrierückführung | ++ | ++ | + | + | + | ++ |
| CAD | - | - | + | ++ | ++ | - |

++ = hohe Einflussnahme
+ = vorhanden, aber geringe Einflussnahme
- = nicht vorhanden

Funktionalitäten verschiedener Software nach [Weiss17]

| | Detailliertes Vorgehen | Vereinfachtes Vorgehen | CAD-basiertes Vorgehen | Integriertes Vorgehen |
|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| CAD | Catia (++) | Inspire (+) | Inventor (++) | NX 11 |
| FEM | HyperMesh (++) | Inspire (+) | Inventor (-) | NX 11 |
| Optimierung | OptiStruct (++) | Inspire (+) | Inventor (-) | NX 11 |
| Rückführung | OSSmooth (++) | - | Inventor (+) | NX 11 |
| Nachmodellierung | Catia (++) | Inspire (+) | Inventor (++) | NX 11 |
| Fertigung | Magics (++) | Magics (++) | Netfabb (++) | NX 11 |

Softwareanwendung nach Vorgehensweise [Ahlgimm17]

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen die Fertigung optimierter, komplexer Strukturen, ohne erhöhten Mehraufwand. Es sind beispielsweise Topologieoptimierung mit anschließender Ableitung der finalen Konstruktion oder die Integration von Gitterstrukturen denkbar. Da die Fertigung auf Basis des entstandenen CAD-Modells erfolgt, sind diese Features in die CAD-Konstruktion einzufügen. Verfügbare Software bietet hierfür unterschiedliche Funktionalitäten. Die Abfolge der Softwareanwendung ergibt sich daraus.

In nebenstehender Tabelle sind Programme hinsichtlich des Umfangs ihrer Funktionalitäten zusammenfassend dargestellt (Stand 2017). Die untersuchten Programme bieten unterschiedliche Umfänge an Einstellmöglichkeiten. Programme mit weniger Möglichkeiten der Einflussnahme bieten im Gegenzug eine erleichterte Bedienung und ermöglichen es, auch nicht spezialisierten Konstrukteuren auf einfache Weise beispielsweise optimierte Strukturen zu erstellen.
[Weiss17]

Da verfügbare Programme die Zwischenschritte der Erstellung optimierter Konstruktionen in unterschiedlichem Maße unterstützen, sind nachfolgend beispielhafte Vorgehensweisen dargestellt.

- Im detaillierten Vorgehen werden ausschließlich spezialisierte Programme genutzt.
- Das vereinfachte Vorgehen nutzt Software mit geringeren Möglichkeiten zur Einflussnahme.
- Das CAD-basierte Vorgehen nutzt eine Topologieoptimierung in klassischer CAD-Umgebung.
- Das integrierte Vorgehen findet ausschließlich in einer Software statt. Beispielsweise Siemens NX 11 und Autodesk Fusion versprechen den gesamten Entwicklungsprozess für AM zu unterstützen.
[Ahlgimm17]

Berechnungsmethoden für nicht isotrope Materialien
nach [Weiss17]

Die Eigenschaften eines vollständig anisotropen Materials werden durch 21 verschiedene Werte in der Materialmatrix abgebildet, welche durch Versuche bestimmt werden müssen. Die Werte spiegeln Dehnung und Schub entlang der Hauptachsen, die Querkontraktionen, also Dehnung-Dehnung-Beziehungen, die Kopplung von Dehnung und Schub sowie die Kopplung für Schub-Schub wider. Besitzt ein Material Dehnung-Schub- oder Schub-Schub-Kopplungen, wird von anisotropem Material gesprochen. Weist das Material diese Abhängigkeiten nicht auf, ist ein Material orthotrop. Im Falle eines anisotropen Materialverhaltens müssen geeignete Festigkeitshypothesen angewendet werden.

Derzeit ist kein Richtwert bekannt, welcher auf Grund des „Grades der Anisotropie“ eine Nichtbeachtung oder einen Einbezug der Anisotropie in die Rechnung empfehlen lässt. Ob anisotrope Materialeigenschaften für die Berechnung von optimierten Strukturen angewandt werden können, ist maßgeblich durch die eingesetzte Optimierungssoftware bedingt. Der Grad der Annäherung an eine optimale Struktur ist dann von der Kenntnis der korrekten Materialeigenschaften für die Berechnung abhängig. Herstellerangaben liefern allerdings in Bezug auf die Materialdaten **normalerweise keine ausreichenden Informationen zur Durchführung einer anisotropen Optimierung**. In der Abbildung ist beispielsweise der E-Modul von Laser-Strahlgeschmelztem AISI10Mg in unterschiedlichen Bauarrichtungen dargestellt.
(nach [Weiss17])

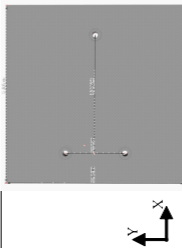
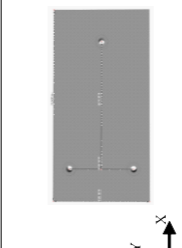
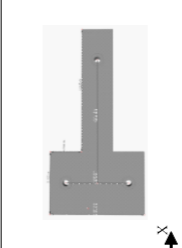
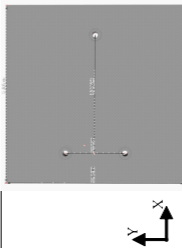
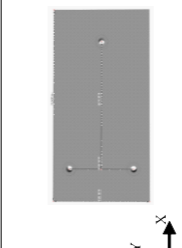
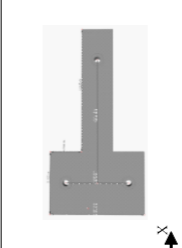
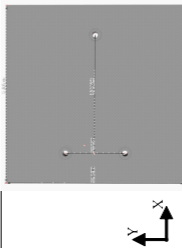
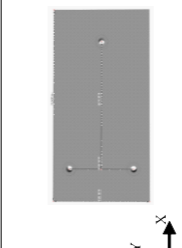
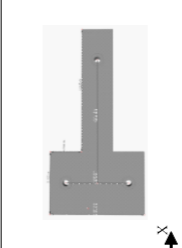
Optimierung von Fertigungstopologien hinsichtlich Stützstrukturen

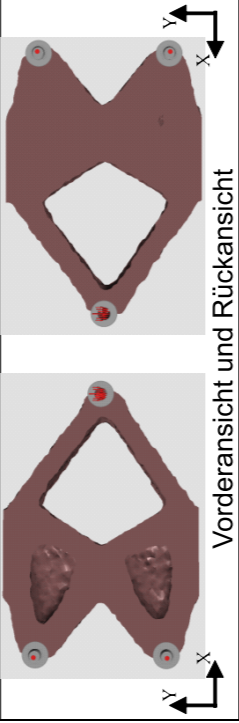
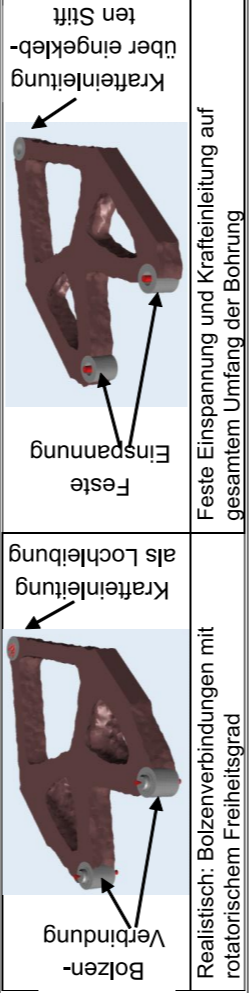
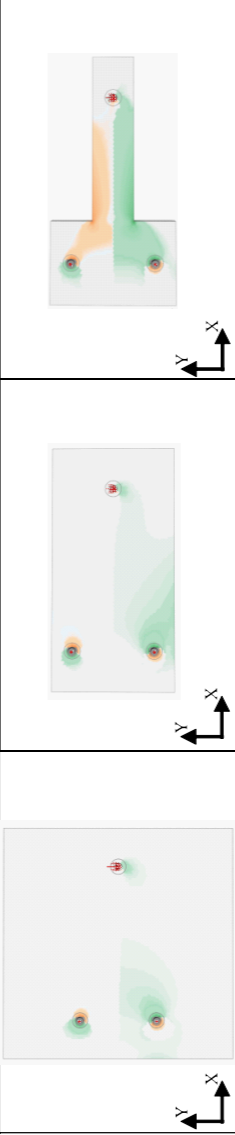
| | | | |
|--|--|--|---------------|
| Zusätzliche Stützstrukturen notwendig | | | [Langelaar17] |
| Keine zusätzlichen Stützstrukturen notwendig | | | [Gaynor15] |

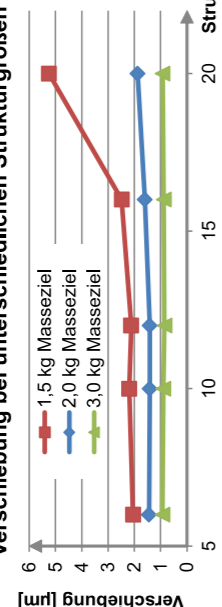
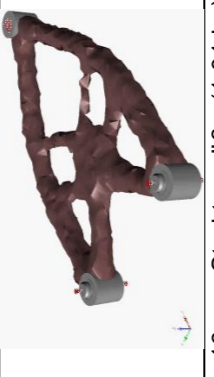
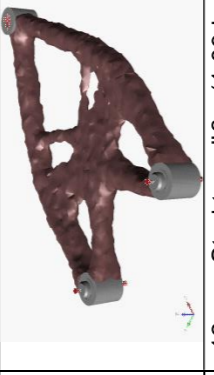

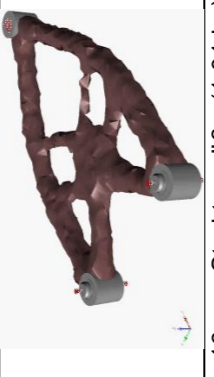
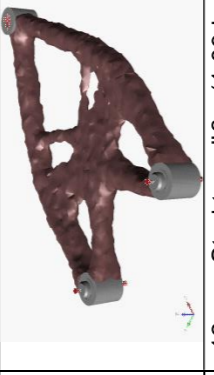

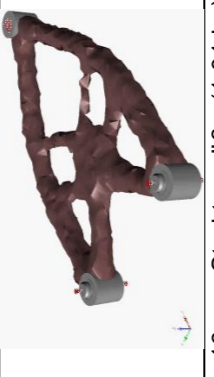
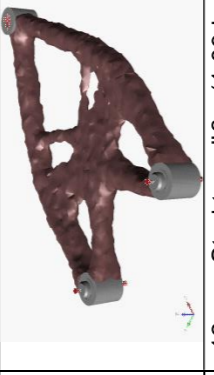

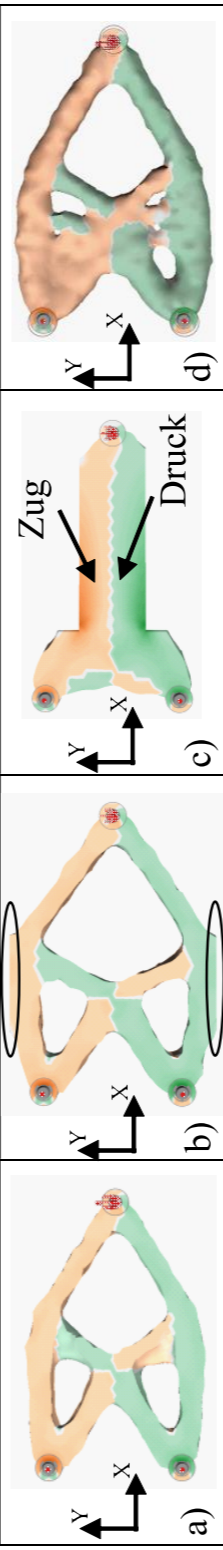
Ein fertigungstechnisches Problem, welches bei vielen additiven Fertigungsverfahren auftritt, ergibt sich durch die Unterschreitung von kritischen Überhangswinkeln. Zusätzliche Stützstrukturen sind oftmals auch bei Freiformgeometrien notwendig, wie sie bei der Topologieoptimierung entstehen. Um die Notwendigkeit von Stützstrukturen zu verhindern, kann die Topologieoptimierung angepasst und die Aufbaurichtung einbezogen werden. Die Optimalität der entstehenden Strukturen wird dadurch allerdings beeinflusst und ist zu prüfen. In den Abbildungen sind Strukturen mit und ohne der Notwendigkeit zusätzlicher Stützstrukturen gegenübergestellt.

Es ist auch möglich, die entstehenden Spannungen während der Fertigung zu simulieren und deren Einfluss auf die später entstehende Form abzubilden. Die Konstruktion lässt sich dadurch so anpassen, dass das Bauteil nach der Fertigung der gewollten Form entspricht. Eine Lösung wird beispielsweise von ANSYS angeboten.

A.31 Katalog: n. Vorgehen zur Topologieoptimierung - Anpassung von Lösungsprinzipien an bauteilspezifische Randbedingungen

| <p>Vorgehen zur Topologieoptimierung - Anpassung von Lösungsprinzipien an bauteilspezifische Randbedingungen (nach [Weiss17])</p> | | | | | | | |
|--|---|---|------------------------------------|--|------------------------------------|---|--|
| <p>Nachfolgend wird ein schrittweises Vorgehen zur Optimierung bestehender Lösungsprinzipien für spezifische Randbedingungen additiv hergestellter Produkte vorgestellt. Die Vorgehensweise baut auf der bereits bestehenden Entscheidung für die additive Fertigung eines Bauteils auf und unterstützt somit nicht den Entscheidungsprozess als solchen. Das Vorgehen ist schrittweise beschrieben, wobei es Iterationen unterworfen sein kann. Alle Schritte des beschriebenen Vorgehens können zu einem Erkennen eines Fehlers führen und somit eine Iteration notwendig machen. An den Stellen, an denen eine explizite Analyse des bisher erarbeiteten Ergebnisses von besonderer Bedeutung ist, beinhaltet der vorgestellte Prozess explizit Analyseschritte, die in ihrer Konsequenz eine Iteration erfordern können. Allen Arbeitsschritten ist jeweils ein erwartetes Ergebnis zugeordnet. In der Ausführung der Schritte wird Bezug zu den Randbedingungen der additiven Fertigung wie z. B. der Auflösung der Fertigungsverfahren, einzuhaltender Konstruktionsregeln und der Anisotropie genommen.</p> | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Prozessschritt</p> <p>Aufgabenstellung / Anforderungen</p> <p>Materialgruppe auswählen</p> <p>Additives Fertigungsverfahren festlegen</p> <p>Lösungsprinzip wählen</p> <p>Bauraummodell erstellen und Funktionsflächen festlegen</p> <p>Bauraummodell des vordefinierten Lösungsprinzips transformieren</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Bauraummodell erstellen und Funktionsflächen festlegen 2. Aufbaurichtung definieren 3. FE-Modell erstellen 4. Randbedingungen zuweisen 5. Bauraummodell analysieren 6. Optimierung des FE-Modells 7. Ergebnis analysieren (Plausibilität des Ergebnisses untersuchen) 8. Optimierungsergebnis rückführen oder nachmodellieren 9. Ergebnis analysieren (Masse, Spannungen, Steifigkeit, Stabilität, Wandstärke, ...) <p>Pre-Processing</p> <p style="text-align: right;">Prozessdarstellung</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>Ergebnis</p> <p>Grundlegende Materialeigenschaften</p> <p>Ausgewähltes Verfahren, erweiterte Materialeigenschaften</p> <p>Vor- oder selbstdefiniertes Lösungsprinzip</p> <p>Bauraummodell</p> <p>Richtungsabhängige Materialeigenschaften</p> <p>Designbereich, Non-Designbereich, Netz-Modell</p> <p>FE-Modell mit Netz und Randbedingungen</p> <p>Entscheidung zur Iteration oder Fortschreiten</p> <p>Optimierte Struktur hinsichtlich der Masse, Spannungen oder Steifigkeit</p> <p>Entscheidung zur Iteration oder Fortschreiten</p> <p>CAD-Modell</p> <p>Entscheidung zur Iteration oder Fortschreiten mit entstandener Geometrie zur Fertigungsverfahren</p> </div> </div> | | | | | | |
| <p>Im ersten Prozessschritt sind der Bauraum und die Funktionsflächen des Lösungsprinzips festzulegen. Die realitätsnahe Abbildung ist im Kontext der additiven Fertigung von besonderer Bedeutung, da im Idealfall das Optimierungsergebnis direkt dem Fertigungsverfahren entsprechen kann und nachfolgend keine umfassenden Anpassungen durch das angewandte Fertigungsverfahren notwendig sind. Anschlussstellen und Funktionsflächen sollten aus diesem Grund mit dem tatsächlich gewollten Maß modelliert werden und bspw. den Mittelwert der zulässigen Toleranzen abbilden. Das Modell kann auch bereits als vordefiniertes Lösungsprinzip vorliegen und muss in diesem Fall angepasst werden. Allgemein ist der Bauraum für die Topologie-Optimierung maximal groß zu wählen, um optimale Lösungen nicht von vornherein auszuschließen. In der Abbildung sind verschiedene Ausprägungen des Bauraums bei gleichen Abmaßen der Funktionsflächen des hier genutzten Beispiels der Kraftleitung dargestellt.</p> | <p>Bauraummodell erstellen und Funktionsflächen festlegen</p> <p>1.</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td>Bauraum 300 mm x 300 mm x 20 mm</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Bauraum 300 mm x 150 mm x 20 mm</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Bauraum mit Abstufung 300 mm x 150 mm x 20 mm</td> </tr> </table> |  | Bauraum 300 mm x 300 mm x 20 mm |  | Bauraum 300 mm x 150 mm x 20 mm |  | Bauraum mit Abstufung 300 mm x 150 mm x 20 mm |
|  | Bauraum 300 mm x 300 mm x 20 mm | | | | | | |
|  | Bauraum 300 mm x 150 mm x 20 mm | | | | | | |
|  | Bauraum mit Abstufung 300 mm x 150 mm x 20 mm | | | | | | |

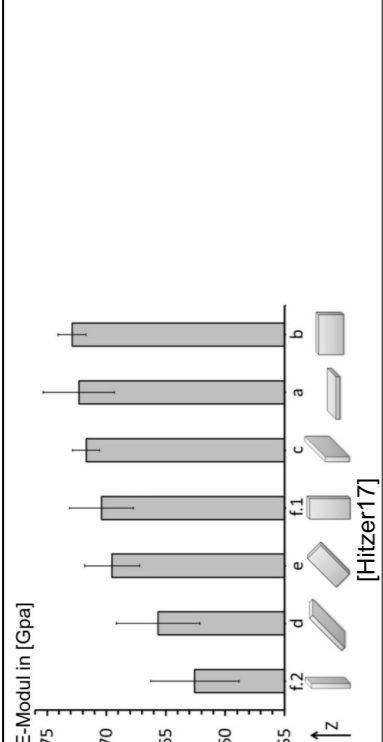
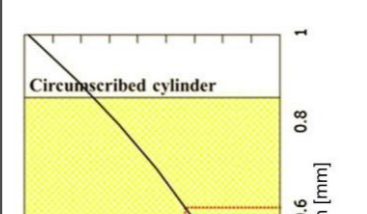
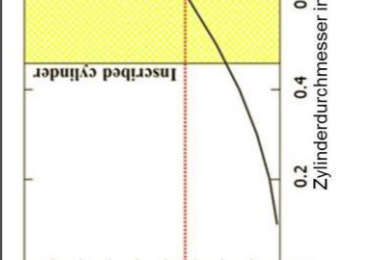
| | |
|----|---|
| 2. | <p>Bedingt durch den schichtweisen Aufbau der additiven Fertigung ergibt sich ein richtungsabhängiges Materialverhalten, eine Anisotropie. Dieses hat durch die Aufbaurichtung des Bauteils direkten Einfluss auf dessen Eigenschaften. Falls anisotrop gerechnet wird, sollte zunächst die Orientierung des Bauteils so gewählt werden, dass die kleinste Bauraumabmessung in Aufbaurichtung liegt, um die Kosten zu reduzieren.</p> <p>Im Allgemeinen ist die Festigkeit eines Bauteils in Aufbaurichtung geringer als in Schichtrichtung und der Grad der Anisotropie lässt sich bei Metallen durch Wärmebehandlung verringern. Auch kann die Schwankung der Materialeigenschaften so gering sein, dass sie während der Optimierung keiner Beachtung bedarf.</p> <p>Für das hier vorgestellte Vorgehen wird vorgeschlagen, die Materialeigenschaften des Bauteils als isotrop anzunehmen und mit dem schlechtesten Materialkennwert zu approximieren. Zusätzlich sollte die Hauptbelastungsrichtung des Materials in Schichtrichtung liegen. Auch hier sollte allerdings beachtet werden, dass evtl. Mehrkosten durch eine größere Abmessung in Aufbaurichtung entstehen können, da die Richtung der Hauptbelastung nicht der größten Bauteilabmessung entsprechen muss. Für das hier verwendete Beispiel der Kraftleitung wird von isotropem Material ausgegangen und die Platzierung des Bauteils erfolgt durch parallele Anordnung der Bohrungen zur Aufbaurichtung.</p> |
| 3. | <p>Durch eine automatische oder manuelle Vernetzung des Bauraums wird ein FE-Modell erstellt und es werden Designbereiche und Non-Designbereiche definiert. Es stehen verschiedene Netzelemente zur Verfügung. Mit Tetraeder-Elementen wird ein Modell tendenziell steifer abgebildet. Geometrische Eigenschaften wie Bohrungen oder Lager lassen sich damit aber besser abbilden. Die Elementgröße sollte 1/3 der angestrebten minimalen Strukturgröße des Bauteils nicht überschreiten [Bracket11]. Die angestrebte Strukturgröße richtet sich nach der minimalen fertigeren Strukturgröße des Fertigungsverfahrens und ist in diesem Schritt so klein wie möglich anzunehmen. Dies erhöht die Rechenzeit, kann aber zu einem steiferen Optimierungsergebnis führen.</p> <p>Das Ergebnis der Optimierung ist netzabhängig. Ein unsymmetrisches Netz kann zu nicht symmetrischen Designvorschlügen führen. Existieren aufgrund der gegebenen Kräfte und Einspannungen Symmetrien, sollten diese zugewiesen werden.</p> <p>Der gegebene Belastungsfall des Beispiels weist eine Symmetrie auf. Wird diese nicht zusätzlich als Restriktion aufgeführt, kann als Ergebnis der Optimierung ein nicht symmetrischer Designvorschlag entstehen. Eine fehlende Angabe äußert sich, wie in der Vorder- und Rückansicht in der Abbildung dargestellt, in einem asymmetrischen Designvorschlag. Das daraus resultierende Bauteilverhalten einer Torsion um die X-Achse (überhöht in der Abbildung rechts dargestellt) kann durch das Einfügen der Symmetriebedingung vermieden werden.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">  <p>Vorderansicht und Rückansicht</p> </div> |
| 4. | <p>Die Randbedingungen umfassen Lager- und Kraftbedingungen. Das Optimierungsergebnis kann bei der additiven Fertigung im Gegensatz zu konventionellen Verfahren im Idealfall nahezu ohne Fertigungseinschränkungen umgesetzt werden. Daraus lässt sich ableiten, dass am Designvorschlag manuell möglichst wenig geändert werden sollte, um das Optimalitätskriterium beizubehalten. Lager- und Kraftbedingungen sind deshalb so realitätsgetreu wie möglich zu modellieren. In der Abbildung sind zur Veranschaulichung des Einflusses der Randbedingungen zwei Designvorschläge bei geänderten Lagerarten der Krafteinleitung und sonst gleichen Einflussfaktoren gegenübergestellt.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">  </div> |
| 5. | <p>Vor der Durchführung der Optimierung sollte zunächst das Bauraummodell analysiert werden. Der Hauptkraftfluss muss innerhalb des Bauraummodells liegen und sollte keine Randbereiche einschließen. In der Abbildung sind die Analysen der zuvor definierten verschiedenen Bauräume dargestellt und die Ausprägungen des Kraftflusses sind zu erkennen. Während sich in der Zug/Druck-Analyse der linken beiden Darstellungen die Spannungen auf die Krafteinleitungspunkte beschränken und kaum Kraftfluss zum Bauraumrand besteht, ist im rechten Bauraum eine deutliche Spannungsüberhöhung an den Kerbstellen zu beobachten. Der Kraftfluss wird hier extrem eingeschränkt, was durch eine Optimierung nur geringfügig verbessert werden kann. Der Bauraum sollte hier vergrößert werden bzw. sollten zumindest Entlastungen vorgesehen und eine Formoptimierung durchgeführt werden.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">  </div> |





| 6. | Optimierung des FE-Modells | <p>Bei der Optimierung des FE-Modells werden verschiedene Ansätze eingesetzt. Zunächst ist ein Optimierungsziel zu wählen, z. B. eine minimale Masse oder eine maximal zulässige Verschiebung. Die möglichen Optimierungsziele sind vom angewandten Optimierungsprogramm abhängig. Neben dem Optimierungsziel sind Randbedingungen der Optimierung zu wählen. Diese umfassen erlaubte Verschiebungen, maximale Spannungen, minimale Strukturgrößen und Symmetrien. Die entstehende Struktur setzt sich aus den Einzelstrukturen der unterschiedlichen Lastfälle zusammen. Die minimale Strukturgröße wird maßgeblich durch das gewählte Fertigungsverfahren eingeschränkt und kann durch die Verfahrensparameter beeinflusst werden. Durch die Wahl einer kleineren minimalen Strukturgröße werden filigranere Geometrien erstellt. Allgemein wird in der Literatur darauf hingewiesen, dass die Bildung feiner Strukturen die Maximierung der Steifigkeit begünstigt. In Bezug auf die Optimalität sollte deshalb die minimale Struktur so klein wie möglich gewählt werden. Je kleiner die Strukturgröße ist, desto höher ist allerdings die Rechenzeit. Auch sollte die Strukturgröße mindestens der dreifachen Elementgröße des FE-Netztes entsprechen [Brackett11], um die Strukturen ausreichend abbilden zu können (siehe Schritt 3).</p> <p>In der nachfolgenden Abbildung sind für verschiedene Masseziele die aus der Optimierung resultierenden Verschiebungen in Abhängigkeit der Strukturgröße aufgetragen. Für die Berechnung wurde der Bauraum so erweitert, dass Randeffekte nicht auftreten. In der darauf folgenden Abbildung sind für das Masseziel 1,5 kg die dazugehörigen Optimierungsergebnisse mit resultierender Masse dargestellt. Der Wert von 16 mm für die minimale Strukturgröße stellt den vom Optimierungsprogramm vorgeschlagenen Wert dar.</p> | | | | | | | | |
|-------------------------------|---|--|---|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|--|---|
| | | <p style="text-align: center;">Verschiebung bei unterschiedlichen Strukturgrößen</p>  <table border="1" data-bbox="756 451 994 1585"> <thead> <tr> <th>Strukturgröße [mm]</th> <th>16 mm Strukturgröße (1,01 kg)</th> <th>12 mm Strukturgröße (1,09 kg)</th> <th>6 mm Strukturgröße (1,18 kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>16 mm Strukturgröße (1,01 kg)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | Strukturgröße [mm] | 16 mm Strukturgröße (1,01 kg) | 12 mm Strukturgröße (1,09 kg) | 6 mm Strukturgröße (1,18 kg) | 16 mm Strukturgröße (1,01 kg) |  |  |  |
| Strukturgröße [mm] | 16 mm Strukturgröße (1,01 kg) | 12 mm Strukturgröße (1,09 kg) | 6 mm Strukturgröße (1,18 kg) | | | | | | | |
| 16 mm Strukturgröße (1,01 kg) |  |  |  | | | | | | | |
| 7. | Ergebnis analysieren (Plausibilität des Ergebnisses untersuchen) | <p>Es kann erkannt werden, dass bei geringer Massereduktion (höheres Masseziel) zwischen den unterschiedlichen Strukturgrößen nahezu keine Differenz bei der Verschiebung erkennbar ist. Dies kann damit erklärt werden, dass sich die Optimierung in diesem Bereich noch auf die niedrig belasteten Bereiche beschränkt, die nur geringen Einfluss auf die Steifigkeit haben. Bei geringerer Masse allerdings besitzt die feinere Struktur die geringste Verschiebung. Es wird vorgeschlagen, Rechnungen zunächst mit größerer Struktur zu rechnen und zu kontrollieren, ob das Masseziel bereits hiermit erreicht werden kann. Ist das Masse- oder Steifigkeitsziel dagegen ambitioniert, sollten feinst mögliche Strukturen gewählt werden.</p> <p>In diesem Arbeitsschritt ist vorrangig die Plausibilität des Optimierungsergebnisses, aber auch die Einhaltung von Fertigungsrestriktionen zu prüfen. Die Überprüfung der Plausibilität kann in Hinblick auf die Beurteilung von Lastpfaden erfolgen. Bei Optimierung auf Steifigkeit sollten Zug-Druck-Hauptpfade und dazwischenliegende Stützpfade erkennbar sein. Tragwerkähnliche Strukturen sollten, im Gegensatz zur ausgebildeten Struktur in der Abbildung c), keine Biegebeanspruchung enthalten, sondern ausschließlich Zug oder Druck in den Einzelstrukturen vorherrschen. Indikatoren für eine Biegebeanspruchung sind auch T-Stöße in tragwerkähnlichen Strukturen. Die Struktur sollte auf Kerbstellen hin untersucht werden. Querschnittssprünge bedeuten dabei Steifigkeitssprünge und somit Kraftflussveränderungen. In Hinblick auf die Fertigungsrestriktionen sollte untersucht werden, ob die Entfernung von Stützstrukturen und Pulverresten möglich ist, also z. B. keine geschlossenen Hohlräume existieren. Bei flachen Überhangwinkeln sind Stützstrukturen notwendig und die Zugänglichkeit zur Entfernung muss gewährleistet sein. Offensichtliche Fehler im Designvorschlagn sind freischwebende oder abgebrochene Strukturelemente, die eine Veränderung der abgeschnittenen Elementdichte (Cutoff) oder eine Verkleinerung der Elementgröße in Schritt 3 erfordern.</p> <p>Im Ergebnis Abbildung c) kann sich, wie erwartet, keine optimierte Struktur ausbilden. Die beiden linken Ergebnisse weisen prinzipiell eine geeignete Struktur für die Funktionserfüllung auf, allerdings sind im Ergebnis Abbildung b) Bauraumgrenzen enthalten (siehe Markierung), was die Struktur verzerrt und eine Iteration mit vergrößertem Bauraum in Y-Richtung erfordert. Auch sollte für das linke Ergebnis eine Iteration mit verbreitertem Bauraum (Z-Richtung) in Betracht gezogen werden, um die entstehende Struktur hier nicht zu beschränken (Ergebnis siehe Abbildung d)).</p> | | | | | | | | |
| 8. | Optimierungsergebnis rückführen oder nachmodellieren |  <p>Basierend auf der entstandenen Struktur und dem Einsatzzweck des Bauteils sollte entschieden werden, ob eine computerbasierte Rückführung der Geometrie oder eine Nachmodellierung erfolgt. Die Rückführung erfolgt durch eine Glättung des entstandenen Ergebnisses, bspw. mit dem Programm OSSmooth, und anschließende Fehlerausbesserung der entstandenen Datei, bspw. mit CATIA. Die Nachmodellierung des Designvorschlagns kann entweder manuell oder teilautomatisiert erfolgen, wie bspw. bei Inspire über Freiformflächen, sogenannter POLYNURBS. Bei einer Optimierung aus Leichtbaugründen, d. h. hinsichtlich des Verhältnisses der Masse zur Steifigkeit, sowie bei höheren ästhetischen Anforderungen an das Bauteil ist eine möglichst gute Modellierung der zu fertigenden Oberfläche zweckmäßig. Ist die Optimierung rein durch die Kosteneinsparung motiviert, also in dem Bereich, in dem die Massenreduktion noch keinen erheblichen Einfluss auf die Steifigkeitsreduktion hat (siehe Abbildung bei 6.), ist sie nicht zwingend notwendig.</p> | | | | | | | | |
| 9. | Ergebnis analysieren | <p>Das letztlich entstandene Ergebnis des Prozesses sollte nochmals auf die Erfüllung aller Anforderungen, aber besonders hinsichtlich seiner Masse, der auftretenden Spannungen und der Steifigkeit überprüft werden. Auch sollten etwaige Stabilitätsprobleme, wie z. B. Knicken, ausgeschlossen werden. In Bezug auf die Fertigbarkeit sind neben der Prüfung der Kriterien aus Schritt 7 weitere Fertigungsrestriktionen zu untersuchen, wie minimale Spaltmaße und Strukturgrößen.</p> <p>Nach erfolgreicher Optimierung des Bauteils und abschließender Freigabe für die Fertigung in der Ergebnisanalyse erfolgt die Vorbereitung der Daten zur Fertigung, welche auch als Pre-processing bezeichnet wird.</p> | | | | | | | | |

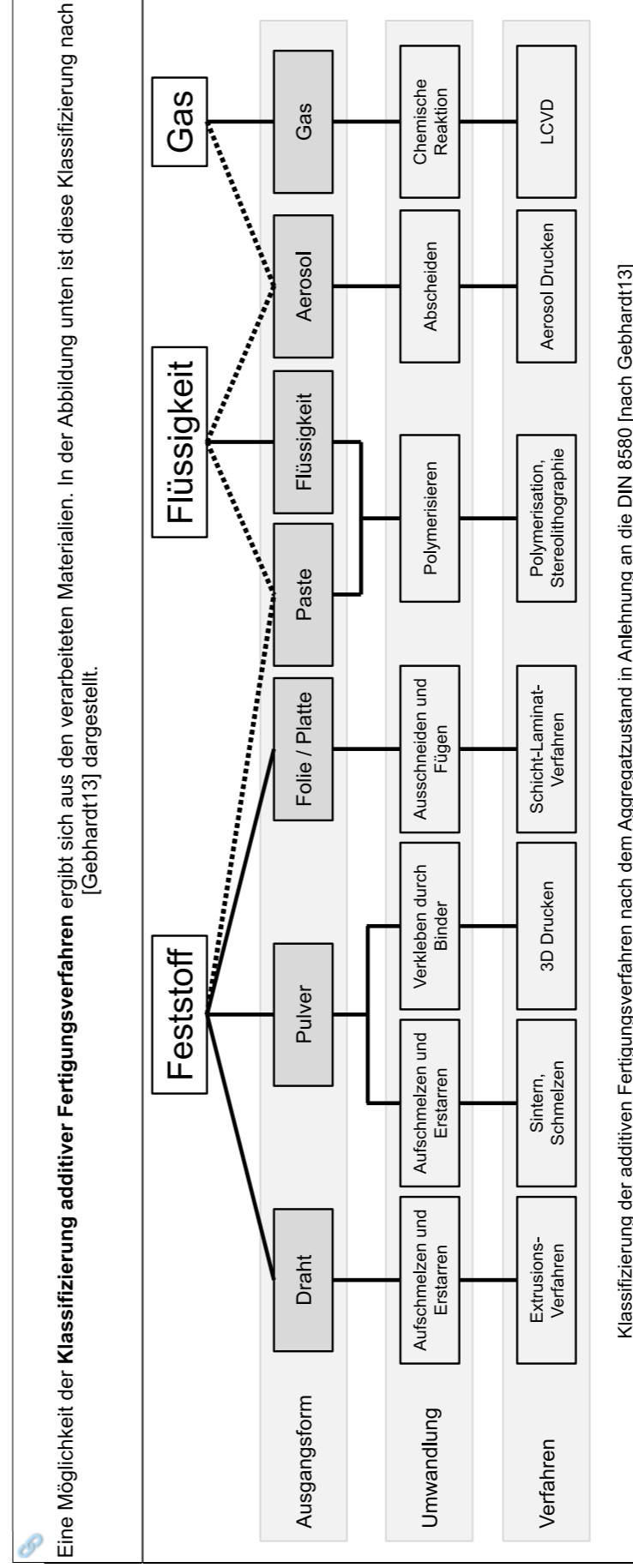
A.32 Katalog: o. Grundlagen zu Produktindividualisierung und -personalisierung bei der additiven Fertigung

| | | | | | |
|---|--|---|---|--|---|
| <p>Grundlagen zu Produktindividualisierung und -personalisierung bei der additiven Fertigung</p> | <p>Aufgrund der werkzeuglosen Fertigung ermöglichen additive Fertigungsverfahren die einfache Personalisierung / Individualisierung von Produkten. Dieser Vorteil führt dazu, dass wirtschaftliche AM-Produkte, die in großen Stückzahlen gefertigt werden, häufig mit Personalisierung einhergehen. Personalisierte AM-Produkte haben sich zum Beispiel in der Medizintechnik oder der Schmuckindustrie etabliert. Auch bei der Individualisierung von Produkten sind die Verfahrensrestriktionen zu beachten. Im Folgenden sind Beispiele individualisierter Produkte dargestellt.</p> | <p>Kundenspezifische Brillen: Die Passform der Brille wird dem Gesicht des Kunden angepasst.</p>  <p>Quelle: Framelapp</p> | <p>Individualisierter Türgriff aus Edelstahl</p>  <p>Quelle: i.materialise</p> | <p>Individualisiertes Gehäuse von Hörgeräten</p>  <p>Quelle: 3D Systems</p> | <p>Individualisierter Schmuck aus Gold</p>  <p>Quelle: ReaLizer GmbH</p> |
|---|--|---|---|--|---|

A.33 Katalog: p.1 Werkstoffe und deren Eigenschaften

| Materialeigenschaften und Werkstoffübersicht | |
|--|--|
| <p>Allen additiven Fertigungsverfahren ist gemein, dass sich durch den schichtweisen Aufbau richtungsabhängig unterschiedliche Materialeigenschaften ergeben. Die Ausprägung dieser Anisotropie kann unterschiedlich hoch ausfallen und daher unterschiedliche Relevanz für die Konstruktion haben. Laut Herstellerangaben ist beim Laser-Sintern (LS) der richtungsabhängige Unterschied der Materialeigenschaften oftmals vernachlässigbar, bzw. es werden keine richtungsabhängigen Materialdaten zur Verfügung gestellt. Beim Laser-Strahlschmelzen (LBM) von AISi10Mg ergeben sich beispielsweise nach der Untersuchung von [Hitzer17] allerdings richtungsabhängige Abweichungen des E-Moduls von über 10 %.</p> |    <p>[Hitzer17]</p> <p>[Suard14]</p> |
| <p>Weiterhin wird die Belastbarkeit der Materialien durch die Oberfläche beeinflusst. Vor allem bei kleinen Strukturen steigt der Einfluss der Oberfläche merklich und reduziert die massebezogene Steifigkeit. Dieser Effekt ist beispielsweise bei Gitterstrukturen zu beachten. In der linken Abbildung ist für das Elektronen-Strahlschmelzen (EBM) das Modell einer Gitterstrebe mit 1 mm Durchmesser abgebildet. Es ist zu sehen, dass der tatsächlich entstehende Vollzylinder deutlich kleiner ist. In der rechten Abbildung ist der Einfluss dieses Effekts auf die resultierende Steifigkeit aufgetragen. Die resultierende Steifigkeit nimmt mit kleiner werdendem Zylinderdurchmesser ab, da der Einfluss der Oberfläche zunimmt.</p> | |

| Werkstoffübersicht | | | |
|--|--|---|---|
|  <p>KUNSTSTOFF Pulver</p> |  <p>KUNSTSTOFF Filament</p> |  <p>METALL Pulver</p> |  <p>KERAMIK Pulver</p> |
| <p>Zu einigen der möglichen Werkstoffe sind im Folgenden genauere Kennwerte gesammelt.</p> | | | |



A.34 Katalog: p.2 Werkstoffe und deren Eigenschaften

| Werkstoffe: Keramikpulver | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|--------|-------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|---------------------------------|--|--|-----------------------------|------------------|-----------------------|
| Werkstoffgruppe | Werkstoff | | Eigenschaften | | | | | | | | | | Herstellerauswahl (Quellen) | Bemerkung | |
| | Werkstoff | Zusatz | Schmelzpunkt [°C] | max. Einsatz-temp. [°C] | mittlere Partikelgröße [µm] | Schüttdichte [g/cm ³] | Dichte [g/cm ³] | E-Modul [MPa] | Biegefestigkeit [MPa] | B3B (biaxiale Festigkeit) [MPa] | Heißbiegefestigkeit [N/cm ²] | Kaltbiegefestigkeit [N/cm ²] | | | Oberfläche [µm] |
| Keramik | Al ₂ O ₃ (Aluminiumoxid) | | 2072 | 1400 - 1700 | | | 3,7 - 4 | 300 - 380 | 300 - 580 430 [Lithoz] | | | | Ra = 0,4 | Lithoz, Cerix | |
| | ZrO ₂ (Zirkonoxid) | | 2715 | 800 - 1600 | | | 5,0 - 6,0 | 200 - 210 | 500 - 1000 Lithoz: 700 | | | | Ra = 0,6 | Lithoz, Cerix | |
| | SiC | | 2730 | | | | | | | | | | | | |
| | Si ₃ N ₄ (Siliziumnitrid) | | 1900 | | | | 3,25 | | | 760 | | | | Lithoz | |
| | TCP (Tricalciumphosphat) | | | | | | | | 20 - 30 | | | | | Lithoz | Knochenersatzmaterial |
| | ZTA (Zirkoniumoxid-verstärktes Aluminiumoxid) | | | 1500 - 1600 | | | | 4,0 - 4,1 | 310 - 380 | 400 - 760 | | | | | Cerix |
| Sand | Al-Si-Sand | | 1825 | | 130 ± 20 | 1,64 ± 0,05 | | | | | 800 ± 80 | 2000 ± 200 | | EOS Ceramics 5.2 | [Gebhardt13] |
| | Quartzsand | | 1700 | | 140 ± 20 | 1,4 ± 0,04 | | | | | 600 ± 60 | 1600 ± 160 | | EOS Quartz 4.2 | [Gebhardt13] |


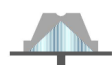





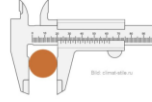
A.35 Katalog: p.3 Werkstoffe und deren Eigenschaften

| Werkstoffe: Kunststoff-Filamente | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|----------|---------------|--------------------|---------------------|-------------------|------------------|--|--------------------------------------|-------------------------|-------------------|--|-----------------------------|
| Werkstoffgruppe | Werkstoff | | Eigenschaften | | | | | | | | | | Herstellerauswahl (Quellen) |
| | Werkstoff | Zusatz | E-Modul [MPa] | Streckgrenze [MPa] | Zugfestigkeit [MPa] | Streckdehnung [%] | Bruchdehnung [%] | Kerbschlagzähigkeit [kJ/m ²] | Schlagzähigkeit [kJ/m ²] | Glasübergangstemp. [°C] | Schmelztemp. [°C] | | |
| Polyamide | PA | | 503 - 665 | 46 - 56 | 34 | 13 | 32 - 330 | Izod: 2,3 | | 82 | 200 - 210 | Fabb-it, Ninjatek, Tauliman3D, Volaprint | |
| | PA 11 | | 3378 | | | | | | | | | Stratasys | |
| | PA 12 | | 1310 | 53 | | | 9,5 | Izod: 150 J/m ² | Izod: > 2000 J/m | | | Stratasys | |
| | PA | TPE | 73 | 34,8 | | | 498 | | | 74 | 203 | Tauliman3D | |
| Acrylnitril-Styrol-Polymere | ABS | | 1600 - 2400 | 31 - 48 | 32 - 36 | 2 - 4,4 | 4 - 9 | Izod: 128 J/m ² | Izod: 300 J/m ² | 108 | 200 - 240 | Advance3d, Fabb-it, GermanRepRap, Stratasys, Verbatim, Volaprint | |
| | ASA | | 2010 | 29 | 33 | 2 | 9 | Izod: 64 J/m ² | Izod: 321 J/m ² | 108 | | Stratasys | |
| Polycarbonat | PC | | 2000 | 40 | 57 | | 4 | Izod: 73 J/m ² | Izod: 877 J/m ² | 112 - 161 | | GermanRepRap, Stratasys | |
| | PC | ABS | 1810 - 2400 | 29 - 54 | 60 | | 5 | Izod: 235 J/m ² | Izod: 642 J/m ² | 125 | | Stratasys, Volaprint | |
| Polyetherimid | PEI | GB | 2270 - 3580 | 47 - 64 | 69 - 110 | 2,2 - 7 | 3,3 - 60 | Izod: 41 J/m ² | Izod: 326 J/m ² | 186 - 215 | | Citim, ExcelTec | |
| Polyethylen-terephthalat | PET | G | 1941 - 3000 | 47 - 53 | 19 | 4 | 5,9 - 31 | Izod: 4,5 | Izod: no break | 70 - 80 | 220 | Advance3d, Formfutura, GermanRepRap, Tauliman3D, Verbatim | |
| Poly lactide | PLA | | | 50 | | | > 3 | | Izod: 3-5 | 60 | 170 - 180 | Advance3d, Fabb-it, GermanRepRap, Verbatim, Volaprint | |
| Polyoxymethylen | POM | Co | 1300 - 2450 | 39 - 62 | | 9 - 23 | | Charpy: 8,5 | | -60 | 165 | Apiumtec, Volaprint | |
| Polypropylen | PP | | 1100 | 29 | | 11 | > 50 | Charpy: 26 | | | | GermanRepRap, Stratasys, Verbatim, Volaprint | |
| Polystyrol | PS | MF | 2250 | 32,5 | 28 | | 55 | Charpy: 8 | | | | GermanRepRap | |
| | PS | HI | 2000 | 26 | | 1,5 | 0,4 | Charpy: 17 | | | | Fabb-it, GermanRepRap, Volaprint | |
| Polyethylen | PE | LLD | 490 | 31 | | | 300 | | Izod: 10 | | 110 | Tauliman3D | |
| | PE | HD | 1100 | 27 | | 13 | | Izod: 6 | | | | Volaprint | |
| Polyetheretherketon | PE | TP-Co-PE | 29 | | 8 | | 350 | | | | | Formfutura, Nexeo 3D | |
| | PEEK | | 3700 | 97 | | 29 | | Charpy: 5,7 | Charpy: 100 | 147 | 338 | Apiumtec | |
| Polymethylmethacrylat | PMMA | | | | 55 | | | | | | 200 | Material4Print | |
| Thermoplastische Elastomere | TPE | | 12,4 - 14 | | 1,8 | | 990 | | | | 175 - 195 | Verbatim, Volaprint | |
| Thermoplastische Polyurethane | TPU | | 12 - 16 | 4 - 30 | 26 - 39 | 55 - 65 | 500 - 850 | | | -24 bis -35 | 220 | GermanRepRap, Ninjatek, Volaprint | |
| Polyvinylidenfluorid | PVDF | | 2000 | 50 | | 9 | > 50 | | | | 169 | Apiumtec | |
| Polyvinylalkohol | PVA | | | | | | | | | | 163 | Advance3d, Formfutura | |
| Legende: | Co = Copolymer G = Glykol GB = Glaskugelverstärkt HD = Hohe Dichte HI = High Impact (Hohe Schlagzähigkeit) LLD = Lineares PE niedriger Dichte TP = Thermoplastisch | | | | | | | | | | | | |

A.36 Katalog: p.4 Werkstoffe und deren Eigenschaften

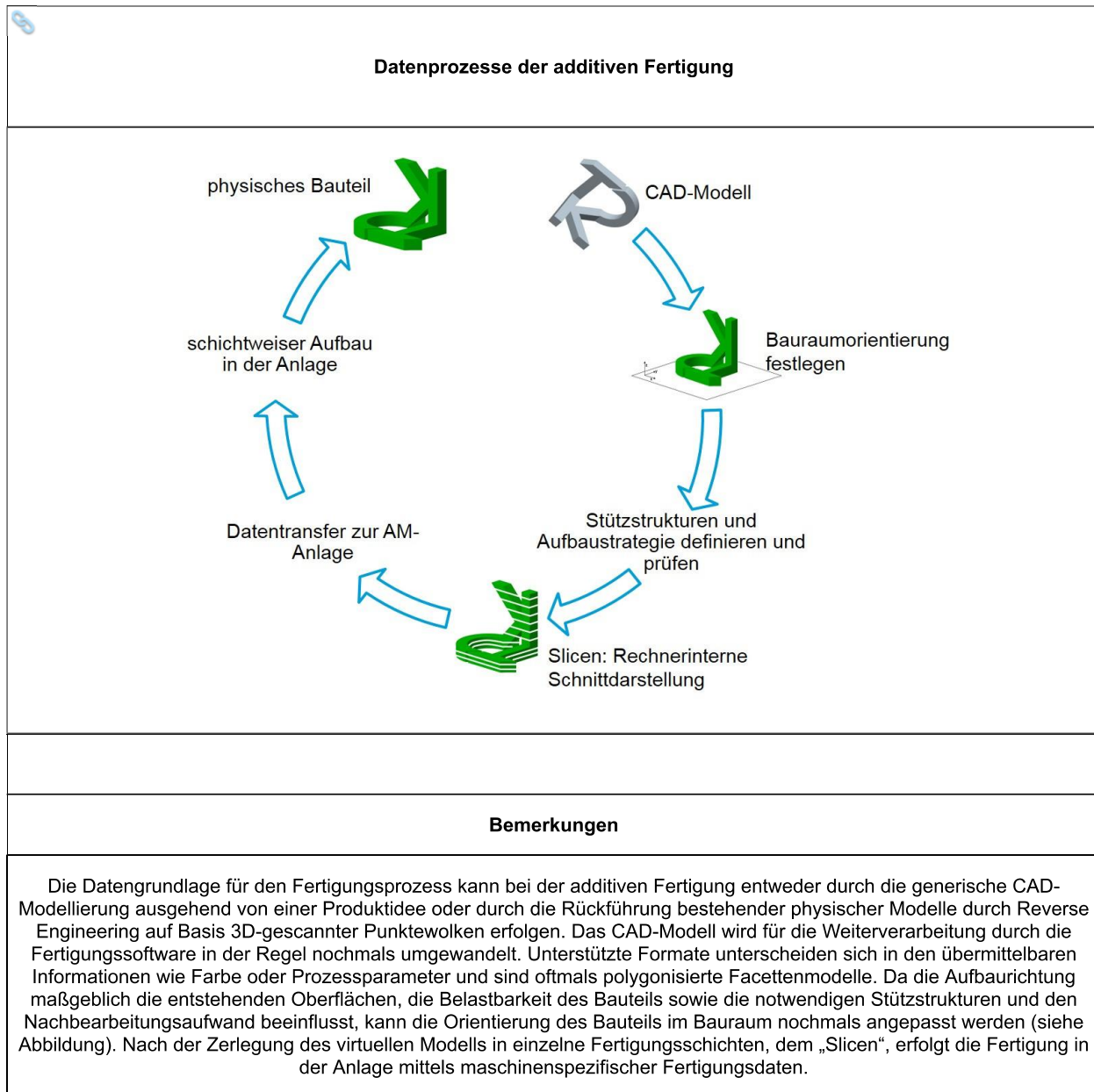
| Werkstoffe: Kunststoff-Pulver | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---|--------|---------------------------------------|--------------------|---------------------------|------------------|--|--------------------------------------|---|--|-----------|
| Werkstoffgruppe | Werkstoff | | Eigenschaften | | | | | | | Herstellerauswahl (Quellen) | Bemerkung |
| | Werkstoff | Zusatz | E-Modul [MPa] | Streckgrenze [MPa] | Zugfestigkeit [MPa] | Bruchdehnung [%] | Kerbschlagzähigkeit [kJ/m ²] | Schlagzähigkeit [kJ/m ²] | Schmelztemp. [°C] | | |
| Polyamide | PA 11 | | 1500 | 37 | 48 | 45 | Charpy: 6,5 | Charpy: 7,8 | 201 | 3D Systems, Advanc3d, ALM, EOS, ExcelTec | |
| | PA 11 | GF | 3378 | | 48 | 4 | | | 200 | ALM, ExcelTec | |
| | PA 12 | | 1700 ± 100 | | 45 ± 2 | 25 ± 2 | Charpy: 4,8 | Charpy: 5,3 | 176 | 3D Systems, Advanc3d, ALM, EOS, CRP Technologies, Citim, CRP Technologies, EOS | |
| | PA 12 | FR | 1900 - 2500 | | 32 - 49 | 4 - 20 | Izod: 49 J/m ² | Izod: 371 J/m ² | 185 | 3D Systems, ALM, EOS | |
| | PA 12 | AL | 3600 ± 200 | | 48 ± 2 | 4 ± 1 | Charpy: 4,6 | Charpy: 2,9 | 176 | ALM, Citim, EOS, Fabb-it | |
| | PA 12 | CF | Längs: 6850 ± 250 Quer: 3650 ± 250 | | Längs: 72±2 Quer: 52±2 | 2 ± 1 | Charpy: 8,7 | Charpy: 5,4 | 176 | 3D Systems, ALM, Citim, CRP Technologies, EOS | |
| | PA 12 | CS | | | 60 | 10 | | | 170 | Fabb-it | |
| | PA 12 | GB | 3200 | | 48 ± 2 | 9 ± 2 | Charpy: 35 ± 2 | Charpy: 35 ± 2 | 176 | Citim, ExcelTec | |
| | PA 12 | GF | 3200 - 6048 | | 26 - 60 | 1,4 - 9 | Charpy: 5,4 | Charpy: 3,5 | 176 | 3D Systems, ALM, CRP Technologies, EOS, Fabb-it | |
| | PP | | 1990 | | 20 | 12 | | Izod: 8 | ≈135 | Advanc3d, Diamond Plastics, Luvosint | |
| | PP | MF | 2450 - 2950 | | 25 - 28 | 5,5 - 10 | | Izod: 12 - 18 | ≈135 | Diamond Plastics | |
| | PS | | 1600 | | 5,5 | 0,4 | | Izod: 14 J/m ² | 229 | 3D Systems, Advanc3d, EOS | |
| Polyethylen | PE | HD | 2000 | 21 | | 5,5 | Izod: 10 | 130 | Diamond Plastics | Wandstärke ≥ 1,5 mm | |
| Polyetheretherketon | PEEK | | 4250 | 90 | | 2,8 | | 372 | EOS | | |
| Polymethylmethacrylat | PMMA | | | | 4,3 | | | ≈160 | Voxeljet | | |
| Thermoplastische Elastomere | TPE | | 7,4 - 8 | | 1,8 | 110 | | 178 | 3D Systems, ALM | Reißwiderstand: 6 - 15 N/mm | |
| Thermoplastische Polyurethane | TPU | | 5,3 - 40 | 2 - 27 | 200 - 500 | 200 - 500 | | 118 - 180 | 3D Systems, Advanc3d, Citim, EOS, Fabb-it, Luvosint | Citim: Reißwiderstand: 7,6 N/mm Druckverformungsrest: 83 % | |
| Legende: | GF = glasfaserverstärkt GB = glaskugelveerstärkt FR = flame retardant AL = aluminiumgefüllt CS = keramikverstärkt (ceramic strengthened) MF = mineralgefüllt HD = Hohe Dichte | | | | | | | | | | |

A.38 Katalog: q. Übersicht Nachbearbeitung (Post-processing)

| Übersicht Nachbearbeitung (Post-processing) | | | | |
|---|------------------------------|--|--|---|
| <p>Im Folgenden sind mögliche Nachbearbeitungsschritte aufgeführt und diese den Verfahrensgruppen zugeordnet. Allgemein unterscheiden sich die Nachbearbeitungsverfahren nicht von denen konventionell hergestellter Bauteile, wie bspw. durch Gussverfahren.</p> | | | | |
| Hauptgruppe | Sekundärbearbeitung | Bearbeitungsprozesse | Verfahrensgruppen | Symbol |
| Grundlegende Nachbearbeitung | Reinigen | Restmaterial wegpinseln oder abspülen | Pulverbettbasierte Verfahren Flüssigharz-basierte Verfahren |  |
| | Stützstrukturen entfernen | Abknicken, Sägen, Fräsen, Auswaschen | Alle Verfahren (bis auf LS von Kunststoffen) |  |
| | Zerspanende Nachbearbeitung | Bohren, Gewinde schneiden, Fräsen, Drehen, Sägen, Schleifen, etc. | Alle Verfahren |  |
| Oberflächentechnik | Oberflächenbehandlung | Trommelschleifen, Strahlen, Polieren, Induktion, Nitrieren, Aufkohlen, Plasma-behandlung, etc. | Alle Verfahren |  |
| | Oberflächenbeschichtung | Lackieren, Galvanisieren, PVD, CVD, Tauchabscheidung, etc. [Breuning13] | Alle Verfahren |  |
| Optimierung der mechanischen Eigenschaften | Wärmebehandlung | Warmauslagern, Härten, Ausscheidungshärten, Lösungsglühen, Anlassen, etc. | LBM, EBM, LMD |  |
| | UV-Behandlung | Nachvernetzen restlicher Monomere | SL, PJM, DLP |  |
| Qualitätssicherung | Dichte/Härte/Festigkeit/etc. | zerstörend | alle Verfahren |  |
| | | zerstörungsfrei | | |

• Für zahlreiche Nachbearbeitungsprozesse muss ein Aufmaß vorgesehen werden.
 • Gitterstrukturen: Oberflächenbehandlungen, chemisches Ätzen und elektrochemisches Polieren zur Entfernung von Pulveranhaftungen reduzieren den Durchmesser der Gitterelemente und somit die mechanischen Eigenschaften [Pyka12].

A.39 Katalog: r. Datenprozesse der additiven Fertigung



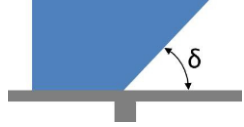
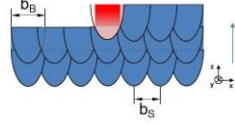
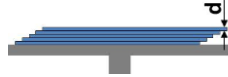
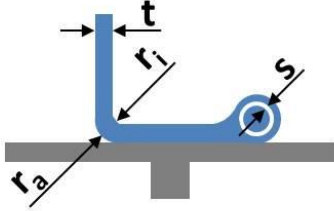
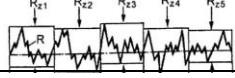
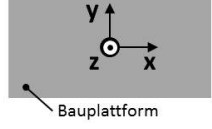
A.40 Katalog: s. Ökologische Betrachtungen der additiven Fertigung

| Ökologische Betrachtungen der additiven Fertigung | | | | |
|--|----------------------|-----------|---|---|
| <p>Die Betrachtung der ökologischen Auswirkungen additiver Fertigungsverfahren und ihrer Nutzungen kann auf vielfältige Weise geschehen und ist stark vom jeweiligen Anwendungsfall, dem Fertigungsverfahren und dem verwendeten Material abhängig. Oft werden in die Betrachtung nur reduzierte Transportwege und Lieferketten einbezogen und diese in einer Argumentation für AM angeführt. Für fundierte Aussagen sind allerdings ganzheitliche Lebenszyklusanalysen erforderlich.</p> <p>Auch in additiven Fertigungsanlagen sind prinzipiell biobasierte und bioabbaubare Kunststoffe verarbeitbar, ihr Marktanteil ist aber gering. Probleme ergeben sich durch Multimaterialbauteile beim Recycling und erfordern ein eindeutiges Labeling. [Ökoinstitut13]</p> | | | | |
| <p style="text-align: right;">nach [Endres09]</p> | | | | |
| <p>Pulverbettverfahren verbrauchen viel Energie für die Inertisierung und das Aufwärmen und Abkühlen des Bauraums. Der Energieverbrauch ist also anlagenabhängig und die Bauraumgröße muss für die Energiebetrachtung bekannt sein. Einige Werte aus Energiebetrachtungen sind in der Abbildung unten gegenübergestellt, wobei die Vorgehensweisen zur Ermittlung und auch die eingeschlossenen energieumwandelnden Prozesse sich zwischen den Studien unterscheiden. Gleiche AM-Verfahrensprinzipien sind durch gleiche Farben gekennzeichnet.</p> | | | | |
| Untersuchung | Material | Verfahren | Energieverbrauch in [kWh/kg] (Untergrenze der Untersuchung) | Vorgehen |
| [Luo99] | Kunststoff (EP) | SL | 20,70 | Energieverbrauch nicht empirisch gemessen |
| | Kunststoff (Polymer) | LS | 29,83 | |
| | Kunststoff (ABS) | FDM | 23,08 | |
| [Mognol06] | Kunststoff | 3DP | 232,00 | Einzelbauteil in verschiedenen Orientierungen |
| | Kunststoff | FDM | 54,00 | |
| | Metall | LBM | 509,00 | |
| [Sreenivasan09] | Kunststoff (PA12) | LS | 14,50 | Einzelmessung, keine empirischen Ergebnisse |
| [Kellens10] | Kunststoff (Polymer) | LS | 36,04 | Experiment mit voller Bauraumausnutzung |
| | Kunststoff | LBM | 26,89 | |
| [Baumers11a] | Kunststoff (PA12) | LBM | 56,75 | Experiment, das versucht Energieverbrauch aufzuteilen |
| | Kunststoff (PA12) | EBM | 66,02 | |
| [Baumers11b] | Metall (Titan) | EBM | 16,94 | verschiedene Anlagen bzgl. Bauraumkapazität und verschiedene Materialien untersucht |
| | Metall (1.4404) | LBM | 23,06 | |
| | Metall (1.4404) | LBM | 117,50 | |
| | Metall (1.4542) | LBM | 66,94 | |
| | Kunststoff (PA12) | LS | 29,72 | |
| | Kunststoff (PC) | FDM | 144,17 | |
| [Morrow05] | Metall (1.2344) | LMD | 2141,00 | inkl. 2-phasiges Spannungsarmglühen |

A.41 Katalog: t. Dienstleister additive Fertigung

| Dienstleister additive Fertigung | | |
|--|--|---|
| <p>Hier findet sich eine Auswahl von Anbietern additiver Fertigungstechnologien als Dienstleistung. Die Webseiten der Anbieter bieten im Allgemeinen die Möglichkeit eine Bauteildatei hochzuladen und direkt eine Preisauskunft für unterschiedliche Verfahrens- und Materialkombinationen zu erhalten.</p> | | |
| Name | Internetadresse | Angebotene Verfahren/ Anmerkung |
| 3D Fab | http://3dfab.net | Laser-Sintern (LS) Fused Layer Modelling (FLM) Werkstoffauftrag (PJM) 3D-Drucken (3DP) |
| 3YOURMIND GmbH | https://www.3yourmind.com/de/marktplatz Link | Laser-Sintern (LS) Laser-Strahlschmelzen (LBM) Elektronen-Strahlschmelzen (EBM) Stereolithographie (SL) Fused Layer Modelling (FLM) Werkstoffauftrag (PJM) 3D-Drucken (3DP) |
| AnyShape | http://anyshape.de/index.html Link | Standort: Universität Stuttgart, IFB Laser-Sintern (LS) Fused Layer Modelling (FLM) |
| Hasenauer-Hesser GmbH | https://www.hasenauer-hesser.de/ Link | Laser-Sintern (LS) |
| Initial (Prodways) | https://www.initial.fr/de/ Link | Laser-Sintern (LS) Elektronen-Strahlschmelzen (EBM) Stereolithographie (SL) Fused Layer Modelling (FLM) Werkstoffauftrag (PJM) Gerichtete Energieeinbringung |
| JOMATIK | http://jomatik.de/ Link | Laser-Sintern (LS) |
| Kegelmann Technik GmbH | http://www.ktechnik.de/ Link | Laser-Sintern (LS) Laser-Strahlschmelzen (LBM) Stereolithographie (SL) |
| Krause DiMaTec GmbH | http://www.krause-dimatec.de/ Link | Laser-Sintern (LS) Laser-Strahlschmelzen (LBM) Stereolithographie (SL) Fused Layer Modelling (FLM) |
| LMD GmbH und Co. KG aA | https://www.lmd-innovation.de/ Link | Laser-Sintern (LS) |
| Materialise GmbH | https://www.materialise.com/de/manufacturing/materialise-onsite Link | Laser-Sintern (LS) Laser-Strahlschmelzen (LBM) Stereolithographie (SL) Fused Layer Modelling (FLM) Werkstoffauftrag (PJM) 3D-Drucken (3DP) |
| Protiq | https://www.protiq.com/ Link | Laser-Sintern (LS) Laser-Strahlschmelzen (LBM) Stereolithographie (SL) Werkstoffauftrag (PJM/MJM) Keramik 3D-Druck (Lithographiebasiert) |
| Proto Labs GmbH | https://www.protolabs.de/services/3d-druck/ Link | Laser-Sintern (LS) Laser-Strahlschmelzen (LBM) Stereolithographie (SL) Werkstoffauftrag (MJM/PJM) 3D-Drucken (3DP) |
| rapidobject | https://www.rapidobject.com/ Link | Laser-Sintern (LS) Laser-Strahlschmelzen (LBM) Stereolithographie (SL) Fused Layer Modelling (FLM) Werkstoffauftrag (PJM) 3D-Drucken (3DP) |
| Steinbach AG | https://www.steinbach-ag.de/de/technical-ceramics.html Link | Laser-Strahlschmelzen (LBM) Keramik 3D-Druck (Lithographiebasiert) |

A.42 Katalog: u. Konventionen und geometrische Grundlagen

| Konventionen und geometrische Grundlagen | | | |
|--|---------------|-------------------------------------|---|
| Symbol | Einheit | Beschreibung | Grafik |
| α | $^{\circ}$ | Neigungswinkel zur Bauplattform |  |
| b | μm | Spurbreite b_s / Bahnbreite b_b |  |
| d | μm | Schichtdicke |  |
| L | mm | Länge | |
| t | mm | Wandstärke |  |
| r_a | mm | Außenradius | |
| r_i | mm | Innenradius | |
| s | mm | Spalt | |
| R_z bzw. R_a | μm | Rauheit |  |
| x, y, z | -- | Koordinatensystem in der Baukammer |  |

A.43 Katalog: Quellen

| Quellen | |
|----------------|--|
| Kurzform | Quellenangabe |
| [acatech16] | acatech- Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften: Additive Fertigung. München, 2016. |
| [additively] | Additively Ltd. (Additively AG): www.additively.com |
| [Adam15] | Adam, Guido A. O.: Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modelling. Dissertation, Universität Paderborn, 2015. |
| [Adam17] | Adam, Guido: Materialdaten (1. VDI-Strategiekongress !! Additive Manufacturing !!). Stuttgart, 22.03.2017 |
| [Adams11] | Adams, J.J.; et al.: Conformal Printing of Electrically Small Antennas on Three-Dimensional Surfaces. In: Advanced Materials 2011, 23, 1335–1340 |
| [Ahlgrimm17] | Ahlgrimm, Lasse: Verbesserung der Strukturoptimierung für additiv hergestellte Bauteile. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Masterarbeit, 2017. |
| [Baumers11a] | Baumers, M.; Tuck, C.; Bourell, D. L.; Sreenivasan, R.; Hague, R.: Sustainability of additive manufacturing: Measuring the energy consumption of the laser sintering process. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 225 (2011), Nr. 12, S. 2228–2239. |
| [Baumers11b] | Baumers, Martin; Tuck, Christopher; Wildman, Ricky; Ashcroft, Ian; Hague, Richard: Energy inputs to additive manufacturing: Does capacity utilization matter? In: 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011 (2011) |
| [Binz17] | Binz, Hansgeorg: Konstruktionslehre I : Umdruck zur Vorlesung. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Skript, 2017. |
| [Bracket11] | Brackett, D. ; Ashcroft, I. ; Hague, R.: Topology optimization for additive manufacturing: Topology optimization for additive manufacturing. 2011 |
| [Breuninger13] | Breuninger J.; Becker R.; Wolf A.; Rommel S.; Verl A.: Generative Fertigung mit Kunststoffen – Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern. Berlin, Heidelberg: Springer 2013 |
| [Capel13] | Capel, A.J.; et al.: Design and additive manufacture for flow chemistry. In: Lab on a Chip, 2013, 13, S. 4583–4590. |
| [Carrico15] | Carrico, J.D.; et al.: Fused filament 3D printing of ionic polymer-metal composites (IPMCs). In: Smart Materials and Structures 24 (2015) 125021 (11pp) |
| [Chen16] | Chen, Tian; Mueller, Jochen; Shea, Kristina: Design and Fabrication of a Bistable Unit Actuator With Multi-Material Additive Manufacturing. In: 2016 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, SFF Symp 2016, 2016. |
| [Cooper12] | Cooper, D.E.; et al.: Additive Manufacturing for product improvement at Red Bull Technology. In: Materials and Design 41 (2012), S. 226–230. |
| [Cooper15] | Cooper, D.; et al.: Design and manufacture of high performance hollow engine valves by Additive Layer Manufacturing. In: Materials and Design 69, (2015), S. 44–55 |
| [CRT Erlangen] | Enzenberger, F.: Tailor-made reactors made by additive manufacturing. URL: www.crt.cbi.uni-erlangen.de/.../handout_tailor-made_rectors.pdf |
| [Curdy16] | Curdy, R.; et al.: Printable Hydraulics: A Method for Fabricating Robots by 3D Co-Printing Solids and Liquids. In. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016 |

| | |
|--------------------|---|
| [Dede15] | Dede, E.M.; et al.: Topology Optimization, Additive Layer Manufacturing, and Experimental Testing of an Air-Cooled Heat Sink. In: Journal of Mechanical Design 2015, 137, S. 1–9. |
| [Deffenbaugh13] | Deffenbaugh, P.; et al.: Fully 3D Printed 2.4 GHz Bluetooth/Wi-Fi Antenna, 2013. |
| [DIN EN ISO 286-1] | DIN EN ISO 286 Blatt 1. 2010. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - ISO-Toleranzsystem für Längenmaße. Berlin: Beuth Verlag GmbH. |
| [Dragone13] | Dragone, V.; et al.: 3D-printed devices for continuous-flow organic chemistry. In: Beilstein Journal of Organic Chemistry, 9, 2013, S. 951–959 |
| [Endres09] | Endres, H.-J.; Siebert-Raths, A.: Technische Biopolymere: Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Hanser, Carl, 2009. |
| [Ehrlenspiel17] | Ehrlenspiel, Klaus; Meerkamm, Harald: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag GmbH |
| [EOS] | N.N.: Konstruktionsgrundlagen für das Laser-Sinter-Verfahren. EOS GmbH, Firmenschrift, 2012 |
| [Erhard08] | Erhard Gunter: Konstruieren mit Kunststoff. München: Carl Hanser Verlag, 2008. |
| [Fritz15] | Fritz, A. Herbert; Schulze, Günter: Fertigungstechnik. 11., neu bearbeitete und ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015. |
| [Furumoto15] | Furumoto, T.; et al.: Permeability and strength of a porous metal structure fabricated by additive manufacturing. In: Journal of Materials Processing Technology 219, 2015, S. 10–16 |
| [Gaynor15] | Gaynor, Andrew Thomas: Topology Optimization Algorithms for Additive Manufacturing. Baltimore, Maryland, Johns Hopkins University, Dissertation, Februar 2015. |
| [Gebhardt13] | Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren : additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping, Tooling, Produktion. 4. Aufl. München : Hanser, 2013. |
| [Gebhardt16] | Gebhardt, Andreas; Hötter, Jan-Steffen: Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Munich, Cincinnati: Hanser Publishers; Hanser Publications, 2016. |
| [Gerber08] | Gerber, G.F.; Barnard, L.J.: Designing for Laser Sintering. In: Journal for New Generation Sciences: Volume 6 Number 2, 2008, S. 47–59 |
| [Gibson15] | Gibson, Ian; Rosen, David; Stucker, Brent: Additive Manufacturing Technologies. New York, NY: Springer New York, 2015. |
| [Govett12] | Govett, T.; Kim, K.; Lundin, M.; Pinero, D.: Design Rules for Selective Laser Sintering. University of Texas at Austin, 2012 |
| [Hetzer16] | Hetzer, D.: Leitung von Energie über statische, lösbare, kombiniert reib- und formschlüssige Verbindungen mittels additiv hergestellter Strukturen. Masterarbeit, IKTD Universität Stuttgart, 2016 |
| [Hitzler17] | Hitzler, Leonhard; Janousch, Christoph; Schanz, Jochen; Merkel, Markus; Heine, Burkhard; Mack, Florian; Hall, Wayne; Öchsner, Andreas: Direction and location dependency of selective laser melted AISi10Mg specimens. In: Journal of Materials Processing Technology 243 (2017), S. 48–61. |
| [Ishiguro14] | Ishiguro, Y.; Poupyrev, I.: 3D Printed Interactive Speakers, 2014. |
| [Kellens10] | Kellens, Karel; Dewulf, Wim; Deprez, W.; Yasa, Evren; Duflou, Joost: Environmental analysis of SLM and SLS manufacturing processes. In: Proceedings of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE2010) (2010) |
| [Kim10] | Kim, M.; et al.: Direct Metal Printing of 3D Electrical Circuit using Rapid Prototyping. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING Vol. 10, No. 5, S. 147–150. |
| [Kitson13] | Kitson, P.J.; et al.: Combining 3D printing and liquid handling to produce user-friendly reactionware for chemical synthesis and purification. In: Chemical Science, 2013, 4, S. 3099–3103. |

| | |
|-------------------|---|
| [Klahn15] | Klahn, C.: Laseradditiv gefertigte, luftdurchlässige Mesostrukturen : Herstellung und Eigenschaften für die Anwendung. Berlin: Springer Vieweg, 2015. |
| [Klahn16] | Klahn, C.; Singer, D.; Meboldt, M.: Design Guidelines for Additive Manufactured Snap-Fit Joints. In: Proceedings of the 26th CIRP Design Conference 2016, S. 264–269 |
| [Klahn16] | Klahn, Christoph; Singer, Daniel; Meboldt, Mirko: Design Guidelines for Additive Manufactured Snap-Fit Joints. In: Procedia CIRP 50 (2016), S. 264–269. |
| [Kloppenburger17] | Kloppenburger, G., et al.: Additive Fertigung transparenter Optiken. In: Lachmayer, R.; et al. (Hrsg.): Additive Manufacturing Quantifiziert. Berlin: Springer, 2017 |
| [Ko07] | Ko, S.; et al.: All-inkjet-printed flexible electronics fabrication on a polymer substrate by low-temperature high-resolution selective laser sintering of metal nanoparticles. In: Nanotechnology 18 (2007) 345202 |
| [Kong14] | Kong, Y.L.; et al.: 3D Printed Quantum Dot Light-Emitting Diodes. In: Nano Letters 2014, 14, S. 7017–7023. |
| [Kranz15] | Kranz, J.; Herzog, D.; Emmelmann, C.: Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. In: Journal of Laser Applications, Heft 27, 2015, S14001. |
| [Künneke17] | Künneke, T.; Zimmer, D.: Funktionsintegration additiv gefertigter Dämpfungsstrukturen bei Biegeschwingungen. In: Richard, H.A.; et al. (Hrsg.): Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen. Wiesbaden: Springer, 2017 |
| [Lachmayer17] | Lachmayer, Roland; Lippert, Rene Bastian: Additive Manufacturing Quantifiziert. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. |
| [Langelaar17] | Langelaar, Matthijs: An additive manufacturing filter for topology optimization of print-ready designs. In: Structural and Multidisciplinary Optimization 55 (2017), Nr. 3, S. 871–883. |
| [LBCEngineering] | LBC Engineering bzw. Renishaw GmbH: Präsentation Innovative Werkzeugtemperierung. URL: http://www.lbc-engineering.de/upload/lbc-engineering-wzb-2014-03.pdf |
| [Leigh12] | Leigh, S.J.; et al.: A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors. In: PLOS ONE, 2012 Volume 7 Issue 11 |
| [Lieneke15] | Lieneke, T.; Adam, G. A. O.; Leuders, S.; Knoop, F.; Josupeit, S.; Delfs, P.; Funke, N.; Zimmer, D.: Systematical Determination of Tolerances for Additive Manufacturing by Measuring Linear Dimensions. In: 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, USA (2015), S. 371–384. |
| [Lieneke16] | Lieneke, Tobias; Denzer, Vera; Adam, Guido A.O.; Zimmer, Detmar: Dimensional Tolerances for Additive Manufacturing: Experimental Investigation for Fused Deposition Modeling. In: Procedia CIRP 43 (2016), S. 286–291. |
| [Luo99] | Luo, Yanchun; Ji, Zhiming; Leu, M. C.; Caudill, R.: Environmental performance analysis of solid freedom fabrication processes. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No.99CH36357): IEEE, 1999, S. 1–6. |
| [Mattheck06] | Mattheck, Claus: Verborgene Gestaltgesetze der Natur: Optimalformen ohne Computer. 1. Aufl. Eggenstein-Leopoldshafen: Forschungszentrum Karlsruhe, 2006. |
| [Menge17] | Menge, D.; et al.: Herstellbarkeit und mechanische Charakterisierung von lasergesinteren Gitterstrukturen. In: Richard, H.A.; et al. (Hrsg.): Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 105–120. |
| [Meiners99] | Meiners, W.: Direktes selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. Als Manuskript gedruckt. Aachen: Shaker, 1999. |
| [Meisel14] | Meisel, N.; et al.: A procedure for creating actuated joints via embedding shape memory alloys in PolyJet 3D printing. In: Journal of Intelligent Material Systems and Structures 2015, Vol. 26(12) S. 1498–1512 |
| [Mognol06] | Mognol, Pascal; Lepicart, Denis; Perry, Nicolas: Rapid prototyping: Energy and environment in the spotlight. In: Rapid Prototyping Journal 12 (2006), Nr. 1, S. 26–34. |

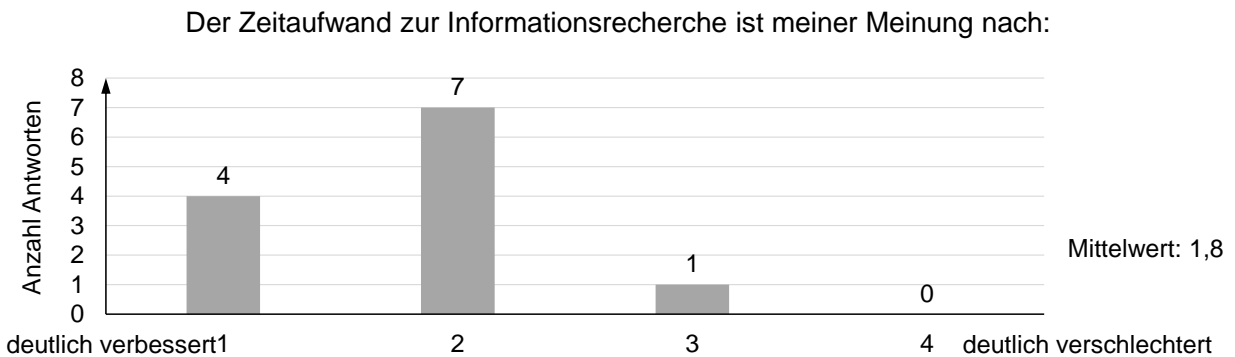
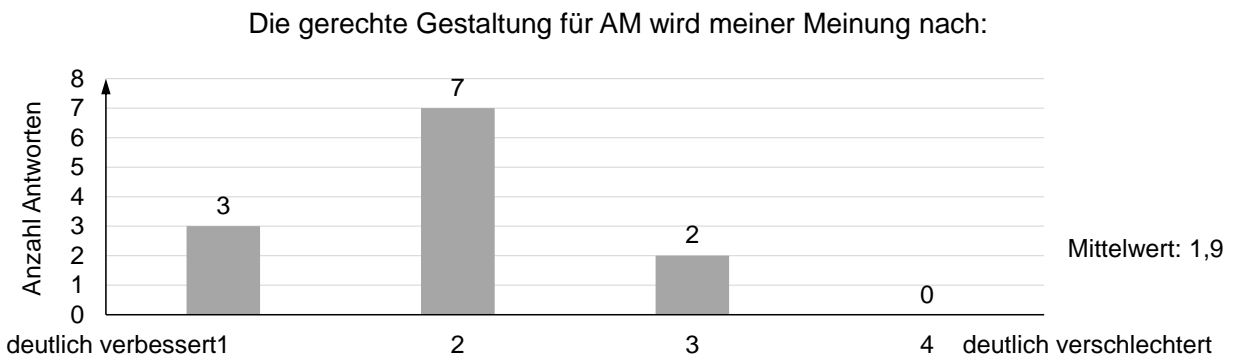
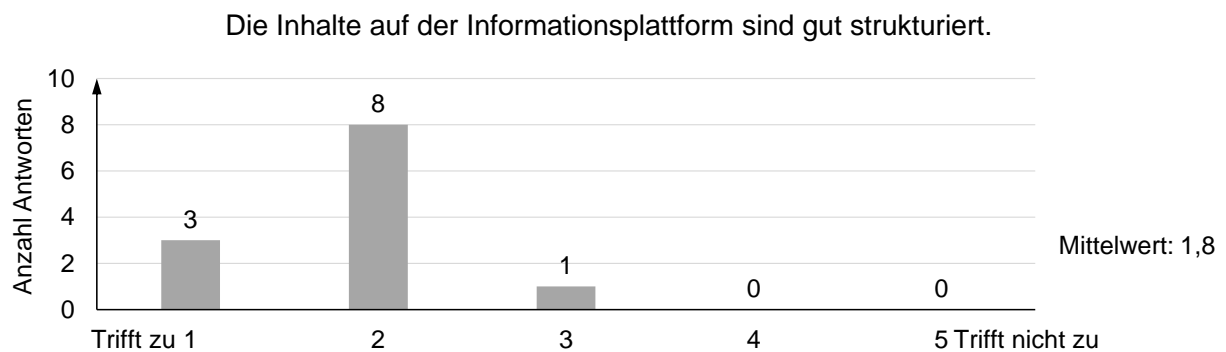
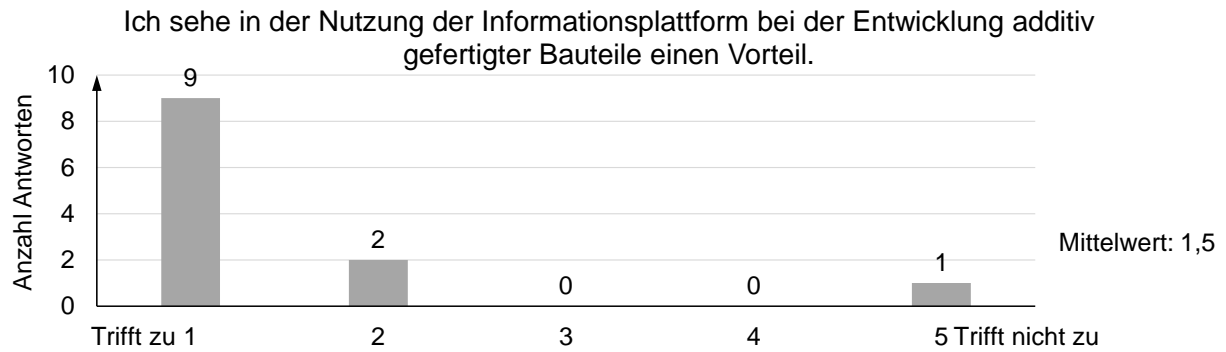
| | |
|-----------------|--|
| [Morrow05] | Morrow, W. R.; Qi, H.; Kim, I.; Mazumder, J.; Skerlos, S. J.: Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. In: Journal of Cleaner Production 15 (2005), Nr. 10, S. 932–943. |
| [Muth14] | Muth, J.T.; et al.: Embedded 3D Printing of Strain Sensors within Highly Stretchable Elastomers. In: Advanced Materials, 2014, 26, S. 6307–6312. |
| [Nayeri14] | Nayeri, P.; et al.: 3D Printed Dielectric Reflectarrays: Low-Cost High-Gain Antennas at Sub-Millimeter Waves. In: IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 62, NO. 4, APRIL 2014, S. 2000-2008 |
| [Neugebauer11] | Neugebauer, R.; et al.: Additive manufacturing boosts efficiency of heat transfer components. In: Assembly Automation, Vol. 31, No. 4, 2011, S. 344-347. |
| [Noviello16] | Noviello, D.: Understanding the Mechanical Properties of Additively Manufactured Lattice Structures with Testing and Simulation. Autodesk University, 2016. |
| [OConnor15] | OConnor, J.; et al.: A comparison between the hydrodynamic characteristics of 3D-printed polymer and etched silicon microchannels. In: Microfluid Nanofluid, 2015, 19, S. 385–394 |
| [Ökoinstitut13] | Dr. Hartmut Stahl: 3D Printing – Risks and Opportunities.; Öko-Institut e.V.; URL www.oeko.de; Darmstadt, 5 December 2013 |
| [Pyka12] | Pyka, G.; et.al.: Surface Modification of Ti6Al4V Open Porous Structures Produced by Additive Manufacturing. In: ADVANCED ENGINEERING MATERIALS |
| [Richard17] | Richard, Hans Albert; Schramm, Britta; Zipsner, Thomas: Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. |
| [Roth00] | Roth, Karlheinz: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band II Konstruktionskataloge. 3., wesentlich erw. Aufl. Berlin: Springer, 2000. |
| [Salvo11] | Salvo, P.; et al.: A 3D printed dry electrode for ECG/EEG recording. In: Sensors and Actuators A 174 (2012), S. 96–102 |
| [Schäfer08] | Schäfer R.: Design Guidelines for Rapid Prototyping – Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien für ein fertigungsgerechtes Gestalten anhand des Fused Deposition Modeling. Bremen, Hochschule, Master Thesis, 2008 |
| [Siemann07] | Siemann, E.: Selektives Lasersintern von porösen Entlüftungsstrukturen am Beispiel des Formenbaus. In: IMW - Institutsmitteilung Nr. 32, 2007, S. 65–70. |
| [Shemelya13] | Shemelya, C.: 3D Printed Capacitive Sensors. University of Texas at El Paso, 2013. |
| [Sreenivasan09] | Sreenivasan, Rameshwar; Bourell, David: Sustainability Study in Selective Laser Sintering – An Energy Perspective. In: Proceedings of the 20th Solid Freeform Fabrication Symposium (2009) |
| [Seepersad14] | Seepersad, C.C.; Govett, T.; Kim, K.; et. al.: A Designers Guideline for Dimensioning and Tolerancing SLS Parts. In: Proceedings of the University of Austin, Texas, 2014, S. 921–931 |
| [Skrzypacz14] | Skrzypacz, J.: Investigating the impact of multi-piped impellers design on the efficiency of rotodynamic pumps operating at ultra-low specific speed. In: Chemical Engineering and Processing 86, 2014, S. 145–152 |
| [Sun13] | Sun, K.; et al.: 3D Printing of Interdigitated Li-Ion Microbattery Architectures. In: Advanced Materials 2013, 25, S. 4539–4543. |
| [Taube17] | Taube, A.; et.al.: Numerische und mechanische Untersuchung additiv gefertigter TiAl6V4 Gitterstrukturen. In: Richard, H.A.; et.al. (Hrsg.): Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 201–214. |
| [Thomas09] | Thomas, D.: The Development of Design Rules for Selective Laser Melting. Dissertation, University of Wales, 2009. |
| [Tsai15] | Tsai, M.; Ku, L.: 3-D Printing-Based Design of Axial Flux Magnetic Gear for High Torque Density. In: IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 51, NO. 11, NOVEMBER 2015 |

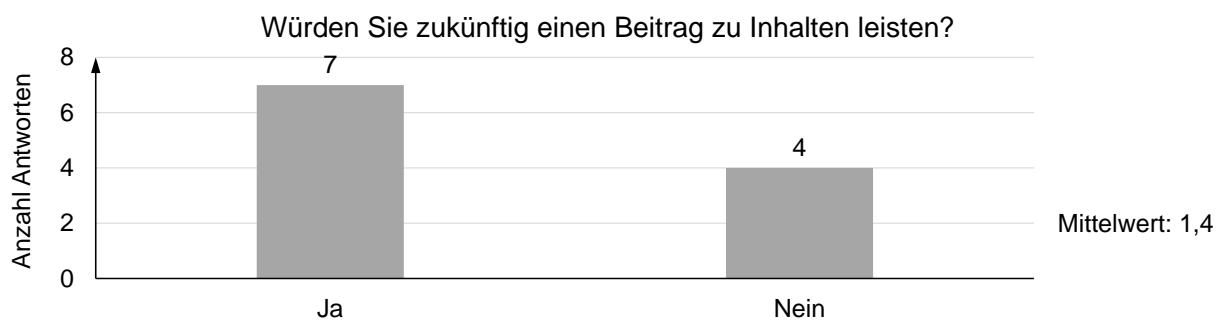
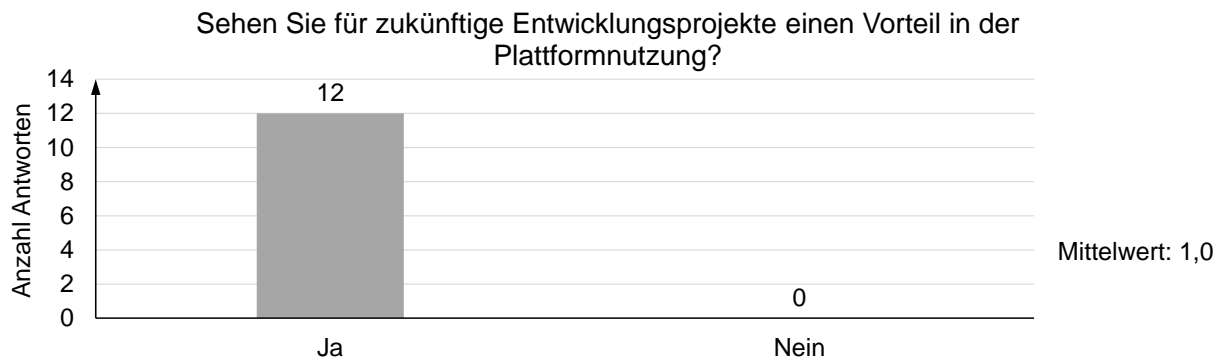
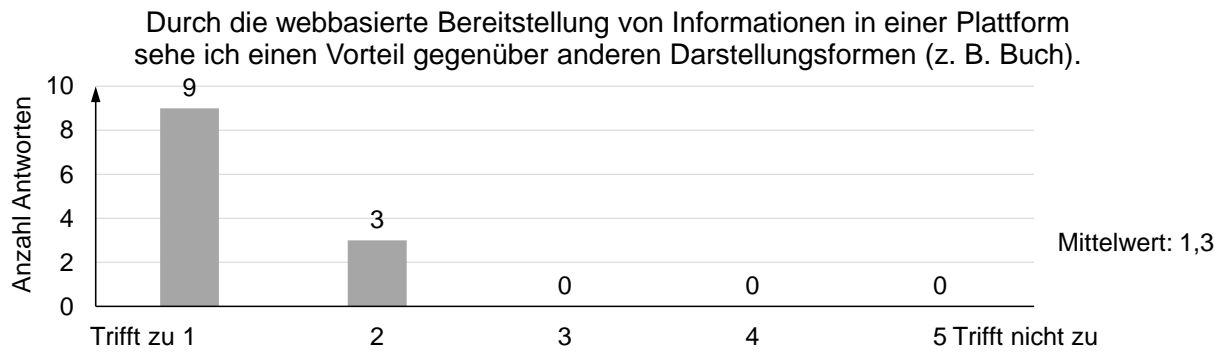
| | |
|----------------|---|
| [VDI2221] | VDI-Richtlinie 2221, Mai 1993. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth Verlag GmbH. |
| [VDI3405-2] | VDI-Richtlinie 3405 Blatt 2 August 2013. Additive Fertigungsverfahren - Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung. Berlin: Beuth Verlag GmbH. |
| [VDI3405-3] | VDI-Richtlinien 3405, Blatt 3, Dezember 2015: Additive Fertigungsverfahren - Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen. Berlin: Beuth Verlag GmbH. |
| [Wegner12] | Wegner A.; Witt G.: Konstruktionsregeln für das Lasersintern. In: Zeitschrift Kunststofftechnik 8 (2012), S. 253–277 |
| [Weidenbach17] | Weidenbach, M.; et al.: 3D-gedruckte quasioptische Bauelemente für den Terahertz-Frequenzbereich. In: Lachmayer, R.; et al. (Hrsg.): Additive Manufacturing Quantifiziert. Berlin: Springer-Vieweg, 2017. |
| [Weiss15] | Weiss, Florian; Binz, Hansgeorg; Roth, Daniel: Approach to consider rapid manufacturing in the early phases of product development. In: Weber, Christian; Husung, Stephan; Cascini, Gaetano; Cantamessa, Marco; Marjanovic, Dorian; Rotini, Federico (Hrsg.): Design for life: The 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15); 27th - 30th July 2015, Politecnico di Milano, Italy. Glasgow: Design Society, 2015. |
| [Weiss17] | Weiss, Florian; Ahlgrimm, Lasse; Binz, Hansgeorg; Roth, Daniel: Prozess zur computergestützten Anpassung AM-gerechter Lösungsprinzipien an produktspezifische Randbedingungen. In: Binz, Hansgeorg; Bertsche, Bernd; Bauer, Wilhelm; Spath, Dieter; Roth, Daniel (Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017 : Stuttgart, 29. Juni 2017, Wissenschaftliche Konferenz. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 2017. |
| [Weiss18] | Weiss, Florian; Garrelts, Enno; Roth, Daniel; Binz, Hansgeorg; Brunetti, Mara; Karcher, Thomas: Konstruktionsrestriktionen für das Indirect Tooling mit FDM und Feinguss. In: Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 2018 |
| [Willis12] | Willis, K.D.D.; et al.: Printed Optics: 3D Printing of Embedded Optical Elements for Interactive Devices, 2012. |
| [Wits13] | Wits, W.W.; et al.: Metal additive manufacturing of a high-pressure micro-pump. In: Procedia CIRP 7, 2013, S. 252–257 |
| [Wong08] | Wong, M.; et al.: Convective heat transfer and pressure losses across novel heat sinks fabricated by Selective Laser Melting. In: International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 2009, S. 281–288. |
| [Wong16] | Wong, K.K.; et al.: Fabrication of heat sinks by Selective Laser Melting for convective heat transfer applications. In: Virtual and Physical Prototyping, 11:3, 2016, S. 159–165. |
| [Yan12] | Yan, C.; et al.: Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture 62 (2012) S. 32–38. |
| [Zhao14] | Zhao, C.; et al.: Three dimensional (3D) printed electrodes for interdigitated supercapacitors. In: Electrochemistry Communications 2014, 41, S. 20–23. |
| [Zhu16] | Zhu, C.; et al.: Supercapacitors Based on Three-Dimensional Hierarchical Graphene Aerogels with Periodic Macropores. In: Nano Letters 2016, 16, S. 3448–3456 |

A.44 Verteilungstests der informationsgruppenbezogenen Zugriffe

| <u>Kolmogorov-Smirnov-Tests mit Signifikanzniveau (α) 0,05</u> | | | | | | | | | | |
|--|----------------|------------------------------------|--------------------------|----------------|----------------|--------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------|--|
| Verteilung: Informationsgruppe | Studierende | | | Mitarbeiter | | | Studierende und Mitarbeiter | | | |
| | Normalverteilt | Gleichverteilt | Exponential- verteilt | Normalverteilt | Gleichverteilt | Exponential- verteilt | Normalverteilt | Gleichverteilt | Exponential- verteilt | |
| k. Lösungsprinzipien nach allgemeinen Funktionen | - | - | + | + | + | + | - | - | + | |
| Kurzbeschreibung Informationsplattform | - | - | + | + | + | + | - | - | - | |
| d. Additive Fertigungsverfahren | + | + | + | + | + | + | + | + | - | |
| l. Konstruktionsrestriktionen | - | - | + | + | + | + | + | - | - | |
| p. Werkstoffe und deren Eigenschaften | + | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| h. Checkliste AM-gerechte Gestaltung | - | - | + | + | - | + | - | - | + | |
| a. Allgemeine Grundlagen additiver Fertigungstechnologien | - | - | + | - | - | + | - | - | + | |
| c. Funktionsintegration / Bauteilintegration | - | - | + | + | + | + | - | - | + | |
| g. Checkliste zweckmäßiger (wirtschaftlicher) Einsatz | + | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| i. Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens | + | + | + | - | - | + | - | + | + | |
| j. Bauteilorientierung im Bauraum der Fertigungsanlage | - | - | + | + | - | + | - | - | + | |
| b. Oberflächen und Fertigungsgenauigkeiten | + | + | + | + | + | + | - | - | + | |
| o. Produktindividualisierung / -personalisierung | - | - | + | + | + | + | - | - | + | |
| n. Vorgehen Topologieoptimierung | + | + | + | + | + | + | - | + | + | |
| f. Entwicklungskosten und Entwicklungszeiten | + | + | + | - | + | + | + | + | + | |
| e. Indirekte Fertigungsprozessketten mit AM | + | + | + | - | - | + | + | + | + | |
| q. Nachbearbeitung (Post-processing) | + | + | + | + | + | + | - | + | + | |
| m. Softwareanwendung Bauteiloptimierung / Fertigungsoptimierung | + | + | + | - | + | + | + | + | + | |
| u. Konventionen und geometrische Grundlagen | + | + | + | - | + | + | + | + | + | |
| Quellen | + | + | + | - | - | + | + | + | + | |
| t. Dienstleister additive Fertigung | - | - | + | - | + | + | - | - | + | |
| r. Datenprozesse der additiven Fertigung | + | + | + | - | + | + | + | + | + | |
| s. Ökologische Betrachtungen | + | + | + | - | + | + | + | + | + | |
| Nullhypothese: Die Daten entsprechen der jeweiligen Verteilung | Legende: | | | | | | | | | |
| | - | Die Nullhypothese wird abgelehnt | | | | | | | | |
| | + | Die Nullhypothese wird beibehalten | | | | | | | | |

A.45 Ergebnisse der Evaluation der zeitlichen Informationsunterstützung aus Kapitel 6.2





ISBN-13: 978-3-946924-11-1