

Die zunehmende Globalisierung ist ein treibender Faktor für technologischen Fortschritt und Innovationen. Hierdurch ergeben sich stetig Möglichkeiten zur Erschließung neuer Märkte bei sich gleichzeitig entwickelnder Konkurrenz. Um die Beständigkeit und Wirtschaftlichkeit auf den Märkten zu gewährleisten, sind kontinuierliche technologische Neuentwicklungen sowie Alleinstellungsmerkmale unabdingbar. Diese tragen zu innovativen Lösungsansätzen in unterschiedlichen Technologiefeldern bei.

Eine schon lange bestehende Technologie im Bereich der Fertigungsprozesse ist die Additive Fertigung (AF), oft auch unter dem Synonym 3D-Druck zusammengefasst. Hierbei handelt es sich nicht um die klassischen subtraktiven, das heißt abtragenden Fertigungsprozesse wie Drehen, Fräsen, Gießen oder Schmieden, sondern um Schichtbauverfahren, die durch das Auftragen von Material die Herstellung komplexer Geometrien und innerer Strukturen ermöglichen. Die Additive Fertigung soll zukünftig eine wichtige Rolle als Schlüsseltechnologie einnehmen, insbesondere im Zusammenhang mit Industrie 4.0 und einer zunehmend individualisierten Produktion.

Um die Potenziale dieser Fertigungstechnologie vollständig auszuschöpfen, bedarf es eines tiefgründigen Wissens über die gesamte Prozesskette, von der Vor- und Nachbearbeitung, über die Fertigung, das Datenhandling und die verfügbaren Materialien und Maschinen.

Das Zusammenwirken verschiedener Einflussfaktoren spielt eine besonders große Rolle bei der Entstehung qualitativ hochwertiger und additiv gefertigter Bauteile. Den Grundstein liefern virtuelle, dreidimensionale, rechnerunterstützte Modelle, aus denen die physischen Bauteile generiert werden. Der Umgang mit 3D-Konstruktionsprogrammen und die Erstellung von 3D-Modellen sind somit die Voraussetzung zur eigenständigen Anwendung der additiven Fertigungstechnologien.

Aktuell verfügbare Softwareanwendungen zur Erstellung dreidimensionaler Modelle haben oftmals eine Schwäche. So können zum Beispiel wichtige Informationen wie die Zuordnung von Materialeigenschaften oder die Festkörpersimulation mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) nicht dargestellt beziehungsweise

umgesetzt werden. Zusätzliche Softwarelösungen müssen angewendet werden, die wiederum die 3D-Daten anders interpretieren und Kompatibilitätsprobleme zur Folge haben. Es kommt zu enormen Zeitverlusten, weil die virtuellen AF-Modelle angepasst werden müssen, zu einer nutzerunfreundlichen Handhabung und zu großen Fehlerquellen. Eine Automatisierung der additiven Prozessketten, die besonders aus industrieller Sicht unabdingbar ist, kann dadurch nicht oder nur schwer realisiert werden. Ein Lösungsansatz könnte durch integrierte Softwarelösungen geschaffen werden, um die Additive Fertigung im Rahmen einer automatisierten Serienproduktion einsetzen zu können.

Für den intuitiven Umgang mit Modellierungswerkzeugen werden Ansätze wie die generative Modellierung beforscht und sind zum Teil bereits auf dem Markt erhältlich. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass intuitivere Mensch-Computer-Schnittstellen notwendig sind, um es privaten Nutzern zu ermöglichen, 3D-Modelle für den 3D-Druck zu konstruieren oder anzupassen. Obwohl die Mehrzahl der privaten Anwender den Umgang mit IT gewohnt ist, stellt sie der Umgang mit 3D-Daten vor eine große Herausforderung – insbesondere, wenn es sich um technische Konstruktionen handelt.

Um die Potenziale der AF bestmöglich nutzen zu können, müssen Benutzerschnittstellen entwickelt und die Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen und Produkten vereinfacht werden. Dieses Buch leistet einen Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses im Umgang mit Designrichtlinien und Möglichkeiten zur Herstellung additiver Bauteile.

■ 1.1 Zielsetzung für das Buch

Dieses Buch zielt darauf ab, Einsteigern und Anwendern im Technologiefeld Additive Fertigung ein grundlegendes und zugleich detailliertes Fachwissen zur Gestaltung von Bauteilen zu liefern. Konstrukteuren und Anwendern fehlt es aktuell häufig an einem tiefgründigen Erfahrungsschatz zur Ausschöpfung der konstruktiven Potenziale von additiven Fertigungsverfahren. Daher richtet sich dieses Buch an all diejenigen, die sich für die hochtechnologischen Fertigungsverfahren, ihre Möglichkeiten und Grenzen bis hin zur optimalen und qualitativ anspruchsvollen Bauteilgestaltung interessieren.

Dabei greift das Buch besonders die folgenden Themenschwerpunkte auf:

- Einordnung der additiven Fertigungsverfahren und Übersicht
- Potenziale der Additiven Fertigung
- Entwicklung der Bauteilgestaltung und -auslegung
- Herausforderungen und Chancen für Konstrukteure

- Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)-Verfahren und die dadurch bedingte besondere Gestaltung von Bauteilen

Dieses Buch dient dazu, Leserinnen und Lesern die Designregeln der Additiven Fertigung und die zur Fertigung eines Qualitätsbauteils benötigten Parameter verständlich und einfach zu erläutern. Zu Beginn werden die additiven Fertigungsverfahren in den Gesamtkontext eingeordnet und anschließend deren Potenziale aufgezeigt. Neben der Entwicklung der Bauteilgestaltung sind die derzeitigen Herausforderungen für Konstrukteure ein wesentlicher Schwerpunkt dieses Buches. Die Besonderheit dieses Buches liegt darin, dass die laserbasierten Pulverbettverfahren zur Verarbeitung metallischer Werkstoffe in Abschnitt 3.2 „Materialien“ im Fokus liegen. Begründen lässt sich dies durch die steigende Entwicklung metallischer Produkte und der dazugehörigen Anlagen sowie der Tatsache, dass metallische Werkstoffe unter dem Gesichtspunkt der Produktgestaltung und den Potenzialen Leichtbau und Topologieoptimierung besser geeignet sind als kunststoffbasierte Werkstoffe.

Wie bei anderen Fertigungsverfahren gilt auch für die Additiven Verfahren, dass der Anwender bestimmte Konstruktionsregeln befolgen muss, um die Potenziale vollständig auszunutzen. Hierfür bedarf es jedoch eines grundlegenden Verständnisses über die Prozesstechnik, das Zusammenspiel von Anlagen und Materialien, der Möglichkeiten und Grenzen der Verfahren sowie der optimale Auslegung von Bauteilen in der Konstruktion. Dieses Grundverständnis soll anhand dieses Buches vermittelt werden.

Da dieses Arbeitsfeld verhältnismäßig jung ist und es sich noch in der Entwicklungsphase befindet, fehlt ein abgeschlossener Konstruktionsleitfaden, wie er für Gießen oder Fräsen vorliegt. Dennoch wurden bereits einige Designrichtlinien definiert, mit deren Hilfe die Fertigung und der Gebrauch von additiv gefertigten Bauteilen in optimaler Weise erfolgen können. Viele dieser Gestaltungsempfehlungen wurden durch Forschungsarbeiten entwickelt und im Rahmen von Abschlussarbeiten und Dissertationen veröffentlicht. Auf dieser Grundlage aufbauend haben verschiedene Gremien begonnen, Richtlinien und Normen zu erarbeiten. In Deutschland werden die Arbeiten vom VDI Fachausschuss FA 105 „Additive Manufacturing“ und dort vom Unterausschuss FA 105.3 „Additive Manufacturing – Konstruktionsempfehlungen“ vorangetrieben. Diese Ergebnisse sind durch das DIN an internationale Gremien weitergereicht worden, sodass bereits die deutsche VDI Richtlinie 3405 – Blatt 3 in den internationalen Normen DIN EN ISO 52911-1 und DIN EN ISO 52911-2, die momentan als Entwurf vorliegen, übernommen worden ist. Eine Besonderheit bei diesen Normen stellt die Tatsache dar, dass sie sowohl ISO- als auch ASTM-Normen sind und somit in beiden Geltungsbereichen gültig sind¹⁾.

¹⁾ (Weitere Informationen zu den Arbeiten des Fachausschusses 105 – Additive Manufacturing und den entsprechenden Unterausschüssen: <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/produktion-und-logistik/fachbereiche/produktionstechnik-und-fertigungsverfahren/fa105-fachausschuss-additive-manufacturing/>)

Dieses Buch trägt dazu bei, Haupteinflüsse und Besonderheiten, die sich bei der Konstruktion, Herstellung und dem zu verwendenden Material für additive Fertigungsverfahren erheblich von traditionellen Methoden unterscheiden, zu identifizieren und zu erörtern. Die Ausführungen sollen dem Leser und Anwender mögliche Probleme, die bei der Erstellung von qualitativ hochwertigen Bauteilen auftreten können, näherbringen. Die Ausführungen sind exemplarisch, erheben also keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

■ 1.2 Einordnung der additiven Fertigungsverfahren

Unter einem additiven Fertigungsverfahren (AF) versteht man einen automatisierten Prozess zur Herstellung maßstablicher dreidimensionaler physischer Objekte, die unmittelbar aus einem 3D-CAD-Datensatz (computer-aided design) generiert werden. Er basiert auf dem Schichtbauprinzip und benötigt keine bauteilabhängigen Werkzeuge wie beispielsweise einen Fräser oder Bohrer. Die Bauteile entstehen durch Auf- und Aneinanderfügen von Volumenelementen (sogenannten Voxeln). Ursprünglich wurde dieses Verfahren als „Rapid Prototyping“ bezeichnet, wie es auch heute noch häufig genannt wird. Zusammen mit den „Subtraktiven Fertigungsverfahren“, wie Fräsen oder Drehen, und den „Formativen Fertigungsverfahren“, wie Gießen oder Schmieden, stellen „additive Fertigungsverfahren“ die dritte Säule der gesamten Fertigungstechnologie dar [Bur1993].

Die Begriffe „Rapid Prototyping“ oder „Generative Herstellung“, die im Jahr 1987 entstanden, als die ersten Ansätze für „additive Fertigungsverfahren“ auf den Markt kamen, sind heute noch geläufig. Dennoch wurden in den folgenden Jahren viele abweichende Namen präsentiert und häufig weitere hinzugefügt (zum Beispiel Desktop Manufacturing, Freeform Manufacturing usw.). Obwohl jede der Bezeichnungen aus dem besonderen Blickwinkel der Erfinder als perfekt betrachtet wird, rufen viele von ihnen Verwirrung hervor. Dies ist oft einer der Gründe, warum sich besonders Neulinge in dem Technologiefeld der Additiven Fertigung schwer zurechtfinden.

Der englische Begriff zur deutschsprachigen Ausführung „additive Fertigungsverfahren“ ist Additive Manufacturing (abgekürzt und häufig genannt: AM). Dieser Begriff wurde von der internationalen Standardisierungsorganisation ASTM und ISO (ISO/ASTM Standards [ISO/ASTM 52900:2015]) wie folgt definiert: „Additive Manufacturing is a process of joining materials to make objects from three-dimensional (3D) model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies. As a new tool in the entrepreneurial toolbox, additive

Branche: Medizintechnik

Anwendungsbeispiel: Individualisierte Hüftpfanne

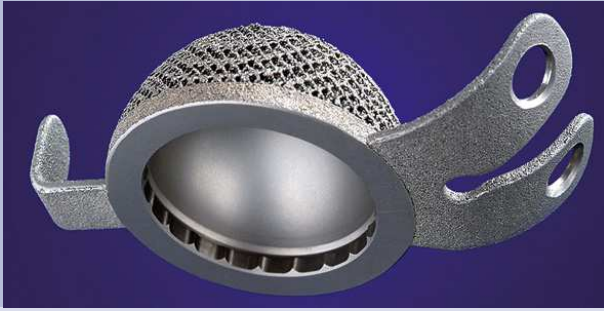


Bild 1.6 Individualisierte Hüftpfanne, SLM – Titan
(Quelle: Fraunhofer ILT)

Branche: Architektur und Design

Anwendungsbeispiel: Modell Aachener Dom



Bild 1.7 Modell des Aachener Doms
(Quelle: GoetheLab for Additive Manufacturing, Fachhochschule Aachen/IwF GmbH)

Branche: Spielwarenindustrie
Anwendungsbeispiel: Kürbis-Spinne



Bild 1.10 Kürbis-Spinne aus dem 3D-Drucker
(Quelle: Megawillbot Designs)

Branche: Formenbau (Rapid Tooling)
Anwendungsbeispiel: Bionisch optimierter Halter



Bild 1.11 Bionisch optimierter Halter für das Crew Rest Compartment im Airbus A350 XWB
(Quelle: Airbus)

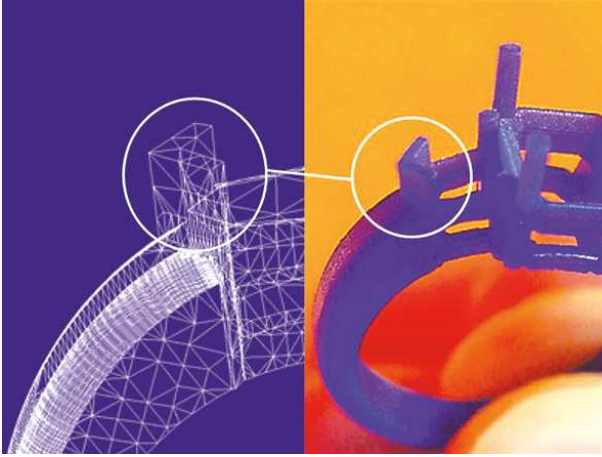


Bild 4.6 Triangulierte Oberfläche und zugehöriges additiv gefertigtes Bauteil
(Quelle: 3D Systems)

Die STL-Formulierung hat auch Nachteile:

- Sie erzeugt sehr große Datenmengen, insbesondere bei Verfeinerungen des Netzes, um zum Beispiel die Oberflächengüte zu verbessern
- STL-Datensätze enthalten nur die Geometrieinformation und keine Informationen über Farbe, Texturen, Material oder sonstige Bauteileigenschaften

Fehler im STL-Datenformat

Bei der Umsetzung der CAD-internen Geometriedaten in STL-Files können unterschiedliche Fehler auftreten, die die Qualität des additiv gefertigten Bauteils zuweilen stark beeinträchtigen. Hoffmann [HOF95] systematisiert sie wie folgt:

- Konstruktionsfehler,
- Umsetzungsfehler,
- Beschreibungsfehler.

Konstruktionsfehler konzentrieren sich auf überflüssige Daten im Inneren des Körpers, die unter anderem auf die fehlerhafte Vereinigung von Einzelementen im CAD-System zurückzuführen sind (Bild 4.7). Daraus können sich Probleme für additive Verfahren ergeben. Die Folgen reichen von zusätzlichem Aufwand während des Bauprozesses bis zum Totalverlust des Teils. Bei den Polymerisations- und Sinterverfahren wirken sich diese Fehler nicht, oder nur marginal durch Doppelbelichtungen, auf das Bauteil aus.

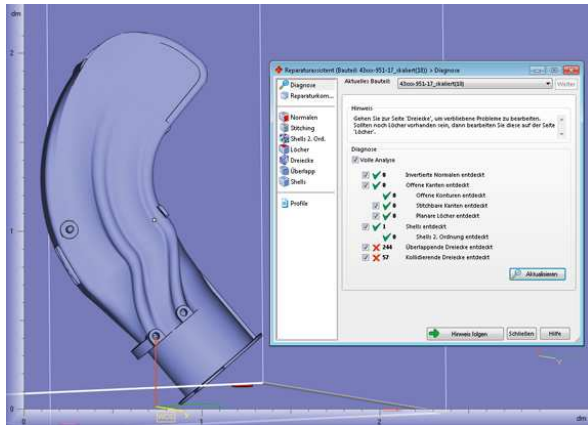


Bild 4.102 Fehleranalyse des Bauteils
(Quelle: GoetheLab for Additive Manufacturing, Fachhochschule Aachen)

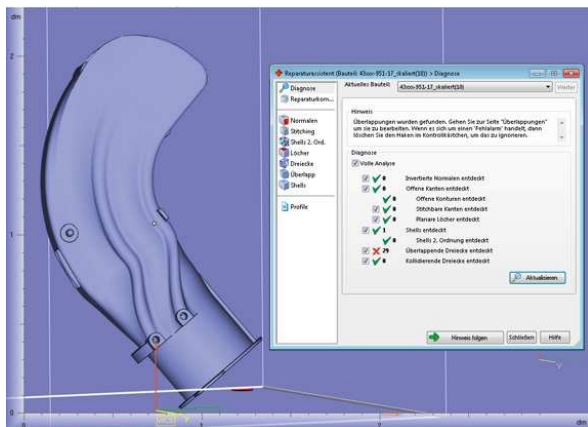


Bild 4.103 Fehlerkorrektur nach erster Korrekturschleife
(Quelle: GoetheLab for Additive Manufacturing, Fachhochschule Aachen)

Bevor die Stützstrukturen am Bauteil angebracht werden können, muss eine vorteilhafte Orientierung im Bauraum festgelegt werden. Die Ausrichtung von Bauteilen hat einen entscheidenden Einfluss auf den reibungslosen und wirtschaftlichen Ablauf eines L-PBF-Prozesses, da die Bauzeit zum einen von der Bauhöhe und zum

Symbole

3D-CAD-Modell 141
3D-Datensätze 29
3D-Drucken 5, 45, 53, 66
3D Printing 5

A

abgewinkelte Stützstrukturen 245
Additive Fertigung 1
Additive Fertigungsverfahren 4, 45
Additive Manufacturing 4
Agents 57
AMF-Datenformat 148
AM-Software Suites 257
Anti-Quietsche-Effekt 162
Anwendungsbeispiele 35
Anwendungsgebieten 8
Application Program Interfaces 139, 257
ASTM 79
Aufbaurrate 93
Automotiv 40

B

Bandsäge 243
Baukammer 120
Bauplattform 120
Bauteilgestaltung 137
Bauteilparameter 91
Berichtswesen 259
Beschichtungssystem 120
Beschichtungszeit 90

Beschreibungsfehler 147
Bewegliche Baugruppen 207, 218
Break Out 61

C

CAD-Modell 29
CAD-System 30, 141
Carbonfasern 60
Cladding 61
Cloud-Lösungen 260
Constructive Solid Geometry 142

D

Datensicherheit 259
Designspace 200
Designverbesserung 258
Deutsche Institut für Normung 78
Differenzdarstellung 259
Digital Mock Up 141
Dosierfaktor 90
Drahterodieren 243
Dreidimensionales Drucken 53
Dreiecks Patches 147

E

EIGA-Verfahren 112
Einheitszelle 169
elektro-chemische Verfahren 253
Elektronenstrahl-Schmelzen 52, 62
Elementarzelle 154