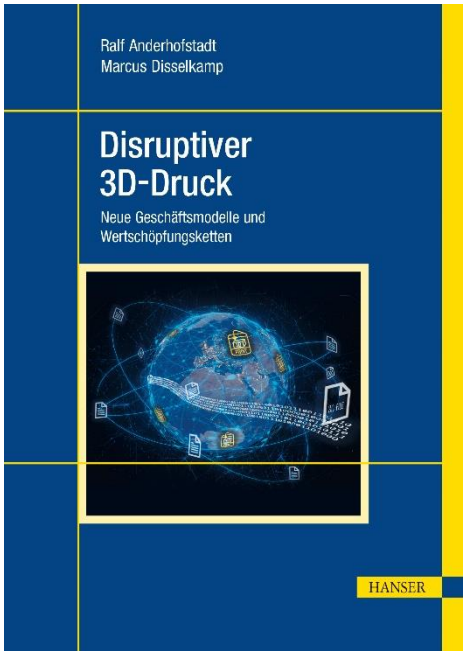
HANSER




# Leseprobe

zu

# Disruptiver 3D-Druck

von Ralf Anderhofstadt und Marcus Disselkamp

ISBN: 978-3-446-47020-0
E-Book-ISBN: 978-3-446-47021-7
ePub-ISBN: 978-3-446-47022-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter
https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446470200
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt


**Vorwort** ..... **IX**

**Autoren** ..... **XI**

**Erläuterung** ..... **XIII**

**1 Additive Fertigung – nächste Stufe der Industrialisierung** ... **1**

1.1 Einführung in die additive Fertigung ..... 4

1.1.1 Wettbewerbsvorteile dank 3D-Druck ..... 12

1.1.2 Vielzahl an Materialien ..... 14

1.1.3 Normen und Richtlinien ..... 28

1.1.4 Klassifizierung der Fertigungsverfahren ..... 30

1.2 Übersicht über 3D-Druckverfahren ..... 38

1.2.1 Die wesentlichen additiven Herstellungsverfahren ..... 39

1.2.2 Kombinierte 3D-Druckverfahren ..... 47

1.2.3 Neue Verfahren ..... 51

1.3 Vielzahl von Anwendungen und Branchen ..... 57

1.3.1 Automobil- und Luftfahrtindustrie ..... 59

1.3.2 Maschinenbau ..... 62

1.3.3 Medizintechnik ..... 64

1.3.4 Konsumgüterindustrie ..... 72

1.3.5 Lebensmitteltechnik ..... 75

1.3.6 Immobilienwirtschaft ..... 78

1.4 Ausblick Zukunft ..... 82

**2 Disruptionen – neue Spielregeln für Unternehmen und Menschen ... 87**
2.1 Bruch mit heutigen Wertschöpfungsketten ... 95
2.1.1 Dematerialisierung ... 96
2.1.2 Disaggregation ... 101
2.1.3 Disintermediation ... 104
2.1.4 Produktion „on Demand“ ... 108
2.1.5 Dezentrale Produktion ... 111
2.1.6 Creator Economy (DIY²) ... 120
2.1.7 Neue Logistikketten ... 125
2.1.8 Durchgängigkeit interner Wertschöpfungsketten ... 131
2.1.9 Nachhaltigkeit ... 134
2.2 Mit Menschen Disruptionen entwickeln ... 147
2.2.1 Barrieren gegen Veränderungen ... 152
2.2.2 Think Big, Start Small, Move Fast ... 155

**3 Wettbewerbsfähigkeit dank 3D-Druck ... 161**
3.1 Kostenvorteile ... 172
3.2 Mehrwerte ... 179
3.2.1 Mehrwerte aus dem 3D-Druck ... 184
3.2.2 Mehrwerte (mit den Kunden) schaffen ... 198
3.3 Leistungsarchitektur ... 206
3.3.1 Aufbau einer eigenen additiven Fertigung ... 207
3.3.2 Nutzung einer externen additiven Fertigung ... 214
3.3.3 Management der 3D-Druckdaten und -Druckprozesse ... 217
3.3.4 Schutz des geistigen Eigentums ... 228
3.3.5 Einbindung digitaler Plattformen ... 243
3.4 Ertragsmodell ... 255
3.4.1 Kostenstruktur der additiven Fertigung ... 256
3.4.2 Einnahmequellen der additiven Fertigung ... 260

**4 Fazit ... 267**

**Literaturverzeichnis** . . . . . 271

**Interviewpartner** . . . . . 273

**Sammlung Paradigmenwechsel** . . . . . 275

**Stichwortverzeichnis** . . . . . 277

# Vorwort

Additive Fertigungsverfahren waren in den letzten drei Jahrzehnten zunächst eine Randerscheinung. Mittlerweile hat der Fortschritt im 3D-Druck aber für gewaltigen Auftrieb gesorgt. Hersteller der verschiedensten Waren und Händler der unterschiedlichsten Branchen zeigen mehr und mehr Akzeptanz und Interesse am Potenzial der neuen Technologien. Das Umdenken führt zu einer Vielzahl von Innovationen. Sparsamere und umweltfreundlichere Produktionsprozesse sind eine Seite, Flexibilität in der Produktion und die Digitalisierung der bestehenden Abläufe kommen hinzu. Der industrielle 3D-Druck bricht somit mit vielen bestehenden Konzepten: Unternehmen übernehmen im Sinne von „Do it yourself" die Funktionen ihrer bisherigen Zulieferer, Intermediäre verlieren durch die sogenannte Disintermediation ihre Existenzgrundlage, Hersteller verlagern ihre Produktionen an dezentrale Standorte und (End-)Kunden werden zu viel intensiveren „Prosumern", als es sich jemals das Marketing vorstellen konnte.

Die Geschäftsmodelle vieler Bestandsunternehmen aus ganz unterschiedlichen Branchen werden toxisch, also existenzgefährdend, wie in den Bereichen Logistik und Lagerwesen, Industrie, Dienstleistungen, Handel oder Service. Umgekehrt ergeben sich auch viele Chancen für moderne, existenzsichernde Geschäftsmodelle, auf die die Publikation genauer eingehen wird. Gesteigerte Nachfrage in vielen Bereichen zeigen das Interesse des Marktes – nicht nur in Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie, Immobilienwirtschaft, Nahrungsmittelbranche oder Medizintechnik. Fortschreitende Digitalisierung und Standardisierung des 3D-Drucks sind derzeit Thema. Sie sind auch Voraussetzung für eine weitere Durchdringung der Serienfertigung mit additiven Fertigungsverfahren.

Aus diesem Grund gewinnt der 3D-Druck insbesondere in den letzten Jahren zunehmend an Aufmerksamkeit. Neben Forschung und Wissenschaft interessieren sich große und kleine Unternehmen für den Einsatz der additiven Fertigung im industriellen Umfeld. Globale Entwicklungen zeigen neue Trends und prognostizieren einen großen Umbruch im Bereich der industriellen Fertigung – und sogar darüber hinaus. Der 3D-Druck und die damit verbundenen Möglichkeiten sind disruptiv. Das heißt nichts anderes, als dass wir mit dem 3D-Druck in vielen Bereichen der Produktion bereits gravierende Veränderungen sehen und noch weitere

erleben werden. Davon ist eine Vielzahl von Branchen betroffen: Nicht nur in der Automobil- oder Luftfahrtindustrie entstehen Bauteile aus dem 3D-Drucker. Dabei geht der Einsatz von additiven Fertigungstechnologien in der Zwischenzeit weit über den Bau von ein paar Prototypen hinaus – sie sind in der Serienproduktion angekommen. Mehr noch: Mittlerweile werden medizinische Prothesen individuell von spezialisierten Unternehmen gefertigt, entstehen Nahrungsmittel per Druckverfahren – sogar in Restaurants – und ganze Häuser kommen aus dem 3D-Drucker. In den folgenden Kapiteln finden Sie dazu einige interessante Beispiele.

Scheinbar grenzenlos sind die Möglichkeiten der additiven Fertigung. Nach Ausschöpfen der bisherigen Potenziale gibt es neue Ansätze zu langfristigen und nachhaltigen Strategien hinsichtlich weiterer Einsatzmöglichkeiten. Dazu gehören neben technologischen Trends auch neue Geschäftsmodelle. Lange bewährte Wertschöpfungsketten werden hinterfragt: Die bereits zitierte Digitalisierung führt in der Industrie zu einem massiven Umdenken. Klassische Fabriken, Maschinen und sogar Arbeitsplätze werden nicht mehr in uns bekannter Form und gewohntem Umfang benötigt. Die damit verbundene Dematerialisierung betrifft viele Bereiche, nicht nur die Produktion! Produkte werden „neu gedacht“: bestehende Funktionen mit neuen Angeboten kombiniert und daraus neue Geschäftsideen und Ertragsmöglichkeiten geschaffen. Nicht nur Kostenoptimierung steht im Mittelpunkt, sondern auch Mehrwerte für Kunde und Unternehmen stehen im Fokus – das Ziel: operative Excellence UND Customer Experience.

Die verschiedenen Kapitel dieses Buches bieten einen Überblick über additive Fertigungstechnologien und das gesamte Umfeld: zuerst vom Einblick in die aktuellen 3D-Druckverfahren über die breite Palette an verfügbaren Werkstoffen und damit den Einsatzmöglichkeiten des 3D-Drucks, gefolgt von den gravierenden, ja sogar disruptiven Effekten auf Unternehmen und ganze Wertschöpfungsketten sowie am Ende der Diskussion hin zu den für die additive Fertigung dringend notwendigen Geschäftsmodellen, ohne die der 3D-Druck nur eine neue Technologie bleibt, ohne neue Einkommensmöglichkeiten und Wettbewerbsvorteile zu generieren.

Noch ein Hinweis zu den im Text verwendeten Bezeichnungen. Hier werden synonym die Begriffe „additive Fertigung“ und „3D-Druck“ verwendet. Diese Parallelität ist auch weitverbreitet in wissenschaftlichen und praxisorientierten Veröffentlichungen zu finden. Der eigentliche Unterschied liegt darin, dass mit der Bezeichnung „additive Fertigung“ im Wesentlichen die Methode der dahinterstehenden Fertigungsverfahren beschrieben wird. Mit additiven Fertigungsverfahren werden Objekte durch Aneinanderfügen von Volumenelementen hergestellt – in den meisten Fällen durch schichtweisen Aufbau der gewünschten Geometrie. Daher kann man ohne Einschränkungen feststellen, dass additive Fertigung und 3D-Druck für dasselbe stehen. Sie beschreiben ein und dieselbe Fertigungstechnologie – lediglich aus verschiedenen Perspektiven betrachtet.

Neu-Ulm und München, Juni 2022

# Autoren

**Ralf Anderhofstadt** ist Leiter des Center of Competence Additive Manufacturing und Projektleiter des crossfunktionalen 3D-Druck-Projekts innerhalb Daimler Truck. Seit mehreren Jahren gestaltet er federführend mit seinen Teams die Einführung des industriellen 3D-Drucks in die unterschiedlichen Prozesse bei Daimler Truck. Hierzu zählt die Steuerung und Integration von zahlreichen nationalen und internationalen Bereichen innerhalb des Konzerns mit dem Ziel zum Aufbau eines digitalen 3D-Druck-Geschäftsmodells. Parallel ist er im VDI Fachgremium „Rechtliche Rahmenbedingungen der Additiven Fertigung“ aktiv, arbeitet als Dozent mit dem Schwerpunkt 3D-Druck und ist als Trainer für zahlreiche Schulungen innerhalb des Geschäftsfelds der Additiven Fertigung tätig.

**Dr. Marcus Disselkamp** ist ein anerkannter Experte für Unternehmensstrategien in Zeiten des digitalen Wandels und einer der TOP-100-Trainer im deutschsprachigen Raum. Seit Jahrzehnten begleitet er als Business Coach und Sparring Partner Firmen bei der unternehmerischen Wettbewerbsfähigkeit, modernen Geschäftsmodellen und der digitalen Transformation. Mehrere Tausend Teilnehmer von Strategie- und (digitalen) Innovationsprojekten sowie Managementtrainings überzeugte er schon mit seiner praxisnahen, methodisch ganzheitlichen und dynamischen Art und Weise. Er unterrichtet das Themenfeld „(digitale) Wettbewerbs- und Wachstumsstrategien“ an mehreren internationalen Hochschulen und Business Schools, ist Fachautor, Podcaster sowie Mitglied in mehreren Beirats- und Verwaltungsratsorganen (*www.disselkamp.com*).

# 1 Additive Fertigung – nächste Stufe der Industrialisierung

In den letzten Jahren hat der Einsatz additiver Fertigungsverfahren in vielen Bereichen und darüber hinaus auch in vielen Branchen stark zugenommen. Der industrielle Einsatz begann allerdings schon in den 1980er-Jahren, als die Automobilindustrie die Methode für sich entdeckte, da sich damit besonders effizient Prototypen herstellen ließen. Im Vergleich zu bisherigen, konventionellen Fertigungsmethoden mussten Objekte nicht mehr in mehreren Schritten maschinell bearbeitet werden, sondern konnten schichtweise sozusagen „an einem Stück" aufgebaut werden. So wurden Prototypen schneller und mit geringerem Werkstoffeinsatz hergestellt, jedoch waren diese ersten Objekte meist wenig stabil und in vielerlei Hinsicht empfindlich.

Mit zunehmender Digitalisierung wurden die Methoden und Verfahren der additiven Fertigung verbessert und weiterentwickelt. In der Folge konnten auch wichtige Qualitätsmerkmale und Eigenschaften der 3D-gedruckten Objekte deutlich verbessert werden. Durch die höhere Qualität der Produkte erlangte die additive Fertigung auch wachsendes Interesse in anderen Bereichen – auch über den klassischen Maschinenbau hinaus. Weitere Branchen begannen nach und nach, die Vorteile des 3D-Drucks für sich zu entdecken und die Möglichkeiten der additiven Fertigung für ihre Produkte anzuwenden. Neue, weitere Technologien wurden entwickelt oder für branchenspezifische Belange angepasst. Die rasche Verbreitung des 3D-Drucks lässt sich unter anderem auch auf die immer schnellere Entwicklung und Anpassung von Verfahren zurückführen.

Hinzu kommt noch die ständig wachsende Zahl an Werkstoffen, die zum Einsatz gebracht werden können. Waren es zu Beginn nur Kunststoffe, die mit additiven Fertigungsverfahren verarbeitet werden konnten, so ist heute eine Vielzahl von Werkstoffen für unterschiedlichste Einsätze verfügbar. Metalle und Keramik finden ebenso Anwendung wie Gips – je nachdem in welcher Branche und was gefertigt werden muss. Viele Unternehmen arbeiten mittlerweile in ihren Forschungsbereichen mit Hochdruck daran, eigene Werkstoffe für spezifische Anwendungen zu entwickeln und zu optimieren – häufig auch in Zusammenarbeit mit Hochschulen.

**Interview EOS**

„Wir glauben, dass Innovation und Technologie helfen kann eine bessere Welt für alle zu ermöglichen. Wir gestalten die Zukunft einer nachhaltigen Fertigung. Unser Ziel und Unternehmenszweck ist es, bahnbrechende digitale Innovationen im industriellen 3D-Druck mit nachhaltigen Praktiken zu verbinden.“

Björn Hannappel, Head of Sustainability EOS GROUP (Quelle: EOS)

Um bei der wachsenden Zahl von Verfahren und Werkstoffen einen Überblick zu behalten – oder auch um Interessierten einen ersten Einblick in Methoden und Möglichkeiten zu geben – wurden mittlerweile von nationalen und internationalen Gremien Normen und Richtlinien verfasst. Der Verein Deutscher Ingenieure hat beispielsweise eine ganze Richtlinienfamilie verfasst. In dieser Richtlinie VDI 3405 sind beispielsweise die gängigsten Verfahren oder Kenndaten für Werkstoffe erfasst. Eines der Ziele bei der Erstellung war, Unternehmen bei der Wahl sowohl des bestgeeigneten Verfahrens als auch des „optimalen“ Werkstoffs in Bezug auf den spezifischen Einsatz zu unterstützen.

**3D-Druck** stellt den **Oberbegriff für eine wachsende Anzahl verschiedenster Fertigungstechnologien** dar. Die Verfahren unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich der verwendeten Werkstoffe, sondern im Wesentlichen durch die Art und Weise, wie Objekte aus den Werkstoffen aufgebaut werden.

Hier kommen mittlerweile unterschiedlichste Ansätze zur Anwendung, die in den folgenden Kapiteln detaillierter beschrieben und dargestellt werden.

Eins haben alle Verfahren der additiven Fertigung zunächst gemeinsam: Bei allen wird **mithilfe von CAD-Programmen ein digitales Modell eines dreidimensionalen Objektes erstellt**. Diese 3D-Datenmodelle werden wiederum mittels geeigneter Software in maschinenlesbare Datensätze umgewandelt und dann an ein 3D-Drucksystem übertragen. Dort werden die Objekte dann Schicht für Schicht – additiv – aufgebaut.

Damit unterscheidet sich der 3D-Druck ganz wesentlich von herkömmlichen – als „subtraktive Fertigung“ bezeichneten – spanabhebenden Fertigungsverfahren.

Beim 3D-Druck handelt es sich zwar um junge Fertigungsverfahren – jedoch lassen sich viele Gründe für das ständig wachsende Interesse finden. Das liegt an vielen Vorteilen, die die Herstellung von Teilen und Objekten mit einem 3D-Drucker mit sich bringt. Es sind beispielsweise keine Formen oder Werkzeuge erforderlich und der Materialverbrauch ist im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsverfahren deutlich geringer. 3D-Druck ermöglicht eine wirtschaftliche Anwendung – besonders auch bei kleinsten Fertigungsstückzahlen (bis hin zu Losgröße 1) – und macht additive Fertigungsverfahren ökologisch nachhaltig und kosteneffizient. Darüber hinaus ermöglicht 3D-Druck die Fertigung von komplexen Objekten in einem Schritt, die mit herkömmlichen Methoden aus mehreren Teilen gefertigt und dann montiert werden müssten. Ausgehend von Anwendungen in der Industrie haben 3D-Drucker in der Zwischenzeit auch viele Felder des privaten Umfelds erobert.

**Interview Messe Frankfurt**

**Additive Manufacturing (AM) ist mehr als reine Technologie**. AM wird nicht nur unsere industrielle Zukunft, sondern unser künftiges Leben maßgeblich beeinflussen. Warum ist das so? Wenn ich als Messeveranstalter der Formnext als bedeutendster Messe für den industriellen 3D-Druck die letzten Jahre Revue passieren lasse, hat sich alleine seit 2015 in der Anwendung des Additive Manufacturing und den AM-Technologien unglaublich viel getan. Noch vor wenigen Jahren wurde der „3D-Druck“ vor allem in der Tages- und Wirtschaftspresse noch in der Form dargestellt, dass wir als Konsumenten in naher Zukunft bald jeder einen eigenen Drucker zu Hause stehen haben und uns die wundersamsten Dinge daraus selbst drucken. Diese etwas sehr verklärte Vorstellung hat sich nicht bewahrheitet. Vielmehr hat sich das aufs „µ“ berechnete additive Zusammenfügen kleiner und kleinster Materialteilchen, ob nun aus Kunststoff, Metall, Keramik, CFK, und weiterer wie Glas oder Holz samt teilweise Mischungen derselbigen plus eingedruckter elektronischer Bauteile oder gar organischer Zellen zu einer – wenn nicht sogar der – Zukunftstechnologie industrieller Fertigung schlechthin entwickelt.

Aus den Erfahrungswerten von Sascha Wenzler sind in den vielfältigsten Anwendungsgebieten, seien es Automotive, Maschinenbau, Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik, Dentaltechnik über Schmuck, Schiffsbau, Schienenverkehr, Elektroindustrie, Verpackungen, Werkzeugbau bis zu Nischen wie Offshore oder Oil and Gas Exploration und vielen mehr, sind Designs, Produkte und Anwendungen entstanden, die noch vor wenigen Jahren schlichtweg nicht vorstellbar waren. Ein neues Denken entsteht durch AM. Vom Produktdesigner über den Entwicklungsingenieur bis zum Fertigungsverantwortlichen und CEO werden die Freiheiten und Möglichkeiten des Drucks in der dritten Dimension entdeckt. Für mich besonders faszinierend bleibt die Medizintechnik, hier ist besonders greifbar, wie Additive Manufacturing dem Menschen als Patienten hilft und echten Lebenswert schafft.

In der Großindustrie, aber auch mehr und mehr im Mittelstand entstehen zudem knallhart kalkulierte Business Cases. Der industrielle 3D-Druck ist zudem in der Lage Lieferketten auf den Kopf zu stellen und Resilienz zu schaffen. Additive Manufacturing ist längst auf dem Weg zu einer regulären Fertigungstechnologie in Ergänzung, aber auch im Wettbewerb mit den traditionellen Verfahren. Serienreife wird bereits erreicht und wir stehen trotzdem erst am Anfang der Reise. Mir persönlich bleibt es eine besondere Freude, diese Reise mit der Formnext mitzugestalten und zu begleiten.

Sascha F. Wenzler, Vice President Mesago Messe Frankfurt GmbH

## 1.1 Einführung in die additive Fertigung

Seit Urzeiten stellen Menschen Dinge für den täglichen Bedarf her, die das Leben vereinfachen sollen. Es begann mit einfachen Werkzeugen, die sich unsere Vorfahren aus Holz und Stein bastelten. Im Lauf der Zeit – genauer gesagt mit der Entdeckung von Metallen und neuen Werkstoffen – wurden die Werkzeuge und Werkstücke vielfältiger und komplexer, und mit ihnen wurden auch die Methoden und Verfahren zur Herstellung immer komplexer. Die klassischen Fertigungstechnologien haben dabei in der Regel einen gemeinsamen großen Nachteil: Die Werkstücke (oder Komponenten davon) werden aus massiven Blöcken von Rohmaterial herausgeschnitten. Man spricht bei diesen Verfahren auch von einer **subtraktiven Fertigung**. Häufig geht den herkömmlichen Fertigungsverfahren ein großer Anteil des Rohmaterials als Abfall verloren. Bei komplexen Werkstücken fallen manchmal sogar bis zu 90 Prozent des eingesetzten Materials der Zerspanung zum Opfer! Zudem müssen komplexe Bauteile häufig aus mehreren Einzelteilen aufgebaut werden, was zusätzliche Zeit für Montage erfordert.

Bild 1.1 zeigt schematisch die Fertigung eines Bauteils mithilfe konventioneller Fertigungsverfahren: Der Aufbau komplexer Bauteile erfolgte bisher in der Regel aus einzelnen Komponenten. Zunächst werden diese Komponenten des zu fertigenden Bauteils als Einzelteile gefertigt. In den meisten Fällen geht bei der Herstellung dieser Einzelteile ein häufig ganz erheblicher Anteil des Werkstoffs als Abfall durch spanabhebende Verfahren verloren.

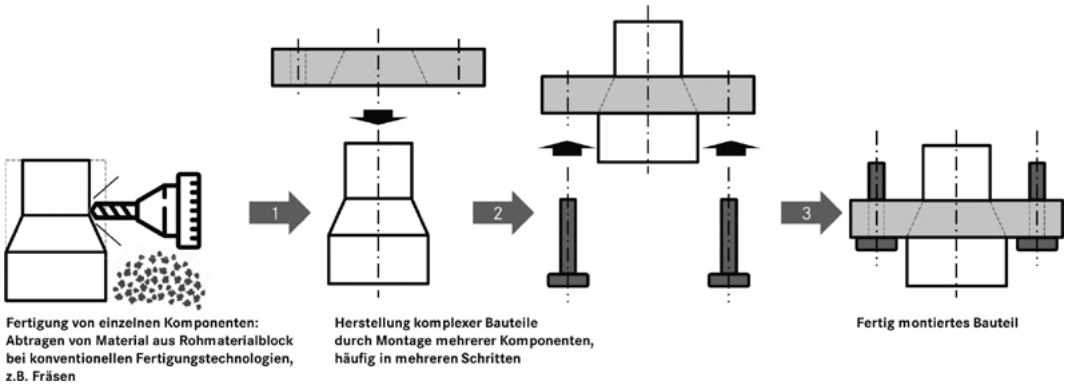



**Bild 1.1** Konventionelle Fertigungsmethoden

Doch dank der additiven Fertigungsverfahren geht es mittlerweile auch anders. Bereits in den 1970er-Jahren hatte der belgische Komikautor Hergé eine Vision: In einem seiner Comics beschreibt er, wie seine Comic-Helden Tim und Struppi den Professor Bienlein besuchen und dessen neueste Erfindung – eine 3D-Kopiermaschine – bestaunen. Mit dieser Maschine ist der Professor in der Lage, einen Gegenstand in einem Arbeitsgang nachzubilden – durch den Aufbau aus Rohmaterial. Das Besondere dabei ist, dass das alles ohne die bisher notwendigen Bearbeitungsvorgänge wie Drehen, Fräsen oder Bohren funktioniert. Nur eine Fantasiewelt des Comics? Oder wurde hier tatsächlich schon der Grundgedanke der additiven Fertigung – auch „Additive Manufacturing" genannt – sichtbar gemacht. Das käme einer Revolution gleich, wie in Urzeiten die Erfindung des Rads.

Es dauerte dann noch etwa zehn Jahre, dann gelang es Chuck Hull – einem amerikanischen Ingenieur –, das erste Verfahren des 3D-Drucks in die Tat umzusetzen. Im Jahr 1986 wurde dieses als Stereolithografie bezeichnete Verfahren als erste additive Fertigungstechnologie patentiert. Das Besondere und Neue an diesem Verfahren von Hull war, dass er Werkstücke mithilfe von 3D-Konstruktionsprogrammen in einzelnen Schichten aufbaute, indem es ihm gelang, gezielt Punkte im Raum zu materialisieren.

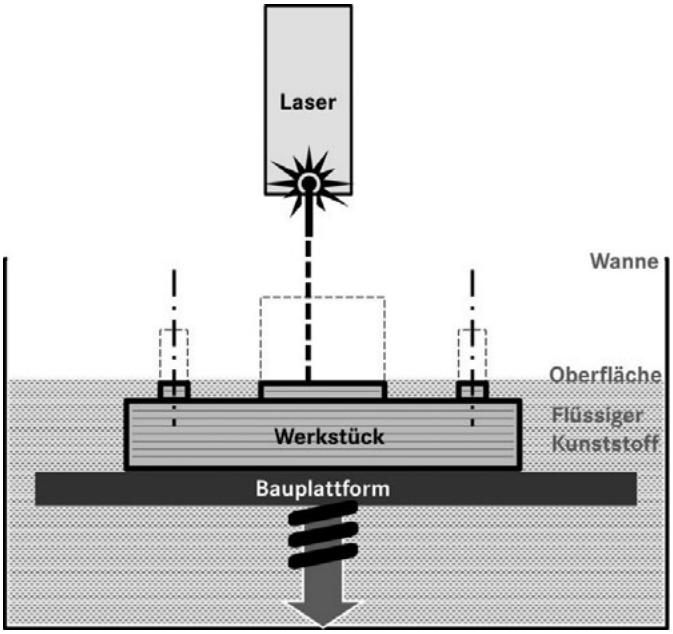



**Bild 1.2** Stereolithografie

Bild 1.2 zeigt das Prinzip der von Chuck Hull patentierten Lösung. Bei dieser sogenannten Stereolithografie erfolgt eine punktweise Materialisierung von Kunststoff (Polymer) aus einem Flüssigkeitsbad durch gezielte Bestrahlung mit einem Laser. Nach Fertigstellung einer Schicht wird die Bauplattform um eine Schichtdicke nach unten abgesenkt und die nächste Schicht aufgetragen.

In den folgenden Jahren nahm die Entwicklung der additiven Fertigung – besser bekannt als 3D-Druck – dann deutlich an Fahrt auf. Innerhalb von wenigen Jahren wurde dabei zunächst Rapid Prototyping als neues Fertigungsverfahren bekannt. Mit Rapid Prototyping konnte man zum ersten Mal Musterteile ohne manuellen Aufwand herstellen. Dazu benötigte man lediglich die CAD-Daten (Computer-Aided-Design) des Objekts, die für 3D-Druck in Maschinensprache umgesetzt werden und dann an den 3D-Drucker übertragen werden mussten. Rapid Prototyping repräsentiert somit den Beginn des 3D-Drucks in der industriellen Anwendung.

Produktentwicklung und Prototypenbau waren demnach auch die ersten Bereiche, in denen die neue Technologie zur Anwendung kam. Entscheidend dafür war, dass der Zeitaufwand von Entwicklung und Konstruktion eines Produktes bis zu dessen Markteinführung deutlich reduziert werden konnte. Und so ist es auch mit den Kosten: Mit Rapid Prototyping können Konstruktionen abgesichert werden, bevor in Werkzeuge investiert werden muss.

Mittlerweile ist ein durchaus positiver weiterer Effekt der wachsenden Verbreitung des 3D-Drucks erkennbar: Mit der zunehmenden Entwicklung und Reife von Technologien und Werkstoffen sinken auch die Kosten des 3D-Drucks – und das ermöglicht in der Folge wiederum einen wirtschaftlichen Einsatz der additiven Fertigung in der Serienproduktion und eine weitere Ausbreitung der Technologie in die Produktion von Endprodukten.

**1. Paradigmenwechsel**

Am Anfang nutze man den 3D-Druck vorwiegend für die Fertigung von kleinen Losgrößen sowie für Prototypen. In der Zwischenzeit gibt es bereits viele Anwendungen in der **Serienproduktion**.

Wie die bisher klassisch gefertigten Endprodukte entsprechen in 3D gedruckte Objekte in ihren Eigenschaften und Funktionen genau den Vorgaben, die im Produktentwicklungsprozess spezifiziert wurden. Diese neue Art der Herstellung eines Produktes wird als **Direct Manufacturing** bezeichnet. Direct Manufacturing hat zum Ziel, von Kunden benötigte oder gewünschte Teile innerhalb kurzer Zeit bereitzustellen – selbstverständlich in gewohnt qualitativ hochwertiger und wettbewerbsfähiger Ausführung. Diese Methode unterstützt eine aktuelle Tendenz des Marktes: Objekte können mit geringem Aufwand individualisiert und in geringen Stückzahlen gefertigt werden. Der Umsetzung einer wachsenden Nachfrage nach personalisierten Produkten steht nichts mehr im Wege!

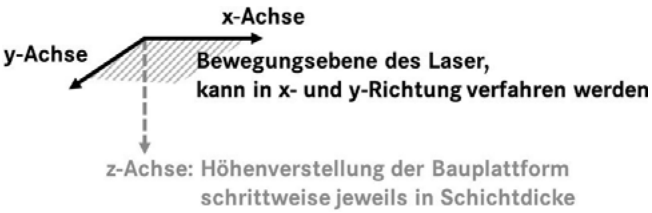


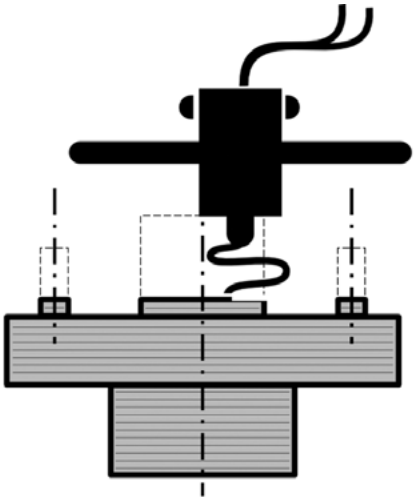

**Bild 1.3** Erzeugung dreidimensionaler Bauteile im 3D-Druck

Wie der dreidimensionale Aufbau eines Objektes erfolgt, zeigt die Darstellung in Bild 1.3: Bleiben wir zunächst am Beispiel Stereolithografie. Der Laser wird hierbei anhand der Geometriedaten des Objekts in der x-y-Ebene bewegt und initiiert dabei eine gezielte Materialisierung des Werkstoffs an der Oberfläche des Kunststoffbades. Ist eine Ebene (Schicht) abgearbeitet, wird die Bauplattform in z-Richtung (nach unten) um eine Schichtdicke abgesenkt und die Bearbeitung der nächsten Ebene erfolgt. Durch schrittweise Höhenverstellung der Bauplattform in z-Richtung lassen sich damit schichtweise dreidimensionale Geometrien erzeugen.

**Definition additive Fertigung**

Als 3D-Druck oder additive Fertigung (eng. Additive Manufacturing) werden heute alle Fertigungsverfahren bezeichnet, mit denen dreidimensionale Werkstücke durch schichtweisen („additiven“) Aufbau hergestellt werden können. Dabei können unterschiedliche Werkstoffe zum Einsatz kommen, die zur Erzeugung eines Bauteils schichtweise hinzugefügt werden. Ermöglicht wird diese Art der Fertigung von Objekten durch die zunehmende Digitalisierung. Formen und Dimensionen der Objekte werden als dreidimensionale Modelle in CAD-Programmen erstellt und beschrieben. Die Bauteile werden dann auf Basis des CAD-Datensatzes in einem 3D-Drucksystem Schicht für Schicht aufgebaut. Zu ihrer Fertigung wird kein bauteilspezifisches Werkzeug benötigt. Der Aufbau der Werkstücke erfolgt computergesteuert, ohne dass hierzu manuelle Eingriffe erforderlich sind.

In Bild 1.4 zeigt sich die Entstehung eines Werkstücks mittels 3D-Druck, also dem schichtweisen Aufbau. Das Ergebnis ist nach diesem Prozess ein dreidimensionales Objekt.



**Additive Fertigungstechnologien:**
**Schichtweiser Aufbau von Objekten durch Auftragen von Material**

**Bild 1.4** Aufbau eines Werkstücks „Schicht für Schicht“

3D-Drucksysteme nutzen entweder **physikalische oder chemische Härtungs- oder Schmelzprozesse** zum Aufbau der Werkstücke aus dem meist formlosen Rohmaterial. Durch Einwirkung einer Energiequelle wie Wärme oder Laserstrahlen wird das Rohmaterial verfestigt. Das fertige Werkstück entsteht dabei durch die aufeinanderfolgende Verbindung der Schichten. Man spricht aus diesem Grund auch häufig von generativer Fertigung zur Herstellung eines Bauteils.

Eine Besonderheit der additiven Fertigung liegt in den formgebenden Fertigungsverfahren, die jedoch keine speziellen Formen zur Erzeugung der Geometrie eines Werkstücks benötigen. Die dabei verwendeten Werkstoffe umfassen pulverförmige, stabförmige und flüssige Werkstoffe. Derzeit kommen sowohl Kunststoffe als auch faserverstärkte Kunststoffe, Keramiken und Metalle zum Einsatz. Mittlerweile wird auch an Werkstoffen aus Carbon- und Grafitmaterialien für den Einsatz im 3D-Druck zur Herstellung von Teilen aus Kohlenstoff gearbeitet.

Additive Fertigungstechnologien gehören somit zu den bedeutendsten Entwicklungen der letzten Jahre und machen außerdem die fortschreitende Digitalisierung für Kunden im wahrsten Sinne des Wortes greifbar. Denn aus digitalen Modellen oder Druckvorlagen, die man sich am Computer anschauen kann, werden hochwertige Produkte. Selbst komplexe, dreidimensionale Formen lassen sich so kostengünstig – bei Bedarf sogar vor Ort oder direkt bei Kunden – herstellen. Das bringt für Unternehmen und Kunden viele Vorteile, die man unmittelbar auch der zunehmenden Digitalisierung zuordnen kann. Daher setzen mehr und mehr Branchen 3D-Druckteile in unterschiedlichsten Bereichen ein.

Zur Vorbereitung für den 3D-Druck wird ein **dreidimensionales digitales Modell** in eine Vielzahl einzelner übereinanderliegender Ebenen (Schichten) zerlegt. Diese Ebenen werden im Anschluss an das 3D-Drucksystem übertragen und dort nacheinander bis zur Fertigstellung des Werkstücks abgearbeitet.

Werkstücke oder Objekte werden am Computer mittels geeigneter Software (in der Regel CAD-Programme) als digitales Modell erzeugt und als Datensatz gespeichert. Soll das Werkstück gedruckt werden, wird dieser Datensatz aufgerufen und wiederum mittels entsprechender Software in ein maschinenlesbares Format „übersetzt“. In diesem maschinenlesbaren Format werden die Geometriedaten der einzelnen Schichten sowie weitere Parameter, die der 3D-Drucker zur Herstellung des Werkstücks benötigt, hinterlegt. Zu diesen Parametern gehören neben den Steuergrößen wie beispielsweise Schichtdicke und Temperatur auch Kenndaten des eingesetzten Werkstoffes. Das Prinzip dieses Prozesses von der Konstruktion zum fertigen Produkt beim 3D-Druck zeigt Bild 1.5.

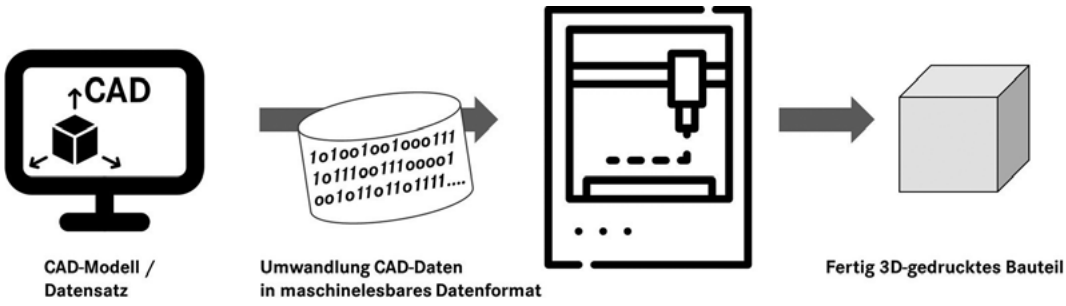



**Bild 1.5** Additive Fertigung, vom digitalen Modell zum Produkt

3D-Drucker sind mittlerweile in Industrie und Forschung, im Modellbau und häufig auch im Konsumgüter-Bereich im Einsatz. Weit verbreitet ist mittlerweile die industrielle Fertigung von Modellen, Mustern, Prototypen, und Werkzeugen. Industrielle Endprodukte und private Nutzung gewinnen zunehmend an Bedeutung. Darüber hinaus entdecken immer mehr Branchen wie beispielsweise das Bauhandwerk die Möglichkeiten des Einsatzes von additiver Fertigung.

Drei **Einsatzmöglichkeiten** existieren für die additive Fertigung, wie in der VDI-3405-Richtlinie gegliedert: Prototypen, Werkzeuge und Endprodukte.

Die Anfänge der additiven Fertigungsverfahren liegen im Prototypenbau. Daher auch die Bezeichnung der ersten der genannten Einsatzmöglichkeiten: **Rapid Prototyping** (wörtlich übersetzt „schneller Modellbau“). Rapid Prototyping ist eigentlich eine übergeordnete Bezeichnung und steht für unterschiedliche Verfahren, mit denen Musterbauteile – also Prototypen – schnell und direkt aus Konstruktionsdaten hergestellt werden können. Allerdings stellt der 3D-Druck die gängigsten Rapid-Prototyping-Verfahren, daher wird Rapid Prototyping gelegentlich wie ein Synonym für die Bezeichnung 3D-Druck verwendet, obwohl 3D-Druck für sehr viel mehr Anwendungen eingesetzt werden kann (und eingesetzt wird).

**Rapid Tooling** (= schneller Werkzeugbau) ist dagegen schon per Definition direkt dem 3D-Druck zugeordnet. Die Herstellung von Werkzeugen oder Werkzeugteilen mittels 3D-Druck stellt eine besondere Art des Werkzeug- und Formenbaus dar und wird häufig zur Herstellung von Kunststoffspritzwerkzeugen eingesetzt.

Im Lauf der letzten Jahre wurden die Verfahren weiterentwickelt und vielseitiger. Damit konnte auch die Qualität der Teile, die mithilfe von 3D-Druck hergestellt werden, deutlich verbessert werden. Mittlerweile sind 3D-gedruckte Objekte häufig so gut, dass sie – gegebenenfalls nach einer Nachbearbeitung wie beispielsweise Lackieren – direkt als fertige Produkte eingesetzt werden können. Aus den neuen Fertigungsverfahren lassen sich verschiedene Potenziale herleiten, um sowohl Fertigungszeit als auch -kosten von Bauteilen deutlich zu reduzieren. Gleichzeitig kann dabei häufig noch die Funktionalität der Teile erhöht werden. Mit der Richtlinie VDI 3405 Blatt 3 wurde für Unternehmen und Konstrukteure eine Arbeitsgrundlage erarbeitet, die bei der Auswahl eines geeigneten 3D-Druckverfahrens für spezifische Anforderungen unterstützen soll. Insbesondere hat die Richtlinie Gültigkeit für das Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen (VDI 3405 Blatt 1) sowie auch das Strahlschmelzen von metallischen Bauteilen (VDI 3405 Blatt 2).

In vielen Konstruktionsbereichen liegen derzeit noch keine oder nur wenig ausgeprägte Erfahrungswerte hinsichtlich der Unterschiede – respektive Stärken und Schwächen – der einzelnen Verfahren vor. Die Richtlinie soll Orientierung und Unterstützung geben, um die Vielzahl von Möglichkeiten durch die neue Gestaltungsfreiheit auch zu erkennen.

Mit 3D-Druck lassen sich **Formen und Geometrien umsetzen, die bisher als Teil kaum vorstellbar** und mit konventionellen Verfahren nicht herstellbar waren.

Die in der Richtlinie beschriebenen Eigenschaften und Besonderheiten der 3D-Druckverfahren bieten detaillierte und konkrete Hinweise für Entwicklungsabteilungen und Konstrukteure – beispielsweise für Bauteilfertigung mittels Laser-Sintern aus Kunststoffwerkstoffen. Neben der Beschreibung der Vorteile sind in der VDI-Richtlinie auch verfahrensbedingte Einschränkungen zu den jeweiligen Verfahren aufgeführt und können so bereits bei der Auslegung in die Konstruktion von Teilen einfließen.

Die VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL) veröffentlicht außerdem zusätzliche Informationen sowie Statusberichte zu additiven Fertigungsverfahren und deren Potenzialen im Bereich Maschinenbau auf ihrer Webpräsenz unter: *www.vdi.de/statusadditiv*.

Hier noch einmal eine kurze Zusammenfassung der drei Einsatzmöglichkeiten nach VDI-Richtlinie 3405:

1. **Rapid Prototyping für den schnellen Aufbau von Prototypen**: Diese Technologie wird bereits seit Jahrzehnten eingesetzt. Im Allgemeinen versteht man darunter meist Urformverfahren, mithilfe derer Objekte aus formlosen Werkstoffen erstellt werden können. Additive Fertigung eignet sich für Rapid Prototyping ganz besonders, da beim 3D-Druck die Musterteile direkt aus dem erstellten CAD-Datensatz ohne Formen oder Werkzeuge und häufig auch gänzlich ohne manuellen Aufwand gefertigt werden.
2. **Rapid Tooling zur raschen Herstellung von Werkzeugen**, Werkzeugbestandteilen und weiteren Hilfsmitteln im Werkzeugbau oder Formenbau, insbesondere von Kunststoffspritzwerkzeugen:
   Das Rapid Tooling hat die Fertigung von Formen oder Modellen mit einfacher Reproduzierbarkeit zum Ziel. Direkt in den Montagebereichen können mittels 3D-Druckern auch einfache Hilfsmittel direkt vor Ort hergestellt werden. So kann der Aufwand für Lagerhaltung deutlich reduziert werden. Zudem lassen sich beim 3D-Druck ohne zusätzlichen Aufwand Kühlkanäle in Werkzeuge oder Werkzeugeinsätze integrieren. Gegenüber Werkzeugen aus Vollmaterial haben diese Werkzeuge häufig eine optimierte Kühlleistung – oder können ebenso zur Temperierung während der Fertigung eingesetzt werden. Dies ermöglicht kürzere Zykluszeiten in der Produktion und reduziert obendrein noch den thermischen Verzug von Bauteilen. Daraus resultiert auch ein positiver Effekt auf die Bauteilqualität.
3. **Direct Manufacturing von Endprodukten**: Diese Methode, bei welcher die gefertigten Objekte direkt als Endprodukt in den Einsatz kommen, ist in der Medizintechnik zum Beispiel für Hörgeräte, Behelfsprothesen oder im Bereich

der Zahnbehandlung bereits bewährt und in der Luft- und Raumfahrtindustrie für hochkomplexe Bauteile wie Einspritzdüsen für Turbinen gängige Praxis. Im Automotive-Bereich setzt sich die Nutzung des Verfahrens bei allen namhaften Herstellern nach und nach bis in die Serienfertigung durch. Ziel ist die Nutzung der Vorteile aus konventioneller Serienfertigung – hierzu zählen hohe Fertigungsleistung bei geringen Stückkosten, Maßhaltigkeit und Austauschbarkeit der Werkstücke bei reduziertem Personalaufwand – bei gleichzeitiger Minimierung der Nachteile wie Kapitaleinsatz und Durchlaufzeiten in Verbindung mit Werkzeugeinsatz.

**Praxisbeispiel Automobilindustrie**

Der Automobilhersteller BMW erreichte nach eigenen Veröffentlichungen (*press.bmwgroup.com*) bereits 2019 eine Jahresproduktion von über 300 000 Teilen mithilfe von 3D-Druck. Im Juni 2020 eröffnete die BMW Group dann den Campus 3D-Druck. Dort sind schwerpunktmäßig die Produktion von Prototypen- und Designteilen, aber auch Serienbauteilen, die Forschung und die Qualifizierung von Mitarbeitern an einem Ort vereint. Zum Zeitpunkt der Eröffnung arbeiteten bereits etwa 80 Mitarbeiter in diesem Zentrum mit ca. 50 industriellen 3D-Drucksystemen für Metall- und Kunststoffteile. Darüber hinaus werden mehr als 50 weitere Anlagen an verschiedenen Standorten eingesetzt.

### 1.1.1 Wettbewerbsvorteile dank 3D-Druck

In den letzten 30 Jahren hat sich die additive Fertigung wie schon beschrieben Schritt für Schritt weiterentwickelt. Heute bieten die unterschiedlichen Technologien und Verfahren des 3D-Drucks die Grundlage zur Herstellung einer breiten Produktpalette und ermöglichen gleichzeitig völlig neue Wege der Industrialisierung. Dabei liegen ungeahnte Potenziale nicht nur in der Fertigung von Produkten, sondern auch in der Veränderung von Abläufen und des gesamten Umfelds. Und diese Potenziale sind vielseitig, denkt man beispielsweise an die Reduzierung von Lagerbeständen, da Teile gezielt bei Bedarf gefertigt werden können. Eine Revolution im Ersatzteilwesen in der Fahrzeug- oder Luftfahrtindustrie bahnt sich an. Darüber hinaus sind Kosteneinsparungen durch kürzere Vorlauf- und Montagezeiten zu erzielen. Damit lassen sich durch 3D-Druck bewährte Wertschöpfungsketten infrage stellen. In Verbindung damit reduziert sich der Verwaltungsaufwand und somit eröffnen sich weitere Kostenpotenziale.

Wie wir noch im Rahmen von Kapitel 3 zur Wettbewerbsfähigkeit ausführlich schildern werden, resultieren aus den neuen Gegebenheiten der additiven Fertigung deutliche Vorteile für die Unternehmen, und dabei ganz besonders mit Blick auf die Kunden. Oft erstaunt dabei die Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten.

- **Kleine Stückzahlen und Prototypenbau**: Der 3D-Druck-Ansatz bietet eine ganze Menge von Vorteilen bei Objekten mit kleinen Stückzahlen, aber hohem Entwicklungsaufwand.
- **Individualisierung**: Im Sinne der später noch diskutierten Mass Customization erlaubt der 3D-Druck einen hohen Grad an Individualisierung sowie die Produktion von Varietäten und Unikaten.
- **Sehr kleine oder komplizierte Formen**: Mittels additiver Fertigung lassen sich auch sehr kleine Objekte sowie sehr komplizierte Formen realisieren, wobei in der Zwischenzeit auch große und komplexe Projekte, wie der Bau von Häusern oder Brücken, mittels 3D-Druck möglich sind.
- **Effizientere Produktion** dank optimierter bzw. sogar substituierter Fertigungsprozesse: Die additive Fertigung erlaubt nicht nur häufig eine werkzeuglose Fertigung, sie optimiert oder ersetzt gar konventionelle Fertigungsmethoden.
- **Bedarfsnahe Fertigung** (örtlich oder zeitlich)!
- **Insourcing statt Outsourcing**: Gerade in Verbindung mit einer bedarfsnahen, oft dezentralen Produktion kommt es immer häufiger zu einer Abkehr von früheren Outsourcing-Aktivitäten zugunsten von Insourcing.
- **Optimierung der Supply Chain**: Durch den Einsatz des 3D-Drucks ergeben sich ganz neue Möglichkeiten für die komplette Supply Chain durch eine deutlich höhere Effektivität und Effizienz.
- **Neue Endprodukte**: Neue Technologien, neue Werkstoffe oder Materialkombinationen und komplexere Geometrien eröffnen auch die Umsetzung völlig neuer Produkte.

Wichtig zu erwähnen ist, dass es sich hierbei nur um einen Auszug der Einsatzmöglichkeiten handelt und sich immer neue Einsatzfelder bilden. Doch wie dem auch ist, die gezielte Verwendung des 3D-Drucks führt zu großen Wettbewerbsvorteilen.

**Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit**: Die additive Fertigung bietet Industrieunternehmen enorme Wettbewerbsvorteile, sowohl bei der Generierung neuer Kundennutzen als Basis für höhere Produktmargen und Renditen als auch bei der effizienteren Steuerung der Fertigungsprozesse mit einer Vielzahl von Kostenvorteilen.

All die Eigenschaften, die zu höheren Mehrwerten für die Kunden führen, werden wir in Kapitel 3 zum Themenfeld des Kundennutzens intensiver erläutern (siehe Abschnitt 3.2). Zu diesen zählen der Prototypenbau bzw. die Fertigung kleinster Stückzahlen, die Erstellung sehr kleiner oder komplizierter Formen, die Funktion einer (zeitlich und örtlich) bedarfsnahen Fertigung, die Möglichkeiten einer hohen Individualisierung im Sinne der Mass Customization sowie die Erstellung ganz neuer Lösungen für die Kunden.

Die übrigen Vorteile der additiven Fertigung mit Fokus auf die effizientere Steuerung der Leistungsprozesse, wie optimierte bzw. substituierte Fertigungsprozesse, Insourcing statt Outsourcing sowie eine bessere Steuerung der Supply Chain, werden im Abschnitt 3.1 im Rahmen der Kostenvorteile und operativen Excellence ausführlich erläutert.

### 1.1.2 Vielzahl an Materialien

Im täglichen Leben haben wir ständig Umgang mit irgendwelchen Gegenständen, die für besondere Zwecke mit spezifischen Eigenschaften hergestellt wurden. Diese Gegenstände sind je nach Zweck und geforderten Eigenschaften wiederum aus unterschiedlichsten Materialien hergestellt worden. Dies geht so weit, dass wir uns im Alltag häufig hierüber gar keine großen Gedanken machen.

Bei der Auswahl dieser Materialien können jedoch neben beispielsweise mechanischen Eigenschaften auch weitere Faktoren wie beispielsweise Kosten, geforderte Lebensdauer oder Haltbarkeit des Gegenstands eine Rolle spielen. Die richtige Auswahl des Werkstoffes hat also einen entscheidenden Einfluss auf das fertige Produkt. Zunächst ist der beste Werkstoff der, der aus technischer Sicht die beste Kombination von geforderten Eigenschaften zeigt. Zusätzlich müssen jedoch auch Kosten und Verfügbarkeit der Materialien in die Betrachtung einfließen.

Beim Design und der Konstruktion eines Produktes fällt der Werkstoffauswahl also eine wichtige Rolle zu, um ein für alle Aspekte und Anforderungen taugliches Material zu finden. In diese Anforderungen gehen technische Faktoren wie Struktur, Funktionalität, Korrosionsbeständigkeit ein. Diesen objektiven Anforderungen steht jedoch häufig ein weiterer Aspekt gegenüber: die optische Erscheinung, die für Verkauf und Marketing eine wichtige Rolle spielt. Im privaten und auch geschäftlichen Bereich verbinden wir damit auch ganz stark den Punkt Qualität eines Produkts bzw. den individuellen Wert für jeden Einzelnen.

In der heutigen Zeit haben technische Anforderungen meist nicht die höchste Priorität – vielmehr stehen eher wirtschaftliche Aspekte an erster Stelle. Kosten haben für Kunden häufig mehr Einfluss auf die Entscheidung zur Anschaffung eines Produktes als die Lebensdauer. Betrachtet man dazu als Beispiel die Korrosion, so zeigt sich: Da Kosten einen wichtigen Faktor bei einem Produkt darstellen, wird bei Stählen manchmal aus Kostengründen auf Stähle mit geringerem Gehalt an Legierungselementen zurückgegriffen, da die Rohstoffpreise für höhere Legierungen die Kosten des Produkts zu sehr in die Höhe treiben.

# Index


## Symbole

3D-Biodruck *65*
3D-Druck *2*, *8*
3D-Druckdaten *217*
3D-Drucker-Hardware *208*
3D-Druck-Hardware *209*
3D-Druckkosten *258*
3D-Druck-Roboter *82*
3D-Druck-Software *210*
3D-Drucksystem *9*, *208*
3D-Modell *218*
3DS *221*
3D-Siebdruck *33*
3MF *221*
4D-Druck *83*

## A

Abonnement *264*
ABS *18*
Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer *18*
ADAM *52*
additive Fertigung *8*
Additive Manufacturing *3*
Agents *48*, *149*
AKF *34*
Aligner *69*
Aluminium *21*
Ambidextrie *156*
AMF *221*
Arburg Kunststoff-Freiformen *34*
Atomic Diffusion Additive Manufacturing *52*
Automobilbranche *194*
Automobilindustrie *59*, *179*
Autonomie *225*

## B

BAAM *50*
Barrieren *152*, *201*
Bauprozess *80*
Bauteildigitalisierung *213*
bedarfsnahe Fertigung *13*, *108*, *193*
Big Area Additive Manufacturing *50*
Binder Jetting *29*
Bionik *188*
Bioprinting *71*
BJT *29*
BLEND *221*
Blockchain *234*
Bluesint PA 12 *56*
BMD *34*, *55*
Bound Metal Deposition *34*, *55*
Brillengestelle *66*

## C

CAD-Formate *219*
CAD-Modelle *219*
CAD-Programme *9*
CC *33*
CLIP *32*
$CO_2$-Einsparpotenzial *145*
COLLADA *220*

Condition Monitoring *218*
Consumerisation *92*
Continuous Liquid Interface Production *32*
Contour Crafting *33*

D

Dateiformate *213*
Datendrehscheiben *251*
Dateneigentum *230*
Datenmodell *2*, *233*
Datenökonomie *227*
Datenschutz *230*
Datenzentrierung *251*
Dekarbonisierung *135*
Denkmustern *205*
Dentaltechnik *68*
Detailing Agent *46*
Digitale Lichtverarbeitungs-Technologie *68*
digitale Plattformen *244*
digitaler Schatten *217*
digitaler Zwilling *217*, *237*, *243*
digitales Lager *107*, *113*, *175*
digitales Lagerhaus *175*
digitales Modell *9*
digitale Transformation *228*
Digital Light Processing *30*
Digital Warehouse *175*
Direct Manufacturing *7*, *11*
Disintermediation *239*
Disruption *90*, *147*
Distributed Ledger Technology *234*
DIY *123*
DLP *30*, *68*
DLT *234*
Do It Yourself *123*
Drohne *61*
Druckerhersteller *209*
DSGVO *228*
Duroplaste *17*
DWG *222*

E

EBM *29*
Effizientere Produktion *13*
Einnahmequellen *260*
Elastomere *17*
Electron Beam Melting *29*
Elektronen-Strahlschmelzen *29*
Engpässe *195*
Entbinder *56*
Ersatzteile *175*
Ertragsmodell *166*, *255*, *261*
ESG *144*
EU-Förderung *116*

F

FabLabs *117*, *196*
FabShops *196*
Fachpromotoren *151*
FBX *221*
FDM *39*, *40*
FFF *29*
filigrane Formen *188*
FLM *29*
Flugzeugtriebwerk *62*
Freemium *262*
Functograph *83*
Funktionsspezialist *253*
Fused Deposition Modelling *39*, *40*, *209*
Fused Filament Fabrication *29*
Fused Layer Modelling *29*
Fusing Agent *46*

G

gaia-X Initiative *238*
Gasturbinenschaufeln *64*
geistiges Eigentum *228*
Genchi Gembutsu *149*
Geometrien *11*, *126*
Geschäftsmodell *162*, *165*
Geschäftsmodellinnovation *89*, *166*
Gewichtsvorteile *139*
Gips *24*

Glas *23*
Glycerol *19*
Godfathers *154*
Gold *22*
Gradientenwerkstoffe *25*
GraMMaCAD *25*

H

Hartmetalle *82*
Häuser *78*
High Impact Polystyrene *18*
HIPS *18*
Hybridverfahren *49*

I

IGES *219*
Immobilien *81*
Immobilienwirtschaft *78*
Informationsdefizit *153*
Insourcing *174*
Intellectual Property *122*, *228*
Intermediär *104*
Investitionen *257*

J

Just-in-Time (JiT) *108*

K

Kano-Modell *202*
Keramik *23*
Klasse vor Masse *151*
Kleidung *85*
komplizierte Formen *13*
Konsumgüterindustrie *72*
konventionelle Fertigung *5*
Kostenführer *167*
Kostenstruktur *256*
Kostenvorteile *172*, *257*
Kundengruppen *195*
Kupfer *23*

L

Laserauftragschweißen *32*
Laser Beam Melting *29*
Laser-Sintern *28*
Laser-Strahlschmelzen *29*
Laterales Denken *205*
LBM *29*
LCM *33*
Leasing *265*
Lebensmittel *75*, *76*
Lebensmitteltechnik *75*
Leistungsarchitektur *206*
Leistungserstellung *165*
Lieferkette *175*
Light-Directed electrophoretic Deposition *34*
Lithography-based Ceramic Manufacturing *33*
Lizenzen *122*
LLM *29*
LMD *32*
Losgröße *173*
Losgröße 1 *185*
LS *28*
Luft- und Raumfahrt *53*, *61*, *85*, *178*

M

MaaS *196*, *215*, *260*
Machtpromotor *151*
Manufacturing *29*
Manufacturing-as-a-Service *196*, *215*, *260*
Market Pull *161*
Marktplatz *246*
Marktplätze *245*
Maschinenbau *62*
Mass Customization *13*, *185*
Materialien *14*
Medizintechnik *64*, *189*, *228*
Mehrkomponentenverfahren *48*
Mehrwerte *180*
MELATO *32*
Metal Laminated Tooling *32*
Metall-Pulver-Auftragsverfahren *33*, *50*

minimal brauchbares Produkt *200*
minimal wertvolles Produkt *202*
Minimum Viable Product *199*, *276*
Missbrauch *228*
mit Kunden lernen *203*
MJF *39*, *45*
MJM *29*
Monetarisierung *201*, *226*
Moonshot Thinking *206*
Motivationsdefizit *154*
MPA *33*, *50*
MTL *222*
Multi-Jet Fusion *39*, *45*
Multi-Jet Modelling *29*
Multi-Side-Effekt *248*
MVP *159*, *200*
MWP *159*, *202*

N

Nanobereich *190*
NextGenAM *225*
Nutzenführer *167*, *180*
Nutzenversprechen *165*

O

OBJ *220*
Ohnmacht *154*
Ökosysteme *252*
on Demand *163*, *193*
One-Shot-Technik *177*
Organisationsdefizit *154*
Organisationsinnovation *89*
Orthesen *67*
Outsourcing *215*

P

Painspotting *204*
Paradigmenwechsel *206*
Part Screening *213*
Pay-per-Use *263*
PCM *26*
PEEK *18*
PEI/ULTEM *19*
Perspektivenwechsel *205*
PETG *19*
PHA *20*
Phase-Change-Material *26*
Pipeline-Prozesse *104*
PLA *20*
Plattform *107*, *244*
Plattformökonomie *244*
PLY *220*
Polyamid *20*
Polyetheretherketon *18*
Polyetherimid *19*
Polyethylenterephthalat *19*
Polyhydroxyfettsäure *20*
Poly-Jet *209*
Polylactide *20*
Prediction *196*, *264*
Private Key *241*
Produkteigenschaften *180*
Produkthaftung *230*
Produktinnovationen *88*
Produktpiraterie *232*
Prosumer *121*, *239*
Prothesen *67*
Prototyp *173*, *184*, *199*
Prototypen *6*
Provisionen *264*
Prozessenergie *140*
Prozessinnovationen *88*
Prozesspromotor *151*

Q

Qualifikationsdefizit *152*
Quick Wins *158*, *199*

R

Rapid Prototyping *6*, *10*, *179*, *184*
Rapid Tooling *10*
RAR *222*
Rasierer *187*
Razor & Blade *262*
Redesign *177*

Reengineering *177*
Re-shoring *119*, *144*

## S

Saas *264*
SCAD *221*
Schiffsbau *176*
Schmuck *187*
Schuhe *72*
Screw Extrusion Additive Manufacturing *34*, *53*
SEAM *34*, *53*
Security Token *242*
Selective Absorption Fusion *209*
Selective Heat Sintering *32*
Selective Laser Melting *29*, *39*, *42*
Selective Laser Sintering *39*, *44*
Sensibilisierung *153*
Serviceleistungen *181*
Serviceökonomie *181*
Serviceverständnis *103*
SHS *32*
Sichtbarkeit *217*
Silber *22*
Simulation *224*
SKP *221*
SL *28*
SLDPRT *221*
Slicer-Software *41*, *211*
Slicing *55*
SLM *29*, *39*, *42*
SLS *39*, *44*
Smart Contracts *238*
Smartglasses *65*
Software-as-a-Service *264*
Sonnenbrillen *66*
STEP/STP *219*
Stereolithografie *5*, *28*, *210*
STL *219*
STL-Format *218*
Substitution *137*, *176*
subtraktive Fertigung *3*, *4*
Sumpf *106*, *168*
Supply Chain *13*
Systemintegrator *253*

## T

TCO *173*, *256*
Technology-Push *161*
Thermoplaste *17*
Thermotransfer-Sintern *30*
Think Big, Start Small, Move Fast *155*
Titan *22*
Token *240*
Total Cost of Ownership *173*, *256*
toxisches Geschäftsmodell *164*
Transparenz *222*
TTS *30*

## U

UAM *50*
Überschuss-Lagerhaltung *176*
U-Boot-Strategie *158*
U-Boot-Theorie *153*
Ultrasonic Additive Manufacturing *50*
Unikate *173*
Unkenntnis *153*
Urheberrechte *230*
Utility Token *242*

## V

VDI-3405-Richtlinie *10*
Veränderungstypen *155*
Verified Credentials *238*
Vermietung *265*
Versorgungslücken *195*
versteckte Objekte *233*
Virales Management *158*
Vorhersehbarkeit *196*
VRML *220*

## W

Wasserzeichen *231*
Watermark *231*
Wax Deposition Modelling *33*

WDM *33*
Werkstoff *15*
Werkzeugbau *62*
Wettbewerbsfähigkeit *13*, *161*
Wettbewerbsvorteile *12*, *248*
Wohnhauses *79*

## X

X3D *220*

## Z

Zahnbürsten *70*
Zahnersatz *68*
Zahnkronen *69*
Zahnmedizin *70*
Zahnspangen *69*
Zwei-Photonen-Lithografie *34*
Zwischenhändler *104*
Zylinderschlösser *63*