

---

# 3D-Druck: Überblick über Technologie, Anwendungen, Chancen und Grenzen

# 2

Pizza, Organe, Häuser oder Zahnersatz: 3D-Drucker können beinahe jeden Gegenstand aus vielfältigen Materialien herstellen. Die Medien berichten täglich über neue Anwendungsbeispiele zu den scheinbar grenzenlosen Möglichkeiten der Technologie, sodass sie bereits als industrielle Revolution gefeiert wird: „3D printing has the potential to revolutionize the way we make almost everything“ (Barack Obama). Die Vision: Eine Welt, in der sich jeder Mensch zu Hause druckt, was er benötigt. 3D-Druck verspricht vielfältige Vorteile im Hinblick auf Umsatzsteigerung über individualisierte Produkte und Kostensenkungen in vielen Bereichen der Wertschöpfungskette. Allerdings lernen Hersteller derzeit, dass auch eine revolutionäre Technologie an ihre Grenzen stößt, insbesondere bei der Massenproduktion. Daher sind im Folgenden nicht nur die Chancen des 3D-Drucks, sondern ebenso technologische und wirtschaftliche Grenzen aufzuzeigen.

---

## 2.1 Technologie und Anwendungen

3D-Druck als Technologie ist auf die Stereolithografie zurückzuführen und wurde in den frühen 1980er Jahren für **Rapid Prototyping** entwickelt, um Produktparameter in der Produktentwicklungsphase zu analysieren und so die Entwicklungszeit (time-to-market) zu verkürzen [5]. Heutzutage stehen eine Vielzahl von 3D-Druck-Technologien und Materialien zur Verfügung, die ebenso im Bereich des **Rapid Tooling** (Werkzeug- bzw. Vorrichtungsbau) und im **Rapid Manufacturing**, also der Fertigung von Komponenten für ein Endprodukt oder das Endprodukt selbst, eingesetzt werden [6]. Beim 3D-Druck werden dreidimensionale Gegenstände aus einem oder mehreren Materialien schichtweise

mittels physikalischer oder chemischer Schmelz- oder Härtingsverfahren aufgebaut. Entscheidendes Merkmal ist der **schichtweise (additive) Aufbau**, bei dem durch Hinzufügen, Auftragen und Ablagern von Material anhand eines digitalen Modells ein Objekt erstellt wird – im Gegensatz zu subtraktiven Fertigungsverfahren wie z. B. Fräsen oder Bohren, bei denen formgebende Werkzeuge zum mechanischen Abtragen von Material genutzt werden.

Die **Druckverfahren** sind durch eine große Vielfalt gekennzeichnet, sowohl im Hinblick auf das Drucken an sich als auch im Hinblick auf die verwendeten Materialien. Stark vereinfacht lassen sich zwei Verfahrensgruppen unterscheiden. Bei der ersten Verfahrensgruppe „Heißklebepistole“ trägt der Druckkopf dünnste Schichten z. B. aus geschmolzenem Kunststoff auf: Mit jeder Schicht wächst das Werkstück in die Höhe. Bei der zweiten Verfahrensgruppe „Sandkasten“ ist die Ausgangsbasis ein z. B. mit Metallpulver gefülltes Gefäß. Bei einigen Varianten dieses Verfahrens fährt der Druckkopf ähnlich wie bei einem Tintenstrahldrucker über das Pulverbett und trägt flüssiges Bindemittel auf, sodass das Material an den gewünschten Stellen „verklebt“ wird; danach wird die nächste Schicht aufgetragen. Eine andere Variante zum schichtweisen Aufbau eines Objekts ist das punktgenaue Beschießen von Pulver oder Flüssigkeit mit einem Lichtstrahl zum Härten von lichtempfindlichen Polymeren oder mit einem Laser- oder Elektronenstrahl zum Schmelzen z. B. von Metallen. Durch das Aushärten bzw. Schmelzen wird so aus immer wieder neu aufgetragenen Schichten ein

**Tab. 2.1** Überblick über Druckverfahren, Prinzipien und Materialien

Gruppe	Basis	Prinzip	Druckverfahren (Beispiele)	Materialien (Beispiele)
<b>Schmelzschichtung</b>	Geschmolzene Materialien	<b>Schmelzschichtung</b>	Fused Deposition Modeling (FDM) Fused Filament Fabrication (FFF) Fused Layer Modeling (FLM) Layer Plastic Deposition (LPD)	Kunststoffe (z. B. ABS, PLA, Nylon, PET, ASA, POM, PP) und Kunststoffmischungen (z. B. Holz, Stein, Karbon, Kupfer)
<b>Aushärten</b>	Flüssige Materialien	<b>Druckkopf</b>	PolyJet (PJM) Multi-Jet Modeling (MJM) Wachdruck (3DWP)	Kunstharze, UV-sensitive Flüssigkunststoffe, Wachs
		<b>Stereolithografie mit Laser</b>	Stereolithografie (STL, SLA)	Kunstharze, lichtempfindliche Flüssigkunststoffe,
		<b>Stereolithografie mit Maske</b>	Digital Light Processing (DLP) Film Transfer Imaging (FTI)	Epoxidharze, Elastomere, Acrylate
<b>Aufschmelzen</b>	Pulver	<b>Sintern</b>	Selektives Lasersintern (SLS) Selective Heat Sintering (SHS)	Kunststoffe, Metalle, Legierungen, Keramik
		<b>Schmelzen</b>	Selektives Laserschmelzen (SLM) Elektronenstrahlschmelzen (EBM)	
<b>Verkleben</b>	Pulver, Papier	<b>Schichten Verkleben Cutting</b>	Laminated Object Modeling (LOM) Layer Laminated Manufacturing (LLM) 3DP, PLT	Gips Papier
<b>Sonderformen</b>	Div.	<b>Diverse</b>	Contour Crafting (CC) etc.	Beton, Wachs, Teig, Slikon, Schokolade, Weingummi

dreidimensionales Objekt geformt. Die Basis dafür ist ein dreidimensionales digitales Modell des Objekts.

Tab. 2.1 bietet einen differenzierten Überblick über die Fertigungsprinzipien, Druckverfahren und beispielhafte Materialien. Die Vielfalt der Bezeichnungen der teilweise technisch vergleichbaren Verfahren resultiert aus der Vielzahl an Herstellern und Patenten.

Die Anwendungsbereiche sind vielfältig. Sie reichen z. B. von Präsentations- und Funktionsmodellen, künstlerischen Objekten, Ersatzteilen, Gussformen bis hin zur (Klein-)Serienproduktion. Es scheint fast alles druckbar, zumal laufend weitere **Materialien** hinzukommen: Gips, Keramik, verschiedenste Kunststoffe, Glas, Holzverbindungen, Schokolade, Gold, Titan, Lebensmittel etc. Aktuell wird am Druck eines funktionsfähigen Herzens aus organischem Material geforscht.

**Tab. 2.2** Schritte zur Erstellung eines 3D-Drucks

Schritt		Aktivitäten
<b>1</b>	<b>Digitales Design des 3D-Modells</b>	Erstellen der digitalen 3D-Daten, z. B. mittels CAD-Software (Computer Aided Design) oder Scan
<b>2</b>	<b>Vorbereitung des Bauprozesses</b>	
2.1	Konvertierung des 3D-Modells in 3D-Druck-Format	Z. B. Konvertierung in STL-Datei (Standard Triangle Language bzw. Standard Tessellation Language) zur weiteren Aufbereitung für den Druck
2.2	Aufbereitung der konvertierten 3D-Datei	Z. B. Orientierung, Stützstruktur, Slicing, Meshing
2.3	Vorbereitung des Druckers	Z. B. Kalibrieren, Vorheizen, Bestücken mit Druckmaterial
<b>3</b>	<b>Bauprozess</b>	
3.1	Physische Herstellung	Schichtweiser Druck des Objekts
3.2	Entnahme des Objekts	Ggf. Zeitbedarf für Auskühlung bzw. -härtung
<b>4</b>	<b>Ggf. Nachbearbeitung</b>	
4.1	Entfernung des Stützmaterials	In Abhängigkeit von der Geometrie des Objekts und des 3D-Druck Verfahrens
4.2	Oberflächenbehandlung	In Abhängigkeit von den Qualitätsanforderungen
<b>5</b>	<b>Nutzung des gedruckten Objekts</b>	

Um ein tieferes Verständnis für den Einsatz von 3D-Druck als Fertigungsverfahren zu schaffen, beschreibt Tab. 2.2 schematisch die Schritte zur Erstellung eines gedruckten Objekts.

---

## 2.2 Änderungen der Supply Chain

Stellen Sie sich folgendes Szenario vor: Statt Schuhe aus einem vorgefertigten Sortiment zu wählen (oder auf die Lieferung zu warten), designen Sie Ihre Schuhe selbst oder kaufen im Internet die Design-Rechte. Die neuen Schuhe drucken Sie einfach zu Hause aus oder lassen sie von einem Druckdienstleister zusenden. Dies ist keine Vision, sondern bei zahlreichen eCommerce-Anbietern bereits Realität.

In konventionellen Supply Chains (Wertschöpfungs-, Lieferketten) erbringen ein oder mehrere Unternehmen arbeitsteilig eine Leistung für einen Endkunden. Die Wertschöpfung ist durch hohe Investitionen in Maschinen und Infrastruktur gekennzeichnet, sodass die Produktion hoher Stückzahlen angestrebt wird. Aufgrund der Vielzahl der beteiligten Partner und der Erstellung von Werkzeugen und Formen dauert es lange von der ersten Produktidee bis zum ersten Verkauf. Transport- und Lagerkosten bestimmen wesentlich die Höhe der Gesamtkosten in der Supply Chain.

Bei einer Supply Chain mit 3D-Druck sind **radikale Strukturänderungen bzw. Verkürzungen** denkbar, indem komplette Wertschöpfungsstufen umgangen werden (sog. **Disintermediation**). Im Extremfall des Drucks beim Endverbraucher entfallen Teile-Lieferanten, Produktionsstufen, Transportdienstleister und lokaler Handel: Statt physischen Produkten bestimmen Transaktionen digitaler Daten und Druck-Rohstoffe die Supply Chain. Die Eigenproduktion mit hoher Fertigungstiefe findet nah am Ver- bzw. Gebrauchsort statt, sodass Transportkosten und -zeiten sinken. Durch die Flexibilität des 3D-Druckers sind Investitionen in Spezialmaschinen und Werkzeuge niedriger.

---

## 2.3 Chancen

In der Produktentwicklung ist 3D-Druck seit Jahrzehnten im Einsatz, da der Druck von Prototypen (Rapid Prototyping) die Zeit von der Produktidee bis zur Markteinführung (time-to-market) signifikant verkürzt [7]. Im Hinblick auf die Attraktivität und die Einsatzgebiete für die Serienproduktion scheinen sich vor

allem die Luftfahrtindustrie [8], die Automobilindustrie und die Elektronikindustrie für den Einsatz des 3D-Drucks zu eignen [9]. Diese Branchen profitieren besonders von der **Gewichtersparnis**, wenn Teile in Wabenstruktur mit Hohlräumen gedruckt werden (im Gegensatz zu massiven Objekten bei Spritzguss- oder subtraktiven Fertigungsverfahren). Dies führt zu signifikanten Senkungen des Treibstoffverbrauchs im operativen Betrieb der Endprodukte wie z. B. Flugzeuge und Autos.

3D-Druck ermöglicht individuell nach Kundenwunsch „maßgeschneiderte“ **Produkte**, mit denen auch kleinste Marktsegmente profitabel bedient werden können, ohne dabei auf eine Vielzahl von produktspezifischen Fertigungsanlagen und Werkzeugen angewiesen zu sein – es gibt nur ein digitales Modell, das jederzeit verändert werden kann. Dies schafft in vielen Branchen wie z. B. der Medizintechnik mit personalisierten Implantaten große Umsatzpotenziale im Rahmen des sog. **Mass Customizing**, d. h. der kundenindividuellen Fertigung, im Extremfall mit der Stückzahl bzw. Losgröße 1 wie z. B. bei einer individuellen Anpassung eines Hörgeräts an das Ohr des Patienten. Durch die geringere Investition in produktspezifische Maschinen und Werkzeuge sinkt auch das betriebswirtschaftliche Risiko bei der Einführung neuer Produkte [10].

Eine Stärke des 3D-Drucks sind die **Freiheitsgrade beim Produktdesign**: Fast alle Formen sind realisierbar – selbst komplexe Geometrien, die mit konventionellen Fertigungsverfahren schwer oder gar nicht herstellbar sind [5]. Es besteht keine direkte Beziehung zwischen der Produktkomplexität und den Herstellungskosten, da die Komplexität des Designs nicht die Komplexität der Werkzeuge oder Fertigungsschritte bestimmt [10]. Dabei ist die Kombination verschiedener Materialien möglich. Selbst frei bewegliche Teile (z. B. Kugelenke) können in einer einzigen monolithischen Struktur gedruckt werden, die nicht zusammengesetzt werden muss [2]. Die geringere Anzahl an Teilen (**Funktionsintegration**) und Fertigungsschritten senkt insbesondere über die Lohn- bzw. Montagekosten die Herstellkosten [1]. Die Integration einer (vorher zu montierenden) Baugruppe in einem einzigen Teil kann ebenso die Anzahl der Wertschöpfungsstufen der Supply Chain reduzieren, sodass z. B. die Koordinationskosten mit einem Teile-Lieferanten entfallen [1]. Durch die Verringerung der Lohn- und Koordinationskosten kann ein sog. **Reshoring**, d. h. die Rückverlagerung der Produktion aus sog. Billiglohnländern in die Absatzregion, wirtschaftlich werden.

3D-Druck bietet wesentliche Vorteile im Vergleich zu Spritzguss- oder subtraktiven Fertigungsverfahren im Hinblick auf **Rüstkosten** und **Kosten für Werkzeuge, Vorrichtungen und Formen** [10]. Ohne Werkzeugwechsel beim

Wechsel der Fertigung von einem Produkt A auf ein Produkt B werden die Rüstkosten stark reduziert oder entfallen im Extremfall. Damit stellen Rüstkosten ebenso keinen Treiber für große Lose bzw. Kampagnenfertigung dar, mit denen bei konventionellen Fertigungsverfahren Stückkosten durch Mengendegressionseffekte gesenkt werden [2]. Kleine Stückzahlen kundenindividueller Produkte werden wirtschaftlich. Hohe Bestände an Endprodukten durch rüstkostengetriebene große Lose, denen keine konkrete Nachfrage gegenübersteht, gehören der Vergangenheit an – zumindest, wenn die Druckgeschwindigkeit bzw. die Ausbringungsmenge je Zeiteinheit mit der Absatzgeschwindigkeit synchronisiert ist. Statt physischer Bestände an Endprodukten „lagern“ Firmen nur digitale 3D-Daten.

Wenn Produkte bzw. Teile erst bei konkreter Nachfrage gedruckt werden, entfallen **Lagerkosten** und Verschrottungsrisiken unverkaufter Bestände [2]. Somit bietet 3D-Druck insbesondere Kostensenkungspotenziale bei einem Produktportfolio, das sich durch eine große Vielfalt an Varianten mit geringer Stückzahl („high mix, low volume“) auszeichnet oder stark schwankende bzw. sporadische Nachfrageverläufe in Kombination mit hoher Prognoseungenauigkeit aufweist. Dies trifft z. B. auf das **Ersatzteil- und Projektgeschäft** zu. Ebenso sinken **Transportkosten**, wenn die Güter erst bei konkretem Bedarf am Ver- oder Gebrauchsort lokal gedruckt werden.

Im Vergleich zu subtraktiven Fertigungsverfahren, in denen Werkstücke durch abtragende Bearbeitung wie Fräsen und Bohren in die gewünschte Form gebracht werden, fällt weniger Abfallmaterial an [2]. Petrovic et al. berichten von einer **Abfallreduzierung** von 40 % bei Metalleanwendungen im Vergleich zu subtraktiven Fertigungsverfahren [11]. Zudem kann ein Großteil des Abfallmaterials beim 3D-Druck für die Fertigung wiederverwendet werden.

Auch in indirekten Bereichen wie z. B. der Beschaffung bestehen Kostensenkungspotenziale. Anstatt eine Vielzahl an Komponenten von zahlreichen Lieferanten zu bestellen, wird nur noch einmal eine große Menge an z. B. Pulver von einem Lieferanten bestellt. Dadurch sinken die **Prozesskosten im administrativen Bereich**.

Trotz eines rasanten Anstiegs der Qualität der Druck-Erzeugnisse und eines rapiden Preisverfalls setzen Hersteller 3D-Druck primär bei der Produktentwicklung ein. Ob und wann 3D-Druck in der Massenfertigung eine Rolle spielen und damit die viel beschworene industrielle Revolution auslösen wird, hängt von der Entwicklung im Hinblick auf die aktuellen Grenzen der Technologie ab.

## 2.4 Aktuelle Grenzen

Vor allem die zu geringe Geschwindigkeit des Drucks und qualitative Herausforderungen limitieren die Verbreitung für die Massenproduktion [12]. Die **Geschwindigkeit** bestimmt sich vor allem durch den Zeitbedarf fürs Aushärten der einzelnen Schichten bis zum Aufbringen der nächsten Schicht. Je detaillierter das Objekt, desto mehr Durchgänge, desto länger die Produktionszeit. Um eine hohe Stückzahl in kurzer Zeit herzustellen, sind traditionelle Verfahren vielfach schneller und kostengünstiger. Eine weitere Herausforderung ist die **Nachbearbeitung**. So ist bei Objekten, bei denen die erste Schicht als Überhang in der Luft „schwebt“, Stützmaterial erforderlich. Dieses ist nachher zeitaufwendig zu entfernen. Weiterer Zeitbedarf ergibt sich ggf. für Oberflächenbehandlung und Reinigung. Zudem wird die Kompliziertheit der Technik vielfach unterschätzt: Umsetzbare digitale Modelle erfordern neben CAD-Kenntnissen viel Erfahrung, um Ausschuss zu vermeiden.

In der branchenübergreifenden Studie der FH Münster [13] betonten Unternehmen folgende **Qualitätsprobleme**: Größe der Teile (Dimensionen des Bau-raums), Maßhaltigkeit (Einhalten von Toleranzen bzw. exakte Reproduzierbarkeit der Objekte bei großer Stückzahl), mechanische Eigenschaften, Temperaturbeständigkeit sowie Verbundwirkungen mit anderen Komponenten (z. B. Lacke, Kleber). Mitunter bilden sich unerwünschte Hohlräume, auch ist die Oberfläche teilweise zu rau. Fehlende Standards für Materialeigenschaften und Objektqualität werfen Fragen im Hinblick auf Zuverlässigkeit der Erzeugnisse und Produkthaftung auf. Die Qualität der Druckrohstoffe ist ein weiterer limitierender Aspekt. Beispielsweise sind viele UV-sensitive Harze und Granulate giftig, sodass sie nicht für alle Produkte einsetzbar sind. Zudem unterscheidet sich der Grad der Wiederverwendbarkeit für die Produktion stark je nach Material. Die weitere Ausprägung internationaler Standards würde die Verfügbarkeit sicherer und zuverlässiger Materialien, aber auch Technologien und Prozesse, fördern.

Viele der bestehenden **CAD-Programme** (Computer Aided Design; Software für die digitale Konstruktion) sind vor allem auf Produkte für konventionelle Fertigungsverfahren wie z. B. Spritzguss ausgelegt, insbesondere auf kreisförmige Objekte und gerade Linien. Somit können die geometrischen Freiheitsgrade des 3D-Drucks in Bezug auf das Produktdesign nur bedingt ausgenutzt werden. Zudem zeichnen sich viele CAD-Programme nicht durch Benutzerfreundlichkeit aus. Beide Aspekte schränken die Nutzung der Potenziale des 3D-Drucks beim Design stark ein, insbesondere hinsichtlich einer „Demokratisierung“ der Produktentwicklung. Komplexe 3D-Modelle erfordern außerdem viel Speicherkapazität.

Den einen Drucker als „eierlegende Wollmilchsau“ für alle Produkte gibt es nicht: Ein Drucker, der Plastik schmilzt und in dünnen Schichten aufträgt, kann keine Metalle verarbeiten. Schmelzpunkt und Abkühleigenschaften sind nur zwei Eigenschaften, die sich je Material unterscheiden. Den Drucker für Metalle im Privathaushalt wird es aufgrund hoher Schmelztemperaturen und Sicherheitsaspekten so schnell nicht geben. Kunststoffdrucker sind jedoch bereits für wenig Geld für den Hausgebrauch erhältlich.

Viele Fragen zur **ökologischen Nachhaltigkeit** sind unbeantwortet. Einerseits bietet 3D-Druck viele Chancen wie die Senkung des Materialverbrauchs oder die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch verbrauchernahe Produktion und die Herstellung leichterer Komponenten für die Automobil- und Luftfahrtindustrie. Andererseits birgt die Technologie ökologische Risiken: Kompensiert höheres Transportaufkommen vieler kleiner Transporte zu dezentralen „Druck-Orten“ die o. g. CO<sub>2</sub>-Einsparungen? Welche Gesundheitsrisiken entstehen z. B. durch Kleinstpartikel-Emission? Führt die Verwendung „minderwertiger“ Materialien zu einer kürzeren Lebensdauer der Produkte, sodass eine Wegwerf-Kultur gefördert wird (sog. Rebound-Effekt)? Wie können miteinander verschmolzene Materialien sortenrein recycelt oder entsorgt werden? Wie hoch ist der Energiebedarf je Stück, wenn Mengendegressionseffekte konventioneller Fertigungsverfahren wie z. B. bei Spritzgussverfahren entfallen? Hinsichtlich dieser Fragen besteht erheblicher Forschungs- und Steuerungsbedarf.





<http://www.springer.com/978-3-658-15195-9>

3D-Druck – Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit

Entscheidungsunterstützung für Unternehmen

Feldmann, C.; Pompe, A.

2016, IX, 63 S. 16 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-15195-9