

HANSER



Leseprobe

zu

3D-Druck für Führungskräfte

von Oliver Kunze, Johannes Schilp, Fabian Frommer,
Fabio Oettl und Galiya Klinkova

Print-ISBN: 978-3-446-47604-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-47728-5

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446476042>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

1	Einführung	1
TEIL A	Technologie	5
2	Kategorisierung der 3D-Druckverfahren	7
2.1	Verfahrensklassen, -familien und -arten	7
2.2	Verfahrenstaxonomie	8
2.3	Grafische Idealisierung	9
3	Technologische Übersicht der 3D-Druckverfahren	13
3.1	„In-Gas“-Druckverfahren	13
3.1.1	Material Extrusion (MEX)	14
3.1.1.1	Material Extrusion – Thermal Reaction Bond (MEX-TRB) ..	15
3.1.1.2	Material Extrusion – Chemical Reaction Bond (MEX-CRB) ..	18
3.1.1.3	Material Extrusion mit thermischer Nachbehandlung (MEX*-Heat)	19
3.1.1.4	Material Extrusion mit Faserverstärkung (MEX*-Fiber) ..	20
3.1.1.5	Druckbeispiele	21
3.1.1.6	Vorteile	22
3.1.2	Directed Energy Deposition (DED)	22
3.1.2.1	DED-Verfahren mit Drahtmaterial	23
3.1.2.1.1	Druckbeispiel	24
3.1.2.1.2	Vorteile	24
3.1.2.2	DED-Verfahren mit Pulverstrahl	24
3.1.2.2.1	Druckbeispiel	25
3.1.2.2.2	Vorteile	26
3.1.2.3	Pulverstrahlverfahren mit Überschallaufprall (DED-SSI) ..	26

3.1.2.3.1	Druckbeispiele	28
3.1.2.3.2	Vorteile	28
3.1.3	Material Jetting Technology (MJT)	28
3.1.3.1	Verfahrensunterfamilien (MJT-TRB, -CRB und -UV)	29
3.1.3.2	Druckbeispiele	31
3.1.3.3	Vorteile.	31
3.2	„In-Solid“-Druckverfahren.	32
3.2.1	Powder Bed Fusion (PBF)	32
3.2.1.1	Powder Bed Fusion – Laser Beam (PBF-LB).	32
3.2.1.2	Powder Bed Fusion – Electron Beam (PBF-EB)	35
3.2.1.3	Powder Bed Fusion – Infra Red Light (PBF-IrL)	36
3.2.1.4	Druckbeispiele	36
3.2.1.5	Vorteile.	37
3.2.2	Binder Jetting Technology (BJT)	37
3.2.2.1	Binder Jetting Technology – Single Step (BJT-SSt)	38
3.2.2.2	Binder Jetting Technology – Multi Step (BJT-MSt).	38
3.2.2.3	Druckbeispiele	39
3.2.2.4	Vorteile.	40
3.2.3	Sheet Lamination (SHL).	40
3.2.3.1	Sheet Lamination – Adhesive Joining (SHL-AJ).	40
3.2.3.1.1	Druckbeispiele.	42
3.2.3.1.2	Vorteile	43
3.2.3.2	Sheet Lamination – Ultrasonic Consolidation (SHL-UC)	43
3.3	„In-Liquid“-Druckverfahren	43
3.3.1	Vat Photopolymerization (VPP)	43
3.3.1.1	Vat Photopolymerization mit UV-Laser (VPP-UVL).	44
3.3.1.2	Vat Photopolymerization mit Maske (VPP-UVM)	46
3.3.1.3	Vat Photopolymerization mit LED (VPP-LED)	46
3.3.1.4	Vat Photopolymerization mit thermischer Nach- behandlung (VPP-*-Heat)	47
3.3.1.5	Druckbeispiele	47
3.3.1.6	Vorteile.	48
3.3.2	„In-Liquid“-Verfahren außerhalb der DIN EN ISO/ASTM 52900.	48
3.3.2.1	In Jelly Drop on Demand Deposition (JDD)	48
3.3.2.2	Weitere Verfahren außerhalb der DIN EN ISO/ASTM 52900	49

4	Verfügbare Materialien für den 3D-Druck	51
4.1	Polymere (/P)	51
4.1.1	Plastische und elastische Polymere	51
4.1.2	Faserverstärkte Polymere	52
4.1.3	Polymere mit Zusätzen	52
4.1.4	Ausgewählte 3D-Druck-relevante Polymereigenschaften.	52
4.1.4.1	Löslichkeitseigenschaften	53
4.1.4.2	Hygroskopische Eigenschaften	53
4.1.4.3	Weitere Eigenschaften	53
4.2	Metalle (/M)	53
4.3	Keramische Werkstoffe (/C)	54
4.4	Mörtel und Beton	54
4.5	Wachs	55
4.6	Papier	55
4.7	Holz	55
4.8	Lebensmittel	56
4.9	Lebendzellen	56
4.10	Materialbezogene ökologische Aspekte	56
TEIL B	Prozesse & IT	59
5	Die 3D-Druck-Prozesskette	61
5.1	Datenvorbereitung	62
5.1.1	Reverse Engineering durchführen	62
5.1.2	Konstruktion erstellen	62
5.1.3	3D-CAD-Modell erzeugen	63
5.1.4	Polygonisierung durchführen	63
5.2	Pre-Prozess	66
5.2.1	Bauteilorientierung festlegen	67
5.2.2	Supportstrukturen einfügen	69
5.2.3	Nesting durchführen	70
5.2.4	Slicing durchführen	71
5.2.5	Anlage einrichten und rüsten	72
5.3	In-Prozess	72
5.3.1	Baujob ausführen	72

5.3.2	Entnehmen/Entpacken	73
5.3.3	Optionale Finalisierungsschritte	73
5.4	Post-Prozess	74
5.4.1	Reinigung, Materialreste und Supportstrukturen entfernen	74
5.4.2	Nachbearbeiten.....	75
6	Digitalisierung der 3D-Druck-Prozesskette	81
6.1	Digitaler Zwilling, Digitaler Schatten und Digitales Modell – eine Begriffsabgrenzung	81
6.2	Einsatzmöglichkeiten des Digitalen Zwillings im 3D-Druck	84
6.3	Mehrwert des Digitalen Zwillings	86
6.3.1	Identifizierung der Einsatzmöglichkeiten	86
6.3.2	Ermittlung des Nutzens.....	87
6.3.3	Ermittlung der Kosten	89
6.3.4	Ermittlung des Mehrwerts	90
TEIL C	Ökonomie	95
7	Ökonomische Aspekte des 3D-Drucks	97
7.1	Kommerzielle Potenziale des 3D-Drucks	97
7.1.1	Individualisierung: Produktion kleiner Losgrößen	98
7.1.2	Ressourceneffizienz und Materialeinsparung.....	99
7.1.3	Resilienz und Supply Chain Disruption.....	107
7.1.3.1	Multiple Ursachen für die Vulnerabilität globaler Supply Chains	107
7.1.3.2	Lieferkettenunterbrechungen im Lean-Zeitalter	107
7.1.3.3	Die hilfreiche Rolle des 3D-Drucks bei Lieferketten- unterbrechungen	108
7.1.4	Substitution von physischem Transport: verwendungsortnahe Produktion.....	108
7.1.5	Substitution von physischer Lagerung: Print on Demand.....	112
7.2	Neue Geschäftsmodelle durch 3D-Druck	113
7.2.1	Neue Geschäftsmodelle in der Logistik	114
7.2.2	Neue Geschäftsmodelle in der Medizin und Medizintechnik	116
7.2.3	Neue Geschäftsmodelle in der Lebensmittelbranche	118

7.3	Kostenkalkulation für den 3D-Druck	118
7.3.1	Kostenarten des 3D-Drucks	119
7.3.2	Kostenszenarien beim 3D-Druck – Make or Buy	122
7.3.3	Ausgewählte Kostenbeispiele	123
7.3.3.1	Kostenbeispiel 1: Kleine Losgröße	124
7.3.3.2	Kostenbeispiel 2: Formoptimierung	127
7.3.3.3	Kostenbeispiel 3: Supply Chain Disruption	130
7.3.3.4	Kostenbeispiel 4: Detailbetrachtung der Stückkosten im 3D-Druck unter Berücksichtigung von Batchgrößen	132
TEIL D	Ökologie	139
8	Ökologische Aspekte des 3D-Drucks	141
8.1	Ökologische Potenziale des 3D-Drucks	141
8.2	Bewertung von Umweltwirkungen (Life Cycle Assessment)	146
8.2.1	Definition des Ziels und Untersuchungsumfangs	148
8.2.2	Lebenszyklus-Sachbilanz	149
8.2.3	Lebenszyklus-Wirkungsabschätzung	151
8.2.4	Interpretation	153
8.3	Fallstudien zur Bewertung ökologischer Potenziale des 3D-Drucks	154
8.3.1	Fallstudie 1: Verlängerung des Produktlebenszyklus durch 3D- gedruckte Ersatzteile	155
8.3.2	Fallstudie 2: Verkürzung der Lieferdistanzen und Form- optimierung durch verwendungsnahen 3D-Druck	162
TEIL E	Integration	171
9	Integration von 3D-Druck ins Unternehmen	173
9.1	Strategische Integration	173
9.2	Direkte Integration	178
9.3	Indirekte Integration	179
9.4	Auswahl zeitintensiver Prozesse bei der Integration von 3D-Druck in bestehende Unternehmensabläufe	181
	Glossar	189
	Index	193

Der Verlag und die Autoren haben sich mit der Problematik einer gendergerechten Sprache intensiv beschäftigt. Um eine optimale Lesbarkeit und Verständlichkeit sicherzustellen, wird in diesem Werk auf Gendersternchen und sonstige Varianten verzichtet; diese Entscheidung basiert auf der Empfehlung des Rates für deutsche Rechtschreibung. Grundsätzlich respektieren der Verlag und die Autoren alle Menschen unabhängig von ihrem Geschlecht, ihrer Sexualität, ihrer Hautfarbe, ihrer Herkunft und ihrer nationalen Zugehörigkeit.

Oliver Kunze, Johannes Schilp

Was ist 3D-Druck? Wie funktioniert dieses faszinierende Fertigungsverfahren, und was kann man damit herstellen? Was kostet der Einsatz der Technologie? Wie lässt sich 3D-Druck in bestehende Fertigungsprozesse integrieren? Und welche Auswirkungen hat der Einsatz von 3D-Druck auf unsere Umwelt? Das vorliegende Buch soll dazu beitragen, diese Fragen für Entscheidungsträger ohne Vorkenntnisse und ohne ingenieurstechnischen Hintergrund auf kompakte Weise zu beantworten. Es ist auch als Einstiegsliteratur zum Thema 3D-Druck für Studierende nichttechnischer Fächer geeignet.

Den Begriff „3D-Druck“ (3DD) haben wir bewusst gewählt, da sich dieser intuitiv besser erfassen lässt als der technisch korrektere Begriff „Additive Fertigung“ (engl. *Additive Manufacturing*, AM). Doch 3D-Druck ist nicht nur ein einziges Verfahren, sondern setzt sich aus einer Vielzahl von Verfahrensklassen zusammen, von denen sich alle ständig weiterentwickeln. Der 3DD-Einsteiger wird daher in der Regel mit einer wahren Flut von historisch gewachsenen und untereinander nicht immer konsistenten Drei-Buchstaben-Akronymen konfrontiert (wie z. B. FDM, SLA oder SLS), welche den Zugang zum Thema unnötig erschweren. Wir wollen mit diesem Buch daher auch einen Beitrag dazu leisten, Ordnung in die Fülle von (überwiegend englischen) Begriffen¹ und Akronymen zu bringen und dem Laien eine leicht verständliche Übersicht zu bieten.

Das Buch gliedert sich in folgende Teile:

- Teil A: Technologie

In Kapitel 2 wird eine Technologiekategorisierung vorgenommen, d. h. die Vorstellung einer systematischen Kategorisierung der unterschiedlichen 3D-Druck-Verfahrensklassen und -familien mit Bezug zur DIN EN ISO/ASTM 52900. Kapitel 3 liefert eine Technologieübersicht, d. h., die einzelnen 3D-Druckverfahren werden auf anschauliche Weise für Nichttechniker erklärt.

¹ Die verwendeten Abkürzungen, Begriffe und Definitionen entsprechen so weit wie möglich den nationalen und internationalen Standardisierungen und Normen.

In Kapitel 4 wird eine Übersicht der verfügbaren Druckmaterialien präsentiert, d. h., die unterschiedlichen Materialklassen, welche sich mit 3D-Druckverfahren verarbeiten lassen, werden beschrieben.

- Teil B: Prozesse & IT

In Kapitel 5 werden die wesentlichen Elemente der 3D-Druck-Prozesskette erläutert. Kapitel 6 behandelt die Digitalisierung der 3D-Druck-Prozesskette. Hier wird dargestellt, wie der Prozess digital unterstützt werden kann (Stichwort „Digitaler Schatten“ und „Digitaler Zwilling“).

- Teil C: Ökonomie

Kapitel 7 beschäftigt sich mit den kommerziellen Potenzialen des 3D-Drucks. Da Entscheidungsträger in der Regel auch eine ökonomische Bewertung neuer Technologien für ihr jeweiliges Geschäftsmodell erstellen müssen, werden kommerzielle Potenziale im Kontext aktueller Entwicklungen und Trends aufgezeigt. Außerdem enthält das Kapitel eine Kostenkalkulation für den 3D-Druck, d. h., es werden unter anderem Kalkulationsannahmen erläutert und anhand von konkreten Beispielen illustriert.

- Teil D: Ökologie

Um die ökologischen Aspekte des 3D-Drucks für den jeweiligen Anwendungsfall bewerten zu können, wird in Kapitel 8 eine Methode zur Quantifizierung der ökologischen Effekte vorgestellt und mithilfe von konkreten Beispielen erläutert.

- Teil E: Integration

Kapitel 9 enthält Anregungen für Manager, wie sich 3D-Druck strategisch und operational in die Wertschöpfung von Firmen integrieren lässt.

Ein Glossar (Abkürzungsverzeichnis), das Ihnen die gezielte Suche nach einzelnen Akronymen und Begriffen in diesem Buch erleichtert, rundet den Inhalt ab.

Auch aktuelle Aspekte aus laufenden Diskussionen in verschiedenen nationalen und internationalen Expertengremien und deren (Zwischen-)Ergebnisse haben wir passend zu den einzelnen Themenschwerpunkten nach Möglichkeit in dieses Buch eingebracht. Bei den Themenschwerpunkten Digitalisierung und Industrialisierung bzw. Ökonomie und Integration der 3D-Druck-Prozesskette stehen wir unter anderem im engen Austausch mit dem Arbeitskreis „Industrialisierung“ in der Arbeitsgemeinschaft „Additive Manufacturing“ des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), in dem rund 200 Firmen die gesamte Bandbreite der Prozesskette der additiven Fertigung repräsentieren.

Unser besonderer Dank gilt dem bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV), welches durch die Förderung des Verbundteilprojekts Rev3D im Projektverbund ForCYCLE II² maßgeblich zur Entstehung dieses Buches beigetragen hat, allen Mitarbeitern und Partnerfirmen des Verbundteilprojekts Rev3D sowie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Hochschule Neu-Ulm (HNU) und der Universität Augsburg (UA), die an der Entstehung dieses Buches mitgewirkt haben. Namentlich seien hier insbesondere Fabian Frommer, Fabio Oetl und Galiya Klinkova genannt, die als Co-Autoren Inhalte beigesteuert haben.

Wir wünschen allen Lesern viel Spaß und Erkenntnis beim Lesen!

Prof. Dr.-Ing. Oliver Kunze
(Hochschule Neu-Ulm)

Prof. Dr.-Ing Johannes Schilp
(Universität Augsburg)

² Das Projekt ForCYCLE II wurde



TEIL A

Technologie

2

Kategorisierung der 3D-Druckverfahren

Oliver Kunze

Im Sprachgebrauch der 3D-Druck-Community wird in der Regel eine Fülle von historisch gewachsenen Verfahrensnamen und Kürzeln verwendet, welche nicht immer systematisch und uneindeutig sind und die oft auch nur deshalb existieren, um ein Copyright der Technologiehersteller für das jeweilige Verfahren kenntlich zu machen. Eine möglichst trennscharfe und vollständige Kategorisierung der unterschiedlichen 3D-Druckverfahren¹ bzw. -technologien zu schaffen ist jedoch unbedingt notwendig, da zum einen selbst bei Namensähnlichkeit oft große Verfahrensunterschiede bestehen (z. B. Binder Jetting, BJ, versus Poly Jetting, PJ) und da sich diese Ähnlichkeit zum anderen selbst bei sehr ähnlichen Verfahren nicht anhand der gebräuchlichen Verfahrensnamen erkennen lässt (z. B. Digital Light Processing, DLP, versus Liquid Crystal Display, LCD).

■ 2.1 Verfahrensklassen, -familien und -arten

Die historisch gewachsene Namensgebung der 3D-Druckverfahren folgt somit keinem durchgängigen Muster. Wir versuchen daher, im Folgenden eine verständliche Kategorisierung der unterschiedlichen Verfahren mit Bezug auf die aktuelle Version der DIN EN ISO/ASTM 52900 einzuführen. Dazu schlagen wir in Anlehnung an Gebhardt und Höttner (Gebhardt/Höttner 2016) vor, die verschiedenen Technologien zunächst anhand der Aggregatzustände des Mediums, das das Druckobjekt beim Druck jeweils umgibt, nach folgenden drei *Verfahrensklassen* zu unterscheiden:

- Druck in gasförmiger Umgebung
- Druck in flüssiger Umgebung
- Druck in einer festkörperartigen Umgebung

Druckverfahren in einer festkörperartigen Umgebung kann man darüber hinaus nach den Medien „powder bed“ (Pulverbett) und „sheets“ (deutsch: Bogen, Blätter, Lagen²) unterscheiden.

¹ Auch additive Fertigungsverfahren genannt (engl. *Additive Manufacturing*, AM)

² Zum Beispiel eine Lage Papier oder eine Lage Metallblech

Innerhalb dieser drei Klassen schlagen wir außerdem vor, die Technologien anhand der DIN EN ISO/ASTM 52900-Nomenklatur nach derzeit sieben *Verfahrensfamilien* zu differenzieren:

- Material Extrusion (MEX)
- Material Jetting (MJT)
- Directed Energy Deposition (DED)
- Powder Bed Fusion (PBF)
- Binder Jetting (BJT)
- Sheet Lamination (SHL)
- Vat Photopolymerisation (VPP)

Für die jeweiligen Technologiefamilien differenziert die DIN EN ISO/ASTM 52900 noch weitere spezifische Varianten, welche wir *Verfahrensunterfamilien* nennen. Die Unterfamilien ergeben sich dadurch, dass sich die Verfahren in einer Familie zusätzlich jeweils in spezifischen Eigenschaften voneinander unterscheiden. Diese weiter differenzierenden spezifischen Eigenschaften sind folgende:

- die Art der Herstellung des Bindungszusammenhalts zwischen Schichten (bei MEX und MJT)
- die Art des Energieeintrags (bei DED und PBF)
- die Anzahl der notwendigen Prozessschritte (bei BJT)
- die Art der Schichtverbindung (bei SHL)
- die Art der Belichtungsbeschränkung (bei VPP)

Außerhalb (und somit unterhalb) der Definitionen der DIN EN ISO/ASTM 52900 lassen sich teilweise nochmals differenzierende, oft herstellereinspezifische Verfahrensspezifika erkennen, die im Folgenden als *Verfahrensarten* bezeichnet werden.

■ 2.2 Verfahrenstaxonomie

Ein Vorschlag für eine 3D-Druck-Verfahrenstaxonomie ist in Bild 2.1 dargestellt. Die drei Spalten repräsentieren somit die Technologieklassen, die sieben fett umrahmten Rechtecke die Technologiefamilien und die einfach umrahmten Rechtecke die Unterfamilien. Die vorgeschlagene Struktur kann zwar nicht alle Eigenschaften, anhand derer sich 3D-Druckverfahren unterscheiden, berücksichtigen, sie bietet jedoch trotzdem eine Orientierungshilfe zur Technologieübersicht und soll daher als Gliederungsstruktur für Kapitel 3 dienen. Die sonst gebräuchlichen (nicht taxonomiekonformen) Verfahrensnamen und -kürzel sind im Glossar alphabetisch sortiert und den vorangehend eingeführten Kategorien (Klassen, Familien, Unterfamilien) zugeordnet.

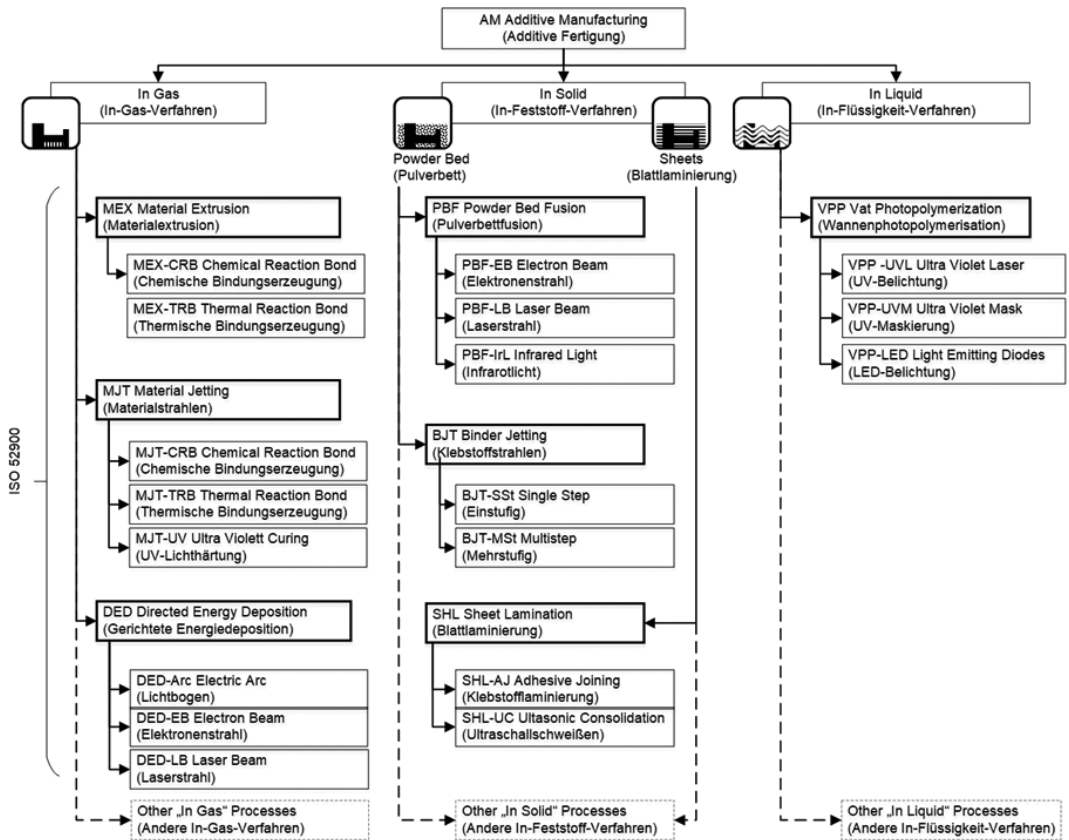


Bild 2.1 Verfahrenstaxonomie

2.3 Grafische Idealisierung

Um einen besseren Überblick über die Vielzahl der verschiedenen 3D-Druckverfahren herzustellen und um die unterschiedlichen Verfahren jeweils „auf einen Blick“ zu beschreiben, idealisieren wir die verschiedenen Aspekte der jeweiligen Verfahren im Folgenden durch eine grafische Icondarstellung. Diese beinhaltet zusätzlich zur Taxonomie auch wesentliche notwendige Nachbearbeitungsschritte und verwendbare Materialien.

Für diese Idealisierung verwenden wir das in Bild 2.2 gezeigte vierdimensionale Darstellungsschema, welches erstens das Medium im Bauraum, zweitens den technischen Druckprozess selbst (In-Prozess), drittens die notwendigen Nachbearbeitungsschritte (Post-Prozess) und viertens die verwendbaren Materialien darstellt.

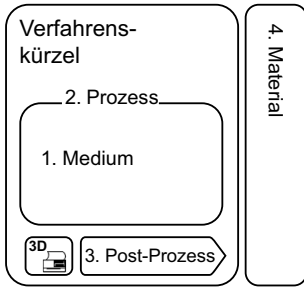


Bild 2.2 Idealisiertes Darstellungsschema für unterschiedliche 3D-Druckverfahren

Um die technischen Elemente des eigentlichen Druckverfahrens jeweils idealisiert darzustellen, verwenden wir die in Bild 2.3 dargestellten Symbole bzw. Icons. Um die Idealisierung bezüglich der Nachbearbeitungsprozesse jeweils zu visualisieren, verwenden wir die in Bild 2.4 dargestellten Symbole bzw. Icons. Um die üblicherweise mit dem Verfahren druckbaren Materialien zu visualisieren, verwenden wir die in Bild 2.5 dargestellten Symbole bzw. Icons.

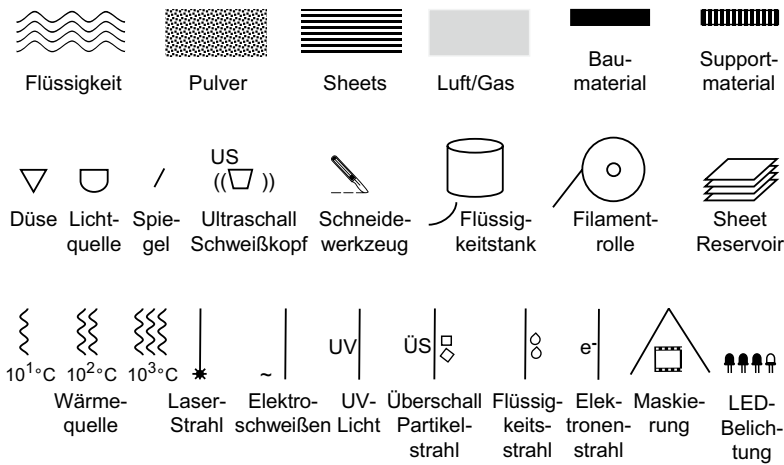


Bild 2.3 Icons für die technischen Elemente der 3D-Druckverfahren

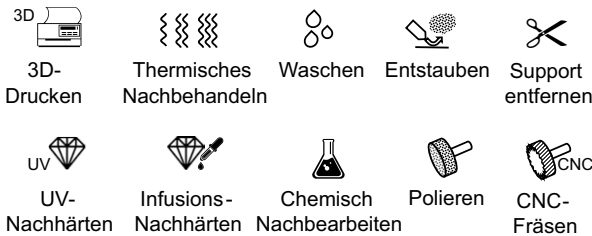


Bild 2.4 Icons für die Nachbearbeitungsprozesse



Bild 2.5 Icons für die druckbaren Materialien

Damit lassen sich die 3D-Druckverfahren analog zur vorangehend definierten Verfahrenstaxonomie eindeutig und anhand von zusammengesetzten Symbolen beschreiben. Die Verfahren sind in Kapitel 3 auf verständliche Weise, sowohl textlich als auch bildlich, beschrieben. Für eine weiterführende und technisch tiefere Beschreibung der einzelnen Verfahren der unterschiedlichen Hersteller verweisen wir auf die jeweiligen technischen Dokumentationen dieser Hersteller.

Literatur

DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03: Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary. Beuth Verlag, Berlin 2022

Gebhardt, Andreas/Hötter, Jan-Steffen: Additive Manufacturing. 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Carl Hanser Verlag, München 2016

Index

Symbole

- 3D-Druck
 - direkte Integration *178*
 - Geschäftsmodelle in der Lebensmittelbranche *118*
 - Geschäftsmodelle in der Logistik *114*
 - Geschäftsmodelle in der Medizin *116*
 - Geschäftsmodelle in der Medizintechnik *116*
 - indirekte Integration *179*
 - kommerzielle Potenziale *97*
 - Kostenbeispiele *123*
 - Kostenkalkulation *118*
 - neue Geschäftsmodelle *113*
 - ökologische Aspekte *141*
 - ökologische Potenziale *141*
 - ökonomische Aspekte *97*
 - ökonomische Potenziale *97*
 - strategische Integration *173*
- 3D-Druck-Materialien
 - Beton *54*
 - Holz *55*
 - keramische Werkstoffe *54*
 - Lebzellen *56*
 - Lebensmittel *56*
 - Metalle *53*
 - Mörtel *54*
 - Papier *55*
 - Polymere *51*
 - Wachs *55*
- 3D-Druck-Prozesskette *61*
 - Digitalisierung *81*

A

- ADAM *20*
- Adhesive Joining (AJ) *40*
- AJ *40*
- AMF-Format *65*
- Anisotropie *67*
- Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) *20*

B

- Binder Jetting *30*
- Binder Jetting Technology (BJT) *37*
 - Multi Step (BJT-MSt) *38*
 - Single Step (BJT-SSt) *38*
- BJT *37*
- BJT-MSt *38*
- BJT-SSt *38*
- bonding agent *38*
- Braunling *19*
- Brim *17*

C

- CFF *15*
- Chemical Reaction Bond (CRB) *18, 29*
- CJ *38*
- CNC *23, 28, 43*
- Coldspray *23, 26*
- ColorJet-Verfahren (CJ) *38*
- Complexity for Free *103*
- Continuous Filament Fabrication (CFF) *15*
- CRB *18, 29*

D

Datenvorbereitung 62
 DED 22
 DED-SSI 26
 digitale Ersatzteillager 146
 Digitaler Schatten 82
 Digitaler Zwilling 82
 – Mehrwert 86
 Digitales Modell 82
 Digital Light Processing (DLP) 46
 Directed Energy Deposition (DED) 22
 – mit Drahtmaterial 23
 – mit Pulverstrahl 24
 Direct Metal Deposition (DMD) 22
 DLP 46
 DMD 22
 Druckprozess 9

E

EB 35
 EBM 35
 Eigenspannungen 69
 Electron Beam Melting (EBM) 35

F

Faserverstärkung 20
 FDM 15
 FFF 15
 Fiber 20
 Filament 15
 fill patterns 17
 Formoptimierung 127
 Füllmuster 100
 Fused Deposition Modeling (FDM) 15
 Fused Filament Fabrication (FFF) 15

G

Geschäftsmodelle
 – in der Lebensmittelbranche 118
 – in der Logistik 114
 – in der Medizin 116

– in der Medizintechnik 116
 – neue 113
 Grünling 19

H

High-Speed Sintering (HSS) 36
 HSS 36

I

Icons 10
 Idealisierung 9
 – Darstellungsschema 9
 IGES-Format 66
 Individualisierung 97, 98
 Infra Red Light 36
 „In-Gas“-Druckverfahren 13
 In Jelly Drop on Demand Deposition
 (JDD) 48
 „In-Liquid“-Druckverfahren 43
 In-Prozess 9, 72
 „In-Solid“-Druckverfahren 32
 Integration
 – direkte 178
 – indirekte 179
 – strategische 173
 IrL 36

J

JDD 48

K

kommerzielle Potenziale des
 3D-Drucks 97
 Kostenbeispiele für den 3D-Druck 123
 Kostenkalkulation für den 3D-Druck 118

L

LAM 28
 Laminated Object Manufacturing (LOM) 40
 Laser Metal Deposition (LMD) 22

Laser Sintering 32
 Layer Laminated Manufacturing (LLM) 40
 LB 32
 LCD 46
 LDM 18
 Lebenszyklus-Sachbilanz 149
 Lebenszyklus-Wirkungsabschätzung 151
 LED 46
 Lieferkettenunterbrechungen 107
 Life Cycle Assessment 146
 – Definition des Ziels und Untersuchungsumfangs 148
 – Interpretation 153
 – Lebenszyklus-Sachbilanz 149
 – Lebenszyklus-Wirkungsabschätzung 151
 Light Emitting Diodes (LED) 46
 Liquid Additive Manufacturing (LAM) 28
 Liquid Crystal Display-Verfahren (LCD) 46
 Liquid Deposition Modeling (LDM) 18
 LLM 40
 LMD 22
 LOM 40

M

Make or Buy 122
 Materialeinsparung 146
 Material Extrusion (MEX) 14, 100
 – Chemical Reaction Bond 18
 – mit Faserverstärkung 20
 – mit thermischer Nachbehandlung 19
 – Thermal Reaction Bond 15
 Materialien 9
 Material Jetting (MJT)
 – Chemical Reaction Bond 29
 – Thermal Reaction Bond 29
 – Ultra Violett Curing 29
 Material Jetting Technology (MJT) 28
 Medium 9
 MEX 14, 100
 MEX-CRB 18
 MEX-*-Fiber 20

MEX-*-Heat 19
 MEX-TRB 15
 MJ 28
 MJF 36
 MJM 30
 MJT 28
 MJT-CRB 29
 MJT-TRB 29
 MJT-UV 29
 MSt 38
 Multi Jet Fusion (MJT) 36
 MultiJet Modeling (MJM) 30
 Multi Jetting (MJ) 28, 30

N

Nesting 70, 133

O

ökologische Aspekte des 3D-Drucks 141
 ökonomische Aspekte des 3D-Drucks 97

P

PBF 32, 101
 PBF-EB 35
 PBF-IrL 36
 PBF-LB 32
 PJ 28
 PJM 28
 Polygonisierung 63
 PolyJet Modeling (PJM) 28
 Poly Jetting (PJ) 28, 30
 Post-Prozess 9, 74
 Powder Bed Fusion (PBF) 32, 101
 – Electron Beam 35
 – Infra Red Light 36
 – Laser Beam 32
 Pre-Prozess 66
 Print on Demand 112
 Pulverstrahl 24

Q

Qualitätssicherung 76

R

Raft 16
 Rapid Manufacturing 178
 Rapid Prototyping 178
 Recycling 146
 Resilienz in Lieferketten 98, 107
 Ressourceneffizienz 98
 Reverse Engineering 62

S

SDL 40
 Selective Deposition Lamination (SDL) 40
 Selective Laser Melting (SLM) 33
 Sheet Lamination (SHL) 40
 – Adhesive Joining 40
 – Ultrasonic Consolidation 43
 SHL 40
 SHL-AJ 40
 SHL-UC 43
 SLA 44
 Slicing 71
 SLM 33
 SPD 26
 SSI 26
 SSt 38
 STEP-Format 66
 Stereolithographie (SLA) 44
 STL-Format 63
 Super Sonic Particle Deposition (SPD) 26
 super sonic speed impact 26
 support 16, 35, 45
 Supportstrukturen 69

T

Thermal Reaction Bond (TRB) 15, 29
 Total Cost of Ownership 90

TRB 15, 29
 Treppenstufeneffekt 67

U

UAM 40
 UC 43
 Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) 40
 Ultrasonic Consolidation (UC) 43
 Ultra Sonic Welding (USW) 43
 Ultra Violett Curing 29
 Ultra Violett Masking (UVM) 46
 Umweltbewusstsein 98
 USW 43
 UV 29
 UVL 44
 UVM 46

V

Vat Photopolymerization (VPP) 43, 101
 – mit LED 46
 – mit Maske 46
 – mit UV-Laser 44
 – thermische Nachbehandlung 47
 Verfahrensarten 8
 Verfahrensfamilien 8
 Verfahrensklassen 7
 Verfahrensunterfamilien 8
 Verlängerung von Produktlebenszyklen 146
 Verringerung des Materialausschusses 146
 verwendungsortnahe Produktion 108, 146
 VPP 43, 101
 VPP-*-Heat 47
 VPP-LED 46
 VPP-UVL 44
 VPP-UVM 46

W

WAAM 22
 Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) 22