

# HANSER



## Leseprobe

zu

## Kunststoff-Wissen für die additive Fertigung

von Andreas Fischer, Dirk Achten und Martin Launhardt

Print-ISBN: 978-3-446-46488-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-46904-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446464889>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung in die thermoplastbasierte additive Fertigung ...</b>	<b>1</b>
1.1	Generierungsstrategie der additiven Fertigung .....	2
1.2	Verfahrensgruppen der additiven Fertigung .....	4
1.2.1	Sintern und Extrusion .....	5
1.2.2	Bindertechnologie und Laminieren .....	6
1.3	Funktionsprinzip des Fused Deposition Modelings (FDM) .....	11
1.3.1	Additive Extrusion mit Filament .....	12
1.3.2	Charakteristika des Fused Deposition Modelings .....	16
1.3.2.1	Oberflächen .....	16
1.3.2.2	Stützstrukturen und Baukammer .....	19
1.4	Funktionsprinzip des Fused Layer Modelings (FLM) .....	24
1.4.1	Werkstoffzuführung .....	27
1.4.2	Charakteristika des Fused Layer Modelings .....	30
1.4.2.1	Stützstrukturen und Bauraum .....	32
1.4.2.2	Roboterbasiertes Fused Layer Modeling .....	35
1.5	Funktionsprinzip des Selektiven Lasersinterns (SLS) .....	41
1.6	Hybride additive Fertigung mit Thermoplasten .....	45
1.6.1	Faserverstärkte additive Bauteile .....	45
1.6.2	Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) .....	52
<b>2</b>	<b>Polymere in der additiven Fertigung .....</b>	<b>57</b>
2.1	Geschichte der künstlichen Polymere (Kunststoffe) .....	61
2.1.1	Homopolymere .....	65
2.1.2	Copolymere .....	65
2.1.3	Organische und anorganische Polymere .....	65

2.2	Polymerchemie .....	66
2.3	Polymere als Werkstoffe .....	67
2.3.1	Thermoplaste .....	68
2.3.2	Duromere .....	69
2.3.3	Elastomere (Gummi) .....	70
2.3.4	Thermoplastische Elastomere (TPE) .....	71
2.4	Herstellverfahren von Polymeren .....	74
2.4.1	Kettenwachstumsreaktion .....	74
2.4.2	Stufenwachstumsreaktion .....	76
2.4.2.1	Polyadditionsreaktion .....	77
2.4.2.2	Polykondensationsreaktion .....	77
2.4.3	Biologische Polymerisation .....	80
2.5	Physikalische Eigenschaften von Polymeren .....	81
2.5.1	Viskoelastizität .....	81
2.5.2	Dynamisch-mechanische Analyse (DMA) .....	83
2.5.2.1	Vernetzungsdichte .....	87
2.5.2.2	Entropieelastizität .....	89
2.5.2.3	Relaxationszeiten und Temperatur .....	90
2.5.2.4	Beobachtbare Relaxationen .....	92
2.5.2.5	Freies Volumen .....	93
2.5.3	Kalorimetrische Messmethode .....	98
2.5.4	Schmelzeviskosität .....	104
2.5.5	Schmelze-Volumenfließrate .....	106
2.5.6	Wärmeübertragung .....	109
2.5.7	Strömungsmechanik .....	114
2.5.8	Thermische Zersetzungstemperatur .....	122
2.5.9	Härtemessung .....	123
2.5.10	Zugversuch .....	124
2.5.10.1	Wärmetönung im Zugversuch an Kunststoffen .....	125
2.5.10.2	Alterungsprüfungen .....	128
2.5.10.3	Temperaturabhängige Prüfung .....	128
2.5.11	Weitere zerstörende Testverfahren .....	128
2.5.12	Zerstörende Prüfung additiv gefertigter Bauteile .....	128

2.6	Thermoplaste	129
2.6.1	Einteilung von thermoplastischen Kunststoffen	132
2.6.2	Teilkristalline Thermoplaste	133
2.6.3	Glasartige Thermoplaste	134
2.6.4	Thermoplastische Vulkanisate	135
2.6.5	Thermoplastische Polymerblends	136
2.6.6	Hochleistungskunststoffe	137
2.6.6.1	Herstellverfahren von Hochleistungsthermoplasten	139
2.6.6.2	Stereochemie von Polymeren	140
2.6.6.3	Mechanische Eigenschaften	142
2.6.6.4	Thermische Stabilität	143
2.6.6.5	Kristallinität	144
2.6.6.6	Lösungseigenschaften	145
2.6.6.7	Anwendungen/Einsatzgebiete	145
2.6.6.8	Additive Fertigung mit Hochleistungsthermoplasten	145
2.6.7	Konstruktionskunststoffe	148
2.6.7.1	Polyamid (PA)	149
2.6.7.2	Polyethylenterephthalat (PET)	155
2.6.7.3	Polybutylenterephthalat (PBT)	159
2.6.7.4	Polyoxymethylen (POM)	161
2.6.7.5	Polycarbonat (PC)	165
2.6.7.6	Polymilchsäureester (PLA)	169
2.6.7.7	Thermoplastische Elastomere (TPE)	173
2.6.8	Standardkunststoffe	176
2.6.8.1	Polyethylen (PE)	176
2.6.8.2	Polypropylen (PP)	183
2.6.8.3	Polyvinylchlorid (PVC)	187
2.6.8.4	Polystyrol (PS)	191
2.6.8.5	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS)	196
2.6.8.6	Polymethylmethacrylat (PMMA)	199
2.7	Verarbeitungsverfahren von Thermoplasten	202
2.7.1	Spritzgießverfahren	203
2.7.2	Extrusionsverfahren	203

2.7.3	Thermoformen	204
2.7.4	Extruder	205
2.8	Formulierung von Thermoplasten	207
2.8.1	Farbeinstellung	208
2.8.2	Flammschutz	208
2.8.3	Stabilisatoren	209
2.8.4	Verarbeitungshilfsmittel	209
2.8.5	Füllstoffe	211
2.8.5.1	Partikelgefüllte Kunststoffe	211
2.8.5.2	Ruß	212
2.8.5.3	Kreide, Talkum	212
2.8.5.4	Glimmer (Mica)	213
2.8.5.5	Partikelverstärkte Thermoplaste in der additiven Fertigung	213
2.8.6	Faserige verstärkende Füllstoffe	214
2.8.6.1	Glasfasern	215
2.8.6.2	Kohlenstofffasern	216
2.8.6.3	Keramikfasern	217
2.8.6.4	Naturfasern	217
2.8.6.5	Polymerfaser	218
2.8.6.6	Thermische Beständigkeit und Witterungs- beständigkeit von Kunststofffaserverbundstoffen	218
2.9	Witterungsbeständige Thermoplaste	219
2.10	Leitfähige Thermoplaste/elektrisch isolierende Kunststoffe	220
2.10.1	Elektrisch passive isolierende Kunststoffe	220
2.10.2	Elektrisch aktive, leitfähige Kunststoffe	221
2.10.3	Leitfähige Kunststoffe in der additiven Fertigung	221
2.11	Brandgeschützte Thermoplaste	222
2.12	Geschäumte Thermoplaste	224
2.12.1	Schäumverfahren	225
2.12.2	Schaumextrusion	225
2.12.3	Thermoplast-Schaumguss-Verfahren (TSG)	226
2.12.4	MuCell-Verfahren	226
2.12.5	Geschäumte Thermoplaste in der additiven Fertigung	227

2.13	Thermoplaste mit Lebensmittelkontakt	227
2.14	Biokunststoffe, Biokompatibilität/-abbaubarkeit	229
2.15	Thermoplaste in medizinischen Anwendungen	229
2.15.1	Einsatz der additiven Fertigung mit Thermoplasten in medizinischen Anwendungen	230
2.15.2	Organe aus dem 3D-Drucker	232
<b>3</b>	<b>Besonderheiten der Thermoplastverarbeitung in der additiven Fertigung</b>	<b>241</b>
3.1	Extrusionsbasierte Verfahren (Material Extrusion, MEX)	242
3.1.1	Filamentextruder	243
3.1.2	Granulatrextruder (Pellet Extrusion)	244
3.1.3	Thermoplasteigenschaften	246
3.1.3.1	Erweichungs-/Schmelztemperatur	247
3.1.3.2	Wärmekapazität	247
3.1.3.3	Schmelzeviskosität/Schmelzevolumenfließrate	248
3.1.3.4	Verfestigungstemperatur/Verfestigungskinetik	248
3.1.3.5	Schwindung	250
3.1.4	Verfahrensbedingungen	251
3.1.4.1	Düsentemperatur	251
3.1.4.2	Düsengeometrie	252
3.1.4.3	Volumenaustragsgeschwindigkeit	255
3.1.4.4	Bauraumheizung	257
3.1.4.5	Bauplattformheizung	259
3.1.5	Druckprobleme	260
3.1.5.1	Haftung an der Bauteilplattform	260
3.1.5.2	Zwischenschichthaftung	262
3.1.5.3	Fadenbildung (Stringing) und Auslaufen (Oozing)	264
3.1.5.4	Verzug (Warping)	268
3.1.5.5	Unterextrusion	270
3.1.5.6	Überextrusion	273
3.1.6	Prozesssimulation	274
3.1.7	Stützmaterialien	276
3.1.8	Nachbearbeitungsverfahren	280

3.1.8.1	Entfernen von Stützmaterial	281
3.1.8.2	Oberflächenvergütung	282
3.1.8.3	Funktionalisierung (chemisch)	283
3.1.8.4	Konsolidierung (thermisch/chemisch)	283
3.1.8.5	Bauteileigenschaften	285
3.1.9	Software	300
3.1.10	Recycling von 3D-Druck-Materialien	302
3.1.11	Belastung der 3D-Druck-Materialien	304
3.1.11.1	Thermische Belastung	304
3.1.11.2	Mechanische Belastung	306
3.1.12	Anforderungen an die Produktionsumgebung	306
3.1.12.1	Maschinenauswahl	307
3.1.12.2	Arbeitsbereich	308
3.1.12.3	Arbeitssicherheit	308
3.1.12.4	Partikel/volatile organische Komponenten (VOC)	310
3.1.13	Qualitätssicherung	311
3.1.14	Normung	311
3.2	Selektives Lasersintern (SLS) von Kunststoffen	313
3.2.1	Verfügbare Werkstoffe	315
3.2.1.1	Pulverherstellungsverfahren	317
3.2.1.2	Pulverprüfverfahren	321
3.2.1.3	Thermische Alterung	325
3.2.2	Thermische Prozessführung	327
3.2.3	Belichtungsstrategie und -parameter	331
3.2.4	Anlagensystem und Prozesstechnik	333
3.2.5	Baujobvorbereitung (Pre-Processing)	338
3.2.5.1	CAD-Design	339
3.2.5.2	Konstruktionsempfehlungen für SLS-Bauteile	340
3.2.5.3	Slicing	342
3.2.5.4	Empfehlungen für Baujoblayout	344
3.2.6	Bauteilcharakteristik	346
3.2.7	Allgemeine Qualitätssicherung an SLS-Bauteilen	350
3.2.7.1	Gestaltabweichung	350

3.2.7.2	Mechanische Eigenschaften .....	358
3.2.7.3	Typische Bauteil- und Prozessfehler .....	359
3.2.8	Wirtschaftlichkeitsanalyse .....	363
3.2.9	Nachbearbeitungsverfahren (Post-Processing) .....	366
3.2.9.1	Baujob entpacken .....	367
3.2.9.2	Bauteile entpulvern .....	369
3.2.9.3	Bauteile glätten .....	370
3.2.9.4	Färben .....	372
3.2.10	Materialmanagement .....	374
3.2.11	Arbeitssicherheit .....	376
3.2.12	Beispielanwendungen .....	379
<b>4</b>	<b>Additive Baumaterialien und Applikationen im thermoplastischen Bereich .....</b>	<b>389</b>
4.1	Additive Baumaterialien und Wertschöpfungsketten .....	390
4.1.1	Extrusionsbasierte Verfahren (MEX) .....	390
4.1.1.1	Baumaterialien .....	390
4.1.1.2	Wertschöpfungsketten (Thermoplast, Abmischung, Filament) .....	391
4.1.2	Pulverbasierte Verfahren (SLS, HSS) .....	414
4.1.2.1	Baumaterialien .....	415
4.1.2.2	Wertschöpfungsketten aus Drucker und (zertifizierten) Materialien .....	419
4.2	Produkte und Anwendungen .....	422
4.2.1	Prototypen und Musterbauteile .....	422
4.2.1.1	Lüftungsgitter .....	422
4.2.1.2	Großformatige additive Fertigung im Designprozess ..	423
4.2.2	Verfahren mit verlorener Form .....	424
4.2.2.1	Lösliche Fused Deposition Modeling-Formen .....	424
4.2.2.2	Nachhaltige Einwegkaffeebecher .....	426
4.2.2.3	Hybrid additiv erzeugte Flugzeugsitze .....	427
4.2.3	Funktionale Bauteile .....	429
4.2.3.1	Lautloser Unterwasserantrieb .....	430
4.2.3.2	Integration von Lichtleitern (Clear Cast Integration) ..	431



4.2.4	Serienbauteile .....	432
4.2.4.1	Funktionales Werkzeuggehäuse .....	433
4.2.5	Möbel .....	435
4.2.5.1	Kleinformel und Leuchten .....	435
4.2.5.2	Stadtmobiliar .....	436
4.2.5.3	Erhöhung der Nutzbarkeit von IKEA-Produkten für Menschen mit Behinderung .....	437
4.2.5.4	Additive Fertigung als zirkuläres Fertigungsmodell ..	439
4.2.6	Ersatzteile und Zubehör .....	440
4.2.6.1	Ersatzteile für den Segway X2 .....	441
4.2.6.2	Miele-Zubehör .....	443
4.2.7	Transportwesen .....	444
4.2.7.1	Fahrzeugkarosserie mittels Fused Deposition Modeling .....	445
4.2.7.2	Fahrzeugrahmen und -karosserie mittels Big Area Additive Manufacturing .....	446
4.2.7.3	Elektromotorrad .....	447
4.2.7.4	Jetbetriebene Drohne .....	448
4.2.7.5	Konzept-Wohnmobil .....	449
4.2.8	Medizinische Anwendungen .....	451
4.2.8.1	Ventile für Atemmasken .....	451
4.2.8.2	Implantate aus Hochleistungskunststoff .....	452
4.2.8.3	Personenspezifische Prothesen und Orthesen .....	453
4.2.9	Sportequipment und Mode .....	454
4.2.9.1	Nachhaltiges Surfbrett .....	455
4.2.9.2	Kraftabsorbierender Fahrradhelm .....	456
4.2.9.3	Hygiene-Warnsystem .....	456
4.2.9.4	Brillenfassungen aus Polyamid .....	457
4.2.9.5	Personalisierte Handtaschen .....	458
4.2.10	Maschinenbau .....	459
<b>Index .....</b>		<b>463</b>

# 1

## Einführung in die thermoplastbasierte additive Fertigung

Unter dem Begriff Additive Fertigung (AF), der im Englischen als Additive Manufacturing (AM) bezeichnet wird, versteht man Fertigungsverfahren, die schichtweise mittels Materialaufbringung und -anhäufung dreidimensionale Bauteile erzeugen. Zeitweise wurden für diese Art der Bauteilerzeugung auch die Begriffe Rapid Prototyping (RP) und Generative Fertigung (GF) genutzt. Umgangssprachlich ist der Begriff 3D-Druck oder 3D Printing in Verwendung. Beim Vergleich der Begriffe Rapid Prototyping und Additive Fertigung wird deutlich, wie sich die Verfahren insbesondere hinsichtlich ihres Einsatzspektrums über die Zeit entwickelt haben. In der Anfangsphase der digitalen additiven Fertigung ermöglichten die ersten Systeme anhand von Datensätzen die direkte – und im Vergleich zu der klassischen Herstellung schnelle – Fertigung von Prototypen oder Musterteilen. Durch den Einsatz additiver Fertigung können Produktentwicklungen verbessert bzw. verkürzt werden. Durch die Verbesserung und Neuentwicklung von Verfahren und Systemen nahm der Anteil direkt produzierter Bauteile und Produkte mittels additiver Fertigung zu. Diese Entwicklung initiierte auch die nötige Entwicklung oder Adaption neuer Werkstoffe für die verschiedenen Verfahren der additiven Fertigung. Anfang der 1990er-Jahre kamen die ersten kommerziellen thermoplastbasierten additiven Systeme der Verfahrensgruppen Extrusion und Sintern auf den Markt.

In diesem Kapitel erfahren Sie, auf welcher grundlegenden Strategie die Verfahren der additiven Fertigung basieren und welche Verfahrensgruppen existieren. Im Folgenden wird das Grundprinzip des Fused Deposition Modelings (FDM), des Fused Layer Modelings (FLM) und des Selektiven Lasersinterns (SLS) erklärt. Abschließend wird erläutert, was unter der hybriden additiven Fertigung mit Thermoplasten zu verstehen ist.

## ■ 1.1 Generierungsstrategie der additiven Fertigung

Die Generierungsstrategie von Bauteilen mittels der additiven Verfahren lässt sich durch die 1892 patentierte Fertigungsstrategie Contour Relief Maps von J.E. Blather erläutern. Die Geländemodelle, welche mit dieser Fertigungsstrategie erzeugt wurden, bestanden aus Wachsplatten. Die Wachsplatten wurden anhand der jeweiligen Höhenlinie des Geländes zugeschnitten und in einem weiteren Schritt aufeinandergesetzt und positioniert. Die Dicke der Wachsplatten ergab die sogenannte Schichtdicke des additiv erzeugten Modells. Um ein zusammenhängendes Wachsbauteil aus den einzelnen konturierten Wachsplatten zu erhalten, wurden diese mittels gezielter Wärmeeinwirkung miteinander verbunden. Bei einer relativ großen Verbindung zwischen den einzelnen Platten beziehungsweise Schichten konnte so auch eine dem Werkstoff entsprechende Schichthaftung und eine daraus folgende Stabilität gewährleistet werden.

Der Grundgedanke zur Bauteilerzeugung der additiven Fertigung ist dementsprechend die Aufschichtung und Verbindung gefüllter Konturen. Dies kann wie bei den Contour Relief Maps analog, also händisch, erfolgen oder digital und automatisiert. Im letzteren Fall liegt das zu fertigende Bauteil in einer digitalen Form vor, woraus dann die Schichten mit den jeweiligen Konturen abgeleitet werden. Diese Schichten weisen eine spezifische gleichbleibende Stärke auf und folgen einer geometrischen Achse durch das Bauteil. Nach der Erzeugung der virtuellen Schichten werden diese in Steuerbefehle für das spezifische additive Fertigungssystem umgewandelt. Das additive System wiederum erzeugt in spezifischer Reihenfolge die konturierten Schichten und deren Verbindung mittels spezifischer Materialien.

Physikalisch besteht insbesondere bei Bauteilen mit Überhängen von mehr als 45 Grad die Notwendigkeit, diese mit einer Stützkonstruktion gegen Verbiegen oder Abbrechen zu schützen. Diese Stützstrukturen werden bei einigen additiven Verfahren (wie auch die virtuellen Schichten) digital und abhängig von der Geometrie und dem Verfahren vorab erzeugt.

Hierbei handelt es sich verfahrensabhängig wiederum um Konturen, welche in Steuerbefehle umgewandelt werden. Je nach eingesetztem additiven Verfahren führen diese Stützstrukturen zu einem höheren Materialverbrauch und längeren Herstellzeiten sowie zu einer nachgelagerten Entfernung der Stützstruktur vom Bauteil. Durch den schichtweisen Aufbau der additiven Verfahren bilden Stufen die wahrnehmbare Oberfläche in Aufbaurichtung.

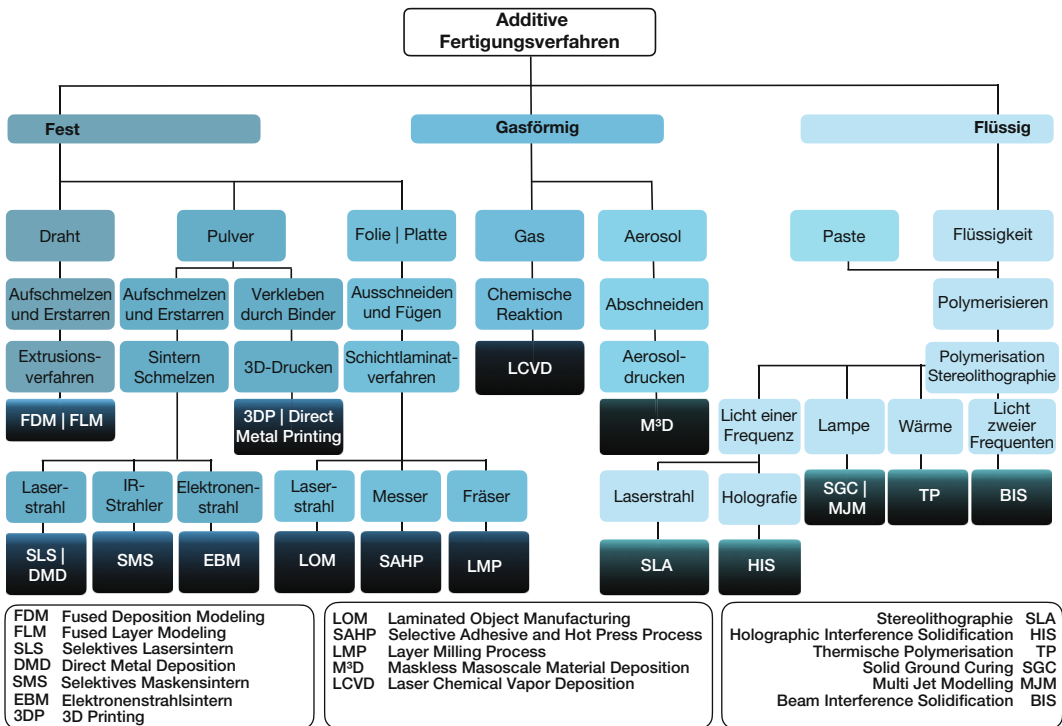
Die Ausprägung und Sichtbarkeit dieser Stufen ist abhängig von der Schichtdicke. Je dünner die jeweiligen Schichten erzeugt werden können, desto geringer ist deren Wahrnehmbarkeit. Gleichzeitig erzeugt jedoch eine geringe Schichtdicke auch längere Herstellzeiten und damit auch höhere Herstellkosten je Bauteil. Die dünnsten Schichtdicken werden bei additiven Verfahren erzielt, deren Werkstoffe in flüssigem oder gasförmigem Zustand vorliegen. Doch auch spezielle Verfahren, bei denen der Werkstoff in Pulverform vorliegt, wie zum Beispiel beim Lasermikrosintern, können Schichtdicken von 15  $\mu\text{m}$  bis 1  $\mu\text{m}$  erreichen.

Die Oberflächen additiv erzeugter Bauteile, welche nicht durch den Stufenefekt geprägt sind, werden durch verfahrensspezifische Prinzipien und deren Ausprägung gekennzeichnet. Bei den Verfahren Fused Deposition Modeling (FDM) und Fused Layer Modeling (FLM) sind dies Schmelzdüsen für thermoplastisches Material mit einem entsprechenden Düsendurchmesser.

Im Gegensatz dazu werden die Oberflächen beim Selektiven Lasersintern (SLS) durch einen gepulsten Laser und lokal aufgeschmolzenes Thermoplastpulver geprägt. Eine Ausnahme sowohl hinsichtlich der Stufenbildung als auch der verfahrensspezifischen Oberflächenausprägung stellen die Verfahren Laminated Object Manufacturing (LOM), Selective Adhesive and Hot Press Process (SAHP) und Layer Milling Process (LMP) dar.

Grundsätzlich kann die Stufenbildung bei den Verfahren durch eine 5-Achsen-Bearbeitung aufgehoben werden. Des Weiteren sind die Oberflächen, welche nicht durch die Schichtung beeinflusst werden, durch die Oberfläche des genutzten Folien- oder Plattenmaterials und nicht durch das Verfahren geprägt. Additive Verfahren, die vornehmlich thermoplastische Werkstoffe verarbeiten, sind im Ausgangszustand fest verankert (Bild 1.1).

Der zu verarbeitende Thermoplast kann hier als Draht, Rundschnur (Filament), Pulver oder in Folien- bzw. Plattenform vorliegen.



**Bild 1.1** Unterteilung der additiven Verfahren nach Ausgangszustand des Werkstoffs  
(© Leonie Fensterle 2020, in Anlehnung an Sehrt 2016)

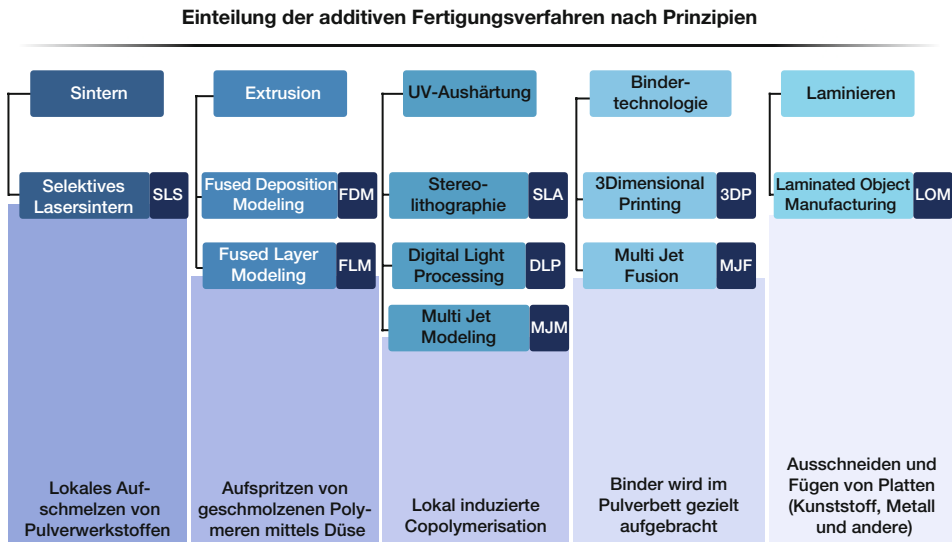
## 1.2 Verfahrensgruppen der additiven Fertigung



Historisch bedingt haben sich verschiedene Begrifflichkeiten bei schichtaufbauenden Verfahren etabliert. Durch die technologische Weiterentwicklung und damit die erweiterten Einsatzmöglichkeiten von additiven Systemen entstanden über die Zeit folgende Begrifflichkeiten, die bis heute eine spezifische Verwendung finden:

- Rapid Prototyping (RP): Fertigung von Muster- und Prototypenteilen
- Rapid Tooling (RT): Fertigung von Werkzeugen für urformende und umformende Fertigungsverfahren
- Additive Manufacturing (AM): Fertigung von Bauteilen und Kleinserien als marktfähige Produkte

Neben der Einordnung nach DIN 8580 können additive Systeme auch anhand des Zustands des Ausgangsmaterials, des Werkstoffs des erzeugten Bauteils, des Einsatzes im Produktentstehungsprozess oder anhand der Verfahrensprinzipien unterteilt werden. Die Unterscheidung nach Verfahrensprinzipien ist in Bild 1.2 in reduzierter Form wiedergegeben. Die Reduktion erfolgte nach den Kriterien „Kunststoff als Werkstoff für die Bauteilerzeugung“ und „Etablierung der Systeme am Markt“.



**Bild 1.2** Einteilung der additiven Fertigungsverfahren nach Verfahrensgruppen und Prinzipien in reduzierter Form (© Leonie Fensterle 2020, in Anlehnung an Fischer 2020)

### 1.2.1 Sintern und Extrusion

Die Verfahrensgruppen Sintern und Extrusion basieren auf thermoplastischen Werkstoffen (Bild 1.2). Das Selektive Lasersintern (SLS) wurde 1992 von DTM kommerziell auf den Markt gebracht. Die Systeme hießen damals Mod A und Mod B. Im Jahr 2001 wurde DTM von der Firma 3D Systems übernommen. 3D Systems war zu diesem Zeitpunkt spezialisiert auf Stereolithografie (SLA) der Verfahrensgruppe UV-Aushärtung und Marktführer bei den Systemen der additiven Fertigung.

In der Verfahrensgruppe Extrusion sind folgende zwei Verfahren in Bild 1.2 aufgeführt: das Fused Deposition Modeling (FDM) und das Fused Layer Modeling (FLM). Beide Verfahren nutzen das Prinzip des Aufspritzens von geschmolzenen Polymeren mittels einer Düse. Die Unterschiede zwischen den Systemen der beiden Verfahren sind stellenweise geringfügig. Fused Deposition Modeling-Systeme lie-

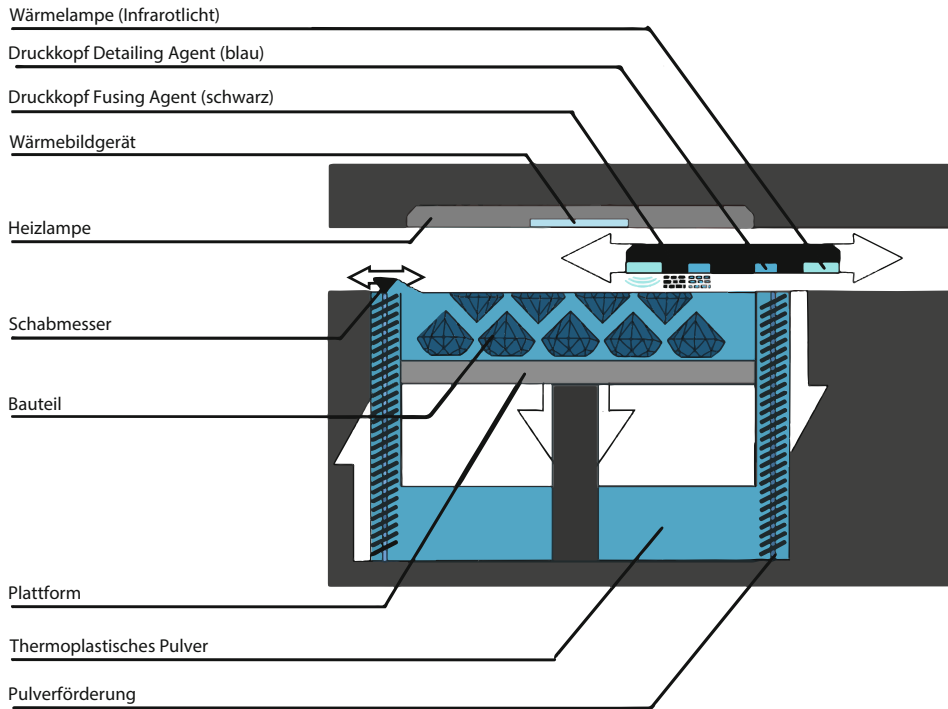
gen im Vergleich oft preislich höher als Fused Layer Modeling-Systeme, welche teilweise auch für Privatanwender konzeptioniert sind. Die Systeme des Fused Deposition Modelings weisen zudem oft einen robusteren Fertigungsprozess und einen höheren Automatisierungsgrad auf. Der Begriff Fused Deposition Modeling wurde von der Firma Stratasys eingeführt. Stratasys brachte sein erstes additives System, den 3D Modeler, 1992 auf den Markt. Stratasys wurde mit dem Fokus auf Low-End-Systeme in der additiven Fertigung 2003 Marktführer, verkaufte zu diesem Zeitpunkt fast die Hälfte aller additiven Systeme und stellte das größte Kontingent an installierten additiven Systemen. Grundsätzlich werden additive Systeme, die von der Firma Stratasys hergestellt werden und der Gruppe Extrusion zuzuordnen sind, unter Fused Deposition Modeling geführt. Dies gilt auch für Systeme von Herstellern wie zum Beispiel MakerBot, welche zu Stratasys gehören. Unter Fused Layer Modeling sind alle Anlagen geführt, die der Verfahrensgruppe Extrusion zuzuordnen sind und nicht von der Firma Stratasys oder von zugehörigen Unternehmen hergestellt werden. Darunter fallen auch viele additive Systeme, welche zum Beispiel nicht kommerziell verfügbar sind und sich noch im Forschungs- oder Entwicklungsstadium befinden.

## 1.2.2 Bindertechnologie und Laminieren

Zwei weitere thermoplastbasierte additive Verfahren sind zum einen in der Verfahrensgruppe Bindertechnologie (Multi Jet Fusion, MJF) und zum anderen in der Verfahrensgruppe Laminieren (Laminated Object Manufacturing, LOM) enthalten (Bild 1.2).

### Multi Jet Fusion (MJF)

Die durch Multi Jet Fusion erzeugbaren Bauteile ähneln denen des Selektive Lasersinterns und können aktuell mithilfe von Polyamid (PA) 12 und thermoplastischem Polyurethan (TPU) 90 A hergestellt werden. Verfahrensbedingt erfolgt die Schichterzeugung schneller als beim Selektive Lasersintern, was in Kombination mit geringeren oder gleichen Anlagenkosten zu niedrigeren Bauteilkosten führt. Beim von HP lancierten Multi Jet Fusion-Verfahren wird über einen Druckkopf wärmeleitende Flüssigkeit, der sogenannte Fusing Agent, auf die aktive pulverbasierte Schicht im Bauteilbereich aufgespritzt. Eine weitere Flüssigkeit, der Detailing Agent, wird parallel auf die Konturen des Bauteils in der Schicht aufgebracht und ist für die Erzeugung scharfer Kanten zuständig. Nach dem Aufspritzen der beiden Flüssigkeiten wird der jeweiligen Schicht über Infrarotlicht (IR) Energie zugeführt. Der Fusing Agent erhöht die Energie durch Absorbierung des thermoplastischen Pulvers und führt so zu einem Verschmelzen des Materials im benetzten Bereich. Der Detailing Agent wirkt diesem Vorgang als Isolator entgegen und begrenzt das Schmelzen des Materials (Bild 1.3).



**Bild 1.3** Funktionsprinzip des Multi Jet Fusion-(MJF-)Verfahrens von HP (Leonie Fensterle 2020)

Bei den aktuellen Systemen werden jede Sekunde 300 Millionen Tropfen Flüssigkeit mit einer Genauigkeit von  $21\ \mu\text{m}$  auf die Pulverschicht aufgespritzt. Somit besitzt das System ungefähr die Hälfte der Genauigkeit von Multi Jet Modeling-(MJM-)Systemen der Verfahrensgruppe „UV-Aushärtung“, welche zu den genauesten additiven Systemen gehören. Beide Verfahren nutzen Druckköpfe, welche denen in Tintenstrahldruckern ähneln. Dadurch wird die XY-Auflösung der Multi Jet Fusion-Systeme in mit 1200 dots per inch (dpi) angegeben. Der Einsatz von Flüssigkeit und deren optimale Einbringung in das Pulver führen zu einem gleichmäßigen Verschmelzen und zu einem weitgehend dichten Bauteil, welches zusätzlich auch die Problematik der Schichthaftung bei additiv erzeugten Bauteilen weitgehend behebt. Die hohe Geschwindigkeit, mit welcher die Schichten erzeugt werden, wird durch eine hohe Anzahl von Druckköpfen und die Einbindung der Energieeinbringung im Benetzungsvorgang erzeugt. Nach Angaben von HP lassen sich mit Multi Jet Modeling drei Zentimeter Bauteilhöhe pro Stunde erreichen, was der dreifachen Aufbaugeschwindigkeit des Selektive Lasersinterns entspricht.

Eine Besonderheit des Verfahrens ist der Sink-Effekt, welcher zu einem Grat in der Größenordnung von  $0,1\ \text{mm}$  auf der Endfläche des Bauteiles in Z-Richtung führt. Dieser Effekt wird durch die Einbringung der Flüssigkeiten hervorgerufen. Der



Bauraum der aktuellen HP-Systeme liegt bei  $380 \times 380 \times 28$  mm. Die Nachbearbeitung der Bauteile ähnelt denen des Selektiven Lasersinterns. Die Bauteile müssen nach der Entnahme aus dem System von Restpulver gereinigt werden. Die Oberfläche kann zum Beispiel über Gleitschleifen geglättet werden. Ein Einfärben der Bauteile ist – wie beim Selektiven Lasersintern – auch möglich. Das Multi Jet Fusion-Verfahren ist im Vergleich zum Selektiven Lasersintern und Fused Deposition Modeling ein junges additives Verfahren. Ab 2016 waren die ersten kommerziellen Systeme unter dem Namen HP Multi Jet Fusion 4200 erhältlich. HP kooperierte ab 2014 bei der Entwicklung mit den Firmen Nike, BMW und Johnson & Johnson (3Faktur GmbH).

### **High Speed Sintering (HSS)**

Ein weiteres tintenstrahlbasiertes additives Verfahren mit thermoplastischen Werkstoffen ist das High Speed Sintering (HSS) des Unternehmens voxeljet. Das High Speed Sintering unterscheidet sich in der Verfahrensweise nur bedingt vom Multi Jet Fusion-Verfahren von HP (Tabelle 1.1). Wie bei der HP-Systematik wird über einen Druckkopf eine Energie absorbierende Flüssigkeit auf ein Pulverbett eingebracht und die Energie über Infrarotlicht zugeführt. Die bedruckten Pulverbettbereiche verschmelzen dabei durch den Energieeintrag, wobei der restliche Pulverbereich lose bleibt und nach der Aufbereitung erneut dem Fertigungsprozess zugeführt werden kann. Der wesentliche Unterschied zum Multi Jet Fusion liegt darin, dass keine zweite Flüssigkeit (Detailing Agent) benötigt wird, da mittels zweier verschiedener Infrarotlichtstrahler unterschiedlicher Wellenlänge beide Pulverbereiche unabhängig voneinander in der Temperatur geregelt werden können. Das System von voxeljet ermöglicht zusätzlich den vollen Zugang zu den Druckparametern, um die Fertigung für den jeweiligen Werkstoff und die jeweilige Anwendung zu optimieren. Somit handelt es sich um ein sogenanntes offenes System, welches auch für die additive Fertigung mit kundenspezifischen Werkstoffen oder die Werkstoffentwicklung eingesetzt werden kann. Unterschiede bestehen zwischen den eingesetzten Druckköpfen. Beim Multi Jet Fusion von HP werden Bubble-Jet-Druckköpfe mit einer Auflösung von circa 1200 dpi genutzt. Im Gegensatz dazu werden beim High Speed Sintering Piezo-Druckköpfe mit einer Auflösung von circa 360 dpi eingesetzt (Tabelle 1.1). Die Auflösung der Bauteile wird jedoch maßgeblich durch die Korngröße des Werkstoffpulvers beeinflusst. Diese liegt bei beiden Systematiken bei circa  $55 \mu\text{m}$ . Die Piezo-Druckköpfe des High Speed Sinterings können ölbasierte, wasser- und lösemittelbasierte Fluide verarbeiten. Diese Möglichkeit erhöht weiter die Flexibilität hinsichtlich der Werkstoffauswahl (voxeljet AG).

**Tabelle 1.1** Multi Jet Fusion und High Speed Sintering im Vergleich (voxeljet AG)

	High Speed Sintering	Multi Jet Fusion
<b>Anwendungen</b>	Materialentwicklung und -forschung, Prototypenbau, Produktionsanwendungen, Dienstleistungszentren, verarbeitenden Gewerbe und Spritzgussunternehmen	Prototypenbau, Dienstleistungszentren und Produktionsanwendungen
<b>Bauraum</b>	VX200 HSS: 290 × 140 × 180 mm VX1000 HSS: 1000 × 540 × 400 mm	MJF 540/580: 322 × 190 × 248 mm MJF 4200: 380 × 285 × 380 mm MJF 5200: 380 × 294 × 380 mm
<b>Geschwindigkeit</b>	VX200 HSS: 580 cm <sup>3</sup> /h VX1000 HSS: 6500 cm <sup>3</sup> /h	MJF 540/580: 1817 cm <sup>3</sup> /h MJF 4200: 4115 cm <sup>3</sup> /h MJF 5200: 505 cm <sup>3</sup> /h
<b>Auflösung</b>	360 dpi	1200 dpi
<b>Werkstoffe</b>	PA 12, TPU, PP, PEBA und EVA offenes System	PA 12, PA 11, TPA und TPU
<b>Minimale Schichtstärke</b>	80 µm	80 µm
<b>Abkühlzeiten</b>	14 Stunden (abhängig von der Bauhöhe)	48 Stunden ohne „Fast Cooling“ (abhängig von Werkstoff und Korngröße)

### Laminated Object Manufacturing (LOM)

Das Laminated Object Manufacturing aus der Verfahrensgruppe Laminieren ähnelt dem Verfahrensprinzip der Contour Relief Maps von J.E. Blather (siehe Abschnitt 1.1). Die Verfahrensgruppe basiert auf einer Schichterzeugung, bei der mittels Messer, Fräser, Heißdrähten oder Lasern Halbzeuge in Platten- oder Folienform konturiert und simultan oder nachgelagert materialabhängig spezifisch gefügt und verbunden werden. Da bei dieser Verfahrensgruppe auch trennende und abtragende Bearbeitungsschritte vorhanden sind, wurde diese von Bernard und Taillander 1998 auch als subtraktiv-additives Verfahren bezeichnet.

Ein weiterer Begriff, der für die Verfahrensgruppe genutzt wird, ist Layer Laminated Manufacturing (LLM). Dieser Begriff ist dem Zusammenhang geschuldet, dass die Namensschöpfung von Laminated Object Manufacturing von der Firma Helisys ausging, ähnlich wie beim Fused Deposition Modeling von der Firma Stratasys. Im Gegensatz zu Stratasys wurde die Firma Helisys im Jahr 2000 aufgelöst. Seitdem werden keine Laminated Object Manufacturing-Systeme von Helisys mehr hergestellt. Firmen wie zum Beispiel die 2005 gegründete Firma Mcor Technologies Ltd brachten auf A4-Papier basierte Systeme wieder auf den Markt. Die ersten digitalen Laminated Object Manufacturing-Systeme wurden 1991 von Helisys auf den

Markt gebracht und waren somit ein Jahr vor den Systemen des Selektiven Lasersinterns und Fused Deposition Modelings kommerziell verfügbar. Das Helisys-System basierte auf Papier, welches einseitig mit einem thermisch aktivierbaren Klebstoff kaschiert war. Dieses beschichtete Papier lag in Rollenform vor und wurde mittels eines CO<sub>2</sub>-Lasers konturiert. Das spezielle Papier wird über die Bauplattform gezogen. Eine auf 330 °C erhitzte Walze aktiviert den Klebstoff und verbindet durch zusätzlichen Druck die aktuelle Schicht mit dem teilfertigen Bauteil. Nach diesem Schritt konturiert der CO<sub>2</sub>-Laser die aktuelle und verbundene Schicht, welche der spezifischen Querschnittschicht des zugrunde liegenden CAD-Modells entspricht. Dieses Vorgehen erhöht die Positioniergenauigkeit der jeweiligen Schichten zueinander, erhöht aber auch das Abfallvolumen. Weiterhin wird vom Laser ein gleichbleibender Rahmen aus dem Papier geschnitten, der auch den maximalen XY-Abmaßen des Bauraums entspricht. Durch diesen Rahmen wird die aktuelle Schicht vom Rollenmaterial gelöst. Papier, welches sich in diesem Rahmen befindet, jedoch nicht zum Bauteil gehört, wird quadratisch zerkleinert. Die sich daraus ergebenden Elemente lassen sich nach der Fertigstellung des Bauteils leichter mechanisch von diesem entfernen und sind mit Stützstrukturen wie beim Fused Deposition Modeling vergleichbar. Die Baugeschwindigkeit in Z-Richtung lässt sich durch die Laserbearbeitung von maximal vier Schichten zur selben Zeit erhöhen. Dadurch verringert sich aber die Auflösung des Bauteils in Z-Richtung, und die bearbeiteten Konturen verfärben sich stärker durch den Energieeintrag des Lasers.

Das Laminated Object Manufacturing wurde in verschiedene Richtungen weiterentwickelt. Die nutzbaren Materialien sind generell unbegrenzt, solange diese in Platten oder Folienform vorliegen und sich fügen lassen. Kunststoffe, Metalle, Keramik und Holz lassen sich mittels Laminated Object Manufacturing verarbeiten. Es sind auch Multimaterial-Bauteile aus mehreren Werkstoffen möglich, wobei der Materialwechsel sowohl schichtweise als auch lokal in der Schicht möglich ist. Verschiedene klassische trennende Verfahren können mit unterschiedlichen fügen Verfahren wie Kleben, Schweißen, Klemmen und Ultraschallschweißen kombiniert werden. Stellenweise lassen sich Laminated Object Manufacturing-Systeme auch nach dem Prinzip der Fügung kategorisieren.

Die Firma Cirtes bietet unter dem Namen Stratoconception Laminated Object Manufacturing-Lösungen an, welche mittels Mikro-CNC-Fräsen, Laserbearbeitung, Heißdraht oder Oszillationsmesser konturieren. Die Systematik hinter Stratoconception wurde von Claude Barlier entwickelt und 1991 zum Patent angemeldet. Die Besonderheit bei Stratoconception ist die nachträgliche Positionierung der Schichten mit Stiften beziehungsweise Aussparungen. Die nachträgliche Positionierung ermöglicht eine maximale Ausnutzung des Plattenmaterials für die Erzeugung der Bauteile. Eine weitere Besonderheit ist die Möglichkeit, zwischen 2-Achs-, 2½-Achs- und 5-Achs-Bearbeitung der Platten wählen zu können. Im Vergleich sind die Schichten bei der 2-Achs-Bearbeitung je nach Plattenstärke gut sichtbar.

Durch die 2½-Achs-Bearbeitung wird diese Sichtbarkeit maximal reduziert. Mit der Stratoconception-Systematik lassen sich sowohl kleine als auch große Bauteile erzeugen. In XY-Richtung sind Maße von 2000 × 3000 mm möglich. In Z-Richtung bestehen nur physikalische oder statische Beschränkungen.

Einer der Hauptvorteile des Laminated Object Manufacturings ist die höhere Prozessgeschwindigkeit gegenüber anderen additiven Verfahren bei großen Bauteilen mit hohem Volumen und geringer Komplexität der Geometrie. Weiterhin ist die Technologie der Anlagen einfach zu beherrschen und teilweise unabhängig vom genutzten Werkstoff. Durch das Verkleben der Schichten werden Spannungen reduziert und die Bauteile so vornehmlich verzugsfrei erzeugt. Problematisch ist die unterschiedliche Belastbarkeit der Bauteile in und quer zur Schichtrichtung, welches insbesondere beim Fügen der Schichten mit Klebstoffen auftritt. Ultraschall- oder diffusionsgeschweißte Metallbauteile stellen hier eine Ausnahme dar und weisen gleichbleibende Belastbarkeit in alle Richtungen auf. Weiterhin stellen Geometrien mit Hohlräumen oder Ausschnitten, welche das nachträgliche Entfernen der nicht zu dem Bauteil gehörigen Segmente verhindern, ein Problem dar. Eine Lösung hierfür ist die Entnahme des jeweiligen Segmentteils in der Schicht. Dies ist jedoch nicht bei jeder Laminated Object Manufacturing-Systematik möglich und verlangsamt die Prozessgeschwindigkeit. Des Weiteren kann durch das anfallende Abfallmaterial, welches den Faktor 1 : 10 aufweisen kann, der gleiche oder geringere Werkstoffpreis ausgeglichen werden. Wird das Laminated Object Manufacturing mit einem gleichbleibenden thermoplastischen Werkstoff genutzt, könnte der resultierende Abfall wieder zu Plattenmaterial umgeformt werden und somit ökologisch wie auch ökonomisch diesen Nachteil reduzieren.

## ■ 1.3 Funktionsprinzip des Fused Deposition Modelings (FDM)

Wie in Abschnitt 1.2.1 dargelegt, verbirgt sich hinter dem Namen Fused Deposition Modeling (FDM) der Verfahrensgruppe Extrusion das Unternehmen Stratasys. Es handelt sich um ein amerikanisches Unternehmen, welches ursprünglich im Bundesstaat Minnesota gegründet wurde und inzwischen den Hauptsitz nach Rehovot in Israel verlegt hat. Der Sitz in Eden Prairie wurde dennoch beibehalten. Neben der Firma MakerBot im Jahr 2013 hat Stratasys 2012 den Anlagenhersteller Objet Geometries übernommen. MakerBot deckt mit seinen kostengünstigen Systemen auch den Privatkundenbereich der thermoplastischen Extrusion ab. Die Multi Jet Modeling-(MJM-)Systeme von Objet Geometries sind der Verfahrensgruppe UV-Aushärtung zuzuordnen und werden von Stratasys unter dem Namen PolyJet

geführt. Auch wurde der Bereich der Dienstleistung, die bei Stratasys durch Red-Eye abgedeckt wurde, durch die Integration der Unternehmen Solid Concepts und Harvest Technologies erweitert. Die unterschiedlichen Fused Deposition Modeling-Systeme von Stratasys unterscheiden sich in einigen Aspekten, sei es hinsichtlich des Bauvolumens, der Materialbandbreite, des Stützmaterials sowie der zusätzlichen Anforderungen, wie zum Beispiel Waschanlagen, um Stützstrukturen zu entfernen, oder dem Aufstellort. Sowohl die Stratasys- als auch MakerBot-Systeme sind auf die Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen spezialisiert, welche in spezifischem Durchmesser als Rundschnur vorliegen. Diese Rundschnur wird im additiven Bereich als Filament bezeichnet und über Extrusion aus thermoplastischem Granulat hergestellt. Thermoplastisches Material wird beim Fused Deposition Modeling sowohl für die Erzeugung der Bauteile als auch für die nötigen Stützstrukturen eingesetzt.

### 1.3.1 Additive Extrusion mit Filament

Die Systeme der Verfahrensgruppe Extrusion unterscheiden sich vor allem durch ihre Zugänglichkeit von den anderen Gruppen. Keine anderen additiven Systeme können so zeitnah und kostengünstig in Unternehmen eingeführt werden. Durch das vergleichsweise preisgünstige und einfach herzustellende thermoplastische Verbrauchsmaterial können insbesondere Produktkonzept-Tests ohne großen finanziellen und zeitlichen Aufwand durchgeführt werden.

Die thermoplastischen Filamente für die Erzeugung der Bauteile und nötiger Stützstrukturen liegen mit einem Rundschnurdurchmesser von 1,75 mm vor. Das Filament wird durch die Extrusion von thermoplastischem Granulat erzeugt. Bei diesem kontinuierlichen Verfahren werden die thermoplastischen Werkstoffe mittels einer Schneckenpresse durch eine Matrize gepresst. Das Granulat wird dabei durch Wärmezuführung und innere Reibung aufgeschmolzen und homogenisiert. Durch den gleichzeitig aufgebauten Druck wird der Thermoplast durch die formgebende Matrize ausgestoßen. Der durch die Matrize austretende Thermoplast erstarrt dann in einer wassergekühlten Kalibrierung. Durch zusätzliches Anlegen von Vakuum presst sich das thermoplastische Profil an die Wände der Kalibrierung und beendet somit die Formgebung. Die Fertigungstoleranzen bei der Extrusion bewegen sich im Bereich von  $\pm 0,05$  mm. Das extrudierte thermoplastische Filament wird anschließend mit Hinblick auf ungehinderte und leichtgängige Abgabe auf Spulen gewickelt. Diese Filamentspulen werden einigen Fused Deposition Modeling-Systemen in gekapselter Form oder über Adapter zugeführt. Diese Art der Zuführung von Filament ermöglicht neben der Erfassung des Verbrauchs auch den Schutz vor unerwünschten Partikeln und Feuchtigkeit. Weiterhin unterstützt eine solche Filamentaufbewahrung den bei Fused Deposition Modeling-Systemen

weitverbreiteten automatischen Lade- und Entladeprozess. Dabei wird das Filament über Fördermotoren durch ein Schlauchsystem hin zum eigentlichen Schmelzkopf gefördert und automatisch in diesen ein- oder ausgefädelt. Nach dem automatischen Einfädeln des thermoplastischen Filaments wird eine gewisse Länge von diesem durch die Schmelzdüse in einen Behälter extrudiert. Diese Prozedur dient auch dazu, Partikel oder Restmaterial aus der Düse zu befördern. Nach dieser kurzen Extrusion wird die Düse über eine Gummilippe und Metallbürste bewegt. Dadurch werden anhaftendes Material und Verunreinigungen entfernt oder verringert. Dieser Reinigungsprozess wird auch während des Bauprozesses beim Wechsel zwischen den aktiven Düsen vorgenommen und erhöht dadurch die Qualität der Bauteile.

Bei den F123-Anlagen von Stratasys wird zusätzlich der sogenannte Purge Tower erzeugt. Dieser stellt ein automatisch generiertes und separates Bauteil dar, das zusätzlich zur Düsenreinigung eingesetzt wird. Adaptiert wurde diese Systematik aus dem Fused Layer Modeling, wo teilweise grundsätzlich stationäre Düsenreinigungsbereiche fehlen. Die Idee beim Purge Tower ist, dass einerseits die Düse von Partikeln und Restmaterial befreit wird und gleichzeitig mit ausreichend Material gefüllt ist, bevor diese wieder Material am eigentlichen Bauteil aufträgt. Der Nachteil dieses zusätzlich erzeugten Bauteils ist der Mehrverbrauch an thermoplastischem Material und die Erhöhung der Herstellzeit für Bauteile.

Farbwechsel in Bauteilen lassen sich bei Fused Deposition Modeling-Systemen prinzipiell nur schichtweise erzeugen. Dazu wird der Bauprozess gezielt nach der Fertigstellung einer bestimmten Schicht angehalten und das aktive thermoplastische Filament automatisch aus dem Schmelzkopf ausgefädelt. Dadurch kann dieses Filament abhängig nach System zusammen mit der Spule und dem Adapter entnommen werden. Das Anhalten kann vorab mit dem Setzen einer Pause geplant oder manuell an dem System ausgeführt werden. Nach dem Einsetzen des neuen Filaments wird dieses automatisch zum Schmelzkopf gefördert und dort eingefädelt. Der Bauprozess startet dann erneut mit dem neuen andersfarbigen Filament in der zu erzeugenden nächsten Schicht des Bauteils. Durch Restpartikel in der Düse wird im Bauteil ein weicher Farbübergang erzeugt. Die gleiche Systematik wird auch genutzt, wenn weiteres Filament für die Fertigstellung eines Bauteils benötigt wird. Dabei wird jedoch das Anhalten des Bauprozesses und Ausfädeln automatisch vom System eingeleitet.

Bis auf wenige Ausnahmen bei MakerBot-Systemen sind Fused Deposition Modeling-Systeme mit zwei Schmelzköpfen ausgestattet. Jeweils ein Schmelzkopf ist für den Bauteilthermoplast vorgesehen. Der zweite Kopf ist für das thermoplastische Stützmaterial ausgelegt. Bei den Fused Deposition Modeling-Systemen der 2017 bei Stratasys eingeführten F-Serie sind die beiden Schmelzköpfe leicht auswechselbar. Dies ist auch auf den bei Stratasys-Systemen neuen Werkstoff Polylactid (PLA) zurückzuführen. Der thermoplastische Werkstoff ist im additiven Privatbereich als

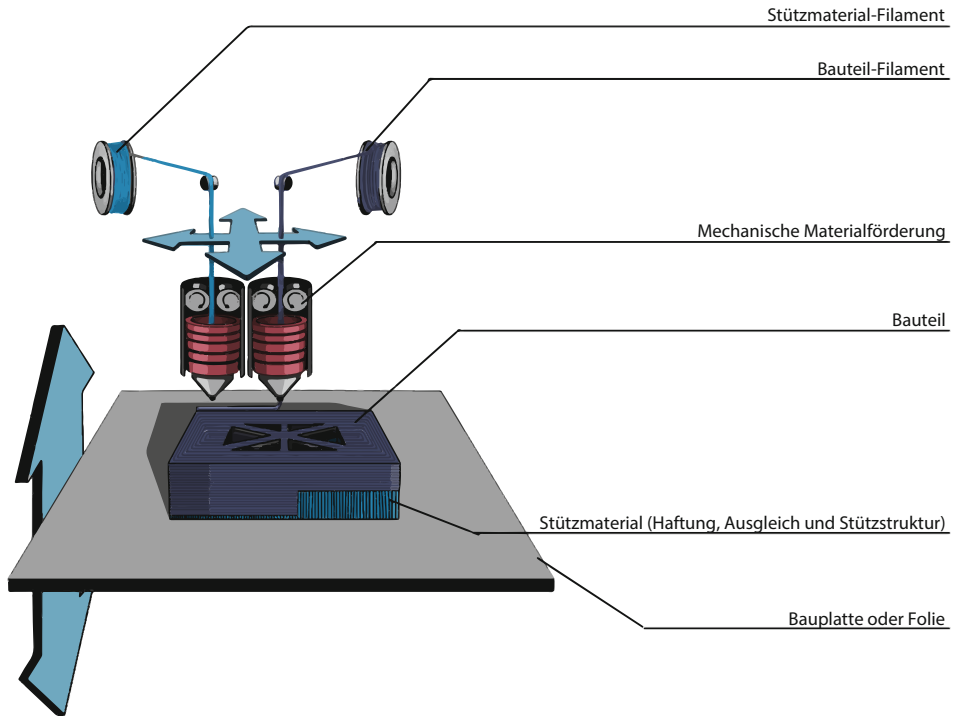


Verbrauchsmaterial sehr verbreitet und wird aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Die Polylactid-Nutzung als Werkstoff beim Fused Deposition Modeling ist auf Systeme von MakerBot zurückzuführen, welche dieses Material vornehmlich für den Bauprozess nutzen. Die Kosten für ein Kilogramm Polylactid sind circa 50% geringer als bei Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS). Der Thermoplast Acrylnitril-Butadien-Styrol ist bei Fused Deposition Modeling-Systemen der meist genutzte Werkstoff. Dementsprechend sind viele der Stratasys-Systeme auf die Verarbeitung von Acrylnitril-Butadien-Styrol oder ähnlicher Thermoplaste optimiert. Für schnelle und kostengünstige Konzept- und Verifikationsmodelle sind bei der F-Serie Polylactide vorgesehen. Um diese auf der F-Serie zu verarbeiten, wird der Schmelzkopf für die Erzeugung des Bauteils gewechselt, da Polylactide niedrigere Verarbeitungstemperaturen aufweisen als die weiteren systemkompatiblen Thermoplaste. Würde dieser Wechsel der Schmelzköpfe nicht vorgenommen, könnten Restpartikel der Thermoplaste mit höheren Verarbeitungstemperaturen zu einer fehlerhaften Extrusion oder Verstopfung führen. Die Stützung erfolgt bei Polylactiden mit dem gleichen Material bei gezielter Kühlung über einen speziellen zweiten Aufsatz, der den auswechselbaren zweiten Schmelzkopf ersetzt, welcher bei den anderen Thermoplasten für das Stützmaterial vorgesehen ist. Die Polylactid-Stützstruktur muss in einem nachgelagerten Schritt mechanisch entfernt werden.

Fused Deposition Modeling-Systeme sind grundsätzlich als 3-Achssystem in Portalanordnung konzeptioniert (Bild 1.4). Die Auflösung in XY-Richtung wird durch den Düsendurchmesser der Schmelzeinheiten geprägt. Bei Stratasys-Systemen liegt dieser Durchmesser durchschnittlich bei circa 0,45 mm und ist nicht variabel. Die Auflösung in Z-Richtung wird durch eine Achse erzeugt und kann bei einigen Fused Deposition Modeling-Systemen über die Steuersoftware verändert werden. Im Durchschnitt liegt diese bei circa 0,25 mm. Das thermoplastische Filament wird mechanisch durch Ritzel in die Schmelzdüsen gefördert und durch permanente mechanische Schubförderung extrudiert. Die dabei entstehenden dünnen Extrusionsraupen werden dann über Achsbewegungen gezielt und schichtweise aufgetragen, um das Bauteil oder nötige Stützstrukturen zu erzeugen. Dabei verbindet sich das wärmere aufgetragene Material mit dem schon vorhandenen. Die Schichterzeugung erfolgt in der Regel durch das Abfahren der jeweiligen Außenkontur und das Füllen dieser Umrandung durch eine 45°-Schraffur. Werden die Extrusionsraupen dabei direkt aneinandergelegt, wird ein vollgefülltes Bauteil erzeugt. Durch das gezielte Versetzen der Extrusionsraupen bei der 45°-Schraffur können Hohlstrukturen in den Bauteilen und der Stützstruktur erzeugt werden. In Z-Richtung werden die kleinen Hohlräume durch das Aufsetzen mehrerer vollgefüllter Schichten geschlossen.

Beim größten Teil der Fused Deposition Modeling-Systeme werden als Substratgrundlage für das zu erzeugende Bauteil thermoplastbasierte Bauplatten oder Folien eingesetzt. Diese sind hinsichtlich guter Haftung des Stützmaterials ausgelegt

und teilweise mit einer haftungsfördernden Struktur versehen. Die Haftung zwischen Substrat, Stützmaterial und Bauteilmaterial verhindert das Ablösen des Bauteils während des Bauprozesses oder die Deformation der Schichten in Z-Richtung, welche zum Abbruch des Bauprozesses führen können.



**Bild 1.4** Funktionsprinzip des Fused Deposition Modeling-(FDM)-Verfahrens von Stratasys  
(© Leonie Fensterle 2020)

Zu Beginn des Bauprozesses mit der Z-Auflösung von 0,25 mm werden circa neun Schichten mit Stützmaterial erzeugt, welche eine optimale lotrechte Ausrichtung von der letzten Stützmaterialschicht zu den Schmelzdüsen gewährleistet. Dieser Stützmaterialunterbau wird überall dort erzeugt, wo im weiteren Verlauf des Bauprozesses die ersten Bauteilschichten oder Stützstrukturen erzeugt werden. Eine nicht optimal ausgerichtete Düse zur Schicht kann einerseits zu einer Verstopfung der Düse und andererseits zum Verlust der Haftung zwischen den Schichten führen. Werden diese Stützmaterialschichten aus auflösbarem Thermoplast erzeugt, kann das Ablösen des Bauteils vom Trägersubstrat automatisch beim Entfernen der Stützen erfolgen. Der Stützmaterialunterbau beim Fused Deposition Modeling ist die Folge des vor dem Bauprozess erfolgten Kalibrierungsvorgangs, bei dem unter anderem circa neun Punkte auf dem Trägersubstrat mittels Taster abgenommen werden.



# Index

## Symbole

3D-Druck 57, 59, 60, 183, 224  
– Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) 197  
– PETG 158  
– Polyamide (PA) 154  
– Polybutylenterephthalat (PBT) 160  
– Polycarbonat (PC) 168  
– Polyethylen (PE) 182  
– Polymethylmethacrylat (PMMA) 201  
– Polymilchsäure (PLA) 172  
– Polyoxymethylen (POM) 164  
– Polypropylen (PP) 186  
– Polystyrol (PS) 194  
– Polyvinylchlorid (PVC) 190  
– Thermoplastische Elastomere (TPE) 175  
3D-Druck-Software 300  
3D-Druck-Stifte 24  
3D Fibre Printer 36  
3-Punkt-Biegebelastung 86, 128  
4D-Druck 80

## A

Abfallturm 278, 289  
Abkühlkonzept 365  
Abkühlphase 328  
Abkühlung 365  
Abkühlzeit 330  
Ablufteinrichtung 377  
Abriebtestverfahren 128  
ABS 137, 176, 191, 231  
Absaugung 378

absolute Genauigkeit 36  
Absorptionsgrad 317, 322  
Acrylglas (PMMA) 199  
Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) 137, 176, 191, 231  
Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copoly-  
mere 191  
Acrylnitril-Styrol-Acrylat-Copoly-  
mere 191  
Adaptive Layers 293  
Additive 211  
additive Fertigung 57, 64  
additives Fertigungsverfahren 313  
Aerosoljet-Verfahren 222  
AFK 218  
Aligner 230  
Allzweckkunststoff 197  
Alterungsprüfungen 128  
Altpulver 367  
amorphe Thermoplaste 130  
Andrewzahl 332, 364  
Anelastizität 82  
anionische Kettenpolymerisation 75  
Anisotropie 212  
anorganische Füllstoffe 212  
antistatische Eigenschaften 221  
Anwachsen 331, 344, 356, 361, 362  
äquiennergetische Prozessbeschleu-  
nigung 332  
aramidfaserverstärkte Kunststoffe  
(AFK) 218  
Arbeitsschutz 308, 309  
Arbeitssicherheit 376

- ARBURG Kunststoff-Freiformalen (AKF)  
   29, 59  
 Artificial Life 427  
 ASA 191  
 Aspektverhältnis 324  
 Atomic Diffusion Additive Manufacturing  
   (ADAM) 52  
 Auffrischprozess 375  
 Auffrischrate 326, 364, 365, 376  
 Auflösese Genauigkeiten 341  
 Aufschmelzkinetik 332  
 Aufwärmphase 328  
 Augmented Reality 458  
 Auslaufen 260, 264, 265, 273  
 Auspackstation 368  
 Außenbewitterung 220
- B**
- Bakelit 61  
 Baujobentpackung 367, 375  
 Baujobvorbereitung 338  
 Bauplattformheizung 259  
 Bauraumgeometrie  
   – rechteckig 336  
   – rund 336  
   – Wechselrahmen 336  
 Bauraumheizung 190, 257, 269  
 Bauraumtemperatur 161  
 Bauraumvolumen 364, 365  
 Bauteilauslegung 87, 127  
 Bauteilcharakteristik 346  
 Bauteilfehler 359  
 Bauteilprüfung 73  
 Bauteilqualität 124  
 Bauteilsimulation 124  
 Bauteilspannung 102  
 Beam-Offset 331, 354  
 Belichtungsgeschwindigkeit 364, 365  
 Belichtungsparameter 331  
 Belichtungsstrategie 331  
   – Hatchingstrategie 331  
 Big Additive Area Manufacturing  
   (BAAM) 29  
 Bioabbaubarkeit 172  
 biobasierte Polyamide 154  
 Biokompatibilität 169, 171, 230  
 Biokomposite 217  
 Biokunststoff 229  
 biologisch abbaubare Produkte 181  
 Bioplastik 229  
 Biopolymere 63, 65  
 Bioprinting 80  
 Biowerkstoffe 217  
 Biphenyle (PBB) 208  
 Blenden 207  
 Blends 72  
 Bowden-Extruder 116, 257, 271  
 BPTMC 167  
 Brandschutz 378  
 Break-even-Punkt 363, 364  
 Bruchdehnung 349  
 Brustimplantate 230  
 Bubble-Jet-Druckköpfe 8  
 Buckling 116, 243  
 Bussknetter 205
- C**
- CAD 285, 388  
 Carbon Nanotubes 222  
 Ceiling-Temperatur 122  
 CE-Zeichen 307  
 CFK 216  
 chemische Konsolidierung 284  
 chemisches Glätten 371  
 chemisches Recycling 157, 160  
 chemisches Schäumen 225  
 chloriertes Polyethylen (PE-C) 181  
 chlorsulfoniertes Polyethylen  
   (CSM) 181  
 Clear Cast Integration 431  
 CNC-Fräse 302  
 CO<sub>2</sub>-Laser 317  
 Coasting 267  
 COC 181  
 Code of Federal Regulations 21  
   CFR181.32 und Food  
   Notification 190 227  
 Coextrusion 409

Collagenmodell 232  
Comparative Tracking Index (CTI) 143  
Composite Filament  
  Fabrication (CFF) 50  
Compoundieren 207  
Contour Relief Maps 2  
COPE 173  
Copolyesterelastomere (COPE) 173  
Copolymere 65  
Crowdsourcing 446  
CSM 181  
CTI 143  
Curling 348, 356  
Curling-Effekt 327, 328, 356, 357  
Cycloolefin-Copolymere (COC) 181

## D

Dauergebrauchstemperatur 132, 137  
Deborah-Zahl De 118  
Dichte 349  
Differential Scanning Calorimetry (DSC)  
  98, 99, 103, 247  
Digital Light Synthesis (DLS) 454  
DIN EN ISO/ASTM 52900 312  
Dipol-Dipol-Wechselwirkungen 90  
Direct Drive-Extruder 175  
Direct Extruder 257  
Direct Light Processing (DLP) 59  
Dispergierhilfsmittel 209  
DIY 58  
DLP 59  
DLS 454  
DMA 83, 86  
Do It Yourself (DIY) 58  
Doppelschneckenextruder 205  
Downcycling 70  
Druckbetttemperatur 159  
Druckgeschwindigkeit 159  
Dryblend 377  
DSC 96, 98, 99, 103, 247  
DSC-Diagramm 327  
duales System 182, 194  
duktils Bruchverhalten 161  
Duromere 45, 60, 69

Duroplaste 58  
Düsengeometrie 106, 243, 252  
Düsentemperatur 251  
dynamische Wärmeflussdifferenzkalori-  
  metrie 98, 99, 103, 247  
dynamisch-mechanische Analyse (DMA)  
  83, 86  
dynamisch-mechanische Ermüdungs-  
  prüfung 128

## E

Echtzeitproduktion 439  
E-Glas 218  
Eigenspannungen 203  
Eindruckhärte 225  
Einschneckenextruder 205  
Einzelschichtheizung 146  
Elastizitätsmodul 88  
Elastomere 60, 69, 70  
elektromagnetische Strahlung 221  
Emissionsgrenzwert 190  
E-Modul 350  
Empfehlungen für Baujoblayout 344  
endkonturnah 444  
Endlofaser 47  
Endlofaserdrucker 409  
Energiedissipation 84  
Entaglements 92  
Entformungshilfsmittel 209  
Enthalpie 89  
Entpackungsanlage 368  
Entpulverung 314, 369  
Entropie 89  
Entwicklungscomplexität 433  
EPDM 135, 197  
EPDM/PP 135  
EP (Epoxidharze) 62  
Epoxidharze (EP) 62  
EP (Polyepoxide) 66  
Ermüdungsverhalten 87  
Ersatzorgane 232  
Erweichungstemperatur 68  
Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk  
  (EPDM) 135, 197

Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVAC) 181  
 Ethylen-Vinylalkohol-Copolymere (EVOH) 181  
 EVAC 181  
 EVM 181  
 EVOH 181  
 Extruder 58, 203  
 extrusionsbasierte Verfahren 58  
 Extrusionsmultiplikator 270, 273  
 Extrusionsparameterraum 256  
 Extrusionsraupen 14

## F

Fadenbildung 260, 264  
 Fällungspolymerisation 317  
 Farbeinstellung 208  
 Färben 372  
 Faserablageverfahren 216  
 Fasern 153, 155  
 Faserorientierung 214, 215  
 Faserverbundwerkstoffe (FVW) 211, 219  
 Faservolumenanteil 214  
 FDA 227  
 FDA-Richtlinien 227  
 FDM 59  
 Feingestalt 350, 351  
 Feinguss 427  
 Feinpartikelmaske 377  
 fermentative Verfahren 229  
 Fertigungskosten 366  
 Fertigungsphase 328  
 Fertigungswerkzeug 159  
 Feuchtigkeitsaufnahme 150  
 FFF 59, 60  
 Filamentdurchmesser 119, 272  
 Filamente 58  
 Filamentvortrieb 255, 256  
 Finishing Touch Smoothing-Station 17  
 FIPFG 227  
 Flächenenergie 332  
 Flammbeständigkeit 137  
 Flammenschutz 208  
 Flammenschutzadditive 223

Flammenschutzmittel 153  
 Fließeigenschaften 160  
 Fließinstabilitäten 120  
 FLM 24, 59, 60  
 Fluorpolymere 138  
 Flüssigkristallpolymere 138  
 Fokusdurchmesser 356  
 Folien 27, 58  
 Formabweichung 355  
 formed in-place foam gasketing (FIPFG) 227  
 Formhaltigkeit 355  
 Formmassen 207  
 Formulieren 207  
 Fourier'sches Gesetz 110  
 freies Volumen 93, 103  
 F-Thetalinse 367  
 Fügeverfahren 202  
 Fülldichte 269, 298  
 Füllstoff 211  
 Füllstoffanteil 212  
 Füllstoffgehalt 71  
 funktionale Prototypen 159, 172  
 Funktionalisieren durch Inserts 374  
 Funktionsintegration 429  
 Fused Deposition Modeling (FDM) 59  
 Fused Filament Fabrication (FFF) 59, 60  
 Fused Layer Modeling (FLM) 24, 59, 60  
 FVW 211, 219

## G

G-Code 302, 435  
 GDP 149  
 Gebrauchstemperatur 61, 70  
 Gebrauchtpulver 374  
 Gefährdungsbeurteilung 308  
 Gel-Extrusion 180  
 Generative Fertigung (GF) 1  
 generatives Design 427  
 geschlossene Systeme 408  
 Gestaltabweichung 350  
 GfK 215  
 GFV-Polymere 213  
 Gibbs-Energie 89

glasfaserverstärkte Kunststoffe  
(GFK) 215  
glasfaserverstärkte Polymere 213  
Glaskugeln 369  
Glaspunkt 60  
Glasübergangstemperatur 60, 85, 93,  
144, 150, 172  
Glätten 370  
Glätten durch Strahlen 370  
Glättungsanlage 372  
Gleitschleifen 371  
Granulat 27, 58  
Granulatruder 224, 244, 296  
Graphen 222  
Grenzwerte 227  
Grobgestalt 350  
Growth Domestic Product (GDP) 149  
GS-Prüfzeichen 307  
Gummi 70  
Gummielastizität 70, 88  
Gummiplateau 82  
Gummiplateaumodul 89

## H

Haifischhaut 119  
Harze 58  
Harzinfiltration 196  
Hatchabstand 331  
Hatchingstrategie 331  
Hatchlinien 331  
Hausner-Faktor 322  
Hautverträglichkeit 373  
HDPE 62  
HDT 132, 142, 143  
Heat Deflection Temperature (HDT)  
132, 142, 143  
High Impact-Polystyrene (HIPS) 191  
High Speed-Sintern (HSS) 8, 87  
HIPS 191  
HKV 106, 107  
Hochdruck-Kapillar-Viskosimeter (HKV)  
106, 107  
Hochdruckpolyethylen (HDPE) 62  
Hochleistungsfaserstoffe 140

Hochleistungskunststoffe 132  
Hochleistungsthermoplaste 137  
Hochtemperaturkunststoff 132  
Homopolymere 65  
Hooke'sches Gesetz 81  
Hotend 58  
HSS 87  
Hybridbauweise 153  
hybride additive Fertigung 45  
Hydrolyse 153  
hydrophile Wirkung 377  
Hyperpersonalisierung 435

## I

ICP 222  
IDEX-Drucker 278  
Imprägnierung 409  
Industrieroboter 26, 206  
Infill 269, 296, 299  
Infillstrukturen 124  
Infiltrationsverfahren 228  
Infrarotspektroskopie 22  
Inkjet-Verfahren 222  
innere Spannungen 161  
Integralschaum 226  
intrinsisch leitfähige Polymere  
(ICP) 222  
IR-Absorption 131  
IR-Strahlung 131  
Isoliereigenschaften 220  
Isopropanol 367  
isotrope Körper 84

## K

kalorimetrische Methoden 98  
kationische Kettenpolymerisation 75  
Kautschuk 61, 70  
Kelvin-Körper 82  
Kennwerte 127  
Kerbschlagzähigkeit 128  
Kettencopolymerisation 161  
Kettenlänge 80  
Kettensegmentbeweglichkeit 94

kinetische Dämpfer 456  
 Kleinserien 145  
 Knochenimplantate 230  
 Knochennägel 230  
 kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) 216  
 Kohlenstoffnanoröhren 222  
 komplexe Viskosität 84  
 Kompressionstest 128  
 Konsolidierung 283, 409  
 Konstruktionsempfehlungen 342  
 Konstruktionsempfehlungen für SLS-Bauteile 340  
 Konstruktionskunststoffe 65, 132, 148  
 Kontamination 360  
 kooperative Roboter 40  
 koordinative Kettenpolymerisation 75  
 Kratzfestigkeit 200  
 Kreide 212  
 Kriechfestigkeit 147  
 Kristallisationsanfangstemperatur 327  
 Kristallisationsbeschleuniger 210  
 Kristallisationsgrad 352  
 kritische Kettenlänge 92, 105  
 Kryomahlverfahren 87, 418  
 Kunststoffe 57, 61, 62, 64, 137, 142, 148, 155, 164, 176, 219, 220, 221, 222, 224, 412  
 Kunststoff-Freiformen, ARBURG (AKF) 29, 59  
 Kunststoffmatrix 45  
 Kunststoffpyramide 133  
 Kurzfaser 47  
 Kurzfasergrenulate 215  
 kurzfaserverstärkte Thermoplaste 214

## L

Lagetoleranz 350  
 Längenänderung 353  
 Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha$  184  
 Langfaser 47  
 Langfasergrenulate 215  
 langfaserverstärkte Thermoplaste 214  
 Large Format Printing (LFP) 250, 412

Large Scale Additive Manufacturing (LSAM) 412  
 Laser-Absorption 131  
 Laserfenster 367  
 Laserfokusbereich 331, 356  
 Laserleistung 365  
 Laserschutzvorrichtung 378  
 Lasersintern 161  
 Laserstrahlschmelzen 313  
 Layer Lamine Manufacturing (LLM) 9  
 lebende Polymerisation 75  
 Lebensdauer 147  
 Lebensmittelkontakt 227  
 Lebensmittelzulassung 227  
 Leerfahrt 264  
 Leitfähigkeit 220, 221  
 LFP 250, 412  
 Limiting Oxygen Index (LOI) 222  
 Liquid Crystalline Polymers (LCP) 138  
 LLM 9  
 Lohnkosten 363  
 LOI 222  
 lokale additive Fertigung 441  
 Lost Foam 424  
 Lösungsmittel 142  
 Lösungsviskositätszahl 325  
 LSAM 412

## M

Mahlverfahren 318  
 – kryogenes 319  
 Maschinenrichtlinie 2006/42/EG (MRL) 307  
 Maßabweichung 352  
 Massenproduktion 159  
 Maßhaltigkeitsprobekörper 355  
 Maßtoleranz 350  
 Masterbatch 208, 211  
 Masterkurve 91  
 Material Extrusion (MEX) 58, 242, 390, 391  
 Materialinfusion 129  
 Materialkosten 366  
 Materialmanagement 374

Matratzen 175  
Maxwell-Element 90  
mechanische Eigenschaften 349, 358  
mechanisches Glätten 371  
mechanisches Recycling 168  
mechanisches Schäumen 225  
Mecuris Solution Platform 453  
medizinische Geräte 230  
Medizintechnik 167  
Mehrkomponentenspritzgießen 203  
Mehrphasensysteme 136  
Melt Volume-flow Rate  
(MVR) 97, 106, 248  
Melt Volume Index (MVI) 106, 248  
Meniskus 347  
Meniskuseffekt 347  
MEX 58, 242, 390, 391  
Mica 213  
Migration 227  
Mikro-Fabriken 446  
Mineralglas 200  
Mischen 375  
Mischpulver 374  
MJF 6  
MuCell-Verfahren 226  
Multi Jet Fusion (MJF) 6  
Multimaterial-Bauteile 10, 25  
MVI 106, 248  
MVR 97, 106, 248

## N

Nachbearbeitungsverfahren 131, 366  
Nachsintern 129  
Nachvernetzung 325  
nachwachsende Rohstoffe 65, 154  
Nahtstellenbildung 434  
naturfaserverstärkter Kunststoff  
(NFK) 217  
Necking 127  
Netzwerkmodul 89  
Neupulver 368, 374  
NFK 217  
Normen 127, 311  
Nukleierungsmittel 210

## O

Oberflächenbehandlung 162  
Oberflächenglättung 129  
Oberflächenhaftung 186  
Oberflächenstruktur 346  
Oberflächenverdichtung 370  
Oberflächenvergütung 282  
Ökodesign-Richtlinie 440  
Ölbeständigkeit 153  
Oozing 260, 264, 265, 273  
Operationsbesteck 230  
optische Eigenschaften 207  
Orangenhaut 351  
Orangenhaut-Effekt 325  
Orange Peel Effect 325  
Organdruck 172  
orientierungsabhängige Maß-  
abweichung 330  
Orthesen 230  
Oszillation 86  
Overflow 335, 376  
Oxidationsbeständigkeit 143  
Oxidationsstabilisatoren 209

## P

PA 62, 65, 149  
PA 11 231  
PA 12 231  
PAC 65  
Packdichte 364, 365  
PAEK 62, 137  
PAM 141, 222  
Parametersysteme 337  
Partcake 333, 367  
Partikeldurchmesser 316, 323  
partikelgefüllte Kunststoffe 211  
Partikelgrößenverteilung 317, 323  
PAS 137  
Pastenextrusion (PAM) 141, 222  
PBB 208  
PBI 138  
PBT 149, 159  
PC 62, 65, 149, 165, 231  
PC+ 199

- PC-ABS 137, 169  
PC-PBT 137, 169  
PE 65, 135, 176  
PEBA 173  
PE-C 181  
PEEK 79, 138, 231  
PEF 63  
PEI 62, 138, 139, 223  
Pellets 58  
Perfluoralkoxyalkan (PFA) 138  
Personalisierung 429  
Personalkosten 366  
PES (Polyester) 65, 66  
PES (Polyethersulfon) 139  
PET 149, 155  
PETG 158, 231  
PFA 138  
PHA 63  
Phasenübergänge 98  
Photopolymersysteme 70  
Photopolymerverfahren 58  
physikalisches Schäumen 225  
PI 62, 138  
Piezo-Druckköpfe 8  
Pigmente 208  
Pinselhaare 360  
PLA 63, 169  
Plastik 57  
PMI 138  
PMMA 62, 176, 199  
Poissonzahl 84  
Polyacrylnitril-Butadien-Styrol  
(ABS) 137, 176, 231  
Polyamide (PA) 62, 65, 149  
Polyaramide 138  
Polyarylate 138  
Polyaryletherimid (PEI) 62, 138, 139, 223  
Polyaryletherketone (PAEK) 62, 137  
Polyarylethersulfone (PAS) 137  
Polybenzimidazole (PBI) 138  
polybromierte Biphenyle (PBB) 208  
Polybutylenterephthalat (PBT) 149, 159  
Polycarbonate (PC) 62, 65, 149, 165, 231  
Polycarbonat-Polyacrylnitril-Butadien-  
Styrol (PC-ABS) 137, 169  
Polycarbonat-Polybutylenterephthalat  
(PC-PBT) 137, 169  
Polyepoxide (EP) 66  
Polyester (PES) 65, 66  
Polyether-Blockcopolyamide (PEBA) 173  
Polyetheretherketon (PEEK) 79, 138, 231  
Polyetherimid (PEI) 62, 138, 139, 223  
Polyethersulfon (PES) 139  
Polyethylenfuranoat (PEF) 63  
Polyethylen (PE) 65, 135, 176  
Polyethylenerephthalat (PET) 149, 155  
Polyethylenvinylacetat (EVM) 181  
Polyhydroxyalkanoate (PHA) 63  
Polyimide (PI) 62, 138  
Polyjetting 71  
Polylactid (PLA) 63, 169  
Polymerblends 130, 136  
Polymerfasern 218  
Polymerisation 66  
Polymerisationsreaktion 74  
Polymerlegierung 130  
Polymermischungen 136  
Polymerphasen 71  
Poly(meth)acrylate (PAC) 65  
Polymethylmethacrylat  
(PMMA) 62, 176, 199  
Polymilchsäureester (PLA) 63, 169  
Poly-m-phenylenisophthalamid  
(PMI) 138  
Polyoxymethylen (POM) 149, 161  
Polyphenylsulfid (PPS) 137, 139  
Polypropylenfasern 185  
Polypropylen (PP) 65, 135, 176  
Polyreaktionen 66  
Polystyrol  
– ataktisch 191  
Polystyrol-Acrylnitril (SAN) 176  
Polystyrol-Blockcopolymer (SBC) 72  
Polystyrol (PS) 62, 65  
Polytetrafluorethylen (PTFE) 62, 138  
Polyurethane (PU) 62, 65, 66  
Polyvinylacetat (PVA) 62, 183  
Polyvinylalkohol (PVA) 62, 183  
Polyvinylchlorid (PVC) 62, 65, 176, 187  
Polyvinylidendifluorid (PVDF) 138, 197



Polyvinylidenfluorid (PVDF) 138, 197  
POM 149, 161  
Porosität 124, 348  
Positivlisten 230  
Post-Processing 366  
Postsinterverfahren 228  
PP 65, 135, 176  
PPS 137, 139  
Pre-Processing 338  
Produktentwicklungsprozess 423  
Prothesen 230  
Prototypenbau 76, 145  
Prozessfehler 359  
Prozessinstabilitäten 108  
Prüfstab 126  
PS 62, 65  
PTFE 62, 138  
PU 62, 65, 66  
Pull-out 356  
Pulverauffrischung 325  
Pulverauftrag 335  
Pulverauftragssystem 333, 367  
– Doppelklinge 333  
– Rakel 333  
– Rolle 333  
pulverbasierte Verfahren 58  
Pulverbett 58  
Pulverbodenschicht 328  
Pulvereinschlüsse 362  
Pulverherstellungsverfahren 317  
Pulverkreislauf 375, 376  
Pulverkuchen 330, 359, 367, 368, 375  
Pulverpool 375, 376  
Pulverprüfverfahren 321  
– Klopfdichte 322  
– Melt Volume-flow Rate (MVR) 326  
– Schüttdichte 322  
Pulverschüttdichte 335  
Pulversinterverfahren 87, 124  
Pulverzuführung 334  
– mit vertikal verfahrenbaren  
  Zylindern 334  
– per Trichter 335  
Purge Tower 13, 278, 289  
PVA 62, 183

PVC 62, 65, 176, 187  
PVDF 138, 197  
PVT-Diagramm 250  
pyrolytisches Recycling 164  
Pyrometer 328, 366

## Q

Qualitätskontrolle des Neupulvers 375  
Qualitätssicherung 311  
Qualitätssicherung an SLS-Bau-  
  teilen 350  
quasiisotherme Prozessführung 316,  
  324, 328  
Querkontraktionszahl 84

## R

radikalische Kettenpolymerisation 75  
Raleigh Disturbances 319  
Ram-Extrusion 180  
Rapid Prototyping (RP) 1  
Rapid Tooling (RT) 4  
Rauchgase 223  
Rauchgastoxizität 223  
Rauchmeldeanlagen 378  
Rauheit 346, 350, 351  
Rauheitsmessgerät 352  
Raumgewicht 224  
Ready-to-Use 374  
reaktiver Extrusionsprozess 174  
Recyclingkunststoff 186  
Recyclingprozesskosten 168  
Refilament 304  
Regranulat 186, 194, 304  
Reinraumumgebung 453  
Rekristallisationskinetik 100  
Relaxationsverhalten 136  
Relaxationszeit 90  
Restpulver 43, 368  
Reynolds-Zahl 114  
Rezyklat 168  
Rieselfähigkeit 322  
Rieselhilfen 317  
Risswachstum 129

- Roboterarmenlenksysteme 459
- Robotic Composite 3D 40
- Rückzug 265
- Rückzugsgeschwindigkeit 121, 266, 273
- Rückzugslänge 121, 266
- Ruß 212
- Rüttlersystem 334
  
- S**
- Sacrificial Tooling 424
- Salzverfahren 228
- Sandguss 428
- SAN (Polystyrol-Acrylnitril) 176
- SAN (Styrolacrylnitril-Copolymere) 191
- Sauerstoffindex 222
- SBC 72, 173, 191
- SBS 134
- Scangeschwindigkeit 332, 364
- Scanrichtung 331
- Scharfkantigkeit 347
- Schaumstoffe 224
- Schergefälle 105
- Schichtaufbauichtung 331
- Schichtauftragsgeschwindigkeit 365
- Schichtbaufehler 359
- Schichthöhe 316
- Schichtsterverfahren 58
- Schlagschäume 225
- Schlupf 271
- Schmelzeanhäufung 344, 357, 361
- Schmelzebruch 108, 119
- Schmelzedefekte 120
- Schmelzedichte 97, 107
- Schmelzedispersionsprozesse 419
- Schmelzenthalpie 328
- Schmelzepumpe 246
- Schmelzeverdüsung 319
- Schmelzeviskosität 325, 326
- Schmelze-Volumenfließrate 106, 248
- Schrumpf 67, 95, 96, 100, 107, 155
- Schutzbrillen 377
- Schutzhandschuhe 377
- Schutzkleidung 360
- Schwarzpigment 212
- Schwindung 250, 330, 352, 357
- Schwund 356
- SEBS 134
- Selective Laser Melting (SLM) 313
- Selektives Laserschmelzen 313
- Selektives Lasersintern (SLS) 41, 60, 87, 313
- Serienbauteilfertigung 307
- Shark Skin 119
- Shell Style 426
- Shore-Härte 123
- SI 62
- Sicherheitsdatenblätter 282, 308
- Sicherheitseinrichtungen 377
- Sicherheitsmaßnahmen 377
- Sicherheitsschuhe 377
- Sieben 317
- Silikone (SI) 62
- Skalierungsfaktor 354
- SLA 59
- Slicer 116, 267, 285
- Slicing 342
- Slicing-Fehler 359
- Slip 271
- SLM 313
- SLS 41, 60, 87, 154, 161, 313
- solvolytische Depolymerisation 164
- solvolytisches Recycling 168
- Sonderfertigungsstrategie 435
- Spannungs-Dehnungs-Diagramm 125
- Spannungs-Relaxationsversuch 90
- Spannungsrissbildung 219
- Spannungsrisskorrosion 200
- Sparse Style 426
- Sphärizität 324
- Spritzgießverfahren 202
- Spritzquellung 98, 117, 118, 119, 169
- Spurversatz 331
- Stabilisatoren 209
- Standardkunststoff 132
- Standard Triangulation Language (STL) 340
- Staubsauger 378
- Stauchhärte 225
- Stents 230

- Stereochemie 140
  - stereochemische Isomerie 140
  - Stereolithografie (SLA) 59
  - Stickstoffwarnmeldeanlage 378
  - STL 340, 437
  - stoffliches Recycling 160
  - stoffliche Wiederverwertung 69
  - STOP-Prinzip 309
  - Strahlgut 369
  - Strahlkabine 370
  - Strahlprozess 370
  - Strahlverschiebung 354
  - Strati 29
  - Streckgrenze 126
  - Streckspannung 126
  - Streifenlichtprojektionsverfahren 358
  - Stringing 260, 264
  - Struktur-Eigenschaftsbeziehung 140
  - Stufenwachstumsreaktion 76
  - Stützmaterial 58, 131, 276, 281
  - Stützstruktur 333
  - Styrolacrylnitril-Copolymere (SAN) 191
  - Styrol-Blockcopolymere (SBC) 173, 191
  - Styrol-Butadien-Pfropfcopolymere (SB) 191
  - Surface Tesselation Language (STL) 340, 437
  - Surround Support 19
- T**
- Taktizität 142
  - Talkum 212
  - tan  $\delta$  84
  - Tauchfärben 373
  - technische Kunststoffe 132
  - technische Polymere 67
  - teilkristalline Thermoplaste 130
  - Temperatur-Verweilzeitspektrum 254
  - Temperprozess 71, 161
  - Textilfasern 156
  - TGA 122, 305
  - thermische Alterung 325
  - thermische Degradation 143
  - thermische Konsolidierung 283
  - thermische Prozessführung 327
  - thermischer Verzug 344
  - thermisches Recycling 160, 164
  - thermisch leitfähige Kunststoffe 222
  - Thermoformen 204
  - thermogravimetrische Analyse (TGA) 122, 305
  - thermoplastische Elastomere (TPE) 71
  - thermoplastische Kunststoffe 58
  - thermoplastische Olefine (TPO) 173
  - thermoplastische Polyester-Elastomere (TPE-E) 173
  - thermoplastische Polyolefin-Elastomere (TPO) 72
  - thermoplastische Polyurethane (TPU) 72
  - thermoplastische Vulkanisate (TPV) 135, 173
  - Tissue Engineering 171
  - Titandioxid 377
  - Toleranzen 285
  - Tomografie 232
  - Topologieoptimierung 275, 301
  - Towpreg-Extrusion 409
  - TPE 71, 135
  - TPE-E 173
  - TPO 72, 173
  - TPU 72, 231
  - TPV 135, 173
  - Treibmittel 203
  - Treppenstufeneffekt 16, 333, 344, 346, 351
  - triangulierte .stl-Dateien 359
  - tribologische Eigenschaften 212
  - Trichter mit Doppelklinge 335
  - Trogvibrator 371
- U**
- Überbrückung 158, 287
  - Überextrusion 116, 273
  - Überhänge 58, 172
  - Überhärtung 356
  - Überlauf 335
  - Übersinterung 356
  - Ulbrichtkugel 322

Umformverfahren 202  
 Unterextrusion 116, 273  
 Urbee 445  
 urformender Fertigungsprozess 316  
 Urformverfahren 202, 204  
 Used Material 374  
 UV-Stabilisatoren 162

## V

Van-der-Waals-Wechselwirkungen 90  
 van Gorp-Palmen-Plot 106  
 VDI-Richtlinien 312  
 Verarbeitungseigenschaften 207  
 Verarbeitungsextruder 205  
 Verarbeitungshilfsmittel 209  
 Verarbeitungstemperatur 71  
 Verarbeitungsviskosität 71  
 Verbundmaterialien 63  
 Verbundwerkstoffe 171  
 Vergilbungsstabilisatoren 209  
 verlorene Form 424  
 Vernetzungsdichte 86  
 Vernetzungsmodul 86  
 Verschlaufungen 92  
 verunreinigtes Pulvermaterial 360  
 Verzug 96, 161, 260, 264, 268, 269,  
 348, 356  
 Verzug durch Warpage 361  
 verzugsbegünstigende Probekörper  
 – Curling-Kreuze 328  
 Vielzweckprüfkörper 358  
 Virgin Material 374  
 VOC 310  
 Volatile Organic Compounds  
 (VOC) 310  
 volatile organische Komponenten 310  
 Volumenänderung 353  
 Volumenenergiedichte 332, 364  
 Volumenschwindung 353  
 Volumentoleranzen 164  
 volumetrischer Schwindungsanteil 354  
 Vorschubkraft 243, 255, 256, 272

## W

Wachsausschmelzverfahren 424  
 Wachstum 356  
 Wärmeformbeständigkeit 132, 142, 143  
 Wärmekapazität 109, 247  
 Wärmeleitung 102, 103, 110  
 Wärmestand 128  
 Wärmestrahlung 110, 111  
 Wärmeübergang 110  
 Warpage 344, 348, 356, 357, 361  
 Warping 165  
 Wasserstoffbrückenbindungen 150  
 Wasserstoffbrücken-Wechsel-  
 wirkungen 90  
 Weichmacher 188  
 Weiterreißenergie 129  
 Welligkeit 350  
 Weltwirtschaftsleistung 149  
 Werkstoff 61  
 Wertschöpfungskette 391, 419  
 Wiederholgenauigkeit 36  
 Williams-Landel-Ferry-Gleichung 93  
 Wipe 267  
 Wirtschaftlichkeit 332, 363  
 Wirtschaftlichkeitsanalyse 363  
 Witterungsbeständigkeit 152  
 WLF-Gleichung 93  
 Wood Plastic Composites (WPC) 217  
 WPC 217

## Z

Zeit-Temperatur-Superposition 93  
 Zellplotting 80  
 Zersetzung 188  
 Zersetzungstemperatur 165  
 zerstörende Testverfahren 128  
 Zugfestigkeit 349  
 Zugstab 358  
 Zugversuch 124  
 Zuschlagstoffe 207  
 Zweiphasenmischgebiet 327  
 Zwischenschichthaftung 262, 263, 269