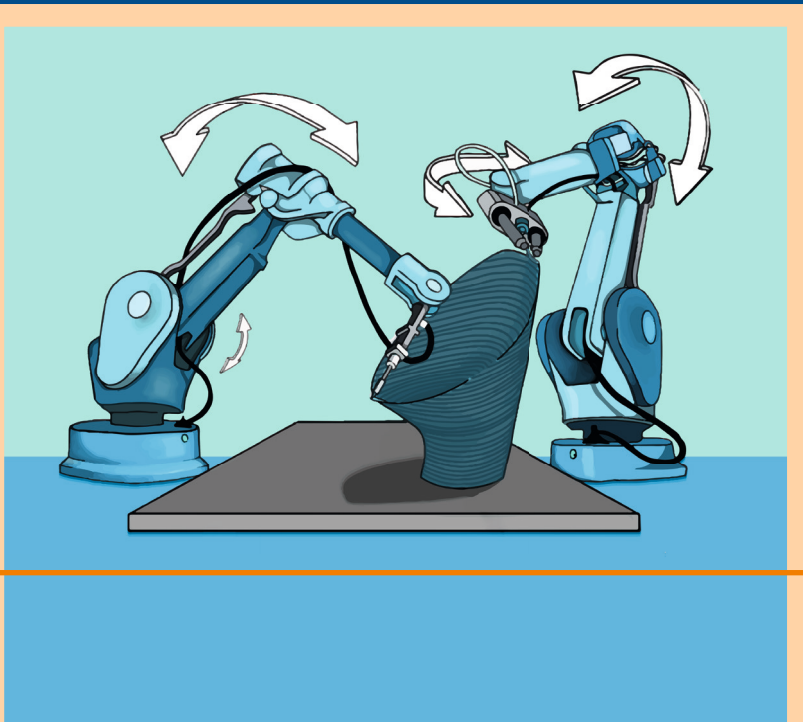


Andreas Fischer
Dirk Achten
Martin Launhardt

Kunststoff-Wissen für die additive Fertigung

Eigenschaften, Verarbeitung und
Einsatzgebiete von Thermoplasten



HANSER

Fischer/Achten/Launhardt
Kunststoff-Wissen für die additive Fertigung



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Andreas Fischer
Dirk Achten
Martin Launhardt

Kunststoff-Wissen für die additive Fertigung

Eigenschaften, Verarbeitung und Einsatzgebiete
von Thermoplasten

HANSER

Die Autoren:

Andreas Fischer, Gemmrigheim

Dirk Achten, Leverkusen

Martin Launhardt, Frechen

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht, auch nicht für die Verletzung von Patentrechten, die daraus resultieren können.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Bibliografische Information der deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag München

www.hanserfachbuch.de

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

Titelmotiv: © Leonie Fensterle

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

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

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

Inhalt

1	Einführung in die thermoplastbasierte additive Fertigung ...	1
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
2	Polymere in der additiven Fertigung	57
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
3	Besonderheiten der Thermoplastverarbeitung in der additiven Fertigung	241
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
4	Additive Baumaterialien und Applikationen im thermoplastischen Bereich	389
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	Kleinmöbel 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

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. Blanthier 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 μm bis 1 μm erreichen.

Die Oberflächen additiv erzeugter Bauteile, welche nicht durch den Stufeneffekt 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.

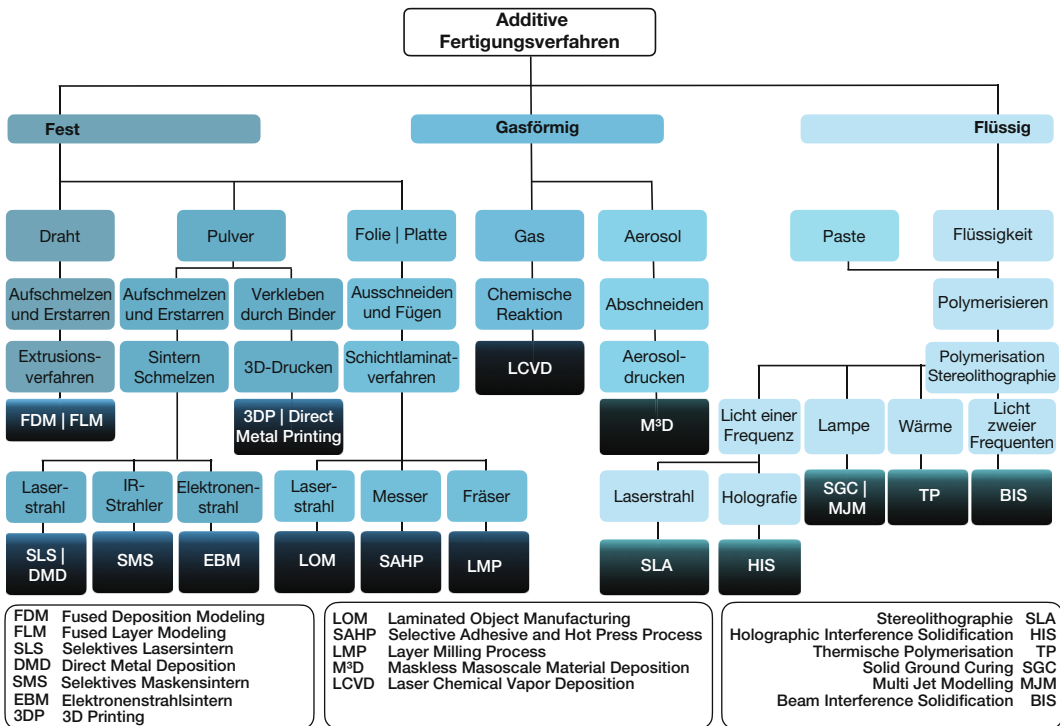


Bild 1.1 Unterteilung der additiven Verfahren nach Ausgangszustand des Werkstoffs
(© Leonie Fensterle 2020, in Anlehnung an Sehrt 2016)

■ 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“.

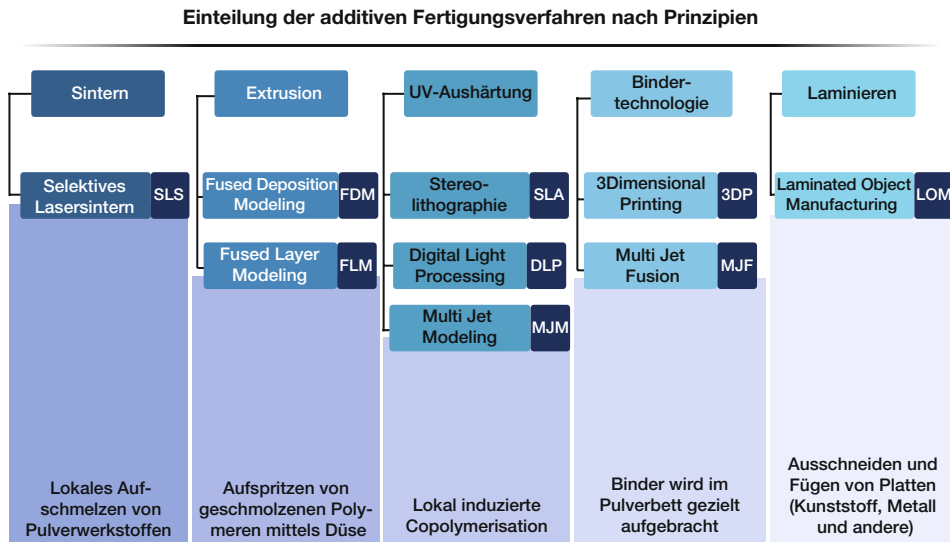


Bild 1.2 Einteilung der additiven Fertigungsverfahren nach Verfahrensgruppen und Prinzipien in reduzierter Form (© Leonie Fensterle 2020, in Anlehnung an Fischer 2020)

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).

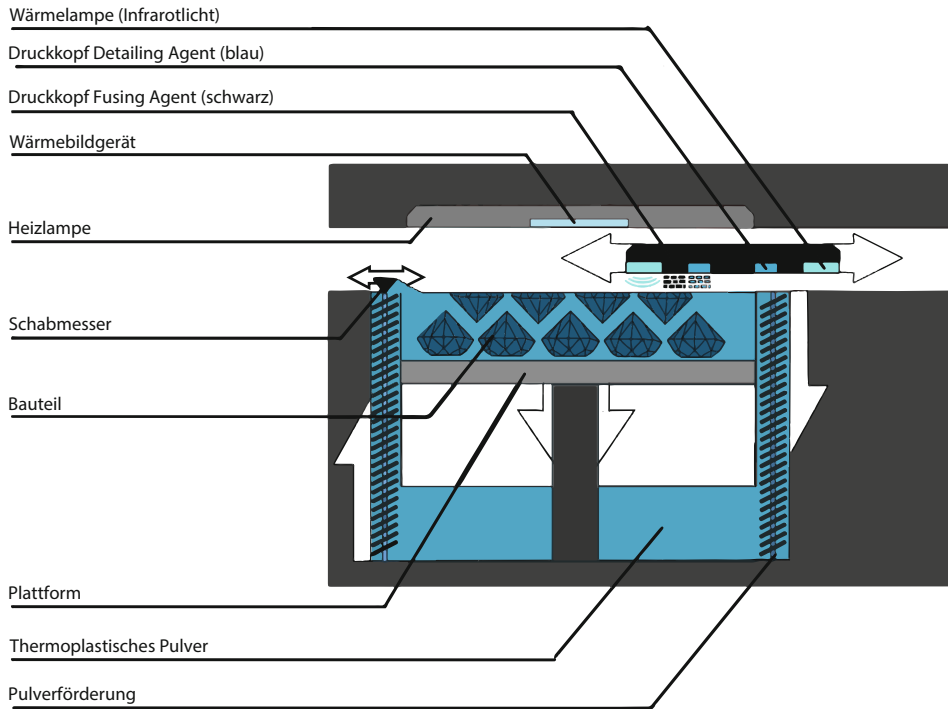


Bild 1.3 Funktionsprinzip des Multi Jet Fusion-(MJF-)Verfahrens von HP (Leonie Fensterle 2020)

Bei den aktuellen Systemen werden jede Sekunde 300 Millionen Tropfen Flüssigkeit mit einer Genauigkeit von $21\text{ }\mu\text{m}$ 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 Tintenstrahl Druckern 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
Anwendungen	Materialentwicklung und -forschung, Prototypenbau, Produktionsanwendungen, Dienstleistungszentren, verarbeitenden Gewerbe und Spritzgussunternehmen	Prototypenbau, Dienstleistungszentren und Produktionsanwendungen
Bauraum	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
Geschwindigkeit	VX200 HSS: 580 cm ³ /h VX1000 HSS: 6500 cm ³ /h	MJF 540/580: 1817 cm ³ /h MJF 4200: 4115 cm ³ /h MJF 5200: 505 cm ³ /h
Auflösung	360 dpi	1200 dpi
Werkstoffe	PA 12, TPU, PP, PEBA und EVA offenes System	PA 12, PA 11, TPA und TPU
Minimale Schichtstärke	80 µm	80 µm
Abkühlzeiten	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. Blanthier (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 CO₂-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 CO₂-Laser die aktuelle und verbundene Schicht, welche der spezifischen Querschnittsschicht 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 Matrizie gepresst. Das Granulat wird dabei durch Wärmezuführung und innere Reibung aufgeschmolzen und homogenisiert. Durch den gleichzeitig aufgebauten Druck wird der Thermoplast durch die formgebende Matrizie ausgestoßen. Der durch die Matrizie 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.

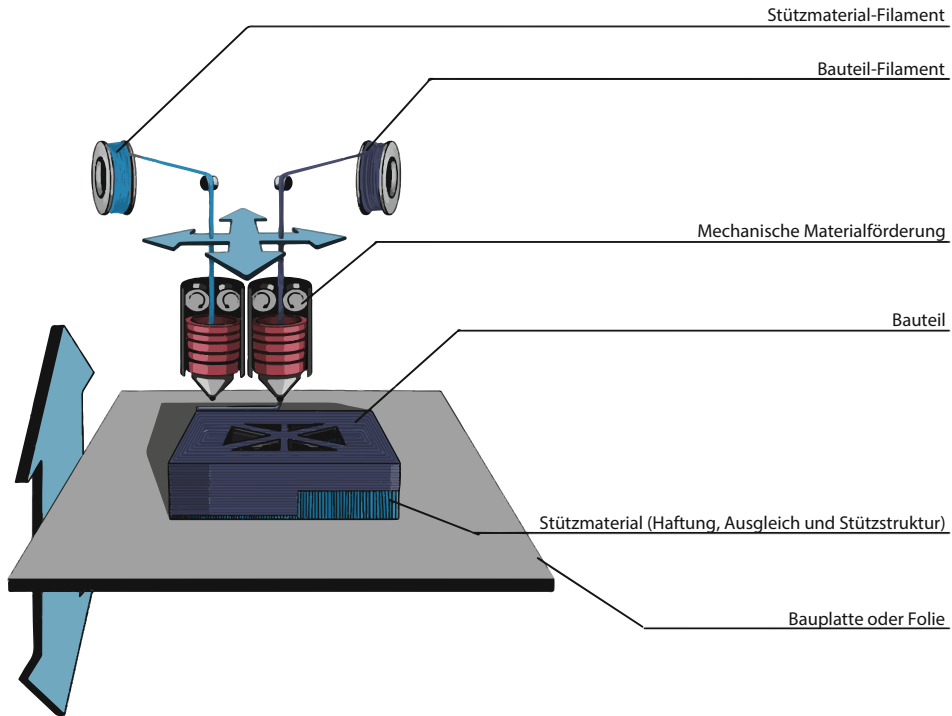


Bild 1.4 Funktionsprinzip des Fused Deposition Modeling-(FDM-)Verfahrens von Stratasys
(© Leonie Fensterle 2020)

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.

1.3.2 Charakteristika des Fused Deposition Modelings

Bauteile, welche über Fused Deposition Modeling erzeugt wurden, sind durch den bei Stratasys-Systemen oft verwendeten Thermoplast Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und die prägnanten Extrusionsraupen geprägt. Je nach genutztem Düsendurchmesser und Z-Auflösung sind die aufeinandergestapelten Extrusionsraupen haptisch wahrnehmbar und gut sichtbar. Bei der Füllung der Schichten über die 45°-Schraffur werden in jeder Schicht die Bahnen um 90° gedreht. Diese Strategie soll verhindern, dass zu viele Extrusionsraupen direkt aufeinander abgelegt werden, und führt so zu einer besseren Schichthaftung innerhalb der Bauteile. In Folge des Durchmessers der Extrusionsraupen und der 45°-Schraffur kann es bei bestimmten geometrischen Ausprägungen zu Fehlstellen ohne Materialeintrag in den Schichten kommen. Diese Fehlstellen können negative Auswirkungen auf angelegte Funktionalitäten wie Belastbarkeit, Dichtheit und Oberflächenqualität haben.

1.3.2.1 Oberflächen

Die Oberflächen von Bauteilen, welche durch additive Systeme erzeugt wurden, weisen durch den schichtweisen Aufbau insbesondere in Z-Richtung einen Treppenstufeneffekt auf. Je nach Verfahren ist dieser Effekt stärker oder schwächer ausgeprägt. Additive Systeme, die vornehmlich Flüssigkeiten verarbeiten, haben durch eine hohe Z-Auflösung den geringsten Treppenstufeneffekt und damit die glattesten Oberflächen in Z-Richtung. Oberflächen in XY-Richtung haben mehrheitlich eine geringere und prozessbedingte Auflösung. Bei Fused Deposition Modeling ist grundsätzlich die Z-Auflösung höher als die Auflösung in XY-Richtung. Bei den Stratasys-Systemen sind folgende Z-Auflösungen in unterschiedlichen Kombinationen vorgesehen:

- 0,127 mm
- 0,178 mm
- 0,254 mm
- 0,330 mm

Am weitesten verbreitet ist die Z-Auflösung mit 0,254 mm, die für den größten Teil der Systeme zur Verfügung steht.



Bauteile, die Sichtoberflächen aufweisen, sollten beim Fused Deposition Modeling möglichst so erzeugt werden, dass diese Flächen größtenteils über die Z-Auflösung geprägt werden. Die möglichen Oberflächenveredelungen bei Fused Deposition Modeling sind bei Oberflächen, welche mit der Z-Auflösung erzeugt wurden, wesentlich effektiver. Parallel sollten jedoch auch mögliche Erhöhungen von Kosten und Bauzeit durch die spezifische Ausrichtung des Bauteils bewertet werden. Des Weiteren ist zu beachten, dass insbesondere die mögliche Zugbelastung bei Bauteilen in Z-Richtung geringer ist als die in XY-Richtung.