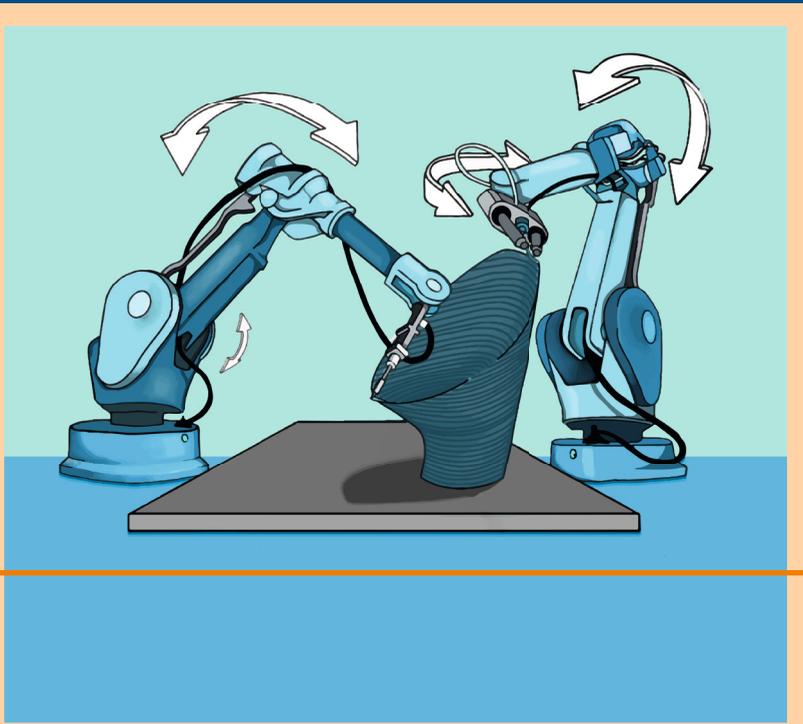


Andreas Fischer
Dirk Achten
Martin Launhardt

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	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	Jettriebene 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
Index		463

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. 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.

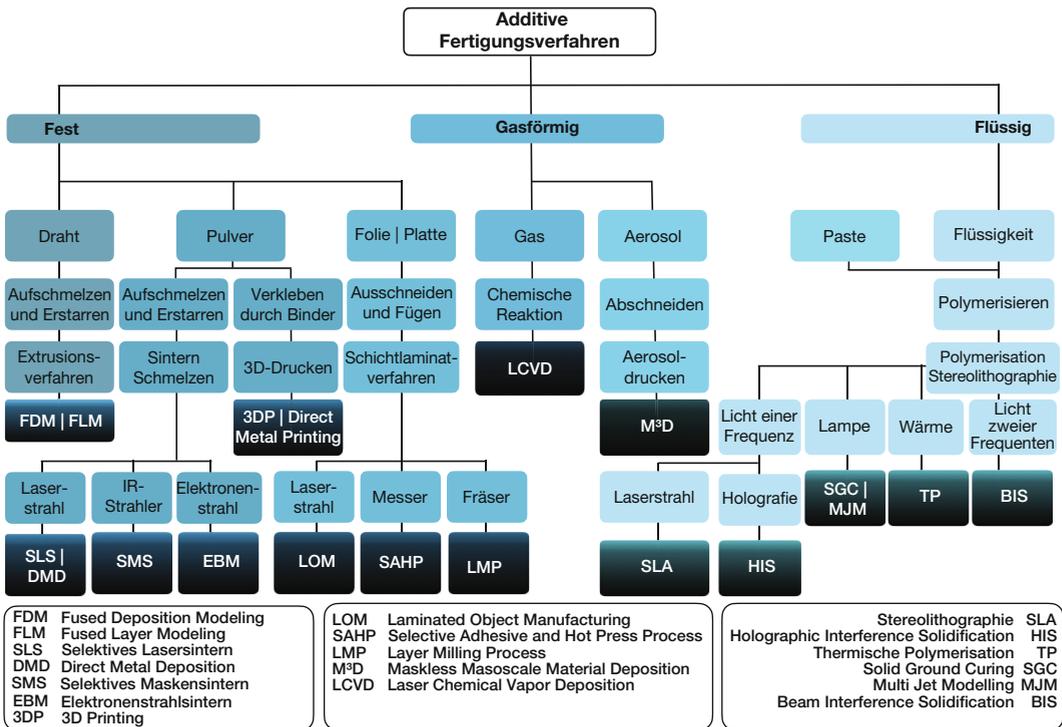


Bild 1.1 Unterteilung der additiven Verfahren nach Ausgangszustand des Werkstoffs
(© Leonie Fensterle 2020, in Anlehnung an Sehrt 2016)

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“.

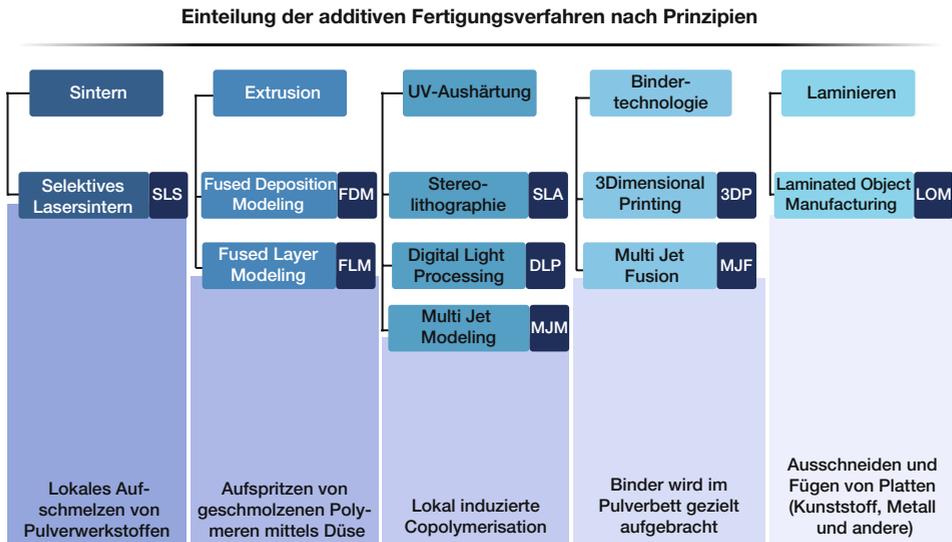


Bild 1.2 Einteilung der additiven Fertigungsverfahren nach Verfahrensgruppen und Prinzipien in reduzierter Form (© Leonie Fensterle 2020, in Anlehnung an Fischer 2020)

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).

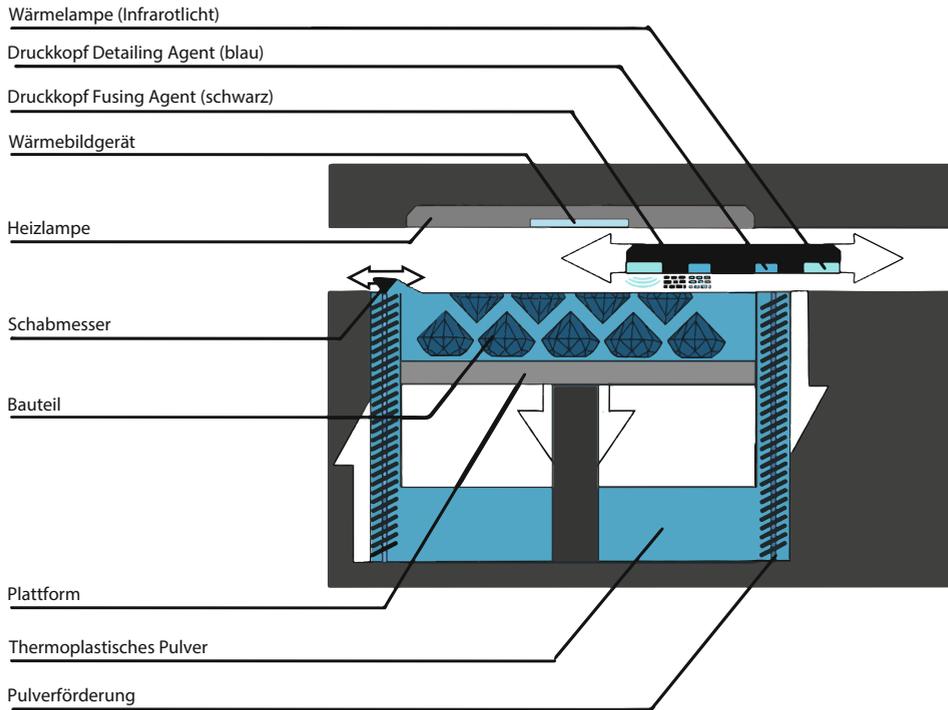


Bild 1.3 Funktionsprinzip des Multi Jet Fusion-(MJF-)Verfahrens von HP (Leonie Fensterle 2020)

Bei den aktuellen Systemen werden jede Sekunde 300 Millionen Tropfen Flüssigkeit mit einer Genauigkeit von $21\ \mu\text{m}$ 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
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. 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 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 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.

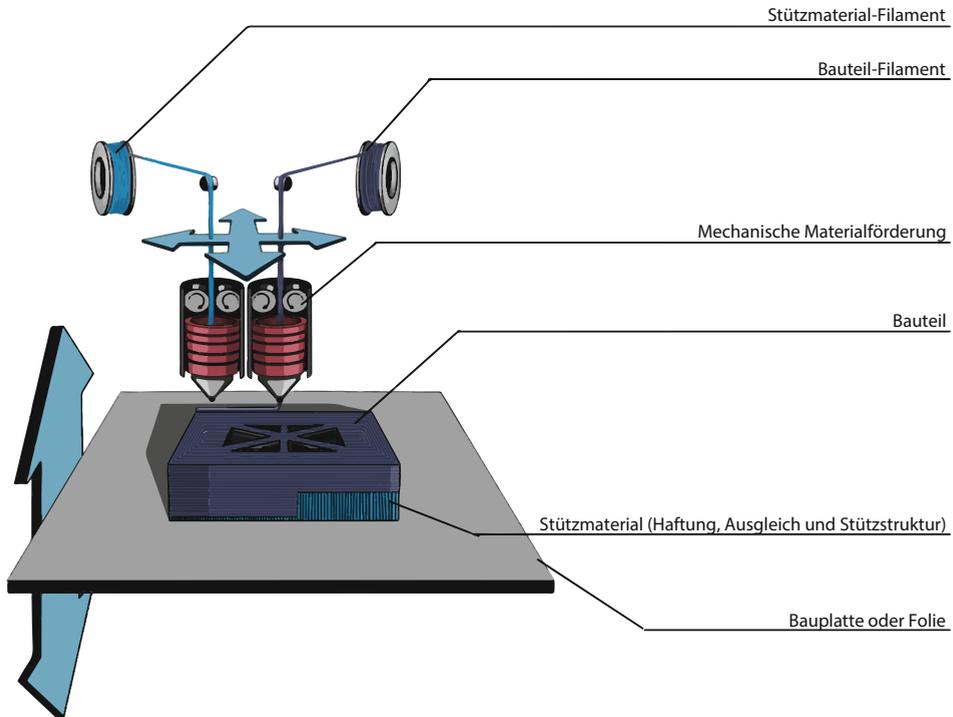


Bild 1.4 Funktionsprinzip des Fused Deposition Modeling-(FDM)-Verfahrens von Stratasys (© Leonie Fensterle 2020)

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.

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.

Die für Fused Deposition Modeling typischen Extrusionsraupen sind in XY-Richtungen deutlicher zu erkennen und spiegeln den typischen Düsendurchmesser der Systeme wider. Der Düsendurchmesser liegt bei Stratasys-Systemen bei circa 0,45 mm. Auch können insbesondere in XY-Richtung Fehlstellen auftreten, welche aus dem Zusammenspiel des Düsendurchmessers, der Geometrie des Bauteils und der entsprechenden Bahnplanung resultieren (Bild 1.5). Teilweise ist es physikalisch nicht mehr möglich, eine weitere Extrusionsraupe zwischen Bauteilkontur und Bauteilfüllung zu setzen. Dadurch resultiert schlussendlich eine Fehlstelle, die sowohl auf der Oberfläche in XY-Richtung als auch im Inneren des Bauteils vorkommen kann. Die so erzeugten Oberflächen sind in der Regel nur mit mechanischen Nachbearbeitungsschritten hin zu glatten Oberflächen optimierbar.



Bild 1.5 Hier ist die Bahnplanung einer Schicht mit 45°-Schraffur beim Fused Deposition Modeling zu sehen. Es handelt sich um den vollgefüllten Modus mit Fehlstellen im Inneren des Bauteils. Die grünen Linien repräsentieren das Bauteil und die lila Linien das nötige Stützmaterial in der Schicht (© Andreas Fischer 2021).

Chemische Nachbearbeitungen wie das Anlösen der Thermoplast-Oberfläche mittels Lösungsmittel, wie es in der Finishing Touch Smoothing-Station von Stratasys erfolgt, kann nicht die gewünschte Oberflächengüte bei diesen speziellen Oberflächen erzeugen. Dabei dringt das Lösungsmittel der Finishing Touch Smoothing-Station maximal 32 bis 63 mm tief ein und verändert die Bauteiloberfläche nicht mehr als 0,023 mm. In Z-Richtung stehen die Extrusionsraupen beim Fused Deposition Modeling circa 0,051 mm hervor. Die Extrusionsraupen sind nach dem Auftragen grundsätzlich glatt und glänzend. Entlang der Raupen in Z-Richtung ergibt sich somit durchaus ein glatter haptischer Eindruck. Wird das Bauteil chemisch nachbearbeitet, bleibt die Oberfläche glänzend. Bei mechanischer Nachbearbeitung der Bauteile wie zum Beispiel durch manuelles Schleifen, Sandstrahlen oder Gleitschleifen wird die Oberfläche der bearbeiteten Bauteile matt. Weisen die Bau-

teile scharfe Kanten oder feine Details auf, können sowohl die chemische wie auch mechanische Nachbearbeitung der Bauteile zu negativem Ergebnis führen.

Ein weiterer Faktor, welcher sowohl im Bauteil wie auch auf der Oberfläche zu negativen Effekten führen kann, sind Abfallprodukte, welche sich bei der Extrusion an der Düse bilden. Hierbei handelt es sich unter anderem um verbrannte Thermoplast-Reste sowie Teile von Extrusionsraupen, welche bei Nichtentfernung gegebenenfalls bei der Erzeugung der Schichten von der Düse abfallen können und somit in das Bauteil mit eingearbeitet werden. Verbrannte Thermoplast-Reste führen oft zu schwer zu behebenden Deformationen an der Oberfläche der Bauteile und so zu Ausschuss in der additiven Fertigung (Bild 1.6). Reste von Extrusionsraupen, welche in das Bauteil eingearbeitet wurden, können meist einfach mechanisch entfernt werden, wobei kleinere Defekte der Oberfläche die Folge sein können. Um diesem spezifischen Problem der Extrusion entgegenzuwirken und somit die Qualität der Bauteile zu erhöhen, besitzen Fused Deposition Modeling-Systeme eine mechanische Düsenreinigung. Die Reinigungseinheit besteht aus einer Metallbürste mit einer vorgelagerten hitzebeständigen Gummilippe. Bei den F123-Systemen von Statusys wird zusätzlich zur mechanischen Düsenreinigung der Purge Tower parallel zum Bauprozess erzeugt. Neben der Reinigung sorgt dieses separierte Objekt auch für eine optimal mit Material gefüllte Düse. Unterhalb der mechanischen Düsenreinigung werden die entfernten Abfallprodukte und die Extrusionsraupen, welche in Zwischenschritten dort erzeugt werden, in einem wechselbaren Behälter aufgefangen. Die Extrusionsraupen, welche in den Zwischenschritten erzeugt wurden, dienen auch der optimalen Materialfüllung der Düsen. Die Düsen werden bei jedem Wechsel zwischen Modell- und Stützmaterial über die mechanische Reinigungskombination mit schneller Hin- und Herbewegung gefahren und so gereinigt.



Bild 1.6

Fused Deposition Modeling-Bauteil mit Oberflächendefekten in XY- sowie Z-Richtung, hervorgerufen durch den Einschluss von Abfallpartikeln der Düse im Bauteil (© Andreas Fischer 2022)

Nach der Erzeugung einer Schicht wird beim Fused Deposition Modeling die Z-Achse um den Wert der Z-Auflösung abgesenkt und das Druckwerk zur Reinigungseinheit bewegt. Dort wird die zuletzt genutzte Düse, in diesem Fall die Düse

für die Erzeugung des Bauteils, gereinigt. Für die Erzeugung der folgenden Schicht wird die Düse für die Stützstruktur vorbereitet. Sie wird gereinigt, extrudiert kurz und wird nochmals gereinigt. Danach beginnt am durch die Bahnplanung festgelegten Startpunkt die Erzeugung der Stützstruktur und im Folgenden (in gleicher Weise ablaufend) die Vorbereitung der Düse für die Bauteilerzeugung sowie der Start der Schichterzeugung des Bauteils am geplanten Startpunkt. Liegen die geplanten Start- und Endpunkte der Bauteilschichten mehrfach genau übereinander, kann es zu deutlich sichtbaren Materialanhäufungen auf der Oberfläche kommen (Bild 1.7). Diese Nahtstellen treten oft bei Bauteilen, die durch Rotationsachsen erzeugt wurden, auf, insbesondere, wenn ein solches Bauteil so erzeugt wird, dass die Rotationsachse senkrecht zur XY-Ausrichtung des Systems steht. Die Problematik lässt sich durch Veränderung der Startpunkte in der Bahnplanung grundsätzlich beheben, jedoch ist dieser Eingriff in die Bahnplanung nicht bei allen Stratasys-Systemen möglich. Durch mechanische Nachbearbeitung der Bauteile lassen sich die Nahtstellen jedoch einfach entfernen. Grundsätzlich eignet sich insbesondere die spezifische Fused Deposition Modeling-Oberfläche in Z-Richtung, um die Griffigkeit eines Bauteils zu erhöhen.

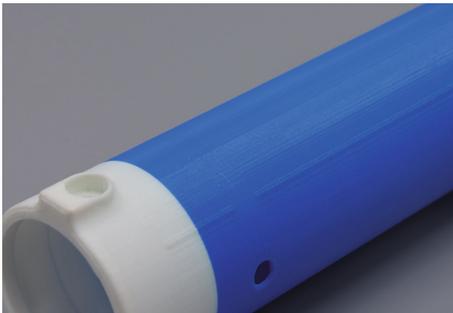


Bild 1.7

Zweifarbige zylindrisches Fused Deposition Modeling-Bauteil mit Nahtstellen auf der Oberfläche (© Andreas Fischer 2022)

1.3.2.2 Stützstrukturen und Baukammer

Beim Fused Deposition Modeling werden über die zweite Düse des Druckwerks nötige Stützstrukturen erzeugt. Um Überhänge, welche 45° übersteigen, zu generieren, wird eine Stützstruktur benötigt. Hierbei stellt die Z-Achse des Fused-Deposition-Modeling-Systems den Nullwinkel dar. Diese Stützstruktur unterstützt Bauteilkonturen und verhindert, dass spezifische Teile bei der Schichterzeugung deformieren oder im Bauprozess abfallen. Bei einigen Stratasys-Systemen gibt es drei auswählbare Strategien für die Berechnung der Stützstruktur:

- Basic
- SMART
- Surround Support

Die Strategie „Basic“ stellt nötige Stützstrukturen dar, welche mit einer 45°-Schraffur gefüllt sind. Diese Struktur eignet sich insbesondere für zu stützende Bauteilsegmente, welche ein hohes Volumen und damit Gewicht darstellen. Die Basic-Strategie führt durch ihr ausgedehntes Volumen und deren dichter Füllung zu erhöhtem Stützmaterialverbrauch und zu längeren Herstellzeiten. Bei der SMART-Systematik wird das Volumen der nötigen Stützstrukturen um circa die Hälfte der Basic-Strategie reduziert. Zusätzlich wird auch die Füllung der Stützstrukturen halbiert, was zu einer Reduktion des Stützmaterials und der Herstellzeit führt. Der Surround Support umhüllt das gesamte Bauteil. Dabei wird die Füllung dieser Stützstruktur gleich dicht wie bei der Basic-Variante gefüllt. Diese Stützstruktur eignet sich insbesondere für filigrane Bauteile, welche somit zusätzlich von der Struktur geschützt werden. Der Verbrauch von Stützmaterial und die Herstellzeit sind bei dieser Strategie extrem ausgeprägt.

Nach Beendigung des Bauprozesses muss das Stützmaterial vom Bauteil entfernt werden. Dies kann mechanisch oder chemisch erfolgen. Das manuelle Entfernen des Stützmaterials ist jedoch bei allen geometrischen Gegebenheiten möglich. Stützstrukturen, welche sich zum Beispiel in Hohlräumen mit geringem Zugang befinden, lassen sich kaum mechanisch entfernen und müssen somit im Bauteil verbleiben. Diese kann jedoch bei der Planung des Bauteils als Stabilisierungsfunktion eingeplant werden. Weiterhin können bei der mechanischen Entfernung auch filigrane Segmente des Bauteils in Mitleidenschaft gezogen werden. Die Surround-Support-Strategie eignet sich nicht für die mechanische Stützstrukturentfernung (Bild 1.8).

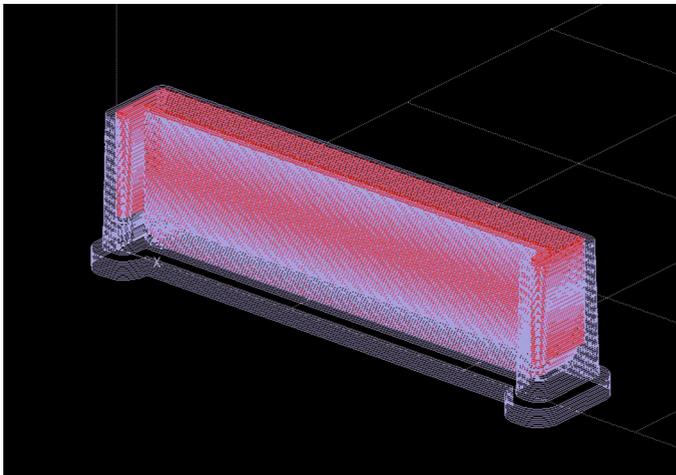


Bild 1.8 Surround Support bei der Bahnplanung eines Fused Deposition Modeling-Bauteils: Das Bauteil ist rot und die Stützstruktur lila dargestellt (© Andreas Fischer 2021).

Je nachdem, welcher Thermoplast für das Bauteil eingesetzt wird, ist das passende thermoplastische Stützmaterial mechanisch entfernbar oder chemisch auflösbar. Bei mechanisch entfernbarem Stützmaterial ist darauf zu achten, dass Hohlräume teilweise schwer von der Stützstruktur befreit und filigrane Bauteilsegmente durch das Entfernen der Struktur deformiert oder beschädigt werden können. Das chemisch auflösbare thermoplastische Stützmaterial wird in einer circa 60 °C warmen und umgewälzten Flüssigkeit entfernt. Hier ist darauf zu achten, dass in ange-dachte Hohlräume durch Öffnungen Flüssigkeit ein- und austreten kann. Sind diese Öffnungen nicht optimal gewählt, kann das Auflösen der Stützstruktur höhere Bearbeitungszeiten in Anspruch nehmen. Bauteile mit dünnen und groß-flächigen Bauteilsegmenten können durch die Umwälzung und den Wärmeeinfluss leicht deformiert werden. Grundsätzlich können mehrere Bauteile in den speziell ausgelegten Systemen für die chemische Stützstrukturentfernung bearbeitet werden (Bild 1.9). Bauteile mit empfindlichen geometrischen Segmenten sollten einzeln bearbeitet werden, da sich die Bauteile insbesondere durch die Zirkulation der Flüssigkeit gegenseitig beschädigen können. Wurde das Innere der Bauteile mittels einer Hohlstruktur erzeugt, können sich diese bei der chemischen Entfernung der Stützstruktur mit der Flüssigkeit füllen. Weiterhin sorgt die umbaute Luft in den Hohlstrukturen dafür, dass die Bauteile an die Oberfläche der Flüssigkeit schwimmen. Dadurch können Teile der Stützstruktur, welche somit keinen richtigen Kontakt mit der Flüssigkeit haben, nicht aufgelöst werden. Fused Deposition Modeling-Bauteile mit Hohlstruktur oder Hohlräumen sollten möglichst so positioniert werden, dass die Flüssigkeit das Bauteil komplett erfassen kann. Nach der Auflösung des Stützmaterials werden die Bauteile mit klarem Wasser gereinigt und dann getrocknet. Bei Bauteilen mit Hohlräumen oder Hohlstruktur sollte vor der Reinigung mit Wasser verbliebene Restflüssigkeit abgelassen werden. Die Kontaktflächen der Bauteile zur Stützstruktur neigen stärker dazu, Defekte an der Oberfläche aufzuweisen. Bei der mechanischen Entfernung können zusätzlich durch das Entfernen Defekte an der Oberfläche erzeugt werden.



Bild 1.9 Umwälzungsbehälter des HP Designjet 3D Removal-Systems für die Entfernung von Stützstrukturen bei Fused Deposition Modeling-Bauteilen aus Acrylnitril-Butadien-Styrol mit maximalen Abmaßen von 200 × 200 × 150 mm (© Andreas Fischer 2021)

Bei der Kombination von Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) als Material für das Bauteil setzt Stratasys das thermoplastische Stützmaterial P400-SR ein. Die Infrarotspektroskopie mittels eines Fourier-Transform-Infrarotspektrometers des Stützmaterials für Acrylnitril-Butadien-Styrol zeigt die typischen Absorptionsbanden eines Acryl-Copolymers, basierend auf Methacrylsäuremethylester (MMA) und Acrylsäurebutylester (BMA). Die Glasübergangstemperatur beträgt 103 °C (Mittelpunkt). Die rheologische Analyse zeigte ebenfalls, dass das Stützmaterial thermoplastisch ist und dass die Viskosität mit der Zeit nicht merklich abnimmt. Bei den Stratasys-HP-Systemen kam das Stützmaterial SR30L in der Kombination mit Acrylnitril-Butadien-Styrol zum Einsatz. Die Infrarotspektroskopie zeigt bei diesem Material die typischen Absorptionsbanden eines acrylischen Thermoplasts, basierend auf Polystyrenecobutylacrylatcoacrylsäure. Die Glasübergangstemperatur beträgt 124 °C (Mittelpunkt). Die beiden Stratasys-Stützmaterialien lassen sich mittels eines in Wasser gelösten Natriumhydroxid-(NaOH)-Pulvers mit der Bezeichnung P400SC durch Umwälzung und Wärmezufuhr auflösen. Das Mischungsverhältnis sollte bei 950 g des P400SC-Pulvers und 42 Liter Wasser liegen. Die Entfernung des Stützmaterials hat speziell auf die Acrylnitril-Butadien-Styrol-Bauteile keine nachweisbaren negativen Auswirkungen. Wird bei den Fused Deposition Modeling-Bauteilen mittels der chemischen Variante die Stützstruktur in großen Mengen entfernt, kann eine spezielle Lagerung und Entsorgung der dabei anfallenden Flüssigkeit erforderlich sein. Durch die gezielte Verdunstung des Wasseranteils der Flüssigkeit lässt sich das Volumen des zu entsorgenden Materials drastisch reduzieren.

Eine weitere Besonderheit der Fused Deposition Modeling-Systeme stellen die Baukammern dar. Die Größe der erzeugbaren Bauteile reicht hierbei vom ehemaligen Einstiegsmodell der Stratasys Mojo mit 127 × 127 × 127 mm bis hin zum Spitzenmodell der Stratasys Fortus 900mc mit 914 × 610 × 914 mm. Dazwischen liegen die Systeme der Idea-Serie mit zwei Anlagen und die Design-Serie mit drei Anlagen. In der Idea-Serie können Bauteile auf der μ Print SE mit 203 × 152 × 152 mm und auf der μ print SE Plus mit 203 × 203 × 152 mm erzeugt werden. Bei der Design-Serie können Bauteile von 203 × 203 × 305 mm auf der Dimension Elite und Bauteile von bis zu 253 × 254 × 305 mm auf der Dimension 1200es oder Fortus 250mc erzeugt werden. In der Production-Serie sind die leistungsstärksten Fused Deposition Modeling-Systeme von Stratasys eingegliedert. Die Größe der erzeugbaren Bauteile reicht hier von 355 × 254 × 254 mm auf der Fortus 360mc bis zu 914 × 610 × 914 mm auf der Fortus 900mc. Dazwischen liegen die Fortus 380mc mit 355 × 305 × 305 mm, die Fortus 400mc mit 406 × 355 × 406 mm und die Fortus 450mc mit ebenfalls 406 × 355 × 406 mm. Die aktuelle F123-Reihe ist, was die Leistung und den Anschaffungspreis betrifft, zwischen der Fortus 250mc und der Fortus 380mc angesiedelt. Die Baukammerkapazitäten reichen hier von 254 × 254 × 254 mm bei der F170 über 305 × 254 × 305 mm bei der F270 bis hin

zu $356 \times 254 \times 356$ mm bei der F370. Insbesondere die Systeme der Idea-Serie und Design-Serie sind weit verbreitet und befinden sich – trotz eingestelltem Service seitens Stratasys – oft noch immer im Einsatz. Spezialisierte Firmen wie die iSQUARED AG aus Lengwil in der Schweiz bieten für diese Systeme weiterhin Serviceleistungen an.

Alle Baukammern dieser Fused Deposition Modeling-Systeme können gleichmäßig über Lüfter auf etwa $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ beheizt werden und sind in sich geschlossen. Diese Eigenschaft ist bei der additiven Bauteilerzeugung über Thermoplasten sehr förderlich, da sie insbesondere thermisch induzierte Eigenspannungen im Bauteil verhindert. Diese Eigenspannungen können zu einer plastischen Verformung des Bauteils führen, welche wiederum die Haftung zum Trägermaterial und das Aufbringen von weiterem Thermoplast negativ beeinflusst. Des Weiteren sorgt die höhere und gleichmäßige Temperatur in der Kammer für einen effektiveren Ablauf der additiven Extrusion und vermindert so auch einen Ausschuss bei der Bauteilerzeugung. Treten während der Erstellung eines Bauteils zum Beispiel Fehler in der Materialzuführung oder im Druckwerk auf, wird das Bauteil weiterhin konstant in der spezifischen Temperatur gehalten. Die Fehlerbehebung kann dann parallel stattfinden und der Bauvorgang danach problemlos fortgesetzt werden. Wird die Erstellung eines Bauteils gestartet, verriegelt sich die Baukammertür automatisch und mechanisch. Somit wird einerseits sichergestellt, dass das Bedienpersonal während der Bauteilerzeugung nicht gefährdet wird, und andererseits wird das Eindringen von Fremdkörpern oder Partikeln, welche den Prozess negativ beeinflussen könnten, verhindert. Um Fehler beim Einfädeln oder Entfernen des thermoplastischen Filaments in beziehungsweise aus dem Druckwerk, welches sich in der Baukammer befindet, zu verhindern und parallel auch das Bedienpersonal zu schützen, wird dieser Prozess über eine automatische Förderung des Filaments gelöst. Der Prozess des Einfädelns und Entferns des Filaments findet in der temperierten Baukammer statt. Dabei wird das Druckwerk über die Achsen in der Baukammer so platziert, dass Biegungen, durch die das Filament gefördert werden muss, minimiert sind. Befindet sich das einzufädelnde Filament vor dem Druckwerk, wird es über das Achssystem wieder über der Reinigungseinheit platziert. Ist die Verarbeitungstemperatur der Düse erreicht, wird das Filament mechanisch in diese gefördert und eine Extrusionsraupe bestimmter Länge in den Abfallbehälter extrudiert. Anschließend wird die Düse mechanisch gereinigt. Beim Entfernen des Filaments wird die Düse auf die Prozesstemperatur erwärmt, um so die Haftung von erkaltetem Thermoplast und Metall der Düse aufzuheben. Ist dies erfolgt, wird das Filament mechanisch aus dem Druckwerk gefördert und kann anschließend durch den Zuführungskanal herausgezogen werden.

■ 1.4 Funktionsprinzip des Fused Layer Modelings (FLM)

Das Fused Layer Modeling (FLM) ist der Verfahrensgruppe Extrusion zuzuordnen und nutzt das gleiche Verfahrensprinzip wie das in Abschnitt 1.3 beschriebene Fused Deposition Modeling. Das Aufkommen von Fused Layer Modeling-Systemen ist auf das Ablaufen der maximalen Schutzdauer früher Stratasys-Patente zurückzuführen. Dadurch war es nun auch anderen Herstellern möglich, auf das von Stratasys entwickelte Verfahrensprinzip zurückzugreifen. Zusätzlich förderlich für diese Entwicklung war, dass der grundlegende Aufbau eines auf additiver Extrusion basierenden Systems im Vergleich zu anderen Verfahrensprinzipien einfach und mit kostengünstigen Komponenten zu realisieren ist.

Die einfachste Variante hierbei stellen die 3D-Druck-Stifte wie zum Beispiel der 3Doodler oder die Play 3D Pens von Polaroid dar. Die Stifte beinhalten grundsätzlich eine mechanische Förderung für den thermoplastischen Werkstoff und eine beheizbare Düse. Der Düsendurchmesser liegt bei circa 0,4 mm, und der Werkstoff wird mittels Stangen oder Filament mit dem Durchmesser von 1,75 mm zugeführt. Hierbei werden vornehmlich die Thermoplasten Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Polylactid (PLA) eingesetzt. Diese 3D-Druck-Stifte ähneln in ihrer Funktion stark einer mechanischen Heißklebepistole, welche wiederum als Inspirationsquelle bei der frühen Entwicklungsphase des Verfahrensprinzips von Fused Deposition Modeling genutzt wurde. Stark vereinfacht handelt es sich bei der additiven Extrusion um eine Heißklebepistole, welche über ein Achssystem oder Manipulatoren gezielt bewegt wird. Im Fall der 3D-Druck-Stifte übernimmt der Bewegungsapparat des Nutzers die Aufgabe des Manipulators. Der Einsatzfokus dieser Geräte ist der gestalterische Hobbybereich. Teilweise nutzen auch professionelle Gestalter die Systeme für die Erzeugung von Skulpturen; zum Beispiel Grace Du Prez und ihr Team, welche vom japanischen Autohersteller Nissan beauftragt wurden, den Nissan Qashqai in Schwarz mit einem 3D-Druck-Stift im Maßstab 1 : 1 zu modellieren. In circa 800 Arbeitsstunden wurde die 4400 mm lange und 1600 mm hohe Skulptur von dem Gestaltungsteam aus etwa 14 Kilometern thermoplastischem Filament erzeugt.

Das Fused Layer Modeling zeichnet sich insbesondere durch die Variation bei den Systemen aus. Neben der Schmelzdüsenanzahl je Druckwerk ist hier das Manipulationssystem für das Druckwerk, die Bauraumbeschaffenheit sowie die Zuführungsart des Werkstoffes zu nennen. Die am weitesten verbreitete Fused Layer Modeling-Systemvariante ist die Kombination von einer Schmelzdüse, einer mechanischer Filamentzuführung, einem dreiachsigen Portalsystem und einem offenen Bauraum (Bild 1.10).

Ein wichtiges Differenzierungsmerkmal des Fused Layer Modelings zu anderen additiven Verfahren stellt die Möglichkeit dar, unterschiedliche thermoplastische Werkstoffe in einem Bauteil zu nutzen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Materialien untereinander eine Haftung eingehen. Um solche Multimaterial-Bauteile über Fused Layer Modeling zu erzeugen, besteht einerseits die Möglichkeit, das System mit mehreren Schmelzdüsen und jeweiliger Materialzuführung auszustatten oder vorab kalkulierte Längen von unterschiedlichen Filamenten zu einem Mehrmaterialfilament zusammenschweißen, welches dann dafür sorgt, dass der Materialwechsel an bestimmten Stellen im Bauteil erfolgt. Fused Layer Modeling-Systeme werden maximal mit bis zu vier Schmelzdüsen ausgerüstet. Weitere Schmelzdüsen sind theoretisch je nach Art des Manipulationssystems des Druckwerks umsetzbar. Bei vier Schmelzköpfen sind drei unterschiedliche Werkstoffe und ein passendes Stützmaterial möglich. Neben der Haftung zwischen den Materialien für das Bauteil muss das Stützmaterial so ausgelegt werden, dass eine Haftung zu den Bauteilmaterialien erfolgt.

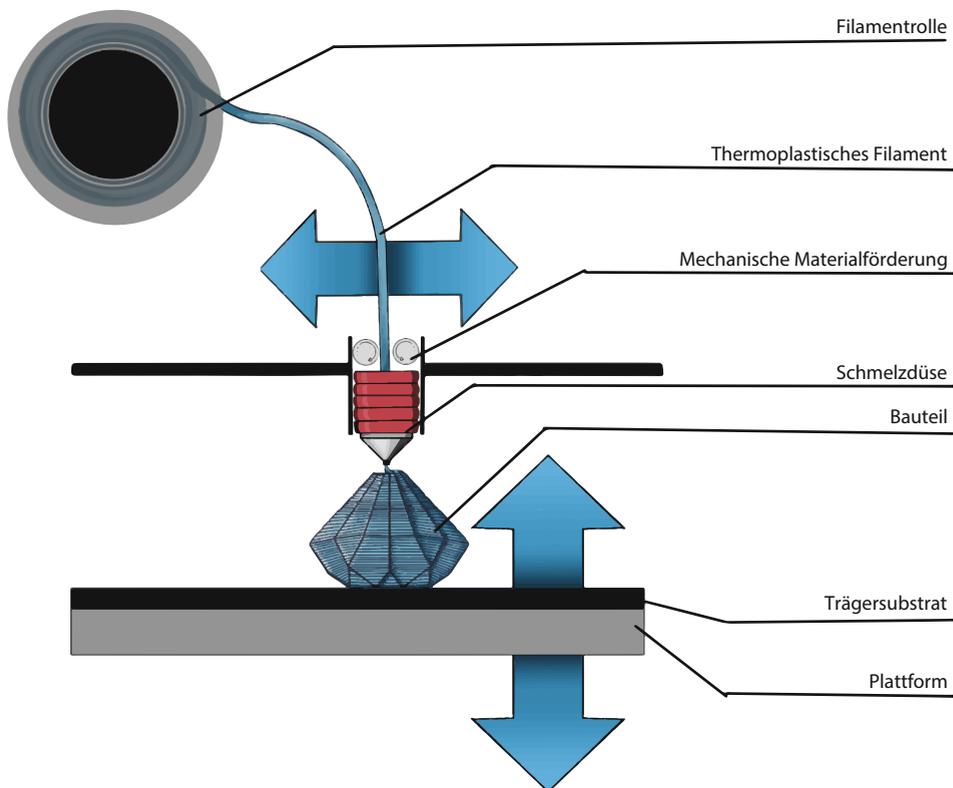


Bild 1.10 Funktionsprinzip des Fused Layer Modeling-(FLM-)Verfahrens mit einer Schmelzdüse (© Leonie Fensterle 2020)

Sehr verbreitet im Fused Layer Modeling ist die Möglichkeit, den Werkstoff in unterschiedlichen Farbausprägungen zu nutzen, um mehrfarbige Bauteile auf Basis eines Werkstoffs herzustellen. Dabei ist es möglich, spezifische Teilbereiche eines Bauteils gezielt in der nötigen Farbe zu erzeugen. Neben der Systematik von mehreren Schmelzköpfen oder der Nutzung von angepassten und geschweißten mehrfarbigen Filamenten besteht auch die Möglichkeit, für die Erzeugung von Mehrfarbbauteilen spezielle Schmelzdüsen mit mehreren Zugängen für Filament einzusetzen. Diese speziellen Düsen verfügen über circa drei Zugänge und benötigen eine aufeinander abgestimmte Förderung der Filamente.

Im Gegensatz zum Fused Deposition Modeling werden unterschiedlich ausgelegte Fused Layer Modeling-Systeme von verschiedenen kommerziellen Herstellern angeboten. Die Zielgruppe dieser Systeme und des passenden Verbrauchsmaterials sind hauptsächlich Privatkunden und teilweise Industriekunden. Neben kompletten Systemen sind im unteren Preissegment auch Bausätze verbreitet. Beim Fused Layer Modeling werden durch die Variabilität des Verfahrens und die Vielzahl von Systemherstellern auch in kurzen Intervallen neue Ansätze und Weiterentwicklungen der zugrunde liegenden additiven Extrusion vorangetrieben. Diese Weiterentwicklungen können im ersten Schritt neue industrielle Applikationen auf der Forschungsebene ermöglichen. Um solche Applikationen gezielt voranzutreiben, sollten additive Verfahrensparameter spezifisch optimiert werden. Diese Parameter sind abgestuft folgende:

- (1) Reduktion der Herstellzeit und damit Aufhebung der limitierten Bauteilgröße
- (2) Erhöhung der Anzahl der verarbeitbaren Werkstoffe und deren Kombinationsmöglichkeiten im Bauteil
- (3) Erhöhung der Oberflächenqualität
- (4) Inline-Qualitätssicherung
- (5) Integration in die Fertigung

Die Parameter **(1)** und **(2)** sind durch verschiedene Systematiken im Fused Layer Modeling weiterentwickelt worden. Die Parameter **(3)** und **(4)** sind noch nicht für industrielle Zwecke akzeptabel gelöst. Parameter **(5)**, die Integration der additiven Systeme in die Fertigung, ist insbesondere durch die Nutzung von Industrierobotern als Manipulationssystem für das Druckwerk möglich und sinnvoll (siehe Abschnitt 1.4.2.2).

1.4.1 Werkstoffzuführung

Der thermoplastische Werkstoff kann bei Fused Layer Modeling über verschiedene Methoden der Düse, welche die thermoplastischen Extrusionsraupen für das Bauteil oder die Stützstruktur aufbringt, zugeführt werden. Dabei liegt der Werkstoff je nach Methode in folgenden Formen vor:

- Filament
- Folie
- Granulat

Die verbreitetste Methode ist wie beim Fused Deposition Modeling die Zuführung der Thermoplaste in Filamentform. Neben dem Durchmesser des Filaments von 1,75 mm sind vereinzelt auch Durchmesser von 3 mm vorhanden. Bei größerem Filament-Durchmesser ergibt sich auch ein größerer Düsendurchmesser, mit der Folge eines größeren Querschnitts der Extrusionsraupen. Dieses hat zur Folge, dass die erzielbare Auflösung und die Herstellzeit für Bauteile verringert werden. Das Prinzip, die Herstellzeit für Bauteile durch einen größeren Durchmesser der Extrusionsraupen zu reduzieren, findet insbesondere Anwendung bei der Zuführung des Werkstoffs in Granulatform. Die Herstellkosten für ein Kilogramm thermoplastisches Filament liegen je nach Werkstoff bei circa 13 €, wobei auf die Umarbeitung des Granulats zu Filament circa 8 € entfallen.

Eine weitere effiziente Möglichkeit, den Werkstoff zuzuführen, stellen thermoplastische Folien dar. Im Vergleich zu filamentbasierten Druckköpfen ist der Durchsatz eines auf Folie basierten Fused Layer Modeling-Druckwerks deutlich höher. Dadurch ergibt sich eine verringerte Herstellzeit der Bauteile bei gleichbleibender Auflösung. Ein weiterer Vorteil der Folie ist, dass diese bei der Lagerung weniger Platz benötigt als Filament. Weiterhin sind Abweichungen hinsichtlich der Stärke beziehungsweise des Durchmessers bei der Folie geringer als beim Filament. Diese erreichbare höhere Präzision bei den Folien führt zu einer höheren Bauteilqualität. Die Druckwerke für thermoplastische Folien unterscheiden sich nicht wesentlich von filamentbasierten. Die Folie wird über einen gekühlten Bereich in die Schmelzeinheit gefördert. Dort wird diese unter dem Einfluss der zugeführten Wärmeenergie in Schmelze umgewandelt und über eine definierte Düsengeometrie ausgetragen (New Media Publisher GmbH 2019).

Die dritte Methode der Werkstoffzuführung bei Fused Layer Modeling ist über thermoplastisches Granulat. In der klassischen Kunststoffverarbeitung wird Granulat für das Spritzgießen oder die Extrusion genutzt. Das Granulat wird durch das Zerschneiden von extrudierten und gekühlten Strängen nach der Polymerisierung oder Compoundierung erzeugt. Durch die Rieselfähigkeit des Granulats lässt sich dieses einfach fördern und transportieren; was insbesondere bei großvolumiger additiver Fertigung von Vorteil sein kann. Durch die direkte Nutzung von Gra-

nulat kann der Zwischenschritt der Filament- oder Folienextrusion umgangen und auf eine größere Materialbandbreite zugegriffen werden. Zusätzlich können durch den direkten Einsatz von Granulat die Herstellkosten der Bauteile reduziert werden. Durch einen wesentlich höheren erzielbaren Durchsatz bei der direkten Verwendung von Granulat können höhere Verarbeitungsgeschwindigkeiten erreicht werden, um insbesondere großvolumige Bauteile in annehmbarer Zeit zu fertigen.

Bei der Zuführung des Werkstoffs in Granulatform bestehen zwei Möglichkeiten der Platzierung des Extruders, welcher die thermoplastische Schmelze erzeugt. Die direkte Platzierung des Extruders als Druckwerk ist eine Variante. Dabei ist zu beachten, dass entweder der Extruder durch die Achsen bewegt werden muss oder bei einer starren Anbringung entsprechend die Bauplattform. Bei der direkten Nutzung eines Extruders als Druckwerk können Vorteile der auf Granulat basierten Werkstoffzuführung wie zum Beispiel die Verringerung der Herstellzeit reduziert werden. Zusätzlich kann diese Art der Platzierung des Extruders eine Erhöhung der Achsen, die bei Fused Layer Modeling möglich ist, beeinträchtigen (siehe Abschnitt 1.4.2.2). Um die Vorteile der auf Granulat basierten Werkstoffzuführung vollumfänglich zu nutzen, ist die Trennung von Druckwerk und Extruder notwendig. Dabei wird die vom Extruder erzeugte Thermoplastschmelze über ein beheiztes Schlauchsystem der Werkstoff aufbringenden Düse des Druckwerks zugeführt.

Als Beispielsysteme für granulatbasierte Fused Layer Modeling-Systeme sind der KamerMaker und Big Additive Area Manufacturing (BAAM) zu nennen. Der KamerMaker wurde ursprünglich für ein Hausbauprojekt des Architekturbüros DUS aus den Niederlanden entwickelt. Der Aufbau des Fused Layer Modeling-Systems basiert auf einer dreiachsigen Portalanordnung und entstand in Kooperation mit Ultimaker BV, einem Fused Layer Modeling-Systemhersteller aus den Niederlanden. Die Abmaße des KamerMaker liegen bei einer Höhe von sechs Metern und einer Grundfläche von sechs Quadratmetern. Die Bauteile, welche über den KamerMaker für das Hausbauprojekt erzeugt wurden, wiegen circa 180 Kilogramm und haben die Abmessungen von $2000 \times 2000 \times 3500$ mm. Als Werkstoff wurde der Thermoplast Macromelt 6900 E der Firma Henkel beziehungsweise Tecnar eingesetzt. Dieser transparente Werkstoff ist ein Polyamid (PA), welcher auf pflanzlichem Öl basiert. Macromelt 6900 E besteht zu 77% aus biologisch nachwachsenden Rohstoffen. Die Verarbeitungstemperatur liegt im Vergleich bei niedrigen 170°C .

Das Big Additive Area Manufacturing-System wurde in Kooperation von Cincinnati, einem in den USA ansässigen Hersteller von Metallbearbeitungssystemen, und dem Oak Ridge National Laboratory entwickelt. Das Fused Layer Modeling-System besitzt einen Bauraum mit den Abmaßen von $6100 \times 2360 \times 1830$ mm. Zu den verarbeitbaren Werkstoffen gehören Polyethylenterephthalat (PET), Polyethylenterephthalat Glycol (PETG), Polylactide (PLA), Polycarbonate (PC), thermoplastisches Polyurethan (TPU), Polyamid (PA), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Acryl-

nitril-Styrol-Acrylat (ASA), Polyetherimide (PEI), Polyetheretherketone (PEEK) und Polyphenylsulfone (PPSU). Durch die Möglichkeit, Kohle- und Glasfasern hinzuzufügen, können die thermische Beständigkeit sowie die Festigkeit der Bauteile verbessert werden. Gedruckt wird mit einem Massenstrom von 17,24 kg pro Stunde bei einem Düsendurchmesser von 7,62 mm. Zusätzlich sind Düsendurchmesser von 5,08 mm und 10,16 mm verfügbar. Durch die relativ großen Düsendurchmesser kann zwar die Herstellzeit für Bauteile verkürzt werden, jedoch sind die bei Fused Layer Modeling typischen Extrusionsraupen sehr prägnant auf der Oberfläche der Bauteile zu erkennen. Das Big Additive Area Manufacturing-System bietet aber zusätzlich die Möglichkeit, nachträglich mittels Fräsen die Oberfläche zu glätten. Die Positionierungsgeschwindigkeit des Systems kann bis zu 250 m pro Minute erreichen. Dabei ist das Druckwerk Beschleunigungskräften von über 2 g ausgesetzt. Das Einsatzspektrum des Systems reicht von Schnitt- und Bohrvorrichtungen über Betonschalungen, Harztransferformen, Sandgussformen und Streckziehvorrichtungen hin zu Möbeln und Fahrzeugen. Teile des Fahrzeugs Strati der Firma Local Motors wurden mit dem Big Additive Area Manufacturing-System additiv gefertigt. Neben dem Fahrgestell, Rahmen und der Außenverkleidung wurden Teile der Innenausstattung an einem Stück hergestellt. Die Mechanik stammt beim Elektrofahrzeug Strati vom Renault Twizy. Die additiv gefertigten Bauteile des Fahrzeugs wurden innerhalb von 44 Stunden gefertigt. Eine Reduktion dieser Herstellzeit auf circa 24 Stunden lässt sich mittel größerem Düsendurchmesser erzielen.

Ein weiteres thermoplastisches additives System, welches den Werkstoff in Granulatform zuführt, ist der ARBURG freeformer. Jedoch kann dieses System nicht dem Fused Layer Modeling zugeordnet werden, da es keine Extrusionsraupen zum Aufbau der Bauteile erzeugt. Vielmehr werden bei diesem System thermoplastische Tropfen über einen Piezo-Düsenverschluss aufgetragen. Das deutsche Maschinenbauunternehmen ARBURG nennt dieses Verfahren Kunststoff-Freiformen (AKF). Beim freeformer wird nicht das Druckwerk über Achsen bewegt, sondern die Bauplattform, auf der das Bauteil erzeugt wird. Im Gegensatz zum KamerMaker und dem Big Additive Area Manufacturing weist der auf drei Achsen basierende freeformer 200-3X zwei Thermoplast-Extruder auf. Somit sind mit dem freeformer auch Bauteile aus zwei Werkstoffen oder die Verwendung eines wasserlöslichen Stützmaterials möglich. Mit einer Baufläche von 200 cm² und einer maximalen Bauteilgröße von 154 × 134 × 250 mm ist der freeformer bürotauglich. Der Düsendurchmesser des 200-3X liegt bei 0,2 mm, und die Baukammer kann maximal auf 120 °C aufgeheizt werden. Der freeformer 300-3X mit einer Baufläche von circa 300 cm² und mit bis zu drei Thermoplast-Extrudern ermöglicht die Erzeugung additiver Bauteile, welche aus zwei unterschiedlichen Thermoplasten bestehen, und den zusätzlichen Einsatz von Stützmaterial. Die Möglichkeit, Standardgranulate zu nutzen, wird durch nötige vordefinierte Parametersätze, welche ARBURG

bereitstellt, ermöglicht. Dabei fungieren diese Parametersätze als Referenzmaterialien. Mit dem freeformer lassen sich thermoplastische Elastomere (TPE), Polyamide (PA), Polycarbonate (PC), Polymethylmethacrylat (PMMA), Polypropylen (PP), Polylactide (PLA) und Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) verarbeiten.

1.4.2 Charakteristika des Fused Layer Modelings

Fused Layer Modeling-Systeme sind zum größten Teil offene Anlagen. Die Systeme bieten grundsätzlich die Möglichkeit, Änderungen der Prozessparameter wie auch Adaptionen der Hardware vorzunehmen. Im Gegensatz dazu sind Fused Deposition Modeling-Systeme vornehmlich geschlossen. Durch die Möglichkeit, die Prozessparameter zu ändern, besteht eine höhere Varianz bei den verarbeitbaren Werkstoffen inklusive der Farbbandbreite. Weiterhin sind durch die offene Systemstruktur Verbrauchsmaterialien bei Fused Layer Modeling nicht herstellerspezifisch gebunden. Diese hat zur Folge, dass Verbrauchsmaterialien circa $\frac{1}{3}$ kostengünstiger sind als bei Fused Deposition Modeling. Bei Fused Layer Modeling ist es durch die offene Struktur grundsätzlich möglich, Bauteile in Serienwerkstoffen herzustellen.

Die offene Systemstruktur bei Fused Layer Modeling wird durch die nötige Software ermöglicht. Diese wird stellenweise von Drittanbietern bereitgestellt und teilweise auch im herstellerspezifischen Branding den Systemen beigelegt. Die nötige Software staffelt sich in zwei Kategorien:

- Schichterzeugung und Bahnplanung (Slicer)
- Maschinensteuerung

Die aus den Kategorien resultierenden Softwarelösungen können separiert oder über eine einheitliche grafische Nutzeroberfläche genutzt werden. Insbesondere die Lösungen hinsichtlich Schichterzeugung und Bahnplanung der Drittanbieter werden auch bei Eigenentwicklungen als Basis genutzt. Da beim Fused Layer Modeling unterschiedlichste Systemvariationen bis hin zu Schwarmanordnungen mit Industrierobotern genutzt werden, besteht eine hohe Anzahl von unterschiedlichsten Softwarelösungen in der Kategorie Maschinensteuerung. Komplette spezifische Softwareeigenentwicklungen für Fused Layer Modeling-Systeme sind im Gegensatz zum Fused Deposition Modeling selten anzutreffen (Bild 1.11).

Die hohe Variation der Systeme und die offene Architektur der Fused Layer Modeling-Systeme kann zu einer Qualitätsreduktion der Bauteile führen. Durch die offene Architektur können auch thermoplastische Filamente von Drittanbietern genutzt werden, welche vielfach einen Preisvorteil darstellen. Diese Filamente können Abweichungen im Durchmesser sowie Lunker im Inneren aufweisen und somit Schwankungen in der Qualität des Filaments darstellen. Fehlstellen im Fila-

ment können durch Fused Layer Modeling-Druckwerke nicht erkannt oder ausgeglichen werden. Schwankungen im Durchmesser von Filamenten können zu Förderproblemen führen. Lunker und die Varianz im Düsendurchmesser führen zu einer erhöhten oder verringerten Thermoplastzuführung. Diese variierende Materialzuführung kann zu Fehlern im Bauteil wie auch auf der Oberfläche der Bauteile führen.

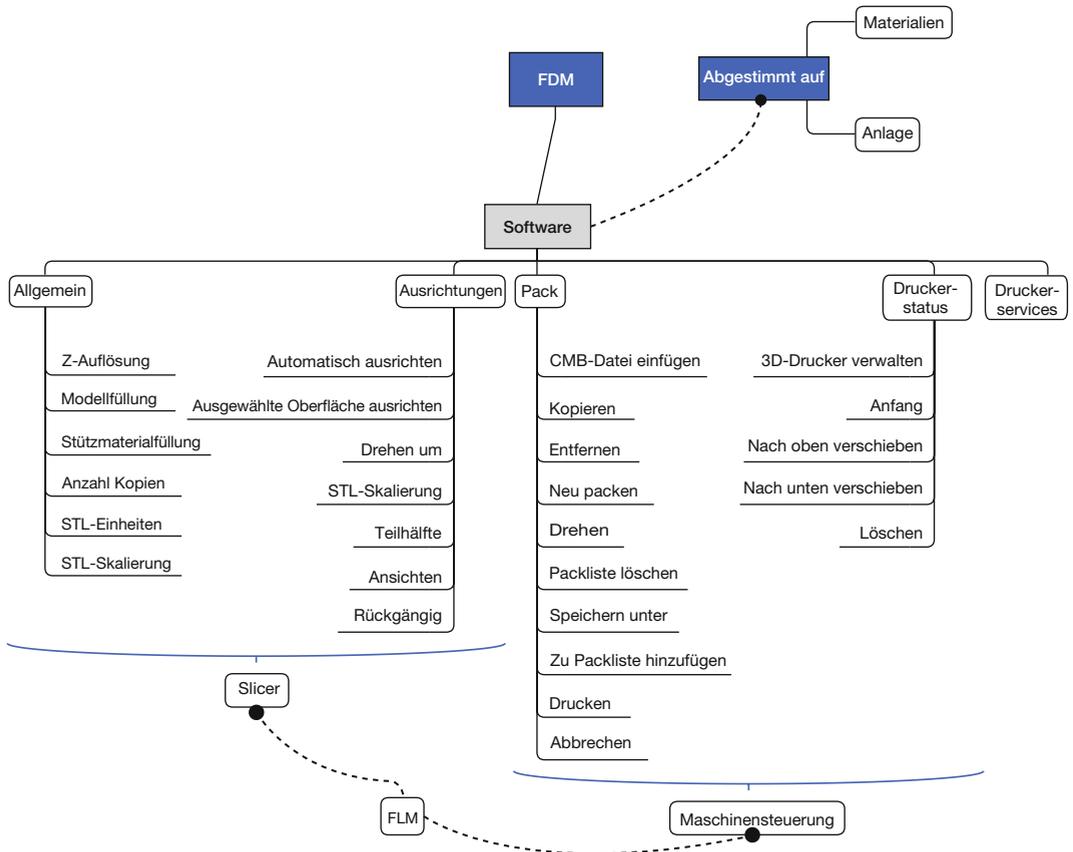


Bild 1.11 Vergleich der Softwarefunktionalität von Fused Deposition Modeling und Fused Layer Modeling (© Andreas Fischer 2021)

Weiterhin führt die hohe Varianz der Systeme zu unterschiedlichen Ausprägungen von maschinenspezifischen qualitätsfördernden Systemkomponenten wie zum Beispiel einer automatisierten mechanischen Düsenreinigung. Das Fehlen einer solchen Reinigungseinheit führt einerseits zu kürzeren Herstellzeiten für Bauteile, da die nötigen Bewegungen zur Reinigungseinheit und der Reinigung selbst eingespart werden. Andererseits können durch die Einsparung der Einheit unbeabsichtigt nachfließender Thermoplast, Verschmutzungen der Düse oder kurze Ex-

trusionsraupen in das Bauteil eingebracht und somit die Qualität des Bauteils reduziert und der Bauprozess negativ beeinflusst werden.

1.4.2.1 Stützstrukturen und Bauraum

Bei Fused Layer Modeling-Systemen sind als Stützmaterial wasserlösliche thermoplastische Materialien oder eine Stützung mit dem Werkstoff, welcher für das Bauteil genutzt wird, vorzufinden. Mitunter werden auch thermoplastische Werkstoffe eingesetzt, welche zum Bauteilwerkstoff eine geringe Haftung aufweisen und nachträglich mechanisch entfernt werden müssen. Es bestehen aber auch Ansätze, durch maschinenseitige Strategien auf Stützmaterial zu verzichten. Werden Fused Layer Modeling-Systeme mit zum Beispiel fünf anstatt drei Achsen genutzt, kann das Bauteil beim Auftragen der aktuellen Schicht so zum Druckwerk platziert werden, dass keine Stützung nötig ist. Für Systeme mit drei Achsen entwickelt die USC Viterbi School of Engineering in den USA eine variable Bauplattform, welche die nötige Stützung der Bauteile über einzeln ausfahrbare Plattformen übernimmt. Dabei wird jede mechanische Stütze über einen eigenen Motor in Z-Richtung bewegt, um bauteilspezifische Bereiche zu stützen. Durch diese Strategie der Stützung lassen sich die Herstellzeiten um circa 40% und der Werkstoffeinsatz um 30% reduzieren. Thermoplaste als Stützmaterial zu verwenden ist prozessbedingt ein zwingend notwendiges Auswahlkriterium für Stützmaterialien bei Systemen der additiven Extrusion. Bei der Nutzung des gleichen Werkstoffs für Bauteil und Stützstruktur wird eine möglichst geringe Anzahl von direkten Kontaktstellen zwischen Bauteil und Stützstruktur gesetzt, da diese Stützstruktur in einem nachgelagerten Schritt vom Bauteil mechanisch entfernt werden muss. Durch die offene Software-Architektur von Fused Layer Modeling-Systemen können die Parameter der Stützstruktur je nach Werkstoff und Bauteilgeometrie angepasst werden. Stützstrukturen beim Fused Layer Modeling wirken sich an den direkten Kontaktstellen meist negativ auf die Oberflächenqualität der betroffenen Bereiche des Bauteils aus. Bei direkter Stützung mit dem Werkstoff des Bauteils kann es in Abhängigkeit von der Größe der Kontaktfläche auch zu einer lokalen Zerstörung der Oberfläche des Bauteils, bei der Entfernung der Stützstruktur, kommen (Bild 1.12). Der Materialschmelzpunkt des auflösbaren Stützmaterials sollte prozessbedingt zwischen 150 °C und 280 °C liegen.

Die für auflösbare Stützstrukturen einsetzbaren thermoplastischen und wasserlöslichen Werkstoffe beschränken sich im Wesentlichen auf die folgenden fünf Thermoplasten:

- Polyvinylalkohol (PVAL)
- Polyvinylmethylether (PVME)
- Polyacrylsäure (PAA)
- Polyvinylpyrrolidon (PVP)
- Celluloseether (CE)



Bild 1.12 Aus Acrylnitril-Butadien-Styrol und mittels Fused Layer Modelings gefertigter Eierbecher mit defekter lokaler Oberfläche, hervorgerufen durch die mechanische Entfernung des Stützmaterials (© Andreas Fischer 2022)

Der Werkstoff Polyvinylmethylether eignet sich mit einem Schmelzpunkt von $-122\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht für die additive Extrusion. Die Thermoplasten Polyacrylsäure und Polyvinylpyrrolidon mit einem Schmelzpunkt von $12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ beziehungsweise $13,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen auch noch in einem Temperaturbereich, der nicht kompatibel mit dem der genutzten Werkstoffe für Bauteile ist. Celluloseether mit einem Schmelzpunkt zwischen $244\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $255\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist bei positiver Haftung am Bauteilwerkstoff als auflösbares Stützmaterial einsetzbar. Der Werkstoff wird aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen und wird vornehmlich bei Bauhilfsstoffen eingesetzt. Der Werkstoff Polyvinylalkohol ist mit einem Schmelzpunkt von $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ebenfalls als auflösbares Stützmaterial beim Fused Layer Modeling einsetzbar. Der Werkstoff wird oft als Adhäsions- und Verdickungsmittel bei Lacken und Klebstoffen genutzt. Polyvinylalkohol ist als wasserlösliches Stützmaterial für Fused Layer Modeling-Systeme etabliert und als Filament erhältlich. Die Systeme sollten beim Einsatz von Polyvinylalkohol entweder eine temperierbare Baukammer oder eine beheizbare Bauplattform aufweisen. Des Weiteren kann der Einsatz eines Haftvermittlers je nach Trägersubstrat der Bauplattform nötig sein. Ein Haftvermittler auf Basis von Polyvinylalkohol und Wasser eignet sich für die Bauteilwerkstoffe Polylactid, Acrylnitril-Butadien-Styrol und Polystyrol. Wird ein Haftvermittler auf Basis von Aceton und Acrylnitril-Butadien-Styrol genutzt, können als Bauteilwerkstoffe Acrylnitril-Butadien-Styrol, Polycarbonat und Mischungen aus Acrylnitril-Butadien-Styrol und Polycarbonaten genutzt werden. Der Werkstoff Polyvinylalkohol kann nicht zu trocken und nicht zu feucht verarbeitet werden. Deshalb muss zuvor eine definierte Menge Wasser von circa 2 bis 2,5% durch den Thermoplast aufgenommen werden. Ist das Filament zu trocken, wird es spröde und behindert den Fertigungsprozess durch häufiges Brechen des Filaments in der Zuführung. Wird Polyvinylalkohol zu feucht verarbeitet, bilden sich beim Aufschmelzen des Fila-

ments Gasbläschen, die zur Schaumbildung in der Schmelzdüse führen. Diese Schaumbildung kann zu Fehlstellen im Bauteil oder Abbrüchen des Fertigungsprozesses führen. Die Lagerung von Polyvinylalkohol-Filament sollte bei einer Luftfeuchtigkeit von 20% bis 30% erfolgen. Polyvinylalkohol ist als Stützmaterial bei Geometrien mit Hohlräumen nicht geeignet, wenn die Haftung am Material des Bauteils nicht gegeben ist. In dieser Kombination können Fehlstellen am erzeugten Bauteil auftreten. Sollten für das Bauteilmaterial und Polyvinylalkohol unterschiedliche Trägersubstrate nötig sein, ist dieses Stützmaterial in der Kombination nicht geeignet.

Die Funktion von beheizbaren Baukammern bei Systemen der additiven Extrusion ist vornehmlich thermisch induzierter Eigenspannung in Bauteilen entgegenzuwirken. Diese Spannung entsteht durch unterschiedlich schnelle Abkühlung von Rand- beziehungsweise Kernbereichen von Bauteilen. Durch die schnellere Abkühlung und Schrumpfung der Bauteilrandzonen kann es dort zu Zugspannungen und zu einer plastischen Verformung kommen. Diese plastischen Verformungen können zu einer teilweisen oder zu einer gesamten Ablösung des Bauteils vom Trägersubstrat führen und somit zum Abbruch des additiven Bauprozesses. Thermisch induzierte Eigenspannung wird zusätzlich durch spezifische Bauteilgeometrien und Verarbeitungstemperaturen der Bauteilwerkstoffe gefördert. Bauteile, welche in den ersten zu erzeugenden Schichten eine großflächige Geometrie darstellen, neigen zur thermisch induzierten Eigenspannung und sind eher in geschlossenen und beheizbaren Baukammern zu erzeugen. Dies gilt auch für Bauteilwerkstoffe, deren Schmelzpunkte in höheren Bereichen liegen und somit eine höhere Verarbeitungstemperatur benötigen. Ein weiterer Einflussfaktor für die thermisch induzierte Eigenspannung insbesondere bei offenen Bauräumen können Temperaturschwankungen am Aufstellort des Fused Layer Modeling-Systems sein.

Die einfachste Form der Bauraumgestaltung bei Fused Layer Modeling-Systemen ist eine starre oder bewegbare Bauplattform, die mit verschiedenen Trägersubstraten bestückt werden kann (Bild 1.13). Diese Art der Bauraumgestaltung ist häufig bei auf Industrierobotern basierten Systemen vorzufinden. Vorteilhaft bei solchen Bauräumen sind Werkstoffe, welche hinsichtlich Schrumpfung modifiziert wurden. Der Aufstellort solcher Systeme sollte möglichst so gewählt werden, dass homogene Umgebungsbedingungen erzeugt werden können. Eine Variation dieser grundlegenden Bauraumgestaltung bei Fused Layer Modeling-Systemen bilden Bauräume, bei denen die Bauplattform mit einer steuerbaren Flächenheizung ausgestattet ist. Diese beheizbaren Bauplattformen werden wiederum mit und ohne Umhausungen eingesetzt. Der Vorteil dieser Bauräume ist, dass die thermisch induzierte Eigenspannung in den unteren Schichten des Bauteils minimiert und somit auch eine bessere Haftung des Bauteils auf dem Trägersubstrat erzielt werden kann. Umhausungen von Bauräumen können die negativen Einwirkungen von

Umgebungsbedingungen auf den Bauprozess minimieren. In Kombination mit integrierten Flächenheizungen kann deren Wirkungsgrad erhöht werden. Eine weitere Bauraumvariation sind Baukammern, welche homogen temperiert werden können. Diese sind prinzipiell den Baukammern, welche beim Fused Deposition Modeling zum Einsatz kommen, sehr ähnlich (siehe Abschnitt 1.3.2.2). Der thermisch induzierten Eigenspannung kann in solchen Bauräumen am effektivsten entgegengewirkt werden.

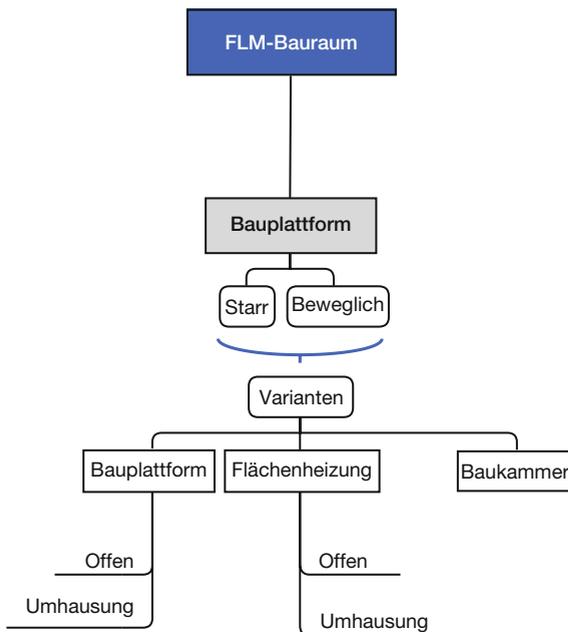


Bild 1.13 Varianten der Bauraumgestaltung bei Fused Layer Modeling-Systemen
(© Andreas Fischer 2021)

1.4.2.2 Roboterbasiertes Fused Layer Modeling

Beim Fused Layer Modeling besteht die Möglichkeit, das nötige Achssystem, welches für die genaue Führung des Druckkopfs und der Bauplatzform zuständig ist, über Industrieroboter darzustellen. Die additive Fertigung mittels Industrieroboter ist wie das Fräsen, Nieten, Bohren oder Vermessen mittels Roboter den Präzisionsanwendungen zuzuordnen. Diese Kombination von additiver Fertigung und Industrieroboter folgt dem allgemeinen Trend, Werkzeug- oder Spezialmaschinen durch Industrieroboter für bestimmte Fertigungsaufgaben zu ersetzen. Industrieroboter besitzen durch große Arbeitsräume und vergleichbar geringe Investitionskosten ein hohes Potenzial zur Senkung der Kosten in der Produktion. Anwendungen wie das Fused Layer Modeling können jedoch erst durch Maßnahmen zur Steigerung der Genauigkeit umgesetzt werden. Da beim Fused Layer Modeling ähnlich wie