

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.

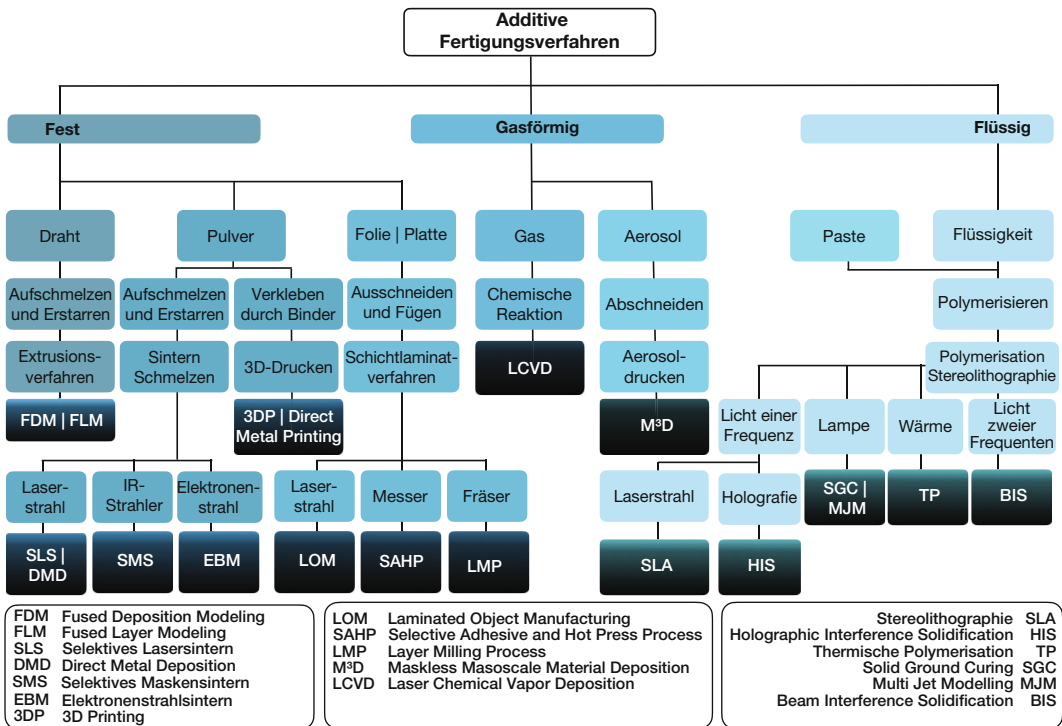


Bild 1.1 Unterteilung der additiven Verfahren nach Ausgangszustand des Werkstoffs
(© Leonie Fensterle 2020, in Anlehnung an Sehrt 2016)

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“.

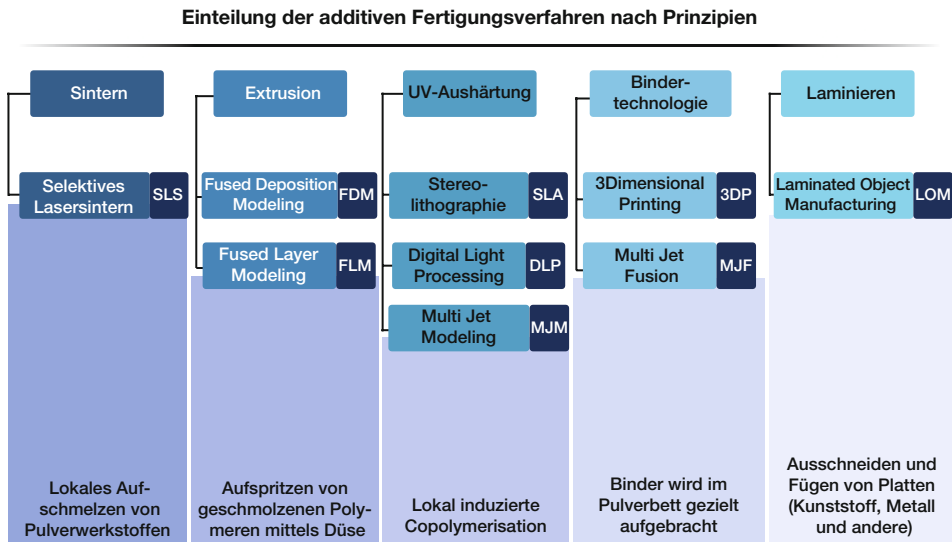


Bild 1.2 Einteilung der additiven Fertigungsverfahren nach Verfahrensgruppen und Prinzipien in reduzierter Form (© Leonie Fensterle 2020, in Anlehnung an Fischer 2020)

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 konzipiert 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).

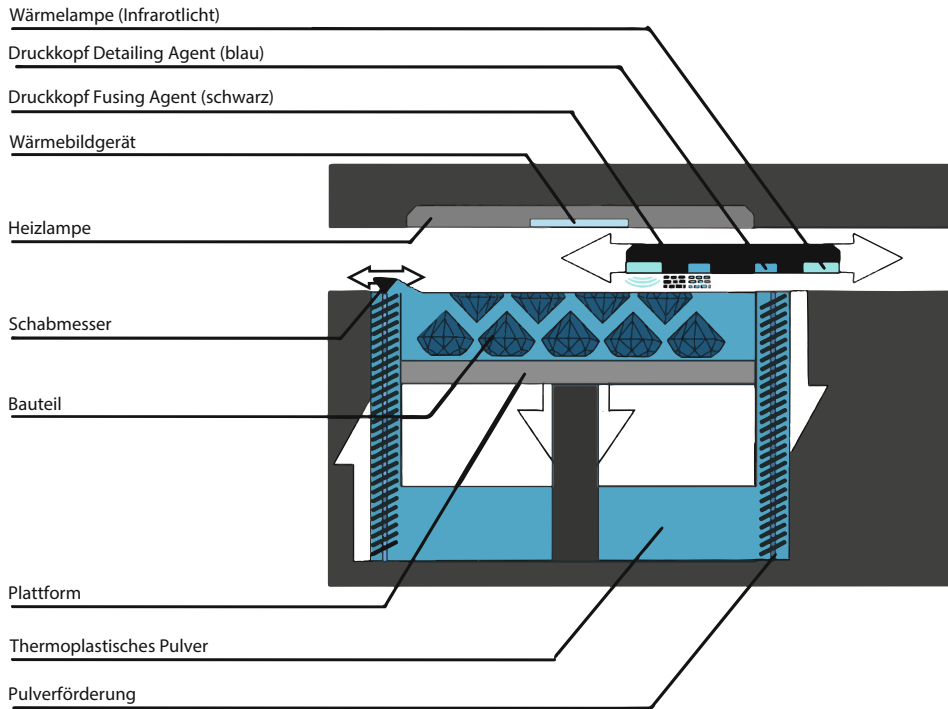


Bild 1.3 Funktionsprinzip des Multi Jet Fusion-(MJF-)Verfahrens von HP (Leonie Fensterle 2020)

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.

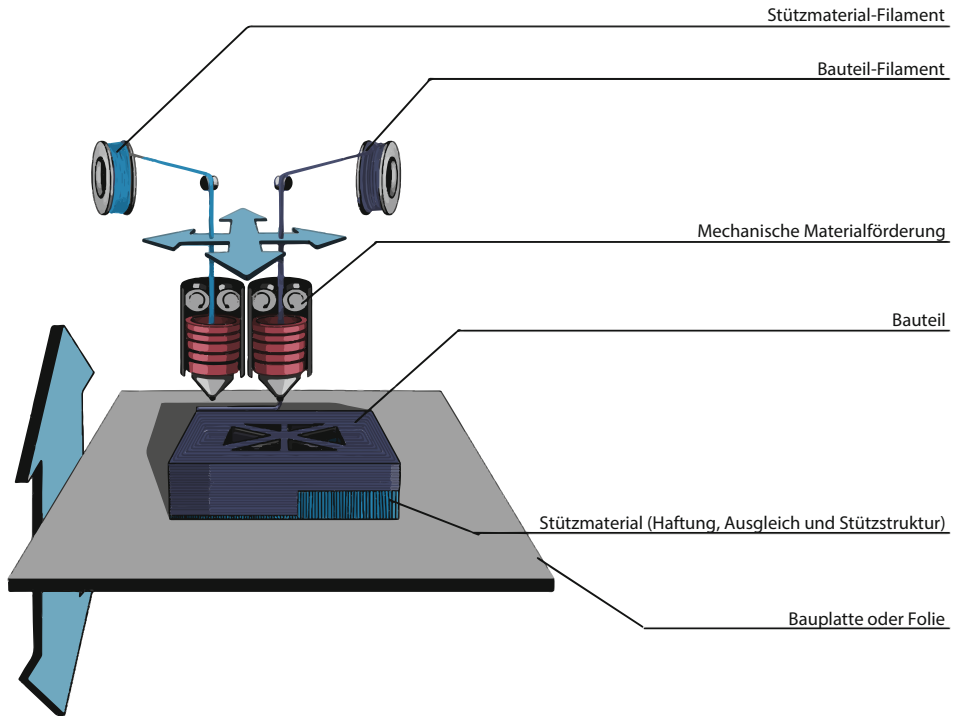


Bild 1.4 Funktionsprinzip des Fused Deposition Modeling-(FDM)-Verfahrens von Stratasys
(© Leonie Fensterle 2020)

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.

Index

Symbole

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

A

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

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

- ARBURG Kunststoff-Freiformalen (AKF)
29, 59
- Artificial Life 427
- ASA 191
- Aspektverhältnis 324
- Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) 52
- Auffrischprozess 375
- Auffrischrate 326, 364, 365, 376
- Auflösegenauigkeiten 341
- Aufschmelzkinetik 332
- Aufwärmphase 328
- Augmented Reality 458
- Auslaufen 260, 264, 265, 273
- Auspackstation 368
- Außenbewitterung 220
- B**
- Bakelit 61
- Baujobentpackung 367, 375
- Baujobvorbereitung 338
- Bauplattformheizung 259
- Bauraumgeometrie
- rechteckig 336
 - rund 336
 - Wechselrahmen 336
- Bauraumheizung 190, 257, 269
- Bauraumtemperatur 161
- Bauraumvolumen 364, 365
- Bauteilauslegung 87, 127
- Bauteilcharakteristik 346
- Bauteilfehler 359
- Bauteilprüfung 73
- Bauteilqualität 124
- Bauteilsimulation 124
- Bauteilspannung 102
- Beam-Offset 331, 354
- Belichtungsgeschwindigkeit 364, 365
- Belichtungsparameter 331
- Belichtungsstrategie 331
- Hatchingstrategie 331
- Big Additive Area Manufacturing (BAAM) 29
- Bioabbaubarkeit 172
- biobasierte Polyamide 154
- Biokompatibilität 169, 171, 230
- Biokomposite 217
- Biokunststoff 229
- biologisch abbaubare Produkte 181
- Bioplastik 229
- Biopolymere 63, 65
- Bioprinting 80
- Biowerkstoffe 217
- Biphenyle (PBB) 208
- Blenden 207
- Blends 72
- Bowden-Extruder 116, 257, 271
- BPTMC 167
- Brandschutz 378
- Break-even-Punkt 363, 364
- Bruchdehnung 349
- Brustimplantate 230
- Bubble-Jet-Druckköpfe 8
- Buckling 116, 243
- Bussknetter 205
- C**
- CAD 285, 388
- Carbon Nanotubes 222
- Ceiling-Temperatur 122
- CE-Zeichen 307
- CFK 216
- chemische Konsolidierung 284
- chemisches Glätten 371
- chemisches Recycling 157, 160
- chemisches Schäumen 225
- chloriertes Polyethylen (PE-C) 181
- chlorsulfoniertes Polyethylen (CSM) 181
- Clear Cast Integration 431
- CNC-Fräse 302
- CO₂-Laser 317
- Coasting 267
- COC 181
- Code of Federal Regulations 21
- CFR181.32 und Food Notification 190 227
- Coextrusion 409

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

D

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

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

E

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

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

F

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

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

G

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

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

H

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

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

I

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

K

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

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

L

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

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

M

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

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

N

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

O

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

P

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

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

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

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

Q

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

R

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

- Roboterarmenlenksysteme 459
- Robotic Composite 3D 40
- Rückzug 265
- Rückzugsgeschwindigkeit 121, 266, 273
- Rückzugslänge 121, 266
- Ruß 212
- Rüttlersystem 334

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

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

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

V

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

W

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

Z

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