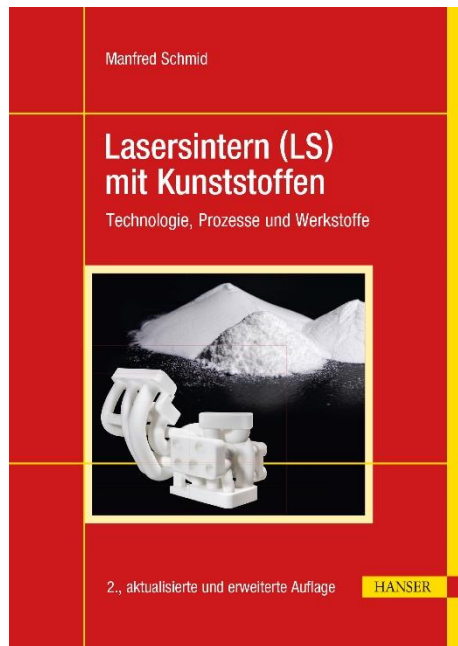


HANSER



Leseprobe

zu

Lasersintern (LS) mit Kunststoffen

von Manfred Schmid

ISBN: 978-3-446-46664-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-47013-2

E-Pub-ISBN: 978-3-446-47622-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446466647>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Vorwort zur ersten Auflage

Die Geschichte der additiven Fertigung scheint sehr jung, ist jedoch nun bereits mehr als hundert Jahre alt. Die erste Patentanmeldung gab es in 1882 von J. E. Blather, welcher ein Verfahren anmeldete zum Herstellen von topografischen Konturkarten, indem ausgeschnittene Wachsplatten aufeinandergelegt wurden.

Dies ist eine erstaunliche Tatsache, nachdem diese schichtweise arbeitenden Verfahren aktuell einen immensen Hype durchlaufen, welcher nicht etwa dadurch ausgelöst wurde, dass grundlegend neuartige Technologien entwickelt wurden. Hintergrund ist vielmehr, dass wesentliche Patente ausgelaufen sind, die es ermöglichen, mit einfachsten Mitteln ein Strangablageverfahren nachzubauen, welches für die Generierung dreidimensionaler Körper genutzt werden kann. Dieser Hype schaffte es jedoch in kürzester Zeit, eine immense Eigendynamik zu entwickeln. Die Nutzerzentralisierung und die neuen Freiheitsgrade der Technologien treffen hier stark auf den heutigen Zeitgeist der DIY-Kultur und so ist es nicht erstaunlich, dass es Abnehmer für „Fabber“ und „3D-Druck-Selfies“ gibt. Im Umkehrschluss wurden damit nun doch auch verschiedene neuartige Technologien über die gesamte Prozesskette hinweg entwickelt. Als ich mich während meines Studiums Anfang 2000 erstmalig mit dem Thema befasste, war der Stellenwert von Schichtbauverfahren lediglich im Bereich des Prototypenbaus hoch. Die Technologien haben sich zwar seither nicht grundlegend verändert, aber heute ist der Markt von individuellen Produkten und Kleinserien in vielen Branchen massiv gestiegen. Demgegenüber steigen etablierte Druckerhersteller und viele innovative Start-ups in dieses Feld ein. So finden additive Fertigungsverfahren bereits heute in ungeahntem Maße Einsatz, sei es für die Herstellung von individuellen Spielzeugen bis hin zu hoch belastbaren Prototypenkomponenten im Antriebsstrang. Zukünftig sind unterschiedlichste Szenarien der Fertigung denkbar und eine dezentralisierte Produktion „on demand“ wirkt greifbar. Dies generiert ein Spannungsfeld aus hohen technologischen Erwartungen, Risiken und möglichen Potenzialen. Eine realistische Einschätzung ist unabhängig von der Begeisterung, die man verspürt, nachdem man seinen ersten additiven Fertigungsprozess gesehen

hat und die damit generierten Bauteile in der Hand hält. Eine eigenständige Forschung an dem Thema wird damit unabdingbar.

Bei der BMW AG wurde bereits 1989 die erste SLA-Anlage beauftragt. Damit war die BMW AG der erste Kunde eines heute weltweit etablierten Lasersinteranlagensherstellers aus dem Münchner Süden. Im Laufe der Jahre hat sich im Forschungs- und Innovationszentrum (FIZ) aus den ersten Anlagen für den Modellbau ein „Center of Competence“ formiert, in welchem heute vielfältige Praxis-, aber auch Grundlagenforschung betrieben wird. Neben immer hochwertigeren Prototypen für die Erprobung und Absicherung der Fahrzeugprojekte werden hier Werkstoffe und Prozesse entwickelt, die es ermöglichen, die Potenziale des Schichtbaus ideal zu nutzen, um hier beispielsweise auch individuell an die Mitarbeiter angepasste Produktionshilfsmittel zu erstellen.

Dabei wird weniger über die in den Medien besprochenen 3D-Druckverfahren diskutiert, sondern es geht um hochkomplexe Werkzeugmaschinen, auf denen die Produktion von morgen stattfinden soll. Eine dieser Technologien ist das Lasersintern – ein strahlbasiertes drucklos arbeitendes Fertigungsverfahren. Mit einem Sinterprozess hat es lediglich die lange Verweilzeit der generierten Schmelze einer Bauteilkontur bei hoher Temperatur gemein. Hierin jedoch liegt auch einer der Kernprozesse des Lasersinterns, der schon in mannigfaltiger Weise untersucht wurde. Als ich mich im Rahmen meiner eigenen Dissertation mit der Zeit- und Temperaturabhängigkeit dieses Zwei-Phasen-Mischgebiets, in welchem Schmelze und Festkörper scharf abgegrenzt nebeneinander vorliegen, befasste, hatte ich die Chance, in eines der vielen interdisziplinären Forschungsfelder der additiven Fertigung einzusteigen, und bin nach wie vor begeistert von diesem Themenfeld. Wer sich intensiv mit dem Thema Lasersintern befassen möchte, wird in den meisten sehr allgemein gehaltenen Büchern zu additiven Fertigungsverfahren nicht fündig werden. Da sich die pulverbettbasierten Technologien jedoch zu den mitunter wichtigsten additiven Fertigungsverfahren etabliert haben, ist es essenziell, auch Ergebnisse der Grundlagenforschung darzustellen und auf den Praxiseinsatz zu transferieren, um beispielsweise als Dienstleister qualitativ hochwertige Teile wirtschaftlich darstellen zu können. Mit dem vorliegenden Buch von Manfred Schmid, einem der anerkannten Spezialisten im Lasersintern, soll genau diese Tiefe gegeben werden, ohne dabei den Nutzen für den Anwender aus den Augen zu verlieren.

Mai 2015

Dr.-Ing. Dominik Rietzel

Vorwort zur zweiten Auflage

Lasersintern hat sich im Reigen der additiven Fertigungsverfahren oder, wie es oft bildlicher ausgedrückt wird, bei den 3D-Druckverfahren im letzten Jahrzehnt eine führende Rolle erarbeitet. Dies gilt sowohl für die Metalle, als auch für die Kunststoffe, die in diesem Buch im Fokus stehen.

Zum einen erzeugt das Lasersintern Bauteile, die von den Eigenschaften am nächsten zu „klassischer“ Thermoplast-Verarbeitung liegen. Zum anderen bietet es als Verfahren ohne jede Art von Stützstrukturen die idealen Voraussetzungen für die freie Bauteilgestaltung und unterstützt damit die Wende von werkzeuggebundenem Design zum funktionsgetriebenem Design eines Bauteils. Diese Freiheit des Designs hält immer mehr Einzug in die industrielle Fertigung für spezialisierte Bauteile mit hoher Funktionsintegration oder hohem Individualisierungsgrad bis hin zum Einzelstück.

Ein Beispiel für die Funktionsintegration ist die Fertigung von Greifersystemen, bei denen bis zu 100 Einzelteile wie Ventile, Federn, Schläuche und die Greifwerkzeuge in ein einziges lasergesintertes Bauteil integriert werden können. Abgesehen von dem Entfall der Montage wiegt das so gefertigte Werkzeug nur einen Bruchteil und ermöglicht damit eine signifikante Reduzierung der Kosten im Lebenszyklus des Bauteils durch schnellere Bewegung des Greifers bei gleichzeitig geringerem Energieverbrauch. Der hohe Individualisierungsgrad kommt insbesondere auch bei Anwendungen rund um den Menschen zum Einsatz, sei es die Fertigung von angepassten Orthesen und Prothesen oder von Bohrschablonen für Operationen. Doch es muss nicht immer hochtechnisierte Medizin sein, sondern auch die Fertigung von lasergesinterten Einlegesohlen ist bereits heute Realität.

Die erste Auflage des Buches „Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen – Technologie, Prozesse und Werkstoffe“ ist zum absoluten Standardwerk für System- und Materialhersteller, Anwender und die Forschung geworden. Dies liegt daran, dass auch einem Neuling im Bereich der additiven Fertigung der Einstieg leicht fällt und an der Detailtiefe und fachlichen Präzision, in der Manfred Schmid es schafft, das hochkomplexe Zusammenspiel von Werkstoff und Prozess zu erläutern, das auf vollkommen anderen Zeitskalen abläuft als jede andere Kunststoffverarbeitung. Dass gerade diese langen Zeitskalen eine besondere Belastung und damit Herausforderung für die Werkstoffe darstellen, ist einer der Gründe, warum die Auswahl an unterschiedlichen Kunststoffen auch nach 30 Jahren Lasersintern noch immer eingeschränkt ist. Um diese Problematik zu überwinden, arbeitet die chemische Industrie mit Nachdruck an angepassten Kunststoffen und die Systemhersteller an der Beschleunigung von Prozessen, zum Beispiel durch den gleichzeitigen Einsatz vieler Laserquellen.

Möge diese zweite Auflage einer neuen Generation von Technikern, die in dem Bereich des Lasersinterns von Kunststoffen tätig sind, eine so hilfreiche, lehrreiche und spannende Lektüre wie die erste Auflage sein und Veteranen dieser Technologie wie mir neue Impulse geben.

August 2022

Dipl. Phys. Peter Keller

Der Autor



Dr. Manfred Schmid startete seine berufliche Karriere mit einer Ausbildung zum Chemielaboranten bei der Metzeler Kautschuk AG in München. Nach dem Abitur auf dem zweiten Bildungsweg folgte ein Chemiestudium an der Universität in Bayreuth mit Promotion im Bereich Makromolekulare Chemie. Ein Thema zu flüssigkristallinen Polyurethanen unter der Anleitung von Prof. Dr. C. D. Eisenbach wurde von ihm bearbeitet.

Nach dem Studium wechselte er in die Schweiz, und es folgten 17 Jahre mit verschiedenen Stationen in der Industrie im Bereich Polymerforschung, und -produktion sowie Materialprüfung für technische Thermoplaste und Polymeranalytik. Polyamide und Biopolymere standen im Fokus der verschiedenen Tätigkeiten.

Seit etwa dreizehn Jahren leitet er den Forschungsbereich für Lasersintern (LS) bei der Inspire AG. Die Inspire AG ist das schweizerische Kompetenzzentrum für Produktionstechnik. Es fungiert als Transferinstitut zwischen den Hochschulen und der Schweizer Industrie.

Die Schwerpunkte seiner aktuellen Tätigkeit liegen im Bereich neue Polymersysteme für den LS-Prozess, der analytischen Bewertung von LS-Pulvern hinsichtlich ihrer spezifischen Eigenschaftsprofile und der LS-Prozessentwicklung. Er betreut mehrere Mitarbeiter und hat eine Vielzahl von unterschiedlichsten Forschungsprojekten in diesem Umfeld geleitet. Eine Reihe von häufig zitierten Originalpublikationen ist daraus entstanden.

Die Idee zum vorliegenden Buch entstand aus mehreren Schulungen, die im Auftrag großer Industriefirmen bei Inspire AG zum Thema „Additive Manufacturing“ durchgeführt wurden.

Danksagung

Der Autor bedankt sich ganz außerordentlich bei Frau Gabriele Fruhmann für die Erstellung einzelner Abschnitte des Buchs vor allem zu den Schwerpunkten industrielle Integration der LS-Technologie (Abschnitt 3.2) und Polyamid 11 (PA11) (Abschnitt 6.1.2), sowie für Ihre vielen wertvollen Hinweise zur Überarbeitung des gesamten Texts. Ohne Ihre Unterstützung und Ihre hochgeschätzten Beiträge wäre die zweite Auflage des Buchs zum Lasersintern von Kunststoffen in der vorliegenden Form nicht möglich gewesen.

Gabriele Fruhmann



Gabriele Fruhmann studierte nach einem Fachabitur in Informatik Mechatronik an der Technischen Universität Graz. Nach dem Studium erfolgte der Einstieg in die Industrie bei Magna Steyr Fahrzeugtechnik in Graz im Bereich Mehrkörpersimulation. Anschließend erfolgte der Wechsel zur ZF Friedrichshafen AG in die Vorentwicklung und die Fokussierung auf faserverstärkte Polymerwerkstoffe.

In 2013 wechselte sie zur BMW AG in den Bereich Werkstoffe und betreute dort Vorentwicklungsprojekte. Im Rahmen dieser Tätigkeit widmete sie sich ab 2014 verstärkt der additiven Fertigung und ab 2017 erfolgte die vertiefte Arbeit in der Werkstoffspezifikation für die Ausgangswerkstoffe beim Lasersintern (LS) und deren Eigenschaften nach dem Prozess im Bauteil.

Nach einem internen Wechsel in 2022 in den Bereich der Simulation sind aktuelle Schwerpunkte die Materialmodellauswahl, Materialcharakterisierung und Materialkartenerstellung für Polymerwerkstoffe in der Struktursimulation sowie die Verknüpfung der Ergebnisse aus unterschiedlichen Prozesssimulationen mit der Struktursimulation in Bezug auf die Materialeigenschaften im Bauteil.

Die Mitarbeit beim Buch entstand aufgrund einer gemeinsamen Projektarbeit und meiner Wertschätzung gegenüber Herrn Schmid für die erste Auflage dieses Buches, welche mir sehr geholfen hat, mich in kurzer Zeit in das Thema Lasersintern einzuarbeiten.

Inhalt

Vorwort	V
----------------------	----------

Der Autor	IX
------------------------	-----------

1 Einführung	1
---------------------------	----------

1.1 Fertigungstechnik	1
1.2 Additive Fertigung	2
1.2.1 Einsatzbereiche und Technologietreiber	3
1.2.2 Hauptgruppen der additiven Fertigung	5
1.3 Additive Fertigung mit Kunststoffen	8
1.3.1 Vat Photopolymerisation (VPP)	8
1.3.2 Material Extrusion (MEX)	10
1.3.3 Material Jetting Technology (MJT)	13
1.3.4 Powder Bed Fusion (PBF)	14
1.3.5 Vergleich additiver Fertigungsverfahren für Kunststoffe	18
1.4 Lasersintern (LS) mit Kunststoffen	20

2 Lasersintertechnologie	23
---------------------------------------	-----------

2.1 Maschinentechnologie	26
2.1.1 Maschinenkonfiguration	26
2.1.2 Temperaturführung	29
2.1.2.1 Wärmequellen	29
2.1.2.2 Oberflächentemperatur am Baufeld	30
2.1.2.3 Laserenergieeintrag, Andrew-Zahl (A_Z)	31

2.1.3	Pulverbereitstellung und Pulverkonditionierung	34
2.1.3.1	Interne und externe Pulverbereitstellung	34
2.1.3.2	Pulverzustand	35
2.1.4	Pulverapplikation.	35
2.1.4.1	Klinge und Pulverkassette	36
2.1.4.2	Rollenbeschichter	38
2.1.4.3	Kombinierte Beschichtungssysteme.	39
2.1.5	Optische Komponenten	40
2.1.5.1	Laserstrahlpositionierung	40
2.1.5.2	Fokuskorrektur.	41
2.2	Maschinenmarkt	42
2.2.1	Industrielle Lasersinteranlagen	42
2.2.1.1	Firma Electro Optical Systems – EOS (Deutschland)	44
2.2.1.2	Firma 3D-Systems (USA)	45
2.2.1.3	Firma Farsoon Technologies (China)	46
2.2.1.4	Weitere Hersteller von LS-Anlagen.	47
2.2.2	Technikums- sowie Forschungs- und Entwicklungsanlagen	50
2.2.2.1	Anlagen mit CO ₂ -Laser.	51
2.2.2.2	Anlagen mit Laserdioden.	52
3	Lasersinterprozess	54
3.1	Prozesskette	54
3.1.1	Pulverbereitstellung.	55
3.1.2	Datenvorbereitung und Baujob.	57
3.1.3	Bauprozess	59
3.1.3.1	Aufheizen	60
3.1.3.2	Prozessablauf	60
3.1.3.3	Teile- und Baukammerparameter	64
3.1.3.4	Belichtungsstrategie.	65
3.1.3.5	Abkühlen und Auspacken	67
3.1.4	Prozessfehler	68
3.1.4.1	Deformation der Teile.	69
3.1.4.2	Oberflächendefekte: Orangenhaut	70
3.1.4.3	Weitere Prozessfehler.	71

3.2	Qualifizierung für die industrielle Serienproduktion	73
3.2.1	Produktbezogene Prozesse	76
3.2.1.1	Pre-Prozess	78
3.2.1.2	In-Prozess	83
3.2.1.3	Post-Prozess	86
3.2.1.4	Prozessvalidierung	87
3.2.2	Funktionsbezogene Prozesse	88
3.2.2.1	Materialmanagement	88
3.2.2.2	Qualifizierung der Lasersintermaschine	92
3.2.2.3	Qualifizierung des Lasersinterprozesses	96
3.2.3	Stand der Normung	97
4	Lasersinterwerkstoffe: Polymereigenschaften	106
4.1	Polymere	106
4.1.1	Polymerisation	107
4.1.2	Chemische Struktur (Morphologie)	109
4.1.3	Thermisches Verhalten	110
4.1.4	Polymerverarbeitung	112
4.1.5	Viskosität und Molekulargewicht	113
4.2	Schlüsseleigenschaften von LS-Polymeren	115
4.2.1	Thermische Eigenschaften	116
4.2.1.1	Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK/DSC)	116
4.2.1.2	Kristallisation und Schmelzen (Sinterfenster)	118
4.2.1.3	Wärmekapazität (c_p) und Enthalpie (ΔH_K , ΔH_m)	123
4.2.1.4	Wärmeleitfähigkeit und Wärmestrahlung	124
4.2.1.5	Modellierung der Abläufe im Sinterfenster	125
4.2.2	Rheologie der Polymerschmelze	127
4.2.2.1	Schmelzviskosität	127
4.2.2.2	Oberflächenspannung	133
4.2.3	Optische Eigenschaften	135
4.2.3.1	Absorption	136
4.2.3.2	Transmission und (diffuse) Reflexion	137

5 Lasersinterwerkstoffe: Polymerpulver141

5.1	Lasersinterpulverherstellung	142
5.1.1	Emulsions-, Suspensions- und Lösungspolymerisation	142
5.1.2	Ausfällen aus Lösungen	143
5.1.3	Mahlen und mechanisches Zerkleinern	144
5.1.4	Schmelzemulgieren	145
5.1.5	Lasersinterpulverherstellung im Überblick	146
5.1.6	Weitere Pulverherstellverfahren	148
5.2	Lasersinterpulvereigenschaften	151
5.2.1	Pulverdichte	151
5.2.1.1	Partikelform und -oberfläche	154
5.2.1.2	Partikelgrößenverteilung (Anzahl- und Volumenverteilung)	156
5.2.2	Pulverrheologie	160
5.2.3	Messung der Pulverfließfähigkeit	161
5.2.3.1	Hausner-Faktor (H_R)	163
5.2.3.2	Rotationspulveranalyse	166
5.2.3.3	Fließhilfsmittel	168

6 Lasersinterwerkstoffe: kommerzielle Materialien171

6.1	Polyamide (Nylon)	176
6.1.1	Polyamid 12 (PA 12)	177
6.1.1.1	Partikelgrößenverteilung und Partikelform	178
6.1.1.2	Thermische Eigenschaften	181
6.1.1.3	Kristallstruktur	186
6.1.1.4	Molekulargewicht und Nachkondensation	188
6.1.1.5	Pulveralterung	193
6.1.1.6	Eigenschaftskombination von PA 12	195
6.1.2	Polyamid 11 (PA 11)	196
6.1.3	Vergleich von PA 12 und PA 11	203
6.1.4	PA 12- und PA 11-Compounds	205
6.1.5	Flammhemmende Werkstoffe auf Basis von PA 12 und PA 11	208
6.1.6	Sonstige Polyamide (PA 6, PA 613, PA 1212)	209

6.2	Weitere Lasersinterpolymere	212
6.2.1	Thermoplastische Elastomere (TPU, TPA, TPC)	212
6.2.2	High-Performance-Polymere (PAEK, PPS)	214
6.2.3	Polyolefine (PP, PE)	216
6.2.4	Polyester (PBT, PET)	218
6.2.5	Duroplaste/Thermoset	219
7	Lasersinterbauteile	223
7.1	Bauteileigenschaften	224
7.1.1	Mechanische Eigenschaften	224
7.1.1.1	Kurzzeitbelastung: Zugversuch	225
7.1.1.2	Lasersinterbauparameter	227
7.1.1.3	Bauteildichte	228
7.1.1.4	Partielles Schmelzen (DoPM)	230
7.1.1.5	Anisotropie der Bauteileigenschaften	233
7.1.1.6	Langzeitbeständigkeit	236
7.1.2	Bauteiloberflächen	237
7.1.2.1	Einflussparameter	237
7.1.2.2	Rauheitsbestimmung	239
7.1.2.3	Oberflächenbearbeitung	240
7.1.2.4	Endbearbeitung/Finishing	242
7.2	Anwendungen und Beispiele	244
7.2.1	Prototypenbau und Kleinserien	246
7.2.2	Funktionsintegration	247
7.2.3	Stücklistenreduktion	249
7.2.4	Individualisierung und Personalisierung	251
7.2.5	Geschäftsmodelle und Ausblick	254
	Stichwortverzeichnis	257

■ 1.1 Fertigungstechnik

Als Fertigung oder auch als Produktion wird der Prozess bezeichnet, bei dem Teile, Güter oder Waren, allgemein Produkte genannt, hergestellt werden. Im Fertigungsprozess werden diese Produkte aus anderen Teilen (Halbzeug) erhalten oder aus Rohmaterialien geschaffen. Die Fertigung kann manuell, maschinell oder auch in gemischten, hybriden Prozessen erfolgen. Die verschiedenen Produktionstechnologien werden im Fachgebiet der Fertigungstechnik behandelt [1].

Gemäß DIN 8580 (Titel: *Verfahren zur Herstellung geometrisch bestimmter fester Körper*) werden die Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen unterteilt:

- **Urformen:** Ein fester Körper entsteht aus formlosen Stoffen (flüssig, pulverig, plastisch); der Zusammenhalt wird geschaffen z.B. durch Gießen, Sintern, Brennen oder Verbacken.
- **Umformen:** Formänderung eines Körpers durch bildsames (plastisches) Ändern, ohne dass die Werkstoffmenge geändert wird (z.B. Biegen, Ziehen, Pressen oder Walzen).
- **Fügen:** Zuvor getrennte Werkstücke werden in eine feste Verbindung überführt (z.B. Kleben, Schweißen oder Löten).
- **Trennen:** Änderung der Form eines festen Körpers; der Zusammenhalt wird orts aufgelöst aufgehoben (typischerweise abtragende Verfahren wie Schleifen oder Fräsen).
- **Beschichten:** Oberflächenveredelung aller Art (z.B. Lackieren, Verchromen usw.).
- **Stoffeigenschaften ändern:** Umwandlung durch Nachbehandlung (z.B. Härten).

Additive Fertigungsverfahren, bei denen Schicht für Schicht Materialien zu neuen Bauteilen zusammengefügt werden, können eindeutig den Urformprozessen zugeteilt werden und wurden dem entsprechend im neuesten Entwurf der DIN 8580 (2020) in Abschnitt 1.10 integriert.

■ 1.2 Additive Fertigung

Unter dem Begriff „Rapid Prototyping“ sind additive Fertigungstechnologien in der Industrie seit Langem bekannt. Breiten Einsatz findet Rapid Prototyping im Modellbau und in der Produktentwicklung in vielen Industriezweigen. Überwiegend ist das Ziel die schnelle und unkomplizierte Herstellung von Einzelteilen, kleinen Bauteilserien oder Funktions- und Designmustern zur Verkürzung von Entwicklungszyklen.

Was den Fachleuten in der Industrie also längst bekannt war, hat unter dem Titel „3-D-Drucken“ vor einigen Jahren einen medialen Hype ausgelöst, der diese Prozesse auch vermehrt in die öffentliche Wahrnehmung gebracht hat. Dabei ist oft der Eindruck entstanden, dass 3-D-Drucken als universelles und disruptives Fertigungsverfahren betrachtet werden kann, welches andere Fertigungstechnologien komplett ersetzen wird. Nach heutiger Einschätzung wird dagegen eher erwartet, dass sich die additive Fertigung in den Reigen der unterschiedlichsten, in der Industrie genutzten Fertigungstechnologien eingliedern wird und nur dann zum Einsatz kommt, wenn klare Kostenvorteile aus deren Anwendung erzielt werden können [2].

Im Kontext dieses Buchs wird generell von additiver Fertigung gesprochen, um auszudrücken, dass auf die Fertigung industrieller Bauteile fokussiert wird. Dies stellt keine Abwertung von Rapid Prototyping oder 3-D-Drucken dar, welche in ihren jeweiligen Anwendungsfeldern eine hohe Bedeutung genießen. Häufig werden die Begriffe additive Fertigung und 3-D-Drucken auch synonym verwendet. Eine eindeutige Abgrenzung ist nicht immer möglich.

Weitere zum Teil historische Begriffe, welche synonym für additive Fertigung verwendet werden oder wurden, sind: generative Fertigung, eManufacturing, additive Fabrikation, additive Schichtfertigung, Direct Digital Manufacturing (DDM), Festkörper-Freiform-Fertigung (FFF) und einige mehr. Zudem wird häufig speziell in der nicht wissenschaftlichen Literatur alles noch unter dem Begriff 3-D-Printing subsummiert. Mittlerweile hat sich aber die Bezeichnung additive Fertigung mehrheitlich durchgesetzt und ist durch die aktuelle Normierung definiert.

Additive Fertigung – Definition

DIN EN ISO/ASTM 52900 Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie ist die grundlegende Terminologie-Norm für die additive Fertigung (engl. additive manufacturing, AM). Die Norm definiert die wichtigsten Begriffe in diesem Zusammenhang. Zum Beispiel auch die additive Fertigung selbst

**Additive Fertigung**

Prozess des Verbindens von Werkstoffen, um Bauteile aus 3-D-Modelldaten, im Gegensatz zu subtraktiven und umformenden Fertigungsmethoden, üblicherweise Schicht für Schicht, herzustellen.

Prozesse der additiven Fertigung finden also Schicht für Schicht statt, sodass gelegentlich auch noch von Schichtbauverfahren gesprochen wird. Mit dieser Definition ist der schichtweise Aufbau der Objekte durch additive Fertigung festgelegt. Die Geometrie des Bauteils liegt als elektronischer Datensatz im Computer vor (3-D-Modelldaten), welcher die Entstehung des Bauteils direkt steuert (engl. direct digital manufacturing, DDM). Eine klare Abgrenzung zu den subtraktiven, zerspanenden oder trennenden Verfahren ist damit gegeben.

Die finalen Eigenschaften der Bauteile entstehen bei der additiven Fertigung in der Regel erst während der Herstellung. Die verwendeten Prozessparameter steuern in enger Verzahnung mit den Eigenschaften der Ausgangswerkstoffe die finalen Eigenschaften der Bauteile. Dies ist einer der wesentlichen Unterschiede der additiven Fertigung zu traditionellen, abtragenden Trennverfahren, bei denen die Bauteileigenschaften vor der Formgebung durch die ursprünglichen Materialeigenschaften des Halbzeugs bereits weitestgehend vorgegeben sind.

Dadurch, dass bei der additiven Fertigung die Bauteile schichtweise, sozusagen zweidimensional, entstehen, spielt die Komplexität der Teile in der dritten Dimension während des Entstehungsprozesses eine untergeordnete Rolle. Bauteile mit nahezu beliebiger Komplexität können so, ohne signifikanten Mehraufwand, während der Entstehung erzeugt werden. Einsatzbereiche, welche hochkomplexe Bauteile erfordern, sind daher für die additive Fertigung besonders prädestiniert und können als einer der Technologietreiber betrachtet werden.

1.2.1 Einsatzbereiche und Technologietreiber

Den AM-Verfahren ist als herausragendes Merkmal gemeinsam, dass sie ohne den Einsatz eines Werkzeugs auskommen, welches die Form des gewünschten Bauteils vorgibt. Aus der schichtweisen werkzeuglosen Formgebung ergeben sich viele Vorteile, welche für folgende Einsatzgebiete besonders geeignet sind und als Haupttreiber der AM-Technologie betrachtet werden können:

- ökonomische Produktion kleiner Bauteilserien (ab Losgröße eins und „on demand“),
- geometrische Freiheit in der Konstruktion (Freiformflächen, Hinterschnitte, Hohlräume),

- Bauteile mit Funktionsintegration (Scharniere, Gelenke, flexible Einheiten),
- Leichtbau (Gitterstrukturen mit hoher oder variierender Steifigkeit),
- Produktpersonalisierung (Medizintechnik, Sport),
- kurzfristige Produkthanpassungen (Verkürzung von Produktzyklen),
- ökologische Aspekte (reduzierter Materialverbrauch, Kreislaufwirtschaft),
- bionische Strukturen.

Typische Branchen, in denen die Vorteile der additiven Fertigung sehr gut zum Tragen kommen und gezielt eingesetzt werden können, sind: Konsumgüterindustrie, Automobil, Luft- und Raumfahrttechnik, Rüstungsindustrie, Medizinaltechnik, Elektronik, Möbelindustrie, Schmuckindustrie, Sportgeräteindustrie und Werkzeug- und Formenbau.

Einige bereits etablierte Geschäftsmodelle (personalisierte Bohrschablonen bei Operationen, individuelle Zahnprothetik, komplexe Möbelgleiter, neuartige Filtersysteme, Robotergriffe) belegen schon heute den wirtschaftlichen Einsatz der AM-Technologien.

Bild 1.1 zeigt schematisch, wo die additive Fertigung aus wirtschaftlicher Sicht traditionellen Produktionsmethoden überlegen ist.

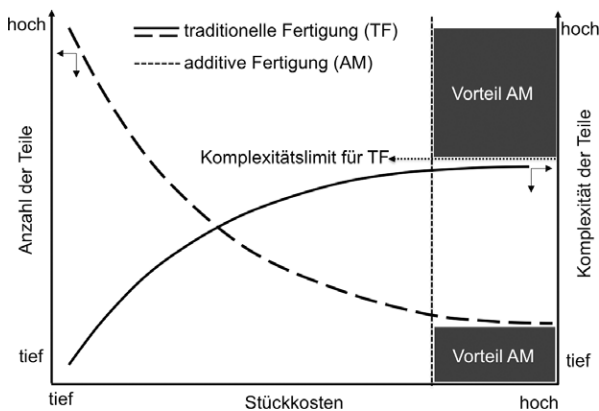


Bild 1.1 Stückkosten im Spannungsfeld zwischen Teilezahl und Bauteilkomplexität bei additiver und traditioneller Fertigung; AM ist in der Regel wirtschaftlich nicht für die Massenproduktion einfacher Bauteile geeignet.

Etablierte oder traditionelle Fertigungstechnologien (TF) sind häufig dahingehend optimiert, hohe Bauteilstückzahlen zu möglichst geringen Stückkosten zu produzieren. Mit der Anzahl der produzierten Teile nehmen die Stückkosten hier signifikant ab (Bild 1.1 – gestrichelte Linie). Gleichzeitig steigen bei TF die Stückkosten mit der Bauteilkomplexität deutlich an. Es wird in der Regel sogar ein Komplexi-

tätslimit erreicht, das herkömmliche Verfahren nicht oder oft nur unter der Erzeugung exorbitant hoher Kosten überwinden können (Bild 1.1 – durchgezogene Linien).

Hier liegen die Vorteile der additiven Fertigungsverfahren (graue Flächen in Bild 1.1). Zu nahezu unveränderten Stückkosten können entweder kleine Bauteilserien oder Bauteile mit erheblicher Komplexität gefertigt werden. Dies erfordert aber auch eine für die additiven Verfahren angepasste Konstruktion der Bauteile. Die Konstruktion wandelt sich von der

fertigungsgerechten Konstruktion in die funktionsgerechte Konstruktion!

Dieser Paradigmenwechsel bedeutet jedoch nicht, dass nun keinerlei Fertigungsregeln mehr zu beachten sind. Die Erfahrungen zeigen viel mehr, dass es auch bei der additiven Fertigung wichtig ist, fertigungsgerecht zu konstruieren. Im Vergleich zu den werkzeugbezogenen Fertigungsverfahren gelten aber andere Regeln, welche beträchtlich höhere Freiheitsgrade bei der Produktgestaltung gestatten.

Die Anpassungen in der Bauteilkonstruktion für die additive Fertigung greifen jedoch in die komplette Prozesskette der Teilefertigung ein. In Produktentwicklungsprojekten muss der geplante Fertigungsprozess deshalb zwingend bereits zu Beginn des Projektes eingebunden werden, um die Vorteile zu nutzen, welche additive Verfahren zur Teilefertigung bieten [3].

Die zielorientierte und bedarfsgerechte Anwendung der additiven Fertigung erfordert eine gute Übersicht und umfassende Kenntnis über die unterschiedlichen AM-Prozesse sowie deren jeweiligen Stärken und Schwächen. Zudem sind die AM-Verfahren meist an spezifische Materialklassen gebunden. Neben der Form und Art der Ausgangsmaterialien unterscheiden sich die additive Fertigungsverfahren ganz wesentlich in Bezug auf die zugrunde liegenden Prozessabläufe, nach denen heute die Einteilung nach AM-Hauptgruppen erfolgt.

1.2.2 Hauptgruppen der additiven Fertigung

Mit der fortschreitenden Normierung im Bereich der additiven Fertigung (siehe Abschnitt 3.2.3) sind aktuell sieben Hauptgruppen als wesentliche Prozesskategorien der additiven Fertigung definiert. Da die englischen Bezeichnungen dieser Hauptgruppen heutzutage wesentlich geläufiger sind als die deutschen Begriffe, wurden sie in der folgenden Aufzählung vorangestellt und werden im Kontext dieses Buchs mehrheitlich auch verwendet.

Die sieben folgenden Hauptprozesskategorien enthalten vielfach weitere Untergruppen, welche sich mehr oder weniger ausgeprägt in Prozessdetails unterscheiden können. Speziell bei den Powder Bed Fusion (PBF)-Prozessen ist es zusätzlich

noch sinnvoll, hinsichtlich Kunststoffverfahren (PBF-P) und Metallverfahren (PBF-M) zu unterscheiden.

- **Vat Photopolymerization, VPP** (dt. badbasierte Photopolymerisation)
 - SLA: Stereolithografie
 - DLP: Digital Light Processing
 - CDLP: Continuous Digital Light Processing
 - CLIP: Continuous Liquid Interface Production
- **Material Extrusion, MEX** (dt. Materialextrusion)
 - FFF: Fused Filament Fabrication
 - FGF: Fused Granulate Fabrication
 - AKF: Arburg Plastic Freeforming
- **Material Jetting Technology, MJT** (dt. Freistrah-Materialauftrag)
 - MJ: Material Jetting
 - DoD: Drop on Demand
- **Binder Jetting Technology, BJT** (dt. Freistrah-Bindemittelauftrag)
- **Powder Bed Fusion, PBF** (dt. pulverbettbasiertes Schmelzen)
 - Polymere
 - PBF-LB/P: laserstrahlbasiertes Schmelzen (Laser Sintering, LS)
 - PBF-IR/P: infrarotstrahlungsbasiertes Schmelzen (MJF, SAF, HSS)
 - Metalle
 - PBF-LB/M: laserstrahlbasiertes Schmelzen (Selective Laser Melting, SLM)
 - PBF-EB/M: elektronenstrahlbasiertes Schmelzen (EBM)
- **Directed Energy Deposition, DED** (dt. Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung)
 - LENS: Laser Engineered Net Shaping
 - EBAM: Electron Beam Additive Manufacturing
- **Sheet Lamination, SHL** (dt. Schichtlaminierung)

In Bild 1.2 sind die Verfahren der sieben Hauptklassen grafisch zusammengestellt. Die Verfahren, welche hauptsächlich mit Kunststoffen als Ausgangswerkstoff arbeiten, befinden sich in oberen Bereich der Darstellung. Darunter werden die Metallverfahren zusammengefasst. Die Sheet Lamination (SHL) und das Binder Jetting (BJT) lassen sich nicht eindeutig zu Metall- oder Kunststoffverfahren zuordnen. Speziell beim BJT können prinzipiell eine Vielzahl an unterschiedlichsten pulverförmigen Substraten verwendet werden. Sogar Schokoladenpulver wurde mit BJT bereits zu „Bauteilen“ verarbeitet.

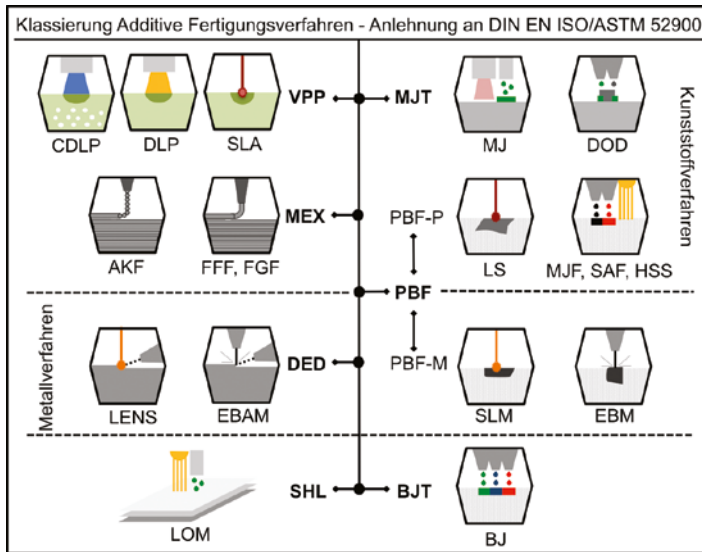


Bild 1.2 Überblick über die Hauptverfahrensklassen der additiven Fertigung in Anlehnung an DIN EN ISO/ASTM 52900; die hauptsächlich im Bereich der Kunststoffe eingesetzten AM-Verfahren sind in der oberen Hälfte zusammengefasst.

Generell wird die Einordnung in Hauptkategorien im Wesentlichen bezüglich der Unterschiede beim Zusammenfügen der jeweiligen Substrate vorgenommen und auf einzelne Materialklassen weniger Rücksicht genommen. Dies ergibt sich aus dem Umstand, dass sich mit dem jeweils gleichen Prozessansatz unterschiedliche Materialien wie Polymere, Metalle, Keramiken und Composites verarbeiten lassen.

Je nachdem, ob ein AM-Verfahren auf direktem Weg zum fertigen Bauteil führt oder über einen „Grünling“ als Zwischenschritt, kann noch zwischen direkten und indirekten AM-Verfahren bzw. einstufigen oder mehrstufigen Prozessen differenziert werden. Kunststoffe und Metalle sind nach wie vor als Hauptmaterialklassen der additiven Fertigung zu betrachten, wenn es um die **direkte Herstellung** von Endbauteilen mit additiver Fertigung für den industriellen Einsatz geht.

Bei den **indirekten AM-Verfahren**, hauptsächlich durch Binder Jetting (BJ) auf verschiedenste Substrate, durch Verarbeitung von Präpolymeren bei Photopolymerisationsverfahren (VPP, MJT) oder durch Compoundverarbeitung bei MEX-Prozessen, werden Endbauteile über den Umweg eines „Grünlings“ erhalten. Keramiken, anorganische Materialien, Faserverbundwerkstoffe und andere „Composites“ sind ebenso zugänglich. Hier werden häufig Polymere oder entsprechende Vorprodukte auch als Grünteilbinder eingesetzt.

Allgemein sind Kunststoffe in den verschiedensten Ausgangsformen aber die nach wie vor dominierende Werkstoffklasse in der additiven Fertigung von Industrieteilen und beim 3-D-Drucken [4]. Ein umfassender Überblick zu allen additiven Fertigungsverfahren mit Kunststoffen sowie der aktuell involvierten Firmen in den einzelnen Prozessfeldern findet sich bei der Firma AMPower [5].

■ 1.3 Additive Fertigung mit Kunststoffen

Was vor ca. 40 Jahren mit den ersten Arbeiten von Chuck Hull zur Stereolithografie begann, hat sich heute zu einem breit gefächerten Technologiespektrum mit unterschiedlichsten kunststoffbasierten additiven Prozessen entwickelt. Die wesentlichen AM-Verfahren, bei denen Kunststoffe zur direkten Herstellung von AM-Bauteilen eine zentrale Rolle einnehmen, sind (siehe Bild 1.2):

- Vat Photopolymerisation (VPP),
- Material Extrusion (MEX),
- Material Jetting Technology (MJT) und
- Powder Bed Fusion mit Polymeren (PBF-P).

1.3.1 Vat Photopolymerisation (VPP)

Den unter Vat Photopolymerisation (VPP) zusammengefassten Verfahren, Stereolithografie (SLA), Digital Light Processing (DLP) und Continuous Digital Light Processing (CDLP) liegt die Nutzung von energiereicher Strahlung (UV oder sichtbarem Licht) zur Herstellung von AM-Bauteilen zugrunde. Dies kann entweder punktuell durch einen UV-Laser erfolgen (SLA) oder über flächige Belichtung über Projektoren (DLP/CDLP) [6].

Dort wo die energiereiche Strahlung das Substrat, ein flüssiges/zähflüssiges Photopolymerharz, trifft, wird die Polymerisation gestartet und eine orts aufgelöste Aushärtung des Materials induziert. Die Harze bestehen meist aus komplexen Mischungen aktiver Komponenten auf Epoxy- oder (Meta-)Acrylatbasis und sogenannten Härtern (Alkohole und/oder Amine), d. h., es entstehen Elastomere oder Duomere während des Druckvorgangs. Durch Variationen in der chemischen Zusammensetzung der einzelnen Komponenten lassen sich die Eigenschaften der resultierenden Bauteile in einem weiten Bereich variieren und den Zielanwendungen anpassen. Die eigentliche Polymerisation wird durch einen Initiator gestartet, der bei der UV-Bestrahlung in Radikale zerfällt und eine Radikalkettenreaktion induziert.

Bei VPP entsteht durch kontinuierliches Zuführen neuer Harzlagen Schicht für Schicht ein Bauteil. Die Bauplattform, auf der das Bauteil entsteht, wird entweder schrittweise im Harzbad abgesenkt oder aus diesem herausgezogen. Da die VPP-Verfahren eine Flüssigkeit zum Herstellen von Objekten verwenden, gibt es während der Aufbauphase keine strukturelle Unterstützung durch das Material. Es muss also mit Stützstrukturen gearbeitet werden, wenn die Bauteile Überhänge, Hohlräume oder andere komplexe Strukturen aufweisen.

Üblicherweise zeichnen sich die VPP-Verfahren durch eine hohe Bauteilpräzision und sehr gute Bauteiloberflächen aus. Nachteil ist häufig eine ausgeprägte Sprödigkeit der Bauteile (Duromere) und eine geringe Langzeitstabilität aufgrund nicht vollständig umgesetzter Photoinitiatoren. Nachhärtungs- und Abbaueffekt induziert durch den UV-Anteil im Sonnenlicht können zur Desintegration der Bauteile führen. Die folgende Auflistung sowie Bild 1.3 fassen die wesentlichen Merkmale der einzelnen VPP-Verfahren zusammen.

Stereolithography (SLA)

Beim SLA-Verfahren wird das Material mithilfe eines UV-Lasers ortsauflöst ausgehärtet. Die Belichtung findet häufig von oben statt, wobei die punktgenaue Steuerung des Laserstrahls über Spiegelsysteme (Scanner) erfolgt. Durch diese Art der Belichtung sind große Bauteildimensionen möglich und es können mit den entsprechenden SLA-Druckern Bauteile sogar im Meterbereich erzeugt werden (z. B. Modelle von Armaturenrägern im Automobilbereich).

Ein neueres Verfahren, welches dem SLA zuzuordnen ist, ist die „Hot Lithography“ (Firma Cubicure). Hier wird die Prozesstemperatur deutlich über Raumtemperatur angehoben, was die Verarbeitung neuartiger SLA-Harze mit höherer Viskosität ermöglicht. Verbesserte Eigenschaften hinsichtlich Temperaturstabilität und mechanischer Eigenschaften sind durch diesen Prozess zu erwarten.

Digital Light Processing (DLP)

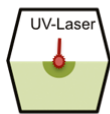
Beim DLP findet eine Flächenbelichtung mit Projektoren statt. Die Belichtung kann sowohl von oben als auch von unten durch einen speziellen Licht- und gegebenenfalls gasdurchlässigen Boden der Harzwanne erfolgen. Die Bauteildimensionen sind durch die Auflösung des Projektors vorgegeben und limitiert im Vergleich zu SLA. Deshalb werden DLP-Prozesse häufig für kleinere oder filigrane Bauteile, z. B. für Gussnegative im Schmuckbereich oder gitterförmige Strukturen mit kleinen lokalen Querschnittsflächen eingesetzt.

Continuous Digital Light Processing (CDLP)

Das CDLP ist eine Variante des DLP-Prozesses. Sehr bekannt wurde dieses Verfahren als Continuous Liquid Interface Production (CLIP) der Firma Carbon 3D. Hierbei wird der Effekt ausgenutzt, dass Sauerstoff (O_2) als Radikalfänger fungiert und die Photopolymerisation gezielt inhibieren kann (Quenchen). Gelingt es, wie im CLIP-Verfahren, die örtliche Kontrolle der Inhibierung sehr genau zu steuern, so ist eine signifikante Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit möglich. Die Bauteile können sozusagen frei im Photopolymerharz erzeugt werden, wenn Belichtungsebene und „Quenching-Zone“ sehr genau aufeinander abgestimmt sind. Die für diese Verfahren entwickelten Polymerharze weisen zudem häufig noch Komponenten auf, welche in

Nachbehandlungsschritten (engl. post processing) thermisch ausgehärtet werden können. Die Bauteile werden dadurch deutlich stabiler und kommen für technische Anwendungen im Langzeiteinsatz in Betracht. Die Bauteildimensionierung ist aber durch die Verwendung von Projektoren und den sich ausbildenden Unterdruck bei größeren Querschnittsflächen ebenso limitiert wie beim DLP-Prozess.

Vat Photopolymerisation (VPP)



Stereolithography (SLA)

UV-sensitive Präpolymere werden mithilfe eines UV-Lasers punktgenau ausgehärtet

Vorteile: hohe Präzision; sehr gute Bauteiloberflächen; große Bauteile möglich

Nachteile: Stützstrukturen, langsamer Prozess; Langzeitstabilität eingeschränkt



Digital Light Processing (DLP)

UV-sensitive Präpolymere werden mithilfe eines Projektors flächig ausgehärtet

Vorteile: hohe Präzision; gute Bauteiloberflächen; erhöhte Prozessgeschwindigkeit

Nachteile: Stützstrukturen; Bauteildimensionen und Langzeitstabilität eingeschränkt



Continuous Digital Light processing (CDLP / CLIP)

Belichtung von unten; gezielte Inhibierung der UV-Härtung durch Sauerstoffzugabe

Vorteile: hohe Präzision; gute Bauteiloberflächen; sehr hohe Prozessgeschwindigkeit

Nachteile: Stützstrukturen; Bauteildimensionen limitiert

Bild 1.3 Unterschiedliche Photopolymerisationsverfahren (VPP) zur Herstellung von Kunststoffbauteilen

1.3.2 Material Extrusion (MEX)

Die additive Fertigung mittels Material Extrusions (MEX) hat in den letzten Jahren sowohl material- als auch prozesstechnisch vielseitige Ausprägungen entwickelt und damit verschiedenste Anwendungsfelder erschlossen [7]. Das reicht von einfachen DIY-Printern für Heimwerker im Hausgebrauch bis zu Spezialverfahren, welche zum Extrudieren von faserverstärktem Beton und damit zum „Drucken“ ganzer Gebäude geeignet sind [8, 9].

Sehr große Bauteile, wie Karosserieteile für Fahrzeuge (z.B. Firma BigRap), lassen sich ebenso wie Mehrkomponenten- und endlos faserverstärkte Werkstücke (z.B. Firma Markforged) mit diesem Verfahren herstellen. Zudem sind mit MEX auch mit Metall- und Keramikpartikeln angereicherte Compositefilamente verarbeitbar, welche mit entsprechenden Nachbehandlungsschritten in reine Keramik- oder Metallteile umgewandelt werden können. Weitere Anwendungen der MEX-Technologie gehen auch in Richtung „Food Printing“ [10].

Wenn nicht verstärkte Kunststofffilamente zum Einsatz kommen, so spricht man häufig von Fused Deposition Modelling (FDM), ein Name den die Firma Stratasys für diese Verfahren eingetragen und geschützt hat, oder allgemeiner von Fused Filament Fabrication (FFF).

Fused Filament Fabrication (FFF)

Kunststoffe werden zum Einsatz für den FFF-Prozess üblicherweise als Filament auf eine Spule aufgewickelt und beim Abrollen im MEX-Drucker durch eine heizbare Düse geführt. Durch die korrekte Erwärmung über den Glaspunkt des Polymers haften die Filamente beim Ablegen des Strangs aufeinander und bilden bei richtiger Verarbeitung ein dreidimensionales Bauteil. Eine Unterart des FFF-Prozesses ist das Continuous Filament Fabrication (CFF)-Verfahren. Hier werden über einen zweiten Druckkopf Endlosfasern, z. B. Carbonfasern, parallel dem FFF-Druckprozess zugeführt, um steife und hochfeste Bauteile zu generieren.

Häufig beim FFF-Verfahren eingesetzte Kunststoffe wie ABS oder PLA sind amorph und weisen auch weit über dem Glaspunkt eine ausreichende Zähigkeit und Formstabilität auf, sodass die Herstellung dreidimensionaler Bauteile gelingt. Außerdem zeigen amorphe Werkstoffe beim Abkühlen kaum Schwund was die Dimensionsstabilität von FFF Bauteilen erhöht und Prozessfehler wie Verzug und Ablösen von der Bauplattform während des Baues vermeidet.

Ein Problem beim FFF-Prozess kann die mangelnde Schichthaftung sein, wenn die Temperatur während des Bauvorgangs zu weit absinkt und eine ausreichende Adhäsion zwischen den Filamentschichten nicht mehr gegeben ist. Um die Schichthaftung in FFF-Bauteilen zu verbessern, wird zum einen mit geschlossenen geheizten Bauräumen gearbeitet und zum anderen gibt es mittlerweile auch Ansätze, durch thermisch oder chemisch induzierte Reaktionen die Haftung an der Grenzfläche zwischen den einzelnen Filamenten zu verbessern. Es wird dann zwischen MEX-TRB (Thermal Reaction Bonding, TRB) und MEX-CRB (Chemical Reaction Bonding, CRB) unterschieden.

Auch werden beim FFF viele Ansätze verfolgt, teilkristalline Polymere, wie Polyamide (PA), Polyester (PET), oder auch Hochtemperaturwerkstoffe, wie Polyetheretherketon (PEEK), Polyetherimid (PEI) oder Polysulfon (PSU), prozesssicher verarbeiten zu können. Anwendungen z. B. in der Medizinaltechnik oder im Flugzeugbau versprechen hier großes Potenzial. Gefüllte oder faserverstärkte Filamente können verwendet werden, um Volumenänderung beim Kristallisationsvorgang gering zu halten und Bauteilverzug zu vermeiden.

Fused Granulate Fabrication (FGF)

Aufgrund der geringen Materialdurchsätze beim FFF-Prozess wurden zum „Drucken“ großer Bauteile Extruderköpfe entwickelt, welche direkt Mikrogranulate oder Standardgranulate von Kunststoffen verarbeiten können. Der zusätzliche Prozessschritt, die Herstellung von Kunststofffilamenten auf Spulen, wird dadurch eingespart. Auch gefüllte oder faserverstärkte Materialien können beim FGF vorteilhaft eingesetzt werden, was für eine gute Dimensionsstabilität essenziell ist. Es wird mit Düsen im Bereich von 2 bis 10 mm Durchmesser gearbeitet. Dadurch ergeben sich aber raue, wellige Oberflächen, die durch entsprechende Nachbe-

handlungsschritte in glatte Oberflächen überführt werden müssen (z.B. durch Überfräsen). Anwendungen für die schnell wachsende FGF-MEX-Variante finden sich im Formen- und Sportgerätebau sowie in der Möbelindustrie und bei großen Fahrzeugteilen.

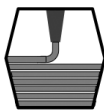
Arburg Plastic Freeforming (APF)

Eine MEX-Variation stellt das von der Firma Arburg entwickelte Kunststoff-Freiformen (AKF) dar. Anstatt Filamenten werden hier kleine Kunststofftropfen über piezogesteuerte Düsen kontinuierlich ausgestoßen (extrudiert). Die Materialdüsen sind ortsfest positioniert und die Bauplattform, auf der die Bauteile entstehen, kann in drei Raumrichtungen bewegt und positioniert werden. Durch den Einsatz mehrerer Düsen lassen sich gleichzeitig unterschiedliche Materialien verarbeiten, sodass Kombinationen unterschiedlicher Materialien (z.B. hart/weich) in einem Bauteil verknüpft werden können.

Der herausragende Vorteil des AKF-Ansatzes ist, dass prinzipiell mit Granulaten als Ausgangswerkstoff gearbeitet werden kann, welche für andere Kunststoffverarbeitungsprozesse (Spritzguss, Extrusion) bereits zur Verfügung stehen. Der aufwendige Zwischenschritt der Filamentherzeugung entfällt. Allerdings ist in der Realität der Einsatz von Standardgranulaten oftmals schwierig, da diese Werkstoffe mit allerlei Prozesshilfsmitteln versehen sind, welche beim AKF-Prozess stören können.

Ebenfalls sind gefüllte Werkstoffe aufgrund der Empfindlichkeit der hochpräzisen Extrusionsdüsen kaum zu verarbeiten. Nachteilig ist hier, wie auch bei den anderen MEX-Verfahren, die relativ langsame Prozessgeschwindigkeit beim Aufbau der Teile und der zwingende Einsatz von Stützmaterialien bei komplexen Strukturen. Bild 1.4 fasst die wesentlichen Elemente der MEX-Technologie für die Verarbeitung von Kunststoffen zusammen.

Material Extrusion (MEX)

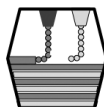


Fused Filament Fabrication (FFF), Fused Granulat Fabrication (FGF)

Kunststoffe werden in einer Düse erhitzt und strangweise aufeinander abgelegt

Vorteile: prinzipiell einfach (DIY) und breite Materialvielfalt

Nachteile: Bauteiloberflächen mäßig, Stützstrukturen; Einzelteile; langsamer Prozess



Arburg Kunststoff Freeformer (AKF)

Polymergranulate werden über eine piezogesteuerte Düse tropfenweise extrudiert

Vorteile: Kunststoffgranulate ab „Stange“; Multimaterialkombinationen (hart/weich)

Nachteile: Stützstrukturen erforderlich; Einzelteile; Aufbaurate sehr langsam

Bild 1.4 Materialextrusionsverfahren (MEX) zur Herstellung von Kunststoffbauteilen

1.3.3 Material Jetting Technology (MJT)

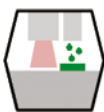
Die direkte Herstellung von Kunststoffbauteilen gelingt mit Material Jetting (MJ)- oder Drop-on-Demand (DOD)-Technologien (siehe Bild 1.5). Dabei handelt es sich prinzipiell um Druckprozesse analog zum traditionellen 2-D-Tintenstrahldruck. Zähflüssige Materialien werden aus digital gesteuerten Druckköpfen auf eine Bauplattform aufgetragen.

Handelt es sich bei den Druckmaterialien um UV-härtende Präpolymere (siehe Abschnitt 1.3.1, VPP-Prozess), so erfolgt eine unmittelbare Aushärtung der Tröpfchen nach der Deponierung durch im Druckkopf positionierte UV-Strahler (Photopolymerisation). Die Härtung nach dem Ablegen der Tröpfchen kann aber auch rein thermisch durch Abkühlen erfolgen, wenn es sich um niedrig schmelzende Substanzen wie Wachse handelt.

Grundvoraussetzung für die MJT ist immer eine gewisse Viskosität der Präpolymere, welche an die hochpräzisen Druckköpfe angepasst sein muss. Ist dies gegeben, ist das Verfahren grundsätzlich gut geeignet, auch mehrere Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaftsprofilen gleichzeitig zu verarbeiten. Die Herstellung von Bauteilen aus „Gradientenmaterial“, d. h. mit lokal angepassten Materialeigenschaften durch Anpassung des Mischverhältnisses der Ausgangsmaterialien direkt im Druckprozess, ist damit möglich. Generell ist MJ sehr vielseitig und generiert mit hoher Geschwindigkeit Bauteile mit sehr geringen Oberflächenrauheiten und hoher Maßgenauigkeit durch präzise Steuerung der Materialabscheidung.

Ein Nachteil beim MJ ist, wie bereits in Abschnitt 1.3.1 (VPP-Verfahren) für UV-härtende Systeme thematisiert, eine gewisse Sprödigkeit der Bauteile (Duromere) und eine geringe Langzeitstabilität (Nachhärtungs- und Abbaueffekt induziert durch den UV-Anteil im Sonnenlicht).

Material Jetting Technology (MJT)



Material Jetting (MJ)

Präpolymertropfen werden mit einem Druckkopf abgelegt und mit UV-Lampe gehärtet

Vorteile: hohe Präzision; sehr gute Bauteiloberflächen; Multimaterialverarbeitung

Nachteile: Stützstrukturen; Langzeitstabilität eingeschränkt



Drop on Demand (DOD)

Polymere (Wachse) werden mit einem Druckkopf abgelegt und thermisch gehärtet

Vorteile: hohe Präzision; gute Bauteiloberflächen; vorwiegender Einsatz Gusskerne

Nachteile: Stützstrukturen; thermisch labile Bauteile

Bild 1.5 Material-Jetting-Technologien zur Herstellung von Kunststoffbauteilen

Stichwortverzeichnis

Symbole

3D-Systems 25, 45
3MF 58
6-Aminohexancarbonsäure 176
 α -triklin 204
 α - und γ -Form 186
 γ -Kristallstruktur 186

A

A-A/B-B-Polyamide 176
Abbruch des Bauprozesses 68
Abkühlen eines LS-Baus 123
Abkühlen und Auspacken 67
Abkühlphase 55
Ablenkgeschwindigkeit des Laserstrahls 32
A-B-Polyamide 176
Abrundung der Partikel 145
Abschätzung der LS-Prozessfähigkeit von Pulvern 162
Absorptionskoeffizient (ε) 136
Absorption, Transmission und Reflexion im Schmelzbereich 138
Absorption von Strahlung 136
additive Fertigung 2
Advanced Laser Materials (ALM) 206
Agglomeration 161
aktive Kettenenden 108
AMF 58
AM-Geschäftsmodelle 254
Amidgruppe 176
Amidierung 108

Amingruppe 176
amorph 109
AM-Standardisierungsaktivitäten 99
AM-Standards 98
Andrew-Zahl (A_z) 31, 65
Anisotropie der Bauteileigenschaften 233
Aspect 47
Aspektverhältnis 154, 158
ASTM F42 97
Asymmetrie beim Schmelzen 183
Aufbau einer LS-Maschine 26
Aufheizen 60
Auftrieb 228
Ausfällen aus Lösungen 143
Ausschussteile 68
Auswirkungen der Nachkondensationsreaktion 193
Automobilflüssigkeiten 237
Automotive 244

B

Balling-Effekt 134
Bauhöhe in Z-Richtung 72
Baujob 54, 57
Baukammerparameter 64
Baukavität 29
Bauprozess 59
Bauraumtemperatur 61
Baureste 55
Bauteildaten 21
Bauteildichte , 127

Bauteileigenschaften 224
 Bauteiloberflächen 237
 bauteilumgebendes Pulver 124
 Bauteilverzug 69
 Belichtung der Pulveroberfläche 66
 Belichtungsstrategie 65
 Belichtungsvektoren 65
 berührungslose optische Messtechniken 239
 Beschichten 242
 Bestimmung
 – der Viskositätszahl 132
 – des Sinterfensters 117
 Bestimmung der Pulverfließfähigkeit 162
 BET-Methode 156
 B.F. Goodrich 171
 Bindenähte 43
 Blendwerkstoffe 235
 Bohrschablonen , 4
 Brillenmodelle 243
 Bruchdehnung , 121, 191, 204
 Businessmodelle 254

C

Caprolactam 176
 CarbonMide 235
 Carboxylgruppe 176
 CEN/TC 438 97
 Charakterisierung der Oberflächen 156
 chemische Bindungen 106
 chemische Struktur (Morphologie) 109
 Commodities 175
 Computertomografie (CT) 149, 229
 Curling 69

D

Dampfphase 241
 Datenqualität 21
 Deformation der Teile 69
 degree of particle melted 122
 Designfreiheit 244
 diffuse Reflexion 137
 DIN SPEC 99
 DIN SPEC 17028 101

DIN SPEC 17071 102
 DMA 237
 Doppelklinge 36
 dry blends 178, 205
 DTM (Desktop Manufacturing, DTM) 171
 Duktilität 204
 Duraform 177, 207, 235
 – HST 207, 235
 – PA 133, 177
 Duroplaste 106
 dynamische Differenzkalorimetrie (DDK/
 DSC) 116

E

eGrip 253
 Eigenschaften für LS-Polymere 115
 Eigenschaftskombination von PA 12 195
 Eigenschaftsmatrix der LS-Werkstoffe 236
 Eindringtiefe der Strahlung 137
 Einfärben von LS-Bauteilen 242
 Eingangskontrolle 161
 Einzelklinge 36
 Elastomere 106
 elastomere Werkstoffe 212
 Electro Optical Systems (EOS) 25, 44
 elektrische Leitfähigkeit 242
 Elektronik 244, 254
 elektrostatische Abschirmung 242
 E-Modul 191
 Emulsions- und Suspensionspolymerisation 142
 Endbearbeitung 242
 Endgruppen 191
 Energieaufnahme 33
 Engineering Polymers 175
 Entwicklungsgeschichte der LS-Technologie 24
 EOSint P 800 45
 EOSINT P 800 215
 Ether- und Ketogruppen 215
 extrinsische Eigenschaften 116
 Extrusionsbedingungen 146

F

fachgerechte Konstruktion 234
 Fahrzeuge und Mobilität 254
 Fällungsprozess 143
 – aus ethanolischer Lösung 143
 falsche Teilepositionierung 69, 70
 FAR-25 (25.853) 208
 Farben 243
 Farbsättigung 229
 Farb- und Lichtechtheit 243
 Farsoon Technologies 46
 Fasern 178
 Fasersorten 205
 Feinpartikel 160
 Feinstaub 57
 fertigungsgerechte Konstruktion 5
 Fertigungstechnik 1
 Fest-Flüssig-Zustand 126
 Feuchtigkeit 35, 207
 Finish-Ergebnis 241
 Finishing 242
 Finish-Prozesse 68
 Flächendeckung 154, 158
 flammhemmende Werkstoffe 208
 Fließfähigkeit von Pulvern 161
 Fließpunkt der Polymere 112
 Fließpunkt (T_f) 111
 Fließ- und Rieselfähigkeit 157
 fluidisierte Höhe 167
 Fluidisierung 37
 Flüssigstickstoff 144
 Fokusebene 41
 Fokuskorrektur 41
 Form der Partikel 158
 Formfaktoren der Hohlräume 229
 Forschungs- und Entwicklungsanlagen 50
 Frischpulver 29
 F-Theta-Linse 41
 funktionelle Endgruppen 108
 funktionsgerechte Konstruktion 5
 Funktionsintegration 4, 247

G

Gebrauchtpulver 56
 Gegenüberstellung mechanischer Kennwerte 226
 Gelbildung 194
 Gel-Permeations-Chromatografie (GPC) 132
 GelSight 239
 geometrische Freiheit , 3
 Geschäftsmodelle 4
 Gewinde 59
 Gibbs-Thomson-Gleichung 187
 Glaskugeln 178, 205
 Glaspunkt (T_g) 110
 glatte Oberflächen 59
 Gleichgewichtsreaktionen 189
 Gleichgewichtszustand 35, 189
 Gleitschleifen 241
 GPC-Messung 190
 Gravitation 133
 Greiferfinger 253
 Grilamid® L20G 181
 große Flächen 59
 Gruppen- oder Deformationsschwingungen 136

H

halogenhaltige Flammenschutzwerkstoffe 209
 Hampel-Schätzer 164
 Handarbeit 240
 Hartsegment 106
 Hausner-Faktor 161, 163
 Hautkontakt 243
 Heiz- und Kühlraten 119
 Herstellung der LS-Pulver 142, 146
 Hinterschnitte 244
 Hitze- und UV-Belastungen 193
 hochporöse Pulver 156
 Hohlkugeln 149
 Hohlräume 59, 153, 228, 244
 homogene Bauteileigenschaften 230
 homogene LS-Bauteile 230
 homogene Partikelgrößenverteilung 180

homogene Teileverteilung 59
 Homogenisierung der Schmelze 122
 Hörgeräte 251
 hydrolyseempfindliche Polymere 130

I

individualisierte Industriegreifer 253
 Individualisierung 251
 industrielle Lasersinteranlagen 42
 Infrarotspektrum 136
 inhomogene Kristallisation 67
 Initiator 142
 innere Spannung 126
 intrinsische Eigenschaften 116
 ionische Polymerisation 107
 IR-Strahler 30
 ISO 17296-2 101
 ISO 17296-3 103
 ISO 27547-1 103
 ISO/ASTM 52901 103
 ISO/ASTM 52902 101
 ISO/ASTM 52910 101
 ISO/ASTM 52911-2 102
 ISO/ASTM 52915 101
 ISO/ASTM 52920 101
 ISO/ASTM 52921 101
 ISO/ASTM 52924 103
 ISO/ASTM 52925 102
 ISO/ASTM 52930 102
 ISO/ASTM 52936-1 103
 ISO/ASTM 52950 101
 ISO TC 261 97
 isotherme Koaleszenz 133
 isothermes Lasersintern 176
 isotrope Bauteileigenschaften 66
 Isotropie der Bauteile 120

K

Kalibrierung 30
 Kegel-Platte-Rheometer 127
 Kerntemperatur des Pulverkuchens 67
 Kettenbrüche 193
 Kettenwachstum 108

kinetische Energie 144
 Klinge und Pulverkassette 36
 Koaleszenz 61
 Koaleszenz von Duraform 133
 kohäsiv 160
 kommerzielle Materialien 171
 Komplexität , 5
 konkave Krümmung 37
 Kontrolle des Pulverzustands 56
 Kontur der Oberfläche 239
 Korngrößenverteilung 156
 Korrekturlinse 41
 kovalente Verknüpfungen 106
 Kriechverhalten 237
 Kristallinitätsgrad 109
 Kristallisation 60, 118
 Kristallisation im LS-Prozess 120
 Kristallisationsenthalpie (ΔH_K) 123, 185
 Kristallisationshilfen 122
 Kristallisationskeime 230
 Kristallisationskinetik 125
 Kristallisationspunkt (T_K) 185
 Kristallisationsverhalten im LS-Prozess 122
 Kristallitgröße 121
 Kristallstruktur 186
 kryogenes Mahlen 144
 Kunststoffmesszylinder 164
 Kunststoffpyramide 174
 Kurzzeitbelastung, Zugversuch 225

L

Lackieren 242
 Lackrohstoffe 143
 lambert-beersches Gesetz 136
 Lamellendicke (l_c) 188
 Langzeitbeständigkeit 236
 Laserbeugungsverfahren 158
 Laserenergieeintrag 31
 Laserfenster 27
 Laserleistung 32
 Lasermodul 26
 Lasersintern (LS)
 – Bauparameter 227

- Bauteile 223
- Compoundwerkstoffe 205
- Materialportfolio 21
- Prozess 54
- Prozessfähigkeit 179
- Prozessfehler 71
- Prozesskette 20
- Prozessstabilität 183
- Sinterfenster 120
- Verfahren 23
- Laserspot 41
- Laserspurabstand 32
- Laserstrahlpositionierung 40
- Laurinlactam 177, 189
- Lawinenwinkel 167
- lebende anionische Polymerisation 142
- Leichtbaustrukturen 244
- lichtmikroskopische Analysen 158
- Lifestyleprodukte 243
- Lifestyle und Mode 254
- Linearisierung der Polymerknäuel 113
- Lösemittel 241
- Luft- und Raumfahrtindustrie 244, 254
- Lunker 228

M

Mahlen 144

Marktanteile 174

Maschinenkonfiguration 26

Maschinenmarkt 42

Maschinentechnologie 26

Maschinen- und Werkzeugindustrie 254

Massachusetts Institute of Technology 239

Matrixpolymer 146

maximale Rauheit (R_z) 238

maximale Zugfestigkeit 225

mechanische Eigenschaften 224

mechanisches Zerkleinern 144

Medizintechnik 244

Medizin/Zahnmedizin 254

Mehrzonenheizung 29

melt flow index (MFI) 130

melt volume rate (MVR) 130

Metallpulver 178, 205

Metall- und Nichtmetalloxide 137

metastabil 118

Mikroskop mit Heitzisch 133

Militär 254

mittlere Rauheit (R_a) 238

mittleres Molekulargewicht 113, 114

Möbelindustrie 244

Modellierung der Abläufe im Sinterfenster 125

Model von Frenkel/Eshelby 133

Molekulargewicht (M_w) 113, 132, 188, 191

Molekulargewichtsverteilung 132

Molmasse 109

monokline (pseudohexagonale) Symmetrie 186

Morphologie 109

Muster-/Prototypenbau 246

MVR-Kontrollpunkte 56

MVR-Messung 130

MVR/MFI-Wert 130

N

Nachbearbeitung 68

Nachkondensation 128, 188, 192

- PA 12 in fester Phase 189

Nachkondensationsreaktion 189

Nadelspitze 239

Namen der Polyamide 176

Nebenvaleanzkräfte 177

Neupulver 56

newtonsche Flüssigkeit 128

nicht-isotherme Kristallisation 120

Normenkomitees auf Länderebene 98

Normung 97

Normungsgremien (ASTM, ISO, CEN) 97

Nullviskosität 113, 127

numerische Simulation 125

Nylon (= Polyamid) 172

O

Oberfläche des Baufelds 61

oberflächenaktive Substanzen 134

- Oberflächenbearbeitung 240
- Oberflächendefekte 70
- Oberflächenfraktalwert 167
- Oberflächenheizung 60
- Oberflächenqualität 22
- Oberflächenrauigkeit 155
- Oberflächenrauigkeit der LS-Bauteile 180
- Oberflächenspannung 113, 127, 133
- Oberflächentemperatur 30, 31
- Ofenalterung 193
- ökonomische Produktion 3
- Oligomere 132
- Onset des Schmelzens 120
- optische Eigenschaften 135
- optische Komponenten 40
- Orangenhaut 70, 71
- Orgasol® Invent Smooth 142, 143, 177
- Overflow-Pulver 55
- Oxidation 29, 67
- oxidative Abbaureaktionen 193

- P**
- PA 12-Basispulver 178
- PA 12-LS-Neupulver 55
- PA 12-Pulver mit Kohlefaser 205
- PA 12- und PA 11-Compounds 205
- Packungsdichte 55
- Packungsdichte der Pulver 157
- Parametersätze 64
- Partialdruckdifferenz 189
- partielle Baufeldschmelze 72
- partiell Schmelzen 230
- Partikelfeinanteil 145, 161, 180
- Partikelgeometrie 153
- Partikelkoaleszenz 134
- Pendant-Drop-Methode 133
- physikalische Netzpunkte 106
- Platte-Platte-Viskosimeter 128
- Polieren 242
- Polyamid 6 (PA 6) 209
- Polyamid 11 (PA 11) 196
- Polyamid 12 (PA 12) 177
- Polyamide (Nylon) 176
- Polycarbonat (PC) 113, 171
- Polydispersitätsindex (PDI) 132
- Polyetherketon (PEK) 215
- Polykondensationsreaktion 108
- Polymereigenschaften 106
- Polymerisation 107
- Polymerketten mit offenen Kettenenden 189
- Polymerpulver 141
- Polymer- und LS-Markt im Vergleich 174
- Polymerverarbeitung 112
- Polymethylmethacrylat, PMMA 113
- Polymorphie 186
- Polyphosphinate 209
- Polyvinylchlorid (PVC) 171
- Poren 229
- Porositätsbestimmung 229
- powder shape 158
- Pressluft 68
- Primärzustand 112
- Prinzip von Le Chatelier 108
- Produktionstechnologie 54
- Produktpersonalisierung 4
- professionelle Nachbearbeitung 242
- ProX™ 500 25
- Prozessablauf 60
- Prozessadditive 143
- Prozessfehler 68
- Prozesskammer 29
- Prozesskette 5, 54
- Prozesskontrolle 223
- Prozessschema für das LS-Verfahren 55
- Prozesssteuerung 125
- Prozessstauglichkeit der Pulver 181
- Prozesstemperatur 126
- Pulveralterung 193
- Pulverauftrag 35
- Pulverbereitstellung 34, 55
- Pulverdichte 39
- Pulverfließfähigkeit 36
- Pulverfluss im LS-Prozess 56
- Pulvergrobanteil 157
- Pulverkonditionierung 35
- Pulverkuchen 67
- Pulverlacke 141
- Pulvermischung 55

Pulververhalten 154
Pulververklumpung 72
Pulververteilung 160, 178, 179
Pulverzufuhr „short-feed“ 72
Pulverzustand , 56
Push™ Process 241
pyrogene Kieselsäure 168

Q

quaderförmige Bauräume 233
Qualifizierung
– industrielle Serienproduktion 73
Querkontamination 57

R

radikalische Polymerisation 107
Rasterelektronenmikroskop 149
Rauheitsbestimmung 239
Rauheitsparameter 239
Raumorientierung 234
Raumrichtungen 233
raumrichtungsabhängige Bauteileigenschaften 234
Recycling 194
Reflexion 135
Reflexionsmessung 137
RESS-Verfahren 150
Restkristallinität 231
Restmonomergehalt 132
Restporosität 230
Rheologie der Polymerschmelze 127
Richtungsorientierung und Bauteilbenennung 234
ringöffnende Polyaddition 177
Ringversuch 164
Rissauslösung 228
Risse im Pulverbett 72
Robotergreifer 4
RoHS-Richtlinie 208
Rollenbeschichter 38
Röntgenbeugungsreflexe (WAXS) 187
Röntgenstrukturanalyse 186
Rotationsgeschwindigkeit 167

Rundheit 154
Rüstungsindustrie 244
Rütteleffekt 152

S

schematischer Aufbau von Polymeren 107
Scherung 113
Schichtbauverfahren 3
Schichtdelamination 72, 192
Schichtgrenzen 121, 192
Schichthaftung 192
Schichtverbindung 122
Schichtzeiten 59
Schlagfestigkeit 121
Schlagzähigkeit 204
Schleiss RPTech 57
Schmelzen 118
Schmelzen im LS-Prozess 122
Schmelzenthalpie (ΔH_m) 123
Schmelzfließfähigkeit 56
Schmelzflussindex 130
Schmelzpunkt (T_m) 61, 110
Schmelzspinnen 148
Schmelzviskosität 70, 127
Schmuckindustrie 244
Schnappfunktionen 59
Schütt- und Stampfdichte 163
Schutzgas 59
Sedimentationszeit 167
Sekundärverarbeitung von Kunststoff 112
Serienteile 223
sichtbare Laserscanlinien 237
Siebanalyse 157
Simulation
– LS-Prozesse 123
– thermische Abläufe 127
– Verfestigungsgrade 126
Sinterfenster des Polymers 118
Sinterhülse 112
Sinterline 210
SinterStation 24
Sinterzyklus 61
Sollbruchstellen 228

Sondermaterialien 64
 Spann- und Greiftechnik 253
 spezifische Oberfläche 156
 Sphärizität 143, 154, 155, 180
 Sphärolithgrenzen 121
 sphärolithische Kristallstrukturen 120
 Spiegelpositionen des Scankopfs 65
 Sport- und Rennsporteinatz 206
 Sprödbbruch 225
 Sprühtrocknung 149
 Stabilisatoren 193
 Standardabweichung 164
 Staubpartikel 26
 Stereolithografie 8
 Stickstoff 35
 STL-File 58
 Störung der molekularen Ordnung 185
 Strahlengang 40
 Streckspannung 121
 Streifenbildung 72
 Streuphänomene 135
 strukturviskose Körper 113
 strukturviskoses Verhalten 128
 Stückkosten 5
 Stücklistenreduktion 249
 Stufenreaktion 107
 Stufenwachstumsreaktion 108
 Stützstrukturen 58
 Sublimation 209

T

taktile/berührende Messung 239
 Taktizität 109
 Tangentialgeschwindigkeit 38
 Technologietreiber 3
 Teilekollisionen 59
 Teilevergilbung 72
 Teilezusammenstellung (Baujob) 58
 teilkristallin 109
 Temperaturführung 29
 Temperaturkontrolle 29
 Temperatursprung in der Laserspür 119
 TGA-Messkurve 207
 thermische Belastung 194

thermische Eigenschaften 116, 181
 thermischer Gleichgewichtszustand 60
 thermischer Schock 60
 thermisches Verhalten 110
 thermische Übergänge amorpher und teil-
 kristalliner Polymere 111
 Thermogravimetrie (TGA) 206
 thermooxidative Schädigung 144
 thermoplastische Elastomere (TPE) , 106
 Thermowaage 206
 Titandioxid (TiO₂) 137
 Translationsgeschwindigkeit 38
 Transmission 136, 137
 Treppenstufeneffekt 238
 Trockenmischungen 178, 205
 Tröpfchen-Matrix-Morphologie 145
 Tropfenextrusion 10
 Trowalisieren 241

U

Überhitzung von einzelnen Schichten 69
 Überlappung der Laserspuren 65
 Ulbricht-Kugel 137
 Umwandlungen erster Ordnung 117
 Universität Austin (TX) 24, 171
 unkontrolliertes Teilwachstum 72
 unterkühlte Schmelze 128
 unversintertes Pulver 55
 Urformen 1
 Urformverfahren 227

V

Variation bei der Belichtung 66
 Variation der Laserenergie 231
 VDI 3405 Blatt 1 103
 VDI 3405 Blatt 1.1 102
 VDI 3405 Blatt 6.2 102
 VDI 3405 Blatt 7 103
 VDI Statusreport „Additive Fertigungsver-
 fahren“ 244
 Verarbeitungstemperatur 110
 Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 98
 Veresterung 108

Verfahren der Universität Sheffield 241
Vergilbung der Oberflächen 67
Vergleichbarkeit (s_R) 164
Vergleich PA 12 und PA 11 203
Verlängerung der Polymerketten 191
Vermischung von Materialien 57
Vernetzung 106
Verteilungskurven von Pulvern 157
Vibrationen des Pulverbeschichters 237
viskoelastische Eigenschaften 128
Viskosität 113
Viskositätskurve 113, 127
vollständige Koaleszenz 112
Vorratspulver 34
Vorwärmphase 54

W

Wärmealterung 237
Wärmeformbeständigkeit 211
Wärmekapazität (c_p) 117, 123
Wärmeleitfähigkeit 124
Wärmequellen 29
Wärmestrahlung 124, 126
Wärmestrahlungseffekte 124
Warpage 69
wash-out 72
Wash-out-Effekte 237
Wasseraufnahme 210
Wasserdichtigkeit 242
Wasserstoffbrücken 177, 204
Weichmachergehalt 207
Weichsegmente 106
Weißpigment 137
Werkstoffauswahl 21
Werkstoffoptimierung durch Additivierung 235
Werkzeug 3
Werkzeugkühlung 122
Werkzeug- und Formenbau 244
wide-angle X-ray scattering, WAXS 186
Wiederholbarkeit (s_r) 164
Wiederholungseinheiten 191
Windform (I) 206

X

XYZ-Baurichtung 204

Z

Zahlenmittel des Molekulargewichts (M_n) 132
Zahnkorrekturen 251
Zahnprothetik 4
Zeitkonstante der Energieabsorption 33
Zersetzungspunkt T_z 111
zerstörungsfreie Bestimmung der Porosität 229
Zinkselenid (ZnSe) 27
Zirkularität 154, 158
Zugfestigkeit 121, 191
Zyklonabscheider 149