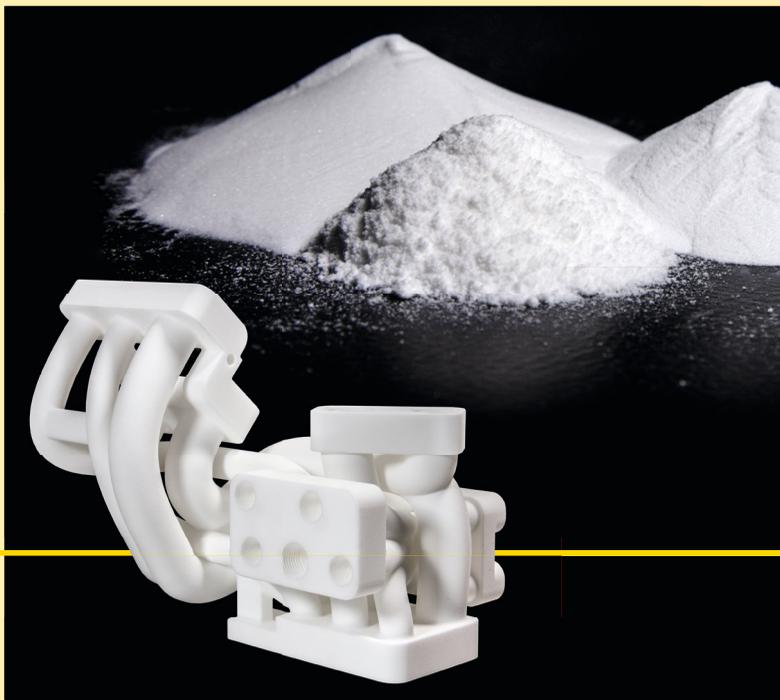


Manfred Schmid

# Lasersintern (LS) mit Kunststoffen

Technologie, Prozesse und Werkstoffe



2., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER





**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter [www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)

## **Die Internet-Plattform für Entscheider!**

**Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

**Richtungsweisend:** Fach- und Brancheninformationen  
stets top-aktuell!

**Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue  
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

***Kunststoffe.de***

Manfred Schmid

# **Lasersintern (LS) mit Kunststoffen**

Technologie, Prozesse und Werkstoffe

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag München

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Mark Smith

Herstellung: Cornelia Speckmaier

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Titelbild: mit freundlicher Genehmigung Rob Kleijnen, mit freundlicher Genehmigung irpd AG

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-46664-7

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

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

# 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 Strangablegeverfahren 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

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Der Autor</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
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
<b>2 Lasersintertechnologie</b> .....	<b>23</b>
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 <sub>2</sub> -Laser. . . . .	51
2.2.2.2	Anlagen mit Laserdioden. . . . .	52
<b>3</b>	<b>Lasersinterprozess . . . . .</b>	<b>54</b>
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
<b>4</b>	<b>Lasersinterwerkstoffe: Polymereigenschaften . . . . .</b>	<b>106</b>
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	Schlüsseigenschaften 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 ( $\Delta H_K, \Delta H_m$ ) . . . . .	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

<b>5</b>	<b>Lasersinterwerkstoffe: Polymerpulver</b> . . . . .	<b>141</b>
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
<b>6</b>	<b>Lasersinterwerkstoffe: kommerzielle Materialien</b> . . . . .	<b>171</b>
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
<b>7</b>	<b>Lasersinterbauteile .....</b>	<b>223</b>
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
	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>257</b>



## ■ 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. Überwiegendes Ziel ist 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, zerspannenden 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:

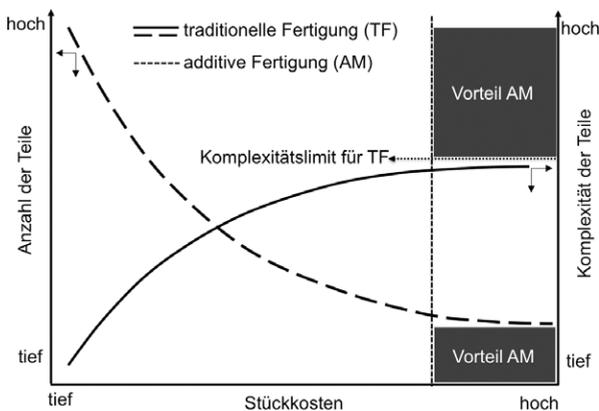
- ökonomische Produktion kleiner Bauteilserien (ab Losgröße eins und „on demand“),
- geometrische Freiheit in der Konstruktion (Freiformflächen, Hinterschnitte, Hohlräume),

- Bauteile mit Funktionsintegration (Scharniere, Gelenke, flexible Einheiten),
- Leichtbau (Gitterstrukturen mit hoher oder variierender Steifigkeit),
- Produktpersonalisierung (Medizintechnik, Sport),
- kurzfristige Produktpassungen (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, Automotiv, 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, Robotergreifer) 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**

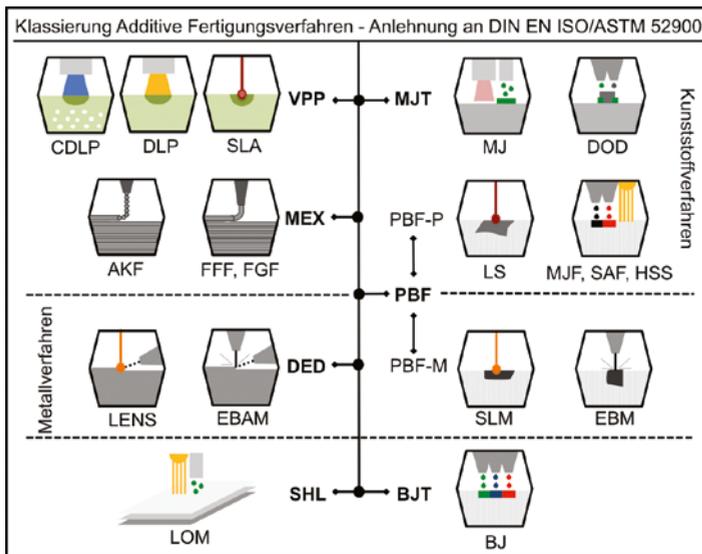
Mit der fortschreitenden Normierung im Bereich der additiven Fertigung (siehe Abschnitt 3.2.3) sind aktuell sieben Hauptgruppen als wesentliche Prozesskategorien der additiven Fertigung definiert. Da die englischen Bezeichnungen dieser Hauptgruppen heutzutage wesentlich geläufiger sind als die deutschen 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: Continous Digital Light Processing
  - CLIP: Continous 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 Industriebauteilen 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 ortsaufgelöste 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 Duromere 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 Bauplatzform, 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 orts aufgelöst 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)**

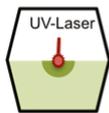
Beim DLP findet eine Flächenbelichtung mit Projektoren statt. Die Belichtung kann sowohl von oben als auch von unten durch einen speziellen Licht- und gegebenenfalls gasdurchlässigen Boden der Harzwanne erfolgen. Die Bauteildimensionen sind durch die Auflösung des Projektors vorgegeben und limitiert 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



#### Continous 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).