

Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen

Technologie, Prozesse und Werkstoffe

Bearbeitet von
Manfred Schmid

1. Auflage 2015. Buch. 200 S. Hardcover

ISBN 978 3 446 44562 8

Format (B x L): 17,3 x 24,8 cm

Gewicht: 609 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Produktionstechnik > Fertigungstechnik](#)

schnell und portofrei erhältlich bei


DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.



Leseprobe

Manfred Schmid

Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen

Technologie, Prozesse und Werkstoffe

ISBN (Buch): 978-3-446-44562-8

ISBN (E-Book): 978-3-446-44550-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44562-8>

sowie im Buchhandel.

Vorwort

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 Startups 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 Lasersinteranlagenherstellers 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

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 und Polymeranalytik. Polyamide und Biopolymere standen im Fokus der verschiedenen Tätigkeiten.

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

Die Schwerpunkte seiner aktuellen Tätigkeit liegen im Bereich neue Polymersysteme für den SLS-Prozess, der analytischen Bewertung solcher Materialien und der qualitativen und quantitativen Verbesserung des SLS-Prozesses. Er betreut mehrere Mitarbeiter und Forschungsprojekte in diesem Umfeld.

Als Gastdozent gibt er wechselnde Vorlesungen zum Thema Werkstoffkunde der Kunststoffe, Verarbeitungsprozesse von Polymeren und 3D-Drucken an der interstaatlichen Fachhochschule Buchs (Schweiz) und der Fachhochschule St. Gallen.

Die Idee zum vorliegenden Buch entstand aus mehreren internen Schulungen durchgeführt bei Inspire AG für große Industriefirmen zum Thema „Additive Manufacturing“.

Inhalt

Vorwort	V
Der Autor	VII
1 Einführung	1
1.1 Fertigungstechnik	1
1.2 Additive Fertigung	2
1.2.1 Einsatzbereiche/Technologietreiber	4
1.2.2 Kunststoffbasierte AM-Verfahren	6
1.2.3 Technologiereife	8
1.2.4 Selektives Lasersintern (SLS)	9
Literaturverzeichnis Kapitel 1	12
2 SLS-Technologie	13
2.1 Maschinentechnologie	15
2.1.1 Maschinenkonfiguration	15
2.1.2 Temperaturführung	18
2.1.2.1 Wärmequellen	18
2.1.2.2 Oberflächentemperatur im Bauraum	19
2.1.2.3 Laserenergieeintrag, Andrew-Zahl (A_Z)	20
2.1.3 Pulverzuführung	22
2.1.3.1 Pulverbereitstellung	23
2.1.3.2 Pulverauftrag	24
2.1.4 Optische Komponenten	28
2.2 Maschinenmarkt	30
2.2.1 3D-Systems (USA)	30
2.2.2 Electro Optical Systems – EOS (D)	31
2.2.3 Aspect (J)	33
2.2.4 Farsoon (CN)	34

2.2.5 Vergleich kommerzieller SLS-Maschinen	35
2.2.6 Weitere Maschinen	36
Literaturverzeichnis Kapitel 2	38
3 SLS-Prozess	39
3.1 Prozesskette	39
3.1.1 Pulverbereitstellung	40
3.1.2 Datenvorbereitung und Baujob	42
3.1.3 Bauprozess	44
3.1.3.1 Aufheizen	44
3.1.3.2 Prozessablauf	44
3.1.3.3 Teile- und Baukammerparameter	49
3.1.3.4 Belichtungsstrategie	50
3.1.3.5 Abkühlen und Auspacken	51
3.1.4 Prozessfehler	53
3.1.4.1 Deformation der Teile	54
3.1.4.2 Oberflächendefekte: Orangenhaut	55
3.1.4.3 Weitere Prozessfehler	57
3.2 Qualitätssicherung	58
3.2.1 Allgemeine Qualitätsmaßnahmen	58
3.2.2 Prüf- und Vergleichsteile	60
3.2.3 Qualitätskosten	61
3.2.4 PPM-Konzept (Fa. EOS)	61
3.2.5 Stand der Normung	62
Literaturverzeichnis Kapitel 3	65
4 SLS-Werkstoffe: Polymereigenschaften	67
4.1 Polymere	67
4.1.1 Polymerisation	68
4.1.2 Chemische Struktur (Morphologie)	70
4.1.3 Thermisches Verhalten	71
4.1.4 Polymerverarbeitung	73
4.1.5 Viskosität und Molekulargewicht	74
4.2 Schlüsseleigenschaften von SLS-Polymeren	76
4.2.1 Thermische Eigenschaften	77
4.2.1.1 Kristallisation und Schmelzen (Sinterfenster)	78
4.2.1.2 Wärmekapazität (c_p) und Enthalpie (ΔH_K , ΔH_m)	83
4.2.1.3 Wärmeleitfähigkeit und Wärmestrahlung	83
4.2.1.4 Modellierung der Abläufe im Sinterfenster	85

4.2.2	Rheologie der Polymerschmelze	87
4.2.2.1	Schmelzviskosität	87
4.2.2.2	Oberflächenspannung	89
4.2.3	Optische Eigenschaften	91
4.2.3.1	Absorption	92
4.2.3.2	Transmission und (diffuse) Reflexion	94
4.2.4	Partikel und Pulver	95
4.2.4.1	Pulverrheologie	96
4.2.4.2	Partikelgrößenverteilung	99
4.2.4.3	Pulverdichte	100
	Literaturverzeichnis Kapitel 4	103
5	SLS-Werkstoffe: Polymerpulver	105
5.1	Herstellung der SLS-Pulver	105
5.1.1	Emulsions-/Suspensionspolymerisation	106
5.1.2	Ausfällung aus Lösungen	107
5.1.3	Mahlen und mechanisches Zerkleinern	108
5.1.4	Coextrusion	109
5.1.5	Überblick: Herstellung der SLS-Pulver	110
5.1.6	Weitere Pulverherstellverfahren	112
5.1.6.1	Sprühtrocknung	112
5.1.6.2	Tropfenextrusion	113
5.1.6.3	Schmelzspinnen	113
5.1.6.4	RESS mit überkritischen Gasen	113
5.2	Bewertung des Pulverzustands	114
5.2.1	Thermische Analyse	115
5.2.1.1	Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK/DSC)	115
5.2.1.2	Thermogravimetrie (TGA)	115
5.2.2	Schmelzviskosität	117
5.2.2.1	Schmelzflussindex (MVR/MFI-Messung)	117
5.2.2.2	Molekulargewicht und Restmonomergehalt	119
5.2.3	Partikelform und Pulververteilung	120
5.2.3.1	Form und Oberfläche	121
5.2.3.2	Volumen- und Zahlenverteilung	122
5.2.4	Pulverrieselfähigkeit	123
5.2.4.1	Hausner-Faktor (HF)	125
5.2.4.2	Rotations-Pulver-Analyse	128
	Literaturverzeichnis Kapitel 5	129

6	SLS-Werkstoffe: Kommerzielle Materialien	131
6.1	Polyamide (Nylon)	135
6.1.1	Polyamid 12 (PA 12)	137
6.1.1.1	Pulververteilung und Partikel	138
6.1.1.2	Thermische Eigenschaften	140
6.1.1.3	Kristallstruktur	145
6.1.1.4	Molekulargewicht und Nachkondensation	147
6.1.1.5	Pulveralterung	152
6.1.1.6	Eigenschaftskombination von PA12	153
6.1.2	Polyamid 11 (PA 11)	155
6.1.3	Vergleich PA 12 und PA 11	156
6.1.4	PA 12- und PA 11-Compounds	158
6.1.5	Polyamid 6 (PA 6)	159
6.2	Weitere SLS-Polymere	160
6.2.1	Polyetherketon (PEK)	160
6.2.2	Flammhemmende Werkstoffe	161
6.2.3	Polyolefine	162
6.2.3.1	Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP)	162
6.2.3.2	Polystyrol (PS)	163
6.2.4	Elastomere Werkstoffe	164
6.2.4.1	Polyurethan (TPU)	164
6.2.4.2	Thermoplastische Elastomere (TPE)	164
	Literaturverzeichnis Kapitel 6	165
7	SLS-Bauteile	167
7.1	Bauteileigenschaften	168
7.1.1	Mechanische Eigenschaften	168
7.1.1.1	Kurzzeitbelastung: Zugversuch	168
7.1.1.2	SLS-Bauparameter	170
7.1.1.3	Bauteildichte	171
7.1.1.4	Partielles Schmelzen (DoPM)	174
7.1.1.5	Anisotropie der Bauteileigenschaften	177
7.1.1.6	Langzeitbeständigkeit	180
7.1.2	Bauteiloberflächen	180
7.1.2.1	Einflussparameter	180
7.1.2.2	Rauheitsbestimmung	182
7.1.2.3	Oberflächenbearbeitung	183
7.1.2.4	Endbearbeitung/Finishing	185

7.2	Anwendungen und Beispiele	187
7.2.1	AM-gerechte Konstruktion	188
7.2.2	Muster-/Prototypenbau	188
7.2.3	Funktionsintegration	190
7.2.4	Stücklistenreduktion	191
7.2.5	Individualisierung	192
7.2.6	AM-Geschäftsmodelle und Ausblick	193
	Literaturverzeichnis Kapitel 7	195
8	Werkstofftabelle SLS-Materialien	199
	Index	203

1.2.1 Einsatzbereiche/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 zu betrachten sind:

- ökonomische Produktion kleiner Bauteilserien (ab Losgröße eins),
- geometrische Freiheit in der Konstruktion (Freiformflächen, Hinterschnitte, Hohlräume),
- Bauteile mit Funktionsintegration (Scharniere, Gelenke, flexible Einheiten),
- Produktpersonalisierung (Medizintechnik, Sport),
- kurzfristige Produktanpassungen (Verkürzung von Produktzyklen),
- ökologische Aspekte (Leichtbau, reduzierter Materialverbrauch).

Typische Branchen, in denen die Vorteile der additiven Fertigung sehr gut zum Tragen kommen und gezielt eingesetzt werden können, sind: Luft- und Raumfahrt-industrie, Rüstungsindustrie, Automobil, Medizintechnik, 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. Wo die additive Fertigung aus wirtschaftlicher Sicht traditionelle Produktionsmethoden schlägt, zeigt Bild 1.2 schematisch.

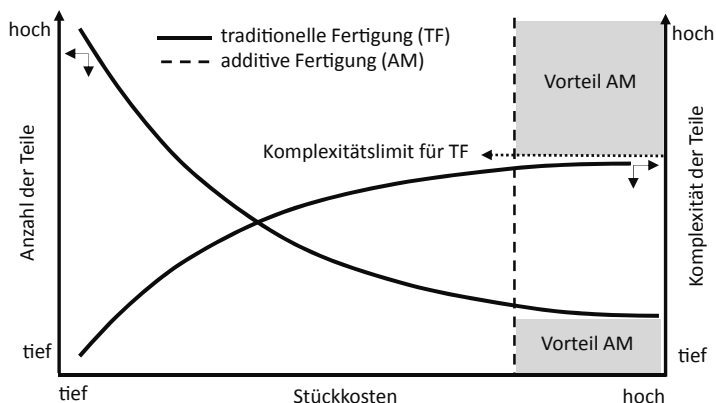


Bild 1.2 Stückkosten im Spannungsfeld der Teilezahl und der Komplexität für traditionelle Fertigungsverfahren (TF) und die additive Fertigung (AM)

Die etablierten Fertigungstechnologien sind häufig dahingehend optimiert, hohe Bauteilstückzahlen zu möglichst geringen Stückkosten zu produzieren. Mit der Anzahl der produzierten Teile nehmen die Stückkosten hier signifikant ab. Gleichzeitig steigen bei den traditionellen Fertigungstechnologien die Stückkosten mit der Bauteilkomplexität aber deutlich an. Es wird in der Regel sogar eine Komplexitätslimit erreicht, das traditionelle Verfahren nicht oder nur unter der Generierung exorbitant hoher Kosten überwinden können.

Hier liegen die Vorteile der additiven Fertigungsverfahren (hervorgehobene Flächen in Bild 1.2). 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 in der Bauteilkonstruktion greift in die komplette Prozesskette der Teilefertigung ein. In Produktentwicklungsprojekten muss der geplante Fertigungsprozess bereits zu Beginn des Projektes eingebunden werden, um die Vorteile die die additiven Verfahren zur Teilfertigung bieten voll nutzen zu können.

Die additive Fertigung wird sich in Zukunft in die Reihen der verschiedenen Fertigungstechnologien eingliedern und immer dann zum Einsatz kommen, wenn Kleinserien hochkomplexer Bauteile produziert werden sollen.

Produzierende Unternehmen sollten die Möglichkeiten, welche die additive Fertigung bietet, erkennen und versuchen, für ihre Zwecke einzusetzen. Dies erfordert in den Unternehmen aber ein Umdenken in sehr vielen Bereichen. In der Produktgestaltung und -konstruktion ergeben sich völlig neue Ansätze. „Supply-Chains“ und Geschäftsmodelle werden sich im Umfeld von AM stark verändern. Die Massenproduktion in Billiglohnländern wird umgelagert zu einer dezentralisierten Herstellung stark spezifischer Bauteile vor Ort. Die Logistik verschiebt sich von den Bauteilen zu den Bauteildaten.

Da die additiven Technologien aber nach wie vor am Anfang ihrer Entwicklung stehen, sind noch viele Hürden zu überwinden. Neben den rechtlichen Aspekten, welche mit der digitalen Produktion (z. B. Datensicherheit) einhergehen, sind speziell im Kunststoffbereich noch erhebliche Problemstellungen zu lösen.

2

SLS-Technologie

Grundprinzip

Das SLS-Verfahren lässt sich schematisch wie in Bild 2.1 gezeigt beschreiben. Eine Baufläche wird sukzessive mit Kunststoffpulver beschichtet. In jede neu aufgebraachte Pulverschicht wird die jeweilige Schichtinformation orts aufgelöst mit dem Laser in die Pulverschicht eingeschrieben (siehe Bild 2.1, rechte Seite). Das Pulver wird dabei an der Stelle, an welcher der Laser das Pulver trifft, möglichst homogen aufgeschmolzen. Durch das schichtweise Schmelzen und anschließende Verfestigen entsteht durch das Übereinanderlegen und Verbinden vieler Einzelschichten ein Bauteil (für weitere Details siehe Abschnitt 3.1.3).

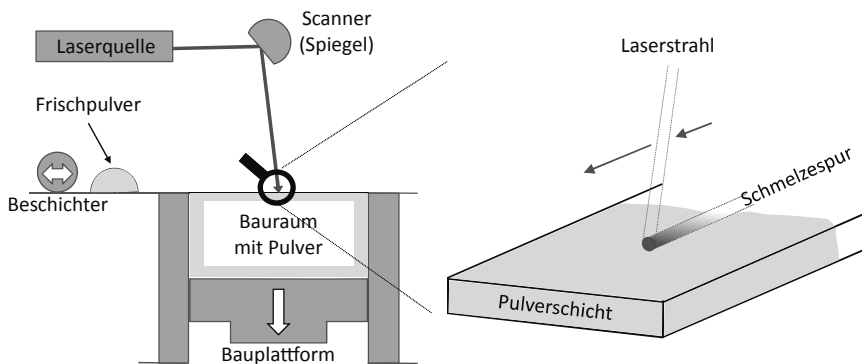


Bild 2.1 Schematische Darstellung des SLS-Prozesses

Entwicklungsgeschichte

Die Entwicklungsgeschichte der SLS-Technologie von den ersten Laborversuchen bis heute findet sich in einem ausführlichen und lesenswerten Text der Universität Austin (TX): *Selective Laser Sintering, Birth of an Industry* [1]. Sehr viele Hintergrundinformationen und Querverbindungen zu anderen wichtigen „AM-Stichpunkten“ werden aufgezeigt.

Ein entscheidender Schritt in der SLS-Historie hinsichtlich Kommerzialisierung der Technologie und dem Bau von SLS-Maschinen war die Gründung der Fa. DTM (1989). Über etwa ein Jahrzehnt wurden von DTM verschiedene Maschinengenerationen entwickelt und mit mehr oder weniger großem Erfolg kommerzialisiert.

Die finale Evolution der DTM-Maschinenentwicklung war die „SinterStation“, welche es in vier Entwicklungsstufen gab: SinterStation 2000, SinterStation 2500, SinterStation 2500plus, SinterStation Pro (Bauzeit von 1992 bis 2001).

Trotz ihres fortgeschritten Alters sind viele SinterStation-Maschinen von DTM im originalen Zustand oder in aufgerüsteter Form auch heute noch vielfach im Einsatz. Sie gelten gemeinhin als robust und zuverlässig. Nachrüstungen, wie Mehrzonenheizungen, verbesserte Temperaturkontrollausrüstungen, digitale Scanköpfe, neue Beschichtungseinheiten usw. sind möglich und werden von verschiedenen Systemanbietern angeboten (z. B. Fa. Laser Sinter Service LSS [D]) [2].

Das Bild 2.2 zeigt eine DTM-Maschine (SinterStation 2500plus) mit Baujahr 1999, die täglich im Einsatz ist. Wettbewerbsfähige Teile können mit dieser Anlage bei entsprechender Wartung problemlos gebaut werden.



Bild 2.2 DTM SinterStation 2500plus (Baujahr 1999); links: geschlossen; rechts: offen, mit Blick in den Baubereich (Prozesskammer) [Quelle: Inspire AG]

Mit der Übernahme von DTM durch die Fa. 3D-Systems (USA) in 2001 ging dieses erfolgreiche und sehr robuste Maschinenkonzept in den Besitz von 3D-Systems über und wurde ebenfalls sukzessive weiterentwickelt (Sinterstation® HiQ™, sPro™). Mittlerweile hat 3D-Systems mit der ProX™ 500-Plattform eine nächste Entwicklungsstufe erreicht (siehe Abschnitt 2.2.1).

Parallel dazu entwickelte die deutsche Fa. Electro Optical Systems (EOS) ein unabhängiges SLS-Maschinenkonzept und stellt 1994 mit der „EOSINT P 350“ eine eigene SLS-Maschine vor. Aufbauend auf dieser Basismaschine wurde in den letzten 20 Jahren ein breites Maschinenportfolio entwickelt (siehe Abschnitt 2.2.2).

allem bei der Entwicklung von entsprechenden Polymersystemen für die SLS-Verarbeitung von großer Bedeutung und wird im Folgenden erläutert.

■ 4.2 Schlüsseleigenschaften von SLS-Polymeren

Die Verarbeitung von teilkristallinen thermoplastischen Polymeren im SLS-Verfahren stellt sehr spezifische Anforderungen an die Eigenschaften der eingesetzten Kunststoffmaterialien. Im Wesentlichen muss eine ideale Kombination mehrerer Basiseigenschaften gegeben sein, damit ein Polymerpulver im SLS-Prozess erfolgreich eingesetzt werden kann. Die fundamentalen Faktoren, die über Erfolg und Misserfolg im ersten Ansatz entscheiden, werden im Folgenden aufgezeigt. Schlüsselgrößen wie thermische und rheologische Eigenschaften sind ebenso ausschlaggebend wie Pulvergeometrie und -verteilung. Daneben spielen auch noch Eigenschaften wie Absorptionsvermögen für die Laserstrahlung und das Alterungsverhalten während des Prozesses eine Rolle. Nur die optimale Kombination der Basiseigenschaften verleiht dem gewählten System eine Chance zum Erfolg.

In Bild 4.7 sind die erforderlichen Eigenschaften für SLS-Polymere übersichtlich zusammengefasst. Den Polymerpartikeln kommt eine besondere Bedeutung zu. Ihre Form und Oberfläche, welche mit der Herstellung gekoppelt ist, hat einen entscheidenden Einfluss auf das Pulververhalten während des SLS-Prozesses. Sind die Pulverpartikel nicht weitgehend rund und die Oberfläche stark zerklüftet und zerhackt, wie häufig bei gemahlenen Pulvern, wird eine homogene Ausbildung des Pulverbetts stark beeinträchtigt und der SLS-Prozess gestört.

Neben einer geeigneten Verteilung des Pulvers (ca. 20 bis 80 μm) sind weitere Materialparameter sehr wesentlich. So stellt z. B. das sogenannte Sinterfenster für viele Kunststofftypen eine Hürde bei der Verarbeitung im SLS-Prozess dar. Kristallisieren und Aufschmelzen dürfen sich nicht überlappen. Nur im thermischen Zwischenbereich zwischen Schmelzpunkt und Kristallisationspunkt (Sinterfenster) kann erfolgreich gearbeitet werden. Daneben sind vom Material weitere sehr spezifische Anforderungen hinsichtlich optischer und rheologischer Eigenschaften zu erfüllen. Hier sind eine ausreichende Absorption der eingestrahlten Laserwellenlänge sowie eine möglichst gute Fließfähigkeit der Polymerschmelze (η_0) zu nennen.

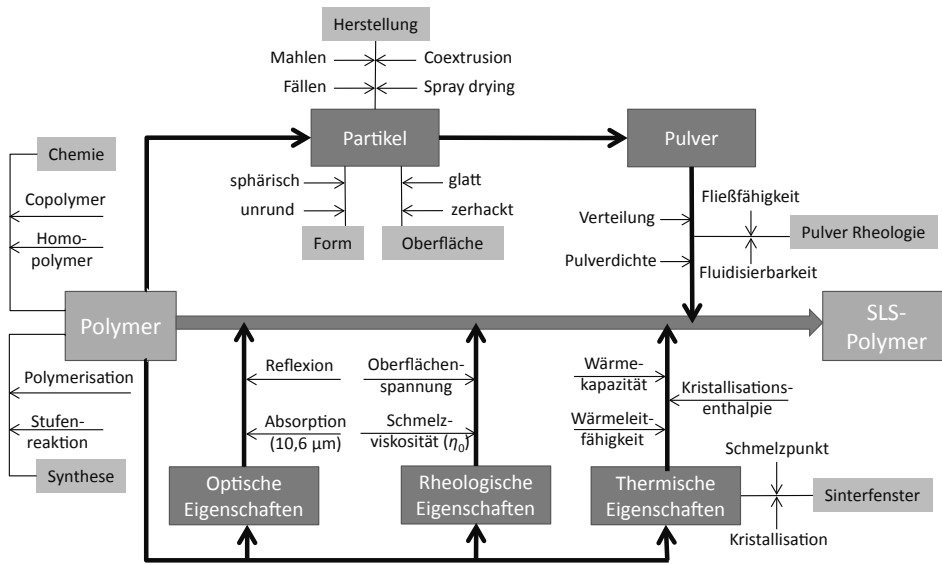


Bild 4.7 Schlüsseleigenschaften von SLS-Polymeren

Die unterschiedlichen Eigenschaften können in intrinsische (thermische-, optische und rheologische Eigenschaften) und extrinsische Eigenschaften (Partikel und Pulver) unterteilt werden. Intrinsische Eigenschaften werden in der Regel von der molekularen Struktur des Polymers zu einem gewissen Grad vorgegeben und können von außen nur schwer oder gar nicht beeinflusst werden. Die extrinsischen Eigenschaften sind dagegen durch Herstellverfahren oder andere vorgängige Prozesse vorgegeben (z. B. Pulvergengerierung, siehe Abschnitt 5.1). Die spezifischen Anforderungen welche für die einzelnen Bereiche gelten, werden im Folgenden aufgezeigt.

4.2.1 Thermische Eigenschaften

Um den Aspekt des passenden thermischen Verhaltens von Polymeren für die SLS-Verarbeitung zu verstehen, muss man sich den prinzipiellen Ablauf des SLS-Verfahrens und im Speziellen den Bauprozess, vergegenwärtigen (siehe Abschnitt 3.1.1).

Beim SLS-Prozess werden sukzessive dünne Pulverschichten in einem Baufeld appliziert. Die Schichtdicke jeder Pulverschicht beträgt in der Regel 100 μm . Die Strahlung eines CO_2 -Lasers trifft die Pulverpartikel und schmilzt die oberste Schicht des Pulverkuchens orts aufgelöst auf. Beim SLS-Prozess werden Bauten mit einer Gesamthöhe von bis zu 50 cm und mehr gebaut. Bei einer Schichtbauzeit im Bereich von 30 bis 40 s oder auch mehr ergibt sich also zwingend, dass ein entsprechender SLS-Bau zur Fertigstellung viele Stunden oder sogar Tage benötigt.

5.1.1 Emulsions-/Suspensionspolymerisation

Bekannte Verfahren zur direkten Synthese von Polymerpartikeln sind die Emulsions- und Suspensionspolymerisation. Bei dieser Art der Polymerisation werden flüssige (Emulsion) oder feste (Suspension) Monomere in einer wässrigen Flotte gelöst und durch die Zugabe geeigneter Tenside stabilisiert (siehe Bild 5.1). Durch die Zugabe eines Initiators, der in die organische Phase diffundiert und bei einer bestimmten Temperatur (ΔT) zerfällt, wird die Reaktion gestartet.

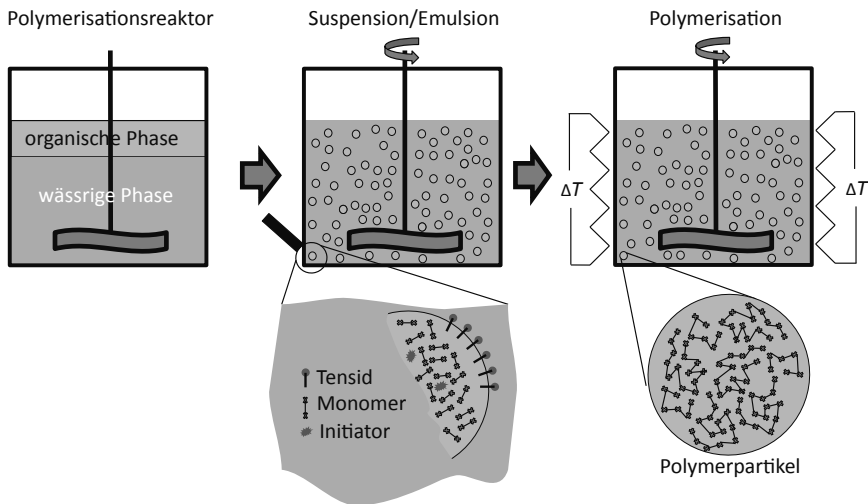


Bild 5.1 Schema der Emulsions- bzw. Suspensionspolymerisation

Der Vorteil dieser Verfahren hinsichtlich der resultierenden Partikel ist, dass über Prozessparameter wie z. B. dem Mischungsverhältnis von organischer zu wässriger Phase oder der Rührgeschwindigkeit die Dimension der Partikel gut gesteuert und über das Verhältnis Monomer zu Radikalstarter auch das resultierende mittlere Molekulargewicht des Polymers gezielt eingestellt werden kann. Auf diese Art und Weise werden technisch wichtige Polymere, wie Polystyrol (PS), Polyvinylchlorid (PVC) und Polyacrylate (z. B. PMMA) hergestellt. Das sind Polymere, die der Radikalkettenreaktion (siehe Abschnitt 4.1.1) besonders gut zugänglich sind.

Die Polymerpartikel fallen am Ende des Polymerisationsprozesses als feines homogenes Pulver mit guter sphärischer Kornform an (ähnlich wie Perlen), weshalb diese Verfahren gelegentlich auch als Perlpolymerisation bezeichnet werden. Dass am Ende des Prozesses in der Regel besonders enge monomodale Pulververteilungen erhalten werden können, zeichnen diese Verfahren aus.

Im Bereich der SLS-Polymere wird das kommerzielle PA 12 der Fa. Arkema (F) mit dem Markennamen Orgasol® Invent Smooth nach einem analogen Verfahren her-

gestellt. Die Reaktion findet in Monomertröpfchen aus Laurinlactam statt, wobei die Polyreaktion nicht radikalisch, sondern ionisch gestartet wird und durch relativ langsames Kettenwachstum die mittleren Molmassen gesteuert werden können (lebende anionische Polymerisation).

Wie aufgrund des Herstellungsprozesses [3] zu erwarten ist, zeichnet sich Orgasol® Invent Smooth durch eine sehr enge monomodale Pulververteilung aus (siehe Abschnitt 5.2.1.1). Die erhaltenen Partikel besitzen in der Regel eine sehr hohe Sphärizität (siehe Bild 5.2).

Das Produkt der Fa. Arkema ist aktuell das einzige kommerzielle Pulver in der SLS-Technologie, bei dem die Polymerpartikel direkt während der Polymerisation hergestellt werden. Bei den anderen bekannten SLS-Pulvern kommen indirekte Verfahren zum Einsatz.

5.1.2 Ausfällung aus Lösungen

Ein weitverbreiteter Prozess der chemischen Verfahrenstechnik ist das Aus- und Umfällen von Substanzen zur Reinigung. Dabei wird gezielt eine heiß gesättigte oder übersättigte Lösung einer chemischen Verbindung erzeugt, bei der unter bestimmten Prozessbedingungen (in der Regel durch kontrolliertes Abkühlen) das gewünschte Produkt amorph ausfällt oder schnell auskristallisiert wird.

In einem analogen Fällungsprozess können auch Polymerpulver gewonnen werden. Dazu wird das Polymer, welches als Pulver erhalten werden soll, in einem Nichtlösemittel dispergiert und die Dispersion unter Rühren und gegebenenfalls hohem Druck über den Schmelzpunkt des Polymers erhitzt. Aus der Dispersion entsteht eine Emulsion, also geschmolzene, flüssige Polymertröpfchen in einer inerten Matrix.

Durch exakte Regelung der Prozessbedingungen, in der Regel durch Abkühlen und/oder Druckreduktion, verfestigen sich die Polymerpartikel in ihrer tröpfchenartigen Form durch Unterschreiten des Schmelzpunkts. Ein großer Vorteil des Verfahrens ist, dass über die gezielte Steuerung der Prozessparameter der Ablauf der Kristallisation in den gefällten teilkristallinen Polymeren durch Tempern beeinflusst und gesteuert werden kann (siehe Abschnitt 6.1.1.3).

Dieses Verfahren zur Herstellung liegt den aktuell am häufigsten eingesetzten SLS-Pulver (Duraform® PA [Fa. 3D-Systems] und PA 2200 [Fa. EOS]) zugrunde. Beide Produkte basieren auf Pulvern der Marke Vestosint® der Fa. Evonik Industries (D). Vestosint®-Pulver sind in der chemischen Technologie weit verbreitet und finden Anwendung im Bereich Beschichtungen (Pulverlacke), Prozessadditive, Lackrohstoffe und einige mehr [4].

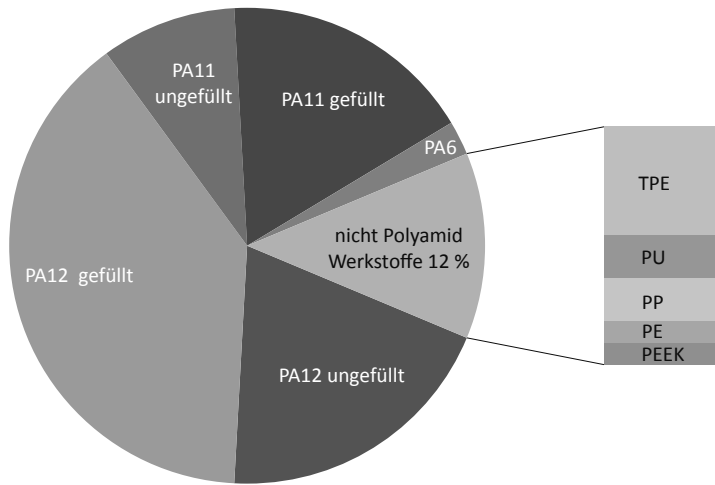


Bild 6.2 Aktuelle Verteilung der SLS-Werkstoffe nach Materialzuordnung

Polymer- und SLS-Markt im Vergleich

Das Bild 6.3 zeigt den aktuellen SLS-Werkstoffmarkt mit Marktanteilen und Preisniveaus und vergleicht ihn mit dem Weltmarkt für Kunststoffe (Kunststoffpyramide). Erhebliche Unterschiede sind ersichtlich. Schon alleine die umgesetzte Gesamtmenge an Polymeren in den beiden Bereichen ist kaum zu vergleichen. Während der gesamte globale Polymermarkt heute knapp 290 Mio. Tonnen Kunststoffe pro Jahr beträgt, werden im SLS-Bereich nach aktuellen Schätzungen lediglich etwa 1500 Tonnen pro Jahr verarbeitet [3]. Ein Verhältnis von etwa 1 : 200 000!

Grenzt man diese Betrachtung auf die Werkstoffklasse der Polyamide ein, so ergibt sich immer noch ein ziemliches Ungleichgewicht. Der Gesamtmarkt für Engineering Polymers beträgt heute ca. 20 Mio. Tonnen wobei etwa 10% auf PA 12 und PA 11 entfallen; also 2 Mio. Tonnen. Der Verbrauch steht also immer noch im Verhältnis 1 : 1500.

Vergleicht man die Preise für die einzelnen Werkstoffbereiche, so ist ersichtlich, dass für SLS-Werkstoffe ein um mindestens Faktor 10 höheres Preisniveau vorliegt. Dies hängt einerseits natürlich mit den eher geringen Produktionskapazitäten und andererseits mit der Tatsache zusammen, dass SLS-Werkstoffe als spezifische Pulver benötigt werden, deren Herstellung in der Regel aufwendig und teuer ist (siehe Kapitel 5).

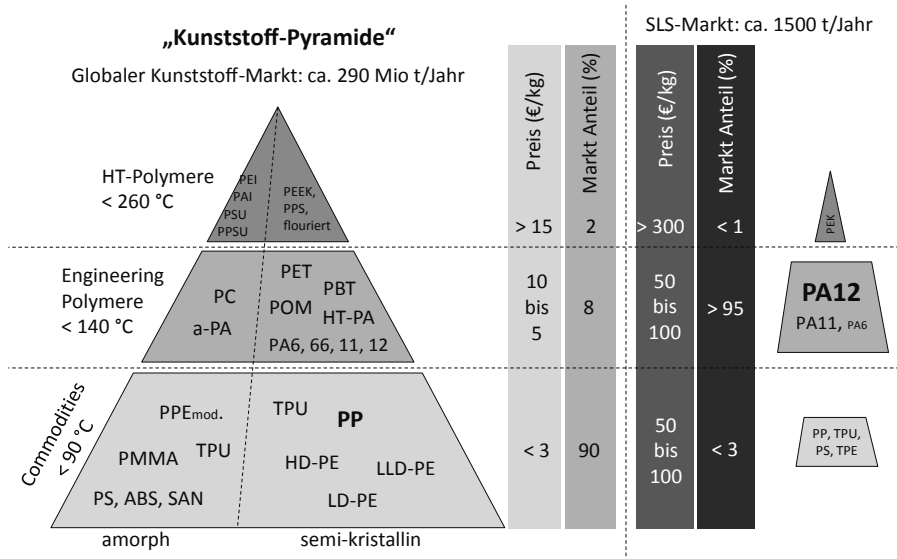


Bild 6.3 Kunststoffweltmarkt im Vergleich zum Markt für SLS-Polymere

Offenkundig ist auch die unterschiedliche Gewichtung der einzelnen Werkstoffe in ihrer Anwendungshäufigkeit. Während in der klassischen Kunststoffpyramide ca. 90 % der eingesetzten Werkstoffe aus der Klasse der sogenannten Commodities stammen, ist diese Werkstoffklasse für die SLS-Verarbeitung aktuell nahezu irrelevant. Ein klares Übergewicht beim SLS-Einsatz besitzen, wie bereits mehrfach erwähnt, die Werkstoffe aus der Gruppe der Polyamide.

■ 6.1 Polyamide (Nylon)

Nylon wurde als mögliches SLS-Material bereits in einem sehr frühen Entwicklungsstadium der Technologie genannt. Beim Nylontyp, erwähnt in Bild 6.1, handelte es sich um gemahlenes PA 11 der Fa. Atochem (F). Die Verarbeitung des Pulvers im SLS-Prozess war problematisch.

Die Teile neigten teilweise zu starkem Verzug, und die Prozesskontrolle war schwierig (hoher Ausschussanteil). Aufgrund der ungenügenden Performance der bis dahin verwendeten Materialien zur Herstellung von Kunststoffteilen hoher Dichte und guter mechanischer Eigenschaften mittels SLS wurde intensiv nach weiteren Erfolg versprechenden polymeren Werkstoffen gesucht.

Bei der Fa. EOS (D) und am Institut für Rapid Product Development (irpd) der Ingenieurschule St. Gallen (CH) wurde Ende der 1990er-Jahre mit Pulvern aus dem

■ 7.1 Bauteileigenschaften

Aufgrund der spezifischen Eigenschaften des SLS-Prozesses (pulverbasiertes Schichtbauverfahren) weisen auch die vorwiegend aus PA 12 hergestellten SLS-Teile spezifische Eigenheiten auf. Die mechanischen Eigenschaften, die Bauteildichte sowie Bauteiloberflächen sind hier primär zu nennen. Speziell die richtungsabhängigen mechanischen Kenngrößen sowie die reduzierte Bauteildichten haben auch Einfluss auf die Langzeitbeständigkeit in bestimmten Einsatzbereichen. Die Bewertung von SLS-Bauteilen im Umfeld bestimmter Anwendungsfelder steht noch ganz am Anfang und muss zukünftig durch Forschungsarbeiten sukzessive erweitert werden.

7.1.1 Mechanische Eigenschaften

Die grundlegenden mechanischen Eigenschaften von Polymerwerkstoffen werden üblicherweise mit Zug-, Schlag- und/oder Biegeversuchen ermittelt. Es handelt sich hierbei um Versuche mit zeitlich stark begrenzter Belastung (Kurzzeitversuche), meist bei einer gegebenen Temperatur. Es können auch Langzeitversuche wie Kriechversuche oder temperaturabhängige Messungen (dynamisch-mechanische Analyse, DMA) vorgenommen werden, welche im Zusammenhang mit dem Einsatz von SLS-Teilen als Funktionsteile zukünftig an Bedeutung gewinnen werden.

7.1.1.1 Kurzzeitbelastung: Zugversuch

Aktuell werden die SLS-Werkstoffe und daraus hergestellte Bauteile üblicherweise mit standardisierten Zugversuchen (z.B. EN ISO 527-1/2) bewertet und mit entsprechenden Größen von Spritzgussteilen verglichen.

Das Bild 7.1 (Kurve a) zeigt schematisch das typische Verhalten von teilkristallinen thermoplastischen Werkstoffen. Duktile, gut verdichtete Bauteile zeigen im Zugversuch nach einer ersten linearen Phase, ab einer bestimmten Belastungsgrenze (maximale Zugfestigkeit, $Y_{\max}$) eine Bauteileinschnürung, bei der es auf molekularer Ebene zu einer Linearisierung der Polymerknäuel kommt. Der Werkstoff weicht der mechanischen Belastung durch molekulare Veränderungen/Anpassungen aus. Die Dehnung nimmt stark zu, bei kaum veränderter Spannung. Häufig wird deshalb für Werkstoffe mit diesem Verhalten neben dem E-Modul die maximale Zugfestigkeit ($Y_{\max}$) zur Charakterisierung eingesetzt. Aber auch die endgültige Bruchdehnung (engl.: elongation at break, EaB) ist von Bedeutung. Gemäß Norm wird der EaB-Wert im Fall einer sehr starken Dehnung mit > 50 % klassifiziert.

Ist eine Bauteileinschnürung nicht möglich, so erfolgt häufig Sprödbbruch nahe der maximalen Zugfestigkeit. Dieses eher für Duomere (hochvernetzte Werkstoffe) typische Verhalten wird für teilkristalline Polymere wie PA 12 an sich nicht erwartet und weist darauf hin, dass das Bauteil aufgrund mikrostruktureller Gegebenheiten mechanische Belastungen nicht durch molekulare Anpassungen aufnehmen kann. Die Unterschiede in Bild 7.1 im Belastungsdiagramm (Spannung (MPa) gegen Dehnung (%)) sind offensichtlich.

Der in Bild 7.1 (Kurve a) dargestellte Verlauf wird üblicherweise für unverstärkte PA 12-Typen erhalten, bei denen die Zugproben mit Spritzguss hergestellt wurden. Mit SLS hergestellte PA 12 Zugproben zeigen dagegen in der Regel bereits Sprödbbruch bei wesentlich geringerer Dehnung in der Belastungsregion der maximalen Zugfestigkeit oder knapp dahinter (Bild 7.1 Kurve b).

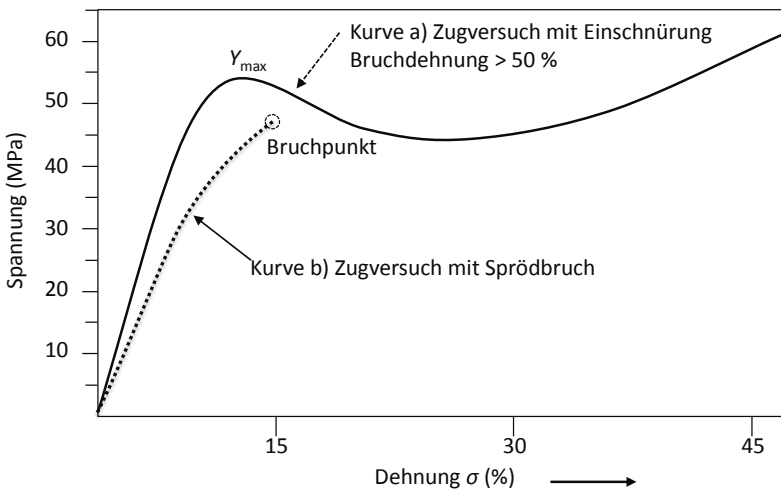


Bild 7.1 Bewertung von mechanischen Eigenschaften mit dem Zugversuch

In Tabelle 7.1 sind einige mechanische Kennwerte von typischen Spritzguss-PA 12-Proben:

- Grilamid L16 nat: niedrigviskoser PA 12-Spritzgusstyp der Fa. EMS-Chemie (CH),
 - VESTAMID L1670: niedrigviskoser PA 12-Spritzgusstyp der Fa. EVONIK (D)
- mit den wichtigsten PA 12-SLS-Werkstoffen (siehe Abschnitt 6.1.1) verglichen. Es handelt sich um Werte die an trockenen, nicht konditionierten Proben erhalten wurden. Die SLS-Proben entsprechen der XYZ-Richtung (siehe Bild 7.5 in Abschnitt 7.1.1.5).

Index

Symbole

3D-Drucken 3, 6f.
3D-Komplexität 2
3D-System 14, 30, 132
3MF 43
6-Aminohexancarbonsäure 136
 α -triklin 157
 α - und γ -Form 145
 γ -Kristallstruktur 145

A

A-A/B-B- und A-B-Polyamide 136
Aarburg Kunststoff-Freiformen (AKF) 7
Abbruch des Bauprozesses 53
Abkühlen eines SLS-Baus 83
Abkühlen und Auspacken 51
Abkühlphase 40
Ablenkgeschwindigkeit des Laserstrahls 21
Abrundung der Partikel 109
Abschätzung der SLS-Prozessfähigkeit von Pulvern 124
Absorptionskoeffizient (ϵ) 92

Absorption, Transmission und Reflexion im Schmelzbereich 95
Absorption von Strahlung 92
Additive Fertigung 2
additive manufacturing, AM 2
Advanced Laser Materials (ALM) 132, 159
Advanced Manufacturing Research Center (AMRC) 194
Agglomeration 97
Aktionscheckliste 59
aktive Kettenenden 69
allgemeine Qualitätsmaßnahmen 58
America Makes 194
AMF 43
AM-gerechte Konstruktion 188
AM-Geschäftsmodelle 193
Amidgruppe 136
Amidierung 69
Amingruppe 136
amorph 70
AM-Roadmaps 193
AM-Standardisierungsaktivitäten 63
Andrew-Zahl (A_2) 20, 50
Anisotropie der Bauteileigenschaften 177

Architekturmodelle 9
Aspect 33
Aspektverhältnis 98, 122
ASTM F42 62
ASTM-Norm F2792 12 a 2
Asymmetrie beim Schmelzen 142
Aufbau einer SLS-Maschine 15
Aufheizen 44
Auftrieb 172
Ausfällung aus Lösungen 107
Ausschussteile 53
Auswirkungen der Nachkondensationsreaktion 152
Automobilflüssigkeiten 180
Automotive 187

B

Balling-Effekt 90
Baufeldvolumen 35
Baufläche 13
Bauhöhe in Z-Richtung 57
Baujob 39, 42
Baukammerparameter 49
Baukavität 18
Bauprozess 44
Bauraumtemperatur 45

Baureste 40
 Bauteildaten 11
 Bauteildichte 87, 171
 Bauteileigenschaften 8, 168
 Bauteiloberflächen 180
 Bauteilpräzision 8f.
 bauteilumgebendes Pulver 84
 Bauteilverzug 54
 Belgien 194
 Belichtung der Pulveroberfläche 51
 Belichtungsstrategie 50
 Belichtungsvektoren 49
 Benchmarkteile 60
 berührungslose optische Messtechniken 182
 Beschichten 185
 Bestimmung der Pulverfließfähigkeit 124
 Bestimmung der Viskositätszahl 120
 Bestimmung des Sinterfensters 115
 BET-Methode 121
 Bindenähte 32
 Blendwerkstoffe 179
 Blueprinter 7
 Bohrschablonen 4, 192
 Brillenmodelle 186
 Bruchdehnung 80, 150, 157, 179
 Businessmodelle 193

C

Caprolactam 136
 CarbonMide® 178
 Carboxylgruppe 136
 Charakterisierung der Oberflächen 121
 chemische Bindungen 67
 chemische Reaktionen 6

chemische Struktur (Morphologie) 70
 China 194
 Coextrusion 109
 Commodities 135
 Computertomografie (CT) 112, 172
 Curling 54

D

Dampfphase 184
 Datenqualität 11
 Datensicherheit 5
 Dauergebrauchs-temperaturen 161
 Deformation der Teile 54
 Degree of Particle Melted 82
 Designfreiheit 187
 diffuse Reflexion 94
 Dimensionsstabilität der Teile 60
 Diodenlaser 37
 DMA 180
 Doppelklingen 25
 dry blends 137, 158
 DTM 14
 DTM-Klon 34
 Duktilität 157
 Duraform® FLEX 165
 Duraform® HST 116, 178
 Duraform® PA 137
 Duroplaste 67
 Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK/DSC) 115

E

eGrip 192
 Eigenschaften für SLS-Polymere 76
 Eigenschaftskombination von PA12 153

Eigenschaftsmatrix der SLS-Werkstoffe 179
 Eindringtiefe der Strahlung 93
 Einfärben von SLS-Bauteilen 185
 Eingangskontrolle 97
 Einteilungsmatrix additiver Fertigung 6
 Einzelklinge 25
 Elastomere 67
 elastomere Werkstoffe 164
 Electro Optical Systems (EOS) 14, 31, 132
 elektrische Leitfähigkeit 185
 Elektronik 187, 193
 elektrostatische Abschirmung 185
 E-Modul 150
 Emulsions- und Suspensionspolymerisation 106
 Endbearbeitung 185
 Endgruppen 150
 Energieaufnahme 22
 Engineering Polymers 134
 England 194
 Entwicklungsgeschichte der SLS-Technologie 13
 EOSINT 31
 EOSINT P 800 31, 161
 EOS PPM-System 61
 Ether- und Ketogruppen 160
 ExcelTec (F) 132, 159
 extrinsische Eigenschaften 77
 extrinsische Pulvereigenschaften 120
 Extrusionsbedingungen 110

F

Fa. B. F. Goodrich 131
 fachgerechte Konstruktion 178
 Fahrzeuge und Mobilität 193
 Fällungsprozess 107
 Fällungsprozess aus ethanologischer Lösung 108
 falsche Teilepositionierung 54
 FAR-25 (25.853) 161
 Farben 186
 Farbsättigung 172
 Farb- und Lichteinheit 186
 Farsoon 34
 Faserlaser 33
 Fasern 137
 Fasersorten 158
 FDM-Industriedrucker 9
 FDM-Verfahren 9
 Feinpartikel 123
 Feinstaub 42
 fertigungsgerechte Konstruktion 5
 Fertigungstechnik 1
 Fest-Flüssig-Zustand 85
 Feuchtigkeit 24, 115
 Fingerprint-Bereich 92
 Finish-Ergebnis 184
 Finishing 185
 Finish-Prozesse 52
 Firma DTM (Desktop Manufacturing, DTM) 131
 Flächendeckung 98, 122
 flammhemmende Werkstoffe 161
 Fließfähigkeit von Pulvern 97
 Fließpunkt der Polymere 73
 Fließpunkt (T_f) 72

Fließ- und Rieselfähigkeit 99

Fließverhalten und Fluidisierbarkeit 97
 Fluidisierte Höhe 128
 Fluidisierung 26
 Flüssigstickstoff 108
 Fokusebene 29
 Fokuskorrektur 28
 Form der Partikel 122
 Formfaktoren der Hohlräume 172
 FORMIGA 31
 Frischpulver 18
 F-Theta-Linse 29
 funktionelle Endgruppen 69
 funktionsgerechte Konstruktion 5
 Funktionsintegration 4, 190
 Funktionsteile 8
 fused deposition modeling, FDM 6

G

Gebrauchtpulver 41
 Gegenüberstellung mechanischer Kennwerte 170
 Gelbildung 153
 Gel-Permeations-Chromatografie (GPC) 120
 GelSight 182
 generelle Sauberkeit 59
 geometrische Freiheit 4, 187
 Geschäftsmodelle 4, 5
 Gewinde 43
 Gibbs-Thomson-Gleichung 147
 Gießverfahren 9
 Glaskugeln 137, 158
 Glaspunkt (T_g) 71
 glatte Oberflächen 43

Gleichgewichtsreaktionen 148

Gleichgewichtszustand 24, 148
 Gleitschleifen 184
 GPC-Messung 149
 Gravitation 89
 Greiferfinger 192
 Grilamid® L20G 141
 große Flächen 43
 Gruppen- oder Deformationsschwingungen 92

H

halogenhaltige Flamm-schutzwerkstoffe 162
 Hampel-Schätzer 126
 Handarbeit 183
 Hartsegment 67
 Hausner-Faktor (HF) 97, 125
 Hautkontakt 186
 Heiz- und Kühlraten 79
 Herstellung der SLS-Pulver 105, 110
 Hewlett Packard (HP) 7
 Hinterschnitte 187
 Hitze- und UV-Belastungen 152
 hochporöse Pulver 121
 Hofmann Medea 1500 SLS 37
 Hohlkugeln 112
 Hohlräume 43, 102, 172, 187
 homogene
 – Bauteileigenschaften 174
 – Partikelgrößenverteilung 140
 – SLS-Bauteile 174
 – Teileverteilung 44
 Homogenisierung der Schmelze 82

Hörgeräte 192
 Huazhong Universität 37
 hydrolyseempfindlichen
 Polymere 118

I

individualisierte Industrie-
 greifer 192
 Individualisierung 192
 Industriestandards für
 Additive Manufacturing
 64
 Infrarotspektrum 93
 inhomogene Kristallisation
 52
 Initiator 106
 innere Spannungen 86
 interne Qualitätsmaß-
 nahmen 58
 intrinsische Eigenschaften
 77
 IR-Strahler 19
 ISO TC 261 62
 isotherme Koaleszenz 89
 isothermes Lasersintern
 136
 isotrope Bauteileigen-
 schaften 51
 Isotropie der Bauteile 80

K

Kalibrierung 19
 Kegel-Platte-Rheometer
 87
 Kerntemperatur des
 Pulverkuchens 52
 Kettenbrüche 152
 Kettenwachstum 69
 kinetische Energie 108
 Klimaanalyse für Fahr-
 simulationstest 189
 Klinge und Pulverkassette
 25

Koaleszenz 45
 Koalszenz von Duraform®
 PA 89
 kohäsiv 97
 Kommerzialisierung von
 SLS 131
 Kommerzielle Materialien
 131
 Komplexität 4 f., 187
 konkave Krümmung 26
 Konstruktionsmerkmale
 60
 Kontrolle des Pulver-
 zustands 41
 Kontur der Oberfläche
 182
 Korngrößenverteilung 99
 Korrekturlinse 29
 kovalente Verknüpfungen
 67
 Kriechverhalten 180
 Kristallinitätsgrad 70
 Kristallisation 45, 78
 Kristallisation im SLS-
 Prozess 80
 Kristallisationsenthalpie
 (ΔH_K) 83, 144
 Kristallisationshilfen 82
 Kristallisationskeime 174
 Kristallisationskinetik
 85
 Kristallisationspunkt (T_K)
 144
 Kristallisationsverhalten im
 SLS-Prozess 82
 Kristallitgröße 81
 Kristallstruktur 145
 kryogenes Mahlen 108
 kundenspezifisches Eigen-
 schaftsprüfung 61
 Kunststoffmesszylinder
 126
 Kunststoffpyramide 134
 Kurzzeitbelastung, Zug-
 versuch 168

L

Lackieren 185
 Lackrohstoffe 107
 Lambert-Beer'sche-Gesetz
 92
 Lamellendicke (l_c) 146
 Langzeitbeständigkeit 180
 Langzeitstabilität 8 f.
 Laserbeugungsverfahren
 122
 Laserenergieeintrag 20
 Laserfenster 16
 Laserleistung 21
 Lasermodul 15
 Laserspot 29
 Laserspotform 29
 Laserspuraabstand 21
 Laurinlactam 107, 136, 148
 Lawinenwinkel 128
 lebende anionische Poly-
 merisation 107
 Leichtbaustrukturen 187
 Leistungsparameter 35
 lichtmikroskopische
 Analysen 122
 Lifestyleprodukte 186
 Lifestyle und Mode 193
 Linearisierung der Poly-
 merknäuel 74
 Logbuch Maschine 59
 Logistik 5
 Lösemittel 184
 Luft- und Raumfahrt-
 industrie 187, 193
 Lunker 172

M

Mahlen 108
 Markennamen 132
 Marktanteile 134
 Maschinenkonfiguration
 15
 Maschinenmarkt 30

Maschinenservice 59
 Maschinentechnologie 15
 Maschinen- und Werkzeugindustrie 193
 Massachusetts Institute of Technology 182
 Maßnahmenliste zur Qualitätskontrolle 59
 Materialportfolio 133
 Matrixpolymer 109
 maximale Zugfestigkeit 169
 mechanische Eigenschaften 8f., 168
 mechanisches Zerkleinern 108
 Medizintechnik 187
 Medizin/Zahnmedizin 193
 Mehrzonenheizung 18
 melt flow index, MFI 117
 melt volume rate, MVR 117
 Metallpulver 137, 158
 Metall- und Nichtmetall-oxide 93
 metastabil 78
 Mikroskop mit Heiztisch 89
 Militär 193
 mittleres Molekulargewicht 74f., 106
 Möbelindustrie 187
 Modellbau 8
 Modellierung der Abläufe im Sinterfenster 85
 Model von Frenkel/Eshelby 89
 Molekulargewicht (M_w) 74, 119, 147, 150
 Molekulargewichtsverteilung 119
 Molmasse 70
 monokline (pseudohexagonale) Symmetrie 145

Morphologie 70
 multijet fusion, MJF 7
 multijet printing, MJP 7
 Muster-/Prototypenbau 188
 MVR-Kontrollpunkte 41
 MVR-Messung 41, 118
 MVR/MFI-Wert 117

N

Nachbearbeitung 52
 Nachkondensation 87, 147, 151
 Nachkondensationsreaktion 148
 Nachkondensation von PA12 in fester Phase 148
 Nadelspitze 182
 Namen der Polyamide 136
 National Additive Manufacturing Innovation Institutes (NAMII) 194
 Nationale AM-Sonderprogramme 193
 Nebenvalenzkräfte 136
 Neupulver 41
 Newton'sche Flüssigkeit 87
 Nicht isotherme Kristallisation 80
 Norge Systems 37
 Normenkomitees auf Länderebene 62
 Normung 62
 Normungsgremien (ASTM, ISO, CEN) 62
 Nullviskosität (η_0) 74, 87
 numerische Simulation 85
 Nylon (= Polyamid) 132

O

Oberfläche des Baufelds 48
 oberflächenaktive Substanzen 91
 Oberflächenbearbeitung 183
 Oberflächendefekte 55
 Oberflächen Fraktalwert 128
 Oberflächengüte 9
 Oberflächenheizung 45
 Oberflächenqualität 8, 11
 Oberflächenrauigkeit 121
 Oberflächenrauigkeit der SLS-Bauteile 140
 Oberflächenspannung (γ) 74, 87, 89
 Oberflächentemperatur 19f.
 Odd-even-Effekt 157
 Ofenalterung 152
 ökonomische Produktion 4
 Oligomere 120
 Onset des Schmelzens 80
 Opferteile 60
 optische Eigenschaften 91
 optische Komponenten 28
 Orangenhaut 55f.
 Orgasol® Invent Smooth 106, 137
 Overflow-Pulver 40
 Oxidation 18, 51
 oxidative Abbaureaktionen 152

P

- PA 12-Basispulver 137
- PA 12-Pulver mit Kohle-
faser 158
- PA 12-SLS-Neupulver 40
- PA 12- und PA 11-Com-
pounds 158
- Packungsdichte 40, 101
- Packungsdichte der Pulver
100
- Parametersätze 49
- Partialdruckdifferenz 148
- Partielle Baufeldschmelze
57
- partielles Schmelzen 174
- Partikelfeinanteil 97, 108,
138
- Partikelform 98, 120
- Partikelgeometrie 102
- Partikelgrößenverteilung
99
- Partikelkoaleszenz 91
- Partikeloberfläche 98
- Part-Property-Manage-
ment (PPM) 61
- PDI (Polydispersitätsindex)
119
- Pendant-Drop-Methode
90
- physikalische Netzpunkte
67
- Platte-Platte-Viskosimeter
88
- Polieren 185
- Polyacrylate 106
- Polyamid 6 (PA 6) 109,
159
- Polyamid 11 (PA 11) 109,
155
- Polyamid 12 (PA 12) 137
- Polyamide (Nylon) 135
- Polybutylenterephthalat
(PBT) 131
- Polycarbonat (PC) 74, 131
- Polyetherketon (PEK) 160
- Polyethylen (PE) 162
- polyjet modeling, PJM 7
- Polykondensationsreaktion
69
- Polymereigenschaften 67
- Polymerisation 68
- Polymerketten mit offenen
Kettenenden 148
- Polymerpartikel 95
- Polymerpulver 105
- Polymer- und SLS-Markt
im Vergleich 134
- Polymerverarbeitung 73
- Polymethylmethacrylat,
PMMA 74
- Polymorphie 145
- Polyphosphinate 162
- Polypropylen (PP) 162
- Polystyrol (PS) 163, 106
- Polyurethan (TPU) 109,
127, 164
- Polyvinylchlorid (PVC)
106
- Poren 172
- Porositätsbestimmung
172
- powder shape 122
- Präzision und Abbildungs-
genauigkeit 60
- Pressluft 52
- Primärzustand 73
- Primepart® ST (PEBA 2301)
165
- Prinzip von Le Chatelier
69
- Produktentwicklung 3, 8
- Produktionsplanung 59
- Produktionstechnologie
39
- Produktivität 35
- Produktpersonalisierung
4
- professionelle Nach-
bearbeitung 185
- ProX™ 500 14
- Prozessabfolge 47
- Prozessablauf 44
- Prozessadditive 107
- prozessbegleitende
Qualitätskontrolle 58
- Prozessfehler 53
- Prozesskammer 18
- Prozesskette 5, 39, 59
- Prozesskontrolle 167
- Prozessschema für das
SLS-Verfahren 40
- Prozesssteuerung 85
- Prozessstauglichkeit der
Pulver 142
- Prozesstemperaturen 86
- Prüfteile 59
- Prüf- und Vergleichsteile
60
- Pulveralterung 152
- Pulverauftrag 24
- Pulverbereitstellung 23,
40
- Pulverdichte 28, 100
- Pulverfließfähigkeit 25,
123
- Pulverfluss im SLS-Prozess
41
- Pulvergrobanteil 99
- Pulverkonditionierung 24
- Pulverkuchen 51
- Pulverlacke 105
- Pulvermischung 40
- Pulverrheologie 96
- Pulverrieselfähigkeit 123
- Pulvertrichter 126
- Pulververhalten 95
- Pulververklumpung 57
- Pulververteilung 120, 123,
138
- Pulverzufuhr „short-feed“
57
- Pulverzuführung 22
- Pulverzustand 41, 114,
124

Push™ Process 184
pyrogene Kieselsäure 98

Q

quaderförmige Bauräume 177
Qualität der Bauteildaten 42
Qualitätskosten 61
Qualitätsmanagement 58
Qualitätsschulungen 58
Qualitätssichernde Maßnahmen 58
Qualitätssicherung 58, 114
Qualitätszertifikat 58
Querkontamination 41

R

radikalische und ionische Polymerisation 68
Radikalkettenreaktion 106
RaFaEI 33
 R_a (mittlere Rauheit) 181
Rapid Prototyping (RP) 3
Rasterelektronenmikroskop 112
Rauheitsbestimmung 182
Rauheitsparameter 183
Raumorientierung 177
Raumrichtungen 177
raumrichtungsabhängige Bauteileigenschaften 178
Recycling 153
Reflektorhalter 190
Reflexion 91
Reflexionsmessung 93
RESS-Verfahren 113
Restkristallinität 175
Restmonomergehalt 119
Restporosität 173

Rheologie der Polymer-schmelze 87
Richtungsorientierung und Bauteilbenennung 177
Rilsan® Invent 155
ringöffnende Polyaddition 136
Ringversuch 126
Rissauslösung 172
Risse im Pulverbett 57
Robotergreifer 4
RoHS-Richtlinie 161
Rollenbeschichter 27
Rollenoberfläche 27
Röntgenbeugungsreflexe (WAXS) 146
Röntgenstrukturanalyse 145
Rotationsgeschwindigkeit 128
Rotations-Pulver-Analyse 128
Rückstellmuster 59, 60
Rundheit 98
Rundversuch 126
Rüstungsindustrie 187
Rütteleffekt 101
 R_z (maximale Rauheit) 181

S

Schematischer Aufbau von Polymeren 68
Scherung γ 74
Schichtbauverfahren 2
Schichtdelamination 57, 150
Schichtgrenzen 81, 150
Schichthftung 150
Schichtverbindung 81
schichtweise Schmelzen 13
Schichtzeiten 44
Schlagfestigkeit 80

Schlagzähigkeit 157
Schleiss RPTech 42
Schmelzen 78
Schmelzen im SLS-Prozess 82
Schmelzenthalpie ΔH_m 83
Schmelzfließfähigkeit 41
Schmelzflussindex 117
Schmelzpunkt 45
Schmelzpunkt (T_m) 71
Schmelzspinnen 113
Schmelzviskosität 56, 87, 117
Schmuckindustrie 187
Schnappfunktionen 43
Schütt- und Stampfdichte 125
Schutzanzüge 191
Schutzgas 44
Sedimentationszeit 129
Sekundärverarbeitung von Kunststoff 73
selective heat sintering, SHS 7
selective laser sintering, SLS 6
Selektives Lasersintern (SLS) 6, 9
– Bauparameter 170
– Bauteile 167
– Compoundwerkstoffe 158
– Historie 14
– Materiallieferanten 132
– Materialportfolio 11
– Prozess 9, 39
– Prozessfähigkeit 138
– Prozessfehler 57
– Prozesskette 10
– Prozessstabilität 142
– Sinterfenster 78
– Technologie 10, 13
– Verfahren 13

Selektives Wärmesintern 7
 SEMplice 33
 Serienteile 167
 sichtbare Laserscanlinien 181
 Siebanalyse 122
 Simulation der thermischen Abläufe 86
 Simulation des Verfestigungsgrades 85
 Simulation von SLS-Prozessen 83
 Singapur 194
 Sinterfenster des Polymers 78
 Sinterhalse 73
 Sinterline™ 159
 SinterStation 14
 Sinterzyklus 45
 Sintratec 36
 solidity 98
 Sollbruchstellen 172
 Sondermaterialien 49
 Spann- und Greiftechnik 192
 spezifische Oberfläche 121
 Sphärizität 98, 107, 121, 139
 Sphärolitgrenzen 81
 sphärolithische Kristallstrukturen 80
 Spiegelpositionen des Scankopfs 50
 Sportgeräteindustrie 187
 Sport- und Rennsportein-satz 159
 Sprödbbruch 169
 Sprühtrocknung 112
 Stabilisatoren 152
 Standardabweichung 126
 Standards für den Bereich Additive Manufacturing 63

Staubpartikel 15
 Stereolithografie 6f.
 stereolithography, SL 7
 Stickstoff 24
 STL-File 42
 STL-Format 42
 Störung der molekularen Ordnung 144
 Strahlengang 28
 Strangablegeverfahren 6
 Streckspannung 80
 Streifenbildung 57
 Streuphänomene 91
 strukturviskose Körper 74
 strukturviskoses Verhalten 87
 Stückkosten 4, 5
 Stücklistenreduktion 191
 Stufenreaktion 68
 Stufenwachstumsreaktion 69
 Stützstrukturen 8, 43
 Sublimation 162
 subtraktive Methoden 2
 Systemlieferant 62
 Systemzustand 59

T

taktile/berührende Messung 182
 Taktizität 70
 Tangentialgeschwindigkeit 27
 Technologiereife 8, 167
 Technologietreiber 4
 Teilkollisionen 43
 Teilevergilbung 57
 Teilezusammenstellung (Baujob) 43
 teilkristallin 70
 Temperaturführung 18
 Temperaturkontrolle 18
 Temperatursprung in der Laserspur 79

TGA-Messkurve 116
 thermische
 – Analyse 115
 – Belastung 153
 – Eigenschaften 8, 77, 140
 – Gleichgewichtszustand 44
 – Schock 45
 – Übergänge amorpher und teilkristalliner Polymere 72
 – Verhalten 71
 Thermogravimetrie (TGA) 115
 thermo-oxidativen Schädigung 108
 thermoplastische Elastomere (TPE) 67, 109, 127, 164
 thermoplastische Polymere 67
 Thermowaage 115
 Tintenstrahl UV-Druck 7
 Titandioxid (TiO₂) 93
 Translationsgeschwindigkeit 27
 Transmission 92ff.
 Treppenstufeneffekt 181
 Trockenmischungen 137, 158
 Tröpfchen-Matrix-Morphologie 109
 Tropfenextrusion 113
 Trowalisieren 184

U

Überhitzung von einzelnen Schichten 54
 Überlappung der Laserspuren 49
 Ulbricht-Kugel 94
 Umwandlungen 1. Ordnung 115

Universität Austin (TX) 13, 131
unkontrolliertes Teilwachstum und „wash-out“ 57
unterkühlte Schmelze 88
unversintertes Pulver 40
Urformen 1
Urformverfahren 170
US-Präsident, Barak Obama 194

V

Varia 3D 34
Variation bei der Belichtung 51
Variation der Laserenergie 175
VDI Statusreport „Additive Fertigungsverfahren“ 187
Verarbeitungstemperatur 71
Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 62, 114
Veresterung 69
Verfahren der Universität Sheffield 184
Vergilbung der Oberflächen 52
Vergleichbarkeit (s_R) 126
Vergleich PA 12 und PA 11 156
Verkleben 6
Verlängerung der Polymerketten 150
verlorene Modelle 9
Vermischung von Materialien 41
Vernetzung 67

verstärkte Werkstoffe 132
Verteilungskurven von Pulvern 122
Vibrationen des Pulverbeschichters 181
viskoelastische Eigenschaften 88
Viskosität 74
Viskositätskurve 74, 87
vollständige Koaleszenz 73
Volumenaufbaurrate 35
Volumenverteilung 122
Vorratspulver 23
Vorwärmphase 39

W

Wachsdrukverfahren 7
Wareneingangskontrolle 114
Wärmealterung 180
Wärmeformbeständigkeit 159
Wärmekapazität (c_p) 83, 115
Wärmeleitfähigkeit 83
Wärmequellen 18
Wärmestrahlung 83, 86
Wärmestrahlungseffekte 84
Warpage 54
Wash-out-Effekte 181
Wasseraufnahme 160
Wasserdichtigkeit 185
Wasserstoffbrücken 136, 157
Weichmachergehalt 116
Weichsegmente 67
Weißpigment 93

Werkstoffauswahl 11
Werkstoffklassen 133
Werkstoffoptimierung durch Additivierung 178
Werkstoffsortiment 133
Werkstofftabelle 199
Werkstoff- und Prozessmatrix 6
Werkzeug 4
Werkzeugkühlung 82
Werkzeug- und Formenbau 187
wide angle X-ray scattering, WAXS 145
Wiederholbarkeit (s_R) 126
Wiederholungseinheiten 150
Windform (I) 132, 159

X

XYZ-Baurichtung 157

Z

Zahlenmittel des Molekulargewichts (M_n) 119
Zahlenverteilung 122
Zahnkorrekturen 192
Zahnprothetik 4
Zeitkonstante der Energieabsorption 22
Zersetzungspunkt T_z 72
zerstörungsfreie Bestimmung der Porosität 172
Zinkselenid (ZnSe) 16
Zirkularität 98, 122
Zugfestigkeit 80, 150
Zyklonabscheider 112