



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 Konturmappen, 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 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

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Der Autor</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
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
<b>2 SLS-Technologie</b> .....	<b>13</b>
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
<b>3</b>	<b>SLS-Prozess .....</b>	<b>39</b>
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
<b>4</b>	<b>SLS-Werkstoffe: Polymereigenschaften .....</b>	<b>67</b>
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 ( $\Delta H_K$ , $\Delta H_m$ ) .....	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
<b>5</b>	<b>SLS-Werkstoffe: Polymerpulver .....</b>	<b>105</b>
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

<b>6</b>	<b>SLS-Werkstoffe: Kommerzielle Materialien</b>	<b>131</b>
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
<b>7</b>	<b>SLS-Bauteile</b>	<b>167</b>
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
<b>8</b>	<b>Werkstofftabelle SLS-Materialien .....</b>	<b>199</b>
	<b>Index .....</b>	<b>203</b>

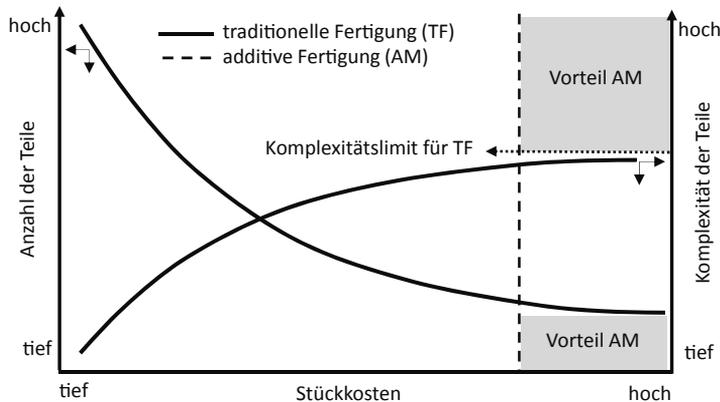
### 1.2.1 Einsatzbereiche/Technologietreiber

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 Produktpassungen (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 Raumfahrtindustrie, 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, Robotergreifer) 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.

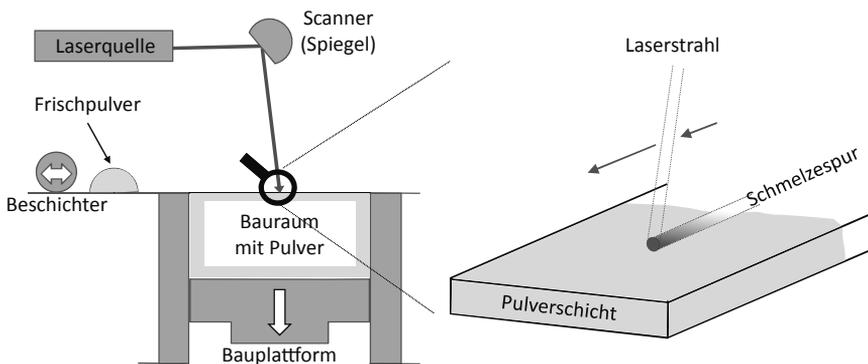
Da die additiven Technologien aber nach wie vor am Anfang ihrer Entwicklung stehen, sind noch viele Hürden zu überwinden. Neben den rechtlichen Aspekten, welche mit der digitalen Produktion (z. B. Datensicherheit) einhergehen, sind speziell im Kunststoffbereich noch erhebliche Problemstellungen zu lösen.

# 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 ortsaufgelöst 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 fortgeschrittenen 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).

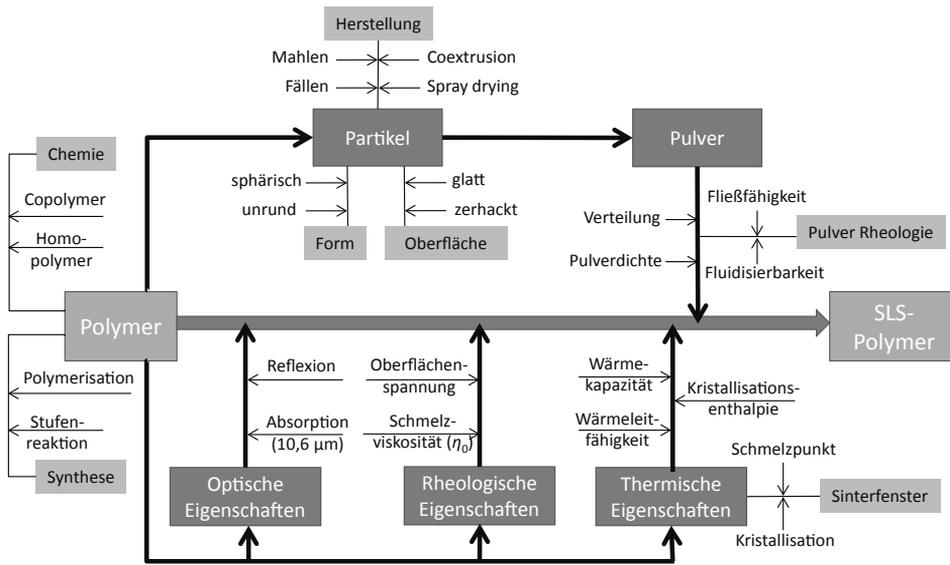
allem bei der Entwicklung von entsprechenden Polymersystemen für die SLS-Verarbeitung von großer Bedeutung und wird im Folgenden erläutert.

## ■ 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 gemahlten Pulvern, wird eine homogene Ausbildung des Pulverbetts stark beeinträchtigt und der SLS-Prozess gestört.

Neben einer geeigneten Verteilung des Pulvers (ca. 20 bis 80  $\mu\text{m}$ ) 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 ( $\eta_0$ ) 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. Pulvergenerierung, siehe Abschnitt 5.1). Die spezifischen Anforderungen welche für die einzelnen Bereiche gelten, werden im Folgenden aufgezeigt.

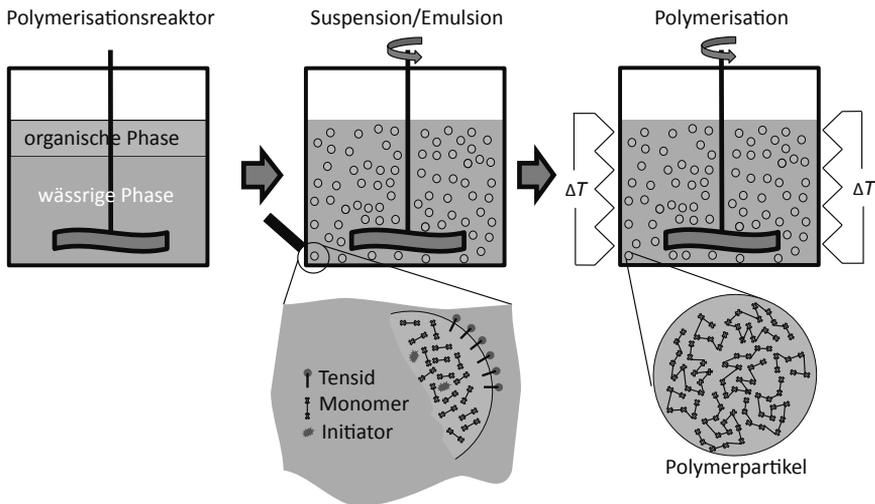
### 4.2.1 Thermische Eigenschaften

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<sub>2</sub>-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 ( $\Delta T$ ) 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<sup>®</sup> 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.

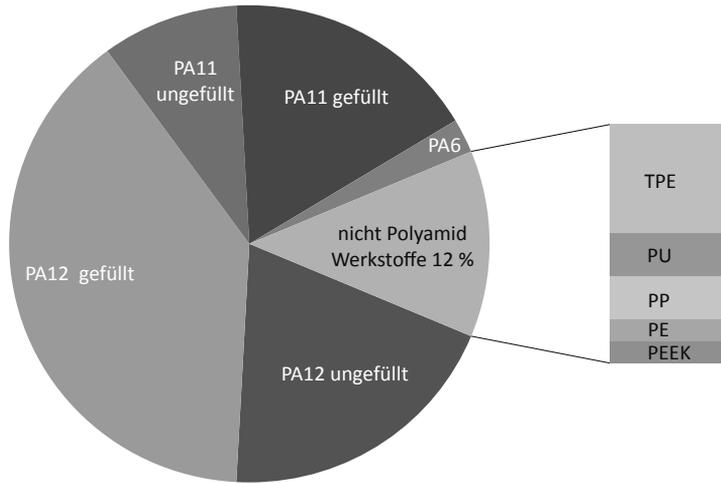
### 5.1.2 Ausfällung aus Lösungen

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-Pulvern (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].

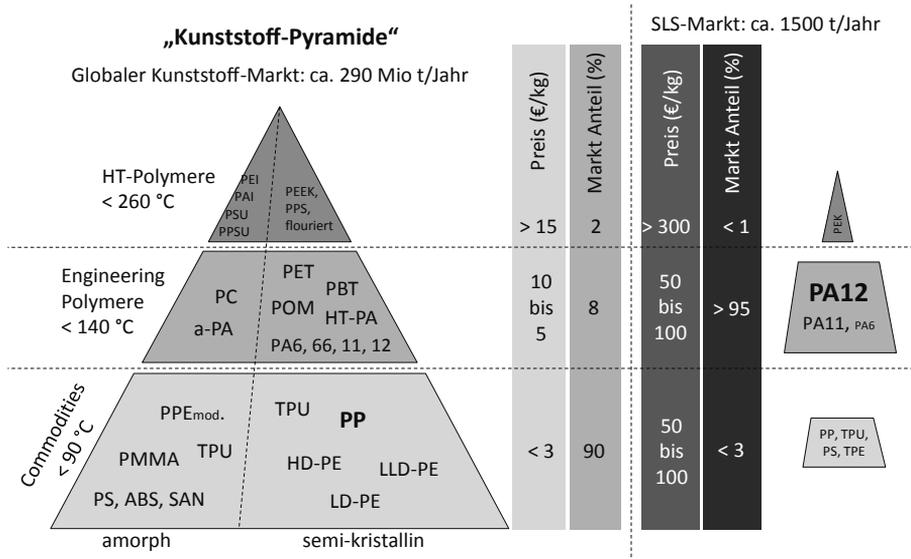


**Bild 6.2** Aktuelle Verteilung der SLS-Werkstoffe nach Materialzuordnung

### 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.

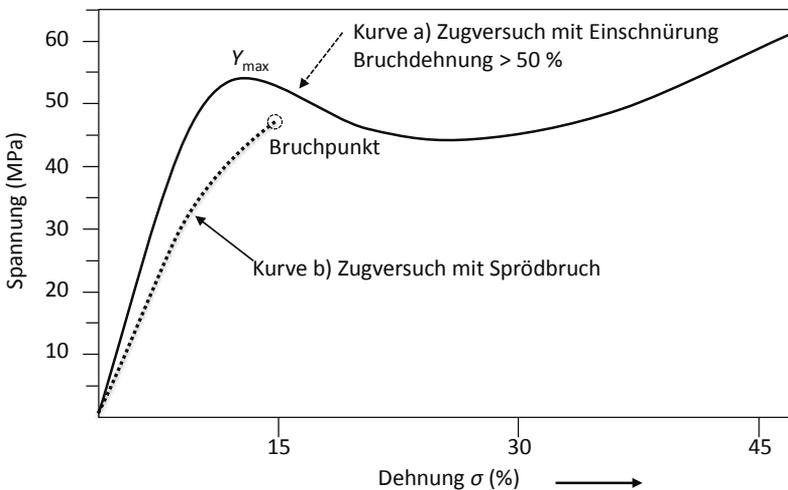
#### 7.1.1.1 Kurzzeitbelastung: Zugversuch

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 Duromere (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  
 $\alpha$ -triklin 157  
 $\alpha$ - und  $\gamma$ -Form 145  
 $\gamma$ -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 ( $\epsilon$ ) 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 ethan-  
 olnischer 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 Werk-  
 stoffe 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 Hohl-  
 räume 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 mecha-  
 nischer Kennwerte 170  
 Gelbildung 153  
 Gel-Permeations-Chro-  
 matografie (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 Deforma-  
 tionsschwingungen 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  
 ( $\Delta H_k$ ) 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-  
 schaftsprofil 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  
 Luncker 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 8 f., 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 Nichtmetalloxide 93  
 metastabil 78  
 Mikroskop mit Heiztisch 89  
 Militär 193  
 mittleres Molekulargewicht 74 f., 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  
 Nebervalenzkräfte 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 ( $\eta_0$ ) 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 ( $\gamma$ ) 74, 87, 89  
 Oberflächentemperatur 19 f.  
 Odd-even-Effekt 157  
 Ofenalterung 152  
 ökonomische Produktion 4  
 Oligomere 120  
 Onset des Schmelzens 80  
 Opferteile 60  
 optische Eigenschaften 91  
 optische Komponenten 28  
 Orangenhaut 55 f.  
 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  
RaFaEl 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  $\gamma$  74  
Schichtbauverfahren 2  
Schichtdelamination 57, 150  
Schichtgrenzen 81, 150  
Schichthaftung 150  
Schichtverbindung 81  
schichtweise Schmelzen 13  
Schichtzeiten 44  
Schlagfestigkeit 80

Schlagzähigkeit 157  
Schleiss RPTech 42  
Schmelzen 78  
Schmelzen im SLS-Prozess 82  
Schmelzenthalpie  $\Delta H_m$  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  
 Sinterhülse 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 (TiO<sub>2</sub>) 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  
 Volumenaufbaurate 35  
 Volumenverteilung 122  
 Vorratspulver 23  
 Vorwärmphase 39
- W**
- Wachsdruckverfahren 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