

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Der Autor</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Fertigungstechnik .....	1
1.2 Additive Fertigung .....	2
1.2.1 Einsatzbereiche und Technologietreiber .....	3
1.2.2 Hauptgruppen der additiven Fertigung .....	5
1.3 Additive Fertigung mit Kunststoffen .....	8
1.3.1 Vat Photopolymerisation (VPP) .....	8
1.3.2 Material Extrusion (MEX) .....	10
1.3.3 Material Jetting Technology (MJT) .....	13
1.3.4 Powder Bed Fusion (PBF) .....	14
1.3.5 Vergleich additiver Fertigungsverfahren für Kunststoffe .....	18
1.4 Lasersintern (LS) mit Kunststoffen .....	20
<b>2 Lasersintertechnologie</b> .....	<b>23</b>
2.1 Maschinentechnologie .....	26
2.1.1 Maschinenkonfiguration .....	26
2.1.2 Temperaturführung .....	29
2.1.2.1 Wärmequellen .....	29
2.1.2.2 Oberflächentemperatur am Baufeld .....	30
2.1.2.3 Laserenergieeintrag, Andrew-Zahl ( $A_Z$ ) .....	31

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

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

<b>5</b>	<b>Lasersinterwerkstoffe: Polymerpulver . . . . .</b>	<b>141</b>
5.1	Lasersinterpulverherstellung . . . . .	142
5.1.1	Emulsions-, Suspensions- und Lösungspolymerisation . . . . .	142
5.1.2	Ausfällen aus Lösungen . . . . .	143
5.1.3	Mahlen und mechanisches Zerkleinern . . . . .	144
5.1.4	Schmelzemulgieren . . . . .	145
5.1.5	Lasersinterpulverherstellung im Überblick . . . . .	146
5.1.6	Weitere Pulverherstellverfahren . . . . .	148
5.2	Lasersinterpulvereigenschaften . . . . .	151
5.2.1	Pulverdichte . . . . .	151
5.2.1.1	Partikelform und -oberfläche. . . . .	154
5.2.1.2	Partikelgrößenverteilung (Anzahl- und Volumenverteilung) . . . . .	156
5.2.2	Pulverrheologie . . . . .	160
5.2.3	Messung der Pulverfließfähigkeit . . . . .	161
5.2.3.1	Hausner-Faktor ( $H_R$ ) . . . . .	163
5.2.3.2	Rotationspulveranalyse . . . . .	166
5.2.3.3	Fließhilfsmittel . . . . .	168
<b>6</b>	<b>Lasersinterwerkstoffe: kommerzielle Materialien . . . . .</b>	<b>171</b>
6.1	Polyamide (Nylon) . . . . .	176
6.1.1	Polyamid 12 (PA 12). . . . .	177
6.1.1.1	Partikelgrößenverteilung und Partikelform. . . . .	178
6.1.1.2	Thermische Eigenschaften. . . . .	181
6.1.1.3	Kristallstruktur. . . . .	186
6.1.1.4	Molekulargewicht und Nachkondensation. . . . .	188
6.1.1.5	Pulveralterung . . . . .	193
6.1.1.6	Eigenschaftskombination von PA 12 . . . . .	195
6.1.2	Polyamid 11 (PA 11) . . . . .	196
6.1.3	Vergleich von PA 12 und PA 11. . . . .	203
6.1.4	PA 12- und PA 11-Compounds. . . . .	205
6.1.5	Flammhemmende Werkstoffe auf Basis von PA 12 und PA 11 . . . . .	208
6.1.6	Sonstige Polyamide (PA 6, PA 613, PA 1212) . . . . .	209

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