

Inhalt

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

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

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

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

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