

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