

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung in die thermoplastbasierte additive Fertigung ...</b>	<b>1</b>
1.1	Generierungsstrategie der additiven Fertigung .....	2
1.2	Verfahrensgruppen der additiven Fertigung .....	4
1.2.1	Sintern und Extrusion .....	5
1.2.2	Bindertechnologie und Laminieren .....	6
1.3	Funktionsprinzip des Fused Deposition Modelings (FDM) .....	11
1.3.1	Additive Extrusion mit Filament .....	12
1.3.2	Charakteristika des Fused Deposition Modelings .....	16
1.3.2.1	Oberflächen .....	16
1.3.2.2	Stützstrukturen und Baukammer .....	19
1.4	Funktionsprinzip des Fused Layer Modelings (FLM) .....	24
1.4.1	Werkstoffzuführung .....	27
1.4.2	Charakteristika des Fused Layer Modelings .....	30
1.4.2.1	Stützstrukturen und Bauraum .....	32
1.4.2.2	Roboterbasiertes Fused Layer Modeling .....	35
1.5	Funktionsprinzip des Selektiven Lasersinterns (SLS) .....	41
1.6	Hybride additive Fertigung mit Thermoplasten .....	45
1.6.1	Faserverstärkte additive Bauteile .....	45
1.6.2	Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) .....	52
<b>2</b>	<b>Polymere in der additiven Fertigung .....</b>	<b>57</b>
2.1	Geschichte der künstlichen Polymere (Kunststoffe) .....	61
2.1.1	Homopolymere .....	65
2.1.2	Copolymere .....	65
2.1.3	Organische und anorganische Polymere .....	65

2.2	Polymerchemie .....	66
2.3	Polymere als Werkstoffe .....	67
2.3.1	Thermoplaste .....	68
2.3.2	Duromere .....	69
2.3.3	Elastomere (Gummi) .....	70
2.3.4	Thermoplastische Elastomere (TPE) .....	71
2.4	Herstellverfahren von Polymeren .....	74
2.4.1	Kettenwachstumsreaktion .....	74
2.4.2	Stufenwachstumsreaktion .....	76
2.4.2.1	Polyadditionsreaktion .....	77
2.4.2.2	Polykondensationsreaktion .....	77
2.4.3	Biologische Polymerisation .....	80
2.5	Physikalische Eigenschaften von Polymeren .....	81
2.5.1	Viskoelastizität .....	81
2.5.2	Dynamisch-mechanische Analyse (DMA) .....	83
2.5.2.1	Vernetzungsdichte .....	87
2.5.2.2	Entropieelastizität .....	89
2.5.2.3	Relaxationszeiten und Temperatur .....	90
2.5.2.4	Beobachtbare Relaxationen .....	92
2.5.2.5	Freies Volumen .....	93
2.5.3	Kalorimetrische Messmethode .....	98
2.5.4	Schmelzeviskosität .....	104
2.5.5	Schmelze-Volumenfließrate .....	106
2.5.6	Wärmeübertragung .....	109
2.5.7	Strömungsmechanik .....	114
2.5.8	Thermische Zersetzungstemperatur .....	122
2.5.9	Härtemessung .....	123
2.5.10	Zugversuch .....	124
2.5.10.1	Wärmetönung im Zugversuch an Kunststoffen .....	125
2.5.10.2	Alterungsprüfungen .....	128
2.5.10.3	Temperaturabhängige Prüfung .....	128
2.5.11	Weitere zerstörende Testverfahren .....	128
2.5.12	Zerstörende Prüfung additiv gefertigter Bauteile .....	128

2.6	Thermoplaste	129
2.6.1	Einteilung von thermoplastischen Kunststoffen	132
2.6.2	Teilkristalline Thermoplaste	133
2.6.3	Glasartige Thermoplaste	134
2.6.4	Thermoplastische Vulkanisate	135
2.6.5	Thermoplastische Polymerblends	136
2.6.6	Hochleistungskunststoffe	137
2.6.6.1	Herstellverfahren von Hochleistungsthermoplasten	139
2.6.6.2	Stereochemie von Polymeren	140
2.6.6.3	Mechanische Eigenschaften	142
2.6.6.4	Thermische Stabilität	143
2.6.6.5	Kristallinität	144
2.6.6.6	Lösungseigenschaften	145
2.6.6.7	Anwendungen/Einsatzgebiete	145
2.6.6.8	Additive Fertigung mit Hochleistungsthermoplasten	145
2.6.7	Konstruktionskunststoffe	148
2.6.7.1	Polyamid (PA)	149
2.6.7.2	Polyethylenterephthalat (PET)	155
2.6.7.3	Polybutylenterephthalat (PBT)	159
2.6.7.4	Polyoxymethylen (POM)	161
2.6.7.5	Polycarbonat (PC)	165
2.6.7.6	Polymilchsäureester (PLA)	169
2.6.7.7	Thermoplastische Elastomere (TPE)	173
2.6.8	Standardkunststoffe	176
2.6.8.1	Polyethylen (PE)	176
2.6.8.2	Polypropylen (PP)	183
2.6.8.3	Polyvinylchlorid (PVC)	187
2.6.8.4	Polystyrol (PS)	191
2.6.8.5	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS)	196
2.6.8.6	Polymethylmethacrylat (PMMA)	199
2.7	Verarbeitungsverfahren von Thermoplasten	202
2.7.1	Spritzgießverfahren	203
2.7.2	Extrusionsverfahren	203

2.7.3	Thermoformen	204
2.7.4	Extruder	205
2.8	Formulierung von Thermoplasten	207
2.8.1	Farbeinstellung	208
2.8.2	Flammschutz	208
2.8.3	Stabilisatoren	209
2.8.4	Verarbeitungshilfsmittel	209
2.8.5	Füllstoffe	211
2.8.5.1	Partikelgefüllte Kunststoffe	211
2.8.5.2	Ruß	212
2.8.5.3	Kreide, Talkum	212
2.8.5.4	Glimmer (Mica)	213
2.8.5.5	Partikelverstärkte Thermoplaste in der additiven Fertigung	213
2.8.6	Faserige verstärkende Füllstoffe	214
2.8.6.1	Glasfasern	215
2.8.6.2	Kohlenstofffasern	216
2.8.6.3	Keramikfasern	217
2.8.6.4	Naturfasern	217
2.8.6.5	Polymerfaser	218
2.8.6.6	Thermische Beständigkeit und Witterungs- beständigkeit von Kunststofffaserverbundstoffen	218
2.9	Witterungsbeständige Thermoplaste	219
2.10	Leitfähige Thermoplaste/elektrisch isolierende Kunststoffe	220
2.10.1	Elektrisch passive isolierende Kunststoffe	220
2.10.2	Elektrisch aktive, leitfähige Kunststoffe	221
2.10.3	Leitfähige Kunststoffe in der additiven Fertigung	221
2.11	Brandgeschützte Thermoplaste	222
2.12	Geschäumte Thermoplaste	224
2.12.1	Schäumverfahren	225
2.12.2	Schaumextrusion	225
2.12.3	Thermoplast-Schaumguss-Verfahren (TSG)	226
2.12.4	MuCell-Verfahren	226
2.12.5	Geschäumte Thermoplaste in der additiven Fertigung	227

2.13	Thermoplaste mit Lebensmittelkontakt	227
2.14	Biokunststoffe, Biokompatibilität/-abbaubarkeit	229
2.15	Thermoplaste in medizinischen Anwendungen	229
2.15.1	Einsatz der additiven Fertigung mit Thermoplasten in medizinischen Anwendungen	230
2.15.2	Organe aus dem 3D-Drucker	232
<b>3</b>	<b>Besonderheiten der Thermoplastverarbeitung in der additiven Fertigung</b>	<b>241</b>
3.1	Extrusionsbasierte Verfahren (Material Extrusion, MEX)	242
3.1.1	Filamentextruder	243
3.1.2	Granulatrextruder (Pellet Extrusion)	244
3.1.3	Thermoplasteigenschaften	246
3.1.3.1	Erweichungs-/Schmelztemperatur	247
3.1.3.2	Wärmekapazität	247
3.1.3.3	Schmelzeviskosität/Schmelzevolumenfließrate	248
3.1.3.4	Verfestigungstemperatur/Verfestigungskinetik	248
3.1.3.5	Schwindung	250
3.1.4	Verfahrensbedingungen	251
3.1.4.1	Düsentemperatur	251
3.1.4.2	Düsengeometrie	252
3.1.4.3	Volumenaustragsgeschwindigkeit	255
3.1.4.4	Bauraumheizung	257
3.1.4.5	Bauplattformheizung	259
3.1.5	Druckprobleme	260
3.1.5.1	Haftung an der Bauteilplattform	260
3.1.5.2	Zwischenschichthaftung	262
3.1.5.3	Fadenbildung (Stringing) und Auslaufen (Oozing)	264
3.1.5.4	Verzug (Warping)	268
3.1.5.5	Unterextrusion	270
3.1.5.6	Überextrusion	273
3.1.6	Prozesssimulation	274
3.1.7	Stützmaterialien	276
3.1.8	Nachbearbeitungsverfahren	280

3.1.8.1	Entfernen von Stützmaterial	281
3.1.8.2	Oberflächenvergütung	282
3.1.8.3	Funktionalisierung (chemisch)	283
3.1.8.4	Konsolidierung (thermisch/chemisch)	283
3.1.8.5	Bauteileigenschaften	285
3.1.9	Software	300
3.1.10	Recycling von 3D-Druck-Materialien	302
3.1.11	Belastung der 3D-Druck-Materialien	304
3.1.11.1	Thermische Belastung	304
3.1.11.2	Mechanische Belastung	306
3.1.12	Anforderungen an die Produktionsumgebung	306
3.1.12.1	Maschinenauswahl	307
3.1.12.2	Arbeitsbereich	308
3.1.12.3	Arbeitssicherheit	308
3.1.12.4	Partikel/volatile organische Komponenten (VOC)	310
3.1.13	Qualitätssicherung	311
3.1.14	Normung	311
3.2	Selektives Lasersintern (SLS) von Kunststoffen	313
3.2.1	Verfügbare Werkstoffe	315
3.2.1.1	Pulverherstellungsverfahren	317
3.2.1.2	Pulverprüfverfahren	321
3.2.1.3	Thermische Alterung	325
3.2.2	Thermische Prozessführung	327
3.2.3	Belichtungsstrategie und -parameter	331
3.2.4	Anlagensystem und Prozesstechnik	333
3.2.5	Baujobvorbereitung (Pre-Processing)	338
3.2.5.1	CAD-Design	339
3.2.5.2	Konstruktionsempfehlungen für SLS-Bauteile	340
3.2.5.3	Slicing	342
3.2.5.4	Empfehlungen für Baujoblayout	344
3.2.6	Bauteilcharakteristik	346
3.2.7	Allgemeine Qualitätssicherung an SLS-Bauteilen	350
3.2.7.1	Gestaltabweichung	350

3.2.7.2	Mechanische Eigenschaften .....	358
3.2.7.3	Typische Bauteil- und Prozessfehler .....	359
3.2.8	Wirtschaftlichkeitsanalyse .....	363
3.2.9	Nachbearbeitungsverfahren (Post-Processing) .....	366
3.2.9.1	Baujob entpacken .....	367
3.2.9.2	Bauteile entpulvern .....	369
3.2.9.3	Bauteile glätten .....	370
3.2.9.4	Färben .....	372
3.2.10	Materialmanagement .....	374
3.2.11	Arbeitssicherheit .....	376
3.2.12	Beispielanwendungen .....	379
<b>4</b>	<b>Additive Baumaterialien und Applikationen im thermoplastischen Bereich .....</b>	<b>389</b>
4.1	Additive Baumaterialien und Wertschöpfungsketten .....	390
4.1.1	Extrusionsbasierte Verfahren (MEX) .....	390
4.1.1.1	Baumaterialien .....	390
4.1.1.2	Wertschöpfungsketten (Thermoplast, Abmischung, Filament) .....	391
4.1.2	Pulverbasierte Verfahren (SLS, HSS) .....	414
4.1.2.1	Baumaterialien .....	415
4.1.2.2	Wertschöpfungsketten aus Drucker und (zertifizierten) Materialien .....	419
4.2	Produkte und Anwendungen .....	422
4.2.1	Prototypen und Musterbauteile .....	422
4.2.1.1	Lüftungsgitter .....	422
4.2.1.2	Großformatige additive Fertigung im Designprozess ..	423
4.2.2	Verfahren mit verlorener Form .....	424
4.2.2.1	Lösliche Fused Deposition Modeling-Formen .....	424
4.2.2.2	Nachhaltige Einwegkaffeebecher .....	426
4.2.2.3	Hybrid additiv erzeugte Flugzeugsitze .....	427
4.2.3	Funktionale Bauteile .....	429
4.2.3.1	Lautloser Unterwasserantrieb .....	430
4.2.3.2	Integration von Lichtleitern (Clear Cast Integration) ..	431

4.2.4	Serienbauteile .....	432
4.2.4.1	Funktionales Werkzeuggehäuse .....	433
4.2.5	Möbel .....	435
4.2.5.1	Kleinformel und Leuchten .....	435
4.2.5.2	Stadtmobiliar .....	436
4.2.5.3	Erhöhung der Nutzbarkeit von IKEA-Produkten für Menschen mit Behinderung .....	437
4.2.5.4	Additive Fertigung als zirkuläres Fertigungsmodell ..	439
4.2.6	Ersatzteile und Zubehör .....	440
4.2.6.1	Ersatzteile für den Segway X2 .....	441
4.2.6.2	Miele-Zubehör .....	443
4.2.7	Transportwesen .....	444
4.2.7.1	Fahrzeugkarosserie mittels Fused Deposition Modeling .....	445
4.2.7.2	Fahrzeugrahmen und -karosserie mittels Big Area Additive Manufacturing .....	446
4.2.7.3	Elektromotorrad .....	447
4.2.7.4	Jetbetriebene Drohne .....	448
4.2.7.5	Konzept-Wohnmobil .....	449
4.2.8	Medizinische Anwendungen .....	451
4.2.8.1	Ventile für Atemmasken .....	451
4.2.8.2	Implantate aus Hochleistungskunststoff .....	452
4.2.8.3	Personenspezifische Prothesen und Orthesen .....	453
4.2.9	Sportequipment und Mode .....	454
4.2.9.1	Nachhaltiges Surfbrett .....	455
4.2.9.2	Kraftabsorbierender Fahrradhelm .....	456
4.2.9.3	Hygiene-Warnsystem .....	456
4.2.9.4	Brillenfassungen aus Polyamid .....	457
4.2.9.5	Personalisierte Handtaschen .....	458
4.2.10	Maschinenbau .....	459
<b>Index .....</b>		<b>463</b>