



Leseprobe

Andreas Gebhardt

Additive Fertigungsverfahren

Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling -
Produktion

ISBN (Buch): 978-3-446-44401-0

ISBN (E-Book): 978-3-446-44539-0

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44401-0>

sowie im Buchhandel.



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!

Informativ: News, wichtige Termine, Bookshop, neue Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.de

Andreas Gebhardt

Additive Fertigungsverfahren

Additive Manufacturing und 3D-Drucken
für Prototyping – Tooling – Produktion

5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Gebhardt

Geschäftsführer der CP – Centrum für Prototypenbau GmbH, Erkelenz/Düsseldorf

Professor an der Fachhochschule Aachen

Lehrgebiet: Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2016 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Coverbild: Arup/Davidfotografie

Satz: Manuela Treindl, Fürth

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-44401-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-44539-0

Vorwort

„Vom Labor in die Produktion“

„*Vom Spielzeug für Techniker zum Schlüssel für die schnelle Produktentwicklung*“ war 1995 das Vorwort der 1. Auflage dieses Buches überschrieben. Etwa sechs Jahre zuvor waren die ersten Stereolithographie-Maschinen in Europa installiert worden. Rapid Prototyping-Verfahren hatten sich seitdem in wenigen Jahren als effektive Werkzeuge für die schnellere Entwicklung besserer Produkte etabliert. Sie hatten sich gewandelt vom isoliert angewandten, technisch faszinierenden, aber wirtschaftlich nicht attraktiven Modellbauverfahren, zum geschwindigkeitsbestimmenden Element in der Produktentwicklungskette.

„*Vom Werkzeug für die schnelle Produktentwicklung zum Werkzeug für die schnelle Produktentstehung*“ wurde im Vorwort zur 2. Auflage die Entwicklung bis 2000 überschrieben. Triebfeder der Entwicklungen war der dringende Wunsch nach Bauteilen mit „Serieneigenschaften“. Dieser wurde durch die Entwicklung von Werkstoffen wie Metall, Sand, Keramik weitgehend erfüllt und durch Verfahren, die die Herstellung von Formen und Werkzeugen erlaubten unterstützt. Das Rapid Tooling erweiterte die Anwendung des Rapid Prototypings und verkürzte den mit traditionellen Methoden zeitaufwendigen und teuren „Schritt ins Werkzeug“ erheblich.

„*Generative Verfahren für die individuelle Fertigung*“ titelte die 3. Auflage 2007. Aufgrund des technischen Fortschritts, aber vor allem auch durch die Verifizierung des enormen Potenzials in immer weiteren Bereichen, hatte sich die direkte digitale Fertigung, das Rapid Manufacturing weiter etabliert. Dazu wurden neue Maschinen und Konzepte entwickelt: Der Prototyper wandelt sich zum Fabrikator. Die losgrößenunabhängige Fertigung von kundenspezifischen Serien mit Einzelteilcharakter wurde möglich und begann die Fertigungstechnik insgesamt zu revolutionieren.

„*Raus aus der Nische!*“ Die 4. Auflage beschreibt 2013 die (noch anhaltende) Verbreitung der Generativen Fertigungstechnik über alle Branchen und viele Anwendergruppen hinweg. Leistungsfähige Production Printer arbeiten in der Industrie und Fabber, kleine, preiswerte und meist selbst zu bauende 3D-Drucker, erschließen die additive Fertigung für semi Professionals und für Privatleute auch an entlegenen Orten.

Seriöse Journale und Tageszeitungen machen mit Drucker Erfolgsgeschichten auf. Drucker sind in aller Munde.

„*Vom Labor in die Produktion*“ greift die vorliegende 5. Auflage die anhaltend hochdynamische Entwicklung auf. Die Technik wird weiter verbessert, die Prozesse werden stabiler und vor allem reproduzierbar. Neue, auch erste kontinuierlich arbeitende, 3D-Druckverfahren drängen auf den Markt. Es entwickeln sich eine dezentrale weltumspannende private Anwenderlinie und eine Entwicklungslinie für Industrial Printer. Letztere reifen zu flexiblen additiven Fertigungssystemen heran. Eine wirkliche Massenproduktion von Einzelteilen ist damit realistisch.

Neben den notwendigen Aktualisierungen und Ergänzungen zeichnet dieses Buch vor allem diese Entwicklung nach.

Alle Aspekte der additiven Fertigungsverfahren sind weltweit Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Es kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass ein Wettbewerber die additiven Fertigungsverfahren nicht kennt oder nicht einsetzt.

Aachen im Oktober 2016

Andreas Gebhardt

Inhaltsverzeichnis

Widmung	V
Vorwort	VII
Über den Autor	IX
Danksagung.....	XI
1 Einordnung und Begriffsbestimmung	1
1.1 Systematik der Fertigungsverfahren.....	1
1.2 Systematik der Additiven Fertigungsverfahren.....	2
1.2.1 Begriffsbestimmungen.....	3
1.2.2 Eigenschaften der Additiven Fertigungsverfahren.....	3
1.3 Einteilung der Additiven Fertigungsverfahren	6
1.3.1 Rapid Prototyping.....	6
1.3.2 Rapid Manufacturing	8
1.3.2.1 Rapid Manufacturing – Direct Manufacturing.....	9
1.3.2.2 Rapid Manufacturing – Direct Tooling (Rapid Tooling – Prototype Tooling).....	9
1.3.3 Nicht-additive Verfahren – Indirect Prototyping und Indirect Tooling	10
1.3.4 Rapid Prototyping oder Rapid Manufacturing?	11
1.3.5 Begriffsvielfalt.....	12
1.3.6 Wie schnell ist Rapid?	13
1.4 Integration der Additiven Fertigungstechnik in den Produktentstehungsprozess.....	13
1.4.1 Additive Verfahren in der Produktentwicklung.....	14
1.4.2 Additive Verfahren für die stückzahl-unabhängige Produktion.....	15
1.4.3 Additive Verfahren für die individualisierte Produktion	15
1.5 Maschinen für die Additive Fertigung	16
1.5.1 Fabber, Personal 3D-Drucker/Personal 3D Printer	17

1.5.1.1	Fabber	18
1.5.1.2	Personal 3D-Drucker/Personal 3D Printer	18
1.5.2	Professional 3D-Drucker/Professional 3D Printer	18
1.5.3	Production 3D-Drucker/Production 3D Printer oder Produktionsmaschinen	18
1.5.4	Industrial 3D-Drucker	19
1.5.5	Maschinenklassen und Bauteileigenschaften	19
2	Merkmale der Additiven Fertigungsverfahren	21
2.1	Verfahrensgrundlagen	21
2.2	Erzeugung der mathematischen Schichtinformation	26
2.2.1	Beschreibung der Geometrie durch einen 3D-Datensatz	27
2.2.1.1	Datenfluss und Schnittstellen	27
2.2.1.2	Modellierung dreidimensionaler Körper mittels 3D-CAD	29
2.2.1.2.1	CAD-Modelltypen	30
2.2.1.2.2	Anforderungen an CAD-Systeme	32
2.2.1.3	Modellierung dreidimensionaler Körper aus Messwerten	33
2.2.2	Erzeugung der geometrischen Schichtinformationen der Einzelschichten	35
2.2.2.1	STL-Format	35
2.2.2.1.1	Fehler im STL-File	37
2.2.2.2	CLI/SLC-Format	40
2.2.2.3	PLY- und VRML-Format	43
2.2.2.4	AMF-Format	45
2.3	Physikalische Prinzipien zur Erzeugung der Schicht	47
2.3.1	Generieren aus der flüssigen Phase	48
2.3.1.1	Photopolymerisation – Stereolithographie (SL)	48
2.3.1.2	Grundlagen der Polymerisation	49
2.3.1.2.1	Laserinduzierte Polymerisation	51
2.3.1.2.2	Vorteile der Stereolithographie	57
2.3.1.2.3	Nachteile der Stereolithographie	59
2.3.2	Generieren aus der festen Phase	60
2.3.2.1	Schmelzen und Verfestigen von Pulvern und Granulaten – Sintern (Lasersintern, LS), Schmelzen	60
2.3.2.1.1	Materialien für das Sintern und Schmelzen	61
2.3.2.1.2	Vor- und Nachteile des Sinterns und Schmelzens	66
2.3.2.1.3	Proprietäre oder handelsübliche Pulver?	67
2.3.2.2	Ausschneiden aus Folien und Fügen – Layer Laminate Manufacturing (LLM)	68
2.3.2.2.1	Vor- und Nachteile der Schichtverfahren (LLM)	69

2.3.2.3	Schmelzen und Verfestigen aus der festen Phase – Fused Layer Modeling (FLM)	71
2.3.2.3.1	Extrudierende und ballistische Verfahren	71
2.3.2.3.2	Vor- und Nachteile der FLM-Verfahren	74
2.3.2.4	Verkleben von Granulaten mit Bindern – 3D Printing (3DP) – Pulver-Binder-Verfahren.	74
2.3.2.4.1	Vor- und Nachteile von Pulver-Binder-Verfahren	75
2.3.3	Generieren aus der Gasphase	76
2.3.3.1	Aerosoldruckverfahren	76
2.3.3.1.1	Vor- und Nachteile von Aerosoldruckverfahren	77
2.3.3.2	Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD).	77
2.3.4	Sonstige Verfahren	79
2.3.4.1	Sonolumineszenz.	79
2.3.4.2	Elektroviskosität.	80
2.4	Elemente zur Erzeugung der physischen Schicht	80
2.4.1	Bewegungselemente.	81
2.4.1.1	Plotter	81
2.4.1.2	Scanner	82
2.4.1.3	Parallelroboter (Delta Roboter).	83
2.4.2	Generierende und konturierende Elemente.	84
2.4.2.1	Laser	84
2.4.2.2	Druckköpfe	86
2.4.2.3	Extruder	90
2.4.2.4	Schneidmesser	90
2.4.2.5	Fräser	91
2.4.3	Schichterzeugendes Element.	91
2.5	Klassifizierung der additiven Fertigungsverfahren.	93
2.6	Zusammenfassende Betrachtung der theoretischen Potenziale der additiven Fertigungsverfahren	95
2.6.1	Werkstoffe	96
2.6.2	Bauteileigenschaften	98
2.6.3	Details	98
2.6.4	Genauigkeiten	99
2.6.5	Oberflächengüte	100
2.6.6	Entwicklungspotenzial	100
2.6.7	Kontinuierliche 3D-Modellierung	101
3	Additive Fertigungsanlagen für Rapid Prototyping, Direct Tooling und Direct Manufacturing	103
3.1	Polymerisation – Stereolithographie (SL).	107
3.1.1	Maschinenspezifische Grundlagen.	107

3.1.1.1	Laser-Stereolithographie	107
3.1.1.2	Digital Light Processing (DLP)	117
3.1.1.3	PolyJet und Multi-Jet Modeling (MJM) und Paste Polymerization	119
3.1.1.4	Continuous Liquid Interface Production (CLIP)	119
3.1.2	Übersicht: Polymerisation – Stereolithographie	120
3.1.3	Stereo Lithography Apparatus (SLA) – 3D Systems	121
3.1.4	STEREOS – EOS GmbH	133
3.1.5	Stereolithographie – Fockele & Schwarze (F&S)	134
3.1.6	Mikrostereolithographie – microTEC	135
3.1.7	Solid Ground Curing – Cubital	138
3.1.8	Digital Light Processing – EnvisionTEC	139
3.1.9	Polymerdrucken – Stratasys/Objet	146
3.1.10	Multi-Jet-Modeling (MJM) – ProJet – 3D Systems	153
3.1.11	Digital Wax	158
3.1.12	Film Transfer Imaging – 3D Systems	161
3.1.13	Sonstige Polymerisationsverfahren	164
3.1.13.1	Paste Polymerization – 3D Systems/OptoForm	164
3.2	Sintern/Selektives Sintern – Schmelzen im Pulverbett	164
3.2.1	Maschinenspezifische Grundlagen	165
3.2.2	Übersicht: Sintern – Schmelzen	170
3.2.3	Lasersintern – 3D Systems	172
3.2.3.1	Laser Sintering, SLS – 3D Systems	172
3.2.3.2	Direct Metal Printing DMP-3D Systems	182
3.2.4	Lasersintern – EOS GmbH	189
3.2.5	Laserschmelzen – ReaLizer GmbH	201
3.2.6	Laserschmelzen – SLM Solutions GmbH	206
3.2.7	Laserschmelzen – Renishaw LTD	209
3.2.8	LaserCusing – ConceptLaser GmbH	212
3.2.9	Laser Metal Fusion (LMF) – TRUMPF	218
3.2.10	Elektronenstrahlsintern – ARCAM	221
3.2.11	Selective Mask Sintering (SMS) – Sintermask	227
3.2.12	Lasersintern – Phenix	228
3.3	Beschichten – Schmelzen mit der Pulverdüse	229
3.3.1	Verfahrensprinzip	230
3.3.1.1	Pulverdüsenkonzepte	232
3.3.1.2	Prozessüberwachung und -regelung	233
3.3.2	Laser Engineered Net Shaping (LENS) – OPTOMECC	233
3.3.3	Laser Metal Deposition (LMD), TRUMPF	237
3.4	Schicht-Laminat-Verfahren – Layer Laminate Manufacturing (LLM)	242
3.4.1	Übersicht: Schicht-Laminat-Verfahren	242

3.4.2	Maschinenspezifische Grundlagen	242
3.4.3	Laminated Object Manufacturing (LOM) – Cubic Technologies	247
3.4.4	Rapid Prototyping System (RPS) – Kinergy	252
3.4.5	Selective Adhesive and Hot Press Process (SAHP) – Kira	252
3.4.6	Layer Milling Process (LMP) – Zimmermann	252
3.4.7	Stratoconception – rp2i	253
3.4.8	Selective Deposition Lamination (SDL) – Mcor	254
3.4.9	Plastic Sheet Lamination – Solido	258
3.4.10	Sonstige Schicht-Laminat-Verfahren	258
3.4.10.1	Bauteile aus Metalllamellen – Laminated Metal Prototyping	258
3.5	Extrusionsverfahren – Fused Layer Modeling (FLM)	259
3.5.1	Übersicht: Extrusionsverfahren	259
3.5.2	Fused Deposition Modeling (FDM) – Stratasys	260
3.5.3	Wachsprinter – Solidscape	272
3.5.4	Multi-Jet-Modeling (MJM) – ThermoJet – 3D Systems	276
3.5.5	ARBURG Kunststoff-Freiformen (AF) – ARBURG GmbH	276
3.6	Three Dimensional Printing (3DP)	282
3.6.1	Übersicht: 3D Printing	282
3.6.2	3D Printer – 3D Systems/Z-Corporation	283
3.6.3	Metall und Formsand Printer – ExOne	287
3.6.3.1	Metall-Linie: Direct Metal Printer	289
3.6.3.2	Formsand-Linie: Direct Core and Mold Making Machine	292
3.6.4	Direct Shell Production Casting (DSPC) – Soligen	295
3.6.5	3D-Drucksystem – Voxeljet	298
3.6.6	Maskless Masoscale Material Deposition (M3D) – OPTOMECC	302
3.7	Hybridverfahren	306
3.7.1	Laserauftragsschweißen und Fräsen – Controlled Metal Build Up (CMB) – Röders	307
3.7.2	Laminieren und Ultraschallschweißen – Ultrasonic Consolidation – Fabrisonic/Solidica	310
3.7.3	Metallpulverauftragsverfahren (MPA) – Hermle	314
3.7.4	Hybrid (Additive and Subtractive manufacturing) – DGM-MORI	319
3.7.5	Extrudieren und Fräsen – Big Area Additive Manufacturing (BAAM) – Cincinnati	323
3.8	Zusammenfassende Betrachtung der Additiven Fertigungsverfahren	328
3.8.1	Charakteristische Eigenschaften der Additiven Fertigungsverfahren im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren	329
3.8.2	Genauigkeit	332
3.8.3	Oberflächen	335
3.8.4	Benchmark-Tests und User-Parts	339

3.9	Entwicklungsziele	342
3.10	Folgeprozesse	343
3.10.1	Zielwerkstoff Kunststoff	343
3.10.2	Zielwerkstoff Metall	343
4	Rapid Prototyping	345
4.1	Einordnung und Begriffsbestimmung	345
4.1.1	Eigenschaften von Prototypen	345
4.1.2	Charakteristika des Rapid Prototyping	347
4.2	Strategische Aspekte beim Einsatz von Prototypen	348
4.2.1	Produktentwicklungsschritte	348
4.2.2	Time to market	348
4.2.3	Frontloading	349
4.2.4	Digitales Produktmodell	352
4.2.5	Die Grenzen der physischen Modellierung	353
4.2.6	Kommunikation und Motivation	355
4.3	Operative Aspekte beim Einsatz von Prototypen	355
4.3.1	Rapid Prototyping als Werkzeug zur schnellen Produktentwicklung	356
4.3.1.1	Modelle	356
4.3.1.2	Modellklassen	356
4.3.1.3	Modellklassen und Additive Verfahren	360
4.3.1.4	Zuordnung von Modellklassen und Modelleigenschaften zu den Familien der <i>Additiven Fertigungsverfahren</i>	364
4.3.2	Anwendung des Rapid Prototyping in der industriellen Produktentwicklung	367
4.3.2.1	Beispiel: Pumpengehäuse	367
4.3.2.2	Beispiel: Büroleuchte	369
4.3.2.3	Beispiel: Einbauleuchtenfassung	373
4.3.2.4	Beispiel: Modellbaggerarm	373
4.3.2.5	Beispiel: LCD-Projektor	377
4.3.2.6	Beispiel: Kapillarboden für Blumentöpfe	379
4.3.2.7	Beispiel: Gehäuse einer Kaffeemaschine	380
4.3.2.8	Beispiel: Ansaugkrümmer eines Vierzylindermotors	381
4.3.2.9	Beispiel: Cocktailbecher	382
4.3.2.10	Beispiel: Spiegeldreieck	382
4.3.2.11	Beispiel: Cabrioverdeck	383
4.3.3	Rapid Prototyping Modelle zur Visualisierung von 3D-Daten	387
4.3.4	Rapid Prototyping in der Medizin	387
4.3.4.1	Charakteristika medizinischer Modelle	387
4.3.4.1.1	Große Datenmengen	388

4.3.4.1.2	Nicht exakt definierte Modellabmessungen	388
4.3.4.1.3	Mehrere Modelle	388
4.3.4.1.4	Transparenz	388
4.3.4.1.5	Sterilisierbarkeit	389
4.3.4.1.6	Biokompatibilität	389
4.3.4.1.7	Stützstrukturen	389
4.3.4.1.8	Unverbundene Modellteile	389
4.3.4.2	Anatomische Faksimiles	390
4.3.4.3	Beispiel: Anatomisches Faksimile für eine Umstellungsosteotomie	392
4.3.5	Rapid Prototyping in Design, Kunst und Architektur	393
4.3.5.1	Modellbildung in Design und Kunst	393
4.3.5.2	Beispiel Kunst: Computer-Skulptur	393
4.3.5.3	Beispiel Design: Flaschenöffner	394
4.3.5.4	Angewandte Kunst – Bildhauerei und Plastiken	395
4.3.5.5	Beispiel Archäologie: Büste der Königin Teje	397
4.3.5.6	Modellbildung in der Architektur	398
4.3.5.7	Beispiel Architektur: Deutscher Pavillon für die Expo '92	399
4.3.5.8	Beispiel Architektur: Ground Zero	400
4.3.5.9	Beispiel Architekturdenkmäler: Dokumentation von baugeschichtlich relevanten Gebäuden	401
4.3.6	Rapid Prototyping zur Überprüfung von Rechenverfahren	402
4.3.6.1	Spannungsoptische und thermoelastische Spannungsanalyse	402
4.3.6.1.1	Spannungsoptische Spannungsanalyse	403
4.3.6.1.2	Thermoelastische Spannungsanalyse (THESA)	404
4.3.6.2	Beispiel: Spannungsoptische Spannungsanalyse an einem Kipphebel eines Lkw-Verbrennungsmotors	404
4.3.6.3	Beispiel: Thermoelastische Spannungsanalyse zum Festigkeitsnachweis an einer Automobilfelge	406
4.4	Ausblick	409
5	Rapid Tooling	411
5.1	Einordnung und Begriffsbestimmung	411
5.1.1	Direkte und indirekte Verfahren	412
5.2	Eigenschaften additiv gefertigter Werkzeuge	414
5.2.1	Strategische Aspekte beim Einsatz Additiver Werkzeuge	414
5.2.1.1	Schnelligkeit	414
5.2.1.2	Umsetzung neuer technischer Konzepte	415

5.2.2	Konstruktive Eigenschaften additiv gefertigter Werkzeuge	416
5.2.2.1	Prototypwerkzeuge	417
5.2.2.1.1	Weiche gegossene Werkzeuge	417
5.2.2.1.2	Harte gegossene Werkzeuge	418
5.2.2.1.3	Harte direkt gefertigte Werkzeuge und Werkzeugeinsätze	418
5.2.2.2	Bereitstellung der Daten	420
5.3	Indirekte Rapid Tooling-Verfahren – Abformverfahren und Folgeprozesse	421
5.3.1	Eignung Additiver Verfahren zur Herstellung von Urmodellen für Folgeprozesse	422
5.3.2	Indirekte Verfahren zur Herstellung von Werkzeugen für Kunststoffbauteile	423
5.3.2.1	Abgießen in weiche Werkzeuge oder Formen	424
5.3.2.1.1	Vakuumgießen	424
5.3.2.1.2	Nylongießen	427
5.3.2.1.3	Silikonabguss	428
5.3.2.1.4	Photocasting	428
5.3.2.1.5	Spincasting	428
5.3.2.2	Abgießen in harte Werkzeuge	429
5.3.2.2.1	Metallspritzen	429
5.3.2.2.2	Gießharzwerkzeuge	430
5.3.2.2.3	Maskenwerkzeuge, Polyurethangießen	431
5.3.2.2.4	Niederdruckspritzgießen, Reaction Injection Molding (RIM)	432
5.3.2.2.5	3D Keltool – Course4 Technology	432
5.3.2.3	Andere Abformverfahren für harte Werkzeuge	433
5.3.2.3.1	Ford Sprayform-Verfahren	433
5.3.2.3.2	Rapid Solidification Process, RSP	433
5.3.3	Indirekte Verfahren zur Herstellung von Metallbauteilen	434
5.3.3.1	Der Feingussprozess mit additiven Prozessschritten	434
5.3.3.2	Werkzeuge durch Feinguss von Rapid Prototyping Urmodellen	437
5.4	Direkte Rapid Tooling-Verfahren	438
5.4.1	Prototype Tooling – Werkzeuge auf der Basis von Kunststoff – 3D-Druckverfahren	438
5.4.1.1	Ausgießen von 3D gedruckten Bauteilen	438
5.4.1.2	3D gedruckte Werkzeugeinsätze	439
5.4.1.2.1	<i>ACES Injection Molding</i> , AIM	439
5.4.1.2.2	3D printed injection molding, 3D-IM	440
5.4.1.3	Tiefziehen oder Thermoformen	441

5.4.1.4	Herstellung von Kernen und Formen für den Metallguss.	442
5.4.1.4.1	Sandguss.	442
5.4.1.4.2	Druckguss.	443
5.4.2	Metallwerkzeuge auf der Basis von mehrstufigen additiven Prozessen.	444
5.4.2.1	Selektives Lasersintern von Metallen – IMLS – 3D Systems.	444
5.4.2.2	Paste Polymerization – 3D Systems.	445
5.4.2.3	3D Printing von Metallen – ExOne GmbH.	445
5.4.3	Direct Tooling – Werkzeuge auf der Basis von Metall 3D-Druckverfahren.	446
5.4.3.1	Mehrkomponenten-Metallpulver-Lasersintern.	446
5.4.3.2	Einkomponenten-Metallpulver-Verfahren – Sintern und Generieren.	447
5.4.3.2.1	DirectTool – EOS GmbH.	447
5.4.3.2.2	Laserschmelzen – SLM-Solutions.	448
5.4.3.2.3	LaserCusing – Concept Laser.	449
5.4.3.2.4	TruPrint und Direktes Laserformen – TRUMPF.	450
5.4.3.2.5	Elektronenstrahlsintern – ARCAM.	451
5.4.3.2.6	Lasersintern – 3D Systems/Phenix.	451
5.4.3.3	Laser-Generieren mit Pulver und Draht.	452
5.4.3.3.1	Laser Engineered Net Shaping (LENS) – OPTOMECH.	452
5.4.3.3.2	Laser Metal Deposition (LMD).	453
5.4.3.4	Schicht-Laminat-Verfahren – Metalllamellenwerkzeuge – Laminated Metal Tooling.	454
5.4.3.4.1	Ultrasonic Consolidation – Fabrisonic/Solidica.	454
5.4.3.4.2	Lamellenwerkzeug – Weihbrecht.	454
5.5	Ausblick.	454
6	Direct Manufacturing – Rapid Manufacturing.	457
6.1	Einordnung und Begriffsbestimmungen.	458
6.1.1	Begriffe.	458
6.1.2	Vom Rapid Prototyping zum Rapid Manufacturing.	459
6.1.3	Workflow für das Rapid Manufacturing.	461
6.1.4	Anforderungen an die direkte Fertigung.	461
6.2	Potenziale der additiven Fertigung von Endprodukten.	462
6.2.1	Erhöhte Konstruktionsfreiheit.	462
6.2.1.1	Erweiterte konstruktive und gestalterische Möglichkeiten.	462
6.2.1.2	Geometrie- und Funktionsintegration.	464

6.2.1.3	Neuartige Konstruktionselemente	464
6.2.2	Herstellung traditionell nicht herstellbarer Produkte.	465
6.2.3	Variation von Massenprodukten	466
6.2.4	Personalisierung von Massenprodukten	467
6.2.4.1	Passive Personalisierung – Hersteller Personalisierung	468
6.2.4.2	Aktive Personalisierung – Kunden Personalisierung . .	470
6.2.5	Realisierung neuer Werkstoffe	471
6.2.6	Realisierung neuer Fertigungsstrategien.	472
6.2.7	Entwurf neuer Arbeits- und Lebensformen	474
6.3	Anforderungen an additive Verfahren für die Fertigung	475
6.3.1	Anforderungen an die additive Herstellung eines Bauteils	475
6.3.1.1	Prozess	475
6.3.1.2	Materialien	477
6.3.1.3	Organisation	479
6.3.1.4	Konstruktion.	480
6.3.1.5	Qualitätssicherung.	480
6.3.1.6	Logistik	481
6.3.2	Anforderungen an die additive Serienfertigung mit heutigen Verfahren.	481
6.3.2.1	Prozess	481
6.3.2.2	Materialien	483
6.3.2.3	Organisation	484
6.3.2.4	Konstruktion.	484
6.3.2.5	Qualitätssicherung.	484
6.3.2.6	Logistik	485
6.3.3	Zukünftige Anforderungen an die additive Serienfertigung	485
6.3.3.1	Prozess	485
6.3.3.2	Materialien	487
6.3.3.3	Organisation	488
6.3.3.4	Konstruktion.	489
6.3.3.5	Qualitätssicherung.	490
6.3.3.6	Logistik	491
6.4	Fertigungsanlagen zur Realisierung des Rapid Manufacturing.	492
6.4.1	Additive Fertigungsanlagen als Elemente einer Fertigungskette . .	492
6.4.1.1	Industrielle Komplettfertigung.	493
6.4.1.2	Individuelle Komplettfertigung (Personal Fabrication) . .	495
6.4.2	3D-Drucker als Flexible AM-Systeme (FAMS)	496
6.4.2.1	Vom Personal 3D-Drucker zum Flexiblen Additive Manufacturing System, FAMS	497
6.4.2.2	Concept Laser, Factory of Tomorrow	498
6.4.2.3	EOS M400	499

6.4.2.4	Additive Industries (AI) MetalFAB1	499
6.5	Anwendungen des Direct Manufacturing	501
6.5.1	Anwendungsfelder nach Werkstoffen	501
6.5.1.1	Metallische Werkstoffe und Legierungen	501
6.5.1.2	Hochleistungskeramiken	502
6.5.1.3	Kunststoffe	504
6.5.1.4	Neue Werkstoffe	504
6.5.2	Anwendungsfelder nach Branchen	505
6.5.2.1	Werkzeugbau	505
6.5.2.2	Gießereiwesen	507
6.5.2.2.1	Dentaltechnik	508
6.5.2.2.2	Schmuckindustrie	509
6.5.2.3	Medizinische Geräte und Hilfsmittel, Medizintechnik ..	511
6.5.2.3.1	Zahnspangen: Aligner – Invisalign	511
6.5.2.3.2	Hörgeräteschalen, Otoplastiken	512
6.5.2.3.3	Technische Medizingeräte	514
6.5.2.4	Design und Kunst	515
6.5.2.5	Automobilbau	521
6.6	Perspektiven	524
7	Sicherheitsvorschriften und Umweltschutz	527
7.1	Gesetzliche Grundlagen für das Betreiben und das Herstellen von Generativen Fertigungsanlagen und den Umgang mit den zugehörigen Werkstoffen	529
7.1.1	Baurecht	529
7.1.2	Wasserrecht	530
7.1.3	Gewerberecht	531
7.1.4	Immissionsschutzrecht	533
7.1.5	Abfallrecht	534
7.1.6	Chemikalienrecht	535
7.1.6.1	Sicherheitsdatenblätter	537
7.1.6.2	REACH	538
7.2	Anmerkungen zu Materialien für die Generative Fertigung	539
7.3	Anmerkungen zur Benutzung von additiv gefertigten Bauteilen	541
8	Aspekte zur Wirtschaftlichkeit	543
8.1	Strategische Aspekte	544
8.1.1	Strategische Aspekte für den Einsatz additiver Verfahren in der Produktentwicklung	544
8.1.1.1	Qualitative Ansätze	544
8.1.1.2	Quantitative Ansätze	545

8.2	Operative Aspekte	546
8.2.1	Auswahl geeigneter additiver Fertigungsverfahren	547
8.2.2	Ermittlung der Kosten von Additiv-Manufacturing-Verfahren	547
8.2.2.1	Variable Kosten	548
8.2.2.2	Fixkosten	550
8.2.3	Charakteristika additiver Fertigungsverfahren und ihre Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit	553
8.3	Make or buy?	559
9	Zukünftige Rapid Prototyping-Verfahren	561
9.1	Mikrobauteile	561
9.1.1	Mikrobauteile aus Metall und Keramik	562
9.1.2	Mikrobauteile aus Metall und Keramik mittels Laserschmelzen	562
9.1.2.1	Schmelzvorgang beim selektiven Laserschmelzen	563
9.1.2.2	Mikrostrukturen aus Metallpulver	564
9.1.2.3	Mikrostrukturen aus Keramikpulver	566
9.2	Contour Crafting	569
9.3	D-Shape-Prozess	570
9.4	Selective Inhibition of Sintering (SIS)	572
9.4.1	SIS-Polymer-Prozess	572
9.4.2	SIS-Metall-Prozess	573
9.4.3	Continuous Liquid Interface Production (CLIP) – Carbon 3D	575
9.5	Fazit, Trends und Ausblick	578
9.5.1	Trends	578
9.5.2	Ausblick	578
10	Anhang	581
	Kritische Erfolgsfaktoren und Wettbewerbsstrategien	581
	Wirtschaftlichkeitsmodell nach Siegart und Singer	582
	Technische Daten und Informationen	587
	CAD-Systeme und Software für die additive Fertigung	588
	Additive Fertigungsanlagen (Prototyper und Fabrikatoren)	588
	Werkstoffe für additive Prozesse und Gießharze	589
	Begriffe und Abkürzungen	668
11	Literaturverzeichnis	679
	Stichwortverzeichnis	689

3.2.4 Lasersintern – EOS GmbH

EOS(INT) P: Formiga P 110, P 396, P 760, P 800

EOS(INT) M: PRECIOUS M 080, M 100, M 280, M 290, M 400

EOSINT S: s750

Electro Optical Systems GmbH (EOS), Krailing-München, Deutschland

Kurzbeschreibung

Additive Anlagen zum direkten Versintern von Kunststoffen (P) und Metallen (M). Die Maschinen arbeiten nach dem Laser-Scanner-Prinzip. Ein Laser scannt die Oberfläche des Pulverbetts und schmilzt die Partikel an oder auf, die nach Erstarrung eine Schicht bilden. Nach Absenkung der Bauplattform und Neubeschichtung wird der Prozess erneut durchlaufen, bis das Bauteil fertiggestellt ist. Verfahrensbedingt sind keine Stützen notwendig.

Für die Verarbeitung von Kunststoffen und Metallen gibt es für den jeweiligen Werkstoff optimierte Maschinen.

Maschinen zur Verarbeitung von Gießereisanden werden auf der Internetseite der Firma nicht mehr angeboten. Die entsprechenden Informationen sind im Abschnitt 3.2.4 „Lasersintern – EOS“ der 4. Auflage dieses Buches zu finden.

Anwendungsbereich

Kunststoffe (EOS(INT) P):

Konzeptmodelle, Funktionsprototypen, Endprodukte aus Kunststoff direkt oder aus Metall über Feinguss

Metalle (EOS(INT) M):

Technische Prototypen, Direktes Tooling (Endprodukte über Tooling)

Entwicklungsstand

Kommerzialisiert seit 1994 (P) und seit 1995 (M, S).

Historisches

EOS wurde 1989 im Rahmen eines Projektes mit der BMW AG zur Entwicklung einer Stereolithographie-Anlage von Dr. Langer gegründet. Schon nach der ersten Stereolithographie-Maschine 1991 wurde eine Sintermaschine zum Kunststoff-sintern entwickelt und zur EOSINT-Modellreihe ausgebaut. Die EOS(INT)- P-Baureihe bezeichnet Maschinen zum Versintern von Polystyrol und Polyamid. Sie wurde 1994 mit der P 350 begründet und führte über die P 360, P 380 zur P 385 (2005) und zur P 396 (2014). Zur Baureihe gehört auch die größte Kunststoff-Sintermaschine, die Doppel-Laseranlage P 700 (1999) in der aktuellen Version als P 760.

EOS(INT)-M, die Baureihe zum Direktversintern von pulverförmigen Metalllegierungen und Metallen, startete 1994 mit dem Prototypen M 160. Es folgten EOS M 250/M250 X^{tended}, M270 (2004) und M 280 (2010) und M 400 (2014).

Zum Versintern von Formsanden wurde aus der P 350, P 760 und P 800 sowie die S 350 eine Anlage zur Herstellung von (vorzugsweise) Kernen für den Sandguss entwickelt. Darauf folgten die Doppel-Laseranlagen EOSINT S750. Die Sandlinie wird auf der Internetseite der Firma nicht mehr aktiv beworben.

Bis zur Aufgabe des Stereolithographie-Geschäftes war EOS weltweit die einzige Firma, die zugleich Stereolithographie- und Sintermaschinen baute.

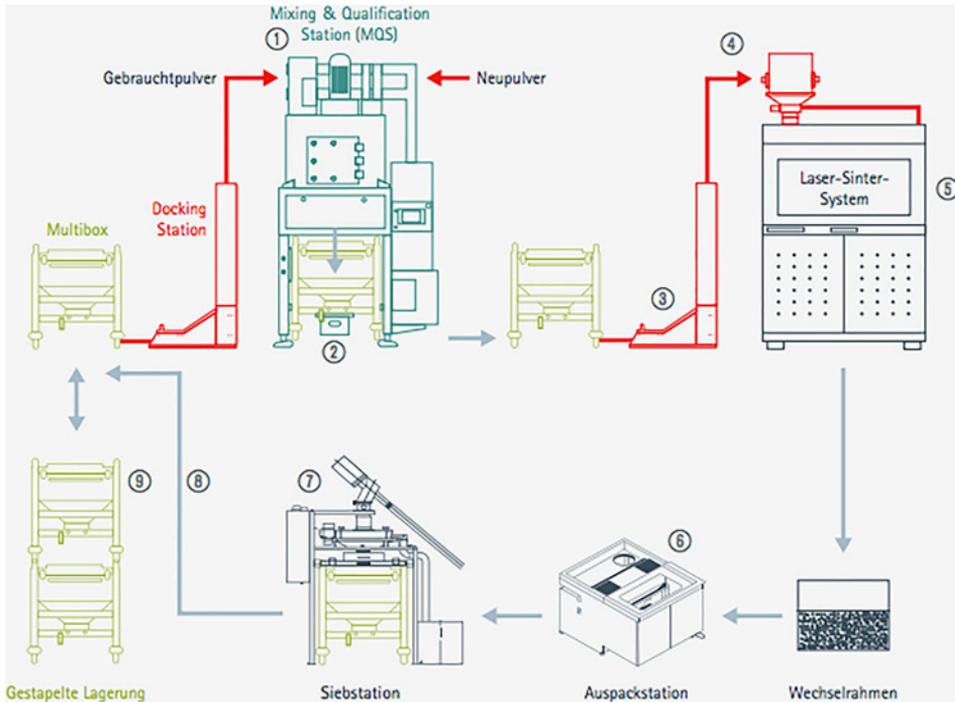
Strategien/Entwicklungspartner

EOS setzt auf die Optimierung eines Maschine-Werkstoff-Systems. Die Baureihe P ist für die Verarbeitung von Kunststoffen ausgelegt, die Baureihe M für Metalle und die Baureihe S für Sande. Die Leistung der Laser, die Scanner und die Scanstrategien sowie die Materialhandhabungs- und Beschichtungssysteme sind auf das jeweilige Material abgestimmt. Details wie Stickstoffgeneratoren sind nur dann vorhanden, wenn das Material es erfordert. EOS setzt auf Entwicklungspartnerschaften mit Materialherstellern, wie z. B. Electrolux (Finnland), mit Softwarelieferanten und mit dem Maschinenhersteller TRUMPF. Anfang 2004 konnte ein langjähriger Patentstreit mit 3D Systems gütlich beigelegt werden. Dem Vernehmen nach wird 3D Systems auf der Basis dieser Vereinbarung die Doppel-Lasertechnologie von EOS einsetzen. Seit Ende 2005 gibt es eine Kooperation mit 3D Micromac, Chemnitz, zur gemeinsamen Anwendung des Mikro-Lasersinterns im Rahmen eines Technologie- und Dienstleistungszentrums.

EOS fokussiert strategisch auf den Markt des Rapid Manufacturing und besetzt dazu aktiv das Themenfeld e-Manufacturing, das auch als Wortmarke geschützt ist. Die Maschinen können durch Zusatzmodule, z. B. IPCM P/M plus (Integrated Process Chain Management, Plastic/Metall) zum Pulvermanagement und zum Auspacken, entsprechend zu Fertigungsanlagen ausgebaut werden (Bild 3.36).

Datenformate/Software

Die Maschinen lesen vollständige STL- und Konturdaten (CLI, Common Layer Interface) ein. Optional gibt es auch Interfaces für Standardformate. Die Software ist unter dem Name EOS RP-Tools zusammengefasst. Sie umfasst auch die Datenaufbereitungssoftware EOSPACE (V3.0, 2005) zur optimierten, automatischen Platzierung von Bauteilen im Bauraum. Alternativ stehen die Softwarepakete Magics von Materialise und Expert Series von Deskarts zur Verfügung. Die EOS Prozess-Software heißt PSW (V3.7). Sie enthält eine Vielzahl von Features für eine optimale Bauteilgenauigkeit, -qualität und Baugeschwindigkeit sowie für eine optimierte Systemproduktivität und Benutzerfreundlichkeit.



1. Mischstation
2. Sensor gesteuerte Bodenklappe. Entleerung in eine Multibox
3. Docking-Station zum Laser-Sinter-System
4. Adapter für Pulverbehälter (EOS P 3 oder EOSINT P 7)
5. Laser-Sinter-System
6. Auspackstation mit Aufnahme für den Wechselrahmen
7. Siebstation mit Entleerung in eine Multibox
8. Rückführung Multibox zur Mischstation
9. Gegebenenfalls gestapelte Lagerung von Multiboxen

Bild 3.36 IPCM P plus (Integrated Process Chain Management)
Integriertes Werkstoffmanagement für EOS-Polymer-Systeme
Quelle: EOS GmbH

Prinzip der Schichtgenerierung

Das Prinzip der Schichtgenerierung entspricht dem in Abschnitt 3.2.1 „Maschinenspezifische Grundlagen“ beschriebenen, für das Lasersintern typischen Verfahren. Die Maschine arbeitet nach dem Laser-Scanner-Verfahren. Insbesondere für den Metallprozess wurde das ursprünglich für die Stereolithographie entwickelte *Skin and Core*-Verfahren derart modifiziert, dass für die Außen- und für die Innenstruktur unterschiedliche optimale Bauparameter vorgegeben werden können.

Die Scanstrategie ist dem jeweiligen Material angepasst.

Bauart/Konstruktion

EOSINT P – Kunststoff-Sintermaschinen

Die EOS P Maschinen arbeiten nach dem Laser-Scanner-Prinzip. Sie verfügen über CO₂-Laser von 30 W (P 110), 70 W (P 396) und 2 × 50 W (P 760 und P 800). Zur Steigerung der Abbildungsqualität werden Planfeldlinsen (F-Theta-Linse) eingesetzt. Verfügbar ist auch ein Dual Fokus Modul, mit dem der Strahldurchmesser während des Baus verändert werden kann. Die Konturierung kann so sehr präzise aber langsamer erfolgen, während das Auffüllen der Flächen mit größerem Strahldurchmesser und damit deutlich schneller geschieht.

Die kompakte EOSINT P 110 Formiga (portugiesisch: Ameise) passt durch eine Tür (1067 mm Breite). Dadurch ist eine Aufstellung in Laboren und normalen Räumlichkeiten möglich und der Aufwand für die Installation ist entsprechend gering.

Sie hat einen rechteckigen Bauraum von circa $x, y, z = 200 \times 250 \times 330$ mm Größe. Sie baut in Schichten von 0,06, 0,1 und 0,12 mm. Der Bauraum der EOSINT P 396 (Bild 3.37) misst circa $x, y, z = 340 \times 340 \times 600$ mm bei einer maximalen Bauhöhe von 660 mm. Die EOSINT P 760 weist einen etwa doppelt so breiten, deutlich größeren Bauraum von circa $x, y, z = 700 \times 380 \times 580$ mm auf. Sie arbeitet simultan mit zwei Laser-Scanner-Einheiten. Die EOS P 800 ist die größere Variante der EOS P 395 ($x, y, z = 700 \times 380 \times 560$ mm).

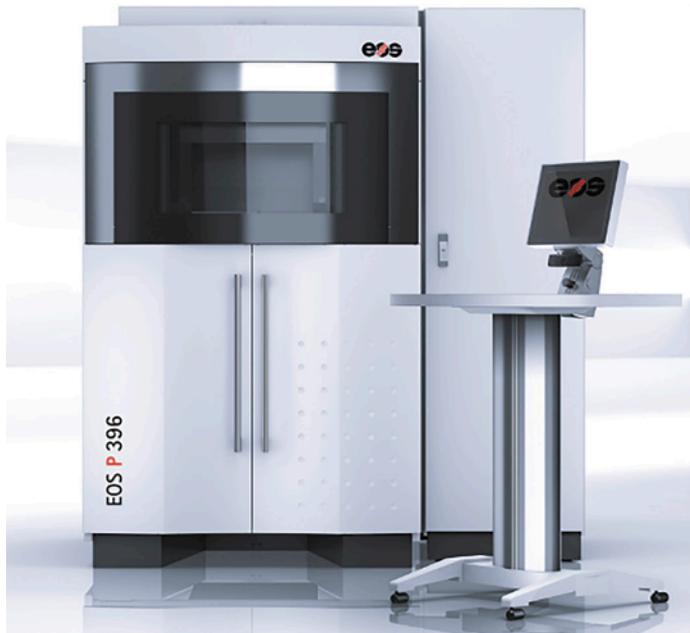


Bild 3.37 EOS P 396 Sintermaschine

Quelle: EOS GmbH

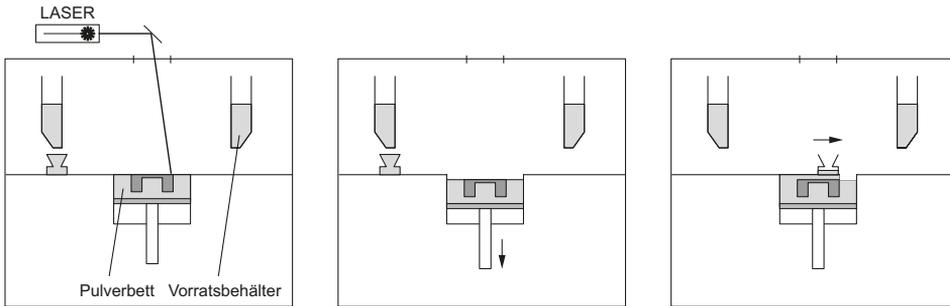


Bild 3.38 Beschichtungssystem EOSINT P (schematisch)

Das Beschichtungssystem für die Kunststoffe verarbeitenden Maschinen ist schematisch in Bild 3.38 wiedergegeben. Es besteht aus einer rinnenartigen, zum Pulverbett hin konvergierenden offenen Pulverzuführeinheit, die wie ein Füllschuh über das Pulverbett streicht und dabei das nötige Pulver aufträgt. Zur Optimierung des Fließverhaltens des Kunststoffpulvers vibriert die gesamte Einheit. Das Beschichtungssystem ist so ausgelegt, dass das Pulverbett bewusst leicht vorverdichtet wird. Die Maschine verfügt über eine Online-Kalibrierung zur kontinuierlichen Überwachung und Korrektur des Laserstrahls während des Bauprozesses.

Die zum Einschluss des Pulverbetts notwendigen Begrenzungswände werden während des Bauprozesses mitgebaut. Dies erfordert zwar Bauzeit und Material, ermöglicht aber das Herausnehmen des kompletten, in diese Wandung und das stützende Pulver eingebetteten Modells aus der Maschine. Durch diese konstruktive Maßnahme muss kein kompletter Kühlvorgang erfolgen, was aufgrund der schlechten Wärmeleitung von Kunststoffen Stunden dauern kann, sondern das Modell kann im Pulverkuchen eingebettet heiß aus der Maschine genommen und extern gezielt abgekühlt werden. Auf diese Weise verkürzen sich die Wiederbeschickungszeiten zwischen zwei Bauvorgängen. Optional wird ein portabler Behälter angeboten, der das Bauen der Umfassungswände überflüssig macht. Die EOS-Maschinen verfügen über einen integrierten Stickstoffgenerator, der den Betreiber von Gaslieferungen unabhängig macht. Dies, und ein automatisches Pulvermanagement erweitern die Maschine zu einem (semi-manuellen) Additiven Fertigungssystem, IPCM P plus (Integrated Process Chain Management, Plastic) Integriertes Werkstoffmanagement für EOS-Polymer-Systeme (Bild 3.36).

Die EOSINT P 760 verfügt über einen so breiten Bauraum, dass die meisten Bauteile hineinpassen, die im Automobilbau, vorzugsweise im Motorenbau, vorkommen. Um die Produktivität zu erhalten, werden zwei simultan arbeitende 50 W CO₂-Lasersysteme eingesetzt. Die Laserstrahlquellen und die sonstigen technischen Daten entsprechen weitgehend den für die P 396 gültigen Werten.

Die Schichtdicken betragen zwischen 0,06 und 0,18 mm und sind materialabhängig.

Kalibrierung der Maschine: Das als Optical Scanner Calibration bezeichnete System führt den Laserstrahl über ein thermosensitives Papier. Das Ergebnis wird anschließend außerhalb der Maschine mithilfe einer Videobildverarbeitung analysiert und schlägt eine Kalibrierung vor. Die Kalibrierung dauert in der Maschine, je nach Rasterabstand (typischerweise 5 mm) und Maschinengröße, zwischen einer $\frac{1}{4}$ Stunde und einer $\frac{3}{4}$ Stunde. Gemeinsam mit der Auswertung und der daran anschließenden Kalibrierung vergehen einige Stunden, wenn dies im eigenen Haus durchgeführt werden kann. Die Auswertung beim Hersteller dauert entsprechend länger.

EOSINT M – Metall-Sintermaschinen

Die EOS M Serie umfasst Maschinen zum Versintern von Metallpulvern. Diese Technologie nennt EOS Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Es gibt bezüglich Material und Bauparameter spezialisierte Anwendungen zur Herstellung von Formen und Formeinsätzen (DirectTool Prozess) und zur direkten Herstellung von Metallbauteilen (DirectPart-Prozess).

Die Software erlaubt neben der Übergabe der Geometriedaten auch die Übermittlung von Referenzpunkten, die die Nachbearbeitung mit konventionellen Werkzeugmaschinen sicher und effektiv ermöglichen.

Konstruktive Details der EOS M280 und ihrer Weiterentwicklung, der EOS M 290 sind der allseitig umschlossene Bauraum von netto $x, y, z = 250 \times 250 \times 325$ mm Größe. Der Vorratsbehälter liegt unter der Bauplattform und mündet in die Bauebene. Das Beschichtungssystem nimmt von dort Material auf, verteilt es über die Bauebene und führt die überschüssige Menge in den Überlaufbehälter ab. Es arbeitet eindirektional und streicht folglich für jeden Beschichtungsvorgang zweimal über die Bauebene. Das Beschichtungssystem (Recoating) ist als feste asymmetrische Klinge ausgebildet. Die Scannerspiegel sind gekühlt, um thermische Verzüge zu vermeiden und die Genauigkeit auf diese Weise zu steigern (Bild 3.39).

Die EOS M 280 ist wahlweise mit einem 200 W oder einem 400 W Yb (Ytterbium)-Faserlaser ausgestattet; die EOS M 290 hat serienmäßig einen 400 W-Faserlaser, der höchste Strahlqualität, hohe Strahlintensität und hohe Dynamik vereint. Ein variabler Fokus (Standard 0,1 und bis 0,5 mm) und eine vollständig gasdicht abgeschlossene Prozesskammer sind die Grundlage für die effektive Versinterung unterschiedlicher Metallpulver.

Die Bauteile werden auf einer geschliffenen Lochplatte gefertigt. Sie verfügt über spezielle Spann- und Positionierelemente und legt so Referenzpunkte und -flächen aus dem CAD reproduzierbar fest. Diese können für nachfolgende Messoperationen oder spanende Bearbeitungsschritte als Aufnahme verwendet werden. Ein Pulver-Siebmodul und ein Pulver-Fördermodul können nachgerüstet werden und ermöglichen als IPCM M plus (Integrated Process Chain Management), Metall ein integriertes Werkstoffmanagement.

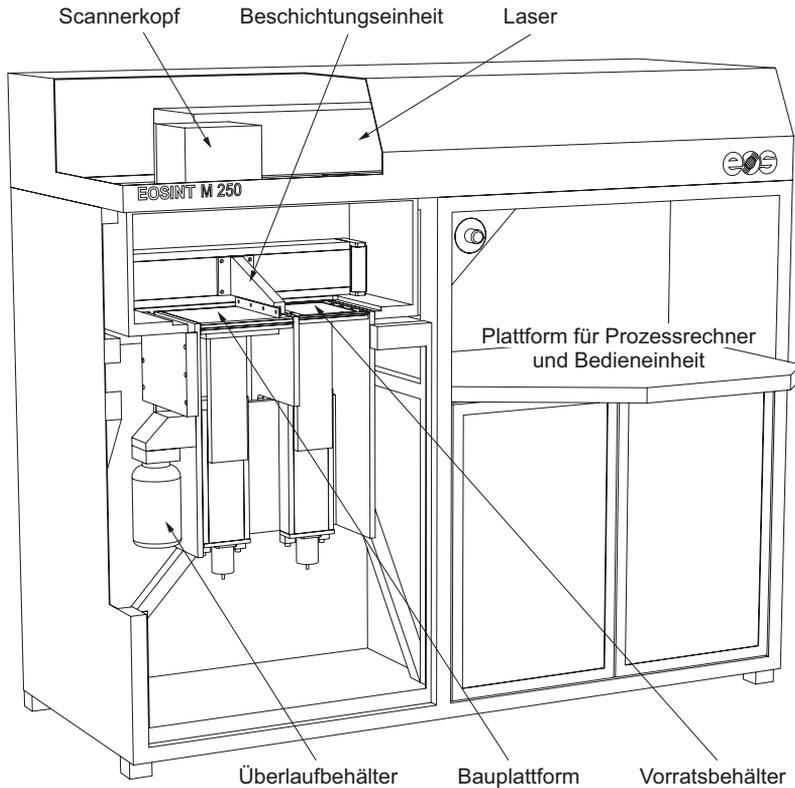


Bild 3.39 EOS M, Sintermaschine für Metalle, schematischer Aufbau
 Quelle: EOS GmbH

Die EOS M 400 (Bild 3.40) ist als System zur additiven Fertigung großer Metallbauteile und als industrielle Produktionsmaschine konzipiert. Sie hat einen Bauraum von netto $x, y, z = 400 \times 400 \times 400$ mm Größe.

Die EOS M 400 besteht aus einer Prozess-, einer Rüst- und einer Auspackstation, die in ein Maschinengestell integriert sind. Durch diesen modularen Ansatz können zukünftige Innovationen einfach integriert werden. Damit ist ein Pulverhandling im geschlossenen System möglich.

Die Maschine arbeitet mit einem 1 kW Yb-Faserlaser. Eine Planfeldlinse (F-Theta-Linse) sorgt für die optimale Belichtung des großen Baufeldes. Der Laserstrahldurchmesser beträgt circa $90 \mu\text{m}$. Der digitale Scanner erreicht eine Geschwindigkeit von bis zu 7,0 m/s



Bild 3.40 EOS M 400. Sintermaschine und Fertigungssystem für Metalle

Quelle: EOS GmbH

Material/Bauzeit/Genauigkeiten

EOS vertreibt selbst entwickelte Materialien, die auch umfangreich dokumentiert sind, beteiligt sich aber auch an den Werkstoffentwicklungen der Kunden. Naturgemäß werden die Ergebnisse solcher Entwicklungen weniger detailliert kommuniziert.

Material – Kunststoffe

Ungefüllte Polyamide (PA 2221, PA 3200GF, PrimePart). In den EOSINT-Maschinen werden als Standardmaterialien Feinpolyamide ähnlich PA 12 eingesetzt. Sie sind ohne Glasfüllung als Primepart Plus PA 2221 oder mit Glasfüllung als PA 3200GF verfügbar. Die Korngrößen betragen circa 60 μm . Die Festigkeiten erreichen bis zu 90 % der Werte, in Einzelfällen auch mehr, die spritzgegossene Bauteile aus formal identischen Werkstoffen aufweisen. Die Bauteile eignen sich deshalb nicht nur hervorragend als Funktionsmodelle und zur Simulation von Spritzgussteilen sondern auch für die direkte Fertigung. Dies begründet auch den Einsatz des Sinterns im Rahmen des e-Manufacturing (siehe Kapitel 6 „Direct Manufacturing – Rapid Manufacturing“). Das Polyamid PA 2200 ist als biokompatibel zertifiziert.

PrimePart ST (PEBA 2301) ist ein flexibles Polyetheramid mit gummiähnlichen Eigenschaften.

Gefüllte PA 12-Polyamide (AluMide, CarbonMide, Flammgeschützte Polyamide). Das AluMide ist ein mit Aluminiumpulver gefülltes Polyamid. Dadurch ergibt sich eine

Metalloptik mit interessanten Farb- und Oberflächeneffekten, vor allem wenn die Bauteile nach dem Bauprozess poliert werden. AluMide weist etwa den E-Modul des PA 3200 GF und die Zugfestigkeit des PA 2221 auf, hat aber mit circa 170 °C eine um 40 °C höhere Temperaturbeständigkeit. EOS fertigt mit diesem Material z. B. die Griffe der EOS M 270 und unterstreicht damit auch in der eigenen Fertigung die Strategie des e-Manufacturing.

CarbonMide (2005) ist ein mit Kohlenstoff (Carbon)-Kugeln gefülltes PA 12-Polyamid, das eine höhere Festigkeit, geringeres Gewicht und eine interessante schwarze Optik miteinander verbindet.

Im Jahr 2005 wurde als weltweit erster flammgeschützter Werkstoff für das Lasersintern ein flammgeschütztes Polyamid vorgestellt. Das Polyamidmaterial auf der Basis des PA 3200 erfüllt mehrere relevante Luft- und Raumfahrtvorschriften, so die JAR/FAR 25¹⁵, Anhang F, für Entflammbarkeit (Teil 1) und Rauchdichte (Teil 5) sowie die ABD0031/AITM 3.0005 (2) (Airbus) und die BSS 7239 (Boeing) für Rauchdichte in der Klasse Wandstärken ab 2 mm. Darüber hinaus wurde für Wandstärken über 2 mm die Klassifizierung V0 gemäß der Richtlinie UL94¹⁶ erreicht. Mit diesen Klassifizierungen stellt EOS ein flammgeschütztes Material zur Verfügung, das sich für die Endprodukthanwendungen in Flugzeugen qualifiziert hat. PA 2241 FR ist ein flammgeschütztes Polyamid 12 mit halogenhaltigem Flammschutzmittel. Dagegen ist PA 2210 FR ein weißes Polyamid 12-Pulver, das mit einem halogenfreien, chemischen Flammschutzmittel arbeitet.

Mit dem Hochtemperatur-Werkstoff EOS PEEK HP3 steht für die EOS P 395 und die EOS P 800 ein Hochleistungspolymer zur Verfügung.

Polystyrole (PS 2500, PrimeCast 101). Als ausschmelzbares Material für den Feinguss sind die amorphen Polystyrolpulver (engl.: Polystyrene) PS 2500 und das neuere PrimeCast 101 verfügbar. Mit PrimeCast 101 können dünnere Schichten erzeugt und damit feinere Details abgebildet werden. Polystyrol kann bei relativ niedrigen Temperaturen verarbeitet werden, was einen geringeren Schrumpfung und eine höhere Modellgenauigkeit begünstigt. Der Bauprozess ist zudem deutlich schneller als bei Polyamid. Für den Feingussprozess muss das Bauteil, z. B. durch Bewachsen, versiegelt werden.

¹⁵ JAR (Joint Aviation Requirements) der JAA sind das europäische Äquivalent zu den FAR (Federal Aviation Regulations) der FAA. Die JAA (Joint Aviation Authorities) ist ein Zusammenschluss der zivilen Luftfahrtbehörden von 34 europäischen Ländern. Die FAA (Federal Aviation Administration) ist die Bundesluftfahrtbehörde der Vereinigten Staaten.

¹⁶ UL (Underwriters Laboratories): eine Organisation zur Überprüfung und Zertifizierung der Produktsicherheit. UL94 regelt die Flammausbreitung.

Material – Metalle

Materialien zur Herstellung von Metallbauteilen sind Einkomponentenpulver oder „Legierungen“. Sie werden in einem Arbeitsgang direkt versintert.

DirectSteel H20 ist ein 20 µm Pulver auf Stahlbasis. Es wurde bereits 1998 (als *DirectSteel 50 V1*) als erstes in einer kommerziellen additiven Anlage einsetzbares reines Stahlpulver vorgestellt. Die Angaben des Herstellers „ohne Kunststoffbinde-mittel“, die Schmelztemperatur „über 700 °C“ und die Zugfestigkeit von bis zu 1100 MPa deuten darauf hin, dass durch entsprechende Optimierung der Legierungsbestandteile (Cr, Ni, Mo, Si, V, C) ein für Stahl relativ niedrig schmelzender Werkstoff entwickelt wurde, dessen Eigenschaften in etwa dem von Stahlguss entsprechen. Die Wärmeleitfähigkeit ist mit $\lambda = 25 \text{ W/mK}$ (bei 23 °C) deutlich geringer als die von Stahl ($\lambda = 45 \text{ W/mK}$) und fällt mit der Temperatur noch deutlich ab. Der entscheidende Schritt besteht aber darin, ein dichtes Bauteil (Dichte = $7,8 \text{ g/cm}^3$) ohne aufwendige Folgeprozesse und deshalb ohne den dadurch verursachten Verzug direkt zu versintern. Es werden Oberflächenhärten von über 40 HRC erreicht. Zur Beschleunigung stehen je nach Anforderung an die Oberflächen auch Parametersätze für Schichtstärken von 40 und 60 µm zur Verfügung. Freistehende Wände werden mit einer Wandstärke bis 0,28 mm realisiert. Eine Infiltration ist weder notwendig noch aufgrund der hohen Dichte sinnvoll möglich. Das Material kann spanend bearbeitet und drahterodiert werden.

StainlessSteel GP1 ist ein Edelstahl, der der europäischen Werkstoffnummer 1.4543 entspricht. Er zeichnet sich durch eine sehr hohe Korrosionsbeständigkeit, gute mechanische Eigenschaften und durch eine hervorragende Duktilität ohne weitere Nachbehandlung aus. Dieser Werkstoff wird besonders für die Herstellung von Bauteilen (*DirectPart*) empfohlen. Mit Standardparametern können Schichtdicken von 20 µm hergestellt werden. Der Werkstoff schmilzt vollständig auf. Die Bauteile sind daher vollkommen dicht und haben nahezu isotrope Eigenschaften. Um den Bauprozess zu beschleunigen, kann auch das Hülle-Kern-Verfahren angewendet werden. Die Bauteile können nicht-additiv bearbeitet, also auch geschweißt, mikrogestrahlt, poliert oder beschichtet werden.

StainlessSteel PH1 ist ein vorlegierter Edelstahl. Der Werkstoff entspricht DIN 1.4540.

StainlessSteel 316L ist ein korrosionsresistenter, auf Eisen basierender Werkstoff, der für die Verarbeitung auf der EOS M 280 optimiert wurde. Er entspricht ASTM F138 “Standard-Schmiede-Qualität für 18Cr-14Ni-2.5Mo Edelstahlteile und Draht für Chirurgische Implantate (UNS S31673)”.

CobaltChrome MPI ist eine sehr feinkörnige, Kobalt-Chrom-Molybdän-basierte Pulvermischung. Sie zeichnet sich durch sehr gute mechanische Eigenschaften sowie durch Korrosions- und Temperaturbeständigkeit aus. Sie entspricht der chemischen Zusammensetzung der UNS R31538 CoCrMo-Legierung, ist nickelfrei (< 0,1 %

Nickelgehalt) und sterilisierbar. Sie eignet sich daher besonders für biomedizinische Anwendungen. Die lasergesinterten Bauteile erfüllen vollständig die Anforderungen von ISO 5832-4 und ASTM F75 für gegossene CoCrMo-Implantatlegierungen, sowie, bis auf die Dehnung, die Anforderungen von ISO 5832-12 und ASTM F1537 für geschmiedete CoCrMo-Implantatlegierungen. Durch heiß isostatisches Pressen (HIP) kann die Dehnung erhöht werden und erfüllt dann auch diesen Standard.

CoCr-Legierungen werden auch für hochbelastete Bauteile, z. B. in Flugzeugtriebwerken und im Motorenbau eingesetzt.

CobaltChrome SP2 ist eine Variante für die Zahntechnik. Es erfüllt zusätzlich zu den Eigenschaften von MP1 die besonderen Anforderungen von Zahnersatzelementen, die mit Dentalkeramik verblendet werden. EOS CobaltChrome SP2 Pulver ist ein Medizinprodukt gemäß Klasse IIa der Richtlinie 93/42/EWG, Anhang IX, Regel 8.

MaragingSteel MS1 ist ein martensitisch aushärtender Stahl. Seine chemische Zusammensetzung entspricht der US-Klassifizierung 18 Maraging 300 bzw. der europäischen 1.2709 und der deutschen X3NiCoMoTi 18-9-5. Er zeichnet sich durch höchste Festigkeit bei guter Duktilität aus. Er kann sehr gut spanend nachgearbeitet werden. Durch eine thermische Nachbehandlung erzielt man eine Härte bis circa 55 HRC. Er wird als Werkzeugstahl für Spitzguss- und Druckgussformen, aber auch für hochbelastete Maschinenteile eingesetzt. Die Bauteile können bei 490 °C für 6 Stunden auf über 50 HRC Härte nachgehärtet werden.

NickelAlloy HX ist eine Nickel-Chrom-Eisen-Molybdän Legierung in feiner Pulverform. Die Bauteile zeichnen sich durch hohe Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen aus und werden deshalb auch für Bereiche bis 1200 °C empfohlen.

NickelAlloy IN625 ist ein Nickel-Legierungspulver, welches hitze- und korrosionsbeständig ist. Die Legierung zeichnet sich durch sehr hohe Zug-, Kriech- und Bruchfestigkeit aus. Des Weiteren ist eine nachträgliche Wärmebehandlung des Materials möglich. Durch ihre hohe Korrosionsbeständigkeit eignen sie sich insbesondere für Anwendungen im maritimen Bereich, wo es auf eine hohe Beständigkeit gegen Lochfraß-, Spalt- und Spannungsrissskorrosion ankommt.

NickelAlloy IN718 ist ebenfalls eine Nickellegierung, welche in ihrer Zusammensetzung Inconel™ 718 entspricht. Aufgrund ihrer Alterungsbeständigkeit, Zug-, Warm- und Bruchfestigkeit, welche bis zu einer Temperatur von circa 700 °C erhalten bleiben, eignet sich diese Legierung insbesondere für Serienprodukte der Luft- und Raumfahrt. Weitere Anwendungen liegen im Bereich der chemischen Industrie, sowie der Erdöl-, Petroleum und Erdgas-Industrie.

AlSiMg10 ist eine Aluminiumgusslegierung, welche für dünnwandige Bauteile mit komplexen Geometrien eingesetzt wird. Die hohe Festigkeit und Härte wird durch

Anteile von Silizium und Mangan in der Legierung erzielt. Aufgrund der mechanischen Eigenschaften und der geringen Dichte findet die Legierung Anwendung im Motorsport, der Luftfahrt, der Pneumatik, der Automobiltechnik, sowie einigen weiteren Branchen. Aus dem Bauprozess resultiert ein Gefüge mit den mechanischen Eigenschaften ähnlich dem T6-Zustand gegossener Bauteile. Daher werden Wärmebehandlungen für Lasersinter-Bauteile nicht empfohlen, aber ein Spannungsarmglühen über 2 Stunden bei 300 °C.

Titanium Ti64 ist ein vorlegiertes Ti6Al4V-Pulver. Es handelt sich um eine Legierung für Struktur- und Triebwerksteile aus der Luft- und Raumfahrt, für Fahrwerksteile und auch für medizinische Implantate. Bauteile aus Titanium Ti64 erfüllen die Anforderungen der Normen ISO 5832-3, ASTM F1472 und ASTM B348 bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung.

Titanium Ti64ELI ist eine Variante des Ti6Al-4 mit höherer Reinheit („extra-low interstitial“) mit enger begrenzten Anteilen an Eisen und den interstitiellen (eingelagerten) Elementen C und O (alpha+beta Legierung). Aufgrund seiner hervorragenden Biokompatibilität eignet es sich vor allem für medizinische und zahnmedizinische Anwendungen.

Durch ein Mikrostrahlen genanntes Verfahren kann die Oberflächengüte auf circa $R_z = 20 \mu\text{m}$ verbessert werden. Mit im Werkzeugbau üblichen Poliermethoden sind Oberflächengüten bis $R_z = 3 \mu\text{m}$ zu realisieren.

Die beim DMLS-Prozess verwendete Lochplatte kann direkt auf Werkzeugmaschinen aufgespannt werden.

Die Materialien, die am Bauprozess teilgenommen haben, aber nicht zum Bauteil verarbeitet wurden, können vollständig wieder verwendet werden.

Bauzeit/Genauigkeiten

Es sind für das Lasersintern typische Bauzeiten und Genauigkeiten zu erzielen. Als Maß für die Baugeschwindigkeit wird ein Baufortschritt in z-Richtung von 24 mm/h (P 110 Formiga) und dem sehr guten Wert von 48 mm/h (P 396) angegeben. Es sind Wandstärken bis hinunter zu 0,6 mm sicher zu realisieren. Bei einem spezifischen Bauvolumen von 2 bis 20 mm³/s resultieren je nach Bauteil Baufortschritte von einem bis zu einigen Millimetern pro Stunde.

Post-Processing

Im Falle der Kunststoff-Sintermodelle entspricht die Nacharbeit dem in Abschnitt 3.2.1 „Maschinenspezifische Grundlagen“ beschriebenen, für das Lasersintern typischen Post-Processing.

EOS vertreibt eine Auspackstation, die an das Pulvermanagement angeschlossen werden kann.

Die Metallmodelle befinden sich nach Abschluss des Sintervorgangs in dem nahezu kalten Pulverbett, sodass lediglich das Pulver nach dem Hochfahren des Bauraums in den Pulverbehälter abgeführt werden muss. Die Bauplattform kann dann leicht vom Lift abgeschraubt werden. Je nach Werkstoff müssen Stützen manuell abgetrennt werden. Die Plattform ist anschließend zu glätten und sollte nach einigen Bauprozessen komplett überschleift werden. Sie kann direkt als Werkzeugträger weiterverwendet werden.

Prozesstypische Folgeverfahren

Es sind alle für das Lasersintern typischen Finishingtechniken und Abformverfahren möglich (vergleiche Abschnitt 3.2.1 „Maschinenspezifische Grundlagen“).

3.2.5 Laserschmelzen – ReaLizer GmbH

Selective Laser Melting (SLM)

ReaLizer SLM 50, ReaLizer SLM 100, ReaLizer SLM 125, ReaLizer SLM 250, ReaLizer SLM300, ReaLizer SLM300i

ReaLizer GmbH, Borcheln (Paderborn), Deutschland

Kurzbeschreibung

Additive Anlagen zum direkten Verschmelzen (Selective Laser Melting, SLM) von reinen Metall- und Keramikpulvern. Die Maschine arbeitet nach dem Laser-Scanner Prinzip.

Anwendungsbereich

Metalle: Funktionsbauteile, Werkzeugeinsätze

Keramiken: Werkzeugeinsätze

Entwicklungsstand

Kommerzialisiert seit 2002.

Historisches

Dr. Fockele und *Dr. Schwarze* gründeten 1990 eine Gesellschaft zur Entwicklung einer Stereolithographie-Anlage und 1992 die F&S-Stereolithographie-Technik GmbH. Ab 1995 entwickelten sie das SLM-Verfahren und stellten 1998 die SLM-ReaLizer vor. 2005 wurden die Entwicklungsarbeiten in der ReaLizer GmbH unter Leitung von *Dr. Fockele* konzentriert, der aktuell auch die Firma führt und die Fertigung und den Vertrieb der Anlagen übernimmt.

Strategien/Entwicklungspartner

F&S und das Fraunhofer Institut für Lasertechnik (FhG-ILT, Aachen) erarbeiteten gemeinsam die Basistechnologie *Laserschmelzen*. Eines der Hauptziele war die Verarbeitung der unterschiedlichen handelsüblichen Metallpulver. Eine strategische Partnerschaft zur Anwendung der Technologie auf Mikroteile gibt es mit dem Institut für Mikroverfahrenstechnik des Forschungszentrums Karlsruhe (IMVT-FZK).

Datenformate/Software

Es gibt eine gemeinsame Steuerungssoftware (für Windows XP) für die STL- und SLM-Realizer-Daten. Sie ermöglicht das Einlesen von STL- und Slice-Daten, die automatische Stützerzeugung, einfache CAD Funktionen, wie die Erzeugung von multiplen Offset-Strukturen und die Generierung von Schalenmodellen aus Slice-Daten sowie die Bauteileplatzierung. Die Software übernimmt zudem die komplette Maschinenkontrolle inklusive der Strahlweitenkompensation.

Prinzip der Schichtgenerierung

Das Laser-Scanner System arbeitet grundsätzlich wie in Abschnitt 3.2.1 „Maschinenspezifische Grundlagen“ beschrieben. Es werden Schichten von 20 bis 100 µm hergestellt.

Bauart/Konstruktion

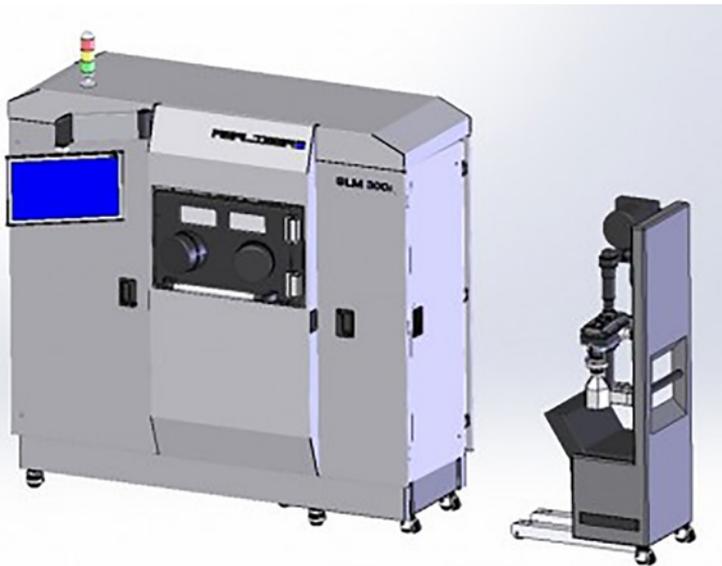
Die *Realizer SLM300i* (Bild 3.41 (a)) basiert auf der Realizer SLM250/300 als gemeinsamer Technologiebasis. Sie ist mit einem im Infrarot emittierenden Faserlaser mit 200 W und bis zu 1 kW ausgestattet. Der Strahldurchmesser beträgt 30 bis 250 µm. Der Bauraum hat eine Größe von $x, y, z = 300 \times 300 \times 300$ mm.

Die Maschine kann inertisiert werden. Für Anwendungen die eine verbesserte Fokussierung erfordern, ist optional ein Wechseloptikmodul erhältlich. Mit diesem Modul wird zwar das maximale Bauvolumen verringert, dafür lässt sich der Laserstrahl aber auf 20 µm fokussieren, um filigranere Strukturen mit hoher Oberflächenqualität herzustellen.

Die SLM 300i verfügt über ein System zum schnellen Pulverwechsel (Bild 3.41 (b)). Oft nicht kommuniziert, kann ein Wechsel des Baumaterials bei SLM-Maschinen im Allgemeinen und abhängig von der Materialfolge bis zu 1,5 Tage dauern. Durch einen Austausch eines vorkonfektionierten Behälters „Patronen-System“ kann bei der SLM 300i das aktuelle Pulver einfach aus der Maschine genommen und durch eine mit anderem Werkstoff gefüllte Patrone ersetzt werden. Beim Pulverwechsel muss nur noch der Bauraum gereinigt werden. Nach Herstellerangabe sollte ein Pulverwechsel dadurch nicht mehr länger als zwei Stunden dauern.



(a)



(b)

Bild 3.41 ReaLizer SLM 300i

(a) Außenansicht

(b) „Patronen-System“ zum schnellen Pulverwechsel

Quelle: ReaLizer GmbH



Bild 3.42 Realizer SLM 125
Quelle: Realizer GmbH

Realizer SLM125. Die Realizer SLM125 (Bild 3.42) ist eine kleinere, für den Bau filigraner Teile optimierte Maschine der Realizer GmbH. Sie verfügt über einen sehr schnellen digitalen Scanner. Der Bauraum misst $x, y, z = 125 \times 125 \times 200$ mm. Er ist vollständig gekapselt und erlaubt das Arbeiten mit Schutzgas und im Vakuum. Auch hochfeine Pulver können so risikolos verarbeitet werden. Die Realizer SLM 125 verfügt standardmäßig über einen 400 Watt-Faserlaser. Eine Pulverauffbereitungsanlage ist integriert. Diese sibt das Pulver schon während der Produktion und sorgt so für ein einfacheres Pulverhandling.

Die Maschine ist in Anbetracht ihrer Bauraumgröße sehr kompakt und passt auch in Labore. Sie orientiert sich an dem neuen an die SLM 50 (siehe nächster Absatz) angelehnten Design des Herstellers.

Realizer SLM50. Die Realizer SLM50 (Bild 3.43) gilt als die weltweit erste SLM-Desktop-Maschine. Sie besitzt sie einen runden Bauraum, dessen Plattfordurchmesser 70 mm und die maximalen Bauhöhe 40 mm beträgt. Der Laser besitzt eine Leistung bis maximal 120 W und ist abhängig von der verwendeten Optik auf einen Durchmesser zwischen 10 und 20 μm fokussierbar. Die SLM 50 wurde speziell für Anwendungen in der Dental- und Schmuckindustrie entwickelt. Ein besonderes Augenmerk richtete der Hersteller bei der Entwicklung der Anlage daher auf die



Bild 3.43 ReaLizer SLM 50 Desktopmaschine

Quelle: ReaLizer GmbH

Verarbeitbarkeit von Werkstoffen für diese Industrien, wie z. B. Kobalt-Chrom oder Gold. Eine weitere Besonderheit dieser Anlage stellt die Integration eines Stereomikroskops dar. Dieses eröffnet vielfältige Einsatzmöglichkeiten der SLM50-Anlage in Hochschulen und der Forschung.

Alle Maschinen liefern vollständig dichte Bauteile.

Material/Bauzeit/Genauigkeiten

Als Materialien werden handelsübliche Pulver mit Durchmessern von 10 bis 45 μm eingesetzt. Sie müssen runde Körner (gasverdüst) aufweisen, um entsprechend rollfähig zu sein und die Beschichtung zu ermöglichen. Die Pulver sollten keine Binder enthalten und eine nicht zu große Streubreite der Kornverteilung aufweisen.

Es können Schichtdicken von 20 bis 100 μm gebaut werden, wobei in Anbetracht der Nacharbeit und bezüglich der Detaillierung geringe Schichtdicken zu bevorzugen sind. Das spezifische Bauvolumen wird mit 7 bis 30 cm^3/h angegeben.

Laut Hersteller sind Edelstähle (316L), Werkzeugstähle (1.2344), Kobalt-Chrom Stähle und Titan zu verarbeiten. Für den Werkzeugstahl 1.2344 werden eine Dichte von $> 99,8\%$ und eine Härte von > 52 HRC erreicht. Die Streckgrenze liegt um die 500 N/mm^2 , die Zugfestigkeit um die 600 N/mm^2 und die Bruchdehnung erreicht bis zu 30 %. Die Werte streuen, je nachdem ob die Proben in Schichtrichtung oder senkrecht dazu entnommen wurden. Bereits Ende 2006 wurden erste Aluminium-Bauteile vorgestellt. Die Prozessgrenzen liegen bei circa 80 μm dünnen Wänden, die mit 50 μm dünnen Schichten korrespondieren (Bild 3.44). Dazu sind sorgfältige Prozessoptimierungen notwendig.

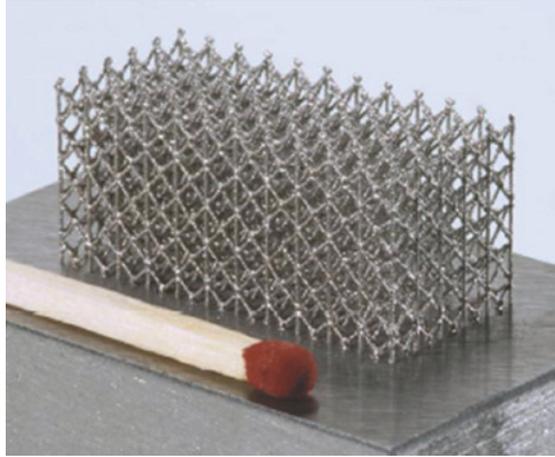


Bild 3.44 Selective Laser Melting, SLM – Mikrostruktur
Quelle: Realizer GmbH

Post-Processing

Es sind keine prozessbedingten Folgeverfahren wie Infiltration oder Wärmebehandlung notwendig. Das Bauteil kann wie jedes andere aus dem gleichen Material behandelt werden. Metallbauteile können spanend bearbeitet, erodiert, geschweißt und wärmebehandelt werden. Polieren bis zum Spiegelglanz ist möglich.

3.2.6 Laserschmelzen – SLM Solutions GmbH

Selective Laser Melting (SLM)
SLM[®] 125 HL, SLM[®] 280 HL, SLM[®] 500 HL,
SLM Solutions GmbH, Lübeck, Deutschland

Kurzbeschreibung

Die SLM Solutions GmbH bietet Laserschmelzanlagen nach dem SLM-Verfahren zur direkten Fertigung von Endprodukten an. Nach eigener Angabe waren die Maschinen des Unternehmens die ersten, welche in der Lage waren, reaktives Aluminiumpulver zu verarbeiten. Titanimplantate im Lasersinterverfahren wurden von ihr zuerst auf den Markt gebracht.

Anwendungsbereich

Endprodukte aus Metall.

Für Aufgaben im Rahmen der Forschung und Entwicklung gibt es darüber hinaus ein breites Programm, das weitere Qualitäten, aber auch Kupfer und Composites wie WC, TiC und CrC bietet.

Nach Herstellerangaben entstehen vollkommen dichte Bauteile aus den unterschiedlichsten Materialien, die die physikalisch-technologischen Eigenschaften von Serienteilen aufweisen sollen. Oberflächengüten von 12 bis 25 $\mu\text{m} R_A$ werden laut Hersteller nach Prozessabschluss erreicht. Die Auftragsraten werden mit 0,5 kg/h angegeben.

Die Hersteller geben an, dass aufgrund des Laserprozesses eine Kornverfeinerung des resultierenden Gefüges eintritt und bewirkt, dass sowohl die Zugfestigkeit als auch die Duktilität der mit LENS hergestellten Teile die Kennwerte der entsprechenden Materialien übertreffen [Kreicher98]. So erreicht der Stahl 316S mit dem LENS-Verfahren eine Zugfestigkeit von 500 MPa gegenüber 243 MPa bei nicht-additiver Verarbeitung. Diese Tendenz zeigt sich auch für Inconel 625 (584/403 MPa) und für Ti6Al4V (973/834 MPa), wobei die Bruchdehnungen mindestens um 10 % über den Vergleichswerten liegen und die erwartete Aufhärtung damit nicht eintritt. Der Hersteller gibt an, dass 0,08 mm große Details aufgelöst werden können und nennt eine Toleranz von $\pm 1/10$ mm bezogen auf das Fertigmaß. Der LENS-Prozess hat den grundsätzlichen Vorteil, dass Bauteile aus unterschiedlichen Materialien aufgebaut werden können. Es ist offensichtlich möglich, das Bauteil mit Stützen aus Kupfer zu versehen; sowohl nach außen als auch in Bezug auf interne Hohlräume. Nähere Angaben darüber gibt es nicht.

Post-Processing

Gegebenenfalls Entfernen der Stützen, materialspezifische Wärmebehandlung, Polieren. Prozesstypische Folgeverfahren.

3.3.3 Laser Metal Deposition (LMD), TRUMPF

TruLaser Cell 7040, TruLaser Cell 3000

TRUMPF Laser GmbH & Co. KG, Ditzingen, Deutschland

Die TrumaForm DMD 505 und der POM 5050 Direct Metal Fabricator (DM3D) waren baugleiche Maschinen, die aus der Partnerschaft von TRUMPF und POM entstanden sind. Inzwischen hat Trumpf die DM- Maschinen nicht mehr im Programm, liefert aber die gleiche oder ähnliche kundenspezifischen Konfigurationen auf Anfrage. POM hat die Aktivitäten in der DM3D Technology konzentriert und bietet Service und kundenspezifische Maschinenkonzepte an.

Nachfolgerin ist die TrueLaser Cell Familie.

Kurzbeschreibung

Die Anlagen arbeiten nach dem Laser Metal Deposition (LMD)-Verfahren (siehe Abschnitt 3.3.1 „Verfahrensprinzip“). Pulver aus den verschiedensten Metallen und Legierungen wird über Pulverdüsen lokal auf ein Werkstück aufgebracht. Es wird simultan mithilfe eines Lasers örtlich aufgeschmolzen und erstarrt durch Wärmeleitung in das Werkstück zu einer festen Schicht. Auf diese Weise wird zeilen- und schichtweise Material generiert und so ein Bauteil aufgebaut oder repariert. Der Prozess entspricht einem geregelten automatisierten Lasergenerieren.

Die als TruPrint bezeichnete Maschinenfamilie arbeitet nach dem Verfahren des direkten Laserschmelzens im Pulverbett (siehe Abschnitt 3.2.9 „Laser Metal Fusion (LMF) – TRUMPF“).

Anwendungsbereich

Rapid Manufacturing.

Entwicklungsstand

Kommerzialisiert seit 2003.

Historisches

TRUMPF (gegr. 1923) ist vor allem als Hersteller von Werkzeugmaschinen für die Blech- und Materialbearbeitung, von Laserstrahlquellen und von lasergestützten Bearbeitungsanlagen für die Industrie bekannt. TRUMPF liefert modular aufgebaute Komplettsysteme, die aus Strahlquellen und Handhabungsanlagen bestehen. Für Anwendungsfelder mit entsprechender Marktrelevanz werden Speziallösungen, z. B. Rohrschweißanlagen, angeboten. Entsprechend der Firmenhistorie steht die Maschinenteknik im Vordergrund.

Bereits 1999 wurde eine aus der Kooperation mit *Precision Optical Manufacturing*, **POM**, hervorgegangene Maschine zum automatisierten Laserbeschichten im geschlossenen Regelkreis, die POM 2400, vorgestellt. Das Verfahren wurde damals als Direct Metal Deposition (DMD) bezeichnet. Ab 2002 repräsentierte die Nachfolgemaschine POM DMD 5000 (mit einem 5 kW Laser) die zweite Generation. Sie wurde auch als *Direct Metal Fabricator* bezeichnet.

Strategien/Entwicklungspartner

Die strategische Zusammenarbeit zwischen POM und TRUMPF aus dem Jahr 2002 zielte vor allem auf die gemeinsame Nutzung des DMD-Patentes zum kontinuierlichen und automatischen Laserauftragen mit einem Pulverdüsen-Systeme über integrierte optische Sensoren. Es führte zur POM DMD 5050 (die auch als DMD 505 bezeichnet wird) und zur TrumaForm DMD 505. Beide werden heute so nicht mehr vertrieben (Details siehe Abschnitt 3.3.3 der 4. Auflage dieses Buches).

Im Zuge der Neuausrichtung von TRUMPF auf dem Gebiet der additiven Fertigung (3D-Drucken) wurden 2015 unter dem Namen TruLaser Cell auch überarbeitete Maschinen zur LMD-Technologie vorgestellt. Die kompaktere TruLaser Cell 3000 (Bild 3.59) und eine große Fünffachmaschine, die TruLaser Cell 7040 (Bild 3.60). Während die TruLaser Cell 7040 dem modularen TRUMPF Konzept folgt, ist die TruLaser Cell 3000 eher als stand alone-Maschine konzipiert.



Bild 3.59 TRUMPF Laser Metal Deposition (LMD), TruLaser Cell 3000
Quelle: TRUMPF



Bild 3.60 TRUMPF Laser Metal Deposition (LMD), TruLaser Cell 7040
Quelle: TRUMPF

Datenformate/Software

Die Anlage arbeitet mit dem TRUMPF 3D CAM Programmiersystem ToPs 800, also mit den 3D CNC Daten des jeweiligen Bauteils. Da zu reparierende Bauteile in den meisten Fällen vorher (und nachher) spanend bearbeitet werden, liegen diese Daten in der Regel vor. Alternativ wird über Teach-Verfahren direkt an der Maschine programmiert. Die Steuerung des Werkzeugweges (der Düse) ist in jedem Fall grundsätzlich bahnenorientiert. Die Maschine kann über das Internet adressiert werden.

Prinzip der Schichtgenerierung

Der Pulverwerkstoff wird über Pulverförderer koaxial zum Laserstrahl zugeführt, auf die Werkstückoberfläche aufgebracht und vollständig aufgeschmolzen. Das Schmelzbad erstarrt durch Wärmeleitung in das Bauteil. Jede Schicht wird bahnen-gesteuert Zeile für Zeile aufgebracht. Es entstehen deshalb zwar Ansätze, aber keine Treppenstufen. Die einzelnen Bahnen haben eine Breite von circa 0,2 bis circa 1 mm und eine entsprechende Höhe. Damit sie eine Schicht bilden, werden sie definiert überlappt. Der Materialauftrag wird über die Geometrie des Schmelzbades durch 3 CCD-Kameras 3D überwacht und in Echtzeit im geschlossenen Wirkungskreis geregelt.

Bauart/Konstruktion

Die TruLaser Cell Serie 3000 verfügt über ein 5-Achsen-Bewegungssystem in einem abgeschlossenen Gehäuse. Sie weist drei Linearachsen (A, B, C) auf. Die Verfahwege sind ($A = x$, $B = y$, $C = z$) $800 \times 600 \times 400$ mm. Zwei Drehachsen können um (B) $\pm 135^\circ$ und um (C) $\pm 360^\circ$ geschwenkt werden. Damit wird ein Arbeitsbereich von $600 \times 420 \times 520$ mm realisiert. Die Werkstücke können eine Dimension von bis zu 800×600 mm aufweisen.

Die Anlage ist auf eine maximale Laserleistung von 8 kW ausgelegt. Als Standard ist ein 5 kW CO_2 -Laser anzusehen. Es steht aber die ganze Palette der TRUMPF-Laser zur Verfügung.

Die Maschine ist Teil des Trumpf Laser Cell Modulsystems und kann daher auch an Transfersysteme angebunden oder in die automatische Bestückung eingebunden werden. Dazu verfügt sie optional über schnelle automatische seitliche Hubtüren.

Die TruLaser Cell Serie 7000 basiert auf einer modular aufgebauten 5-Achsen-Bearbeitungsanlage für die Laser-Materialbearbeitung. Drei Linearachsen (A, B, C) mit Verfahwegen von ($A = x$, $B = y$, $C = z$) $4000 \times (1500) 2000 \times 750$ mm und zwei Drehachsen, die um (B) $\pm 135^\circ$ und um (C) $\pm 360^\circ$ geschwenkt werden können, bilden ein 5-Achsen-Bewegungssystem. Verwendet werden CO_2 -Laser mit Leistungen von 8 kW (Standard sind 5 kW) und Fokussdurchmessern um die 0,2 mm oder Festkörperlaser bis 6,6 kW. Der Bearbeitungskopf mit der Optik, der konzentrischen Pulverdüse und der Sensorik hängt über zwei Drehachsen an der z-Achse.

Dadurch entsteht ein sehr gut zugänglicher Bearbeitungsraum. Die Maschine ist vollständig eingehaust, kann aber bei offenen Türen betrieben und von drei Seiten beschickt werden. Sie erlaubt so die Bearbeitung von Bauteilen, die größer sind als der Bearbeitungsraum. Die Bearbeitung kann unter Schutzgas erfolgen. Die Maschine ist jedoch nicht vollständig abgeschlossen (sealed) und erlaubt daher nicht die Bearbeitung in einer zirkulierenden Schutzgasatmosphäre.

Der Einsatz von bis zu vier Pulverförderern ist auch softwareseitig vorgesehen. Die Pulverwerkstoffe können direkt in der Maschine gemischt werden.

Beide Maschinen sind Teil des Trumpf Laser Cell Modulsystems.

Material/Bauzeit/Genauigkeiten

Es können handelsübliche Einkomponenten-Metallpulver ohne Binder in einer typischen Körnung von 40 bis 105 μm (max. um 160 μm) eingesetzt werden. Typische Materialien sind Superlegierungen und Ni-Co-Cr-Al Systeme, Ni- und Co-Legierungen, Werkzeugstähle wie z. B. 1.2344 sowie WC Hartbeschichtungen. Aufgrund des vergleichsweise geringen Wärmeeintrags können vor allem rissempfindliche Werkstoffe wie Nickel-Basislegierungen (z. B. Inconel) hervorragend bearbeitet werden.

Klassische Materialauftragsraten betragen circa 150 cm^3/h . Herstellerseitig werden für die 7000er Serie bis zu 500 cm^3/h angegeben. Die Schichtdicken betragen meistens mehrere 1/10 mm bis wenige Millimeter, wobei eine Bearbeitungszugabe von etwa 0,2 mm für die Endbearbeitung durch Fräsen zu beachten ist. Dickere Schichten sind weniger aus technischen als vielmehr aus wirtschaftlichen Gründen seltener anzutreffen. In der Maschine ist eine Oberflächenqualität von 175 μm zu erreichen.

Eine Wärmebehandlung kann auch in der Maschine mit dem (defokussierten) Laser erfolgen.

Post-Processing

Die Bauteile können wärmebehandelt werden.

Prozesstypische Folgeverfahren

Die Bauteile werden üblicherweise spanend endbearbeitet.

schiedliche Anwendungen der Additiven Fertigung zur Herstellung von Werkzeugen und Formen vertikal zusammen (vergleiche Bild 1.6).

5.1.1 Direkte und indirekte Verfahren

Wenn die Werkzeuge direkt in der additiven Maschine entstehen, spricht man von direkten Verfahren, entstehen sie durch Abformen von direkt hergestellten Urmodellen in nachgeschalteten nicht-additiven Verfahrensschritten, nennt man sie indirekte Verfahren. Indirekte Verfahren sind überwiegend nicht-additiv und werden im Kontext der Additiven Fertigungstechnik nur behandelt, wenn sie mindestens einen Additiven Verfahrensschritt aufweisen. Es ist in den meisten Fällen der erste und führt auf das Urmodell.

Direkte Verfahren: Prototype Tooling und Direct Tooling

Wenn zur direkten Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen Rapid Prototyping-Verfahren im Sinne des Functional Prototyping eingesetzt werden (Bild 1.6), führen sie je nach Anwendung auf Werkzeuge mit Prototypcharakter, die vorzugsweise aus Kunststoff bestehen. Man spricht dann von *Prototype Tooling* (Bild 5.1). *Prototype Tooling* ist eine Untermenge des Functional Prototyping.

Werden zur Werkzeugherstellung Rapid-Manufacturing-Verfahren (Bild 1.6) verwendet, so entstehen Werkzeuge oder Werkzeugeinsätze mit Seriencharakter (Direct Tooling), die vorzugsweise aus Metall bestehen. In diesem Fall spricht man von *Direct Tooling* (Bild 5.1). *Direct Tooling* ist ein Rapid Manufacturing Prozess.

Um den additiven Charakter zu unterstreichen und um sie von den indirekten Verfahren abzugrenzen, müssten die direkten Verfahren jeweils mit den Vorsatz *direkt* (oder *direct*) versehen werden, also *Direct Prototype Tooling* und *Direct Rapid Tooling* genannt werden. Das geschieht in der Praxis aber meistens nicht.

Indirekte Verfahren

Indirekte Verfahren oder *Indirect Tooling* (*indirektes Tooling*) werden auch *Folgeverfahren* oder Abformverfahren genannt. Sie sind nicht-additiv, gehören also nicht zu den *Additiven Fertigungsverfahren*. Aus zwei Gründen werden sie dennoch kurz besprochen. Zum einen, weil sie eng mit den Additiven Verfahren verwandt sind und mit der Herstellung des Urmodells immer einen ersten additiven Prozessschritt aufweisen. Zum anderen, um die Abgrenzung zu (direkten) Additiven Verfahren deutlich zu machen. Sprachlich findet eine Differenzierung meist nicht statt, weil indirekte Verfahren häufig nicht als *Indirect Tooling*, sondern ebenfalls als *Rapid Tooling* bezeichnet werden. Das geschieht in vielen Fällen bewusst und vor allem aus Gründen des Marketings. Die Bezeichnung eines Prozesses lässt daher meistens keinen Rückschluss darauf zu, ob es sich um ein Additives Verfahren handelt oder nicht.

Bridge Tooling

In der Praxis gibt es Anwendungen des Prototype Tooling, die nicht auf Prototypformteile führen, sondern auf kleine Stückzahlen von Formteilen mit Seriencharakter. Weil das *Prototype Tooling* auf diese Weise die Kluft zu den serientauglichen Direct Tooling-Verfahren überbrückt, nennt man diese Untermenge der Prototype Tooling-Verfahren auch *Bridge Tooling*. Bridge Tools können direkt additiv gefertigt sein, sie können aber auch das Resultat von Abformverfahren sein. Die Bezeichnung *Bridge Tool* wird allerdings auch für Nicht-additive Verfahren gewählt, wenn sie die gleiche Funktion haben.

Die Zusammenhänge sind in Bild 5.1 (einem detaillierten Ausschnitt aus Bild 1.6) dargestellt. Darin wird nochmals deutlich, dass *Rapid Tooling* keine horizontale technologische Gliederung der *Additiven Fertigungsverfahren* bezeichnet, sondern im Sinne einer vertikalen Gliederung unterschiedliche Anwendungen zur Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen thematisch zusammenfasst. Bild 5.1 zeigt auch, dass das Indirekte Tooling auf Basis des Functional Prototyping je nach Verfahren und weiterer Bearbeitung entweder auf reine Prototypwerkzeuge oder auf Werkzeuge mit dem Charakter von Bridge Tools führen kann. Die Bezeichnungen müssten korrekt jeweils mit dem Vorsatz „indirektes ...“ versehen werden. Das ist in Bild 5.1 auch geschehen, wird aber im allgemeinen Sprachgebrauch meistens weggelassen.

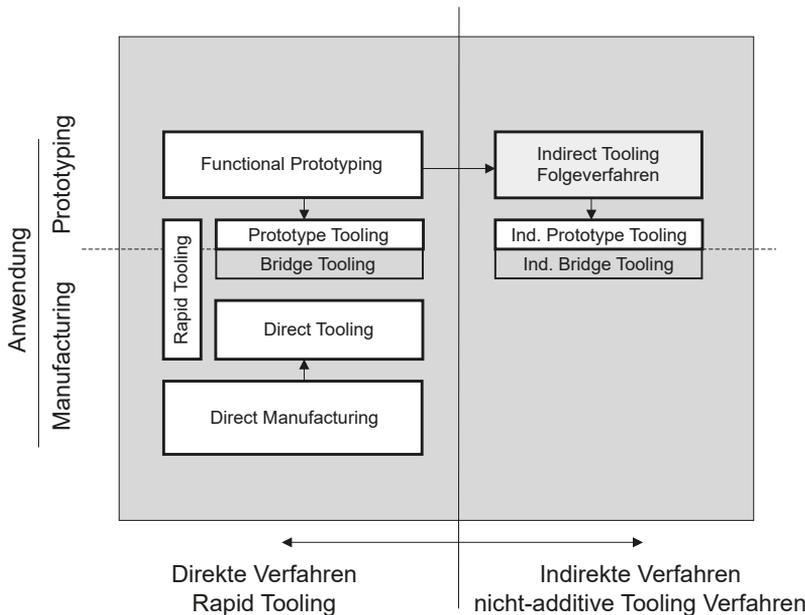


Bild 5.1 Struktur des Rapid Tooling im Kontext der *additiven Fertigungsverfahren* Functional Prototyping und Direct Manufacturing

■ 5.2 Eigenschaften additiv gefertigter Werkzeuge

Additiv gefertigte Werkzeuge unterscheiden sich sowohl im strategischen Ansatz als auch in der konkreten Herstelltechnik von nicht-additiven, sogenannten konventionellen Werkzeugen.

Trotz der Bezeichnung additiv gefertigte Werkzeuge werden in der Praxis vorzugsweise Werkzeugeinsätze gefertigt und mit Normalien und abtragenden Verfahren komplettiert. Rapid Tooling führt nur in Ausnahmefällen zu vollständigen Werkzeugen.

5.2.1 Strategische Aspekte beim Einsatz Additiver Werkzeuge

Mit der additiven Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen werden vor allem die Ziele verknüpft, den Herstellprozess zu beschleunigen und neue technische Konzepte zu realisieren.

Das Kriterium Schnelligkeit führt meistens auf das Prototype Tooling und damit zu nicht metallenen Werkzeugen, die vorzugsweise durch Abformung von additiv gefertigten Urmodellen oder direkt aus additiven Kunststoffprozessen entstehen.

Die Produktion von serientauglichen Bauteilen oder die Umsetzung neuer technischer Konzepte geschieht mit Verfahren des Direct Tooling und damit ausschließlich mit additiven Metall- oder Keramikprozessen.

5.2.1.1 Schnelligkeit

Der entscheidende Fortschritt, der den Additiven Verfahren auch Ihren Namenszusatz *Rapid* beschert hat, bestand zunächst darin, komplexe Formteile aus Kunststoff unter Umgehung von Werkzeugen und damit um viele Wochen schneller und zudem preisgünstiger zu erhalten, als das bis dato (Ende der 1980er-Jahre) möglich war.

Schon Anfang der 1990er-Jahre begann man aber, die neuen Verfahren auch für die Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen zu nutzen, die man eigentlich zukünftig durch den Einsatz Additiver Verfahren vermeiden wollte.

Das lag vor allem an den unzureichenden Materialeigenschaften der damaligen additiven Bauteile und an der Tatsache, dass die Additive Fertigung von größeren Stückzahlen rasch sehr teuer wird, weil keine nennenswerte Kostendegression eintritt, so wie das bei der Spritzgießfertigung der Fall ist.

Man entwickelte deshalb Verfahren und Verfahrensketten zur direkten und indirekten Herstellung additiver Werkzeuge und Werkzeugeinsätze. Dem Ziel, schnell Formteile zu erhalten und dafür sehr schnell ein Werkzeug herzustellen, wurden

andere Anforderungen untergeordnet. So war und ist man bereit, die Qualität des Finishings der Bauteile zu relativieren und beispielsweise Blankstellen oder Einfallstellen zu tolerieren. Auch akzeptierte man eine geringere Ausbringungsmenge, deutlich längere Zykluszeiten und gegebenenfalls auch manuell zu handhabende Losteile anstelle von Schiebern.

Um das primäre Ziel, die Schnelligkeit, zu gewährleisten, werden als Ausgangsbasis Additive Verfahren zur Herstellung von Kunststoffbauteilen gewählt. Der Weg zum Werkzeug führt dann entweder direkt zu Prototypwerkzeugen oder Bridge Tools oder über Folgeverfahren zu entsprechenden indirekt hergestellten Werkzeugen oder Formeinsätzen (Bild 5.1).

5.2.1.2 Umsetzung neuer technischer Konzepte

Auf der Suche nach Alleinstellungsmerkmalen wurden schon frühzeitig zwei Gruppen von Anwendungen definiert, die neue technische Aspekte beleuchten: Die konturangepasste Kühlung (Conformal Cooling) und die Variation des Werkstoffs über dem Bauteilquerschnitt (graded Materials) bezogen auf das Werkzeug. Beide Ansätze unterstützen eine effektive Temperierung von Spritzgießwerkzeugen und zielen sowohl auf Qualitätsverbesserungen durch eine gleichmäßigere Temperaturverteilung als auch auf Kostenvorteile durch kürzere Zykluszeiten. Sie sind beide direkt mit Metallwerkzeugen in Serienqualität verknüpft.

Die Geometriefreiheit ermöglicht die Fertigung interner Hohlräume, die als räumlich gekrümmte Kanäle oder Netze dem Konturverlauf folgend dicht unter die Oberfläche der Kavität gelegt werden können und so eine vor allem viel schnellere Temperierung erlauben (Bild 5.2). Ungleichmäßige Temperaturverteilungen und lokale

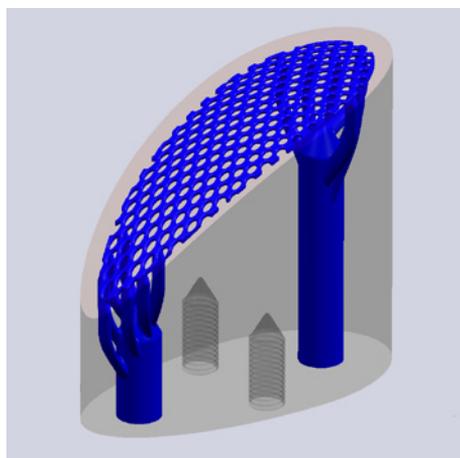


Bild 5.2 Konturangepasste Kühlung: CAD-Konstruktion eines Kühlnetzes
Quelle: Concept Laser GmbH/Hofmann

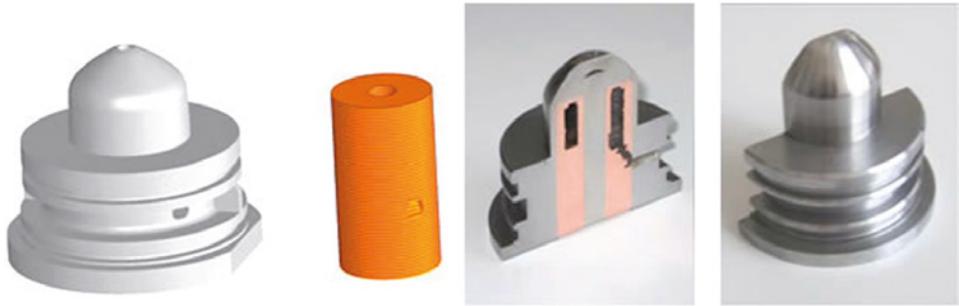


Bild 5.3 Melato. Werkzeugeinsatz aus Stahl und Kupfer. CAD-Konstruktion (ganz links und links), endbearbeitetes Werkzeug (ganz rechts) und aufgeschnittener Einsatz mit Blick auf die Kühlzone (rechts)

Quelle: A. Techel, Fraunhofer-Institut für Werkzeug- und Stahltechnik/rtejournal

Überhitzungen, sogenannte Hotspots, können gezielt vermieden werden. Derartige interne Hohlräume können auch zur Realisierung von Luftauswerfern verwendet werden, die angesichts der mit Kühlstrukturen durchzogenen Kavitäten zunehmend als Alternative zu den gebohrten Auswerferkanälen mit geraden Auswerfern in Betracht gezogen werden.

Additive Verfahren, vor allem das Schicht-Laminat-Verfahren, Abschnitt 3.4 „Schicht-Laminat-Verfahren – Layer Laminat Manufacturing (LLM)“ mit Metallfolien, aber auch das Beschichten mit der Pulverdüse, Abschnitt 3.3 „Beschichten – Schmelzen mit der Pulverdüse“, oder, wenn man sich perspektivisch die Variation der Pulverqualität während des Beschichtens vorstellt, auch das Metallsintern oder -schmelzen, Abschnitt 3.2 „Sintern/Selektives Sintern – Schmelzen im Pulverbett“, eröffnen die Möglichkeit, vor allem unterschiedlich stark wärmeleitende Materialien gezielt zu verarbeiten, um eine definiert verbesserte Temperierung zu erzielen.

Die Variation der Werkstoffeigenschaften über dem Bauteilquerschnitt ist im Ansatz bei dem sogenannten Metallfolien LOM oder Metal Laminated Tooling, MELATO, Abschnitt 3.4.10.1 „Bauteile aus Metalllamellen – Laminated Metal Prototyping“, mit unterschiedlichen Materialien umgesetzt. Das Beispiel auf Bild 5.3 zeigt einen innen gekühlten Formeinsatz aus Stahl, der zusätzlich in der thermisch kritischen Zone einen Einsatz aus Kupfer aufweist. Bild 5.3 zeigt die CAD-Konstruktion und das endbearbeitete, für das Foto geschnittene, Werkzeug.

5.2.2 Konstruktive Eigenschaften additiv gefertigter Werkzeuge

Die strategischen Überlegungen schlagen sich direkt in der Konstruktion von additiv gefertigten Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen nieder.

Schnelle Verfahren stützen sich auf das Abgießen von schnell verfügbaren additiv gefertigten Urmodellen. Die dazu verwendeten weichen oder harten Formmassen

führen auf Prototypwerkzeuge mit entsprechend charakteristischen konstruktiven Eigenschaften.

Neue technologische Ansätze wie die konturangepasste Kühlung werden mit direkt hergestellten serientauglichen Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen kombiniert. Sie werden in der Serienfertigung eingesetzt.

5.2.2.1 Prototypwerkzeuge

Prototypwerkzeuge basieren auf dem Prinzip der Trennung der Eigenschaften. Ausgangspunkt sind schnell verfügbare und geometrisch exakte additiv gefertigte (Rapid Prototyping) Urmodelle. Sie werden mittels unterschiedlicher Gießverfahren abgeformt. Nach der Entformung bilden die Formmassen mit der darin liegenden Kavität das Werkzeug.

Die eingesetzten Abform- oder Folgeprozesse sind alle nicht neu. Sie sind selbst nicht-additiv und auch nicht exklusiv für additiv gefertigte Bauteile anwendbar.

5.2.2.1.1 Weiche gegossene Werkzeuge

Abformverfahren führen häufig auf weiche Werkzeuge aus Silikon oder Kautschuk. Eine CAD-gestützte Werkzeugkonstruktion ist dafür nicht erforderlich und auch gar nicht einfach möglich. Die Werkzeugkonzeption geschieht manuell. Die Trennebenen werden mittels transparenten Klebestreifen am Modell festgelegt, Angüsse und Steiger in Form von Stangen und Drähten angebracht, das so vorbereitete Modell in einen Gießrahmen positioniert und mit der Formmasse umgossen. Nach der Verfestigung wird die ausgehärtete Formmasse an der Trennebene per Hand mit dem Skalpell aufgeschnitten und das Modell entnommen. Die Form wird mit Trennmittel eingesprüht, geschlossen, gegen Öffnen gesichert und vorzugsweise in einer Vakuumkammer ausgegossen. Der Gießvorgang ist semi-manuell. Verwendet werden vergießbare Duroplaste, sogenannte Gießharze, also vorzugsweise Polyurethane (PUR).

Weil die Formen weich sind, sind keine Entformungsschrägen erforderlich. Es können sogar leichte Hinterschnitte zwangsentformt werden. Die Elastizität bringt aber auch Einbußen bei der Dimensionstabilität und der Maßgenauigkeit mit sich. Große Formen verformen sich unter ihrem Eigengewicht und werden deshalb durch Einleger ausgesteift. Der weiche Formstoff hat einen recht hohen Abrieb, wodurch die Ausbringungsmenge auf circa 15 bis 20 Abgüsse pro Form limitiert wird. Feine Details, z. B. wenn sie durch freistehende Dome charakterisiert sind, können leicht abreißen, weshalb die genannte Ausbringungsmenge stark von der Geometrie abhängt. Je nach Gießharz und Formstoff führen chemische Wechselwirkungen zu Oberflächenfehlern oder zum Formverschleiß durch Risse, Materialaufhärtungen und -ausbrüchen. Starke Hinterschnitte können durch Losteile oder mehrfach geteilte

Formen realisiert werden, erhöhen aber die Komplexität der Form. In die Formen können Einleger z. B. aus Metall eingebracht und umgossen werden. Die Zykluszeiten sind mit ein bis zwei Stunden recht lang.

Die Formen werden für den Abguss vorgewärmt. Dieser Vorwärmprozess kann auch zur Fein-Skalierung zumindest von einer Hauptabmessung genutzt werden, weil z. B. Silikone im Temperaturbereich um 70 °C ein nahezu lineares Ausdehnungsverhalten haben.

5.2.2.1.2 Harte gegossene Werkzeuge

Harte Werkzeuge entstehen, wenn die Abformmasse vollständig aushärtet, was z. B. bei aluminiumgefülltem Epoxidharz der Fall ist. Für harte Werkzeuge ist eine vollständige CAD-Werkzeugkonstruktion erforderlich. Sie umfasst vor allem die Festlegung der Trennebenen, die Einbringung der Entformungsschrägen, die Dimensionierung des Angussystems und der Auswerfer sowie die Definition eventuell notwendiger Loseile. Auf Schieber wird aus Gründen des einfachen Werkzeugaufbaus üblicherweise verzichtet. Wenn sie nicht zu umgehen sind, werden sie als Loseile gefräst, an das Urmodell anmodelliert und mit eingegossen. Die Werkzeuge sind vorzugsweise ungekühlt. Das Eingießen von Kühlleitungen ist aber leicht möglich. Harte Werkzeuge müssen, jede Formhälfte für sich, auf Formplatten aufgebaut und einzeln abgegossen werden.

Harte gegossene Werkzeuge werden vorzugsweise als Formhälften in Stammrahmen eingebracht und die Formteile auf Spritzgießmaschinen hergestellt. Der wesentlich aufwendigeren Werkzeugherstellung als bei weichen Werkzeugen steht der Vorteil gegenüber, dass die Formteile aus serientauglichen thermoplastischen Kunststoffen gefertigt werden können. Die Ausbringungsmengen sind zudem höher und erreichen je nach Geometrie und Material mehrere 10.000 Stück. Die Zykluszeiten liegen im Minutenbereich. Sie werden länger, wenn mehrere Loseile per Hand entformt und eingesetzt werden müssen.

5.2.2.1.3 Harte direkt gefertigte Werkzeuge und Werkzeugeinsätze

Die direkte Herstellung von einsatzfähigen Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen basiert auf der additiven Verarbeitung von werkzeugtauglichen Metallen oder Keramiken direkt in der Maschine. Eine vollständige CAD-Werkzeugkonstruktion ist eine zwingende Voraussetzung für den Bau harter Werkzeuge. Die Bauteile sollten mindestens die Genauigkeiten und Oberflächenqualitäten aufweisen, die Nicht-additive Verfahren im Werkzeugbau auch aufweisen. Damit gelten natürlich die Parameter für Serienwerkzeuge. Diese Ziele werden heute (2016) direkt im Prozess noch nicht erreicht. Allerdings gilt das für den konventionellen Werkzeugbau genauso. Spanend hergestellte Elemente werden durch Erodieren und automatisches und manuelles Polieren nachbearbeitet oder ergänzt.

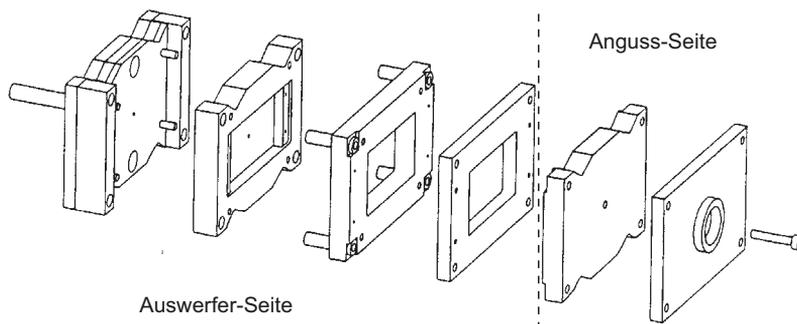


Bild 5.4 Prinzipieller Aufbau eines Stahlstammwerkzeuges für die Kunststoffspritzgießfertigung, Explosionsdarstellung

Die aktuellen Entwicklungen bei den Additiven Verfahren tragen aber kontinuierlich dazu bei, die Oberflächen zu verbessern. Im Prozess geschieht das vor allem durch optimierte Belichtungsstrategien und geschlossene Regelalgorithmen, die auf Messungen des Temperaturfeldes in der Bauebene und auf der Erfassung der Ist-Geometrie durch Kameras in der Prozesskammer basieren.

Die Additive Fertigung ist nach wie vor nur für Bauteile sinnvoll, die nicht oder nicht so gut konventionell hergestellt werden können.

Grundsätzlich sollten alle Werkzeugelemente, die spanend hergestellt werden können, auch spanend hergestellt werden. Auch Komponenten, die als Normalie oder als Halbzeug mit Normaliencharakter zugekauft werden können, sollten keinesfalls additiv gefertigt werden. Bild 5.4 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines typischen Stahlstammwerkzeuges [Lucke95] für den Kunststoffspritzguss. Das eigentliche Werkzeug besteht danach im Wesentlichen aus Normalien, in die die nicht gezeichnete additiv gefertigte Kavität eingesetzt wird.

Auf Bild 5.5 ist ein modular aufgebautes Demonstrationswerkzeug zu sehen. Die Platten bestehen zur Verdeutlichung des Aufbaus aus Plexiglas. Die als Normalien zugekauften Führungen, Federn, Auswerfer und der Düsenstock sind als Originale eingearbeitet und gut zu erkennen. Im Zentrum sieht man beide Hälften des additiv gefertigten Formeinsatzes (Kavität). Vor dem Werkzeug ist das Formteil in Vorder- und Rückansicht zu sehen.

In der Praxis ist es sinnvoll, additiv und konventionell gefertigte Elemente zu kombinieren, indem man additiv auf einer zugekauften Normalie aufbaut. Einige additive Metallmaschinen unterstützen dies, bei Concept Laser (Abschnitt 3.2.8 „LaserCusing – Concept Laser GmbH“) ist es Teil der Strategie.

Es ist offensichtlich, dass die direkte additive Herstellung von Werkzeugen eine umfangreiche Werkzeugkonstruktion voraussetzt, wie sie im Serienwerkzeugbau üblich ist. Additiv werden vorzugsweise Kavitäten oder Element davon gefertigt, keinesfalls ganze Werkzeughälften, wie das bei den gegossenen Werkzeugen der Fall ist.



Bild 5.5 Prinzipieller Aufbau eines Spritzgießwerkzeugs Die Platten wurden zur Demonstration aus Plexiglas gefertigt.
Quelle: 3D Systems

Heutige additiv gefertigte Werkzeuge müssen Eigenschaften aufweisen, die mit Nicht-additiven Verfahren nicht zu erzielen sind. Dazu gehören die konstruktive Umsetzung des Prinzips der konturangepassten Kühlung (Abschnitt 5.2.1.2 „Umsetzung neuer technischer Konzepte“ sowie die Bilder 5.2 und 5.3) und die Integration unterschiedlicher Materialien in ein Werkzeug. Mit Temperierkanälen oder -netzen ausgestattete Werkzeuge sind wesentlich weniger massiv als traditionell ausgelegte Werkzeuge. Ein Festigkeitsnachweis mittels FEM-Simulation und selbstverständlich eine Füllsimulation sind deshalb Bestandteil der Werkzeugauslegung und Konstruktion.

5.2.2.2 Bereitstellung der Daten

Weiche abgegossene Werkzeuge benötigen lediglich ein additiv gefertigtes Urmodell. Der Datenweg zu dessen Herstellung entspricht dem von Bild 2.6.

Harte Werkzeuge erfordern eine Werkzeugkonstruktion. Deshalb muss der Datenweg für das Rapid Tooling von harten gegossenen oder direkt hergestellten Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen gegenüber dem prinzipiellen Datenweg nach Bild 2.6 modifiziert werden (Bild 5.6).

Während beim Rapid Prototyping das additive Bauteil als Faksimile des 3D-Datensatzes aufgefasst werden konnte, weil das additive Bauteil und der CAD-Datensatz idealerweise identisch sind, unterscheiden sich die Geometrie des Werkzeugs und des Formteils grundsätzlich und mitunter erheblich voneinander. Der eigentlichen CAD-Konstruktion des Zielteils nachgeschaltet, aber mit dieser inhaltlich stark

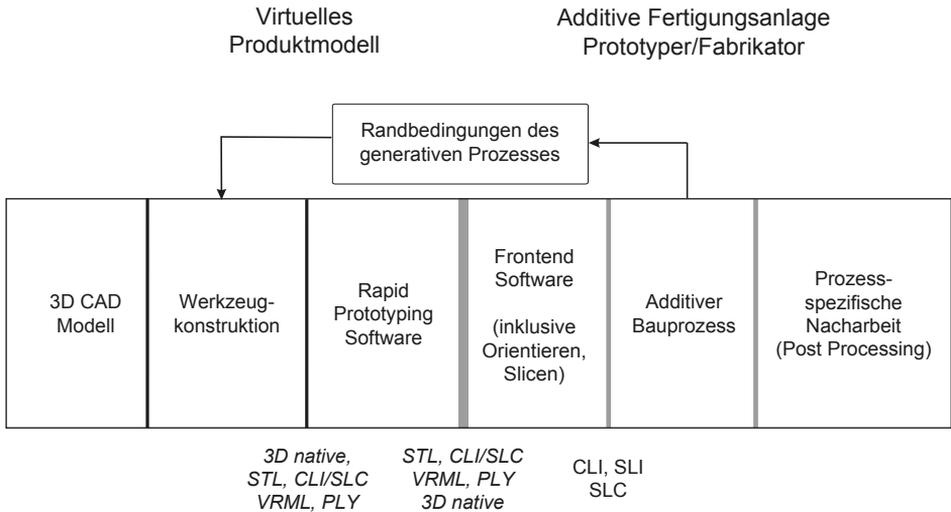


Bild 5.6 Gegenüber Bild 2.6 modifizierter Datenweg für das Rapid Tooling

vernetzt, muss eine Werkzeugkonstruktion erfolgen. Beides kann aber nicht mehr ohne Berücksichtigung des späteren additiven Prozesses erfolgen. Die Orientierung im Bauraum ist entscheidend, wenn beispielsweise unterschiedliche Materialien verwendet werden oder Stufen die Rundheit der Kanäle oder ihre Rauigkeit, also die Strömungsverhältnisse, beeinflussen. Auch der Aufwand der spanenden Nacharbeit, z. B. bei der Herstellung von Systembohrungen z. B. für Auswerfer oder Düsen kann davon abhängen. Grundsätzlich hat sich bewährt, das Bauteil senkrecht zur Entformungsrichtung zu fertigen. Bei der Werkzeugkonstruktion muss daher das später verwendete Additive Verfahren bereits ausgewählt sein und von ihm ausgehende Randbedingungen müssen in die Werkzeugkonstruktion einfließen.

■ 5.3 Indirekte Rapid Tooling-Verfahren – Abformverfahren und Folgeprozesse

Indirekte Verfahren sind nicht zwingend mit additiven Prozessen gekoppelt, sondern in gleichem Maße mit nicht-additiv gefertigten Urmodellen umzusetzen. Einen Vorteil bieten sie nur, wenn die additiv gefertigten Urmodelle den Prozess insgesamt schneller, qualitativ hochwertiger oder sogar überhaupt erst möglich machen. Der Betrachtung der indirekten Rapid Tooling-Verfahren muss deshalb eine Diskussion der Eignung der unterschiedlichen Rapid Prototyping-Verfahren für die Herstellung der Urmodelle vorausgeschickt werden.

5.3.1 Eignung Additiver Verfahren zur Herstellung von Urmodellen für Folgeprozesse

Urmodelle müssen mindestens alle Details aufweisen, die im späteren Formteil zu sehen sein sollen. Das gleiche gilt für die Struktur der Oberfläche. An sie werden aus Gründen der Entformbarkeit und des Formverschleißes darüber hinaus grundsätzlich höchste Anforderungen gestellt. Um Abformungen zu ermöglichen, müssen Urmodelle Festigkeiten aufweisen, die die Entformkräfte sicher aufnehmen. Die Details dürfen deshalb auch nicht zu fein sein. Bei harten Werkzeugen dürfen keine, bei weichen allenfalls geringe Hinterschnitte auftreten. Stufen entgegen der Entformungsrichtung sind zu vermeiden.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, ist bei allen Verfahren ein sorgfältiges Nacharbeiten der Oberflächen, meist durch Schleifen, notwendig. Poröse Modelle, z. B. Sinter- oder 3D Printing-Modelle, werden vor der Abformung infiltriert und in der Regel zusätzlich lackiert. Für gezielte Oberflächeneffekte werden auch Strukturlacke aufgebracht. Es ist darauf zu achten, dass diese Arbeiten die Geometrie nicht verändern.

Bei allen Verfahren ist die Verträglichkeit der Materialien der additiv gefertigten Urmodelle mit denen der Formenmaterialien zu überprüfen. Das gilt insbesondere auch in Hinblick auf Füller und Lacke.

Die unterschiedlichen Additiven Verfahren sind entsprechend unterschiedlich gut für Folgeverfahren geeignet:

Polymerisation. Wegen der hohen Detaillierung und der guten Oberflächen direkt aus dem Prozess sind Polymerisationsverfahren grundsätzlich gut geeignet. Sie sind die vorwiegend für das Abformen eingesetzten additiven Prozesse. Die Nacharbeit ist wegen der weichen Oberflächen relativ einfach. Verfahren ohne Stützen oder solche, bei denen die Stützen ausgewaschen werden, sind bei internen Hohlräumen wie Strömungskanälen von Vorteil.

Bei der Anwendung von Reaktionsharzen ist die Wärmeentwicklung zu berücksichtigen. Insbesondere bei Polymerwerkstoffen mit niedrigen Glasübergangstemperaturen können feine Details erweichen oder angeschmolzen werden.

Sintern (von Kunststoffen). Die Oberflächengüte ist durch Füllern zu verbessern. Das Infiltrieren der porösen Bauteile wird angeraten. Die für das Vakuum-Tiefziehen von Kunststofffolien notwendige definierte Porosität der Form kann prozesseitig eingestellt werden.

3D Printing/Pulver-Binder-Verfahren. Zur Überwindung der Entformkräfte ist eine Steigerung der Festigkeit mittels Infiltration notwendig. Zudem ist eine umfangreiche Nacharbeit zur Erzielung der geforderten Oberflächengüte unumgänglich. Angesichts dieses Aufwandes sind 3D Printing-Verfahren für Abformprozesse weniger geeignet.

Davon ausgenommen sind verlorene Gussformen für den Metallfeinguss, für die es spezielle Baustrategien gibt, z. B. Z-Cast von 3D Systems, Abschnitt 3.6.2 „3D Printer – 3D Systems/Z-Corporation“ oder DSPC von Soligen, Abschnitt 3.6.4 „Direct Shell Production Casting (DSPC) – Soligen“.

Vollständig auswaschbare Modelle für die Herstellung von Bauteilen mit internen Hohlräumen entstehen bei geeigneten Bauparametern und wenn die Infiltration bewusst unterbleibt. Dann wird die Handhabung aufgrund der geringen Festigkeit aber sehr aufwendig.

Schicht-Laminat-Verfahren. Das Infiltrieren gegen das Delaminieren der Schichten und eine Lackierung sind notwendig. Freistehende Wände mit Wandstärken unter 0,5 mm und Aspektverhältnissen über 10 sind in Anbetracht der Entformungskräfte kaum zu realisieren. Die Nacharbeit ist insgesamt aufwendig.

Fused Layer Modeling oder Extrusionsverfahren. Die typische Oberflächenstruktur erfordert in aller Regel ein sehr aufwendiges Füllern und Schleifen. FLM-Verfahren sind daher als Urmodelle für Folgeverfahren kaum von industrieller Bedeutung.

Extrusionsverfahren, die direkt Wachsmodele herstellen, sind hingegen vor allem für den Feingussprozess sehr gut geeignet.

Die Folge- oder Abformprozesse werden unterschieden in solche, die Kunststoffbauteile zum Ziel (Abschnitt 5.3.2 „Indirekte Verfahren zur Herstellung von Werkzeugen für Kunststoffbauteile“) haben und solche, die zur Herstellung von Metall- (Abschnitt 5.3.3 „Indirekte Verfahren zur Herstellung von Metallbauteilen“) und, heute noch von geringerer Bedeutung, Keramikbauteilen eingesetzt werden.

Im Rahmen des Prototype Toolings werden vor allem indirekte Verfahren für Werkzeuge zur Herstellung von Kunststoffformteilen gefertigt.

Metallene Werkzeuge entstehen mit Direct Tooling-Verfahren.

Abformprozesse zur Herstellung von Metallbauteilen sind vorzugsweise mit Gießprozessen, vor allem mit dem Feingussprozess verknüpft und verwenden direkt oder über Zwischenprozesse hergestellte Wachs- oder ausschmelzbare Modelle (Abschnitt 5.3.3 „Indirekte Verfahren zur Herstellung von Metallbauteilen“).

5.3.2 Indirekte Verfahren zur Herstellung von Werkzeugen für Kunststoffbauteile

Die gebräuchlichsten nicht-additiven Folgeverfahren zur Herstellung von Kunststoffbauteilen auf der Basis von additiven Urmodellen gliedert man nach den Eigenschaften der Werkzeuge. Abgegossen werden weiche oder harte Werkzeuge. Die dazu gehörenden Verfahren sind:

Weiche Werkzeuge oder Formen

- Vakuumgießen,
- Nylongießen,
- Silikonabguss,
- Photocasting,
- Spincasting.

Harte Werkzeuge und Werkzeugeinsätze

- Gießharzwerkzeuge,
- Maskenwerkzeuge (Polyurethangießen).

Alle Verfahren sind nicht-additiv und werden daher nachstehend nur kurz beschrieben, um sie in den Zusammenhang mit additiv gefertigten Urmodellen zu stellen.

Die größte technische Bedeutung haben weiche Werkzeuge für das Vakuumgießen (engl. Room Temperature Vulcanization, RTV, oder auch Silicon Transfer Molding). Gefertigt werden Prototypen und Kleinstserien. Für harte Werkzeuge ist das Spritzgießen (Kunststoffspritzguss) von thermoplastischen Formteilen die wichtigste Anwendung.

Während das Vakuumgießen zur Herstellung von Prototypen aber auch häufig zur Fertigung von Endprodukten eingesetzt wird, dienen gegossene harte Spritzgießwerkzeuge in den meisten Fällen nur zur Herstellung von Prototypen und Kleinstserien mit dem Charakter von Endprodukten.

5.3.2.1 Abgießen in weiche Werkzeuge oder Formen

Weiche Werkzeuge aus Silikon oder Kautschukmasse werden beim Vakuumgießen, Nylongießen, Silikonabguss, Photocasting und Spincasting verwendet. Den Verfahren gemeinsam ist, dass ein Urmodell in ein Werkzeug abgeformt wird, das in der Regel aus zwei Formhälften besteht. Bei großen Hinterschnitten können auch kompliziertere Werkzeugkonstruktionen mit Losteilen notwendig werden.

5.3.2.1.1 Vakuumgießen

Das *Vakuumgießen* ist das wichtigste Abformverfahren in der Prototypen- und der spezialisierten Kleinserienfertigung. Die Bauteile entstehen durch Vergießen von 2-Komponenten Polyurethan ((PUR oder auch PU) Harzen in einem Silikonwerkzeug unter Vakuum. Der Vorteil des Gießens unter Vakuum besteht in der gleichmäßigen Füllung der Form und der Vermeidung von Fehlstellen durch Blasen. Hergestellt werden auch sehr kleine Bauteile (z. B. in der Schmuckindustrie) und sehr große Bauteile (z. B. Kfz-Frontschürzen, Bild 5.7).



Bild 5.7 Frontschürze. Vakuumgießen und Finishing
Quelle: CP-GmbH

Die besonderen Vorteile des Vakuumgießens liegen darin, dass für das Werkzeug keine CAD-Werkzeugkonstruktion notwendig ist und dass sich die Silikonformen im Temperaturbereich um die 70 °C nahezu linear mit der Temperatur ausdehnen und somit skalierbar sind, was auch zum Ausgleich des Schwundes benutzt werden kann. Die Bauteile können deshalb durch Temperieren zumindest in einer Vorzugsrichtung genau den Anforderungen angepasst werden.

Die Herstellung der Form erfolgt wie unter *weiche gegossene Werkzeuge*, Abschnitt 5.2.2.1 „Prototypwerkzeuge“, besprochen. Das additiv gefertigte Urmodell wird beim Abformen häufig beschädigt. Wenn es unversehrt bleibt, können zur Herstellung größerer Serien weitere Formen angefertigt werden.

Die Zykluszeit, die Herstellzeit für ein Bauteil, liegt je nach Geometrie und Größe des Bauteils bei einer halben bis über einer Stunde. Dabei dauert das eigentliche Gießen nur circa vier bis acht Minuten, die Aushärtung in der circa 60 °C warmen Form erfolgt in einem Wärmeofen und ist in bis zu einer Stunde abgeschlossen; das Bauteil kann entformt werden. Je nach Vakuumgießwerkstoff und Komplexität der Form können zehn bis dreißig, in Ausnahmefällen auch bis zu 50 Teile aus einer Form gefertigt werden. Bei komplexen Geometrien geht man im Mittel von 15 Abgüssen pro Silikonform aus. Die absolute Ausbringungsmenge wird daher wesentlich von wirtschaftlichen Kriterien begrenzt.

Zur Fertigung werden manuelle und automatische Gießkammern in unterschiedlichen Größen angeboten. Industrielle Modelle (z. B. Bild 5.8 oben) mischen die Komponenten des Gießharzes automatisch und füllen sie über einen Trichter und einen Anguss Schlauch in die darunter liegende Form (Bild 5.8 unten). Im unteren Teil der Vakuumkammer befindet sich während des Gießvorgangs die Silikonform.

Stichwortverzeichnis

Symbole

- 2½D-Verfahren 21, 23, 101
 - 2D-Schneidplotter 90
 - 2-Fokus-Verfahren 101
 - 3D-CAD-Verfahren 29
 - 3D CSP 135
 - 3D-Drucken 3, 12, 103
 - 3D-Drucker 75
 - InVision SR 153
 - kontinuierlich arbeitender 487
 - 3D-Drucksystem 298
 - Voxeljet 300
 - VX 200 298
 - VX 500 298
 - VX 800 298
 - VX 1000 298
 - VX 4000 298
 - VXC 800 298
 - 3D fähig 23
 - 3D gedrucktes Auto 521
 - 3D Keltool 132, 429, 432
 - 3D-Konstruktionen, parametrische 32
 - 3D-Manager 124
 - 3D Micromac 190
 - 3DP 103, 282
 - 3D Pen 519
 - 3D Printed Car „Strati“ 521
 - 3D printed Shelby Cobra Re 523
 - 3D Printer 154, 262, 283
 - 3DPrint™ 124
 - 3D Printing 3, 92, 445, 471, 476
 - Maschine 285
 - Pen 3Doodler 520
 - Verfahren 74, 282, 466
 - von Metallen 445
 - von Metallpulvern mit Polymerbindern 444
 - 3D-Sinteranlage 175
 - 3D-Stift 519
 - 3D-System 276
 - 3D Systems 107, 121, 153, 161, 172, 182, 276, 323
 - 3D Systems/OptoForm 164
 - 3D-Verfahren 101
 - 3D-Volumenmodell 25, 27
 - 9. ProdSV 532
- ## A
- Abbruchreaktion 49
 - Abfallkatalog 534
 - Abfallrahmenrichtlinie 75/442/EWG 534
 - Abfallrecht 529, 534
 - Abfallverzeichnis-Verordnung 534
 - Abformprozess 117
 - Abformverfahren 10, 412
 - Abkühlvorgänge 67
 - ABS 72, 73, 130, 271, 542
 - Abscheiden
 - chemisch 76
 - physikalisch 76
 - Abscheideverfahren 97

- Accura Amethyst 130
- Accura Bluestone 130
- Accura SI 25 58
- Accurate Clear Epoxy Solids 128, 439
- ACES 128, 439
 - Injection Molding (AIM) 10, 121, 128, 132
 - Injection Molding Prozess 439
- Acrylate 49, 59, 110, 116, 119, 137, 163, 541
- Acrylglas 301
- Acryl-Photopolymer 154
- Active Customization 468
- Actua 276
- additive Anlagen 551
- additive Fertigung
 - Datenfluss 27
 - Datenwege 34
- additive Fertigungsanlagen 16
- additive Fertigungsverfahren 1, 2, 3, 21, 30, 47, 93, 95, 458
 - Systematik 93
 - Verfahrensschritte 26
- Additive Layer Manufacturing (ALM) 12
- Additive Manufacturing 3
- Additive Manufacturing File Format (AMF) 45
- Additive Manufacturing Verfahren 93
- additive (Prototyp-)Verfahren 475
 - Konstruktion 475
 - Logistik 475
 - Material 475
 - Organisation 475
 - Prozess 475
 - Qualitätssicherung 475
- additives Prinzip 47
- additive Verfahren 93
- Advanced Digital Manufacturing (ADM) 458
- Advanced Direct Manufacturing (ADM) 173
- aerodynamische Fokussierung 305
- Aerosoldrucken 92, 103, 234
- Aerosoldruckverfahren 76, 77, 92, 100
- Aerosole 97, 302, 304
- Aerosol Jetting 304
- Aerosolprinting 103, 302
- AIM 10, 128, 132, 439
- AKF 73
- aktive Personalisierung 468, 470
- aktiver Recoater 127, 133
- Alisa Minyukova 396
- AlMg-Spinell 291
- alphacam 260
- Alu-Feingussbauteile 437
- AluMide 196
- Aluminium 63, 209, 313
- Aluminiumlegierung 211, 216
- Aluminiumoxid 78
- Aluminium-Silikat-Sand 443
- AM-Bearbeitungszentren 497
- AMF-Format 25, 27, 45, 46
- amorphe Kunststoffe 61, 62, 167
- amorphe Materialien 167
- amorphes Polystyrolpulver 197
- Anatomic Facsimile Models 390
- anatomische Faksimiles 390, 391
- Anisotropien 74
- Anlagen, additive 551
- Ann Arbor 310
- Ansaugkrümmer 381
- Anschaffungskosten 550
- Ansichtsmodell 16
- Arbeitskurve 53
- Arbeitsstättenverordnung 529
- ARBURG freeformer 278
- ARBURG-Kunststoff-Freiformen (AKF) 73
- ARCAM 221
- ARCAM 200 226
- ARCAM A2 221
- ARCAM AB 221
- ARCAM ASTM F75 227

- ARCAM EBM S12 224
- ARCAM H13 226
- Architektur 398
- Architekturdenkmäler 401
- Ar⁺⁺-Ionen- und HeCd-Laser 84
- ATEX Richtlinien 216
- Attrappe 345, 346
- Aufheizvorgänge 67
- Aufrollen 62
- Aufschmelzen 61
- Aushärtspur 55
- Auspacken 70
- Auspackstation 182, 293
- Ausschneiden aus Folien und Fügen 68
- automatische Schichtverfahren 244
- automatisierte Pulverförderung 216
- Automobilbau 327
- AVV 534
- B**
- BAAM 324, 328
- BAAM-Anlage 325
- Ballistic Particle Manufacturing 525
- ballistische Verfahren 71, 73, 97, 102
- bare-dies 136
- Base 28, 166
- Bauebene 21
- Bauplatzform 108, 127
- Bauraum, Orientierung 421
- Baurecht 529
- Baurichtung 27
- Baustrategien 110
- Bauteil 356
 - Eigenschaften 98
 - endfest 75
 - Festigkeit 56
 - gestaltfest 75
 - Orientierung 28
 - Wachsen 66
- Beam Delivery System 175
- Beam Interference 101
 - Solidification (BIS) 79
- Beam Width Compensation 85, 109
- BEGO-Medifactory-Verfahren 508
- Begriffsbestimmung 411
- Belichtungsenergie 110
- Benchmark-Teile 339
- Benetzung 99
- Berandungsfehler, STL 39
- Bergmann, Frithjof 474, 525
- Beryllium Legierungen (AlBeMet) 227
- Beschichten 229
- Beschichtungssystem 194
- Beschreibungsfehler, STL 39
- Betriebskosten - Energiekosten 549
- Bewegungselement 80, 81
- Bewerten (Evaluieren) und Zulassen (Autorisieren) von Chemikalien 538
- BFF file 125
- Big Area Additive Manufacturing 324, 328
- Bildhauerei und Plastiken 395
- BImSchG 533
- BImSchV, 4. 533
- BImSchV, 9. 534
- Binärfile 37
- Bindenähte 72
 - beim Extrusionsverfahren 72
- Binder 75
 - flüssige 74, 86
- Biokompatibilität 196, 389, 541, 542
- biometrische 3D-Daten 469
- Biplotter 141
- Blechbearbeitung 449
- Blindplananteil 354
- BlueCast 275
- Body-Scannen 34
- Border 109, 126
- Break Away Support System (BASS) 263
- Break Away Support Technology (BST) 269
- Break Out Station 176, 182
- Bridge Tooling 10, 413

- Bridgeworks 125
- Broker 560
- Bronzeguss 397
- Bubble-Jet-Druckkopf 86, 87
- Built 154
 - Station 124, 125
- Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) 533

- C**
- Cabrioverdeck 383
- CAD-Modelltypen 30
- CAD-Systeme 33
- CAD to Metal 223
- CAD to Metal EBM S12 221
- CAMOD 140
- Carbonfasern 63
- CarbonMide 196, 197
- CAS 538
- CASM (Computer Assisted Satellite Manufacturing) 313
- CastForm 178
- CastForm PS 181
- Ceiling-Temperatur 51
- CE-Kennzeichnung 532
- Ceraprint 502
- Charlyrobot 253
- Chassis, gedrucktes 521
- Chemical Abstract Service (CAS) 538
- Chemikalienrecht 529, 535
- Chip-Size-Packaging 135
- CIM-Kette 353
- Cincinnati BAAM-Maschine 523
- CINCINNATI Inc. 324
- Clay-Modell 523
- Clermont-Ferrand 228
- CLI 40, 190
 - Daten 141
 - File 42, 43
 - Format 35, 42
- Client Customization (CliCu) 468
- CLIP-Prozess 101
- Cloud Fabbing 18
- CMB – Controlled Metal Build Up 307
 - Verfahren 309
- CNC-Schichtfräs-Zentrum LMC 252
- CO₂-Laser 84, 172, 175, 182, 232, 249
- CO₂-Lasersysteme 193
- CobaltChrome MP1 198
- CobaltChrome SP1 199
- Cocktailbecher 382
- Co-Legierungen 241
- Common Layer Interface 190
- Composites 96
- Computer Aided Modeling Devices (CAMOD) 140
- Computer-Skulpturen 393
- Concept Car 524
- Concept Laser 419, 449
- Concept Laser GmbH 212
- Concept Modeling 7
- Concept Modeller 154
- Concept Models 356
- Conformal Cooling 415
- Continuous Flow-Verfahren 86
- Contour Crafting (CC) 569
- Controlled Metal Build Up (CMB) 307, 309
- Course4 Technology 132
- Craniofaciale Chirurgie 469
- Craniosynostose 392
- Crash Boxen 465
- Critical Energy 51
- CTL Daten 162
- Cubic Technologies 247, 248
- Cubital Ltd. 138
- Cure Depth 52
- Curl 62, 111, 168, 186, 327
- Customization 467
- Customizing 15, 16
- Cyber Production 459, 495
- Cyclic Build Style 126
- Cyclone 436

D

- Datenkontrollmodell 357, 384
- Datensatz 40
- Datenwege für die additive Fertigung 34
- Dauerstrich, continuous wave, CW 85
- DDM 458
- Deckschicht 112, 126
- Delaminierung 70
- Delta Roboter 83
- Delta-Rostock Projekte [DRFAB]) 81
- Densification Furnace 288, 291, 292
- Dentalindustrie 130
- Dentalmarkt 288
- Dentaltechnik 291, 508
- Depowdering Unit 287
- Design for Additive Manufacturing 489
- Design for Rapid Manufacturing 489
- Designmodell 357
- Design Serie 269
- Design und Kunst 393, 515
- Desktop Concept Modeler 258
- Desktop Manufacturing (DMF) 12
- Desktop Manufacturing (DTM) 459
- DGM-MORI 319
- DGM MORI LASERTEC 320
- Differenzial Scanning Calorimetry (DSC) 63
- Diffusionsschweißen 69
- Digitales Produktmodell 30
- Digital Light Processing (DLP) 85, 117, 139
- Digital Manufacturing (DM) 9, 458
- Digital Warehousing 459
- Digital Wax 158, 159
- Digital Wax 010 (010plus) 158
- DIGITAL Wax 030 159
- DIM 474
- Dimension 262, 270
- Dimension 1200es 260
- DIN 8580 93
- diodengepumpte Festkörperlaser 84
- Diodenlaser 232
- Direct Cast 442
- Direct Core and Mold Making Machine 287, 292
- Direct Core and Mold Making System 443
- Direct Digital Manufacturing (DDM) 458
- Direct Manufacturing 8, 9, 66, 457
- Direct Metal Fabrication 316, 322
- Direct Metal Fabricator 238
- Direct Metal Laser Sintering (DMLS) 194, 447
- Direct Metal Printer 289
- Direct Metal Printing 287, 445
- DirectPart 198
- DirectPart-Prozess 194
- DirectPattern 439
- Direct Rapid Tooling 10
- Direct Shell Production Casting (DSPC) 295, 297
- DirectSteel H20 198
- DirectTool 447
- Direct Tooling 9, 10, 66, 412, 438, 446
- DirectTool Prozess 194, 447
- direkte digitale Produktion 100
- direkte Konturgenerierung 41
- direkte Rapid Tooling-Verfahren 438
- direktes Laserformen 218, 450
- direkte Verfahren 412
 - Direct Tooling 412
 - Prototype Tooling 412
- Direkt Pattern 439
- diskrete Koaxial-Düsen 233
- DLP 117, 139
 - Belichtungssystem 139
 - Modul 162
 - Projektor 85, 142
- DM 458
- DMF 12
- DMG MORI 322

- DMLS 447, 448
 - Prozess 200
 - Verfahren 506
 - DOD 86, 272
 - doppelte Dreieckspatches 39
 - Downskin 131
 - Drainage 112
 - Drainageöffnung 58
 - Drastic Pull Ejection Meniscus Control 89
 - Dreieckspatches 36
 - Drewe Otoplastik 162
 - Drop by Drop-Verfahren 86
 - Drop on Demand (DOD) 86, 259, 272
 - drop on powder 75
 - Druckguss 443
 - Druckkopf 86, 92, 570
 - thermischer 87
 - Druckkopf-Lampe-Verfahren 48
 - DSC-Verlauf 63
 - D-Shape Prozess 570
 - DSPC 295
 - DSPC-1 295
 - DTM 459
 - Dual-Spot 126
 - DuraForm 178
 - AF 180
 - EX 179
 - Flex 180
 - FR 180
 - PA 178
 - DXF 29
 - Dynamic Voxel Thickness 146
- E**
- EAK 535
 - EBM 103, 222, 451
 - EBM Control Software 222
 - Eckenmodell 30
 - ecoMold Projekt 506
 - Edelmetalle 216
 - Edelstahl 205, 209, 211, 216
 - -pulver S3 291
 - Eden 147, 149
 - EG-Konformitätserklärung 532
 - Eigenschaftspyramide für Kunststoffe 478
 - Eindringtiefe 55, 56
 - optische 56
 - Einhärtetiefe 52, 53, 54, 55, 56, 109
 - Einkomponenten-Metallpulver 446
 - und Keramiken 65
 - Verfahren 447
 - einlagiges Beschichten 230
 - Einleger 418
 - Einordnung der Additiven
 - Fertigungsverfahren 1
 - Einordnung und Begriffsbestimmung 411
 - Electron Beam Melting (EBM) 103, 222, 451
 - Electro Optical Systems GmbH (EOS) 133, 189, 447
 - Elektronenstrahl 165
 - Quelle 223
 - Schmelzen 103
 - Sintern 164, 221, 451
 - Elektronenstrahlung 79
 - Elektroviskosität 79, 80
 - Elemente
 - Bewegungselement 80
 - generierende 84
 - konturierende 80
 - schichterzeugende 80, 91, 92
 - ELI 200
 - e-Manufacturing 9, 459
 - ENDFACET 37
 - Endprodukte 16, 356
 - Enhanced Resolution Module (ERM) 145
 - Entbinder 182
 - Entlastungsschnitte 28
 - Entwicklungspotenzial 100
 - Entwicklungsschritte nach VDI 2221 356
 - Entwicklungsziele 342

- Entwurfsmuster 345
- EnvisionTEC GmbH 139
- EOS 133
 - Prozess-Software 190
 - RP-Tools 190
- EOSINT
 - M 189, 194, 195
 - M270 189
 - P 189, 192
 - S750 189
- EOSPACE 190
- Epoxidharze 49, 59, 110, 130, 137
- Ergonomiemodell 357
- Erodierstruktur 427
- Erstmusterprüfbericht 341
- E-Shell 100 145
- Europäischer Abfallkatalog (EAK) 535
- Evaluation and Authorisation of Chemicals 538
- EXACT-Baustil 131
- Eximerlaser 136
- ExOne GmbH 287, 290, 445
 - Formsand Drucker 293
 - ProMetal Division 287
- Explosionszeichnung 522
- extra-low interstitial 200
- Extruder 90, 92
- extrudierende Verfahren 71, 72, 74
- Extrudieren und Fräsen 323
- Extrusionskopf 80
- Extrusionsmaterialien 542
- Extrusionsverfahren (FDM) 71, 97, 99, 100, 101, 103, 259, 402
 - Bindenähte 72
 - Übersicht 260
- Extrusion von Schäumen oder Pasten 97

- F**
- Fabber 16, 17, 18, 72, 17
 - Communities 18
- Fabrication 459
- Fabrikator 16, 17
- FACET 37
- Faksimile 459
 - anatomisches 390, 391
- FAMS 496
- Farbe 471
- farbige Bauteile 72
- farbiges ABS-Funktionsmodell 265
- farbiges Modell 285
- Faserlaser 65, 84, 98, 208, 235
- Fassonstift 507
- FAST-Baustil 131
- Fast Sculp 464
- FDA 137
- FDM 260, 402
 - Anlagen 260
 - Bauteil 476
 - Maxxum 264
- Fehler im STL-File 37
- Fehlorientierung, STL 39
- Feinguss 434
 - Bauteile 132
 - Prozess 130, 167
 - Wachs (ICW 06) 271
- Feingussprozess 117
- Fein-Skalierung 418
- Fertigungsverfahren
 - additive 458
 - schichtorientierte 12
- Festkörperlaser 130
 - diodengepumpte 84
- FFF 458
- Film Transfer Imaging (FTI) 118, 161
- Film Transfer Imaging-Verfahren 58
- Fine-Point-Stützen 116
- Fine-Point-Verfahren 111
- Finishing 105, 117
- Fixkosten 548
- Flächenbegrenzungsmodell 31
- Flächenenergie 52, 53, 54, 56
- Flächenfüllung 126

- Flächenmodell 31
 - Flächenrückführung 33
 - flammgeschützter Werkstoff 197
 - Flash Cure 140
 - Flash Curing 162
 - flexible AM-Systeme 19, 496
 - Fließverhalten 193
 - FLM 92, 103
 - Flüssigphasensintern 64
 - Fockele & Schwarze (F&S)
 - Stereolithographietechnik GmbH 134
 - Fokussierung, aerodynamische 305
 - Folgeprozesse 117, 343, 365
 - Folgeverfahren 106, 412
 - Ford Sprayform 433
 - Formation 310, 312
 - Formative Fertigungsverfahren 1
 - Formen 411
 - formgebendes Schweißen 229
 - Formsand 5
 - Fortus 260
 - Fototec 514
 - Fräser 91, 92, 308
 - Fräsmaschine 312
 - freeformer 73
 - Free Form Fabrication (FFF) 222, 458
 - Frontend Software, STL 27, 40, 124
 - Frontloading 349, 351
 - Frontschürze 425
 - FS-Realizer 134
 - F-Theta-Linse 82, 333
 - FTI 118
 - Verfahren 161
 - FullCure-705 Support 151
 - Füllstoffe 119
 - Füllung 126
 - Functional Prototypes 346
 - Functional Prototyping 7
 - Funktionsbauteile 16
 - Funktionsintegration 464
 - Funktionsmodell 357, 384, 385
 - Funktionsprototypen 7, 8, 346, 362, 363
 - Fused Deposition Modeling (FDM) 71, 260, 264, 265
 - Fused Layer Modeling (FLM) 71, 103, 147, 259
- G**
- Galvanometerprinzip 82
 - Galvo 82
 - Scanner 81, 108, 214
 - Gebrauchtmarkt 123
 - Gefährdungsbeurteilung 536
 - Gefahrstoffverordnung 535
 - gefülltes Harz 130
 - gefüllte Sinterwerkstoffe 63
 - Gegengießen 430
 - Geheimhaltung 560
 - Gel-Punkt 51
 - Genauigkeiten 99
 - Generative Verfahrensfamilien 103
 - Generieren
 - aus der festen Phase 47, 60
 - aus der flüssigen Phase 47, 48
 - aus der Gasphase 47, 76
 - mit der Pulverdüse 65
 - generierende Elemente 80, 84
 - Geometrie, komplexe 543
 - Geometrieprototypen 360, 362
 - Geräte- und Produktsicherheitsgesetz 531
 - Gewerberecht 529, 531
 - GF 178
 - GHS 535
 - Gießharze 417
 - Gießharzwerkzeuge 430
 - Gießprozess 507
 - glasgefüllte Sinterwerkstoffe (GF) 63
 - glasgefülltes Polyamid 179
 - Google SketchUp 495
 - GPSG 531
 - graded materials 75, 471, 525

- Gradientenwerkzeuge 455
- Granalien 96
- Greifer 464
- Grundkörpermodelle 31
- Grünfestigkeit 111
- Grünling 59
- Grünteil 64, 289
- Grünzustand 57
- GSG 531
- Gussets 111

- H**
- Handskizzen 33
- Harzbad 58, 108, 112
- Harzbehälter 129
- Harze, gefüllt 107, 130
- Harzoberfläche 109
- Harzparameter 125
- Hatches 109, 126
- HeCd-Laser 84
- heiß isostatisches Pressen (HIP) 199
- Helisys 248
- Hermle 314
 - MPA 40 315
- Hersteller Personalisierung 467
- Hochleistungskeramiken 502
- Hochleistungskunststoff 72
- Hochschule Mittweida 562
- hohlgebaute Stereolithographie-Modelle 112
- Hohlräume, interne 67
- Holographic Interference Solidification (HIS) 79
- HPGL 29, 33
 - Files 41
 - Format 33
- HS Celerity BDS 175
- Hülle-Kern-Strategie 207
- Hülle-Kern-Verfahren 198
- Hybrid 319
 - Maschinen 106
 - Modelle 31, 32, 399
 - Verfahren 259, 306
- hygroskopisch 131

- I**
- ICAM 459
- ICW 06 271
- Idea Serie 268
- IGES 29
- Imagen HNB Alloy 291
- IMAGEWARE 289
- imaginäre Manufaktur (DIM) 474
- IMLS 444
- Immissionsschutzrecht 529
- impact-Verfahren 84
- Implantat 200, 469, 503
 - Legierungen 199
- Inconel 209, 211
 - 620 227
 - 625 227, 237
 - 718 227
- Indirect Metal Laser Sintering (IMLS) 444
- Indirect Prototyping 10, 11, 347
- Indirect Tooling 10, 11
- Indirektes Rapid Prototyping 347
- indirekte Verfahren 412, 421
- individualisierte Produktion 15, 16
- Individualisierung 467
 - von Massenprodukten 582
- InduraBase 275
- InduraCast 275
- InduraFill 275
- Industrial 3D-Drucker 19
- industrielle Komplettfertigung 493
- Inertgas-Atmosphäre 67
- Inertisierung 186
 - der Maschine 166
- Inertisierungszeiten 186
- Infiltration 76, 289, 291
- Infrarot-Heizung 165
- Infrarotstrahler 79, 227

- Ingenieurwerkstoffe 98
- InkJet 284
 - Druckkopf 274
 - Systeme 86
- Instandsetzungskosten 550
- Integrated Computer Aided Manufacturing (ICAM) 459
- Intelligent Powder Cartridge 176
- interne Hohlräume 67
- Inverkehrbringen von Additiven
 - Fertigungsanlagen 529
- Investitionen 550
- Invisible Supports 223, 227
- InVision DP 153
- InVision Finisher 157
- InVision HR 153
- InVision-Print-Client-Software 154
- IPC 176
- iPro™
 - 9000 XL SLA® 122
 - SLA® Production Printer 124
- ISO/ASTM 52900:2015 3
- Isochromatenbild 406
- Isopropanol 59, 115

- J**
- JAR-Vorschrift 197
- JewelCAD-Software 510
- Juweliere 290

- K**
- Kalibrierplatte 131
- Kantenmodell 31
- Kapillarboden 379
- Kaptonfolie 77
- Kavität 419
- Keltool 121
- Kennzeichnung von Chemikalien (GHS) 535
- Keramik 562
 - Materialien 502, 503
 - Pulver 291, 566
 - Sinteranlagen 169
 - Werkstoffe 566
- Kettenfortpflanzungsreaktion 49
- Kinergy Precision Engineering 252
- KIRA Corporation 252
- KIRA Europe GmbH 252
- Klassifizierung der additiven
 - Fertigungsverfahren 93, 94
- Koaxial-Düse 232
- Kobalt-Chrom 209, 211
 - Legierungen 216
 - Stähle 205
- Kodak-Winkel 166
- Komplettfertigung, industrielle 493
- komplexe Geometrie 543
- Kompositbauteile 96
- Konditionierung 168
- Konstruktionswerkstoffe 76
- kontinuierlich arbeitende Maschine 75
- kontinuierlich arbeitender 3D-Drucker 487
- kontinuierliche 3D-Modellierung 101
- kontinuierliche Berandung 23
- kontinuierliche Koaxial-Düsen 232
- kontinuierliche z-Konturierung 24, 102
- kontrollierter Metallaufbau 309
- konturangepasste Kühlung 415, 506
- Konturgenerierung, direkte 41
- konturierendes Element 80
- Konturieren mittels Laserstrahl 81
- Konturierung 21
- konturorientierte Schnittstelle 40
- Konzeptkunst 396
- Konzeptmodelle 7, 8, 16, 356, 360, 361, 365, 384
- Koordinatenmessarm 341
- Koordinatenmessmaschine 33
- kopfüber arrangiertes Stereolithographie-System 139
- Kostenbeeinflussung 352

- Kostenbeurteilung 352
- Kosten, variable 547
- Kosten von additive Manufacturing-Verfahren 549
- Kosten von Rapid Prototyping-Verfahren 546, 547
- kristalline Kunststoffe 61, 62, 167
- Kristallisationstemperatur 62
- Kristallisationswärme 63
- kritische Energie 57
- kritische Erfolgsfaktoren 545, 583
- kritische Flächenenergie 51
- Kunst 393, 515
- Kunstobjekte, metallene 519
- Kunststoffe 71, 137, 167
 - amorphe 61, 62, 167
 - Eigenschaftspyramide 477
 - kristalline 61, 62, 167
 - teilkristalline 62
- Kunststoffpulver 61
- Kunststoff-Sinterprozess 166
- kunststoffummantelte Metallpartikel 444
- L**
- Lab on Chip 465
- LAM 458
- Lamellenwerkzeug 454
- Laminated Metal Prototyping 258
- Laminated Metal Tooling 454
- Laminated Object Manufacturing (LMC) 69
- Laminated Object Manufacturing (LOM) 247
- Laminate Manufacturing (LLM)-Verfahren 246
- Laminieren und Ultraschallschweißen 310
- Lampen-Masken-Verfahren 107, 139
- Large Format Printer 148
- Large Format Printing, LFP 86
- Laser Additive Manufacturing (LAM) 458
- Laser-Auftragsschweißen 307
- Laser-Beschichten 230
- Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD) 77
- Laser Cladding 230
- LaserCUSING® 212, 449, 507
- Laser Engineered Net Shaping (LENS) 233, 452
- LaserForm 178
- Laserformen, direktes 450
- Laser-Generieren 230, 452
- Laser Metal Deposition (LMD) 237, 453
- Laser Metal Fabrication 239
- Laser Metal Fusion (LMF) 218
- Laser-Modell-System (LMS) 134
- Laser-Scanner 48, 83, 129
 - Belichter 108
 - Einheit 165
 - Prinzip 172, 182, 323
 - Stereolithographie 107
 - Verfahren 48, 111, 121, 133, 134, 191
- Laser-Scanner-Stereolithographie 107
 - Verfahren 109
- Laserschmelzen 201, 206, 219, 448
 - selektives 103
- Laserschmelzverfahren, Prinzip 165
- Laserschneidverfahren 70
- Laser-Sintermodell 375
- Lasersintern (LS) 164, 189, 209, 379, 397, 451
 - Phenix 228
 - quasi-isothermes 63
 - selektives 103, 172
- Lasersinterverfahren, Prinzip 165
- Laser-Stereolithographie 57, 59, 103, 107, 113, 380, 382
- Laser-Stereolithographie-Modell 375
- Laserzentrum Mittelsachsen 562

- Layer-File 125
 - Layer Laminate Manufacturing (LLM)
 - 68, 69, 103, 242
 - Verfahren 243
 - Layer Manufacturing 12
 - Layer Milling Process (LMP) 252
 - LCD-Projektor 377
 - LCD-Technik 85
 - LCM+ 213
 - LCVD 77
 - Technik 78
 - Verfahren 78
 - lebende Zellen 75
 - LENS 233, 234
 - 850-R 233, 236
 - Lightyear 124, 125
 - Linearachse 83
 - Line Width Compensation 109
 - Liquid Crystal Display 85
 - Liquifier 90
 - LLM 92, 103, 242, 246
 - LMD 237
 - Local Motors 522
 - LOM 69, 247
 - 1015plus 247, 249
 - 2030H 247, 249
 - Composite 250
 - Paper 250
 - Plastic 250
 - Losgrößen und Bauraumnutzung 554
 - Losteile 430
 - Lösungsmittel 542
 - LS 60, 164
 - Luftauswerfer 416
 - Luftzerlegungsanlage 186
- M**
- M3D 234, 302
 - Verfahren 505
 - MAGICS RP-Software 174
 - Make or buy 559
 - manuelles Schicht-Laminat-Verfahren 244
 - Manufacturer Customization 468
 - Manufacturing on Demand 491
 - Maschine Mcor ARKe 255
 - Maschine Mcor IRIS HD 255
 - Maschinenklassen 19
 - Maskenverfahren 48, 85
 - einstufig 59
 - Maskenwerkzeuge 431
 - Maskless Masoscale Material Deposition (M3D) 234, 302
 - Massenprodukte, Personalisierung 467
 - Material
 - prozessspezifisch 106
 - VisiJet Crystal Plastic 156
 - VisiJet[®] Dentcast Dental Wax-up Material 157
 - VisiJet Hi-Cast 157
 - VisiJet[®] Stoneplast Dental Model Material 157
 - VisiJet Prowax 157
 - VisiJet X 156
 - Materialice 124
 - Materialien
 - amorphe 167
 - keramische 503
 - Materialise 174, 190
 - Materialkosten 548
 - Material Safety Data Sheets (MSDS) 537
 - Materialverbrauch 555
 - Materialzuweisungen 45
 - mathematische Schichtinformation 26
 - Mcor 254
 - ARKe 254
 - IRIS HD 254
 - Matrix 300⁺ 254
 - MCP
 - ReaLizer II^{SLM} 201
 - Medizin 387
 - Geräte 514

- Technik 137, 511
 - medizinische Modelle 387
 - mega-scale Objekte 569
 - Mehrkomponenten Metall-Metallpulver 64
 - Mehrkomponenten Metall-Polymerpulver 63
 - Mehrkomponenten-Metallpulver-Lasersintern 446
 - mehrlagiges Beschichten 230
 - Mehrstrahl-Düsen 233
 - MEIKO 158
 - MEMS 465
 - Meniskus-Effekt 89
 - Meso-Bauteile 465
 - Metall 3D Printing-Verfahren 519
 - Metalle
 - 3D Printing 445
 - selektives Lasersintern 444
 - metallene Schmuck- und Kunstobjekte 519
 - Metallfolien-LOM 258
 - Metalllamellenwerkzeuge 454
 - Metall-Metallpulver, Mehrkomponente 64
 - Metallmodelle 117
 - Metallpartikel, kunststoffummantelte 444
 - Metall-Polymerpulver, Mehrkomponenten 63
 - Metallpulver
 - Mikrostrukturen 564
 - niedrig schmelzendes 64
 - Metallpulver und Keramiken, Einkomponenten- 65
 - Metallspritzen 429
 - Metall und Formsand Printer 287
 - mezo-scale Bauteile 561
 - Microelectromechanical Systems 465
 - Micromag AG 562
 - microTEC 135, 505
 - Mikrobauteile 561, 562, 578
 - mikroelektronische Komponenten 234
 - Mikro-Lasersintern 5, 190
 - Mikrosintern 562
 - Mikrostereolithographie 135, 561
 - Mikrostrahlen 200
 - Mikrostrukturen 61, 563
 - aus Keramikpulver 566
 - aus Metallpulver 564
 - MJM 119, 153, 154, 276
 - MK Technology 436
 - M-Lab 287, 289, 290
 - Mock-Up 7, 345, 346
 - Modellbauzeit 353, 354, 557
 - Modelldefinitionen 359
 - nach VDID 358
 - Modelle 7, 346, 356
 - medizinische 387
 - Modellierung dreidimensionaler Körper
 - aus Messwerten 33
 - Modellklassen 15, 356, 364
 - Modellmaterial 98, 106
 - Modellteile, unverbundene 389
 - Modelltypen 30
 - Modell-Werkstoffe 478
 - ModelMaker 273
 - ModelWorks 273
 - Monomere 49, 50, 108, 112
 - photosensitive 108
 - MPA 314
 - M-Print 287, 289
 - MSDS 537
 - Multi-Düsen-Druckköpfe 147
 - Multi-Jet-Modeling (MJM) 119, 153, 154, 276
 - Verfahren 154, 276
- N**
- Nacharbeit, mechanische 116
 - Nachvernetzen 59, 121, 161
 - Nachvernetzungsöfen 59
 - Naked Edges 39
 - NanoCure RC25 145

Nanotechnik 135
 Nano-Verbundwerkstoff 130
 Nd:YAG-Festkörper-Laser 232, 235
 Nd:YVO₄ 130
 – Festkörperlaser 123, 129
 neutrale Schnittstellen 28, 29, 32
 – DXF 29
 – HPGL 29
 – SET 29
 – STEP 29
 – VDAFS 29
 Next Engine 159
 Next Factory S.R.L. 158
 nicht-additive Verfahren 10
 nickelbasierte Superlegierungen 216
 Ni-Co-Cr-Al 241
 niedrig schmelzendes Metallpulver 64
 non-impact Verfahren 84
 Nullpunkt-Spannsystem 214
 Nylongießen 427

O

Oake Ridge National LAB, ORNL 523
 Oberflächengüte 100
 Oberflächenqualität 335
 Oberflächenversiegelungen 170
 Oberfläche, triangulierte 36
 Objekte, mega-scale 569
 Objet Geometries Ltd. 147
 Objet PolyJet 119
 Objet Studio Software 148
 ODM 459
 Off-axis-Düse 232
 Office Printer 16, 18
 Offline Thermal Station (OTS) 176, 486
 Offload Cart 124
 On-Demand Manufacturing (ODM) 459
 One-Layer-Betrieb 250
 optische Eindringtiefe 52, 56
 Opto 15/400 164
 Opto 40/400 164

Opto 90/800 164
 OptoForm LLC 164, 445
 OPTOMECH Inc. 233, 302
 OPTOMECH M3D 302
 Orientierung
 – des Bauteils 28
 – im Bauraum 421
 Otoplastiken 512
 OTS 176, 486
 Overcure 109, 126, 131

P

P390 189
 P730 189
 PA 6 488, 504
 PA 11 63
 PA 12 63
 PA 2200 196
 PA 3200GF 196
 Paper 3D Printing 254
 Parallelroboter 83
 Parallelroboter (Tripoden) 81
 parametrische 3D-Konstruktionen 32
 Part Curing Unit 163
 Partman 125
 Part-Property System 486
 Parts Now 295
 Part Washer 163
 passive Personalisierung 467
 Paste Polymerization 119, 164, 445
 PatternMaster 273
 PC 130, 271
 PC-ABS 271
 PEEK 137, 488, 504
 Pelz 66, 169, 287
 Perfactory
 – Mini 139
 – R5 145
 – Xede 139
 – Xtreme 139
 – Y8 145

- Perfactory⁴ Standard 139
- Personal 3D-Drucker 16, 17, 18, 497
- Personal 3D Printer 17
- Personal Fabricator (PF) 474, 495, 525
- Personal Factory 140
- Personalisierung 467
 - aktive 470
 - Hersteller 467
 - passive 467
 - von Massenprodukten 467
- Personalkosten 553
- PF 474
- Phenix 228
 - Systems 228
- Photocasting 428
- Photopolymer 163
- Photopolymerisation 48, 92, 107, 119
- physische Prototypen 354
- physische Schichten 25
- Piezo-Druckkopf 86, 88, 299
- Piezo-Düse 88
- Piezo-Element 289
- Pimpen 18
- PLA 73
- planarizer 154
- Planfeldlinse 82, 214
- Plastic Sheet Lamination 258
- Plastiken 395
- Plotter 81, 92, 333
- Plottereinheit 99
- PLT-20 Katana 252
- PLT-A4 252
- PLY 33, 284
- PLY- und VRML-Format 43
- PM100 228
- PM100 Dental 228
- PM250 228
- PMMA (Polymethylmethacrylat) 301
- Polyamid (PA) 63, 167, 381, 541
- Polycarbonat (PC) 62, 130, 167, 170, 271, 541
- Polyethylenglykol 72
- Polygon-File-Format (PLY) 43
- PolyJet 119, 147
- Polyline-Anweisungen 42
- Polymerdrucken 103, 146
- Polymerdruckverfahren 58, 107, 119, 147
- Polymerisation 48, 49, 50, 51, 84, 101, 103, 107, 108, 110, 120, 541
 - kationische 50
- Polymerisationsgrad 51
- Polymerisationsrate 51, 56
- Polymerisationsverfahren 98, 99, 100
- polymerisierbare Wachse 160
- Polymer Printing 48, 92, 103
- Polyphenylsulfon 72
- Polyphenylsulfon (PPSF) 271
- Polypropylen (PP) 130, 145
- Polystyrol 62, 167, 170, 541
- Polysulfon 71
- Polyurethane (PUR) 417
- Polyurethangießen 431
- Polyvinylacetat (PVA) 73
- POM 5050 Direct Metal Fabricator 237
- Positionierung der Bauteile im Bauraum 168
- Post Curing Oven 59, 116
- Post-Processing 28, 66, 105, 115, 116, 170, 334
 - beim Schicht-Laminat- oder Layer Laminate Manufacturing (LLM) 246
- Potenziale, theoretische 95
- PP 130
- PPSF 271
- Pre-Objective-Scanning 82
- Pre-Processing 333
- PrimePart 196
- Prodigy Plus 260
- Production 459
 - 3D-Drucker 16, 18
 - 3D Printer 18, 172, 182, 411
 - on Demand 515

- Production Grade 3D Printer 16
 - Produkt 11
 - Entstehung 14
 - Entwicklung 14
 - Entwicklungsschritte 348
 - Entwicklungszeiten 353
 - Produktmodell
 - digitales 30
 - virtuelles 27
 - Produktreife 353
 - Produktsicherheitsgesetz 532
 - Professional 3D-Drucker 16, 18
 - Professional 3D Printer 16
 - Professional Printer 411
 - Projektionsverfahren 48
 - ProJet[®] 153, 283
 - ProJet[®] 1000 162
 - ProJet[®] 5000 155
 - ProJet[™] Personal 3D Printer 161
 - ProJet Professional 3D Printer 124
 - Prometal 287
 - Rapid Casting System S-15 293
 - Rapid Casting System SR2 293
 - Proportionsmodell 357
 - proprietäre Pulver 67
 - ProtoBuild 275
 - ProtoSupport 275
 - Prototypen 11, 345, 356, 357
 - physische 354
 - serienidentische fahrfähige 523
 - virtuelle 354
 - Prototyper 16, 17
 - Prototype Tooling 9, 10, 412, 438
 - Prototypwerkzeuge 417, 438
 - Prozesskette 391
 - Prozessparameter 476
 - prozestypische Folgeverfahren 117
 - PSW 190
 - Puls-Pausen-Verhältnis 58
 - Pulver
 - handelsübliche 67
 - proprietäre 67
 - Pulverbett 193
 - Pulver-Binder-Kombinationen 76
 - Pulver-Binder-Verfahren 74, 97
 - Pulverdurchmesser 99, 100
 - Pulverdüse
 - Generieren 65
 - Schmelzen 229
 - Pulverförderer 232
 - Pulverförderung, automatisierte 216
 - Pulverkuchen 168, 181
 - Pulvermanagement 173
 - Pulvermanagementsystem 177
 - Pulverrecycling 216
 - PUR 417
 - PVA Polyvinylacetat (PVA) 73
- Q**
- QM powder Siebstation 214
 - quasi-isothermes Lasersintern 63
 - quasi-isothermes Sintern 166
 - Quick Cast 128, 436, 464
 - Quick Cast-Baustil 131, 132
 - Quick Cast-Baustrategie 128
 - Quick Cast-Verfahren 132
 - QuickSlice 262
- R**
- Radiation Curable Pigmented Inks 89
 - radikalische Polymerisation 49
 - Rand 126
 - Randkurven 109
 - Rapid Casting System SR2 292
 - Rapid Change Modul (RCM) 176, 486
 - Rapid Manufacturing (RM) 6, 8, 9, 135, 140, 170, 457
 - Rapid Micro Product Development (RMPD) 135, 136
 - Rapid Mock-Up 7
 - Rapid Production Machine Tools 299

- Rapid Prototyping 6, 8
 - Modell 7
 - Software 27
 - Werkstoffe 478
 - Rapid Prototyping (RP) 11, 12, 140, 345, 347, 459
 - Schnittstelle 35
 - Rapid Prototyping System (RPS) 252
 - Rapid Solidification Process 433
 - Rapid Steel 188
 - RapidTool 188
 - Rapid Tooling 6, 9, 10
 - Rapid Tooling (RT) 411, 459
 - Verfahren, direkte 438
 - Rasterverfahren 85, 174, 235
 - Rauigkeitsmessungen 338
 - räumliche Fachwerke 112
 - RCM 176, 486
 - Modul 186
 - RCP-Farben 89
 - REACH 538
 - Reaction Injection Molding (RIM) 432
 - Realizer GmbH 201
 - Realizer SLM50 204
 - Realizer SLM100 201, 204
 - Realizer SLM250 202
 - RealWax-Verfahren 155
 - Recoating 108, 125, 127, 194
 - Recoatingparameter 125
 - Recycling, Station 182
 - Redundanzfreiheit 32
 - Registration 538
 - Rehovot 147
 - reinforced Polyamid 180
 - Reinigung von Sintermodellen 169
 - Renishaw AM250 209
 - Renishaw LTD. 209
 - RenShape SL7580 58
 - Repetitionsrate 129
 - Rep Rap GmbH 73
 - Restmonomere 541
 - Reverse Engineering 33
 - RIM 432
 - RMPD 135, 136
 - mask 135, 136, 137
 - multimat 135, 136
 - stick2 135, 136
 - Rock Hill 153, 161, 164, 172, 182, 323
 - Röders GmbH & Co. 307
 - roJet-Modellreihen 153
 - Rotationsparaboloiden 109
 - Row Width (RW) 263
 - RP 459
 - Rp2i 253
 - RPS 252
 - RSP-Tooling 433
 - RT 459
 - rule of ten 350
- ## S
- S4H Pulver 291
 - S-15 292
 - SAHP 252
 - Sanddrucker, kontinuierlich arbeitende 101
 - Sander, Karin 396
 - SandForm 178
 - Sandformen 288
 - Sandguss 442
 - Sandkerne 288, 442
 - Sand Mixer 293
 - SC 153, 161, 172, 182
 - Scanner 82, 92, 333
 - Scannereinheit 99
 - Scanstrategien 175
 - Schädelmodell 460, 476
 - Scheibenlaser 84, 232
 - Schichtbauprinzip 1, 2, 25
 - Schichtbauverfahren 12, 345
 - Schichtdicke 22, 55, 109, 127
 - Schichtenmodell 22
 - Schichten, physische 25

- schichterzeugende Elemente 80, 81, 91, 92
- Schicht-Fräsverfahren 99, 102, 245
- Schichtinformation 108
 - mathematische 26
 - virtuelle 25
- Schicht-Laminat-Verfahren 69, 96, 99, 101, 103, 242, 243, 246
 - Übersicht 242
- Schichtstärken 22
- Schichtverfahren, automatische 244
- Schmelzen 61, 66, 92, 103, 164
 - Kerne 368
 - mit der Pulverdüse 170, 229
 - Prozess 65
 - Verfahren 60
 - Vorgang beim selektiven Laserschmelzen 563
 - Wärme 63
- Schmelzverfahren 99
- Schmuckindustrie 130, 509
- Schmuck- und Kunstobjekte, metallene 519
- Schneiden
 - der Datensätze 28
 - im CAD 35
- Schneidgeschwindigkeit 70
- Schneidmesser 90
- Schnellwechsel-Baumodul 182
- Schnittstellen, neutrale 29
 - DXF 29
 - HPGL 29
 - IGES 29
 - SET 29
 - STEP 29
 - VDAFS 29
 - VDAIS 29
- Schoormans, Adrian 396
- Schraffur 109, 126
- Schrumpf 51, 76, 110, 168
 - Harz 51
- Schwund 291, 425
- Scialex Corp. Ltd. 147
- Scitex Corporation 147
- SD300 Pro 258
- SDB 537
- SDU 296
- Secondary Rapid Prototyping 10
- Sekanten-Effekte 22
- Sekundärtropfen 89
- Selective Adhesive and Hot Press Process (SAHP) 252
- Selective Inhibition of Sintering (SIS) 572
 - SIS-Metall-Prozess 573, 575
 - SIS-Polymer-Prozess 572
- Selective Laser Melting (SLM) 65, 103, 201, 206, 447
- (Selective) Lasersintering 103
- Selective Mask Sintering (SMS) 103, 164, 222, 227, 228, 442
- selektives Laserschmelzen 103
- selektives Lasersintern (SLS) 60, 103, 164, 172, 444
- selektives Sintern 164
- Serienfertigung, additive 518
- SET 29
- SFM 12, 458
- Shadowing 333
- Shape Welding 229
- Shaw Verfahren 433
- Shell Cracking 132, 167, 181, 272
- Shell Design Unit (SDU) 296
- Shop Floor Maschinen 18
- Show and Tell-Modelle 360
- SHR 149
- Sicherheitsdatenblätter 536, 537
- Sicherheitsvorschriften 527
- Silberlegierungen 216
- Silikonabguss 428
- Silikon, Werkzeuge 417
- Simulation 437
- Simultaneous Engineering 24, 351

- Single Head Replacement 149
- Sinterbauteile 373, 381
- Sintermask 227
- Sintermaterialien 541
- Sintern 61, 66, 92, 103, 164
 - quasi-isothermes 166
- Sinterprozess 60, 167
- SinterScan 174
- Sinterstation 175, 176, 184
 - Baureihe 173
 - HiQ 181
 - Pro 173, 182
 - PRO Rapid Manufacturing System 486
- Sinter- und Schmelzverfahren 171
- Sinterverfahren 60, 96, 99, 100, 385
- Sinterwerkstoffe
 - gefüllte 63
 - glasgefüllt (GF) 63
- SIS 572
- SiSiC 562
- SIS-Metall-Prozess 573, 575
- SIS-Polymer-Prozess 572
- Skin 112, 126
- Skin and Core-Verfahren 191, 436, 464
- SL 103
- SLA 121
- SLA-250 113, 122
- SLA-5000/7000 131
- SLC 27, 28, 33, 40
- SLI 40
- Slice 174
 - File 125
- slicen 28, 35
- Slice-Verfahren, adaptive 28
- slicing on the fly 28, 174, 181
- SLI-Format 35
- SLI/SLC, Formate 28
- SLM 65, 103, 184, 201, 447
- SLM[®] 125 HL 207
- SLM[®] 280 HL 207
- SLM[®] 500 HL 208
- SLM-Solutions 206
- (S)LS 103
- SLS 164
- Smart Sweep 127
- S-Max 287, 443
- SMS 103, 164, 227, 228
- SolGel-Materialien 137
- SoliCast-Prozess 138
- SolidCenter PLT-A3 252
- Solid Concepts 124, 125
- Solider 4600 138
- Solider 5600 138
- Solid Foil Polymerisation (SFP) 79
- Solid Freeform Manufacturing (SFM) 12, 458
- Solid Ground Curing 138
- Solidica Inc. 310
- Solid Image 7, 8, 346, 360
- Solid Object Printer 154, 276
- Solido Ltd 258
- Solidscape Inc. 272, 274
- Soligen Technologies Inc. 295
- Soluble Support Technology (SST) 269
- Somos 14120 58
- Sonic Layer Technologie 311
- Sonolumineszenz 79
- Sonotrode 312
- Spannproblematik 3
- Spannungsanalyse
 - spannungsoptische 403
 - thermoelastische 402, 404
- spare parts on demand 473
- SPARX AB 228
- SPC (Statistical Process Control) 174
- Speed Part 222
 - AB Mölndal/Göteborg 227
 - RP3 227
- Spiegeldreieck 382
- Spincasting 428
- S-Print 287, 289, 292
- sPro 175

- 60 176, 177
 - 140 185
 - Spurbreite 54
 - SST 269
 - Stahl 237
 - Pulver 291
 - Stammwerkzeug 419
 - StainlessSteel 17-4 198
 - Startreaktion 49
 - STAR-Weave-Technik 110
 - Statistical Process Control (SPC) 174
 - STEP 29
 - Stereographie 48, 107
 - Stereolithographie-Modelle 117, 367, 370, 372, 378, 392
 - Stereolithographie (SL) 48, 50, 57, 59, 92, 96, 103, 107, 120, 134, 136, 276, 334, 399, 476
 - Maschinen 108, 122
 - Schnittstelle 35
 - Stereolithographie-System, kopfüber
arrangiertes 139
 - Stereolithographie-Verfahren 108, 116
 - StereoLithography 103, 107
 - Stereo Lithography Apparatus (SLA)
121
 - STEREOS 133
 - STEREOS DESKTOP/
300/400/600/MAX 600 133
 - STEREOS-Stereolithographie-Maschinen
133
 - Sterilisierbarkeit 389, 542
 - STL 33
 - Beschreibungsfehler 39
 - Daten 141, 174, 184
 - Datensatz 25, 35, 37
 - Fehlorientierung 39
 - Format 27, 35, 36, 39
 - Formulierung 37, 41
 - Lücke 39
 - STL-Formulierungen 111
 - STO-Serie Fräsmaschinen 253
 - Strahlaufweiter 82
 - Strahldurchmesser 84, 109, 168
 - Strahlschmelzen 60, 164
 - Strahlweitenkompensation 85, 109
 - Stratasys Inc. 260
 - Stratasys System Language 262
 - Strati 521
 - Stratoconception 253
 - Stratoconcept STE-Serie 253
 - Stratoconcept VR Software 253
 - stückzahlunabhängige Fertigung 15
 - Stufigkeit 101
 - Stützen 28, 58, 59, 72, 74, 98, 108, 111, 112, 119, 126, 133, 134, 166
 - entfernen 116
 - Stützengeneratoren 37, 125
 - Stützkonstruktionen 59, 111
 - Stützmaterialien 58
 - Stützstrukturen 118, 166, 389
 - subtraktiv-additive Verfahren 69
 - subtraktive Fertigungsverfahren 1
 - Superlegierungen 241, 281, 318
 - nickelbasierte 216
 - Supports 112
 - SupportWorks 262
 - SW 252
 - Systematik der additiven
Fertigungsverfahren 93
 - Systematik der Fertigungsverfahren 1
 - Systemkosten, additive Anlagen 551
- T**
- T66 Benchtop 272
 - Tango 151
 - tape and trim Vorgang 311
 - Technische Regeln für Betriebssicherheit
(TRBS) 532
 - Technische Regeln für Gefahrstoffe
(TRGS) 535
 - teilkristalline Kunststoffe 62

- Teleskop 82
Temperierkanäle 420
Tessellation 35
Texturierung 44
theoretische Potenziale 95
Theorie der Neuen Arbeit 474
Therics 493
TheriForm 493
Thermal Polymerization (TP) 79
thermische Druckköpfe 87
thermoelastische Spannungsanalyse (THESA) 402, 404
Thermoformen 441
ThermoJet 154, 276
– 3D Printer 276
– Printer 119
thermoplastische Kunststoffe 168
THESA 404
Thin-Layer-Baustil 131
Third-Party-Software 27, 35
Three Dimensional Printing (3DP) 103, 282, 295
Ti6Al4V 200, 226, 237
Ti6Al4V ELI 226
Tiefziehen 441
time to market 348
Titan 205, 209
Titanium Ti64 200
Titanlegierungen 216
Tool-less Fabrication 9
TPM 59, 115, 542
traditionelles manuelles Finish 524
transluzent 58, 130
transparent 58
Transparenz 388
TRBS 532
Treppenstufen 174
Treppenstufeneffekt 22
TRGS 535
Triangulation 35
triangulierte Oberfläche 36
Tripropylenglycolmonomethylether (TPM) 542
Tropfenvolumen 88
trouvalieren 170
TruLaser Cell 3000 237
TruLaser Cell 7040 237
TrumaForm
– DMD 505 237
– LF130 218
TRUMPF 218
– Laser Metal Deposition (LMD) 239
TRUMPF Laser GmbH & Co. KG 218, 237
Two-Photon Absorption (TPA) 79
- U**
Über Kopf-Bauarten 118
Überlappungen, STL 39
Überschussenergie 57
Ultem 9085 272
Ultra 139
Ultra-High-Definition 156
Ultraschall-Atomizer 304
Ultraschallschweißen 69, 310
Ultrasonic Consolidation 259, 310, 312, 454
Umsetzungsfehler 38
Umstellungsosteotomie 392
Umweltschutz 527
unverbundene Modellteile 389
uPrint 260
User-Parts 339
UV-Beleuchtungseinheit 154
UV-Lampen 148
UV-Lichtquellen 48
- V**
Vakuumabguss 372, 378, 427
Vakuumgießanlage 426
Vakuumgießen 117, 380, 382, 397, 424, 427
Vakuum-Tiefziehen 441

- Vanquish FC 140
 VDAFS 29
 VDAIS 29
 VDI 3405 3, 357, 360
 Vector Bloom Elimination (VBE) 181
 Vektor-File 125
 Vektorverfahren 85
 Verband der Deutschen Industrie
 Designer, VDID 356
 Verbrauchsgüter 549
 Verfahren
 – Abscheideverfahren 97
 – Aerosoldruckverfahren 99
 – ballistische 71, 73, 102
 – direkte 412
 – extrudierende 71, 72, 74, 99, 101
 – impact 84
 – indirekte 412, 421
 – Pulver-Binder 74
 – schmelzen 99
 – subtraktiv-additive 69
 Verflüssiger 90
 Verkleben von Granulaten 74, 92
 Vero Materialien 150
 Verordnung über das Genehmigungsverfahren (9. BImSchV) 534
 Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) 533
 Versintern von Kunststoffen 61
 Versuchsmodell 345
 Verzüge 76
 V-Flas 162
 Viewer 28
 Viper Pro 123
 Viper SLA 113
 Virtual Reality 354
 Virtual Reality Modeling Language-Datenformat (VRML) 43
 virtuelle Prototypen 354
 Virtuelle Realität 354
 virtuelle Schichtinformation 25
 virtuelles Produktmodell 27
 VisiJet Crystal Plastic 156
 VisiJet® Dentcast Dental Wax-up Material 157
 VisiJet Hi-Cast 157
 VisiJet® PXL™ Pulver 286
 VisiJet® Stoneplast Dental Model Material 157
 VisiJet Prowax 157
 VisiJet X 156
 Volumenmodell 31, 35
 Vorbeugspflicht 533
 Voxel 23
 Voxeljet 298, 300
 Voxeljet Technology GmbH 298
 Voxeljet VXC 800 300
 Voxelstruktur 109
 VRML 33
 VRML-Format 43, 44
 VRML(II) 284
 VX 200 298
 VX 500 298
 VX 800 298
 VX 1000 298
 VX 4000 298
 VXC 800 298
- W**
- Wachse 71
 – polymerisierbare 160
 Wachsen, Bauteile 66
 Wachs-Injektions Werkzeuge 313
 Wachslinge 431
 Wachsprinter 272
 Wärmeleitfähigkeit 167
 Wasseraufnahme 90
 Wassergefährdungsklassen 531
 Wasserrecht 529, 530
 Water Works-Verfahren 269
 WaterWorks (WW) 263
 Wechselbehälter 131

Weihbrecht 259
Werkstoffe 96
– Tango 151
Werkstoffsystem, proprietär 67
Werkzeugbau 505
Werkzeuge
– aus Silikon 417
– harte 429
Werkzeugeinsätze 411, 414
– 3D gedruckt 439
Werkzeugkonstruktion 418
Werkzeugstahl 205, 209, 211, 216
– M4 291
WGK 531
Wiederbeschichtung 108, 175
Wirkstoffe, pharmazeutische 75
Wirtschaftlichkeit 543

X

X line 1000R 215, 216
(x-y)Plotter 81

Y

(Ytterbium Yb)-Faserlaser 194, 210,
211

Z

Z402 Concept Modeler 283
Zahntechnik 199
Zehnerregel 350, 351
Zephyr Recoating System 127
Zimmermann GmbH 252
ZIPPY I 252
ZIPPY II 252
z-Konturierung, kontinuierliche 24, 102
z-Korrektur 127
ZPrint 284
z-Stufung 21
Zwei-Photonen-Verfahren 79
zweistufiges Verfahren 59
Zyklon-Pulverförderer 235
Zykluszeiten 415, 418, 430, 440