

Einführung in die Additive Fertigungstechnologie

■ 1.1 Entwicklung Additiver Fertigungsverfahren im Überblick

Die Additive Fertigung (AF) bzw. das Additive Manufacturing (AM), das heißt die schichtweise Erzeugung dreidimensionaler Objekte, wird bereits seit den 1970er Jahren erfolgreich neben den traditionellen Fertigungsverfahren eingesetzt. Mit Auftauchen des Begriffs 3D-Druck ab circa 2012 und dem damit verbundenen medialen Interesse, entstand ein nie da gewesener Hype um die Additive Fertigung.

Laminated Object Manufacturing (LOM)

Historisch betrachtet ist die Strategie, Objekte schichtweise aufzubauen, welche sich hinter der Additiven Fertigung verbirgt, auf J.E. Blather zurückzuführen. Blather patentierte 1892 eine Strategie zur Erzeugung von Geländemodellen (sogenannte *Contour Relief Maps*). Um die Geländemodelle zu erzeugen, wurden die jeweiligen Höhenlinien aus Wachsplatten ausgeschnitten, aufeinandergesetzt und mittels Wärmeeinwirkung verbunden. Die typische Treppenkontur, welche bis heute ein Merkmal von additiv hergestellten Bauteilen ist, wurde bei Blather verschmolzen, um eine realistische Oberfläche zu erhalten. Die gleiche Strategie benutzte 1974 DiMatteo, der mittels auf Kontur gefräster Stahlplatten und deren Fügung Bauteile mit Hinterschnitten herstellte.

Dieses Grundprinzip entwickelte sich im Laufe der Entstehung Additiver Fertigungssysteme zu einer Verfahrensgruppe, die heutzutage unter dem Begriff Laminated Object Manufacturing (LOM) bekannt ist. Als Ausgangsmaterialien kommen bei dieser Verfahrensgruppe dünne Folien oder Papier zum Einsatz. Die Konturen der Schichten werden je nach System mittels Laser oder Schneidmesser erzeugt. Die Schichten werden aufeinandergeklebt. Nach dem Auflegen werden die Bauteilkontur und der sich ergebende, nicht zum Bauteil gehörende Teil geschnitten. Um nach der Erzeugung des Bauteils das mechanische Entfernen der nicht zum Bau-

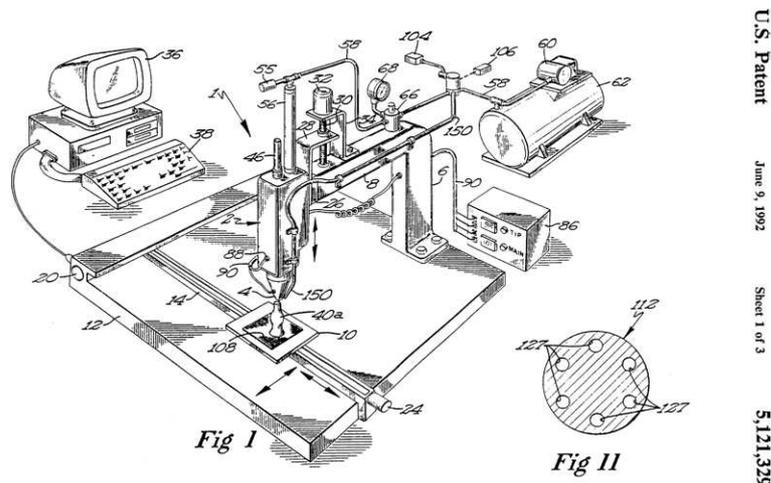
teil gehörigen Segmente zu erleichtern, werden diese mittels kleiner quadratischer Schnitte unterteilt.

Stereolithographie (SLA)

Das erste digital gesteuerte additive System ist die Stereolithographie (SLA). Dieses System gehört zur Verfahrensgruppe der UV-Aushärtung und nutzt das Prinzip der lokal induzierten Copolymerisation. Das Prinzip der Copolymerisation von Harz in einem Behälter mittels Laser wurde zum ersten Mal 1977 vorgestellt. Der Systemhersteller 3D Systems griff dieses Grundprinzip auf und patentierte 1986 das System der Stereolithographie. 1987 wurde dann die erste Stereolithographie-Anlage vorgestellt. Mit dieser Anlage war es erstmals möglich, Bauteile schichtweise herzustellen (basierend auf Computerdaten). Ende der 1980er und Anfang der 1990er Jahre waren die ersten kommerziellen Stereolithographie-Anlagen erhältlich und lösten einen Hype aus. Die große Erwartungshaltung, dass ab sofort alle Bauteile auf schnelle Weise und ohne großen Aufwand direkt aus Computerdaten herstellbar sind, konnte jedoch nicht befriedigt werden. Dies lag zum einen am beträchtlichen Aufwand der Vor- und Nachbereitung des eigentlichen Fertigungsprozesses. Zum anderen konnten die Bauteile nicht die erforderlichen Werte hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit erreichen. Um mit diesen ersten Additiven Fertigungsanlagen Bauteile in guter Qualität herstellen zu können, musste ein gewisses Know-how aufgebaut werden. War dieses Know-how beim Dienstleister vorhanden, konnte dadurch eine hohe Gewinnspanne erzielt werden. Diese Tatsache führte in den folgenden Jahren nach Einführung der Stereolithographie zu einem enormen Anstieg der Anlagenbetreiber, die auch die Konkurrenz erhöhten.

Fused Deposition Modeling (FDM)

Durch den allgemeinen wirtschaftlichen Einbruch Anfang 2000 erfolgte auch in der Branche der Dienstleister eine deutliche Marktberreinigung. Der hohe Kostendruck auf die Industrie führte zu einer neuen Strategie der Anlagenhersteller. Diese entwickelten Anlagen, die auch mit relativ geringen Investitionsmitteln angeschafft werden konnten. Diesen Trend nutzte insbesondere die Firma Stratasys aus. Als Erfinder des Fused Deposition Modeling-Verfahrens (FDM) konnte Stratasys kostengünstige Anlagen wie den Typ *Dimension* für 22 900\$ anbieten, die auf dieser Systematik basierten. FDM ist ein additives, auf Thermoplast basiertes Extrusionssystem, das durch Aufbringen von Extrusionsraupen dreidimensionale Bauteile erzeugt (siehe Bild 1.1). Eingeleitet durch den Erfolg der *Dimension*-Systeme konnte Stratasys den Branchenführer 3D Systems auf den zweiten Platz der Rangfolge verdrängen und ist bis heute an der Spitze geblieben.



U.S. Patent

June 9, 1992

Sheet 1 of 3

5,121,329

Bild 1.1 Erstes Stratasys-Patent US5121329 A von 1992 (Quelle: <http://www.google.com/patents/US5121329>)

Der zweite und immer noch anhaltende Hype um die Additive Fertigung wurde 2012 durch den Vertrieb von Geräten für Heimanwender ausgelöst. Das Ende der Laufzeit einiger früher Patente der Firma Stratasys hatte diese Entwicklung ermöglicht, die das grundlegende Prinzip des Fused Deposition Modeling (auch unter dem Begriff der Additiven Extrusion einzuordnen) schützten. Die Heimgeräte liegen preislich zwischen 500 und 4000\$ und sind somit wesentlich günstiger in der Anschaffung als Stratasys-Systeme, welche zwischen 9000 und 500 000\$ liegen (Stand: 2014).

Stellenweise handelt es sich bei den Heimgeräten um Bausätze und offene Geräte, die hauptsächlich auf der Additiven Extrusion basieren. Unter offenen Geräten ist zu verstehen, dass mit diesen Systemen prinzipiell jedes erhältliche thermoplastische Filament, unabhängig vom Hersteller, druckbar ist. Dies ist bei Stratasys-Systemen nicht möglich. Das Filament bei Stratasys ist durch einen Chip gesichert, der bewirkt, dass nur Filamente von Stratasys nutzbar sind. Der Grund dafür ist hauptsächlich ein kommerzieller, der sichtbar wird, wenn die Preisspanne für Filament betrachtet wird. Für den Heimanwenderbereich liegt der Preis für thermoplastisches Filament zwischen 15 und 50\$ je Kilogramm. Bei Stratasys liegt der Preis für Filament zwischen 250 und 500\$ je Kilogramm. Der Absatz von Stratasys-Anlagen im Preisbereich von 9000 bis 30 000\$ ist durch das Aufkommen von 3D-Druckern für Heimanwender stark zurückgegangen. Mit dem Versuch, alte Patentinhalte in neue Patente zu integrieren, versuchte das Unternehmen, gegen die Flut von Mitbewerbern vorzugehen. Diese Strategie führte jedoch bislang nicht zum Erfolg.

Ähnlich wie beim ersten Hype um die Additive Fertigung Ende der 80er Jahre werden auch heutzutage sehr hohe Erwartungen in den 3D-Druck gesetzt, die trotz besserer Technologie erst teilweise erfüllt werden können. Themen, wie Reduktion der Herstellzeit, Verbesserung der Oberflächenqualität oder Materialauswahl und Kombinationsmöglichkeiten, sind von den etablierten Anlagenherstellern kaum bis gar nicht gelöst. Jedoch ermöglicht und fördert der Hype viele neue Entwicklungen im Bereich der Geschäftsmodelle, der Applikationen wie auch der Prozess- und Anlagenentwicklung.

■ 1.2 Einordnung der Verfahren Fused Deposition Modeling (FDM)/Fused Layer Modeling (FLM)

Je nach Einsatzzweck der schichtweise hergestellten Bauteile werden die verschiedenen Additiven Verfahren unter unterschiedlichen Oberbegriffen zusammengefasst:

- **Rapid Prototyping (RP):** Fertigung von Muster- und Prototypenteilen
- **Rapid Tooling (RT):** Fertigung von Werkzeugen für urformende und umformende Fertigungsverfahren
- **Additive Manufacturing (AM):** Fertigung von Bauteilen und Kleinserien als marktfähige Produkte

Im deutschsprachigen Raum wird neben dem englischen Begriff Additive Manufacturing (AM) auch der Begriff der Additiven Fertigung (AF) bzw. Generativen Fertigung (GF) angewandt. Am weitesten verbreitet ist sicherlich der Oberbegriff Rapid Prototyping (RP), der auch der ursprüngliche Begriff für diese Verfahrensgruppe ist.

Die Additive Extrusion, zu der Fused Deposition Modeling (FDM) bzw. Fused Layer Modeling (FLM) gehören, ist nur bedingt für Rapid Tooling einsetzbar, was an der momentan erreichbaren Oberflächenqualität der Bauteile liegt. Dagegen sind Muster- und Prototypenteile sowie die direkte Produktion von Bauteilen und Kleinserien als marktfähiges Produkt mit der Additiven Extrusion grundsätzlich realisierbar. In Abschnitt 2.6 wird näher auf die spezifischen Merkmale und Einschränkungen von Bauteilen, die mithilfe der Additiven Extrusion erzeugt wurden, eingegangen.

Ausgelöst durch das Aufkommen preisgünstiger Heimgeräte, auf Basis der Additiven Extrusion, wurde durch die Medien der eingängige und selbsterklärende Oberbegriff 3D-Drucken kreiert. Der Begriff ist jedoch mit Vorsicht zu verwenden, da

dieser auch ein spezifisches Additives Fertigungsverfahren beschreibt. Es handelt sich dabei um das 3Dimensional Printing (3DP), das der Bindertechnologie angehört.

Neben der Einordnung nach DIN 8580 können Additive Systeme auch anhand folgender spezifischer Kriterien eingeteilt werden:

- Zustand des Ausgangsmaterials
- Werkstoff des erzeugten Bauteils
- Einsatz im Produktentstehungsprozess
- Verfahrensprinzipien

Die gängigste und sinnvollste Unterscheidung der Additiven Verfahren ist die nach Verfahrensprinzipien (siehe Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1 Einteilung der Additiven Fertigungsverfahren nach Verfahrensprinzip

Verfahrensgruppe	System	Abkürzung	Prinzip
Sintern	Selective Laser Sintering	SLS	lokales Aufschmelzen von Pulverwerkstoffen
	Selective Laser Melting	SLM	
	Electron Beam Sintering	EBS	
Extrusion	Fused Deposition Modeling	FDM	Aufspritzen von geschmolzenen Polymeren mittels Düse
	Fused Layer Modeling	FLM	
UV-Aushärtung	Stereolithographie	SLA	lokal induzierte Copolymerisation
	Multi Jet Modeling	MJM	
	Digital Light Processing	DLP	
Bindertechnologie	3Dimensional Printing	3DP	Binder wird in Pulverbett gezielt aufgebracht
Laminieren	Laminated Object Manufacturing	LOM	Ausschneiden und Fügen von Platten

In der Verfahrensgruppe Extrusion sind zwei Systeme in Tabelle 1.1 aufgeführt: Fused Deposition Modeling (FDM) und Fused Layer Modeling (FLM). Prozesstechnisch handelt es sich grundsätzlich um das gleiche Prinzip.

Beim Fused Deposition Modeling (FDM) handelt es sich jedoch um einen von Stratasys generierten Begriff, der somit hauptsächlich Anlagen dieser Firma abdeckt. Der Erfinder des Grundprinzips der Additiven Extrusion ist S. Scott Crump, der Stratasys 1989 mit seiner Frau Lisa Crump in Minnesota gründete. Die Idee kam S. Scott Crump, als er seiner Tochter einen Spielzeugfrosch bauen wollte. Dabei nutzte er eine handelsübliche Heißklebepistole und baute den Frosch durch aufeinandergesetzte Extrusionsraupen auf.

Im Zuge des medialen Hypes um Additive Verfahren ab 2012 entstanden Produkte wie der 3Doodler, der über Crowd Funding auf der Plattform Kickstarter finanziert wurde, und Doh Vinvi der Firma Hasbro, die Crumps rudimentäre Heißklebepis-

tole für einen neuen Markt adaptierten. Stratasys ging 2010 kurzzeitig eine Kooperation mit Hewlett Packard (HP) ein, die zu HP-FDM-Anlagen im unteren professionellen Bereich führte. Diese Anlagen sind baugleich zu den μ Print-Systemen von Stratasys. Weltweit gesehen sind Stratasys-Anlagen am weitesten verbreitet und am häufigsten im Einsatz, was auf die geringen Anschaffungskosten, die einfache Handhabung und die gute Qualität der Bauteile zurückzuführen ist (siehe Bild 1.2).

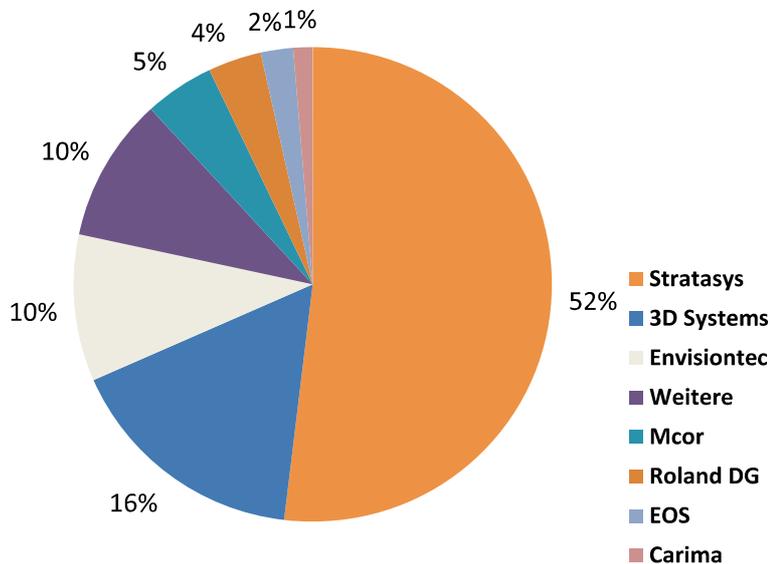


Bild 1.2 Weltweite Marktaufteilung der Anlagenhersteller (Quelle: Wohlers Report 2015)

Unter dem Begriff Fused Layer Modeling (FLM) werden alle Anlagen geführt, die der Additiven Extrusion zuzuordnen sind und nicht von Stratasys hergestellt werden. Vornehmlich sind das Anlagen, die für den Heimanwendermarkt konzipiert sind. Eine Ausnahme bei den Heimeräten bilden die Anlagen der Firma MakerBot, die unter Fused Deposition Modeling (FDM) einzuordnen sind. MakerBot wurde 2009 in New York gegründet und ist 2013 von Stratasys aufgekauft worden. Seit der Übernahme durch Stratasys wird in die Anlagen von MakerBot vermehrt Stratasys-Technologie integriert. Alle Sonderanlagen, die durch die Nutzung des Grundprinzips der Additiven Extrusion angehören, werden ebenfalls unter dem Begriff Fused Layer Modeling geführt. Kurzzeitig wurde auch der Begriff Fused Filament Fabrication (FFF) für Anlagen verwendet, die nicht von Stratasys stammen, der sich jedoch nicht etablieren konnte.

■ 2.4 Additive Fertigung von Faser-Kunststoff-Verbund-(FKV-)Bauteilen

Verbundwerkstoffe aus Kunststoffmatrix und Fasern finden aktuell, bezüglich Gewichtseinsparung und somit Ressourcenschonung, in verschiedenen Produkten Anwendung und werden bereits heute im großen Stil in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Auch in anderen Gebieten, wie zum Beispiel dem Automobilbau, sind immer leichtere und stabilere Werkstoffe gefragt. Verbundwerkstoffe mit Fasern sind allerdings nur teilweise industriell herstellbar und müssen deshalb oft mit einem großen Anteil von Handarbeit produziert werden, was wiederum neben den eigentlichen Fasern die Kosten für Verbundwerkstoffbauteile erhöht. Für die Erzeugung von Faser-Kunststoff-Verbund-Bauteilen mittels Additiver Fertigung sind die thermoplastbasierten Verfahrensgruppen Sintern und Extrusion am besten geeignet. Weiterhin besteht aber auch die Möglichkeit, mittels der Verfahrensgruppe Laminieren, Verbundwerkstoffe herzustellen (siehe Tabelle 1.1). Für die Verfahrensgruppe Sintern und Extrusion sind kommerzielle Lösungen verfügbar.

2.4.1 Faser-Kunststoff-Verbund mittels SLS

Beim Selektiven Lasersintern (SLS) werden verschiedene Polyamidpulver mit Fasern eingesetzt, um Faser-Kunststoff-Verbund-Bauteile additiv herzustellen. Die mittlere Korngröße bei diesen Polyamidpulvern liegt bei 0,058 mm. Die verwendete Faserlänge in diesen speziellen Pulvern kann aus prozesstechnischen Gründen kaum länger sein als die mittlere Korngröße des Pulvers. Somit liegt die Faserlänge unter dem Längenbereich der Kurzfasern, der zwischen 0,1 und 1,0 mm liegt. Der Hersteller 3D Systems nennt seinen kohlefaserverstärkten technischen Kunststoff DuraForm HST Composite. Bei EOS ist das CarbonMide PA12-CF für die Erzeugung von Faser-Kunststoff-Verbund vorgesehen. Die mit diesen speziellen Polyamidpulvern erzeugten Bauteile weisen eine erhöhte Steifigkeit und Festigkeit bei geringem Gewicht auf. Weiterhin ist eine elektrische Leitfähigkeit durch den Kohlefaserteil der Bauteile vorhanden. Die mechanischen Eigenschaften unterscheiden sich jedoch in den drei Raumachsen, was auf die prozessbedingte X-Y-Ausrichtung der Fasern zurückzuführen ist. Gemessen wurde bei CarbonMide PA12-CF von EOS ein E-Modul von 7800 MPa. Teilweise können durch den Einsatz von fasergefüllten Pulvern metallgesinterte (SLM-)Bauteile ersetzt werden. Durch die höheren Kosten für die speziellen Pulver eignet sich Selektives Lasersintern mit Fasern hauptsächlich für niedrige Produktionsvolumen.

2.4.2 Faser-Kunststoff-Verbund mittels FDM/FLM

Wie in Abschnitt 2.3 schon beschrieben, ist es mit klassischen FLM- oder FDM-Druckwerken nicht oder kaum möglich, mit Kurzfasern oder gar Langfasern gefüllte Werkstoffe in Filamentform zu verarbeiten. Bei Makrolon 9415 aus Abschnitt 2.3 handelt es sich um Glaskurzfasern mit einer Länge von 0,3 mm. Zurückzuführen ist diese Tatsache auf den nur durch mechanische Wirkprinzipien erzeugten Druck der klassischen FLM- und FDM-Druckwerke.

KamerMaker und Big Additive Area Manufacturing (BAAM)

Wird wie bei den Systemen KamerMaker oder Big Additive Area Manufacturing (BAAM, siehe Abschnitt 2.2) die Materialzuführung zur Schmelzdüse durch auf Granulat basierte und nicht durch auf Filament basierte Extruder vorgenommen, ist zumindest die Verarbeitung von Kurzfasern möglich. Beide Systeme sind jedoch prototypisch und derzeit noch nicht kommerziell erhältlich. Die Entwicklung des BAAM wird allerdings stark durch den US-Automobilhersteller Local Motors vorangetrieben, welcher für die Montage der Fahrzeuge spezielle Mikro-Fabriken vorsieht. Weiterhin ist die X-Y-Auflösung der Systeme sehr gering, das heißt, der Schmelzdüsendurchmesser ist relativ groß. Beim BAAM liegt dieser zwischen 7,62 bis 10,00 mm. Dadurch ist es möglich, die Herstellzeit zu reduzieren und auch mit Fasern gefüllte Werkstoffe additiv zu verarbeiten. Die Oberflächenqualität ist jedoch bei diesen Systemen sehr gering und stark durch die relativ großen Extrusionsraupen geprägt.

Tabelle 2.11 Faserlänge und Bezeichnung

Bezeichnung	Länge in mm
Kurzfasern	0,1 bis 1,0
Langfasern	1,0 bis 50,0
Endlosfasern	ab 50,0

Mark One

Das FLM-System Mark One des amerikanischen Unternehmens MarkForged kann neben den beiden Thermoplasten PLA und Nylon auch mit Glasfasern, Aramidfasern und Kohlenstofffasern verstärkten Kunststoff verarbeiten. Der Mark One kann sowohl reines Thermoplastfilament und mit Endlosfasern gefülltes Filament verarbeiten. Als Matrixmaterial für das mit Fasern gefüllte Filament wird Nylon eingesetzt. Das Verarbeiten des mit Fasern gefüllten Filaments wird als Composite Filament Fabrication (CFF) bezeichnet. Die Z-Auflösung des ungefüllten Filaments liegt bei 0,1 mm, die des gefüllten Thermoplastfilaments liegt bei 0,2 mm. Das System besitzt einen FLM- und einen CFF-Extruder. Der Bauraum hat die Maße von

305 × 160 × 160 mm. Der benutzte Filamentdurchmesser beim FLM-Extruder ist 1,75 mm, der Durchmesser des CFF-Extruders ist mit MF4 angegeben. Der Mark One ist in der Lage, zwei Materialien parallel zu verarbeiten. Komplexe Bauteile können nur bedingt erzeugt werden, da kein lösliches Stützmaterial vorhanden ist. Die Bauteilerzeugung kann auf diesem System wie nachfolgend beschrieben erfolgen.

Mit dem FLM-Extruder wird eine Nylonbasis erzeugt, welche die Funktion einer robusten, nicht scheuernden Außenschale besitzt. Im nächsten Schritt erzeugt der CFF-Extruder drei innen liegende Kohlefaserschichten mit 0,2 mm Schichtdicke (Nr. 1 in Bild 2.12). Als nächster Schritt wird eine Wabenstruktur aus Nylon durch den FLM-Extruder aufgebracht (Nr. 2 in Bild 2.12). Die letzten Nylonschichten werden wieder massiv durch den FLM-Extruder aufgebracht (Nr. 3 in Bild 2.12).

Neben dem 3D Fibre PrinteR ist der Mark One das momentan einzige funktionierende FDM/FLM-System mit Endlosfaserintegration.



© MarkForged

Bild 2.12 Endlosfaserbauteil, erstellt mit dem Mark One (© MarkForged, Quelle: <http://johannes-lutz.de/home/wp-content/uploads/2015/04/Carbon-3D-Druck-Bauteil.jpg>)

3D Fibre PrinteR

Ein weiterer Ansatz zur Additiven Fertigung von Verbundwerkstoffen ist das direkte Einbringen von Endlosfasern in die Thermoplastschmelze der FLM-Düse. Dieses System mit dem Namen 3D Fibre PrinteR wurde 2012 am Fraunhofer Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart entwickelt (siehe Bild 2.14). Dabei wird ein Faser-Kunststoff-Verbund formlos im

schichtweisen Aufbau erzeugt. Um dieses zu erreichen, müssen im richtigen Verhältnis Endlosfasern und Thermoplastmaterial in die spezielle Düse eingebracht werden. In der Schmelzdüse werden die Fasern vollständig mit dem Kunststoff ummantelt. Die Ummantelung ist sehr wichtig, um eine bestmögliche Haftung zwischen den Fasern und dem Thermoplast zu erzeugen. Bei dem FLM-Extruder des Systems wird der Thermoplast als Filament zugeführt und dann durch eine Vorschubeinrichtung in die Düse gefördert. In der Düse wird das Filament aufgeschmolzen und die Fasern werden eingebracht. Die Förderung der Endlosfasern erfolgt beim 3D Fibre Printer durch die Thermoplastschmelze, was eine einfache An- und Abschaltung der Faserintegration ermöglicht. Die X-Y-Auflösung des Systems beträgt 1 mm und kann bei dieser Auflösung maximal mit 1 K (1000 Filamente mit 7 mm Durchmesser, siehe Bild 2.13) Faser Rovings betrieben werden. Der Faservolumenanteil von Bauteilen, die mittels dieses Systems erzeugt wurden, liegt bei Düsendurchmesser 1 mm bei ca. 10%. Neben Kohlefasern können auch Glas- und Aramidfasern mit diesem System verarbeitet werden. Das thermoplastische Matrixmaterial des Faser-Kunststoff-Verbunds muss jeweils mit der Schlichte der Fasern kombinierbar sein, da sonst die Funktion der Ummantelung und der Schmelzeförderung des Systems nicht gegeben ist.

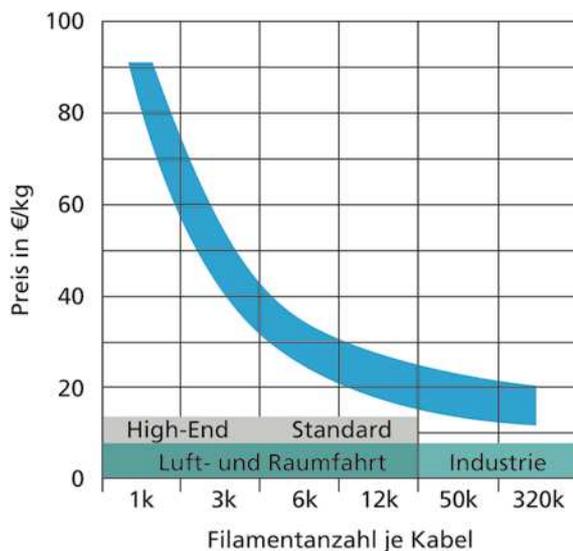


Bild 2.13 Kohlefasertypen und Marktpreise³

³ Jäger, H./Hauke, T.: Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe. Herstellungsprozesse, Anwendungen und Marktentwicklung. Die Bibliothek der Technik, Band 326. Verlag Moderne Industrie, Landsberg 2010. S. 27

Als Achssystem für den 3D Fibre PrinteR wird ein KUKA KR60 HA-Industrieroboter eingesetzt. Dieses ermöglicht es dem System, die klassische dreiachsige Additive Fertigung zu verlassen, um zum Beispiel Stützmaterial einzusparen oder direkt auf vorhandene Oberflächen zu applizieren. Der 3D Fibre PrinteR besitzt drei FLM-Extruder, die mit 3 mm Thermoplastfilament betrieben werden. Der mittlere FLM-Extruder ist für die reine Thermoplastverarbeitung vorgesehen, wie zum Beispiel die Stützmaterialextrusion. Die beiden äußeren FLM-Extruder können durch den Einsatz der spezifischen FLM-Faserdüsen additiven Faser-Kunststoff-Verbund erzeugen. Die FLM-Extruder des 3D Fibre PrinteR sind auch für die Verarbeitung von flexiblen TPU-Sorten ausgelegt. Das Gewicht eines Extruders liegt bei ca. 800 g. Die Nutzlast des Industrieroboters liegt bei 60 kg. Somit ist das System hinsichtlich Extruderanzahl gut erweiterbar. Der Bauraum des 3D Fibre PrinteR ist variabel und ergibt sich aus dem genutzten Robotersystem. Beim KR60 HA sind dies ca. 2000 × 1000 × 1000 mm. Das robotische 3D Fibre PrinteR-System soll als industrielle Sonderlösung vom Start-up Syncree (syncree.com) auf den Markt gebracht werden.

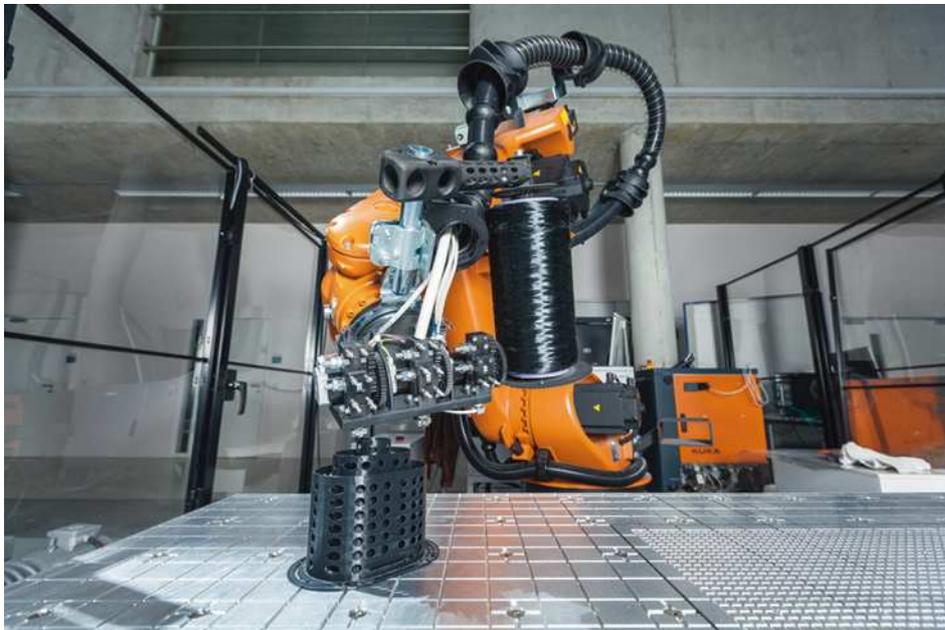


Bild 2.14 3D Fibre PrinteR mit drei FLM-Extrudern und Aramidfaserintegration
(Quelle: Fraunhofer IPA)

AKF-Verfahren der Firma ARBURG

Die Firma ARBURG veröffentlichte in einer Patentschrift von 2013 die Integration von Endlosfasern in das von ihnen kreierte AKF-Verfahren (siehe Abschnitt 2.2). Um eine höhere Stabilität der Bauteile zu erzeugen, wird bei der Herstellung über das AKF-Verfahren eine Endlosfaser zeitgleich mit dem Thermoplastmaterial, das tröpfchenweise aufgetragen wird, zugeführt. Die Endlosfaser bettet sich somit in das Material ein und verbindet sich damit. Durch die Spannung der Endlosfaser kann auf Stützstrukturen verzichtet werden (siehe Bild 2.15).

Die Faserzufuhreinrichtung ist separiert vom AKF-Druckwerk. Die unabhängige Faserzufuhreinrichtung ergibt den Vorteil, dass die Faserstrukturen besser beeinflusst und somit zum Beispiel die Faserstränge von Schicht zu Schicht in eine andere Richtung gelegt werden können.

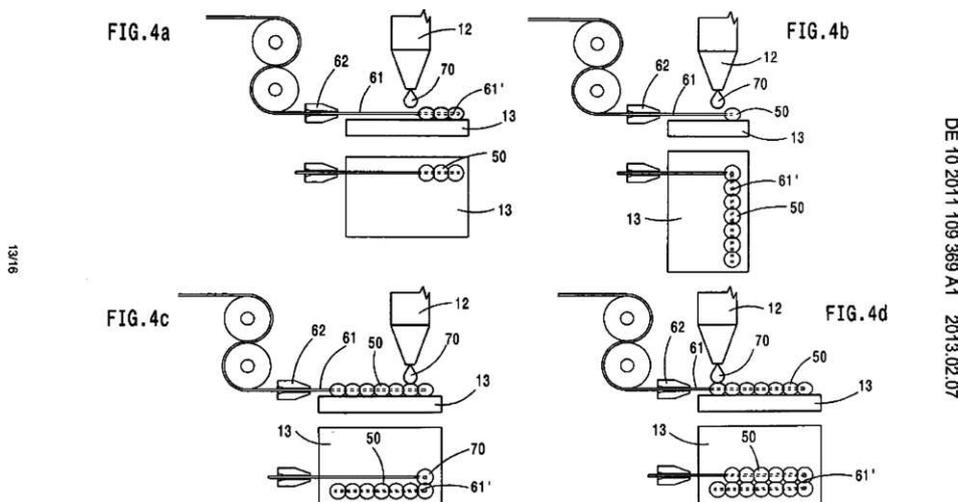


Bild 2.15 ARBURG AKF-Verfahren mit Endlosfaserintegration

■ 2.5 Integration von Funktionen

Sowohl bei FDM- als auch bei FLM-Systemen ist es möglich, gezielt den Prozess anzuhalten und nach dieser Pause den Bauvorgang fortzusetzen. Diese Funktion ist ursprünglich bei Stratasys-FDM-Anlagen integriert worden, um Materialwechsel durchzuführen oder bestehende Probleme des Druckwerks beheben zu können, ohne das schon teilweise erzeugte Bauteil zu verlieren. Grundsätzlich werden die Möglichkeiten der Komponentenintegration sowohl vom Achssystem des Additiven Systems wie auch durch Softwarelimitationen bestimmt. Bei Portal-Achssystemen

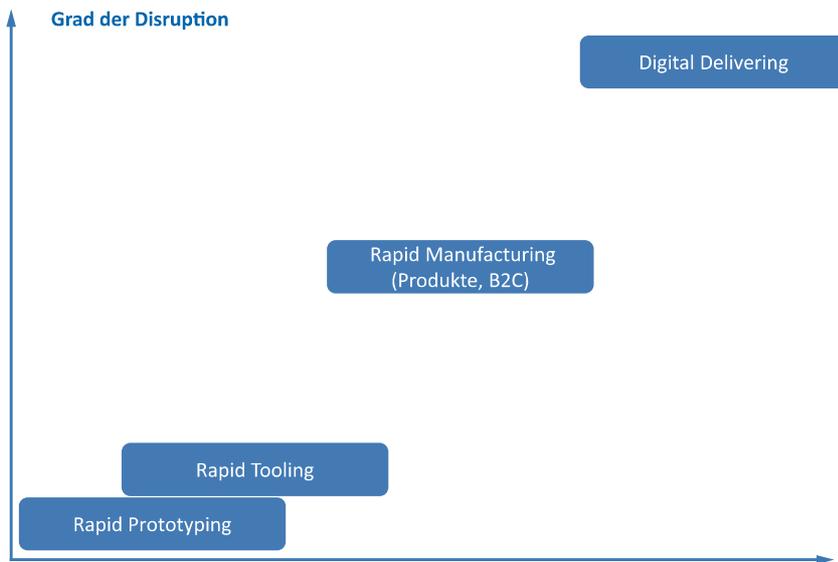


Bild 3.1 Gewichtung der Anwendungsfelder des 3D-Drucks nach Innovations- und Disruptionsgrad

3.1.1 Rapid Prototyping – 3D-Druck in der Produktentwicklung

3D-Druck in der Produktentwicklung (Rapid Prototyping) hat bereits in vielen produzierenden Unternehmen Einzug gehalten und gilt sowohl als ursprüngliche als auch am meisten verbreitete Anwendung des 3D-Drucks. So gaben Unternehmen in einer repräsentativen Umfrage von Gartner Inc. im November 2014 als Grund für die Anschaffung eines 3D-Druckers an, diesen für Prototyping (24,5%) oder Produktentwicklung (16,1%) zu nutzen. Im Jahr 2017 sind 3D-Drucker in den meisten Design- und Konstruktionsabteilungen nicht mehr wegzudenken.

3.1.1.1 Agiles Projektmanagement in der Hardware-Entwicklung

Insbesondere im Bereich (Neu-)Produktentwicklung haben Unternehmen mit großen Unsicherheiten zu kämpfen, sodass in der Planung hohe Toleranzen bezüglich Umfang, Zeit und Kosten notwendig sind, um nicht planbare Schwierigkeiten abzufedern. Dem gegenüber stehen die Forderung nach einer hohen Innovationsgeschwindigkeit, die immer kürzere Produktlebenszyklen erfordert, sowie Time-to-Market als wesentliches Kriterium für den Erfolg eines Produkts. Des Weiteren führt die hohe Innovationsgeschwindigkeit dazu, dass die Kunden und der Markt nicht mehr in der Lage sind, eigene Anforderungen zu definieren.

In der Software-Entwicklung, die sich schon länger als die Hardware-Entwicklung mit diesen Rahmenbedingungen auseinandersetzen muss, ergab sich deshalb die

Entwicklung des agilen Projektmanagements. Wesentlicher Bestandteil dieser Form des Projektmanagements ist die Arbeit in kurzen Iterationszyklen statt des sequenziellen Vorgehens wie beispielsweise im Wasserfallmodell (siehe Bild 3.2). Durch die kurzen Zyklen können Risiken und konkrete Probleme transparent gemacht und entsprechende Änderungen schnell implementiert werden.

Bei der Entwicklung physischer Produkte im klassischen Sinne steht diesem Vorgehen der Aufwand der Herstellung eines Produkts für Testszenarien im Wege. Die wiederholte (und externe) Anfertigung eines Funktionsmusters durch Beauftragung eines Dienstleisters bedarf jedes Mal eines Zeitraums von Wochen und auch die entstehenden Kosten stehen in keinem Verhältnis für die Anwendung iterativer Prozesse. Mittels Rapid Prototyping kann dieser Aufwand vermieden werden, sodass praktisch täglich ein Prototyp zur Analyse zur Verfügung steht. Mittels 3D-Druck kann der Designer direkt nach Fertigstellung des CAD-Modells über Nacht einen Prototypen drucken, der anschließend innerhalb der Entwicklungsabteilung geprüft werden kann. So können früh Fehler erkannt und Spezifikationen angepasst werden, welche wiederum in die Konstruktion einfließen.

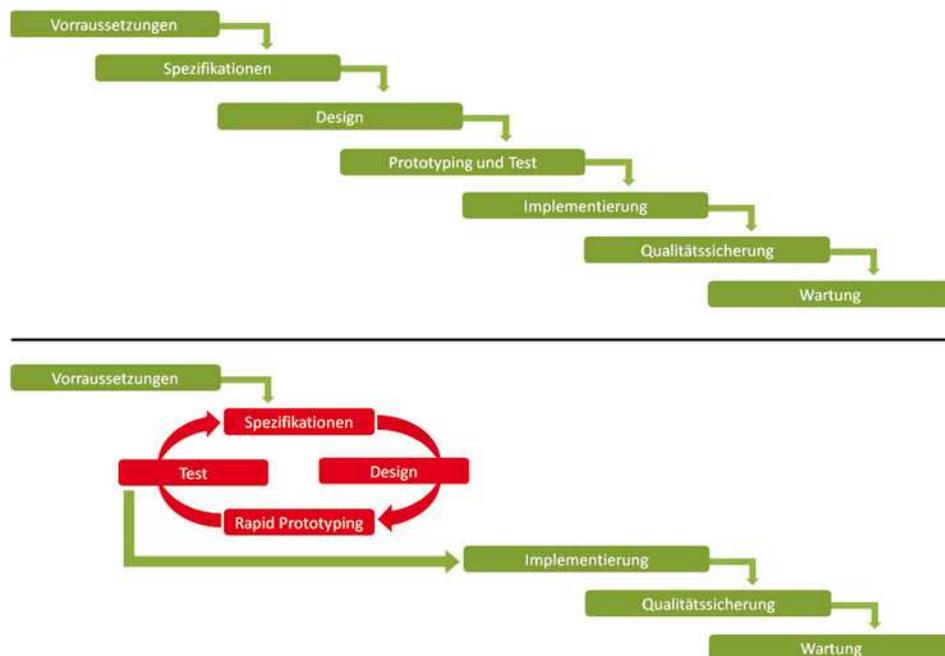


Bild 3.2 Wasserfallmodell vs. Mischmodell mit iterativem Element für die Produktentwicklung



Scrum, ein prominentes Beispiel für agiles Projektmanagement aus der Software-Entwicklung, sieht tägliche Treffen von circa 15 Minuten vor. Auch seitens der Entscheider innerhalb einer Entwicklungsabteilung müssen Wille und Kapazität für agiles Projektmanagement und iterative Prozesse in kurzen Zeitintervallen bestehen.

3.1.1.2 Anwendungsfelder in der Produktentwicklung

Die Verfügbarkeit von Prototypen erhöht sich durch Rapid Prototyping mittels 3D-Druck aufgrund geringer Kosten und schneller Herstellung erheblich, sodass die beschriebenen Änderungen in der Produktentwicklung vorgenommen werden können. Am prinzipiellen Einsatz von Prototypen ändert sich dadurch natürlich nichts, allerdings kann mittels Additiver Fertigung deutlich „verschwenderischer“ mit diesen umgegangen werden kann.

Ein Prototyp ist ein Anschauungsmodell, das in erster Linie der Kommunikation dient. Dies kann unternehmensintern, zum Beispiel abteilungsübergreifend, geschehen, um Designs zu optimieren. Doch auch im Miteinander zwischen Kunden und Lieferanten können mittels Prototypen Missverständnisse aus dem Weg geräumt und Anforderungen besser kommuniziert werden. Außerdem ist der Prototyp ein mächtiges Werkzeug einer jeden Marketingabteilung.

Abgesehen von konzeptionellen Anwendungen werden Modelle auch zur Überprüfung der Integration von Bauteilen in Baugruppen verwendet, sowohl hinsichtlich der Passung als auch der Montagemöglichkeiten. Gerade in diesem Bereich können durch kaum aufwendige Tests teure Fehler wie die Bestellung gespritzter Teile in zu großer Stückzahl, die aufgrund eines nicht erkannten Konstruktionsfehlers nicht passen, vermieden werden. Nicht zu vernachlässigen ist auch die Steigerung der Motivation in der Konstruktionsabteilung, die der Einsatz von 3D-Druck mit sich bringt.



Bild 3.3 FLM-gedruckter Prototyp (Druckzeit: 40 Minuten)



Für den Bereich Rapid Prototyping lassen sich zuverlässige Plug-&-Play-Desktop-3D-Drucker für unter 2000 € einsetzen. In der Regel werden für den Prototypenbau PLA (für Designprototypen) sowie ABS und immer häufiger PETG (für Funktionsprototypen) verwendet. Um Desktop-3D-Drucker bürotauglicher zu machen, fließen Kriterien wie Geräusch- und Vibrationsreduktion sowie die Filtration von Schadstoffen in die Entwicklung ein.

Für viele Unternehmen war und ist Rapid Prototyping aufgrund der geringen Investitionskosten, des überschaubaren Risikos und geringen Aufwands der Einstieg in die Additive Fertigung. Erfahrungsgemäß durchdringt der 3D-Druck, begonnen bei der Produktentwicklung, nach und nach auch andere Bereiche innerhalb der Organisation.

3.1.2 Rapid Tooling – 3D-Druck im Werkzeug- und Formenbau

In diesem Abschnitt wird auf den Werkzeug- und Formenbau (Rapid Tooling) eingegangen – das Bindeglied zwischen Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing. Ursprünglich beschreibt Rapid Tooling die schnelle Herstellung von Werkzeugen für den Kunststoffspritzguss mittels Additiver Fertigung (*Direct Rapid Tooling Method*, DRTM). Das additive Verfahren hat an dieser Stelle den Vorteil, dass Hohlräume und Kavitäten im Werkzeug erzeugt werden, die für Kühlkanäle genutzt werden können und damit ein energieeffizienteres Kunststoffspritzen ermögli-

chen. Unter der *Indirect Rapid Tooling Method* (IRTM) versteht man die Herstellung eines Positivs mittels Rapid Prototyping, auf Basis dessen wiederum ein Werkzeug erzeugt wird (Silikonguss, Epoxidharzguss, Sandform).²

An dieser Stelle soll der Begriff Rapid Tooling um die Herstellung von Montagewerkzeugen sowie den Vorrichtungsbau erweitert werden. Gemein haben alle Anwendungen, dass das hergestellte Bauteil als Hilfsmittel für die Produktion dient, nicht aber in das Produkt selbst einfließt.

3.1.2.1 Formenbau

Mithilfe der *Direct Rapid Tooling Method* des Fused Deposition Modeling (FLM) werden Formen hergestellt, die für den kalten Guss Verwendung finden. Hierzu zählen das Gießen von Silikonen und Silikonharzen sowie das Gießen von Epoxidharzen mit oder ohne Metallpartikeln. Während Silikone meist direkt im Anschluss ihre Verwendung finden, erfolgt beim Metall-Epoxid-Gemisch ein anschließendes Sintern und Infiltrieren. Auch das Herstellen von Wachstformen ist mittels FLM-Formenbau sehr verbreitet. Das anschließende Wachstmodell dient als Positivform für das Wachsschmelzverfahren.

Ein anderer Ansatz ist es, diese Positivform direkt additiv zu fertigen und aus dieser ein Negativform aus Gips, Silikon oder Sand (verlorene Form) herzustellen. Dies gelingt bereits mit handelsüblichen Filamenten. Für ein besseres, rückstandsfreies Ausschmelzen wurden zuletzt auch neue Materialien speziell für diese Anwendung entwickelt (vgl. Bild 3.4).

² vgl. *Gebhardt, A.*: 3D-Drucken. Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM). Carl Hanser Verlag, München 2014



Bild 3.4 3D-gedruckte Positivform (hellblau)

Eine große Herausforderung im Formenbau ist es, Schwindungen zu kalkulieren, die je nach verwendetem Material nach dem Gießen auftreten. Hier liegt der große Vorteil im Rapid Tooling: Gewünschte Maßhaltigkeit kann aufgrund der Geschwindigkeit des Verfahrens und der geringen Kosten auch im Versuch erreicht werden.

3.1.2.2 Werkzeug- und Vorrichtungsbau

Auch im Werkzeug- und Vorrichtungsbau lässt sich mittels des Einsatzes von 3D-Druck immens an Zeit und Kosten sparen. Beim Werkzeugbau liegt der Fokus auf der Herstellung von Sonderwerkzeugen, die nicht kommerziell verfügbar oder erreichbar sind.

Die Thematik Verfügbarkeit wird deutlich, wenn man das 3D-Druckprogramm der NASA als Beispiel heranzieht. Hier wird unter anderem eine auf der ISS benötigte Ratsche am Boden konstruiert, gedruckt und getestet (siehe Bild 3.5). Anschließend wird die STL-Datei via E-Mail an die Raumstation geschickt und vor Ort ausgedruckt und eingesetzt. Somit können Astronauten innerhalb kürzester Zeit mit benötigtem Werkzeug ausgerüstet werden, unabhängig von geplanten Versorgungsflügen. Als Material werden zur Herstellung von Werkzeugen verwindungssteife und schlagzähe Thermoplaste wie Polycarbonat (PC) und Polyamide (PA6.6, PA12) verwendet.

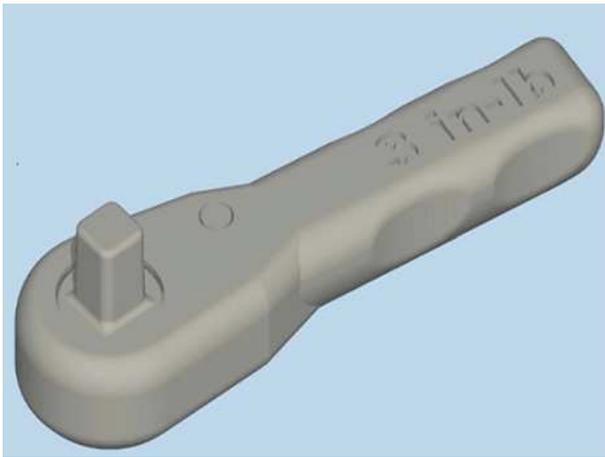


Bild 3.5 Modell einer Ratsche für die ISS (© NASA)



Die NASA ist sich des Vorteils bewusst, mittels Additiver Fertigung große Distanzen zur Versorgung zu überbrücken, und verfolgt diesen Ansatz unter anderem bei der Planung zur Besiedlung des Mars.

Neben dem Werkzeugbau wird die Additive Fertigung bereits erfolgreich in der Herstellung von (betriebsinternen) Vorrichtungen für die Montage in der Produktion oder für Prüfstände in der Qualitätssicherung eingesetzt. Hilfsmittel für die Montage können von der Idee zum Produkt innerhalb von Stunden oder wenigen Tagen hergestellt und mittels direktem Feedback vom Werker innerhalb kürzester Zeit angepasst werden (siehe Bild 3.6). Durch den Einsatz von 3D-Druckern der Firma Ultimaker konnte VW Autoeuropa allein durch die Herstellung von Vorrichtungen im ersten Jahr des Einsatzes 150 000 € Kosten gegenüber der externen Fertigung einsparen. Für die Folgejahre wird gar eine Reduktion von 250 000 € geschätzt. Die Zeitersparnis von der Bedarfsmeldung bis zum Einsatz einer Vorrichtung liegt bei circa 90%. Durch den vermehrten Einsatz von sieben Druckern im Werk in Portugal haben sich diese bereits nach weniger als zwei Monaten amortisiert.³

³ <https://ultimaker.com/en/stories/43969-volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed-tools-jigs-and-fixtures>



Bild 3.6 Mit Geräten von Ultimaker 3D-gedruckte Schablone (links) und Felgenschutz in der Montage bei VW Autoeuropa (© Ultimaker)

In der Qualitätssicherung wird der 3D-Druck zur Prüfung der Maßhaltigkeit komplexer Formen (zum Beispiel Steckverbindungen oder gewundene Flansche) mittels Einbauprobe in ein gedrucktes Negativ eingesetzt.

Für die beschriebenen Einsatzzwecke werden Filamente auf PLA- und ABS-Basis, Polyamide (mechanische Beanspruchung) oder flexible Materialien wie TPE/TPU verwendet. Prinzipiell kann in diesem Bereich bezüglich der für das FLM-Verfahren zur Verfügung stehenden Thermoplaste aus dem Vollen geschöpft werden. Entsprechend wird die Entwicklung der Materialien durch das Rapid Tooling getrieben, woraus mehr und mehr Mut und Möglichkeit entstehen, das Additive Verfahren auch zur Herstellung von Produkten zu verwenden. Diese müssen langzeitstabil gegenüber thermischen und mechanischen Belastungen sowie anderen Umwelteinflüssen (zum Beispiel UV-stabil) sein. Des Weiteren müssen eine hohe Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit hinsichtlich der Maschinen gegeben sein. Diese Punkte sind laut aktuellem Stand der Technik bereits erfüllt und ermöglichen eine Additive Produktion. Welche Faktoren weiterhin, auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht, gelten müssen, um Rapid Manufacturing sinnvoll und gewinnbringend einsetzen zu können, behandelt Abschnitt 33.1.3.

3.1.3 Rapid Manufacturing – 3D-Druck in der Fertigung

Der Schwerpunkt der Additiven Fertigung liegt nach wie vor im Bereich Rapid Prototyping. Dies geht aus einer Studie⁴ der Firma Sculpteo hervor. So liegen insgesamt 57 % der Anwendungsfälle im Bereich Prototypenbau und Proof of Concept (siehe Bild 3.7). Ferner arbeiten 62 % aller befragten Nutzer von 3D-Druckern im Bereich Forschung und Entwicklung. Dies liegt zum einen an der Alternativlosig-

⁴ The State of 3D Printing 2017. Sculpteo's 3rd annual report on 3D Printing and Digital Manufacturing (https://www.sculpteo.com/en/get/report/state_of_3d_printing_2017)