

Der Markt des Additive Manufacturing setzt sich aus einer Mischung von Systemen, Materialien und Dienstleistungen zusammen.

- Die „Systeme“ stehen für die Hard- und Softwarekomponenten.
- Die „Materialien“ beziehen sich auf Verbrauchsmaterial, das in der Konstruktion angewendet wird. Die Formgebung wird in der Regel spezifischen Technologien zugeordnet und entstammt oftmals Eigenentwicklungen.
- Unter „Dienstleistungen“ versteht man die weltweit inzwischen mehr als 1000 umsatzgenerierenden Dienstleistungsstandorte, die Wartungsverträge bedienen, Anwendungstrainings durchführen und – vorwiegend als Systemleistung von Anbietern – produktspezifische Beratung anbieten.

Die Systeme werden an verschiedene, zahlreiche Industriegruppen verkauft. Während das Geschäft seinen Ursprung in den USA hat, findet immer mehr Anbieteraktivität in Europa und Asien statt. Die größte Einkäufergruppe stammt nach wie vor aus den Industriebranchen Automobil, Luft- und Raumfahrt, Verbraucherelektronik und Büromaschinenbau.

Inzwischen wurden die Applikationen unter anderem auf folgende Segmente erweitert: Spielzeug, Schmuck, medizinische Anwendungen und eine breite Palette an Konsumgütern. Viele kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) befassen sich nachweislich vermehrt mit den Technologien, da die Vorteile des 3D-Drucks immer besser verstanden werden und der Durchschnittspreis für Geräte durch den Wettbewerb ständig sinkt.

Es gibt ausgeprägte Trends im Business-to-Business(B2B)- und Technologiebereich, die den Markt antreiben.

Auf der B2B-Seite steht Folgendes im Vordergrund:

- Der Marktdruck zwingt zur Beschleunigung der Zeit zwischen Produktdesign, -entwicklung und -herstellung bis zur Markteinführung.
- Man muss sich mit immer kürzeren Produkt-Lebenszyklen auseinandersetzen.
- Man muss in der Lage sein, Reorganisation entlang funktionsübergreifenden Produktlinien zu meistern.
- Man muss bei der Globalisierung mithalten können.

Bei den Technologietrends stehen folgende Entwicklungen im Vordergrund:

- Enorme Entlastung der EDV-Verarbeitungsleistung.
- Die Einführung kostengünstiger 3D-Computer-Aided-Design(CAD)-Applikationen.
- Das Wachstum der Kommunikationsvernetzung.

Diese Trends verlangen von Designern und Konstruktionsingenieuren neue Wege, um Kosten und Dauer der Produkteinführungsprozesse zu straffen und im Rahmen zu halten.

Die Trends machen außerdem die Verbesserung der Kommunikationskanäle mit anderen Abteilungen und Zulieferern notwendig. Hierbei liegt die Herausforderung vor allem in einer optimalen globalen kommunikativen Vernetzung von unternehmerischen Produktions- und Serviceeinheiten. Primäres Ziel ist die Einführung wettbewerbsfähiger, qualitativ hochwertiger Produkte und deren schnelle Verfügbarkeit.

Ein zunehmender und an Wichtigkeit gewinnender Antreiber im Markt ist der Trend, Produkte in kleinvolumigen und individualisierten Ausführungen herzustellen. Vgl. Abb. 2.1

Technologie	Stereolithografie SLA / STL	Jetted Photopolymer J-P	Laser Sintering / Laserschmelzen SLS	DOD	Single Jet Inkjet	Fused Deposition Modeling FDM / FFF	Three Dimensional Printing 3DP
Abkürzung	SLA / STL	J-P	SLS	DOD			
Systempreise	55.000 - 595.000 Euro	14.000 - 75.000 Euro	140.000 - 1 Mio. + Euro	34.000 - 60.000 Euro		7.000 - 225.000 Euro	11.000 - 52.000 Euro
Geschwindigkeit	Durchschnittlich	Schnell	Durchschnittlich bis schnell	Langsam		Langsam	Sehr schnell
Präzision	Sehr genau	Genau bis sehr genau	Genau	Ausgezeichnet		Annehmbar	Annehmbar
Oberflächenveredelung	Sehr gute Verarbeitungs- qualität	Gute bis sehr gute Verarbeitungsqualität	Gute bis sehr gute Verarbeitungsqualität	Gute bis sehr gute Verarbeitungsqualität		Annehmbare Verarbeitungsqualität	Annehmbare Verarbeitungsqualität
Stärken	Bau großer Werkstücke möglich;	Präzision und Veredelungs- qualität;	Präzision;	Präzision und Veredelungsqualität;		Möglichkeit, vielfältige Materialien einzusetzen;	Geschwindigkeit;
Schwächen	Präzision	Gleichzeitiger Einsatz von mehreren Materialien möglich;	Möglichkeit, vielfältige Materialien einzusetzen	Eignung für den Bürogebrauch		Preis;	Preis;
	Geschwindigkeit;	Eignung für den Bürogebrauch	Einschränkungen bei Größe und Masse;	Langsames Arbeiten;		Eignung für den Bürogebrauch Farben einzusetzen	Möglichkeit, verschiedene Farben einzusetzen
	Preis;	Nichtwendige Nachbearbeitung	Systempreis ist teuer;	Einschränkungen bei Materialauswahl;		Langsames Arbeiten	Einschränkungen bei Materialauswahl;
	Möglichkeit, verschiedene Farben einzusetzen	Oberflächenveredelung ist mangelhaft	Oberflächenveredelung ist mangelhaft	Einschränkungen bei Größe		bruchempfindliche Werkstücke;	mangelhafte Veredelungsqualität
Typische Applikationen	Sehr detailgenaue Werkstücke und Modelle für das Testen von Pass- und Formeigenschaften;	Sehr detailgenaue Werkstücke und Modelle für das Testen von Pass- und Formeigenschaften;	Weniger detail-genaue Werkstücke und Modelle für das Testen von Pass- und Formeigenschaften, d.h. im Vergleich zu photopolymer-basierten Methoden;	Diese additive Technologie ermöglicht die Fertigung von Teilen und Modellen mit der höchsten Detail- genauigkeit für das Testen von Pass- und Formeigenschaften;		Detailgenaue Werkstücke und Modelle aus industriellen Kunststoffen für das Testen von Pass- und Formeigenschaften;	Fertigung konzeptioneller Modelle;
	Wird oft für Ausstellung bei Fachmessen und für Vermarktungszwecke eingesetzt;	Wird oft für Ausstellung bei Fachmessen und für Vermarktungszwecke eingesetzt;	Rapid Manufacturing von Werkstücken, inklusive großer Teile, wie z.B. Luftschachtelsätze;	Fertigung von Formmustern für Spritzgießverfahren, insbesondere in den Herstellungsbereichen Schmuck und medizinische Geräte;		Detailgenaue Werkstücke für Patientenanwendungen und lebens-mittelverbundener Teile;	Fertigung von Teilen für eingeschränktes funktionales Testen;
	Rapid Manufacturing von kleinen, detail-tiefen Werkstücken;	Fertigung von Formmustern für Spritzgießverfahren, insbesondere im Schmuckher- stellungsbereich;	Fertigung von Teilen mit Schnapper-bindungen und aktiven Gelenkstrukturen;	Fertigung von Formmustern für Urethan- und Silikon- Kautschuk (RTV) Formarbeit		hoher Temperatur-belastbarkeit;	Herstellung von farbigen Modellen für Finite Element Analysis (FEA) und verwandte ingenieurtechnische Applikationen;

Abb. 2.1 Übersicht über 3D-Druck-Technologien (Quelle: Core Consulting GmbH)

Fertigung spezieller Werkzeugformteile;	Fertigung von Formmustern für Urethan- und Silikon-Kautschuk (RTV) Formarbeit	Fertigung von belastbaren Werkstücken aus reinem technischen Kunststoff;	Wird oft für Ausstellungen bei Fachmessen und für Vermarktungszwecke eingesetzt, gestaltung;	Fertigung von Modellen für Architektur und Landschaftsgestaltung;
Fertigung von Formmustern für Spritzgießverfahren;	Fertigung von Formmustern für Urethan- und Silikon-Kautschuk (RTV) Formarbeit	Fertigung von Formmodellen für den Feinspritzguss	Rapid Manufacturing von kleinen, detail-tiefen Werkstücken,	Fertigung farbiger Modelle aus dem industriellen Design, insbesondere Konsumgüter und Verpackungsmaterial;
Fertigung von Formmustern für Urethan- und Silikon-Kautschuk (RTV) Formarbeit	Fertigung von Formmustern für Urethan- und Silikon-Kautschuk (RTV) Formarbeit	Fertigung von Formmodellen für den Feinspritzguss	Fertigung von Formmodellen für den Feinspritzguss;	Fertigung von Formlingen/ Rohlingen
Material-einsatz und -eigenschaften	Acryl-stoffe (mit breiter Auswahl);	Acryl-stoffe (mit begrenzter Auswahl);	Herstellung spezial-lierter Bauteile;	Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS);
	klarsichtig und zäh;	ist elastomertisch (flexibel und biegsam)	Polyesterbasierte Kunststoffe;	Verbundener Gipsmörtel, oder Gipsgemische;
	hat Acrylnitril-Butadien-Styrol-Eigenschaften (ABS), einem synthetischen Terpolymer;	ist elastomertisch (flexibel und biegsam)	Feingußformwachs	Polycarbonate (PC), d.h. Kunststoffe aus der Gruppe der synthetischen Polymere und der Familie der Polyester;
	ist dem Polypropylen (PP) ähnlich, einem teilkristallinen Thermoplast;	ist elastomertisch (flexibel und biegsam);		ist elastomertisch (flexibel und biegsam);
	ist elastomertisch (flexibel und biegsam);	Stahl und Edelstahl-Legierungen;		Einsatz bei Feinguss und direktem Guss ist elastomertisch (flexibel und biegsam)
	ist wasserfest	Bronzelegierungen;		
		Kobaltdchrom-Legierungen;		
		Titan		Elastomere, d.h. formfeste, aber elastisch verformbare Kunststoffe

Abb. 2.1 (Fortsetzung)

2.1 Stereolithografie

Eine durch Hebemotorik bewegliche Konstruktionsbühne wird in der Initialphase knapp unter die Oberfläche einer mit flüssigem photopolymerem Kunstharz gefüllten Wanne positioniert.

Wenn das Material mit dem richtigen Lichtspektrum in Berührung kommt, härtet der exponierte Teil augenblicklich aus. Für die meisten photopolymeren Materialien sind ultraviolette Lichtquellen erforderlich. Inzwischen werden Kunstharze angeboten, die man auch mit sichtbarem Licht verarbeiten kann.

In der Regel sind stereolithografische Systeme abgedichtet, um den Austritt von Harzdämpfen zu verhindern. Die Dämpfe sind gegebenenfalls gesundheitsschädlich, verursachen beim Freiwerden aber mindestens einen starken Harzgeruch.

Ein Laserstrahl wird über die Oberfläche des flüssigen Photopolymers geführt, um die Geometrie des Querprofils „abzutasten“. Bei diesem Prozess erhärtet das Harz an den vom Laserstrahl berührten Stellen. Der Laserstrahl bewegt sich entlang der X-Y-Achsen über ein Scanner-System.

Der Laserstrahl wird über ein Spiegelsystem navigiert, das mittels starker Minimotoren einen blitzschnellen und akkuraten Ablauf beschreibt. Die Motoren werden über Informationen von den CAD-Daten gesteuert, die das entsprechende Profil vorgeben.

Das genaue Muster der Laserstrahlspur ist eine Kombination der basisgeometrischen Daten aus dem CAD-Programm sowie aus zusätzlichen Informationen, die von der Software des Druckapparates stammen, um die Präzision des hergestellten Objektes zu optimieren. Dadurch wird auch ein Ausgleich für mögliche Fehler geschaffen, die beispielsweise durch plötzliches Schrumpfen des aufbereiteten Materials entstehen können.

In die Optimierung dieser Auftragstechnologie wurde in den letzten Jahren viel Entwicklungsarbeit investiert. Man nennt den Prozess auch „Build Style“ („Baustilverfahren“).

Einzelne Hersteller liefern markeneigene Bauausführungsverfahren, die für ihre jeweiligen Anlagen und spezifischen Materialien optimiert wurden.

Nachdem eine Schicht komplett „abgetastet“ und durch den Laserstrahl weitestgehend gehärtet wurde, senkt sich die bewegliche Platte um den minutiösen Teil einer Schichtbreite in der Wanne. Der Tast- und Wiederbeschichtungsprozess wird so lange wiederholt, bis das Objekt vollständig hergestellt auf der Konstruktionsbühne steht.

Einige Objekte haben Überhänge und Vertiefungen, die während des Herstellungsprozesses gestützt werden müssen, da die Konstruktion sonst zusammenbrechen würde. Stützmechanismen können manuell im Designprozess zugefügt werden, in den meisten Fällen werden sie aber automatisch durch die Systemsoftware integriert.

Wenn der Fertigungsprozess abgeschlossen ist, wird das Objekt vollständig aus der Wanne hochgefahren, um das flüssige Kunstharz abtropfen zu lassen. Überschüssiges Harz kann mit Alkohol manuell abgetupft werden.

Das Objekt wird meist in einem letzten Schritt in einem sogenannten Post-Curing Apparat (PCA) nachgehärtet. Hierbei handelt es sich um einen ofenähnlichen Apparat,

in dem das Objekt mit intensivem Licht „gebadet“ wird. Nach der endgültigen Härtung werden die Stützmechanismen abgetrennt und die Oberfläche durch Sanden oder andere Verfahren geglättet.

Wie schon erwähnt bedarf es zur Belichtung und Härtung von Photopolymeren nicht ausschließlich eines Lasers. Zunehmender Popularität erfreut sich die Anwendung konventioneller Lichtquellen, zum Beispiel Bogenlampen in Kombination mit Flüssigkristallpanelen, oder eines verformbaren Spiegel-Bauelements (Deformable Mirror Device). Diese sogenannten räumlichen „Lichtmodulatoren“ können jeweils eine gesamte Photopolymer-Schicht in einem Ablauf belichten und härten.

Bei einem typischen Gerät dieses Anwendungsbereiches wird der Photopolymer von unten durch ein Glasfenster belichtet und ermöglicht, dass das gefertigte Objekt sozusagen langsam aus der Produktionsmulde „entwächst“. Einige Hersteller haben diesen Prozess soweit verfeinert, dass der Mechanismus schnell genug arbeitet, um ein stufenloses „Wachstum“ des Bauobjektes zu erlauben – und zwar ohne den Herstellungsvorgang an irgendeiner Stelle im Prozess für Neubeschichtungen anhalten zu müssen.

Neben der Tatsache, dass diese Methode ohne kostspielige Laser arbeitet, gibt es einen weiteren Vorteil: Es wird kein großer, tief gefüllter Behälter für photopolymeres Material benötigt, denn dieses Verfahren arbeitet auf einer flachen Ebene, d. h. Material wird bedarfsgerecht aufgeschichtet – also nur so viel Material, wie tatsächlich gebraucht wird.

Der über die konventionelle Stereolithografie eingesetzte (große) Produktionsbehälter kann mehrere tausend US-Dollar kosten, wobei nicht gebrauchtes beziehungsweise überschüssiges Material hier wesentlich anfälliger für Dekontaminations- beziehungsweise Degenerationsfehler ist.

Die Firma Envisiontec GmbH wendet diese Methode schon seit vielen Jahren über ihre PerfactoryTM-Serie für hochprofessionelle Maschinen erfolgreich an.

Vor kurzem ist eine Reihe von Open-Source-Anbietern aufgetaucht, die Druckmaschinen mit dieser Technologie im Privatverbrauchermarkt als Bausatz für circa 1000 US-Dollar anbieten.

2.1.1 Vorzüge

Im Anwenderbereich wird Stereolithografie allgemein als die additive Technologie mit der höchsten Präzision und der besten Oberflächenveredelung gepriesen. Im Laufe der letzten Jahre wurden Materialien entwickelt, die in ihren Eigenschaften konventionelle Thermoplaste erfolgreich imitieren. Die Auswahl ist jedoch immer noch begrenzt.

Für den biomedizinischen Bereich sind beispielsweise ein paar selektiv farbveränderbare Materialien verfügbar, und Keramikstoffe werden hier für Spezialapplikationen eingesetzt. Die Technologie zeichnet sich auch dadurch aus, dass überdimensionale Objektfertigungen möglich sind.

So können beispielsweise mit den MammothTM-Maschinen, die in Besitz und Anwendung des Dienstleistungsarms der Firma Materialise NV (Belgien) sind, ganze Automobil-Armaturenpulse in einem Verfahren gedruckt werden.

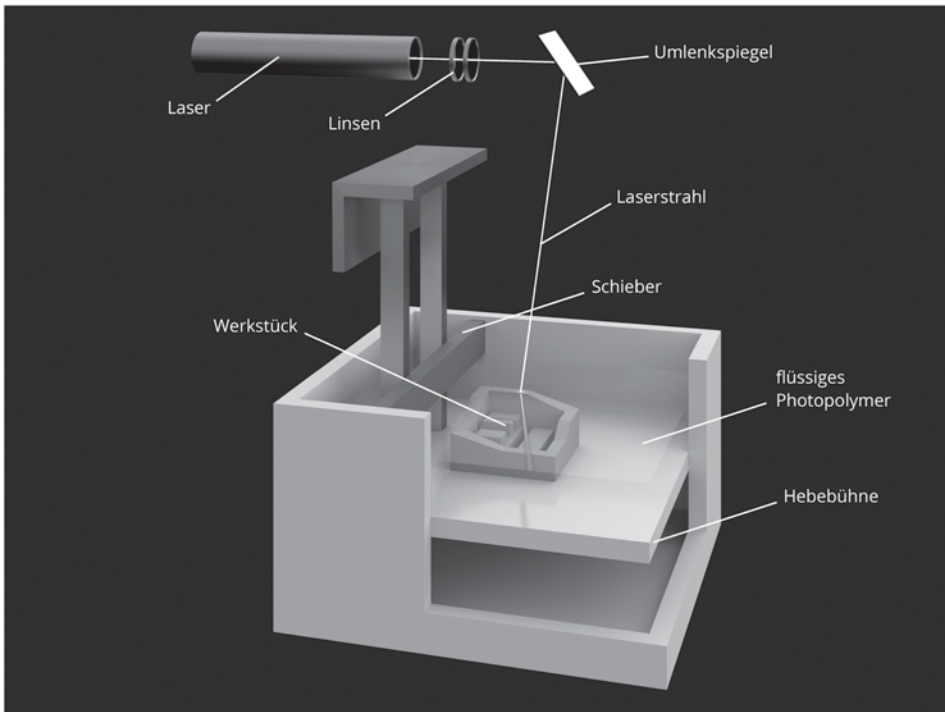


Abb. 2.2 Schemazeichnung Stereolithographie (Quelle: Core Consulting GmbH)

2.1.2 Limitierungen

Das Arbeiten mit flüssigem Material ist selten, wenn überhaupt, sauber. Zudem erfordern „gedruckte“ Objekte eine Nachbehandlung und -bearbeitung bis zur vollständigen Fertigstellung. Da einige der eingesetzten Flüssigstoffe unter Verdacht stehen, krebserregend zu sein, ist besondere Vorsicht geboten.

Die Gewährleistung einer langfristigen Stabilität der Materialien ist immer noch ein Sorgenpunkt und wird bei Überlegungen für Endverbraucher-Applikationen sehr ernst genommen. Die Anlagen sind außerdem teuer: die Rede ist von mehreren zehntausend US-Dollar, was nicht zuletzt daran liegt, dass allein die Laser- und Scanner-Systeme hochwertigste Komponenten sind. Vgl. Abb. [2.2](#)

2.2 Jetted-Photopolymer-Technologie

Bei der Jetted-Photopolymer-Technologie handelt es sich um einen additiven Herstellungsprozess, der die Methoden des Inkjet Printing und der Stereolithografie verbindet.

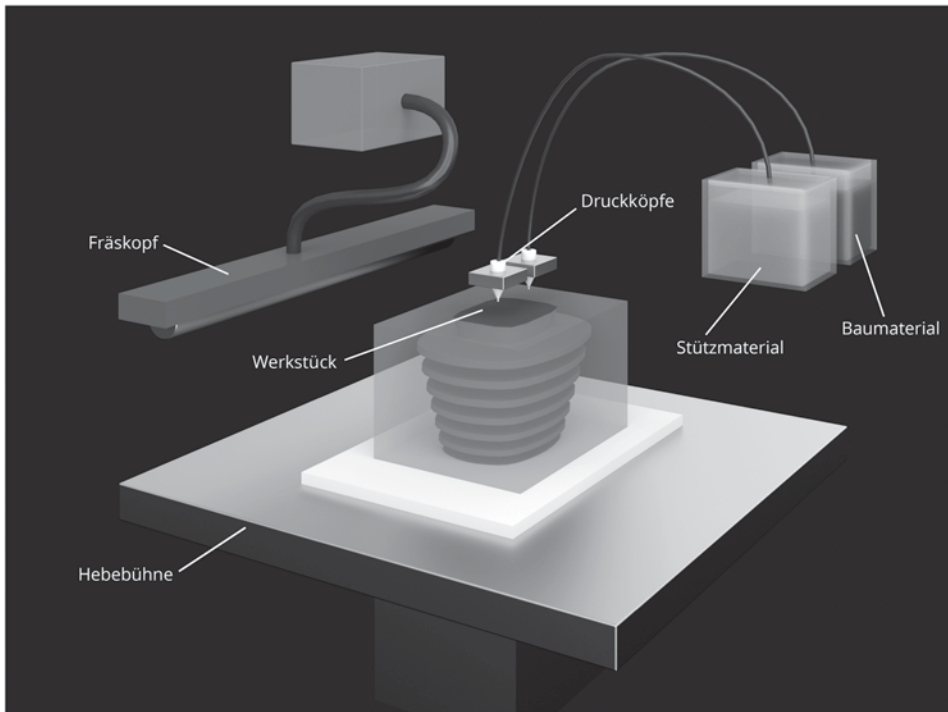


Abb. 2.3 Schemazeichnung der Jetted-Photopolymer-Technologie (Quelle: Core Consulting GmbH)

Der Aufbauprozess des jeweiligen Werkstückes entspricht zunächst dem Inkjet-Printing-Verfahren: Aus einer Anordnung von Inkjet-Druckköpfen wird Bau- und Stützmaterial gespendet, um das Werkstück schichtweise zu erstellen.

Wie bei der Stereolithografie handelt es sich bei dem Baumaterial um ein flüssiges Acrylat-Photopolymer, das über eine UV-Lampe ausgehärtet wird, nachdem die jeweilige Bauschicht aufgetragen wurde.

Im Verbund dieser beiden Technologien spricht man gelegentlich auch von Photopolymer Inkjet Printing. Klare Vorteile dieses Prozesses sind die erzielbare Präzision und eine sehr gute Oberflächenendverarbeitung. Bauwerkdetails sowie Materialeigenschaften sind jedoch nicht so ausgereift wie bei der Stereolithografie.

Die häufigsten Applikationen der Jetted-Polymer-Technologie findet man zurzeit noch im Prototypenbau, spezifisch für das Testen von Form und Passgenauigkeit eines Werkstücks. Andere Applikationen finden sich in den Bereichen der Musterherstellung beim Rapid Tooling, der Schmuckherstellung und der Fertigung medizinischer Geräte.

Unter den Technologie-Anbietern teilen sich bis jetzt Objet Geometries Ltd. (Israel, inzwischen Teil von Stratasys) und 3D Systems (USA) die Marktführerschaft. Beide Unternehmen investieren gezielt in die Weiterentwicklung von Jetted-Polymer-Verfahren und Geräten. Vgl. Abb. 2.3

Während das basistechnologische Verfahren, wie oben beschrieben, bei beiden Unternehmen gleich ist, nutzen sie bei der Stützstruktur, die beim Jetted-Polymer-Bau notwendig ist, unterschiedliche Ansätze: Objet verwendet ein zusätzliches Photopolymer, das aus einer separaten Düse zugeführt wird; 3D Systems verwendet ein Wachs zur Stützung (ebenfalls über eine separate Düse).

2.3 Lasersintering

Lasersintering ist in seinem Grundverfahren der Stereolithografie ähnlich. Anders als bei der Stereolithografie wird hier ein Laserstrahl über die Oberfläche eines Behälters geführt, der mit verdichteten Pulverpartikeln aus thermoplastischem Material gefüllt ist.

Das Pulver wird durch eine gegenrotierende Walze auf die Oberfläche eines Bauzylinders (Build Cylinder) geschichtet. Der Bauzylinder wird durch einen Kolben sukzessive um die Höhe einer minutiösen Schichtbreite nach unten bewegt.

Ein Laserstrahl wird über Spiegel eines Scanner-Systems entlang der X-Y-Achsen navigiert, die an exakt lenkbaren Hochleistungsmotoren befestigt sind. Auf diese Weise brennt der Laserstrahl die Querschnittsform des Objektes.

Wie beim Stereolithografie-Verfahren ist auch hier das genaue Muster der Laserstrahlspur eine Kombination der basisgeometrischen Daten aus dem CAD-Programm sowie zusätzlichen Informationen, die von der Software der Druckmaschine stammen, um die Präzision des hergestellten Objektes zu optimieren. Dadurch werden mögliche Ungenauigkeiten, zum Beispiel durch Schrumpfen oder Wölbungen, vermieden.

Auch für dieses Verfahren wurde zur Optimierung dieser Auftragungstechnologie in den letzten Jahren eine Menge Entwicklungsarbeit geleistet.

Der bei dieser Technologie eingesetzte CO₂-Laser generiert einen konzentrierten Infrarot-Hitzestrahle. Das Fabrikationsgehäuse ist abgedichtet und hält eine konstante Temperatur leicht unter dem Schmelzpunkt des Plastikpulvers aufrecht. Somit benötigt der Laserstrahl nur eine kleine Temperaturerhöhung, um den Schmelzprozess zu aktivieren. Dadurch wird der Bauprozess erheblich beschleunigt. Die Stickstoffatmosphäre in der Fabrikationskammer verhindert, dass es durch die hohen Pulverkonzentrate zu möglichen Explosionen kommt.

Wenn das Objekt fertig geformt ist, wird der Fabrikationstisch über den dortigen Kolben nach oben geschoben. Das überschüssige Pulver wird entfernt und die manuelle Endbearbeitung kann durchgeführt werden.

Damit ist der Vorgang aber noch nicht abgeschlossen. Es kann einige Zeit dauern, bis das geformte Teil ausreichend abgekühlt ist, um aus der Druckmaschine entfernt werden zu können. Bei größeren Teilen, mit dünn aufgetragenen Schichten, kann die Kühlzeit durchaus mehrere Tage betragen. Vgl. Abb. 2.4

Anders als bei der Stereolithografie sind bei dieser Methode keine Stützvorrichtungen notwendig, da Überhänge und Hohlkehlen durch das feste Pulverpartikelbett getragen werden. Im Vergleich zur Stereolithografie erspart diese Eigenschaft Zeit bei der Endbearbeitung.

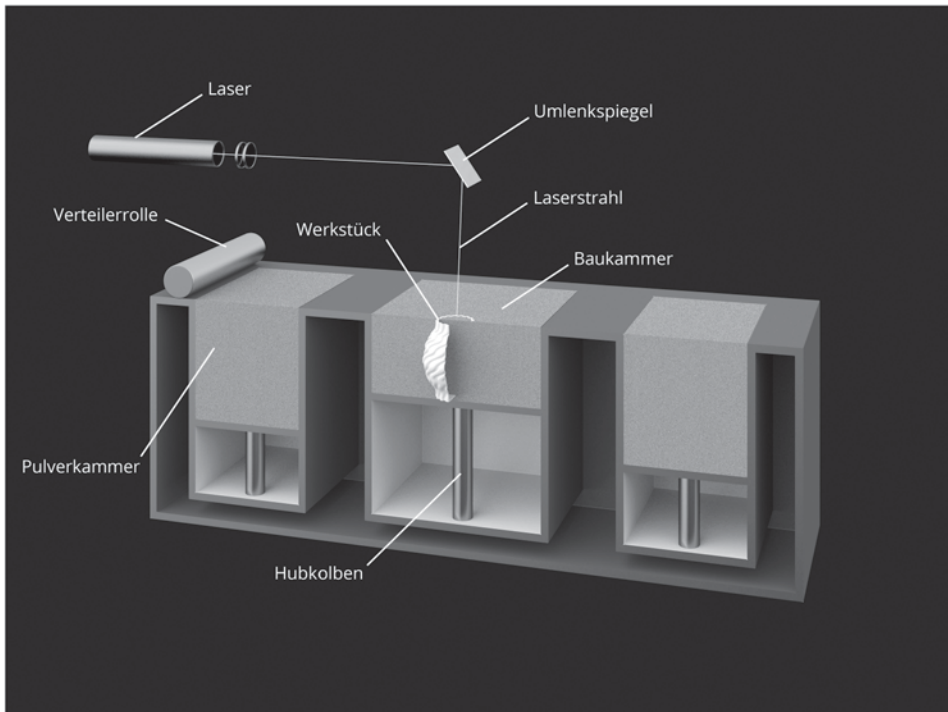


Abb. 2.4 Schemazeichnung Lasersintering-Verfahren (Quelle: Core Consulting GmbH)

Die Endoberflächen sind jedoch nicht so sauber gearbeitet wie bei der Stereolithografie, was wiederum zusätzlichen Zeitaufwand bedeutet. Da die Objekte durch Sintern¹ hergestellt werden, bleibt eine gewisse Porosität erhalten. Je nach Applikation kann es notwendig sein, das Objekt mit einem anderen Material zu infiltrieren, um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern.

In den letzten Jahren wurden große Fortschritte bei der Verbesserung von Oberflächenveredelung und der Reduzierung von Porosität gemacht.

Die Anwendung von Lasersintering wurde inzwischen auf den Bereich der direkten Fabrikation beziehungsweise Verarbeitung von Metall- sowie Keramikobjekten und -werkzeugen erweitert.

2.3.1 Vorzüge

Lasersintering bietet nunmehr die Möglichkeit, ausgereifte Metall- und Plastikteile mit der gleichen Qualität herzustellen, wie sie im konventionellen Verfahren produziert wer-

¹ Sintern ist ein Verfahren, bei dem körniges oder pulveriges Ausgangsmaterial verschmolzen wird.

Das 3D-Druck-Kompodium
Leitfaden für Unternehmer, Berater und
Innovationstreiber

Hagl, R.

2015, XI, 115 S. 53 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-658-07046-5