

Die Rapid Tooling Verfahrenskette

Trenke, D.

Dem generierenden, schichtweisen Fertigungsverfahren des Rapid Toolings kommt im industriellen Einsatz eine immer größere Bedeutung zu. Dies liegt im Wesentlichen an der Möglichkeit, sehr schnell komplexe Strukturen aufzubauen. Die Qualität der erzeugten Bauteile hängt überdies von der Güte jedes einzelnen Verfahrensschrittes ab.

The generating layering manufacturing process of rapid tooling is increasing its importance in the industrial use. This essentially depends on the opportunity to create complex structures very fast. The quality of the hereby produced component parts moreover depends on the good workmanship of every single process step.

reiteten Modelldaten werden zur Rapid Tooling Anlage übermittelt, in der schichtweise das stoffliche Modell mit Hilfe eines Lasers erzeugt wird. Abschließend können Werkstoffeigenschaften der gesinterten Werkstücke durch verschiedene Nachbearbeitungsverfahren (Infiltration mit Epoxidharz, Sandstrahlen, Polieren, usw.) noch gezielt verbessert werden.

1.1 Die CAD-Konstruktion

Wie einleitend erwähnt, beginnt die Rapid Tooling Verfahrenskette mit der CAD-Konstruktion des herzustellenden Werkstücks, wie z. B. eines Prototypens, einer Gussform oder eines Funktionsteils. Bei der Wahl des Konstruktionsprogramms ist darauf zu achten, dass ein 3D-Volumenmodell erzeugt wird. Beim Erzeugen eines 3D-Flächenmodells, welches optisch ebenfalls geschlossen aussieht, würden beim anschließenden generieren der

1 Die Rapid Tooling Verfahrenskette

Die Rapid Tooling bzw. Rapid Prototyping Verfahrenskette (siehe **Bild 1**) beginnt mit der 3D-CAD-Konstruktion des zu sinternden Bauteils.

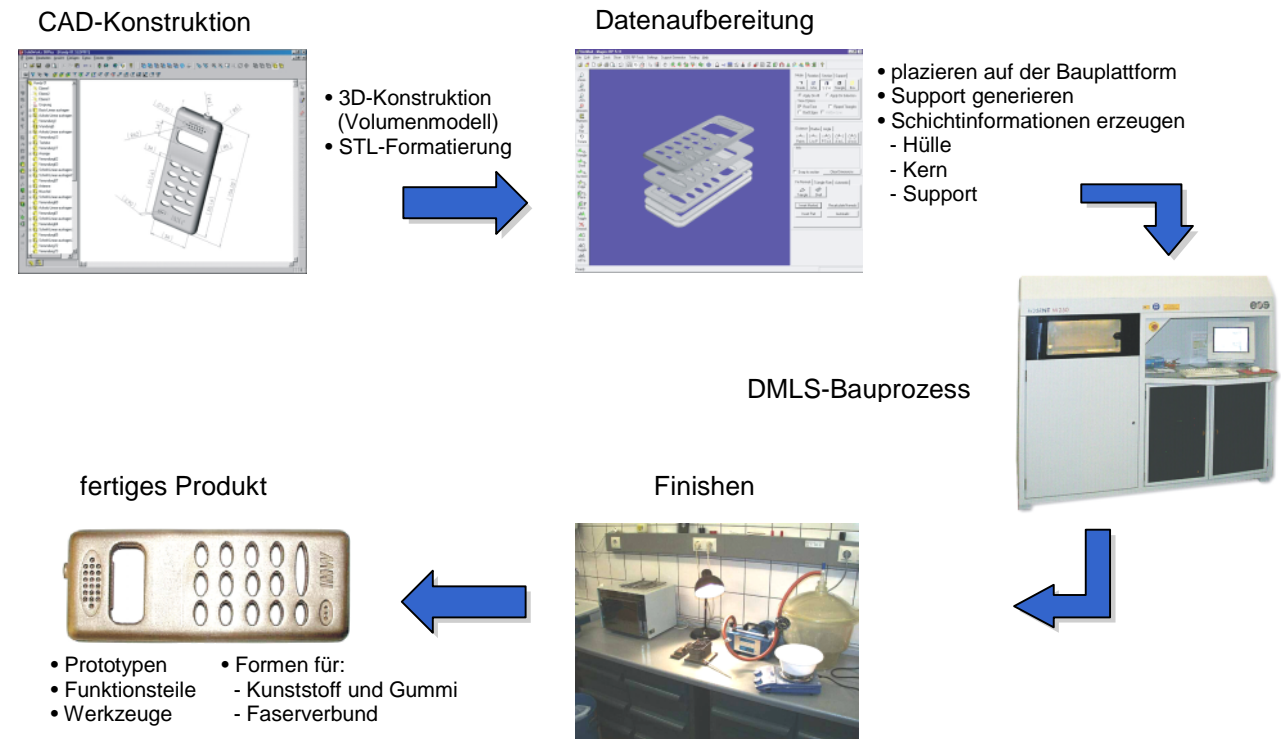


Bild 1: Die Rapid Tooling Verfahrenskette

Das so erzeugte Computermodell wird anschließend mit einer speziellen Rapid Tooling Software für den Lasersinterprozess vorbereitet (Erzeugen von Stützstrukturen, Platzieren im Bauraum, Generieren der Schichtinformationen, usw.). Die aufbe-

Schichtinformationen nur Konturen entstehen. Beim Lasersintern werden aber Flächen benötigt, die im Rapid Tooling Bauprozess aufgeschmolzen werden.

Beim Konstruieren selbst müssen diverse Regeln für eine Rapid Tooling gerechte Gestaltung beachtet werden. Hierzu gehören neben einigen ganz konkreten Regeln, wie z. B. das Beachten von Höhen-Dickenverhältnissen bei Stegen und Zapfen oder minimale Strukturen die gesintert werden können, auch ganz allgemeine Bewusstseinsregeln.

So ist es z. B. sehr wichtig, sich immer wieder vor Augen zu halten, dass es sich beim Rapid Tooling um ein aufbauendes Fertigungsverfahren handelt, d.h. die Komplexität des Werkstücks spielt im Gegensatz zu anderen Fertigungsverfahren keine Rolle. Im Gegenteil, je strukturierter das Bauteil ist, um so kürzer ist die Bauzeit und um so geringer ist die verbrauchte Pulvermenge, was niedrigere Kosten bedeutet.

Des Weiteren muss sich der Konstrukteur immer bewusst sein, dass er durch das Lasersintern Strukturen herstellen kann, die bislang nicht oder nur unter großen Aufwand zu fertigen waren. Hierzu zählen z. B. Kühlkanäle, die dreidimensional durch eine Form verlaufen.

Abschließend muss das konstruierte CAD-Modell in das STL-Format konvertiert werden. Unter STL versteht man dabei ein spezielles Triangulationsverfahren, welches das Computermodell in zahlreiche kleine Dreiecke umwandelt, die dann von der Rapid Tooling Software gelesen werden können.

Als CAD-Programme eignen sich z. B. ProE, CATIA oder SolidWorks (siehe **Bild 2**).

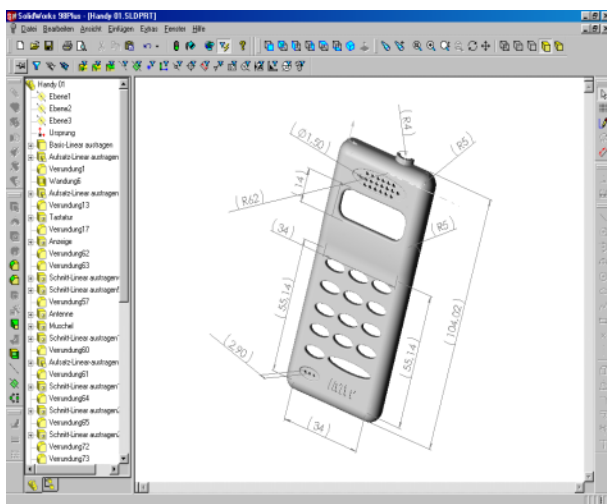


Bild 2: mit SolidWorks konstruierte Handyschale

1.2 Datenaufbereitung

Das erzeugte STL-File wird als nächstes zur Datenaufbereitung an eine spezielle Rapid Tooling Software übertragen. Hierzu wird am IMW das Pro-

gramm Magics RP der Firma Materialise verwendet.

Bei der Datenaufbereitung, bzw. beim Einrichten des „Jobs“ gibt es einige Besonderheiten bei dem am IMW eingesetzten Rapid Tooling Verfahren (direktes Metall-Lasersintern (DMLS)) zu beachten:

Im DMLS-Prozess können die Bauteile, im Gegensatz z. B. zur Stereolithographie, nicht „frei schwebend“ aufgebaut werden, d.h., die Bauteile brauchen immer einen festen Kontakt zu einer Bauplattform, die mit in die Prozesskammer eingelegt wird. Um diesen festen Halt zu gewährleisten, werden so genannte Supportstrukturen erzeugt (siehe **Bild 3**).

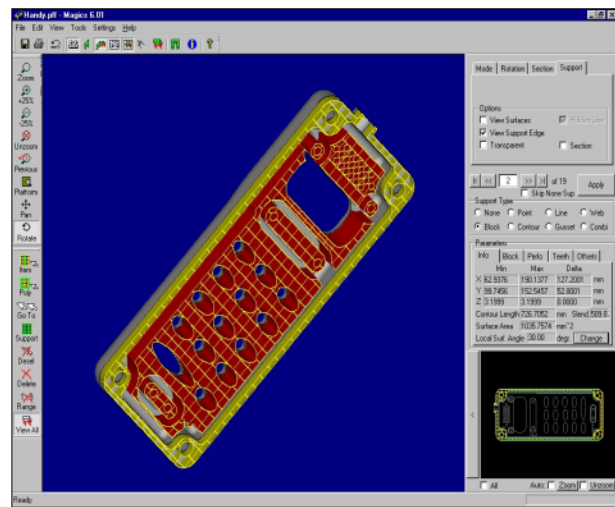


Bild 3: Handyschale mit Stützstruktur

Diese Stützstrukturen dienen zum einem zum Abtrennen des Werkstücks von der Bauplattform und zum anderen stützen sie Auskragungen, die größer als 3 mm sind. Um diese Supportstrukturen leichter entfernen zu können, haben diese einen wabenartigen Aufbau und werden mit speziellen Parametern belichtet.

Formhälften oder Funktionsteile können aber auch direkt auf der Bauplattform gesintert werden, wodurch zum einen Material eingespart wird, da die Bauplattform als Volumen mitgenutzt werden kann und zum anderen entsteht eine feste Unterlage zum Einsetzen der Form in das Stammwerkzeug.

In **Bild 4** ist die Bauplattform, das Bauteil und die Supportstruktur dargestellt. Die so eingerichteten Daten können nun in Schichtinformationen zerlegt werden.

Die eingestellte Schichtdicke hängt dabei von der Korngröße des verwendeten Metallpulvers ab. Die im DMLS-Bauprozess gesinterten Werkstücke besitzen eine typische Schichtdicke von 0,05 mm bis 0,02 mm.

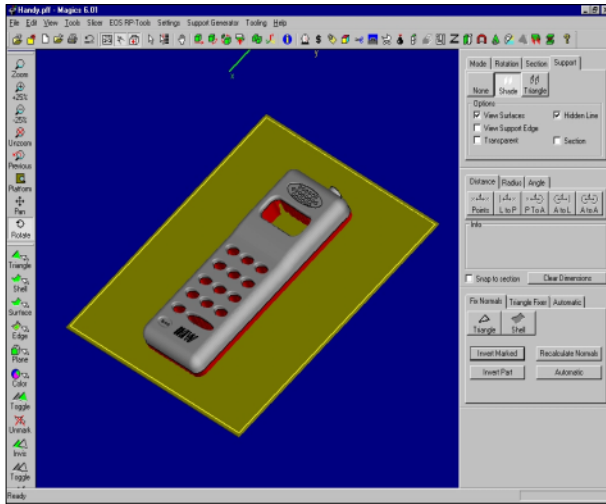


Bild 4: Werkstück, Support und Bauplattform

Anschließend werden die erzeugten Schichtinformationen zur Rapid Tooling Anlage übertragen, wo dann - entsprechend diesen Informationen - das stoffliche Modell mittels eines Lasers schichtweise generiert wird.

1.3 Der DMLS-Bauprozess

Die am Institut für Maschinenwesen verwendete Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250 (siehe **Bild 5**) besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- einem CO₂-Laser (200 W), zum Aufschmelzen des Metallpulvers,
- der Trägerplattform mit aufgesetzter Bauplattform,
- der Dosierplattform, zur Bevorratung des Pulvers,
- dem Abstreifer, zum Auftragen des Metallpulvers auf die Bauplattform und
- dem Prozessrechner mit der Steuerungssoftware.

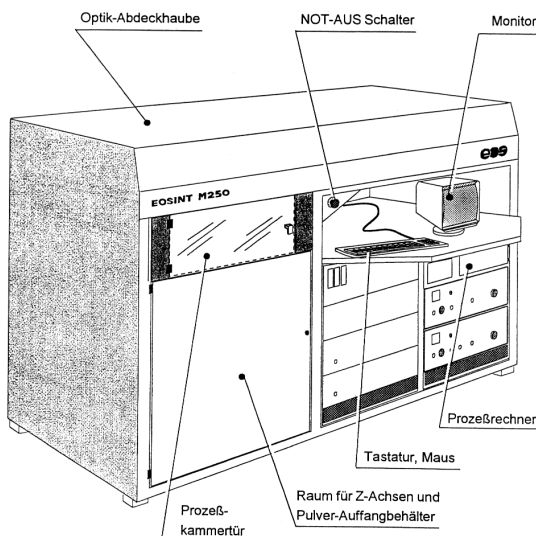


Bild 5: Die Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250

Zu Beginn des Sinterprozesses (siehe **Bild 6**) wird die Bauplattform erstmalig mit einer dünnen Metallpulverschicht bedeckt. Diese Schicht wird dann, entsprechend der ersten Schichtinformation über die Geometrie des herzustellenden Bauteils, von einem CO₂-Laser aufgeschmolzen.

Nachdem so die erste Schicht belichtet wurde, wird die Bauplattform um die nächste Schichtdicke (0,05 mm) abgesenkt und der Abstreifer bis zum Anschlag rechts von der Dosierplattform gefahren. Das Absenken der Bauplattform ist erforderlich, da durch die hohe Oberflächenspannung des Metallpulvers jede Schicht nach der Belichtung eine unregelmäßige, raue Oberfläche besitzt, an welcher der Abstreifer hängen bleiben könnte.

Hat der Abstreifer seine Position rechts vom Werkstück erreicht, wird die Dosierplattform soweit angehoben, bis genügend Pulver zur Verfügung steht, um die Bauplattform erneut vollständig zu bedecken.

Als nächstes fährt der Abstreifer wieder nach links, und trägt so die nächste Pulverschicht auf, die dann entsprechend der zweiten Schichtinformation über das Bauteil aufgeschmolzen wird. Bei dieser Verfahrensbewegung glättet der Abstreifer gleichzeitig die Oberfläche des Bauteils.

Überflüssiges Pulver fällt über den links neben der Bauplattform befindlichen Schacht in die Auffangbehälter.

Die Belichtungsparameter werden beim Sinterprozess so gewählt, dass sich die neue Schicht mit der darunter liegenden fest verbindet.

Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis aus den CAD-Informationen ein vollständiges, dreidimensionales stoffliches Bauteil entstanden ist.

Grundlage für die maximal erreichbare Qualität der lasergesinterten Bauteile sind die Materialeigenschaften des verwendeten Metallpulvers. Hierbei spielen insbesondere das Sinterverhalten und die Partikelgrößenverteilung eine entscheidende Rolle.

Das am IMW verwendete Metallpulver DirectMetal 50-V2 wurde speziell für das direkte Lasersintern entwickelt und besteht überwiegend aus einer Bronze-Nickel-Vermischung mit einem geringen Kupfer-Phosphid (Cu-P) Anteil, der als niedrigschmelzender Binder dient.

Trifft der Laserstrahl während des Bauprozesses auf die Metallpulveroberfläche wird ein Teil der Laserenergie absorbiert, wodurch sich das Pulver erwärmt. Sobald die eingebrachte Energie groß ge-

nug ist, um das Pulver auf eine Temperatur von 660°C zu erwärmen, schmilzt das Kupfer-Phosphid. Als nächstes dringt die nun flüssige Kupfer-Phosphid-Phase in die umgebenden Hohlräume und benetzt dabei die Bronze- und Nickelteilchen. Es kommt zu weiteren Phasenbildungen. Oberhalb von 850°C findet durch Poren- und Mischkristallbildung eine Expansion des makroskopischen Pulvervolumens zur Kompensation des bis dahin erfolgten Sinterschwundes statt.

Im Idealfall ist das Volumen des Körpers jetzt wieder identisch mit dem Volumen der losen Pulverschüttung.

Durch diesen Aufschmelzprozess und das anschließende Abkühlen entsteht die stabile metallische Matrix des gesinterten Bauteils.

Typischerweise besitzt der Hüllbereich eine Schichtdicke von 0,05 mm. Die Schichtdicke des Kernbereichs beträgt 0,1 mm. Hierdurch verkürzt sich die Bauzeit in erheblichem Maße, ohne dass es zu Qualitätsverlust an der Oberfläche des Werkstückes kommt.

Aufgrund dieses Hülle-Kern-Aufbaus sollten Bohrungen für Auswerfer oder Zapfen, Löcher für Befestigungsschrauben, Kühlkanäle, usw. bereits in der CAD-Konstruktion berücksichtigt werden. Werden diese Bohrungen im CAD-File nicht vorgesehen und erst nachträglich eingebracht, verläuft die Materialausparung durch den mechanisch wesentlich instabileren Kernbereich. Dies kann zur Folge haben, dass z. B. nachträglich geschnittene Gewinde ausbrechen.

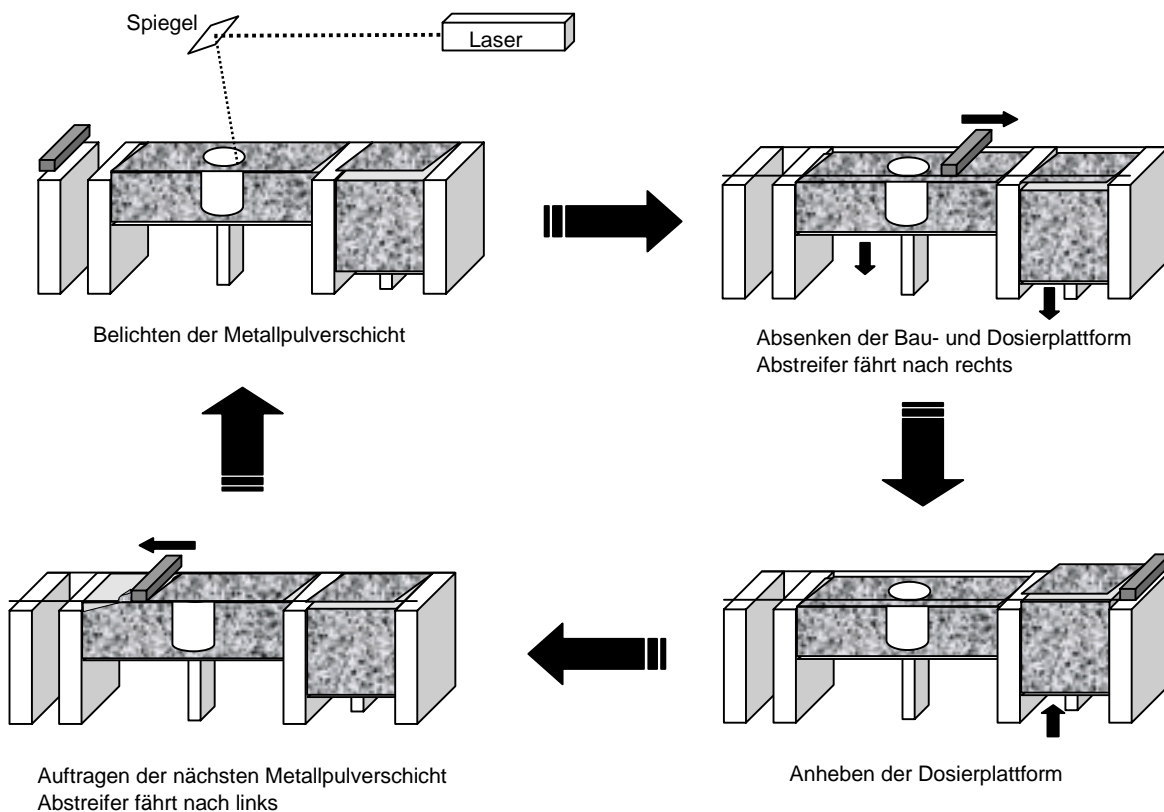


Bild 6: Der Rapid Tooling Bauprozess

Eine weitere Besonderheit des DMLS-Sinterprozesses ist, dass die Werkstücke in einer sogenannten Hülle-Kern-Struktur aufgebaut werden.

Dies bedeutet, dass das Bauteilvolumen in einen Hüllbereich (Skin) und einen Kernbereich (Core) aufgeteilt wird, die mit unterschiedlichen Belichtungsparametern und sogar mit unterschiedlichen Schichtdicken aufgebaut werden. Ziel dieser Unterscheidung ist es, eine harte Oberfläche bei gleichzeitig weichem Bauteilinneren zu erreichen.

Bei der Laserbelichtung wird zunächst die Kontur der Schichtstruktur ein erstes Mal abgefahren.

Da der fokussierte Laserstrahl einen gewissen Aushärtebreite (0,6 mm) besitzt, muss, um sicherzustellen, dass die Kontur des späteren Bauteils genau dem Maß der CAD-Konstruktion entspricht, der Fokuspunkt um die Hälfte der Aushärtebreite - von der Kontur aus nach innen - versetzt werden. Diese Positionskorrektur des Fokuspunktes wird als Strahlkompensation (siehe **Bild 7**) bezeichnet. Sie entspricht bei der ersten Konturbelichtung etwas

mehr als die Hälfte der Breite einer durch den Laserstrahl verfestigten Spur.

Nach der Belichtung der Kontur wird der gesamte Innenbereich verfestigt. Der Laserstrahl fährt dabei die Fläche Linie für Linie ab: dies geschieht mit sehr hoher Füllgeschwindigkeit. Der Abstand der Linien, der sogenannte Füllabstand, beträgt nur etwa ein Viertel des Fokaldurchmessers. Dadurch fährt der Laserstrahl mehrmals über einen zu belichtenden Punkt und gewährleistet, dass hier über einen längeren Zeitraum die Temperatur auf einem hohen Niveau gehalten wird, um sicherzustellen, dass die Sinterprozesse vollständig ablaufen können.

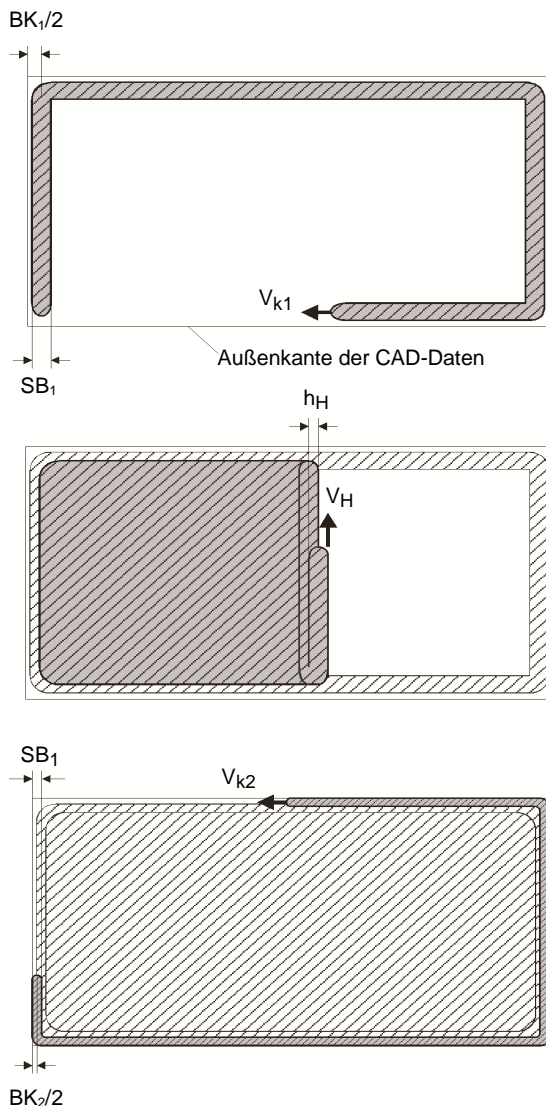


Bild 7: Strahlkompensation beim Lasersintern

Nachdem der gesamte Innenbereich verfestigt wurde, erfolgt eine zweite Belichtung der Außenkontur des Bauteils. Hier wird die Konturkompensation des Lasers auf den exakten Wert eingestellt, um zu gewährleisten, dass die Kanten des Bauteils genau den CAD-Daten entsprechen und somit maßgenaue Teile aufgebaut werden können.

Diese zweite Belichtung der Kontur hat zwei wesentliche Vorteile:

Durch die höhere Wärmeleitung des bereits verfestigten Materials im Bereich der ersten Kontur entstehen aufgrund höherer Temperaturgradienten schärfere Bauteilkonturen: dadurch sinken die Rauigkeiten der vertikalen Flächen.

Da das Material bereits bei der Belichtung der ersten Kontur und des Innenbereiches in x-y-Richtung geschwunden ist, erzeugt die zweite Belichtung eine Kontur, die den Maßen der Konstruktion entspricht. Die Genauigkeit des Bauprozesses wird gesteigert.

Durch Variation der Scangeschwindigkeit V_h und des Fülllinienabstands h wird das Bauteilvolumen bzw. die Bauteildichte beeinflusst, was wiederum zu unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften führt:

Bei einer niedrigen Scangeschwindigkeit und kleinem Fülllinienabstand steigt die Dichte des gesinterten Werkstücks: dadurch werden höhere mechanische Festigkeiten erzielt.

Im Einzelnen sind dies:

- Biegebruchfestigkeit,
- Zugfestigkeit,
- Härte und
- Druckfestigkeit,
- zudem steigt die Wärmeleitfähigkeit.

Bei hohen Scangeschwindigkeiten und großen Fülllinienabständen verringert sich die Dichte und damit die Festigkeit des Werkstücks - gleichzeitig sinkt aber die benötigte Bauzeit.

Die Qualität der horizontalen (x-y) Oberflächen hängt ebenfalls von der Scangeschwindigkeit V_h und dem Fülllinienabstand h ab.

Bei kleinen Scangeschwindigkeiten und geringen Fülllinienabständen ergeben sich niedrigere Oberflächenrauigkeiten.

Die Güte der vertikalen Oberflächen (z) wird unter anderem durch die Konturgeschwindigkeit V_k bestimmt. Eine niedrige Geschwindigkeit bedeutet hier ebenfalls eine geringe Oberflächenrauigkeit.

Die Bauteilqualität wird aber nicht nur von den verschiedenen Prozessparametern beeinflusst, sondern

auch wesentlich von den unterschiedlichen Belichtungsstrategien und Belichtungsparametern.

1.4 Finischen

Nachdem die Bauteile gesintert wurden, werden sie zusammen mit der Bauplattform aus der Rapid Tooling Anlage genommen.

Als nächstes werden eventuell vorhandenen Supportstrukturen entfernt.

Zur Verbesserung der Oberflächenqualität werden die Werkstücke in der Regel noch sandgestrahlt; dadurch wird eine Oberflächenrauigkeit von ca. 20 μm erreicht.

Durch Polieren und Strahlen sind aber auch Oberflächenqualitäten von 2-3 μm möglich.

Nach dem Sintern besitzen die Bauteile eine Restporosität von ca. 30 % - darum werden sie häufig noch infiltriert: hierzu können niedrig schmelzende Metalle oder Epoxidharze verwendet werden.

Die Epoxidharz-Infiltration hat sich dabei als besonders geeignet herausgestellt. Zum einen ist sie sehr unkompliziert und schnell anzuwenden (das Bauteil wird lediglich mit dem Epoxidharz eingestrichen und 2 h bei 160°C ausgehärtet), zum anderen wird eine Festigkeitssteigerung von 160 N/mm² auf 200 N/mm² erzielt.

Nach der Infiltration sind die Bauteile 100 % dicht, was insbesondere für Kühlkanäle sehr wichtig ist.

Es ist aber auch möglich, die Bauteile mit anderen Metallen, wie z. B. Kupfer, zu infiltrieren.

Die lasergesinterten Bauteile können zur Weiterbearbeitung auch geschweißt, gelötet, erodiert oder spanend bearbeitet werden.

1.5 Fertige Sinterprodukte

Durch den DMLS-Bauprozess können z. B. Formen für den Kunststoff- und Gummispritzguss gesintert werden, aber auch für Faserverbundbauteile. Die erreichbaren Stückzahlen der Positivteile liegen dabei zwischen einigen hundert und tausend Teilen. Dies hängt jeweils von der Komplexität der Bauteile ab.

Es ist aber auch möglich, Funktionsteile direkt herzustellen, wie z. B. Zahnräder oder Wellen.

Eine interessante Anwendung ist auch die Herstellung von Elektroden für das funkenerosive Abtragen. Zur Verbesserung des Verschleißverhaltens und der Abbildungsgenauigkeit können die gesin-

terten Elektroden noch chemisch mit Kupfer beschichtet werden.

Natürlich können aber auch Prototypen (siehe **Bild 8**) oder Anschauungsmodelle mittels Rapid Tooling hergestellt werden.

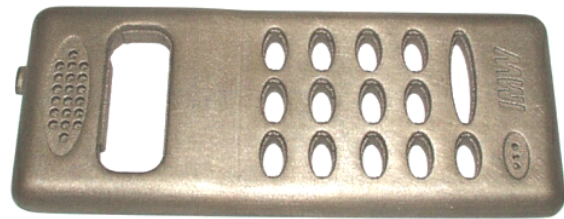


Bild 8: Lasergesinterte Handyschale

2 Zusammenfassung

Wie die Ausführungen gezeigt haben, ist unter dem Begriff Rapid Tooling nicht nur der eigentliche Sinterbauprozess sondern die gesamte Verfahrenskette zu betrachten.

Dies ist insbesondere bei Fragen zur Qualitätssteigerung der Sinterprodukte, neuen Einsatz- und Anwendungsgebieten und der Verkürzung der Fertigungszeiten zu berücksichtigen.

Zudem wird deutlich, dass die Vorstellung, aus einer beliebigen Konstruktion unmittelbar ein stoffliches Bauteil zu erhalten zur Zeit noch mit weiteren Arbeitsschritten verbunden ist.

3 Literatur

- /1/ EOS GmbH: Basis Training, Planegg 1999
- /2/ Trenke, D.: Anwendung von Rapid Prototyping und Rapid Tooling in der Produktentwicklung, IMW Clausthal 2001