

Die Rapid Tooling-Verfahrenskette

Von Detlef Trenke

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

Das erzeugte Computermodell wird anschließend mit einer speziellen Rapid Tooling Software für den Lasersinterprozess vorbereitet (Erzeugen von Stützstrukturen, Platzieren der Bauteile im Bauraum, Generieren der Schichtinformationen, usw.). Die aufbereiteten Modelldaten werden dann zur Rapid Tooling-Anlage

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

Die CAD-Konstruktion

Wie einleitend erwähnt, beginnt die Rapid Tooling-Verfahrenskette mit der CAD-Konstruktion des herzustellenden Werkstücks, wie z. B. eines Prototyps, eines Werkzeuges oder eines Funktionsteils. Bei der Wahl des Konstruktionsprogramms ist darauf zu achten, dass ein 3D-Volumenmodell erzeugt wird. Beim Erzeugen eines 3D-Flächenmodells würden beim anschlie-

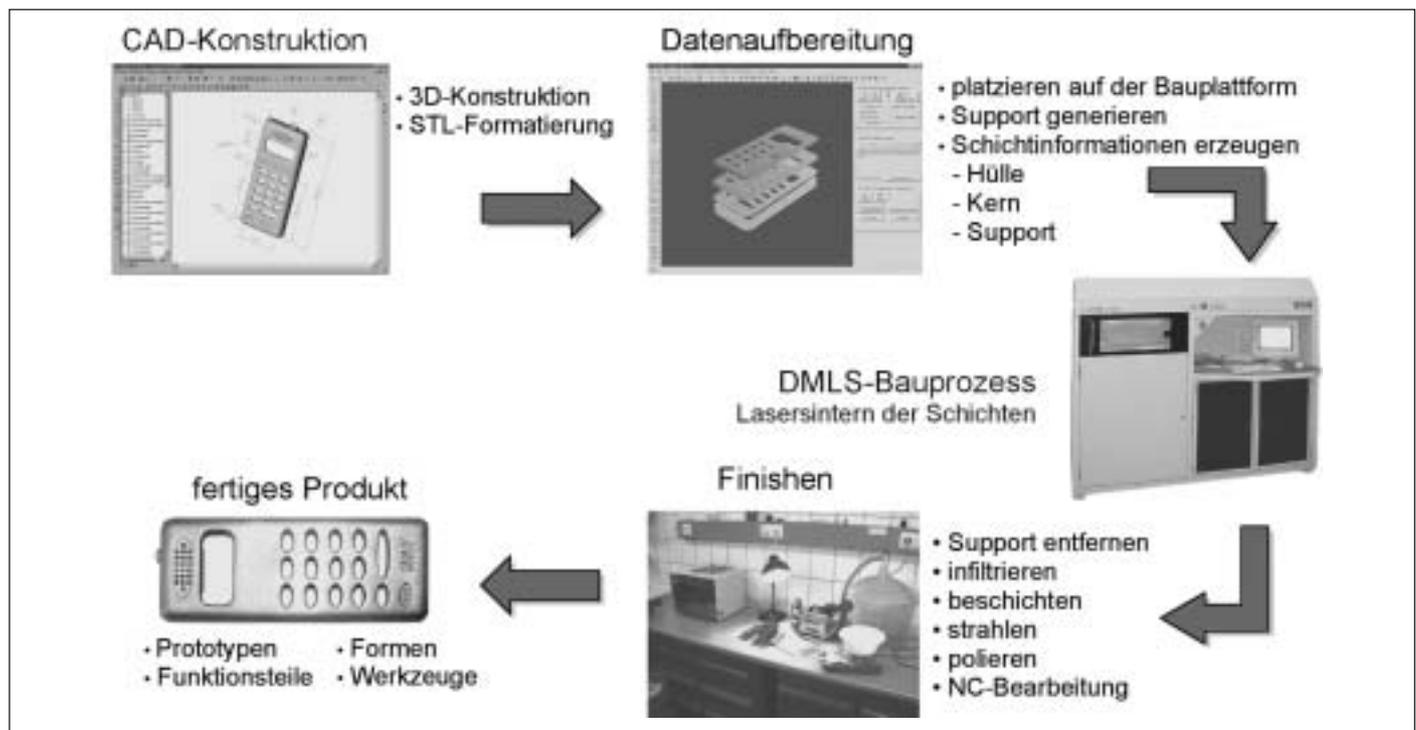


Bild 1: Die Rapid Tooling-Verfahrenskette

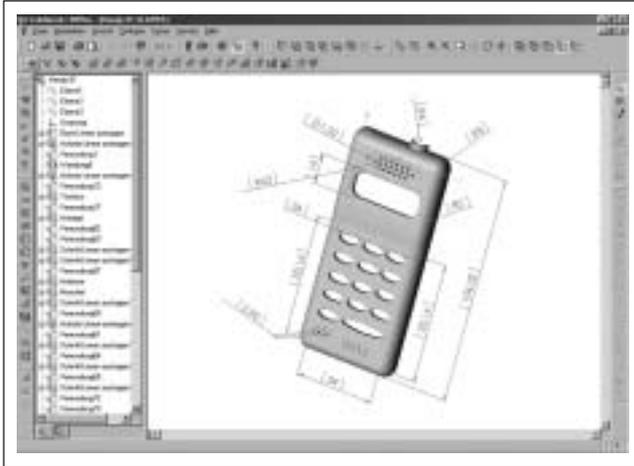


Bild 2: Im CAD-Programm konstruierte Handschale



Bild 5: Rapid Tooling-Anlage EOSINT M 250

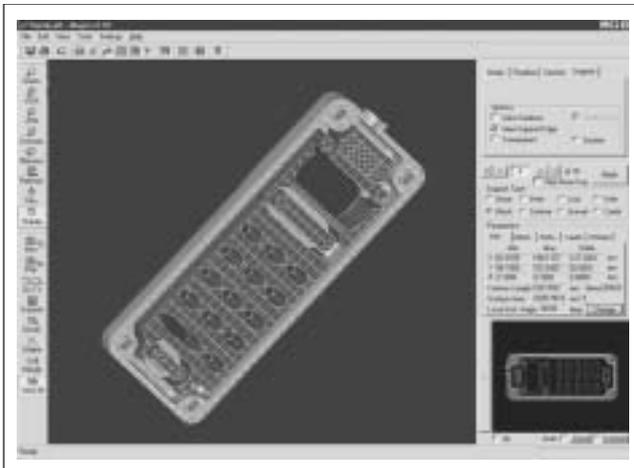


Bild 3: Handschale mit Stützstruktur



Bild 4: Werkstück, Support und Bauplattform

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, umso kürzer ist die Bauzeit und umso geringer ist die verbrauchte Pulvermenge, was wiederum 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 großem Aufwand zu fertigen waren. Hierzu zählen beispielsweise 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 für die Konstruktion eignen sich unter anderem ProE, CATIA V5 oder SolidWorks (siehe Bild 2).

Das erzeugte STL-File wird als nächstes zur Datenaufbereitung an eine spezielle Rapid Tooling-Software übertragen. Bei der Datenaufbereitung bzw. beim Einrichten des „Jobs“ gibt es einige Besonderheiten des am Institut für Maschinenwesen (IMW) eingesetzten Rapid Tooling-Verfahrens, des direkten Metall-Lasersinterns (DMLS), zu beachten: Im DMLS-Prozess können die Bauteile 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).

Diese Stützstrukturen dienen zum einen zum Abtrennen des Werkstücks von der Bauplattform, und zum anderen stützen sie Auskra- ▶

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

Beim Konstruieren selbst müssen verschiedene Regeln für eine Rapid Tooling-gerechte Gestaltung beachtet werden. Hierzu gehören

neben einigen ganz konkreten Bedingungen – wie z. B. das Beachten von Höhen-Dickenverhältnissen bei Stegen und Zapfen oder minimale Strukturen, die gesintert werden können – auch ganz allgemeine Grundsätze.

So ist es beispielsweise wichtig, sich immer wieder zu verdeutlichen, dass es sich beim Rapid

gungen, die größer als 3 mm sind. Um die Supportstrukturen nach dem Bauprozess 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 nicht mehr zusätzlich aufgebaut werden muss. 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 Schichtstärke hängt dabei von der Korngröße des verwendeten Metallpulvers ab. Die im DMLS-Bauprozess gesinterten Werkstücke besitzen eine typische Schichtstärke von 0,05 oder 0,02 mm.

Anschließend werden die erzeugten Schichtinformationen zur Rapid Tooling-Anlage übertragen, wo dann – entsprechend diesen Informatio-

nen – das stoffliche Modell mittels eines Lasers schichtweise generiert wird.

Der DMLS-Bauprozess

Die am IMW 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 Metallpulvers,
- dem Abstreifer zum Auftragen des Pulvers auf die Bauplattform und
- dem Prozessrechner mit der Steuerungssoftware.

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 Schichtstärke 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 leicht 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 einen Auffangbehälter. Die Belichtungsparameter werden beim Sinterprozess so gewählt, dass sich ▶

Anzeige

Wir arbeiten an einer bewegten Zukunft

Auch für Sie. Denn Bewegung ist unser Geschäft, ein Geschäft, in dem man nur Erfolg haben kann, wenn man in Bewegung bleibt und sich weiterentwickelt: In der eigenen Arbeit, im Team, im Unternehmen. Unsere Erfahrungen als internationales Unternehmen sowie unsere zahlreichen Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten helfen die täglichen Herausforderungen zu meistern. Lassen Sie uns gemeinsam etwas bewegen!

Weitere Informationen:
www.siemens.com/ts/jobs_karriere
 E-Mail: perspektiven@ts.siemens.de

SIEMENS

efficient rail solutions

THEM 170458

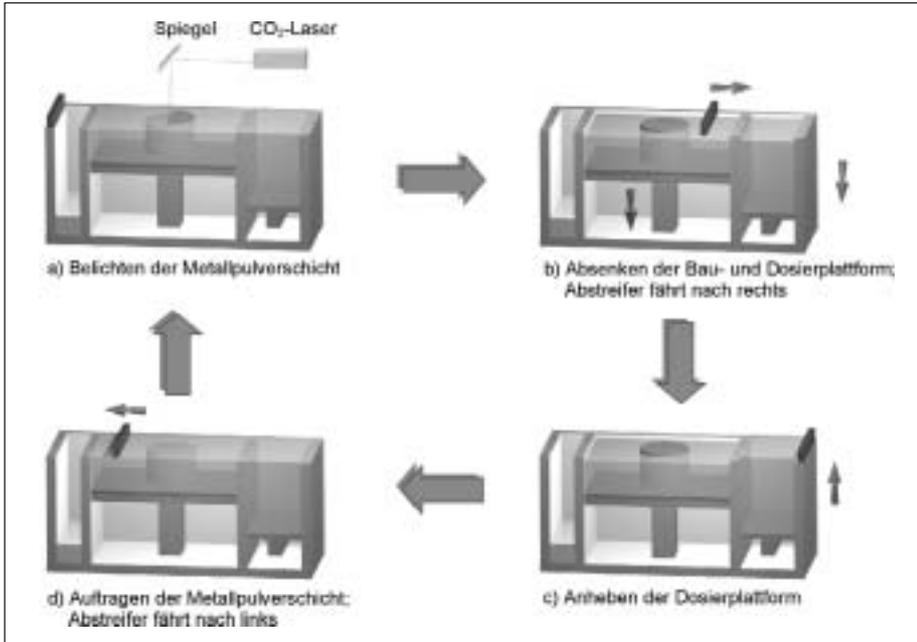


Bild 6: Der Rapid Tooling-Bauprozess

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. Die am IMW verwendeten Bronze- und Stahlpulver wurden speziell für das direkte Lasersintern entwickelt und verfügen über die in **Tabelle 1** aufgeführten Materialeigenschaften.

Eine weitere Besonderheit des DMLS-Sinterprozesses ist der Aufbau der Werkstücke in einer so genannten Hülle-Kern-Struktur. Dies bedeutet, dass das Bauteilvolumen in einen Hüllbereich (Skin) und einen Kernbereich (Core) aufgeteilt wird, die mit unterschiedlichen Belichtungsparametern und sogar mit unterschiedlichen Schichtstärken aufgebaut werden können. Ziel dieser Unterscheidung ist es, eine harte Oberfläche bei gleichzeitig elastischem Bauteilinneren zu erreichen.

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.

Bei der Laserbelichtung einer jeden Schicht selbst (siehe **Bild 7**) wird zunächst die Kontur

der Schicht ein erstes Mal abgefahren. Da der fokussierte Laserstrahl eine gewisse Aushärtebreite (ca. 0,6 mm) besitzt, muss der Fokuspunkt um die Hälfte der Aushärtebreite – von der Kontur aus nach innen – versetzt werden, um sicherzustellen, dass die Kontur des späteren Bauteils genau dem Maß der CAD-Konstruktion entspricht. Diese Positionskorrektur des Fokuspunktes wird als Strahlkompensation bezeichnet. Sie entspricht bei der ersten Konturbelichtung etwas mehr als der 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 V_H . Der Abstand der Linien, der sogenannte Fülllinienabstand h_H , beträgt nur etwa ein Viertel des Fokusedurchmessers. Dadurch fährt der Laserstrahl mehrmals über einen zu belichtenden Punkt. Dies bewirkt, dass über einen längeren Zeitraum die Temperatur auf einem hohen Niveau gehalten wird und die Sinterprozesse vollständig ablaufen können.

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

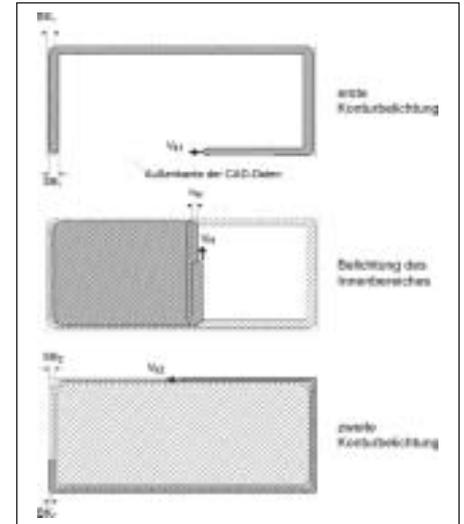


Bild 7: Strahlkompensation beim Lasersintern

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 Füllgeschwindigkeit und des Fülllinienabstandes wird das Bauteilvolumen bzw. die Bauteildichte beeinflusst, was wiederum zu unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften führt:

Bei einer niedrigen Füllgeschwindigkeit und kleinem Fülllinienabstand steigt die Dichte des gesinterten Werkstücks: Dadurch werden höhere mechanische Festigkeiten erzielt. Im Einzelnen sind dies die:

- Biegebruchfestigkeit,
- Zugfestigkeit,
- Härte und
- Druckfestigkeit.

Zudem steigt die Wärmeleitfähigkeit.

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

Die Qualität der horizontalen Oberflächen hängt ebenfalls von der Füllgeschwindigkeit und dem Fülllinienabstand ab. Bei kleinen Füllgeschwindigkeiten und geringen Fülllinienabständen ergeben sich niedrigere Oberflächenrauigkeiten.

Die Güte der vertikalen Oberflächen 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. ▶

	DirectMetal 50	DirectMetal 20	DirectSteel 50	DirectSteel 20
<i>Allgemeine Prozessdaten:</i>				
min. Schichtdicke (µm)	50	20	50	20
Bauteilgenauigkeit (µm)	± 80	± 50	± 100	± 50
kleinste Wandstärke (mm)	0,7	0,6	0,9	0,7
<i>Oberflächenrauigkeit R_z:</i>				
ohne Mikrostrahlen (µm)	50 - 60	40 - 50	60	50
nach Mikrostrahlen (µm)	20	15	35	15
nach Polieren (µm)	bis 1	bis < 1	bis < 1	bis < 1
<i>Bauteileigenschaften:</i>				
Restporosität (%)	20	8	5	2
Zugfestigkeit (MPa)	200	400	500	600
E-Modul (GPa)	50	80	110	130
Biegebruchfestigkeit (MPa)	400	700	950	1000
Härte (HB)	90	110	200	220
max. Temperatur (°C)	400	400	800	800

Tabelle 1: Materialdaten der verschiedenen Sinterwerkstoffe

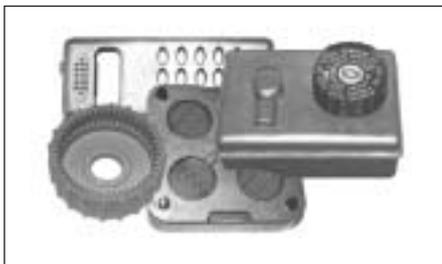


Bild 8: Lasergesinterte Bauteile

Finishen

Nach dem Sintern der Bauteile und der Entnahme der Bauplattform aus der Rapid Tooling-Anlage wird geprüft, ob noch vorhandene Supportstrukturen zu entfernen sind.

Zur Verbesserung der Oberflächenqualität werden die Werkstücke in den meisten Fällen noch sandgestrahlt; dadurch wird eine Oberflächenrauigkeit von ca. 20 µm erreicht. Durch Polieren und Strahlen sind aber auch Oberflächenqualitäten von 1 bis 3 µm möglich.

Nach dem Sintern besitzen die Bauteile eine geringe Restporosität – aus diesem Grund werden sie häufig infiltriert; hierzu können niedrigschmelzende Metalle oder Epoxidharze verwen-

det 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 Stunden bei 160°C ausgehärtet), zum anderen wird eine Festigkeitssteigerung erreicht.

Nach der Infiltration sind die Bauteile vollkommen dicht, was insbesondere für Kühlkanäle wichtig ist. Die lasergesinterten Bauteile können zur Weiterbearbeitung auch geschweißt, gelötet, erodiert oder spanend bearbeitet werden.

Fertige Sinterprodukte

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

Es ist aber auch möglich, metallische Funktionsteile direkt herzustellen, wie beispielsweise Zahnräder oder Wellen. Eine weitere interessante Anwendung ist die Herstellung von Elektroden für das funkenerosive Abtragen. Natürlich können aber auch Prototypen oder Anschauungsmodelle mittels Rapid Tooling hergestellt werden.

In **Bild 8** sind exemplarisch einige am IMW lasergesinterte Bauteile dargestellt.

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 verschiedenen Arbeitsschritten verbunden ist.

*Dipl.-Ing. Detlef Trenke
Institut für Maschinenwesen
Robert-Koch-Straße 32
38678 Clausthal-Zellerfeld
Tel.: 05323/72-3506
Fax: 05323/72-3501
E-Mail: trenke@imw.tu-clausthal.de*