

Repro & Rapid

Rapid Shape Reproduction mit Computertomografie und RP-Verfahren ist realisierbar. Die Untersuchungen zu Genauigkeit und Wiederholbarkeit zeigen jedoch eine starke Abhängigkeit vom eingesetzten RP-Prozess.

➔ Reverse Engineering und additive Fertigungsverfahren setzt die Industrie zur schnellen Teileproduktion ein. Dabei werden beispielsweise Designmodelle aus handwerklicher Arbeit digitalisiert. Es ist aber bisher üblich, auf Basis der Messdaten eine aufwendige Flächenrückführung durch erfahrene Konstrukteure durchzuführen, bevor man Folgeverfahren verwenden kann. Diese Abläufe werden unter dem Oberbegriff »Reverse Engineering« geführt.

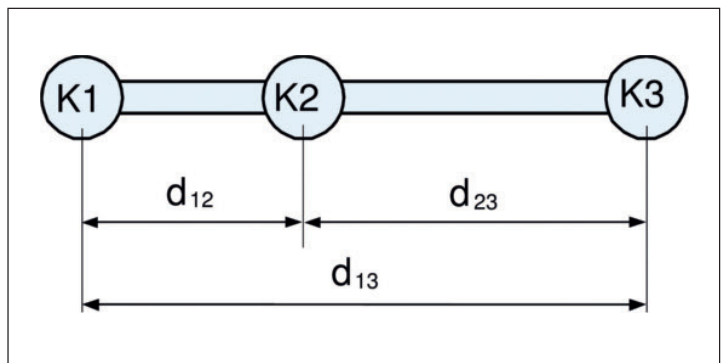
Additive Fertigungsverfahren erlauben die werkzeuglose Herstellung von komplexen Körpern auf Basis eines 3D-CAD-Datensatzes. Der Gedanke, diesen Datensatz nicht durch CAD-Arbeit, sondern direkt durch die Messung existierender Körper zu erzeugen, wurde bereits mehrfach publiziert [2, 3, 5]. Unter den Messverfahren eignen sich besonders jene, die zerstörungsfrei und vollständig die Geometrie eines Körpers aufnehmen können.

Besondere Anforderungen stellen jedoch innere Hohlräume oder Hinterschnitte, die weder für Tastsensoren noch mit einem optischen Verfahren zugänglich sind. Hier bietet sich die industrielle Computertomografie (CT) als Digitalisierungsverfahren an. Bereits Hoffmann [2] beschreibt die Reproduktion eines Zylinderkopfes über CT und Lasersintern.

In der industriellen Praxis wird die CT zur Detektion von Poren, Lunkern und Rissen in komplexen Bauteilen eingesetzt. Derzeit geht die Entwicklung der industriellen CT verstärkt in die Richtung des dimensionellen

Messens. Durch die hochgenaue Abtastung des Messobjektes mit der CT erhält man eine vollständige dreidimensionale Beschreibung des Messobjektes durch ein Volumenmodell. Aus diesem Volumenmodell ist über Triangulation ein Oberflächenmodell (Dreiecksnetz) generierbar. Wenn dieses Dreiecksnetz die »wasserdichte« Beschreibung eines Körpers darstellt, so lässt sich mit diesem Datensatz eine Reproduktion der Gestalt mit RP-Verfahren durchführen. Damit sind Körper reproduzierbar, für die mit konventionellen Fertigungsverfahren aufwendige Konstruktionsarbeiten und teure Werkzeuge notwendig wären.

Es fehlen jedoch Untersuchungen zur Genauigkeit und Reproduzierbarkeit dieses Wegs. Der Aufgabe, diese zu ermitteln, stellte sich ein Team aus dem Fraunhofer EZRT in Fürth und der Hochschule Hof.



Abstandsmaße am Kugelstab: Er ist zur Auswertung gut geeignet. Seine Kugelabstände und deren Werte sind laut CAD-Datei K1 zu K2: d₁₂ gleich 23,516 mm, K2 zu K3: d₂₃ gleich 46,813 mm und K1 zu K3: d₁₃ gleich 70,329 mm. Die Kugeldurchmesser betragen 5,000 mm.

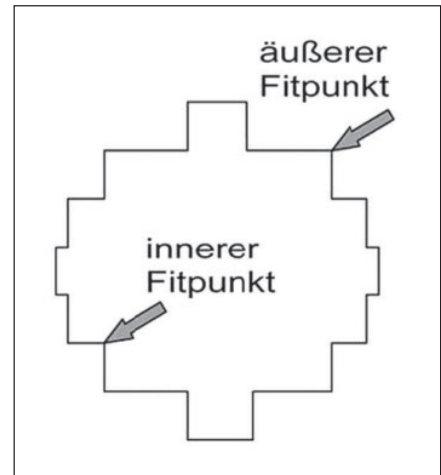


Computertomograf MSX CT500:
Dieser tätigt die Messungen für die beiden RP-Verfahren Selektives Lasersintern (SLS) und Multi-Jet-Modelling (MJM). Die Auswertung der Volumendaten erfolgt mit der Software VG Studio Max 2.1.

Die Ermittlung der Mess- und Fertigungsgenauigkeit geschieht anhand eines Kugelstabes. Zur ersten Untersuchung der Fertigungsunsicherheit des Reverse Engineerings wird ein Kugelstab als Prüfkörper eingesetzt. Der Kugelstab verfügt über drei gleich große Kugeln mit unterschiedlichen Abständen zueinander. Der Kugelstab ist zur Auswertung gut geeignet, da die Kugelmittelpunkte unabhängig von der Schwellwertfindung bei der Auswertung der CT-Volumendatensätze sind. Mit der Schwellwertfindung wird bei der CT die Trennung zwischen Hintergrund (Luft) und Material bezeichnet.

Je nach Schwellwert ist der gemessene Kugeldurchmesser kleiner beziehungsweise größer, jedoch sind die Mittelpunkte der Kugeln immer gleichbleibend. Dies führt zu einem relativ stabilen Ergebnis der Messungen. Bei allen Auswertungen der Messdaten werden die Durchmesser der Kugeln über eine Gaußkugel bestimmt.

Unter anderem wurden die RP-Verfahren ›Selektives Lasersintern‹ (SLS) mit dem Material PA2200 und ›Multi-Jet-Modelling‹ (MJM) mit dem lichthärtenden Modellharz SR200 auf jeweils geeigneten RP-Maschinen von EOS und 3D Systems untersucht. Die PA-Teile wurden am Bayerischen Laserzentrum in Erlangen, die Teile aus SR200 an der Hochschule Hof hergestellt.



Schematische Darstellung der Fitpunkte auf einer mit RP gefertigten Kugel:
Da die Fitpunkte zufällig verteilt an Innen- oder Außenkanten liegen, beeinflusst dies auch den errechneten Kugelmittelpunkt und erhöht die Messunsicherheit der SLS-Bauteile.

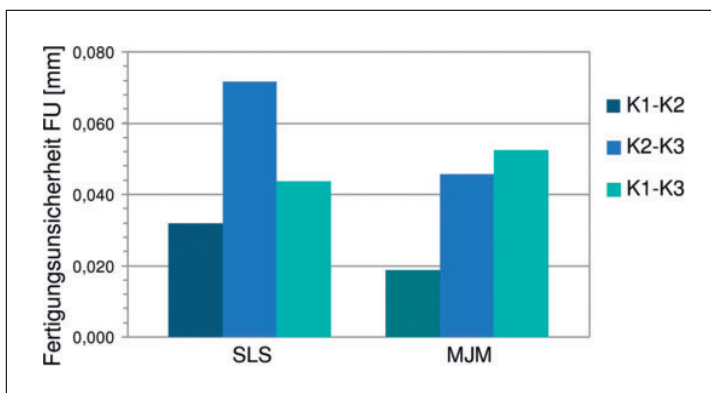
Unsicherheiten bei der CT-Messung. Diese ergaben sich bei den Kugelstäben. Um eine Abschätzung treffen zu können, wie präzise die CT messen kann, muss man zunächst die Messunsicherheit (MU) bestimmen. Dies wird gemäß GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) oder DIN 1319-3 mithilfe eines kalibrierten Werkstücks (kalibrierter Kugelstab) durchgeführt. Die Messunsicherheit der CT-Messung an MJM-Teilen ist mit

weniger als 0,063 mm deutlich geringer als an SLS-Teilen, wo sie in einem Bereich von etwa 0,050 mm (d_{12}) bis circa 0,190 mm (d_{13}) liegt.

Diese recht hohe Messunsicherheit an SLS-Teilen mit der CT überrascht zunächst. Eine genauere Betrachtung des Messablaufs, der in der Auswertesoftware mit Templates (Makroprogrammen) durchgeführt wurde, deckte den Einfluss der typischen Stufen der RP-Bauteile auf. Diese Stufen resultieren aus dem schichtweisen Fertigungsablauf.

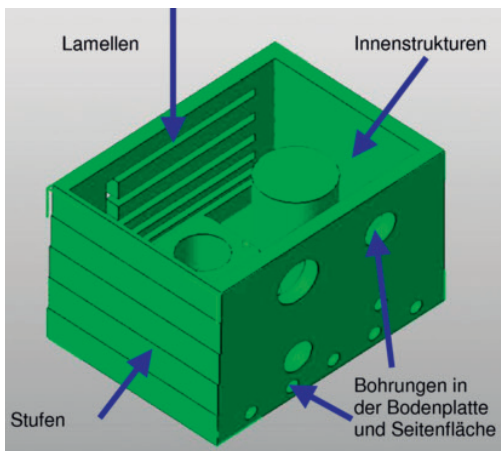
Trotz der Verwendung eines Auswerte-Templates kommt es zu voneinander abweichenden Fitpunkten an der Oberfläche der Teile, die man zur Bestimmung der Regelgeometrien anwendet. Werden die Fitpunkte in die inneren Stufenkanten gesetzt, hat dies einen kleineren Kugeldurchmesser zur Folge als bei Fitpunkten direkt an den äußeren Stufenkanten. Da die Fitpunkte zufällig verteilt an Innen-/Außenkanten liegen, beeinflusst dies auch den errechneten Kugelmittelpunkt und erhöht die Messunsicherheit der SLS-Bauteile. Das MJM-Verfahren erlaubt eine geringere Schichtdicke als SLS, damit ist die Auswirkung der Stufen vernachlässigbar.

Die Kleinserie aus je 20 Kugelstäben pro RP-Verfahren wurde mit einem Koordinatenmessgerät (KMG)

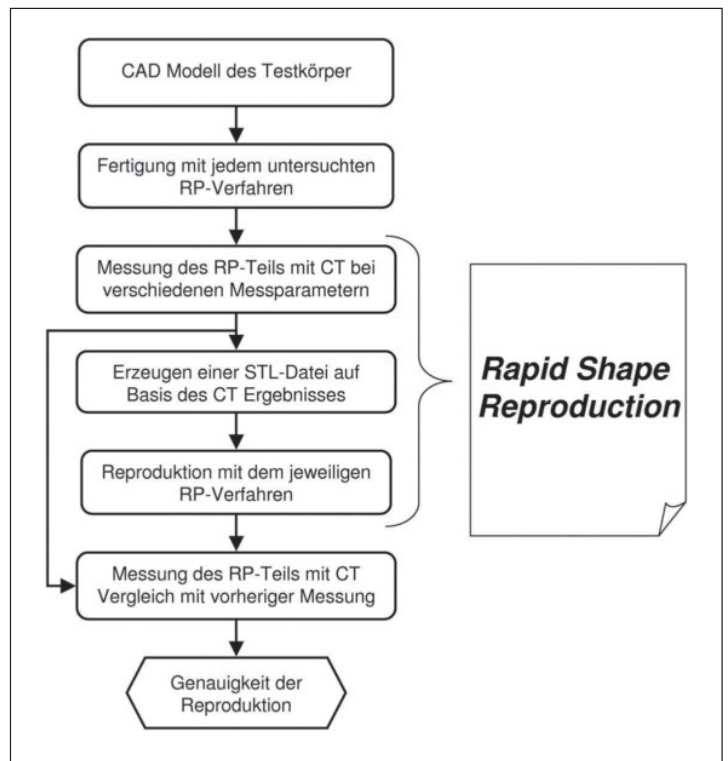


Fertigungsunsicherheit der RP-Verfahren SLS und MJM: Beim MJM ist ein Anstieg der Fertigungsunsicherheit, beim SLS-Verfahren hingegen die größte Abweichung am mittleren Kugelabstand erkennbar.

Bilder Fraunhofer EZRT



Testkörper als CAD-Modell mit Regelgeometrien: SLS und MJM erzeugten den Testkörper aus dem CAD-Datensatz. Das Baueergebnis wurde mit der CT digitalisiert und eine Kopie des Testkörpers angefertigt.



Verfahrensablauf der Rapid Shape Reproduction: Diverse Verfahrensschritte führen zum Ziel. Den Abschluss bildet die Kontrolle der Genauigkeit des reproduzierten Testkörpers mit dem CT.

KONTAKTINFO

Institute:

Fraunhofer EZRT

Tel. +49 911 58061-7560

www.iis.fraunhofer.de/abt/ezrt/

Hochschule Hof

Tel. +49 9281 409-4670

<http://herbert.reichel.hof-university.de>

Ausrüster:

Macro Science GmbH (Computertomograf)

heute: Microelectronic Vertriebs GmbH

Tel. +49 8722 9620-0

www.microtronic.de

Volume Graphics GmbH (Software)

Tel. +49 6221 73920-60

www.volumegraphics.com

3D Systems European Headquarters (MJM-

Maschine, MJM-Harz SR200)

Tel. +49 6151 357-0

www.3dsystems.com

EOS Electro Optical Systems (SLS-Maschine,

SLS-Material PA2200)

Tel. +49 89 89336-0

www.eos.info

tastend gemessen. Durch die beim KMG eingesetzten Kugeltastköpfe kommt es zu einer Glättung der Oberfläche, das heißt, es werden Merkmale, die kleiner sind als der Tastkugelradius (zum Beispiel Schichtstufen), nicht erfasst. Die Kugel des Tastkopfes hat einen Durchmesser von 1 mm, und die zu messende Kugel hat einen Durchmesser von 5 mm. Der Größenunterschied zwischen der messenden und den gemessenen Kugeln ist nicht optimal.

Das KMG dient zur Bestimmung der Fertigungsunsicherheit. Diese taktile Messtechnik ist im Gegensatz zur Messtechnik mittels CT etabliert und wird zum heutigen Stand der Technik als Standard bei Messaufgaben angesehen. Als weiterer Grund für den Einsatz des KMGs ist die bekannte Messunsicherheit ($< 0,001$ mm) anzusehen. Des Weiteren kann die Messunsicherheit der CT so aus dem Fertigungsprozess ausgeschlossen werden.

Beim MJM ist ein Anstieg der Fertigungsunsicherheit von zirka 0,019 bis 0,053 mm bei steigenden Kugelabständen erkennbar. Hintergrund ist ein systematischer Fehler (zum Beispiel Schwindung), der analysiert und behoben werden muss. Beim SLS-Verfahren hingegen ist die größte Abweichung am mittleren Kugelabstand erkennbar. Wie bereits beschrieben, kommt das Problem des Stufeneffektes beim Messen mit dem KMG zum Tragen. An der Kugel K2 gibt es noch die Problematik der taktilen Antastung, bei der aufgrund der geringeren Kugeloberfläche weniger Antastpunkte gesetzt werden können. Dadurch kommt es zu einem ungenaueren Messergebnis.

Für die weitere Untersuchung beim Gesamtprozess des Reverse Engineering wurde ein Testkörper entwickelt, der anspruchsvolle und charakteristische Merkmale für die CT- und die RP-Verfahren besitzt. Er soll die beiden eingesetzten Technologien an ihre Grenzen bringen beziehungsweise Schwachstellen aufzeigen. Dabei wurde ein Quader mit den Außenmaßen 55,1 mm x 41 mm x 40 mm (L x B x H) als Grundgeometrie gewählt und die verschiedenen Merkmale an diesem angebracht. Dieser Testkörper wurde mit den beiden RP-Verfahren aus dem CAD-Datensatz erzeugt. Das Baueergebnis wurde mit der CT digitalisiert und einer dimensionellen Messung unterworfen, auf deren Basis eine Anfertigung einer Kopie des Testkörpers erfolgte.

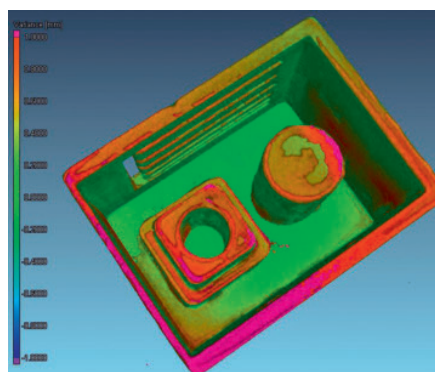
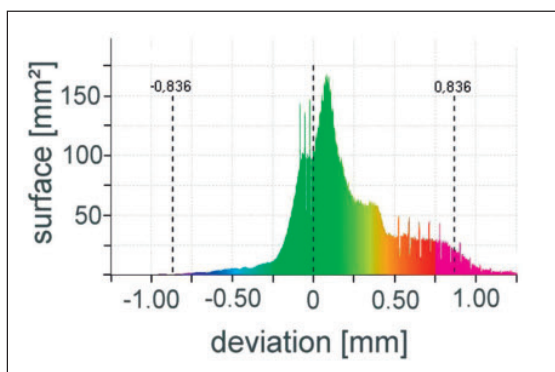
Durchführen der Rapid Shape Reproduction. Die Messungen des Testkörpers geschahen mithilfe des Computertomografen MSX CT500 von Macro Science. Bei diesen Messungen werden für die beiden unterschiedlichen Fertigungsprozesse die Aufnahmeparameter eingestellt und bei allen Messungen entsprechend konstant gehalten. Dabei wird der Testkörper geneigt auf dem Drehteller in der CT-Anlage positioniert, um die Durchstrahlungslängen und die Artefaktbildung zu minimieren. Die Auswertung der Volumendaten erfolgt mithilfe der Software VG Studio Max 2.1 von Volume Graphics. Es wird ein Template erstellt, um die Auswertungen der Messungen an den verschiedenen Bauteilen vergleichbar zu machen.

Das Generieren der triangulierten Oberfläche (STL-Datensatz) aus dem Volumendatensatz erfolgt wiederum in der Software VG Studio Max 2.1 mit dem Einstellparameter Super Precise. Dieser Parameter hat Einfluss auf die Genauigkeit (Dreieckszahl) der zu generierenden STL-Daten.

Die schnelle Bauteilreproduktion geschieht nun über folgende Stufen: Zuerst erfolgt die Herstellung des Testkörpers (Urmodell) an den RP-Anlagen, ausgehend vom erzeugten STL-Datensatz der CAD-Konstruktion. Dann werden bei der Rapid Shape Reproduction (RSR) drei Verfahrensschritte notwendig:

- Im ersten Schritt wird der gefertigte Testkörper mit der CT aufgenommen. Die dabei entstandenen Projektionen werden zu einem Voxelvolumen rekonstruiert.
- Der zweite Schritt erzeugt aus dem Voxelvolumen einen triangulierten STL-Datensatz des Testkörpers.
- Im dritten Schritt wird der STL-Datensatz aus der CT-Messung des Testkörpers als Grundlage zur Reproduktion mit dem jeweiligen RP-Verfahren verwendet. Dann erfolgt die wissenschaftliche Überprüfung und damit die Kontrolle der Genauigkeit. Hierbei wird der reproduzierte Testkörper mit der CT gemessen. Der Computertomograf verwendet die gleichen Aufnahmeparameter wie bereits beim ersten Schritt der Rapid Shape Reproduction. Dabei betrachtet man die beiden Fertigungsverfahren getrennt, untersucht jedoch mit den gleichen Auswertemerkmalen. Für die Auswertung der CT-Messungen am Voxelvolumen wird ein Template erstellt. Die gleichbleibenden Bedingungen sollen eine Vergleichsgrundlage der Ergebnisse schaffen. Durch die Falschfarbendarstellung des Soll-Ist-Vergleichs erhält man einen schnellen Überblick über die Gesamtheit der Abweichungen des Testkörpers. Dabei wird der CT-Datensatz des reproduzierten Testkörpers mit dem CT-Datensatz des Ausgangstestkörpers (Referenz) verglichen. Ein weiterer Vorteil der Falschfarbendarstellung ist die einfache Visualisierung von Verzügen am Bauteil.

Ergebnis der RSR mit SLS. Nach anschließender Messung mit dem CT wurden die erzeugten Voxelvolumen ausgewertet. Der Soll-Ist-Vergleich des Ausgangsdatensatzes des Testkörpers und der reproduzierten Aufnahme erzielt bestimmte Ergebnisse. Hierbei werden über die Falschfarbendarstellung des



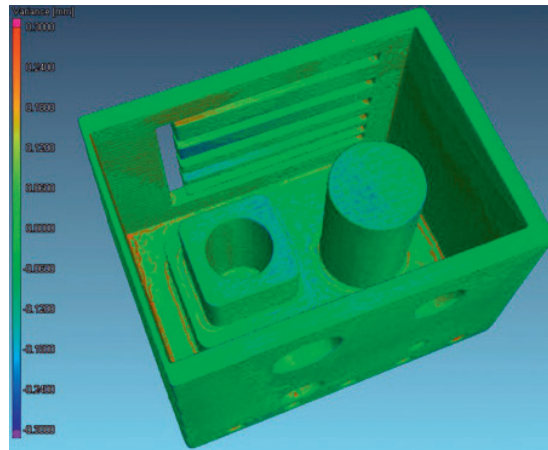
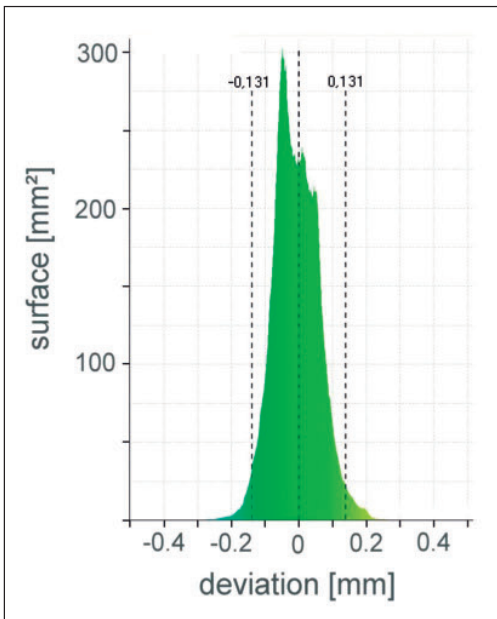
Ergebnis der Rapid Shape Reproduction mit SLS: Histogramm der Soll-Ist-Abweichungen am SLS-Testkörper (links); Falschfarbendarstellung des Soll-Ist-Vergleiches am Testkörper (rechts).

Soll-Ist-Vergleichs die Abweichungen zwischen beiden Voxelvolumen dargestellt. Als Referenz wird der Ausgangsdatensatz herangezogen und die Aufnahme des reproduzierten Testkörpers mit diesem verglichen. Dies schafft einen Überblick über die Abweichungen am gesamten Testkörper und stellt diese für eine Beurteilung besser dar. Die Verteilung der Abweichungen in der Falschfarbendarstellung ist im Histogramm unten dargestellt.

Nach den vorhergehenden Untersuchungen an den Kugelstäben ergab sich eine reine Fertigungsunsicherheit des SLS-Verfahrens von 0,08 mm. Als signifikanter

QUELLEN

- [1] Sackewitz, M. (Hg.): Leitfaden zur industriellen Röntgentechnik. In: Vision Leitfaden 11, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2010
- [2] Hoffmann, H.; Hanß, T.; Steinbeiß, H.: »Copy and Paste« mit Röntgenstrahlen und Laserlicht. In Gießereipraxis 11/2002, S. 394-395, 2002
- [3] Torres, A. M.; Christensen, A. M.; Masters, T. E.; Ketcham, R. A.: From CT scans of embedded Ivanovia to models using rapid prototyping. In Palaeontology, 46, 839-843, 2003
- [4] Muster, T.; Hannibal, W.: CAX-Methoden der Flächenrückführung. Fachhochschule Südwestfalen, Iserlohn 2007
- [5] Zhenkai Liua, Lihui Wang: Integrating cross-sectional imaging based reverse engineering with rapid prototyping. In Computers in Industry; Volume 57, Issue 2, 131-140, February 2006.



Ergebnis der Rapid Shape Reproduction mit MJM: Histogramm der Soll-Ist-Abweichungen am MJM-Testkörper (links); Falschfarbendarstellung des Soll-Ist-Vergleiches am Testkörper (rechts).

Wert für die Übereinstimmung zweier Datensätze kann das 0,95-Quantil des Soll-Ist-Vergleiches angesehen werden. Beim SLS-Verfahren ergibt sich hierfür ein Wert von 0,836 mm. Somit liegen 95 Prozent der Abweichungen in einem Intervall von $\pm 0,836$ mm um den Nullpunkt.

Des Weiteren kann man erkennen, dass die Abweichungen überwiegend im positiven Bereich auftreten. Folglich ist der reproduzierte Testkörper (Test) größer als der Ausgangstestkörper (Referenz). Die Abweichungen an den Geometrieelementen (Durchmesser und Abstände) des Testkörpers liegen bei etwa 1,0 mm und belegen, dass die komplexe Geometrie die erreichbare Genauigkeit beeinflusst. Durch den Aufschmelzprozess beim SLS können sich innere Spannungen ergeben, welche zu einem Verzug führen.

Ergebnis der RSR mit MJM. Im Prozess der Reproduktion des Testkörpers beim MJM-Verfahren an der Invision Si2 von 3D Systems wurden andere Ergebnisse erzielt. Im Gegensatz zu den SLS-Bauteilen liegen hier die Abweichungen an den Geometrieelementen des Testkörpers bei etwa 0,1 mm.

Dabei sind die Abweichungen, die größer als 0,1 mm sind, von Restbeständen des Supportmaterials und durch den Verzug der Lamellen verursacht worden. Die Einzelmaße am Testkörper zeigen, dass die Abweichungen zum Ausgangskörper maximal 0,1 mm betragen. Dies gilt für die Bestimmung der einzelnen Durchmesser und Abstände am Testkörper.

Für das 0,95-Quantil des Soll-Ist-Vergleiches am MJM-Testkörper ergibt sich ein Wert von 0,131 mm, der signifikant kleiner ist als der des SLS-Verfahrens. Im Gegensatz zum SLS-Testkörpers sind die Abweichungen


am MJM-Testkörper größtenteils symmetrisch verteilt. Somit besitzt der reproduzierte MJM-Testkörper (Test) annähernd die gleiche Größe wie der Ausgangstestkörper (Referenz). Nur lokale Schwindungen und Verzug führen zu einem leichten Ausschlag (Maximum) der Abweichungen im negativen Bereich des Histogrammes.

Beurteilung und Ausblick. Abschließend lassen sich zum Reverse-Engineering-Prozess bei der Reproduktion von RP-Bauteilen mit der CT diverse Aussagen treffen.

Es ist möglich, eine Reproduktion von bereits gefertigten Bauteilen durchzuführen. Die Genauigkeit, die man in diesem Prozess erreichen kann, hängt stark vom eingesetzten RP-Verfahren ab. Das Lasersintern ist durch die Körnung des Sintermaterials und die im Vergleich zum MJM-Verfahren größere Schichtstärke für hochpräzise Bauteile bedingt geeignet.

Auch der Einfluss der Qualität des durch Messung erzeugten Datensatzes ist erheblich. Homogene Materialien ergeben gute Datensätze. Materialien, die porös sind, verschlechtern die Qualität. Die CT ist inzwischen so präzise, dass bereits die geringe Porosität eines SLS-Bauteils hier Auswirkungen hat.

Der Vergleich der beiden Verfahren auf die Genauigkeit des reproduzierten Testkörpers zeigt, dass der MJM-Testkörper mit einer Genauigkeit an den Regelgeometrien von zirka 0,1 mm und der SLS-Testkörper mit 1,0 mm reproduzierbar ist.

Anhand der gewonnenen Ergebnisse, die man in dieser Untersuchung erzielt hat, kann die Rapid Shape Reproduction mit der Computertomografie und den additiven Fertigungstechnologien als zukunftsorientiert angesehen werden. Durch weitere Entwicklungen und Forschungen bei beiden Technologien lässt sich das Ergebnis bei der Reproduktion von Bauteilen und deren Güte steigern. Die erzielten Kenntnisse in dieser Arbeit können als Grundlage für weitere Forschungen im Bereich des Reverse Engineerings dienen. 

**Christoph Funk, Dipl.-Wirt.-Ing.; Fraunhofer EZRT
Sebastian Kraus, B. Eng.; Hochschule Hof
Herbert Reichel, Prof. Dr.-Ing.; Hochschule Hof**

Artikel unter RX110416