[FAHRZEUGBAU] [MEDIZINTECHNIK] [VERPACKUNG] [ELEKTRO&ELEKTRONIK] [BAU] [KONSUMGÜTER] [FREIZEIT&SPORT] [OPTIK]

# Additive Fertigung nach Maß

# Optimierte Prozessparameter und die Kompensation von Schwindungen führen zu maßhaltigeren FDM-Bauteilen

Additive Fertigungsverfahren können Kunststoffbauteile ohne formgebende Werkzeuge schichtweise herstellen und bieten damit eine Reihe von Vorteilen gegenüber etablierten Fertigungsverfahren. Die Maßhaltigkeit von additiv gefertigten Teilen ist dagegen geringer als bei konventionellen Verfahren. Am Direct Manufacturing Research Center (DMRC) der Universität Paderborn suchen Forscher nach Wegen, um die Maßhaltigkeit zu steigern.



Maßabweichungen bei additiv gefertigten Bauteilen können unterschiedliche Ursachen haben (© F.Knoop)

Additive Fertigungsverfahren generieren Kunststoff- oder Metallbauteile schichtweise direkt aus 3D-CAD-Daten, wobei der Schichtaufbau durch das iterative Aneinanderfügen von Schichten konstanter Dicke erfolgt [1, 2]. Die additiven Fertigungsverfahren unterscheiden sich durch das Prinzip der Schichtgenerierung [1]. Das in den hier beschriebenen Untersuchungen verwendete Fused Deposition Modeling (FDM) arbeitet nach dem Prinzip der Werkstoffextrusion (**Bild 1**) und zeichnet sich durch den Einsatz von anwendungsnahen Kunststoffen als Ausgangsmaterialien aus [2, 3]. Zur Untersu-

chung der Maßabweichungen am DMRC in Paderborn wurde das Material ABS-M30 verwendet, das zu ca. 70% aus Methylmethacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol (MABS) und zu ca. 30% aus Styrol-Acrylnitril-Copolymer (SAN) besteht – zusammen mit einem löslichen Stützmaterial (Typ: SR-30), das nach dem Bauprozess in einem Laugenbad aufgelöst werden kann [2, 3].

Das FDM-Verfahren wird außer zur Fertigung von Funktionsprototypen und Werkzeugen auch immer häufiger zur Produktion von Serienbauteilen eingesetzt, wobei mit Blick auf die mechanischen Eigenschaften, die Oberflächenqualität und die Maßhaltigkeit hohe Anforderungen gelten [1, 2, 5]. Die auftretenden Maßabweichungen sind bei additiv gefertigten Bauteilen größer als bei konventionell hergestellten Produkten [4, 6, 7]. Weiterhin sind bisher nicht alle Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf die geometrische Genauigkeit identifiziert und analysiert.

## Identifikation relevanter Einflussfaktoren

Um prozessbedingte Maßabweichungen zu ermitteln, geht es im ersten Schritt darum, die Einflussfaktoren auf die geometrische Genauigkeit zu identifizieren [4]. Im zweiten Schritt werden die relevantesten Einflussfaktoren ausgewählt und Schrittweiten für die Variation festgelegt [4]. Einige relevante Einflussfaktoren, z.B. der Material- oder Maschinentyp, die Lagerbedingungen oder die Nachbehandlung, bleiben in diesen Untersuchungen konstant.

Als relevanteste Einflussgrößen haben die Forscher die Maßgruppe, Bauteilkomplexität, Nennmaß, Ausrichtung und Platzierung auf der Bauplattform identifiziert. Zunächst werden nur Außenmaße an nicht-gekrümmten Elementen betrachtet und ein quaderförmiger Probekörper für die experimentellen Untersuchungen definiert. Dieser besitzt eine konstante Querschnittsfläche von 10 mm x 10 mm und die Nennlänge wird entsprechend der DIN EN ISO 286-1 und der DIN 16742 gewählt (**Bild 2**).

70

© Carl Hanser Verlag, München Kunststoffe 6/2018

Alle relevant definierten geometrischen Einflussfaktoren werden an diesem Probekörper untersucht. Dabei werden nur Maßabweichungen betrachtet, keine Form-, Lage- oder Oberflächenabweichungen. Als Maß ist der Abstand zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten definiert [8]. Dieses Maß wird mit Bügelmessschrauben an drei Stellen des Probekörpers aufgenommen:

- auf der sich einstellenden Bindenaht des Probekörpers,
- mittig auf der Messfläche und
- diagonal gegenüber dem ersten Messpunkt.

Die Probekörper werden auf einer FDM-Maschine (Typ: Fortus 400mc; Hersteller: Stratasys Ltd., Eden Prairie/USA) mit einem max. Bauvolumen von 406 mm x 355 mm x 406 mm (XYZ) gefertigt, bei der ein geschlossener und aktiv beheizter Bauraum für verbesserte Bauteileigenschaften sorgt. Dies entspricht dem aktuellen Industriestandard.

## Baujob mit knapp zwei Zehntelmillimeter Schichtdicke

Die Bauteile werden mit einer Schichtdicke von 0,1778 mm und den Standardprozessparametern der Aufbereitungssoftware Stratasys Insight 9.1 hergestellt. Daraus resultiert eine vollständige Bauteilfüllung mit einem um 90° alternierenden Rasterwinkel von 45° zur X-Achse. Die Proben werden mit der Nennlänge entlang der Bauraumachsen X, Y und Z ausgerichtet (**Bild 3**).

Um die Ergebnisse statistisch abzusichern, werden die Baujobs bis zu sechs Mal gefertigt, wobei für die Auswertung ein Mittelwert pro Nennmaß und Ausrichtung gebildet wird. Die auftretenden absoluten Maßabweichungen werden dann über die jeweilige Nennlänge für jede der drei Ausrichtungen aufgetragen (Bild 4).

Die Ergebnisse zeigen bei steigender Nennlänge eine Zunahme der Maßabweichung. Für die Ausrichtungen X und Z ergeben sich positive Maßabweichungen, die entlang der Y-Achse ausgerichteten Probekörper weisen bei Nennlängen über 80 mm dagegen negative Maßabweichungen auf. Die höchste gemessene Abweichung beträgt ca. 0,6 mm und tritt bei Probekörpern mit einem Nennmaß von 400 mm entlang der X-Achse auf. Der schwankende Verlauf der Maßabweichun-



Bild 1. Schematische Darstellung der verwendeten FDM-Anlage mit den wichtigsten technischen Komponenten (Quelle: F. Knoop)



Bild 2. Abgeleitet aus DIN EN ISO 286-1 bzw. DIN 16742 ergeben sich Nennlängen der Probekörper zwischen 3 und 400 mm in verschiedenen Abstufungen (Quelle: F. Knoop)

gen in Z-Richtung ist durch den schichtweisen Aufbau der Probekörper zu erklären, mit dem nur ganzzahlige Vielfache der Schichtdicke gefertigt werden können und sich ein systematischer Fehler einstellt.

Die unterschiedlichen Maßabweichungen in X- und Y-Richtung ergeben sich durch abweichende Konfiguration der Antriebsmotoren für den FDM-Kopf. Da die maximalen Bauraumausprägungen in X- und Y-Richtung ungleich sind, ergeben sich unterschiedlich lange Riemenführungen. Dies resultiert in einem differierenden Übersetzungsverhältnis, sodass jeder Motor anders konfiguriert ist, je nachdem wie groß die eingestellte Winkeldrehung pro Längeneinheit ist. Die Konfiguration der Winkelinkremente bzw. Schritte pro Inch (PPU = Parts Per Unit) kann im Servicemenü der Anlage für jeden Motor individuell angepasst werden. Auf diese Weise lassen sich die

gezeigten Verläufe der Maßabweichungen korrigieren.

#### Optimierung der Prozessparameter

Die Experimente zeigen, dass einige Prozessparameter großes Potenzial zur Verringerung der Maßabweichungen bieten. Über die Skalierungsfaktoren können die auftretenden Schwindungen in X-, Y- und Z-Ausrichtung ausgeglichen werden, indem diese individuell für jedes Bauteil in der Aufbereitungssoftware eingestellt werden. Der Schwindungsfaktor gibt die prozentuale Vergrößerung des Sollmaßes während des Bauprozesses an. Durch die Schwindung verkleinert sich das Bauteil nach der Abkühlung, wobei diese Änderung im Idealfall durch das vorherige Aufmaß der Schwindungsfaktoren ausgeglichen wird. Dieser Faktor ist jedoch unabhängig von der Geometrie und somit konstant. Die Kompensation kann »

© 2018 Carl Hanser Verlag, München www.kunststoffe.de/Kunststoffe-Archiv Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern

# **Die Autoren**

Frederick Knoop, M.Sc., ist seit 2014 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Kunststoffverarbeitung (KTP) und am Direct Manufacturing Research Center (DMRC) der Universität Paderborn tätig; frederick.knoop@dmrc.de

Tobias Lieneke, M.Sc., ist seit 2014 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik (KAt) und am DMRC der Universität Paderborn tätig; tobias.lieneke@dmrc.de **Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner** ist seit 2007 Leiter des Fachgebiets Kunststoffverarbeitung an der Universität Paderborn.

**Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer** leitet seit 2001 den Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik an der Universität Paderborn.

#### Dank

Das diesem Artikel zugrunde liegende Vorhaben wurde durch das Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MIWF NRW) und die Industriepartner des DMRC gefördert. Für die finanzielle und technische Unterstützung möchten die Autoren an dieser Stelle allen Beteiligten danken.

# Service

#### **Literatur & Digitalversion**

 Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/5770145 daher nicht für alle Nennlängenbereiche funktionieren und es entstehen Über- und Untermaße an den Probekörpern.

Zur Optimierung werden die gemessenen Abweichungen für die Berechnung von angepassten Schwindungsfaktoren verwendet. Dazu wird der prozentuale Unterschied zwischen Ist- und Sollmaß berechnet und das Ergebnis anschließend mit dem Ausgangsschwindungsfaktor verrechnet. Ein Übermaß an einem Bauteil verringert den Schwindungsfaktor, ein Untermaß erhöht ihn.

Wie das Ergebnis der Optimierung des Schwindungsfaktors belegt, können die absoluten Maßabweichungen an den betrachteten Probekörpern verringert werden (Bild4). Für die in X-Ausrichtung gefertigten Probekörper lassen sich geringe Abweichungen bis max. -0,2mm bei einer Nennlänge von 400mm feststellen. Die tendenziellen Abweichungen für die X- und Y-Ausrichtung verlaufen im Vergleich zum Ausgangszustand mit Standardparametern invers. Aus dem negativ verlaufenden Trend der Maßabweichungen wird durch die optimierten Schwindungsfaktoren ein leicht positiv ansteigender Trend. Die Maßabweichungen für stehend gefertigte Probekörper (Z) schwanken bis zu einer Nennlänge von 80mm relativ stark zwischen -0,09 mm und +0,17 mm, wobei mit zunehmender Nennlänge sehr geringe Maßabweichungen erzielt werden.

Im nächsten Schritt gilt es, die ermittelten Ergebnisse auf ein reales Bauteil zu übertragen, das deutlich komplexere Struk-



Bild 3. Die X- und Y-Proben werden flach liegend gefertigt, die Probekörper in Z-Richtung stehen senkrecht auf der Bauplattform (Quelle: F. Knoop)

turen aufweist als der verwendete Probekörper. Dadurch soll validiert werden, ob die ermittelten Maßabweichungen der Probekörper auch an geometrisch komplexeren Bauteilen gemessen werden können und eine Übertragbarkeit somit gewährleistet ist. Das dazu konstruierte Demonstratorbauteil orientiert sich an einer technischen Anwendung (Bilds) und ist im Rahmen eines Konstruktionswettbewerbs einer Onlineplattform am DMRC entwickelt worden.

### Wie gelingt die Übertragung auf reale Bauteile?

Das Bauteil beinhaltet zylindrische (z.B. Bohrungen) sowie lineare Elemente (z.B. Außen- und Innenmaße) zwischen 7 und 224 mm. Es wurde mit den genannten Prozess- und Schwindungsparametern aus ABS-M30 insgesamt drei Mal gefertigt



Bild 4. Resultierende absolute Maßabweichungen für Probekörper in den Ausrichtungen X, Y und Z in Abhängigkeit von der Nennlänge bei Verwendung von Standardparametern (links) und optimierten Schwindungsfaktoren (rechts) (Quelle: F. Knoop)

und anschließend mit einer Bügelmessschraube vermessen.

Anhand der Ergebnisse der Maßabweichungsuntersuchung (**Bild4**) erfolgte eine Regressionsanalyse. Die hieraus resultierenden Funktionen modellieren die Maßabweichungen in X, Y und Z-Richtung und werden im Folgenden zur Berechnung der Maßabweichungen für das dargestellte Demonstratorbauteil genutzt. Dies ist notwendig, da sich nicht alle Nennlängen eines realen Bauteils bei den Untersuchungen mit quaderförmigen Probekörpern wiederfinden.

Die Gegenüberstellung von berechneten und real gemessenen Maßabweichungen ermöglicht Aussagen über die Übertragbarkeit (Bild 6). Eine ideale Übereinstimmung würde vorliegen, wenn alle Datenpunkte auf der im 45°-Winkel angeordneten linearen Regressionsgeraden (gelbe Linie) liegen. Die Ergebnisse zeigen eine Regressionsgerade (grüne Linie) mit ähnlicher Steigung. Aufgrund der Tatsache, dass die Regressionsgerade partiell im Konfidenzintervall von ±15% (gestrichelte Linien) liegt, liefert die Näherung ein zufriedenstellendes Ergebnis. Die Auswertung zeigt weiterhin, dass die berechneten Regressionswerte im Mittel 0,05 mm zu groß sind.

## Ausblick

In weiteren Untersuchungen werden der Fokus auf eine Optimierung der Übereinstimmung mit der Regression gelegt und unterschiedliche Strukturen und variierende Volumina zwischen den Messflächen hinsichtlich der sich einstellenden Maßabweichungen analysiert. Weiterhin soll die Übertragbarkeit der ermittelten



Bild 5. Darstellung des Demonstratorbauteils "Payload Bracket" mit allen relevanten Bemaßungen für die experimentellen Untersuchungen: a) isometrische Ansicht; b) Vorderansicht; c) seitliche Ansicht (© E.Knoop)



Bild 6. Ergebnis der Übertragung zwischen berechneten und real gemessenen Maßabweichungen (Quelle: F. Knoop)

Messergebnisse bei der Verwendung von optimierten Prozessparametern näher untersucht werden, z.B. durch angepasste Schwindungsfaktoren. Ziel der Arbeiten ist eine verlässliche Vorhersage der resultierenden Maßabweichungen und im besten Falle eine Fertigung mit wesentlich geringeren Maßabweichungen.

© 2018 Carl Hanser Verlag, München www.kunststoffe.de/Kunststoffe-Archiv Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern