BETREUT VOM GEFÖRDERT VOM





Additive Fertigung, Werkzeugmaschinen

Hochproduktiver fertigungsangepasster 3D-Druck

M. Schilling, J. Bliedtner

Das FDM (Fused Deposition Modeling)-Verfahren ist aufgrund der Vielzahl von industriellen und privaten Anwendungen gegenwärtig das erfolgreichste 3D-Druck-Verfahren. Ziel des Forschungs- und Entwicklungsprojektes "HP3D" ist die effiziente Herstellung von großformatigen Bauteilen in einem echten 3D-Verfahren aus frei wählbaren thermoplastischen Kunststoffen. An die Umsetzung des Projekts wurde sehr komplex herangegangen, um zu garantieren, dass die mechanischen und dynamischen Eigenschaften der aufgebauten Teile den konzipierten Eigenschaften entsprechen.

Productive and manufacturing adjusted 3D printing

The FDM process is currently the most successful 3D printing process due to the multitude of industrial and private applications. The aim of the research and development project HP3D is the efficient production of large-format components in a real 3D process made of freely selectable thermoplastics. The implementation of the project has been very complex in order to ensure that the mechanical and dynamic properties of the assembled parts correspond to the designed properties.

Dr. Martin Schilling 3D-Schilling GmbH Mühlenweg 4, D-99706 Sondershausen Tel. +49 (0)3632 / 5227-30, Fax +49 (0)3632 / 5227-40 E-Mail: werkzeugbau@3d-schilling.de Internet: www.3d-schilling.de

Prof. Dr.-Ing. Jens Bliedtner Ernst-Abbe-Hochschule Jena - Fachbereich SciTec Carl-Zeiss-Promenade 2, D-07745 Jena Tel. +49 (0)3641 / 205-444, Fax +49 (0)3641 / 205-401 E-Mail: jens.bliedtner@eah-jena.de Internet: www.ag-bliedtner.de

Danksagung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt HP3D wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm "Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen" (Förderkennzeichen: 02P14A020 ff.) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

1 Einleitung

Der 3. Januar 1988 ist ein erwähnenswertes Datum in der Geschichte des 3D-Drucks: Die ersten drei Stereolithografiemaschinen [1] wurden ausgeliefert. Chuck Hull hatte es mit seinem Team von 3D Systems geschafft, dass 3D-Konstruktionsdaten automatisch in Maschinendaten umgesetzt sowie Stützkonstruktionen für die Bauteile automatisch generiert werden konnten und der Bauprozess von Körpern als eine Abfolge von Belichtung und neuer Benetzung der Oberfläche stattfand. Gegenüber herkömmlichen Technologien wie Schleifen, Fräsen oder Erodieren war jetzt jede Position - auch im Inneren des Körpers - gestaltbar; den Konstrukteuren eröffneten sich neue Gestaltungsmöglichkeiten. Geometriefreiheit und der hohe Grad der Automatisierung sind bis heute die Begeisterungsmerkmale dieser Technologie.

Möglich wurde die Entwicklung dadurch, weil ab Mitte der 1990er Jahre wichtige und notwendige Randbedingungen in einem ausreichenden Reifegrad gegeben waren: Die ersten 3D-CAD-Systeme hatten sich auf dem Markt etabliert und der Übergang von der 2D- zur 3D-Konstruktion war im vollen Gange. Besonders hilfreich war hierbei die Beschreibung der 3D-Oberflächen mittels STL (Standard Transformation Language)-Format. Als dieses Format im Sommer 1994 als ein Standard für ISO/ANSI [2] akzeptiert wurde, fanden die jahrelangen Forschungsarbeiten bei Hewlett-Packard von Bjarne Stroustrup, Alexander Stepanov und Meng Lee ihre Bestätigung. Wer das STL-Format initiiert hatte oder wessen grundlegende Idee es war, lässt sich nicht mehr belegen. Tatsache ist jedoch, dass das STL-Format bis heute ein Standard-Übergabeformat für die generativen Fertigungsverfahren ist und im ersten Schritt für Stereolithografie genutzt wurde. Auch am nachfolgend aufgelisteten Prinzip der Datenaufbereitung für generative Verfahren hat sich in den vergangenen Jahrzehnten wenig geändert:

- 3D-Beschreibung des Körpers,
- Transformation in das STL-Format,
- Erzeugen mathematischer Einzelschichten sowie
- Umsetzung der Schicht-Information in Maschinenparameter. Die grundlegende Herangehensweise für den 3D-Druck – das gezielte Erzeugen einer konturierten Schicht, welche mit der darüber und der darunter liegenden Schicht zu einem Körper verschmilzt - war gefunden. Die Entwicklung von Verfahren, mit denen diese Schichten aus einer Flüssigkeit (Stereolitho-

BMBF - Produktionsforschung



grafie), aus einem Pulver (Lasersintern), aus extrudierten Fäden (FDM) oder aus Papier beziehungsweise aus Folien hergestellt werden, war nur eine Frage der Zeit.

Die Vielzahl an Maschinen und Anlagen, an Materialien und an Anwendungen der Schichtbauverfahren ist kaum noch zu überschauen. Seit den 1990er Jahren listet der "Wohlers Report" [3] unablässig die Neuigkeiten des jeweiligen Jahres auf, beschäftigt sich mit neuen Maschinen und Verfahren, Verkaufszahlen, Markteinschätzungen und Trends. Oft wird eine Technologie hochgelobt, um dann langsam wieder vom Markt zu verschwinden. Allerdings hat jede neue Technologie das Potential, andere Denkweisen zu fördern sowie zu neuen Prozessabläufen und Maschinen anzuregen.

2 FDM-Verfahren

1988, im Jahr grundlegender Erfindungen für die Schichtbauverfahren, erfand S. Scott Crump [4] zusammen mit seiner Frau Lisa das "Fused Deposition Modeling" (FDM). Beim FDM-Verfahren werden thermoplastische Werkstoffe erhitzt und über eine feine Düse als Endlosfaden extrudiert. Der Kunststofffaden wird konturgerecht Schicht für Schicht aufeinandergelegt und schmilzt dabei auf die darunter liegende Struktur auf. Überhänge werden mit einer Stützkonstruktion aus einem anderen Material, das meist gut löslich ist, abgestützt. Mit dem Verfahren lassen sich unterschiedlichste thermoplastische Kunststoffe verarbeiten.

Geht es nach Anzahl der verkauften Maschinen ist FDM das bisher erfolgreichste Schichtbauverfahren. Es benötigt kein Kunststoffbad oder Pulverbett, kommt ohne Laser und Ablenkeinheiten aus und die Maschinen sind günstig sowie effizient herstellbar. Die FDM-Maschinen arbeiteten zunächst auf der Basis eines Filaments (Kunststofffaden oder -strang), das kontinuierlich der Extrusionseinheit zugeführt wird. Nach dem Auslaufen der grundlegenden Patente, begann für das Verfahren ein regelrechter "Boom". Es wurden massenweise günstige Geräte entwickelt, die auch für private Anwender erschwinglich sind. Durch geschickt verbreitete Visionen über die Herstellung und den Einsatz von 3D-Druck-Erzeugnissen im Privatbereich

wurden von der Allgemeinheit große Erwartungen in diese Technologie gesetzt.

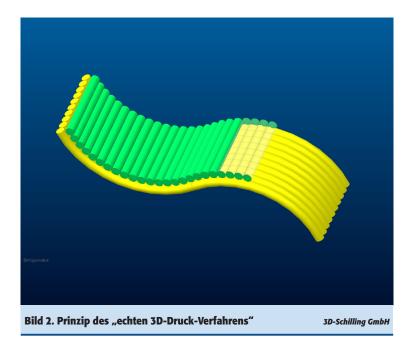
3 Vision: Hochproduktive additive Fertigung großformatiger Bauteile mit Standardmaterialien

Für eine Vielzahl von Anwendungen werden großformatige Bauteile benötigt. Eine formgebundene Herstellung mittels Spritzguss ist mit hohen Investitionskosten verbunden. Die subtraktive Herstellung großer Teile mittels Fräsbearbeitung kann bereits an der Verfügbarkeit entsprechender Halbzeuge scheitern. Die Größe der Bauteile, die im 3D-Druck hergestellt werden, wird durch die Abmessungen der jeweiligen Prozesskammern und von möglichen Bauzeiten begrenzt.

In den Jahren 2012 und 2013 entstand bei 3D-Schilling in Sondershausen die Idee, großformatige Bauteile im FDM-Verfahren mit Standardmaterialien des Spritzgusses zu fertigen. Auf welchen Überlegungen basiert diese Vision?

Das Verdrucken von Standardmaterialien hat zum einen preisliche Vorteile: Diese Materialien kosten aufgrund ihrer massenhafte Herstellung nur einen Bruchteil im Vergleich zu den FDM-üblichen Filamenten. Hinzu kommt, dass Standardmaterialien häufig für bestimmte Einsatzzwecke zertifiziert sind (Spielzeuge, Medizintechnik etc.) oder dass sie bereits diversen spezifischen Vorschriften wie UL-Zulassungen genügen. Die Verarbeitung der Materialien muss mit einem Granulatextruder erfolgen, damit Zertifikate und Zulassungen für die 3D-Druck-Teile erhalten bleiben (**Bild 1**).

Die wahlfreie Verarbeitung thermoplastischer Materialien sowie die Kombination verschiedener Materialien innerhalb eines Baujobs machen neue und innovative Lösungen möglich. Bei fast allen "3D-Druck-Anwendungen" kommt gegenwärtig eher ein 2,5D-Verfahren zum Einsatz: Ausgehend von einer Grundebene werden die Teile Schicht um Schicht erzeugt, wobei die einzelnen Schichten parallel zur Ausgangsebene sind. Ein entstehendes Kunststoffbauteil ist zumeist anisotrop. Die mechanischen Eigenschaften in Aufbaurichtung unterscheiden sich von den Eigenschaften, die in der Auftragsebene gemessen werden. Unter einem "echten 3D-Verfahren" wird allerdings ein



Prozess verstanden, bei dem die erzeugte Schicht der im 3D-Raum liegenden Fläche des CAD-Modells oder ihrem Offset entspricht. Damit wird das "Konzept der parallelen Ebenen" verlassen. Analog dem 3D-Fräsen wird die Relativbewegung "Bauteil - Extruder" im Raum vollzogen (Bild 2).

Die Vision wurde in der Folgezeit mehr und mehr konkretisiert und mündete in einem aktuellen Forschungsprojekt. Die Entwicklung einer "Hochproduktiven Anlage zur additiven Herstellung von Teilen aus beliebigen thermoplastischen Kunststoffen mit hoher Effizienz" ist ein Kern des Verbundprojekts "HP3D", das im Rahmen der BMBF-Initiative "Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte - intelligent einfach und effizient" gefördert wird [5].

Im Verbundprojekt "HP3D" haben sich sechs Unternehmen und drei Forschungseinrichtungen zusammengeschlossen, um interdisziplinär das vorstehend beschriebene, visionäre Verfahren in einer serientauglichen Produktionsanlage umzusetzen. Im Projekt kooperieren die 3D Schilling GmbH, die Glamaco Engineering GmbH, die Granula Deutschland GmbH, die Mebitec Meerbuscher Informationstechnik GmbH, die Optris GmbH, die Technische Universität Ilmenau, das Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF sowie die Ernst-Abbe-Hochschule Jena.

4 Granulatextruder und echtes 3D-Verfahren

In einer ersten Anlage wurde das Prinzip "Extruder - Knickarmroboter" getestet und erste Teile wie Gefäße, Bälle oder Leuchtenkörper ließen sich herstellen. Es wurden gängige Standardgranulate wie PS, ABS, PP, PC und TPE verarbeitet sowie 2K-Teile (ABS-TPE) gefertigt. Die Materialextrusion erfolgte kontinuierlich, der Farbwechsel wurde von Hand vollzogen

Mit dem ersten 3D-Druck-Granulatextruder konnten bis zu 0,8 kg PS pro Stunde extrudiert werden. Im Ergebnis einer Vielzahl von Versuchen entstand das Konzept eines modular aufgebauten Extruders. Auf Basis dieses Konzeptes ist es möglich, je nach Einsatzfall den Extruder hinsichtlich seiner Leistung auszulegen und weitere Komponenten etwa für die Prozesssteuerung im und am Extruder zu integrieren. Das Konzept

gestattet es, dass der Extruder durch den Roboter geführt oder dass er als feststehende Einheit verbaut wird. In einem zweiten Anlagenkonzept wurde der Extruder als feststehende Einheit konzipiert; die Bauplattform (beziehungsweise das Werkstück) wird unterhalb des Extruders bewegt. Hierbei lassen sich beliebig viele Extruder in einen Bauprozess einbinden (Bild 4).

Ziel ist es, Bauteile herzustellen, deren statische und dynamische Eigenschaften garantiert sind und über die Lebensdauer



Bild 3. Erste im Projekt "HP3D" entwickelte Extruderanlage mit einem Knickarmroboter während der Produktion

3D-Schilling GmbH

BMBF - Produktionsforschung



Bild 4. Überprüfung einer Extruderbaugruppe

3D-Schilling GmbH

des Produktes erhalten bleiben. Das bedeutet zunächst eine Schwindungs- und Verzugssimulation, das Messen von Prozessparametern und letztlich die Entwicklung einer intelligenten Prozesssteuerung. Störgrößen aus dem Herstellungsprozess (wie Eigenspannungen im Bauteil, Rissbildung, Verzug, Fehlstellen oder Inhomogenitäten im Material) sollen reduziert und möglichst vermieden werden.

Eine wesentliche Rolle bei der Reduzierung der Störgrößen spielt das "echte 3D-Verfahren". Mit diesem Verfahren können Anisotropien verringert, aber auch gezielt verstärkt werden. Der Winkel unter denen die Bahnen einer Schicht zu den Bahnen der nächsten Schicht verlaufen, muss dem Kraft- und Momentfluss aus Herstellungsprozess (Schwindung) und späterer Bauteilbelastung entsprechen. Dazu ist eine spezielle 3D-Bahnplanung angedacht, die auf dem Schalenmodell basiert. Für die Bahnplanung, den Support und das Bauteil wird im Projekt eine spezielle Software entwickelt.

5 Anlagengestaltung

Die Variationsmöglichkeiten der Anlage mit mehreren Extrudern und zwei kollaborierenden Robotern sind sehr vielfältig. Neben der seriellen Verarbeitung unterschiedlicher Thermoplaste können Strangdurchmesser sowie Schichtdicken und -breiten gezielt im Teileaufbau genutzt werden. Ein zweiter Roboter ermöglicht es, Inserts mit einzudrucken.

Bezüglich der Anlagenausgestaltung haben sich die Partner bereits festgelegt: Bis zum Projektende entsteht eine Demonstratoranlage mit drei Extrudern, mit der es möglich ist, Teile von 1 m x 1 m x 1 m und einer Masse bis zu 25 kg zu fertigen. Für den Nachweis der Funktionstüchtigkeit wurde ein nichttriviales Bauteil gewählt, von dem es gilt, statische sowie dynamische Eigenschaften zu garantieren und bestimmt Oberflächenanforderungen zu erfüllen.

6 Ausblicke

Der 3D-Druck für großformatige Bauteile steht am Beginn seiner Entwicklung. Mit der Demonstratoranlage wird bereits eine Reihe von Problemen gelöst sowie die Tür zu neuen Möglichkeiten geöffnet. Es ist durchaus vorstellbar, dass Anlagen für bestimmte Produktgruppen entwickelt werden oder der 3D-Druck in Fertigungslinien integriert wird. Die Kombination des 3D-Drucks mit seiner Geometriefreiheit und die Präzision der subtraktiven Fertigung wird es möglich machen, neue Anwendungsfelder zu erschließen. Mit dem Konzept der kollaborierenden Roboter ist bereits jetzt das Einbringen von Inserts in 3D-gedruckte Teile möglich. Es ist denkbar, dass präzise Spritzgussteile als Inserts dort in großformatige 3D-Drucke integriert werden, wo eine hohe Genauigkeit im Kunststoff gefragt ist.

Literatur

[1] Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren. 4. Auflage. München: Carl-Hanser-Verlag 2013, S. 119

[2] N. N.: Beschreibung des Formats Standard Template Library (STL). Internet: https://de.wikipedia.org/wiki/Standard_Template_Library. Wikipedia. Zuletzt aufgerufen am 30.05.2017

[3] N. N.: Wohlers Report 2015 – Anual Wordwide Progress Report. Wohlers Associates, Inc., Fort Collins, Colorado, USA. Zuletzt aufgerufen am 30.05.2017

[4] N. N.: Beschreibung von S. Scott Crump. Internet: https://en.wikipedia.org/wiki/S._Scott_Crump. Wikipedia. Zuletzt aufgerufen am 30.05.2017

[5] Schilling, M.; Möhwald; M.; Bliedtner, J.; Bergmann J.-P.: Mannshoch 3D-gedruckt. Plastverarbeiter (2016) Ausgabe Mai