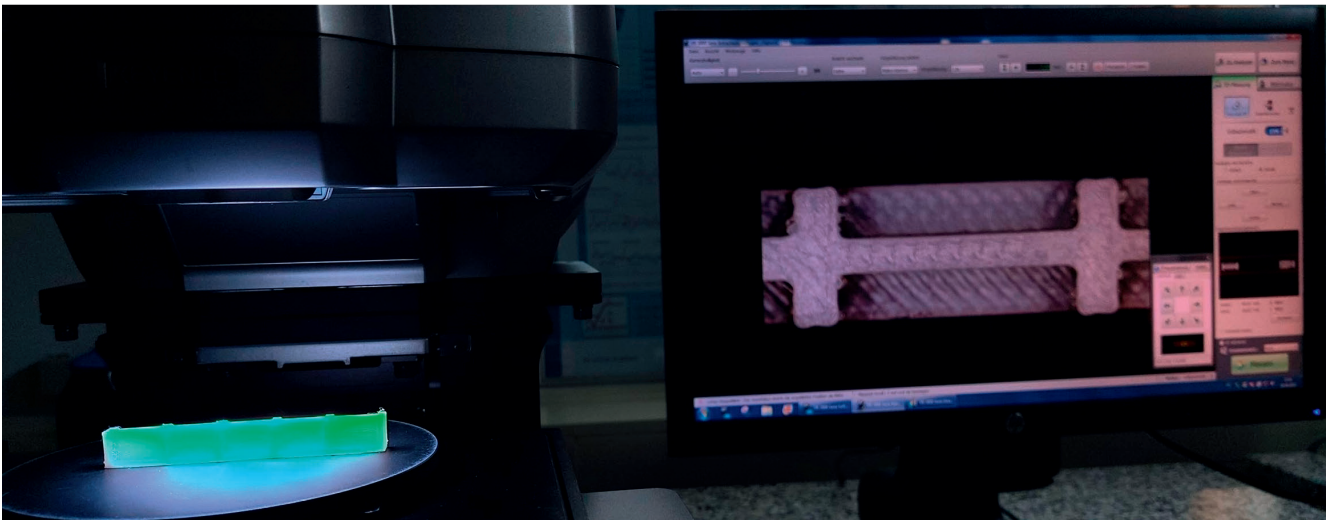


TPU-Filament im 3D-Druck richtig verarbeiten

Mit Gestaltungsrichtlinien zum Erfolg

Thermoplastische Polyurethane stellen neue Herausforderungen an die Bauteilgestaltung und Prozessführung im 3D-Druck. Die bisherigen Gestaltungsrichtlinien für Standardmaterialien sind zudem nicht ohne Weiteres übertragbar. Eine Lösung versprechen materialspezifische Vorschriften, mit denen sich Iterationen bis hin zum finalen Bauteil reduzieren lassen.



Auswertung der Probekörper zur Definition der geometrischen Limitationen bei der Verarbeitung von TPU im FFF-Verfahren. © KTP

Das Fused Filament Fabrication (FFF) Verfahren stellt das am weitesten verbreitete Additive Fertigungsverfahren dar [1]. Es zeichnet sich insbesondere durch die große Materialvielfalt aus. Hierbei haben sich in den vergangenen Jahren die Anforderungen und Nachfrage auf dem Markt der Additiven Fertigungsverfahren erhöht. Das Resultat ist eine fortlaufende Entwicklung neuer, auf die Verfahren spezifisch adaptierter, Materialien.

Dabei sind unter anderem thermoplastische Elastomere (TPE) wie thermoplastische Polyurethane (TPU) zu nennen. Diese Kunststoffe zeichnen sich durch ihre hohe Flexibilität und Verschleißfestigkeit aus [2]. Das weich-elastische Verhalten führt jedoch aufgrund der Streckung und Stauchung des Filaments über den Weg von der Spule bis zur Düse zu einem verzögerten Materialausstrag. Zudem begünstigt die vergleichsweise geringe Steifigkeit des TPU das für FFF-Verfahren charakteristische Oszillieren von Bauteilen mit zunehmender

Bauhöhe, welches durch die Verfahrensbewegung der Düse sowie der Bauplattform hervorgerufen wird.

Aus den beiden angeführten Aspekten resultiert eine reduzierte Positioniergenauigkeit der abgelegten Stränge. Prozessschwankungen und geometrische Abweichungen sind die Folge. Zur Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile sind diese Limitationen zu berücksichtigen, um die gestellten Anforderungen erfüllen zu können, zum Beispiel in Form von sogenannten Gestaltungsrichtlinien. Diese beschreiben die gestalterischen Freiheiten und Limitationen eines Verarbeitungsprozesses unter Berücksichtigung des spezifischen Wirkprinzips.

Warum Gestaltungsrichtlinien?

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen die Herstellung individualisierter und komplexer Strukturen. Durch den charakteristischen Schichtaufbau ergibt sich eine im Vergleich zu konventionel-

len Fertigungsverfahren hohe Gestaltungsfreiheit bei der Konstruktion [3]. Diese Freiheit unterliegt jedoch Limitationen in Abhängigkeit vom spezifischen Verfahren, der Maschine, dem Material sowie den Prozessparametern [4].

Das heißt, es sind auch bei den Additiven Fertigungsverfahren Gestaltungsregeln zu beachten. Bezogen auf das FFF-Verfahren sind diese hauptsächlich



Bild 1. Verwendeter FFF-Drucker von German RepRap für die Probekörperherstellung. © KTP

auf wenige, sehr verbreitete Materialien wie Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS) oder Polyetherimid (PEI) fokussiert [5]. Weiche Materialien, zum Beispiel TPU, finden dabei bisher kaum Beachtung. Aufgrund der bereits angeführten Materialcharakteristika bergen sie Besonderheiten bei der Verarbeitung und somit auch für die Konstruktion.

Relevante Limitationen im FFF-Verfahren

Allgemein lassen sich die verschiedenen geometrischen Limitationen der Fertigungsverfahren anhand von Standardelementen und einer Vielzahl an Elementattributen (zum Beispiel Breite, Radius, Orientierung) beschreiben [5]. Je nach Fertigungsverfahren ergeben sich daraus besonders relevante Standardelemente, welche für die Bauteilgestaltung unerlässlich sind. Für das FFF-Verfahren sind insbesondere die nachfolgenden Limitationen relevant:

- minimale Wanddicke
- minimaler Überhangwinkel ohne Stützstrukturen
- maximaler Innenradius ohne Stützstrukturen
- minimaler Außendurchmesser
- minimales Breite-zu-Höhe-Verhältnis (B/H-Verhältnis)

An der Kunststofftechnik Paderborn wurde in Kooperation mit dem Direct Manufacturing Research Center (DMRC) die Verarbeitung eines TPU (Typ: Ultrafuse TPU 85A, Hersteller: BASF 3D Printing Solutions GmbH) mit dem FFF-Verfahren hinsichtlich der bestehenden geometrischen Limitationen untersucht. Dazu ist das Kunststofffilament auf einem German RepRap x500 verarbeitet worden (Bild 1). Die hierfür definierten Prozessparameter sind in Tabelle 1 aufgeführt, wobei die grundsätzlich vorteilhafte aktive Bauraumtemperierung auf Basis der Empfehlungen des Materialherstellers vernachlässigt wurde [6], [7]. Die Auswertung der einzelnen Probekörper erfolgte durch eine Sichtprüfung sowie eine nachgelagerte Bildauswertung mittels Makroskop (Typ: VR-3100, Hersteller: Keyence).

Einflussgrößen auf die Auswertung

In einem ersten Schritt galt es, die spezifischen Eigenschaften von TPU bei der

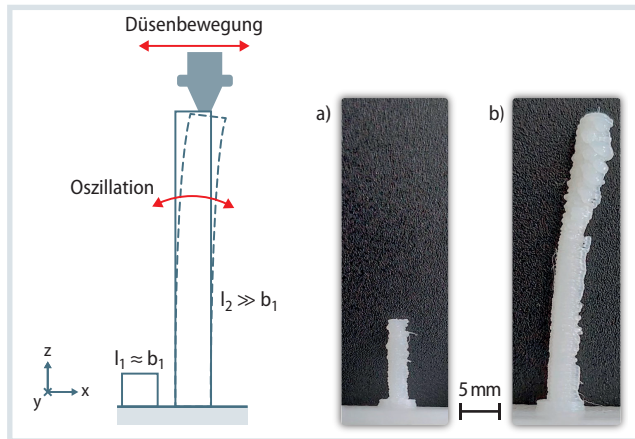


Bild 2. Schematische Darstellung der Oszillation bei der Verarbeitung von TPU zu sehen im Vergleich zwischen einer Bauhöhe von a) 10 mm und b) 30 mm.

Quelle: KTP; © Hanser

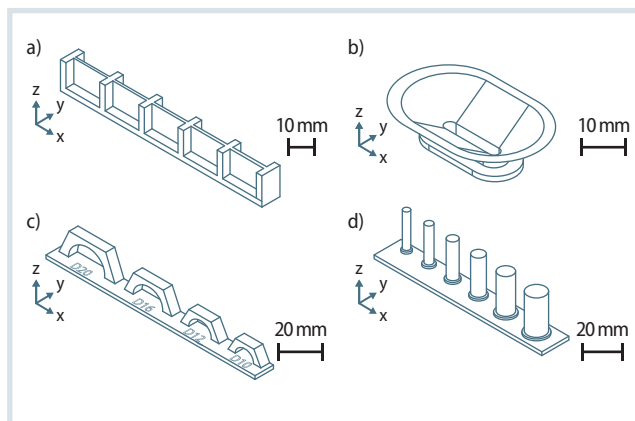


Bild 3. Probekörpergeometrien zur Ableitung der Gestaltungsrichtlinien für a) Wanddicke, b) Überhangwinkel, c) Innenradius und d) Außendurchmesser sowie das minimale B/H-Verhältnis.

Quelle: KTP; © Hanser

Verarbeitung im FFF-Verfahren anhand bestehender Geometrien zu erfassen. Dazu sind Geometrien in Anlehnung an die VDI 3405 3.2 sowie nach ADAM verwendet worden [5], [8].

Die Auswertung der gefertigten Geometrien hat gezeigt, dass das Materialverhalten des eingesetzten TPU-Typs unter Verwendung der gewählten Probekörper einen direkten Einfluss auf die Probekörperqualität und die resultierenden geometrischen Limitationen hat. Dabei ließen sich zwei wesentliche geometrische Einflussgrößen erfassen:

- Fläche der Schichten
- Breite-zu-Höhe-Verhältnis

Die bisher betrachteten Probekörper weisen vergleichsweise kleine, nicht zusammenhängende Flächen je Schicht auf. Das hat zur Folge, dass die Düse im Herstellungsprozess zwischen den einzelnen Flächen innerhalb einer Schicht verfahren muss. Aufgrund des bereits angeführten verzögerten Materialausstrags von TPU liegt somit eine unsaubere Strangablage sowie Bindenahtausbildung vor. Weiterführend ist das Breite-zu-Höhe-Verhältnis der Probekörper für die Verarbeitung von TPU als kritisch zu bewerten. Aufgrund des Materialverhaltens kann es hier zu einem Oszillieren der Probekörper kommen, wodurch »

Prozessparameter	Wert	Einheit
Düsendurchmesser	0,4	mm
Strangbreite	0,48	mm
Schichthöhe	0,2	mm
Düsentemperatur	230	°C
Druckbretttemperatur	40	°C
Druckgeschwindigkeit	30	mm/s
Strangablagestrategie	geradlinig	-
Füllanteil	100	%

Tabelle 1. Verwendete Prozessparameter für die Verarbeitung von TPU 85A Quelle: KTP

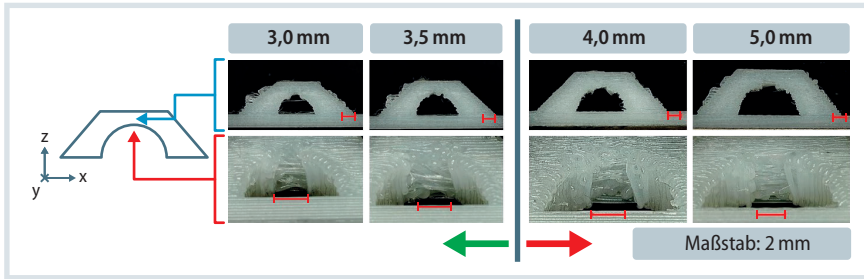


Bild 4. Auswertung des minimalen Innenradius ohne den Einsatz von Stützstrukturen.

Quelle: KTP; © Hanser

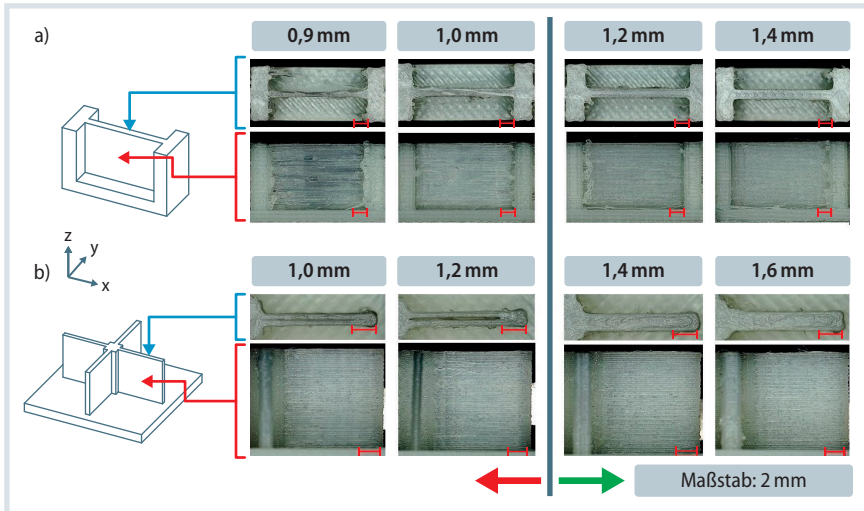


Bild 5. Auswertung der minimalen Wanddicke für eine a) zweiseitige und b) einseitige Anbindung der Prüffläche. Quelle: KTP; © Hanser

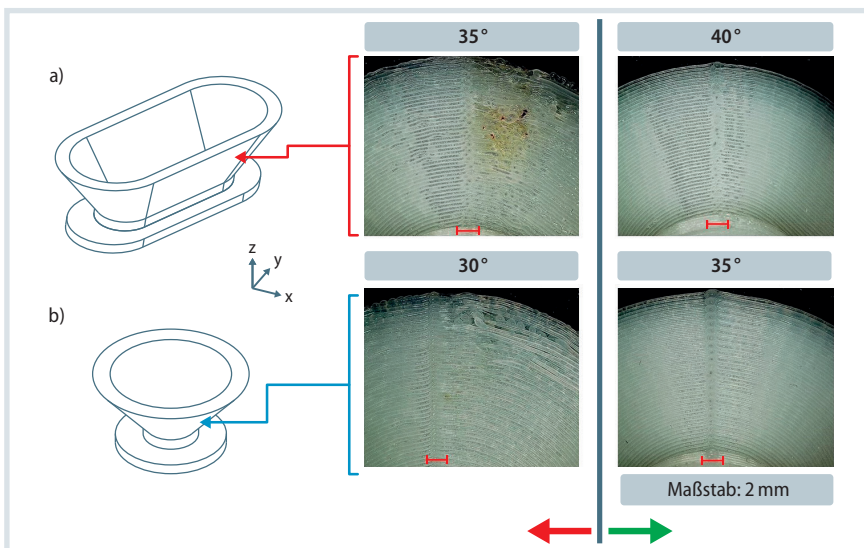


Bild 6. Auswertung des minimalen Überhangwinkels für eine a) gestreckte und b) rotations-symmetrische Geometrie. Quelle: KTP; © Hanser

ebenfalls die Genauigkeit der Strangablage reduziert ist (**Bild 2**).

Richtlinien für Ultrafuse TPU 85A

Basierend auf den angeführten Einflussgrößen auf die Auswertung wurde an

der Kunststofftechnik Paderborn in Zusammenarbeit mit dem DMRC eine materialspezifische Anpassung der Geometrien für die gewählten geometrischen Limitationen vorgenommen (**Bild 3**). Der Wesentliche Fokus lag dabei auf der Sicherstellung ausreichender

Wanddicken sowie einer geschlossenen Strangablage je Schicht. Ziel war es, das Oszillieren der Probekörper sowie die Anzahl an Verfahrbewegungen ohne Materialaustrag je Schicht zu minimieren. Dadurch ist eine ausschließliche Betrachtung der geometrischen Limitationen für das gewählte Material unter Berücksichtigung der Prozessparameter möglich. Die Auswertung der Probekörper bestätigt die Zielsetzung (**Bilder 4 bis 6**).

Die Erarbeitung der Gestaltungsrichtlinien basiert auf der Bewertung der einzelnen Probekörpergeometrien hinsichtlich der Bauteilqualität. Wichtige Kriterien zur Festlegung einer kritischen aus TPU gefertigten Geometrie sind dabei unter anderem:

- unvollständige Flächenfüllung
- Abrutschen beziehungsweise Herunterhängen der Konturstränge
- keine geschlossene Bindenaht
- geometrische Abweichungen

Trifft eines der aufgeführten Kriterien bei einem Probekörper zu, so ist er als Ausschuss zu bewerten. Als Gestaltungsrichtlinie für ein Geometrieelement ist somit die geometrische Größe zu definieren, bei welcher gerade so keine der Kriterien erfasst werden kann. Das Ableiten der Richtlinien erfolgt dementsprechend in einer iterativen Vorgehensweise. Die aus diesem Vorgehen erarbeiteten Ergebnisse sind in **Bild 7** aufgeführt.

Einfluss der Geometrie

Bei der Analyse der unterschiedlichen Geometrien ließ sich eine Abhängigkeit von der gewählten Geometrie auf die betrachtete Limitation feststellen – sowohl für die Bewertung der minimalen Wanddicke als auch für den minimalen Überhangwinkel. Bei der minimalen Wanddicke ist dabei ein Unterschied zwischen einer einseitigen und zweiseitigen Anbindung der relevanten Prüffläche ersichtlich (**Bild 5**). Für den minimalen Überhangwinkel ergibt sich für rotations-symmetrische Geometrien ein geringerer minimaler Winkel im Vergleich zu Geometrien ergänzt um lineare Bereiche (**Bild 6**). Zu begründen ist dies mit der gleichmäßigeren Verfahrbewegung der Düse sowie der gerichteten Schwindung zum Mittelpunkt der Geometrie.

In beiden Fällen handelt es sich nicht um eine rein materialspezifisches Problem. In Abhängigkeit von den verwen-


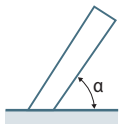
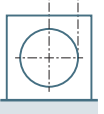

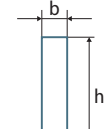
Limitation	Wanddicke	Überhangwinkel	Innenradius	Durchmesser	B/H-Verhältnis
					
Wert	$b \geq 1,2 \text{ mm}$	$\alpha \geq 35^\circ$	$r \leq 3,5 \text{ mm}$	$d \geq 3,0 \text{ mm}$	$b/h \geq 0,3$

Bild 7. Gestaltungsrichtlinien für die Verarbeitung von Ultrafuse TPU 85A im FFF-Verfahren.

Quelle: KTP; © Hanser

deten Prozessparametern und der Aufbereitungssoftware stellt sich eine Änderung der limitierenden Größe ein. Bei der Bewertung kritischer Geometrien ist diese Abhängigkeit zu berücksichtigen.

Fazit & Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass die Verarbeitung von TPU im FFF-Verfahren neue Herausforderungen an die Bauteilgestaltung stellt. So ergeben sich aufgrund des spezifischen Materialverhaltens geometrische Limitationen, welche bei der Konstruktion zu beachten sind. Durch die geeignete Wahl von Probekörpergeometrien können diese erfasst

und in Form von Gestaltungsrichtlinien berücksichtigt werden.

Um weiterführend die Güte der anhand von definierten Geometrien erarbeiteten Richtlinien zu validieren, sind nachfolgend weitere Untersuchungen an komplexeren Geometrien angestrebt. Dabei stehen insbesondere anwendungsbezogene Bauteile im Fokus.

Ebenfalls wird durch die Betrachtung weiterer geometrischer Limitationen eine Erweiterung der Gestaltungsrichtlinien erfolgen. Dadurch kann die Herstellbarkeit von komplexen Strukturen bereits während der Konstruktionsphase bewertet und die Geometrie entsprechend angepasst werden. ■

Info

Text

Christian Lennart Elsner arbeitet seit 2020 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Kunststofftechnik Paderborn (KTP) an der Universität Paderborn; christian.elsner@ktp.upb.de

Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer ist seit 2008 Inhaber des Lehrstuhls für Kunststofftechnologie und Leiter der Kunststofftechnik Paderborn (KTP) an der Universität Paderborn; elmar.moritzer@ktp.upb.de

Dank

Die vorgestellten Ergebnisse sind im Rahmen eines Industrieprojektes am Direct Manufacturing Research Center (DMRC) der Universität Paderborn generiert worden. Das DMRC dankt allen beteiligten Industriepartnern für die Unterstützung.

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter

www.kunststoffe.de/onlinearchiv

English Version

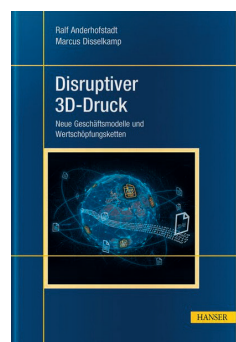
Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

Buchtip

Disruptiver 3D-Druck

Der 3D-Druck bricht mit vielen bestehenden Geschäftsmodellen. Einerseits bringt diese Entwicklung Geschäftsmodelle vieler Bestandsunternehmen aus ganz unterschiedlichen Branchen wie Logistik und Lagerwesen, Industrie, Dienstleistungen, Handel oder Service in Gefahr. Umgekehrt ergeben sich auch viele Chancen für moderne, existenzsichernde Geschäftsmodelle. In ihrem Buch „Disruptiver 3D-Druck: Neue Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsketten“ (erschienen im Hanser Verlag) vereinigen die Autoren Ralf Anderhofstadt und Marcus Disselkamp daher beide Seiten der additiven.

Hintergrund: Hersteller der verschiedensten Waren und Händler der unterschiedlichsten Branchen zeigen mehr und mehr Akzeptanz und Interesse am Potenzial der neuen Technologien. Das Umdenken führt zu einer Vielzahl von Innovationen. Sparsamere und umweltfreundlichere Produktionsprozesse sind eine Seite, Flexibilität in der Produktion und die Digitalisie-



Disruptiver 3D-Druck:
Neue Geschäftsmodelle
und Wertschöpfungsketten

© Hanser

rung der bestehenden Abläufe kommen hinzu. Klassische Fabriken, Maschinen und sogar Arbeitsplätze werden nicht mehr in uns bekannter Form und gewohntem Umfang benötigt. Die damit verbundene Dematerialisierung betrifft viele Bereiche, nicht nur die Produktion. Produkte werden „neu gedacht“; bestehende Funktionen mit neuen Angeboten kombiniert und daraus neue Geschäftsideen und Ertragsmöglichkeiten geschaffen.

Entsprechend zeigt dieses Fachbuch einer breiten Leserschicht nicht nur die Gefahren des disruptiven 3D-Drucks auf, sondern bietet Lösungsansätze und Vorgehensmodelle zur Identifikation neuer wirtschaftlicher Existenzgrundlagen und Wettbewerbsvorteile. Dank der Zusammenarbeit der beiden Autoren kann im Buch auf ein profundes Wissen

über bereits existierende Referenzen und Managementmodelle zurückgegriffen werden. Die verschiedenen Kapitel bieten einen umfassenden Überblick über additive Fertigungstechnologien und das gesamte Umfeld – mit zahlreichen Interviews und Praxisbeispielen.

www.hanser.de