

Haftungsrisiken im 3D-Druck

Untersuchung der Haftung von Kunststoffen auf Druckplattformen im Strangablegeprozess

Wie gut bei additiven Herstellungsverfahren das Material an der Druckplattform haftet, hat einen großen Einfluss auf die Qualität des entstehenden Bauteils. Um Kombinationen aus neuen Druckmaterialien und -plattformen unter Variation der Druckparameter in Strangablegeprozessen (FLM) auf ihre Haftung hin charakterisieren zu können, wurde neben der Anwendung von Oberflächencharakterisierungen eine mobile Prüfvorrichtung konstruiert.

Additive Fertigungsverfahren, die als Rapid-Prototyping-Prozesse seit nahezu 30 Jahren für die Musterteilherstellung genutzt werden, finden heute zunehmend Anwendung in der Serienfertigung von Metall- und Kunststoffbauteilen [1]. Dazu trägt auch der technische Fortschritt, insbesondere das Strangablegeverfahren (Fused Layer Modeling, FLM), bei, der mittlerweile eine Fertigung mit relativ hoher Präzision und guter Wiederholgenauigkeit ermöglicht.

Wegen der einfachen Verarbeitung und einer geringen Schwindung kommen bei Strangablegeverfahren vorwiegend amorphe Kunststoffe zum Einsatz [2]. Zur Ausweitung des Eigenschafts- und Anwendungsspektrums additiv gefertigter Teile wächst allerdings auch die Nachfrage nach teilkristallinen Kunststoffen wie Polyamiden und Hochleistungskunststoffen wie z.B. Polyetheretherketon (PEEK) stetig. Mittlerweile nehmen die Materialangebote von Filamentherstellern, aber auch Drittanbietern sowie Eigenentwicklungen stetig zu und bieten neue Möglichkeiten für die Herstellung funktioneller Bauteile.

Mit zunehmendem Materialangebot steigen die Anforderungen an die eingesetzten Bauplattformen für die Druckprozesse. Die erste ausgetragene Schicht des Bauteils ist ausschlaggebend für eine gute Haftung, um das Bauteil trotz angreifender Kräfte im Druckprozess, wie bspw. Scherkräfte beim Ablegen der Schmelze und Beschleunigungen bei bewegter Bauplattform, sicher zu fixieren. Gleichzeitig soll sich das Formteil nach Fertigstellung ohne Beschädigungen möglichst

einfach von der Druckunterlage entfernen lassen.

Diese Anforderungen stehen prinzipiell im Widerspruch zueinander. Daher bedarf es einer Feinabstimmung zwischen Druckplattform und Druckmaterial sowie geeigneter Prozessparameter. Die Auswahl der Plattform- bzw. des Filamentmaterials erfolgt aktuell meist nach dem „Trial and Error“-Prinzip und beruht auf firmeninternem Know-how sowie Erfahrungen aus dem Hobbydruckbereich.

Der mobile Prüfstand

Wissenschaftliche Methoden sind notwendig, um systematisch geeignete Kombinationen aus Druckplattform und

Druckmaterial zu finden sowie Dauergebrauchseigenschaften und den Verschleiß einer Bauplatte zu ermitteln. Am SKZ wurde im Rahmen eines öffentlich geförderten Forschungsprojekts ein mobiler Prüfstand konstruiert, um ein umfangreiches Verständnis über die Haftung der Materialien auf den Druckplattformen bei Strangablegeverfahren zu erarbeiten. Zudem soll damit ermöglicht werden, die Haftung von Kombinationen aus Druckfilament, Druckplattform und Parametrierung an kleinen Prüfkörpern zu untersuchen, zu optimieren und anschließend die Erkenntnisse auf Druckjobs mit großen Bauteilen zu übertragen.

Bei der mobilen Abzugsvorrichtung handelt es sich um einen Zugkraftaufneh-

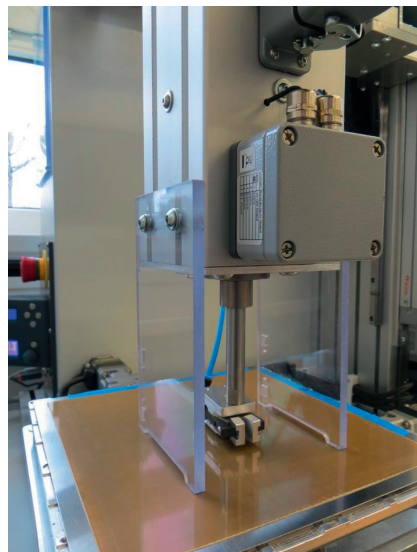


Bild 1. Die mobile Abzugsvorrichtung zieht mithilfe einer Pneumatikzange Material von der Bauplattform ab (© SKZ)

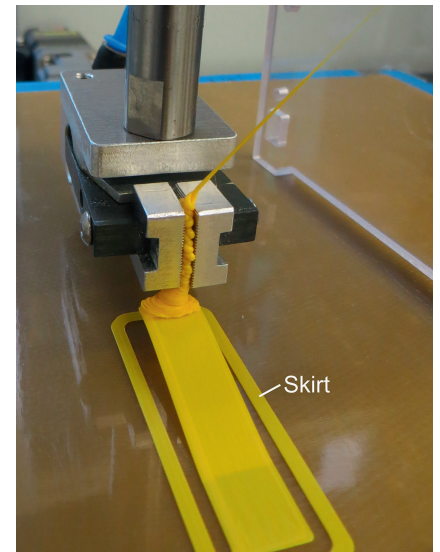


Bild 2. Abzugsversuch: Abzugsprobekörper mit den zur Stabilisierung des Filamentaustrags dienenden Außenbahnen (Skirt) (© SKZ)

Druckplattform	Hersteller	Material	Bezeichnung
EZ-STIK Hot	GeckoTek	-	GeckoTek
Glas	FilaFarm	Borosilikat-Glas	Glas
Harzplatte FilaPrint	FilaFarm	-	Harzplatte
PEI	Lulzbot	Polyetherimid	PEI
Kaptonband	3M	Polyimid	PI

Druckmaterial (Filament)	Hersteller	Druckplattentemperatur [°C]	Verarbeitungsfenster [°C]
PLA	Gehr	50	195–230
TPU	Extrudr	55	190–230
PET-G	Form Futura	78	215–250
ABS	Herz	110	240–250

Tabelle 1. Verwendete Druckplattformen (soweit bekannt mit Angabe des Materials; dazu die im weiteren Verlauf verwendeten Bezeichnungen) und verwendete Druckmaterialien (Quelle: SKZ)

mer, der die Kraft in Abhängigkeit des senkrechten Verfahrensweges ermittelt (Bild 1). Die Abzugsvorrichtung ist auf Bauplattformen verschiedener FLM-Drucker aufsetzbar, solange ausreichend Platz vorhanden ist.

Prüfen der Haftung

Der gedruckte Probekörper wird über eine Pneumatikzange gespannt und von der Bauplattform abgezogen. Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgt digital. Für die Abzugsversuche kam ein Triple F Solid (Eigenbau des SKZ) mit einer 0,8-mm-Düse zum Einsatz. Standardmäßig wurden Filamente mit einer Geschwindigkeit von 30 mm/s bei 0,2 mm Schichtdicke auf beheizte Druckplattformen abgelegt und nachfolgend abgezogen. Einzelmaterialstränge waren im Abzugsversuch nicht ablösbar und sind an den Übergängen zwischen Druckplatte und senkrechtem Griffmaterial gebrochen.

In Vorversuchen wurde deswegen ein Abzugsprobekörper mit einer Fläche von 400 mm² exklusive Skirt (Außenbahnen, die den Filamentaustag stabilisieren sollen) [3] und senkrechtem Griffmaterial definiert (Bild 2). In Anlehnung an Peelkräfte von Verpackungen wie beispielsweise für Joghurtbecher wurden jeweils die maximale Abzugskraft sowie nachfolgend die Peelkraft ausgewertet [4]. Im Rahmen der Untersuchungen kamen fünf unterschiedliche Druckplattformen und vier Druckmaterialien zur Verwendung (Tabelle 1).

Es wurden jeweils fünf Drucke auf der gleichen Stelle der beheizten Bauplattform durchgeführt und nach dem jeweiligen Druck der Probekörper die Abzugsversuche mit verschiedenen Materialkombinationen auf den beheizten Plattformen unternommen. Dabei wurden die eingestellten Druckplattentemperaturen mittels Thermokamera überprüft. Dies diente zum einen der Überprüfung der eingestellten Temperaturen und zum anderen der Überprüfung der Homogenität der Temperaturverteilung auf den Oberflächen.

Wie sich zeigt, hängt die Haftung auf der Druckplatte stark von der Materialkombination ab (Bild 3). Auf der EZ-STIK-Hot-Druckplatte ist beispielsweise ein großer Unterschied zwischen den Filamenten aus ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer) und TPU (thermoplastische Elastomere auf Basis von Polyurethan) zu sehen. Die Glasplatte zeigt allgemein die geringste Haftung, mit der Ausnahme von PET-G (glykolmodifiziertes Polyethylenterephthalat). Um dieses Filament von der Glasplatte zu entfernen, ist die größte gemessene Kraft notwendig.

Beim Abziehen der PET-G-Probekörper von der Glasplatte waren nach dem Abzug Rückstände sichtbar (Bild 4 links). Es handelt sich um kleinere kornartige Rückstände, deren Ausrichtung parallel zu den gedruckten Bahnen verläuft. Dies deutet auf eine starke adhäsive Haftung zwischen den Materialien hin, die nicht mehr ausschließlich über physikalische und mechanische Adhäsion erklärt wer- »

Die Autoren

Irena Heuzeroth ist am Kunststoff-Zentrum SKZ in Würzburg als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich additive Fertigung tätig; i.heuzeroth@skz.de.

Georg Schwalme ist am SKZ als Bereichsleiter im Bereich Spritzgießen/additive Fertigung tätig.

Michael Heilig ist seit 2014 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Oberflächentechnik des SKZ tätig.

Dr. rer. nat. Benjamin Baudrit ist seit 2008 als Bereichsleiter der Gruppe Fügen und Oberflächentechnik sowie seit 2014 als Prokurist der SKZ KFE gGmbH in Würzburg tätig.

Dr. rer. nat. Thomas Hochrein ist seit 2017 als Geschäftsführer der SKZ KFE gGmbH tätig.

Dank

Das Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 19608N wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschung (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Service

Literatur & Digitalversion

- » Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2020-02

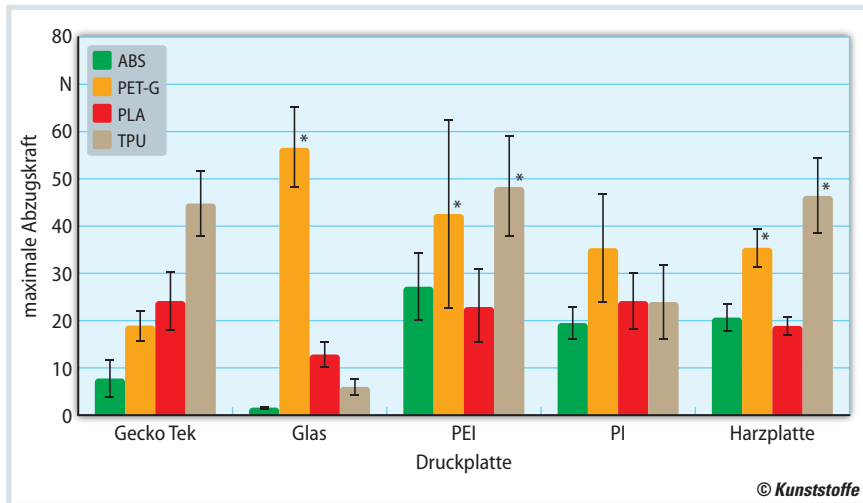


Bild 3. Die gemessenen maximalen Abzugskräfte der FLM-Materialien hängen stark von der Materialkombination ab. Bei den mit * gekennzeichneten Werten tritt bereits nach weniger als fünf Drucken ein Versagen im Bauteil auf, sodass der gemessene Wert niedriger liegt als die tatsächliche Kraft (Quelle: SKZ)

FLM-Druckparameter	verringert	erhöht
Düsentemperatur	0	+
Plattformtemperatur	-	++
Extrusionsfaktor	0	+
Druckgeschwindigkeit	+	-
Schichtdicke	0	-

Legende ++ starke Steigerung + Steigerung 0 keine Änderung
-- starke Verringerung - Verringerung der Maximalkraft

Tabelle 2. Druckparameter und mittlere Auswirkungen ihrer Verringerung/Erhöhung auf die Maximalkraft, gemittelt aus drei Messreihen zur Variation der Einflussgrößen (Quelle: SKZ)

den kann. Oftmals versagten die Bauteile in diesem Fall kohäsiv. Dies bedeutet, dass der ermittelte Abzugswert nicht die maximale Haftkraft widerspiegelt, welche demnach noch höher sein kann (**Bild 3**).

Bei der Kombination von ABS mit Glas treten im Rahmen der Versuchsreihe die niedrigsten Haftkräfte auf. Die Haftung von ABS auf Glas ist so gering, dass es genügt, den Probekörper leicht anzustoßen, um ihn abzulösen. Somit wurden auch kritische Grenzfälle untersucht. Auf der PEI-Druckplatte (Polyetherimid) haften alle Filamente mittel bis stark. Das Polyimid (PI) zeigte für alle Materialien eine mittlere Haftung.

Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Rauheit

Des Weiteren wurde untersucht, inwiefern bekannte Messansätze aus der Klebtechnik, wie beispielsweise Oberflächenenergie-

gienkennwerte oder Rauheitskennwerte, eine Vorhersage von geeigneten Kombinationen erlauben oder dazu dienen können, den Verschleißzustand von Dauerdruckplatten zu bewerten. Eine Korrelation der gemessenen Peelkräfte und maximalen Abzugskräfte mit den Oberflächeneigenschaften der Materialien war im Rahmen der durchgeführten Messungen teilweise mit flächigen Rauheitskenngrößen der Druckplattformen möglich.

Im Gegensatz dazu konnte zwischen den bei Einsatztemperaturen ermittelten Oberflächenenergien der Filamente und Druckplatten nach der Methode von Owens, Wendt, Rabel und Kaelble (OWRK) und der Haftung keine signifikanten Korrelationen ermittelt werden [5]. Die chemischen Eigenschaften der Filamente und Druckplatten sind bei Raumtemperaturen

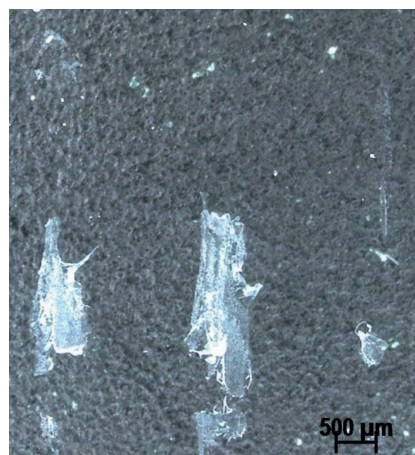


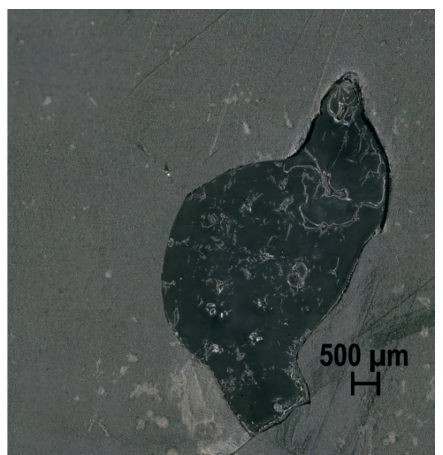
Bild 4. PET-G-Filament: Rückstände auf der Borosilikatglasplatte (links) und auf einer PEI-Platte (rechts) nach fünf Drucken (© SKZ)

und den Einsatztemperaturen relativ ähnlich, da alle Materialien größtenteils dispersen Charakter aufweisen, was die physikalische Adhäsion zwischen diesen generell verbessern sollte. Dadurch ist es auf dieser Basis nicht möglich, das unterschiedliche Verhalten zu begründen oder gar wissenschaftliche Vorhersagen von geeigneten Druckkombinationen zu treffen.

Einfluss der Druckparameter

Zusätzlich wurde der Einfluss der FLM-Druckparameter auf die resultierende Haftung untersucht, indem jeweils ein Druckparameter bei ansonsten gleichbleibenden Parametern variiert wurde. In **Tabelle 2** sind die Resultate aus drei Kombinationen von Druckplattform und Druckmaterial (PLA auf der Harzplatte, PLA auf PEI und ABS auf GeckoTek) zusammengefasst. Teilweise nehmen die Druckparameter signifikanten Einfluss auf die Haftung der gedruckten Filamente. Während es sich bei den Temperaturparametern (Düse und Plattform) und dem Extrusionsfaktor um direkte Proportionalitäten handelt, ist der Zusammenhang zwischen Druckgeschwindigkeit bzw. Schichtdicke und Haftung umgekehrt proportional.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Erhöhung der Temperaturen von Düse und Bauplattform in allen Systemen die Haftung deutlich steigert. Hierbei ist vor allem die Plattformtemperatur entscheidend. Die Düsentemperatur zu erhöhen hat zudem den Nachteil, dass es zu stärkerem „Oozing“ [6], also zum Abtropfen des aufgeschmolzenen Filaments kommt. Dadurch leidet die Gleichmäßigkeit des Drucks.



Fazit

Die Konstruktion einer mobilen Abzugsvorrichtung war notwendig, um das Haftungsverhalten von Druckplattformen und Druckmaterialien im FLM-Prozess zu untersuchen. Unter anderem konnte der signifikante Einfluss der Druckparameter auf die resultierende Haftung nachgewiesen werden. Eine Korrelation zu Kennwerten aus der Klebtechnik wie gemessenen Oberflächenenergien war nicht nachweisbar.

Eine solche Prüfvorrichtung ist notwendig, um vor allem vor zeit- und kostenintensiven Druckjobs von großen Bauteilen mit neuen Materialkombinationen die Haftung zu überprüfen und gegebenenfalls durch Druckparameteranpassungen zu optimieren. Neue Druckmaterialien

oder Druckplattformen lassen sich nun gezielt hinsichtlich der Haftung charakterisieren, um Verarbeitungshinweise zu liefern.

Des Weiteren erfolgt die Auswahl der Plattform bzw. des Filamentmaterials meist durch Ausprobieren. Hierbei wird der Druck aufgrund von Haftungsproblemen häufig abgebrochen, bis die passende Druckplattform gefunden ist. Zielführend ist eine Versuchsplanung, bei der die Verarbeitungsparameter durch einen Sternversuchsplan mithilfe der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) ausgearbeitet werden. Hierbei erfolgt eine Modifikation der einzelnen Faktoren, sodass ausgehend von der Mittelstellung (center point) ein sternförmiger Versuchsplan entsteht.

Ein Zusammenhang der gemessenen Abzugskräfte mit den Eigenschaften der Materialien zeigte sich in der Rauheit. Das treppenstufenartige Verhalten der Rauheit spiegelt sich in den gemessenen Peelkräften der Abzugsversuche wider. Auch für den Anstieg der Haftung ist eine Ursache die zunehmende Oberfläche des Druckplattenmaterials.

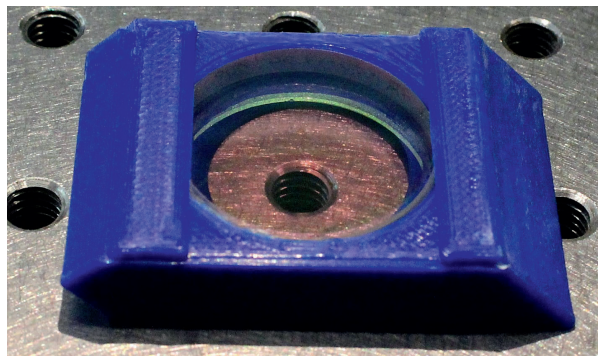
Im Gegensatz dazu konnten zwischen den gemessenen Oberflächenenergien und der Haftung keine Korrelationen ermittelt werden. Die Eigenschaften der Filamente sind relativ ähnlich, da alle Materialien größtenteils dispersen Charakter aufweisen. Dies ist möglicherweise auf einen größeren Einfluss der chemischen Adhäsion zurückzuführen, der mit Kontaktwinkelmessungen nicht erfasst werden kann. ■

Generative Fertigung optischer, thermaler und struktureller Komponenten

Laser aus dem 3D-Drucker

Am 19. November 2019 stellten die vier Partner im Innovationsverbund „Grotesk – Generative Fertigung optischer, thermaler und struktureller Komponenten“ Forschungsansätze vor, mit denen sich optische Systeme mittels 3D-Druck herstellen lassen. Das Ziel des Teams von der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (LUH), vom Clausthaler Zentrum für Materialtechnik (CZM), der Hochschule Hannover (Hsh) und vom Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH) ist es, optische Systeme digital zu konstruieren und Baugruppen mittels additiver Fertigung zu realisieren. Bereits drucken können die Forscherinnen und Forscher innere Strukturen zur verbesserten Kühlung eines Lasers. Mit einem digitalen Zwilling simuliert das Team an der LUH die thermomechanischen Eigenschaften eines 3D-Bauteils und kann den Fertigungsprozess so im Vorfeld modellieren. Effizientere Kühlsysteme ermöglichen höhere Ausgangsleistungen ohne thermische Einbußen – eine Grundvoraussetzung für leistungsstärkere Lasersysteme.

Knackpunkt sind jedoch oft die Werkstoffeigenschaften. „Wir müssen Werkstoffe klug auswählen und Eigenschaften wie etwa den Schmelzpunkt und die Oberflächeneigenschaften gezielt einstellen“, betonte Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling (CZM).



Spannungsfrei eingedruckte Optik für den Einsatz im 3D-gedruckten Lasersystem (© LZH)

Besonderes Augenmerk legt das CZM auf die Anbindung beim direkten Andruck eines Werkstoffs an eine Optik und die dabei entstehenden thermischen Einflüsse. Durch die hohe thermische Belastung in diesem Prozess kann es zu erhöhten Spannungen kommen, die mitunter zum Bruch der Optik führen. Mit angepassten Werkstoffsystemen lässt sich dies jedoch verhindern.

Häufig bestehen optische Systeme auch aus verschiedenen Werkstoffarten. „Wir drucken Metall, Glas und Polymere und möchten die Materialien mit wenig Aufwand wechseln können“, erklärte Prof. Dr.-Ing. Henning Ahlers (Hsh) die Herausforderung an die Systemtechnik. Die Lösung: Ein Koaxialkopf zum Laserauftragschweißen, bei dem der Laserstrahl ge-

teilt und später wieder zusammengeführt wird. So lässt sich das Bauteil richtungsunabhängig bearbeiten, und die verschiedenen Materialien können flexibel und automatisiert zugeführt werden.

„Noch sind wir weit entfernt von der automatisierten Laserherstellung“, räumte Dr. Dietmar Kracht vom LZH ein. „Aber die vorgestellten Konzepte tragen wesentlich dazu bei, dass wir viele Systeme zukünftig automatisiert fertigen können.“ Optiken spannungsfrei direkt in ein Medium eindringen kann das LZH-Team bereits. Dieser Vorgang lässt sich automatisieren und so ein manueller Schritt bei der Laserassemblierung einsparen. In Zukunft will der Forschungsverbund ganze Lasersysteme digital konstruieren und ausdrucken.