

Bestimmung der Haftfestigkeit organischer Haftvermittlerschichten mit Hilfe additiv gefertigter Prüfkörper

H. Schneider, A. Bollin, K. Dilger, S. Hartwig

Technische Universität Braunschweig, Institut für Füge- und Schweißtechnik

hartwig.schneider@tu-braunschweig.de

Abstract

Für die Bestimmung der Haftfestigkeit organischer Überzüge – wie z.B. Lacken – nach ASTM D 4541 [1] werden Prüfkörper aus Aluminium oder Stahl mit einem Strukturklebstoff auf die zu prüfende lackierte Oberfläche geklebt. In einem Kopfzugversuch wird anschließend die Festigkeit der Verbindung mechanisch charakterisiert. Beim Übertragen der Charakterisierungsmethode auf die Bestimmung der Haftfestigkeit eines thermoplastischen Kunststoffes auf einer Glasoberfläche existieren neben der zu prüfenden Grenzfläche zwischen organischem Überzug und Werkstoffoberfläche noch zwei weitere Grenzflächen zwischen Thermoplast und Klebstoff und zwischen Aluminium-Prüfkörper und Klebstoff. Die Charakterisierung, die die prinzipielle Eignung von Haftvermittlerschichten für hybride Glas-Thermoplast-Verbunde angibt, gestaltet sich mithilfe entsprechend der Norm geklebter Aluminiumprüfkörper schwierig. Aufgrund von Elastizitätsunterschieden ist bei einem Fügeverbund mit dem Aufbau Aluminiumprüfkörper-Klebstoff-Thermoplast-Haftvermittler-Glas grenzschichtnahe kohäsives Versagen im Klebstoff an der Aluminium-Klebstoff-Grenzfläche oder im thermoplastischen Werkstoff an der Klebstoff-Thermoplast-Grenzfläche als schwächstes Glied der Fügeketten zu erwarten.

Eine Möglichkeit diese Problematik zu umgehen bildet die Anwendung von additiven Verfahren. Der Aufbau eines thermoplastischen Probekörpers auf einer mit Haftvermittler versehenen Glasoberfläche kann durch Schmelzschichtung im FFF- bzw. FDM- und FLM-Verfahren (Fused Filament Fabrication/ Fused Deposition Modeling/ Fused Layer Modeling) erreicht werden. Probekörper dieser Art verfügen ausschließlich über den zu prüfenden Materialübergang zwischen Glas und Kunststoff. Aufgrund der durch Schmelzschichtung bedingten geringeren mechanischen Festigkeitseigenschaften setzen diese Probekörper eine an die Lastübertragung angepasste Probengeometrie voraus. Haftvermittlerschichten sind in ihren Anwendungen vielfältigen Umweltbeanspruchungen ausgesetzt. Der Kontakt zu Ölen oder Wasser sowie das Einwirken ultravioletter

Lichts kann die haftvermittelnde Wirkung an der Grenzfläche beeinträchtigen. Daher eignet sich eine kleine Probengeometrie der Kopfzugproben für die Auslagerung und Prüfung besonders vieler Proben. Weitere Schwerpunkte der vorliegenden Betrachtung sind Reproduzierbarkeit und Validität sowie mögliche Anwendungsfälle dieser Prüfmöglichkeit.

1 Einleitung

Versagensursachen und Druckfehler an den additiv gefertigten Prüfkörpern erfordern eine passende Prüfvorschrift für additiv gefertigte Prüfkörper und die Definition einer Prüfkörpergeometrie, die eine fertigungsbedingte Anisotropie berücksichtigt. Aktuell gibt es keinerlei Normen, die explizit für eine Bestimmung der Zugfestigkeitseigenschaften von 3D-gedruckten bzw. mittels FLM gefertigten Prüfkörpern entwickelt worden sind. Ein entsprechender Vergleich von FRANKE et al. zeigt, dass sich von den insgesamt 47 untersuchten Normen für die mechanische Charakterisierung von Kunststoff- und Metallwerkstoffen 27 mit Einschränkungen bzw. Anpassungen und 20 Normen überhaupt nicht auf additiv gefertigte Prüfkörper bzw. Bauteile anwenden lassen. Hauptgründe für die Nichtanwendbarkeit dieser Prüfvorschriften sind die geometrischen Abmessungen der Proben, die erforderliche Nachbearbeitung sowie Anforderungen an die Umgebungsbedingungen. [2]

In diesem Zusammenhang wird u.a. beschrieben, dass das Elastizitätsmodul senkrecht zur Druckebene FDM-gedruckter PLA-Proben im Wesentlichen von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig ist. Weiter relevant für die Bewertung der mechanischen Festigkeitseigenschaften additiv gefertigter Prüfkörper sind das Alter des eingesetzten Filaments und eine mögliche Verunreinigung des 3D-Druckers. Außerdem ist bei der Fertigung liegender flacher Probekörper im FLM-Verfahren die Unterseite abgeflacht und damit weniger defektbehaftet als die gegenüberliegende Seite. Zusätzlich kann das Ablösen vom Druckbett (Warping) zu einer Biegung des Probekörpers führen. [3]

Die Bestimmung der Zugeigenschaften von im FDM-Verfahren genutzten Materialien erfolgt in einigen Fällen an einer flachen Zugprobe in Anlehnung an DIN EN ISO 527-1. [2-6] Um die Anisotropie sowie Randeffekte aufgrund lokal unpassender Schichtung und Versagen unmittelbar nach Erreichen des plastischen Verformungsbereiches bei Zugversuchen in Anlehnung an DIN 53504-53 auszuschließen, schlägt z.B. JIN vor, Plattenmaterial, aus welchem die Proben ausgestanzt werden, zu drucken. [7]

Da für die Prüfung der Haftfestigkeitseigenschaften ebenfalls bisher keine Normen für additiv gefertigte Strukturen festgelegt sind, werden entweder Versuche zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Klebungen oder als Kopfzugversuche modifizierte Zugversuche für die mechanische Charakterisierung der Verbindungsfestigkeit herangezogen. GEIBLER et al. nutzen den Z-Zugversuch nach Tappi T541 für eine Untersuchung des Haftverhaltens von PLA-Papier-Verbunden. [8] Der Verbund wird in diesem Fall durch den direkten Auftrag von PLA auf die Papieroberfläche im FDM-Verfahren erzeugt. Der Versuch benötigt allerdings einen Probenaufbau bestehend aus zwei Metallaufnahmen, zwei doppelseitigen Klebebändern und dem mit PLA bedruckten Papierstück mit insgesamt fünf Grenzflächen, sowie benötigt er weitaus geringere übertragbare Spannungen als bei einem Glas-Thermoplast-Verbund mit Haftvermittlereinsatz.

LEUTERITZ et al. stellen einen eigens entwickelten Prüfaufbau für die Charakterisierung formschlüssiger Fügeverbindungen vor. [4] Hierbei handelt sich um 3D-gedruckte Rund- bzw. Bolzenproben mit einem M10-Außengewinde zur Befestigung in entsprechenden Probenaufnahmen, die in der Prüfmaschine befestigt werden. So wurden die formschlüssig durch hinterschnittene Kavitäten gefügten Materialpaarungen PLA-PLA (FDM) und PLA (FDM) -AlSi (Selective Laser Sintering – SLS) geprüft. Die senkrecht zur Belastungsebene durchgeführte Schmelzschichtung bedingt bereits bei relativ geringen Kräften Versagen in Form von Gewaltbrüchen, die in unmittelbarer Umgebung der formschlüssigen Fügeverbindungen eintraten.

ZGHAIR et al. passen hingegen den in DIN 50125 geschilderten Kopfzugversuch für zwei angedruckte AlSi-Bolzen (SLS) an. [9]

WATSCHKE et al. stellen einen angepassten Zugprüfkörper mit kegelförmiger Verjüngung in Anlehnung an DIN EN 12814-2 vor, der als zweikomponentiger Prüfkörper für Kopfzugversuche mittels FDM aneinander gedruckter PLA-ABS-Teile erzeugt wird. [10]

2 Kopfzuguntersuchungen von Haftvermittlern auf Glas

Die Festigkeit eines Fügeverbunds mit besonders starker Adhäsion an Grenzflächen zu einem spröden Substrat richtet sich primär nach den Steifigkeits- und Festigkeitsunterschieden in der Grenzflächenumgebung. Die Differenzierung von adhäsivem, kohäsivem und grenzschichtnahe kohäsivem Versagen lässt bei dem Beispiel eines Glas-Thermoplast-Verbunds mit dünnem ungehärteten Glassubstrat für eine Bestimmung der Haftungseigenschaften Kopfzugversuche sinnvoll erscheinen. Ein entsprechender Versuch zur Prüfung der Haftfestigkeit von Lackschichten auf einem Substrat ist in ASTM

D 4541-17, sog. Dollys, beschrieben. Bei diesem Versuch werden Aluminiumprüfkörper auf die zu prüfende kreisförmig freigelegte Oberfläche geklebt und mittels eines automatischen hydraulischen Prüfgeräts im Versuch von der Oberfläche abgezogen. Sofern dieser Versuch für die mechanische Charakterisierung der Hafteigenschaften herangezogen werden soll, liegen neben der zu prüfenden Grenzfläche zwischen Glassubstrat und thermoplastischem Kunststoff zwei weitere Grenzflächen mit ebenfalls hohen Steifigkeits- und Festigkeitssprüngen in den Grenzflächen Aluminium-Klebstoff und Klebstoff-Thermoplast vor. An ihnen ist ein Versagen wahrscheinlich.

In Vorversuchen wurden Haftvermittler für Gläser mittels ASTM D 4541-17 für den Verbund mit einem Thermoplast geprüft. In Umgebung der oben genannten zusätzlichen Grenzflächen stellte sich im Versuch grenzschichtnahes (UHU endfest, Betamate 1480 Dow) oder rein kohäsives Versagen im Klebstoff ein (Cyanacrylat, UHU endfest). Die zu prüfende Haftvermittlerschicht zwischen Glas und Thermoplast versagte nicht. Die höchste erreichbare Festigkeit trat als grenzschichtnahes kohäsives Versagen des thermoplastischen Polyurethans bei der Klebung von Betamate 1480 auf und lag bei 1,9 MPa (siehe *Abb. 1*). Die kreisförmige Freilegung der kreisförmigen Prüffläche erfolgte durch Eindrücken eines erwärmten Rohrstücks.



Abb. 1: Grenzschichtnahes kohäsives Versagen an der Thermoplast-Klebstoff-Grenzfläche (Betamate 1480)

Eine Möglichkeit, Informationen über die Festigkeitseigenschaften in der Grenzflächenregion zwischen Thermoplast und Glas zu erzielen, besteht in der additiven Fertigung von Prüfkörpern aus dem für die Verbunde genutzten thermoplastischen Polyurethan (TPU) gemäß den in ASTM D 4541 beschriebenen Geometrien. Die Proben wurden im FDM-Verfahren in einem Ultimaker 2 direkt auf eine mit Haftvermittler versehene Glasplatte gedruckt und führten allgemein zu höheren Versagensspannungen von bis zu 3,7 MPa. Es stellte sich allerdings aufgrund der in Bezug auf den Fertigungsprozess nicht lastpfadgerechten Konstruktion des Dollys rein kohäsives Versagen im Prüfkörper ein. Eine weitere Schwierigkeit stellte die Kopfgeometrie in Bezug auf die Probenaufnahme dar. Da TPU eine deutlich geringere Festigkeit aufweist als der zuvor genutzte

Aluminiumprüfkörper, rutschte der Kopf aus der Probenaufnahme. Sämtliche Fehler dieser Prüfkörper sind in *Abb. 2* näher erläutert. Es ist zu beachten, dass die direkte druckfreie additive Fertigung eines Prüfkörpers hinsichtlich erreichbarer Verbindungsfestigkeiten einem anderen Verfahren unterlegen bleibt und nicht direkt verglichen werden kann. Für diese Verfahren wäre aber durch einen Kopfzugversuch grundsätzliche Kompatibilität feststellbar.

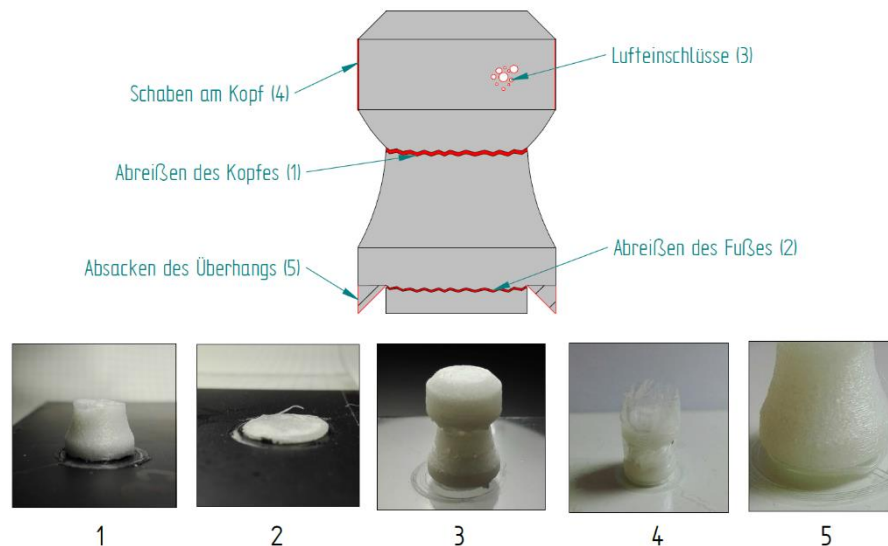


Abb. 2: Dollyversagen bei nicht angepasster Geometrie. 1.) Abreißen des Kopfes, 2.) Abreißen des Fußes, 3.) Luftporen, 4.) Schaben der Probenaufnahme am Kopf und Durchrutschen des Kopfes und 5.) Absacken des Überhang

Im Folgenden soll die Entwicklung eines additiv gefertigten Prüfkörpers diskutiert werden.

3 Experimentelles

Die Einordnung eines FDM-gefertigten Prüfkörpers als defektbehafteten Körper mit starkem Einfluss des defektbehafteten Randes auf die Festigkeit des Prüfkörpers führt zur Nutzung runder Prüfkörperformen, bei denen geometrische Fehler wie Stufungen die bestimmten Festigkeitswerte in geringerem Umfang beeinflussen. Eine entsprechend ähnliche sanduhrförmige Prüfgeometrie wird in ASTM D 1623-17 bzw. DIN EN 12814-2 für die mechanische Charakterisierung von ebenfalls in der Regel stark inhomogenen und damit defektbehafteten Schäumen beschrieben. [11]

3.1 Substrat und Beschichtung

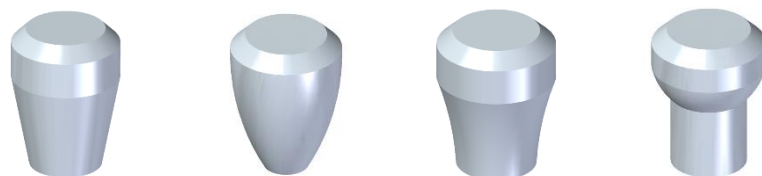
Bei dem genutzten Glassubstrat handelte es sich um Kalk-Natron-Glas mit einer Dicke von 1,1 mm und den Abmaßen von $b \times h = 84,5 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$. Die Proben wurden beidseitig mit Aceton und Isopropanol gereinigt, bevor die Zinnseite mit Hilfe von UV-

C-Strahlung mittels Fluoreszenz bestimmt wurde. Hiernach fand die nasschemische Beschichtung mit einer 1%igen Haftvermittlerlösung aus 1 ml 3-Aminopropyltrimethoxysilan (APTMS), Fa. Sigma-Aldrich in 100 ml Isopropanol statt. Der pH-Wert wurde mittels Essigsäure (40%ig) auf pH 6 eingestellt und die Polymerisationsreaktion mit 1 ml Wasser gestartet. Nach 30 Minuten erfolgte die Aufbringung des Gemischs als Wischauftrag auf der Substratoberfläche und im Anschluss die Trocknung im Ofen bei 80 °C für weitere 5 min.

3.2 Fertigung der Probekörper

Das beschichtete Glassubstrat wurde im FDM-Drucker (Typ Ultimaker 2) mittels Klebestreifen fixiert und anschließend mit einer z-Achsenverschiebung um 1,11 mm mit thermoplastischem Polyurethan (BASF, TPU Shore 58D) bedruckt. Um eine passende Extrudertemperatur einzustellen, wurde vorab die Erweichungstemperatur des TPUs bei 177,8 °C mittels einer dynamischen Differenzkalorimetrie bestimmt. Die eingestellten Extrudertemperaturen waren 228 und 240 °C. Bei der Erzeugung des Prüfkörpers wurde stets ein Füllgrad von 100% mit einer Wandstärke von 1,2 mm eingehalten und ein Linien- bzw. ein Spiralmuster (siehe *Abb. 3*) gelegt. Um Abkühlzeiten zu verkürzen, betrug die Fahrgeschwindigkeit 50 mm/s. Für eine möglichst definierbare Kontaktfläche zwischen Glas und Prüfkörper wurde auf eine Umrandung des gedruckten Körpers verzichtet. Neben der angestrebten konkaven bzw. zylindrischen Form entsprechend einer halben Zugversuchsform in ASTM D 1623 wurden ergänzend kegelige und konvexe Geometrien getestet. Geometrien und Versuchsvarianten sind in *Tab. 1* und *Tab. 2* dargestellt.

Tab. 1: Geprüfte Probengeometrien für Kopfzugversuche in Anlehnung an ASTM D 4541



	Kegel	Konvex	Konkav	Zylinder
Fußdurchmesser	10 mm	6 mm	10 mm	10 mm
Kopfdurchmesser	15 mm	15 mm	15 mm	15 mm
Gesamthöhe	20 mm	20 mm	20 mm	20 mm
Belastete Kontaktfläche	78,54 mm ²	28,27 mm ²	78,54 mm ²	78,54 mm ²

Tab. 2: Variation von Füllmuster, Extrudertemperatur und Schichtdicke

Variante	Füllmuster/Infill	Extrudertemperatur	Schichtdicke
1	Spirale	240 °C	0,2 mm
2	Linien	240 °C	0,2 mm
3	Spirale	228 °C	0,2 mm
4	Spirale	240 °C	0,1 mm

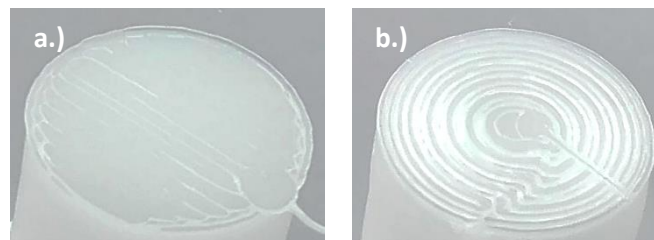


Abb. 3: Unterseite des Prüfkörperfußes mit sichtbarem Füllmuster mit a.) Linienmuster und b.) Spiralmuster

3.3 Mechanische Charakterisierung

Die mechanische Charakterisierung des TPU-Werkstoffs erfolgte in Kopfzugversuchen in Anlehnung an ASTM D 4541. Zur Versteifung des Glassubstrates wurde die Platte rückseitig mit Cyanacrylat auf eine Stahlträgerplatte geklebt, die an einer Universalzugprüfmaschine (Typ Zwick Z1, 1 kN-Kraftmessdose) fixiert wurde. Gewählte Parameter der Prüfung waren eine Vorkraft von 5 N und eine Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min. Die Probenhalterung und der Versuchsaufbau sind *Abb. 5* entnehmbar. Weiterhin wurden an jeweils 5 der insgesamt 13 Proben Klimawechseltests gemäß dem in *Abb. 4* dargestellten Verlaufs durchgeführt.

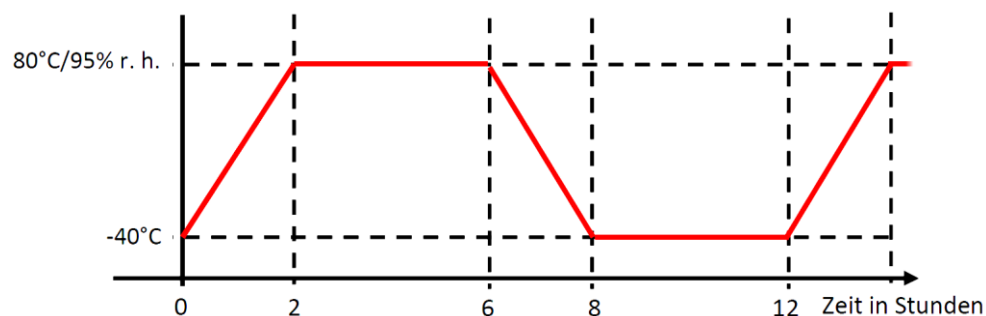


Abb. 4: Klimatische Bedingungen der Probenalterung

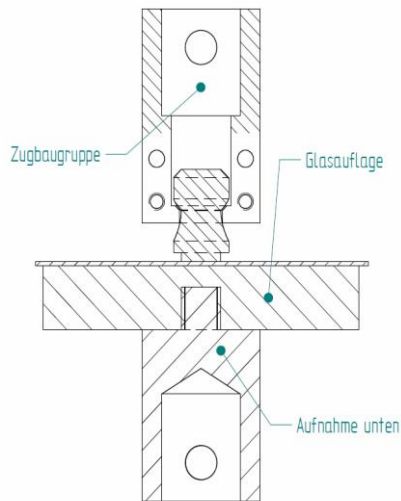


Abb. 5: Aufbau der Prüfvorrichtung in ASTM D 4541

4 Ergebnisse und Diskussion

Für die in Abb. 6 visualisierten Spannungszustände wurden besonders niedrige Lasten von maximal 0,001 MPa mit linear-elastischem Materialverhalten angenommen und die Spannungszustände stark vereinfacht durch v. Mises angenähert. Bei den genutzten Festigkeits- und Steifigkeitswerten des thermoplastischen Polyurethans handelte es sich um Herstellerangaben und bei denen des Kalk-Natron-Glases um allgemeine Kennwerte dieser Materialgruppe. Für aussagekräftigere Simulationen höherer mechanischer Spannungen wären hier viskoelastische bzw. viskoplastische Modelle notwendig, die den nichtlinearen Charakter des Spannungs-Dehnungs-Verlaufes treffender abbilden können, aber nicht Gegenstand dieser Betrachtung sind.

Die Spannungsvisualisierung zeigt für die Probe in Form eines Zylinders einen homogenen Spannungsverlauf mit zwei Konzentrationen an den Zylinderenden unter dem Prüfkörperkopf und im Bereich des Fußes. Beim Aufbringen höherer Zuglasten ist ein Abreißen des Kopfes möglich, was in einigen der anschließend durchgeführten Versuche tatsächlich eintrat

Die konkave Prüfkörpergeometrie weist hingegen lediglich eine Spannungslokalisierung am Fuß des Dollys auf, die allmählich in Richtung des Kopfes ausläuft. Im Belastungsfall sind hier aufgrund der geradlinigen Krafteinleitung in die Grenzfläche vergleichsweise hohe übertragbare Spannungen zu erwarten.

Im Vergleich zur zylindrischen und konkaven Geometrie weisen der Kegel (vgl. ASTM D 1623 und DIN EN 12814-2) und die konvexe Geometrie Kerben mit mehrachsigen Spannungszuständen an der Grenzfläche entsprechend kleine übertragbare

Kräften auf, wobei im Falle der konvexen Geometrie zusätzlich ein kleinerer belasteter Querschnitt vorliegt.

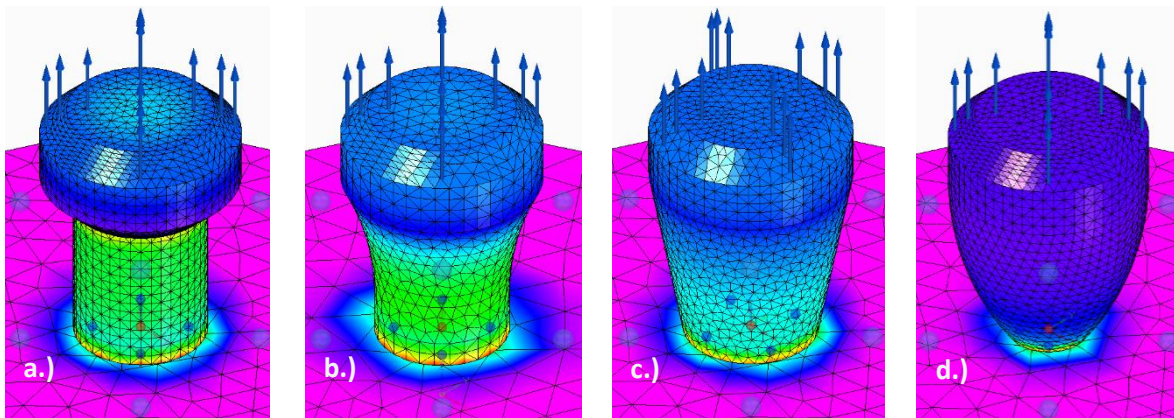


Abb. 6: Qualitative Darstellung von Spannungslokalisierungen für linear elastisches Materialverhalten. a.) Zylinder, Bildung von zwei kleinen Spannungskonzentrationen auf der Füßfläche und unmittelbar unter dem Kopf bei ansonsten relativ homogenen Verlauf, b.) geringe Spannungslokalisierung im Fußbereich, c.) stärkere Lokalisierung der Spannungen, d.) stärkste Spannungskonzentration bedingt durch Kontur und belasteten Querschnitt

Dem Diagramm in Abb. 7 ist das Ergebnis der Kopfzugversuche entnehmbar. Entsprechend der linear-elastischen Abschätzung zeigt die konkave Prüfgeometrie mit 7,73 MPa die höchsten übertragbaren Spannungswerte bei vergleichsweise geringer Streuung der Ergebnisse. Weiterhin sind bezüglich der Extrudertemperaturen die geringeren Haftfestigkeiten erkennbar, die aus der mangelnden Benetzung der beschichteten Glasoberfläche durch das TPU und damit einer nicht hinreichenden Haftung aufgrund verringerter Beweglichkeit der Makromoleküle resultieren.

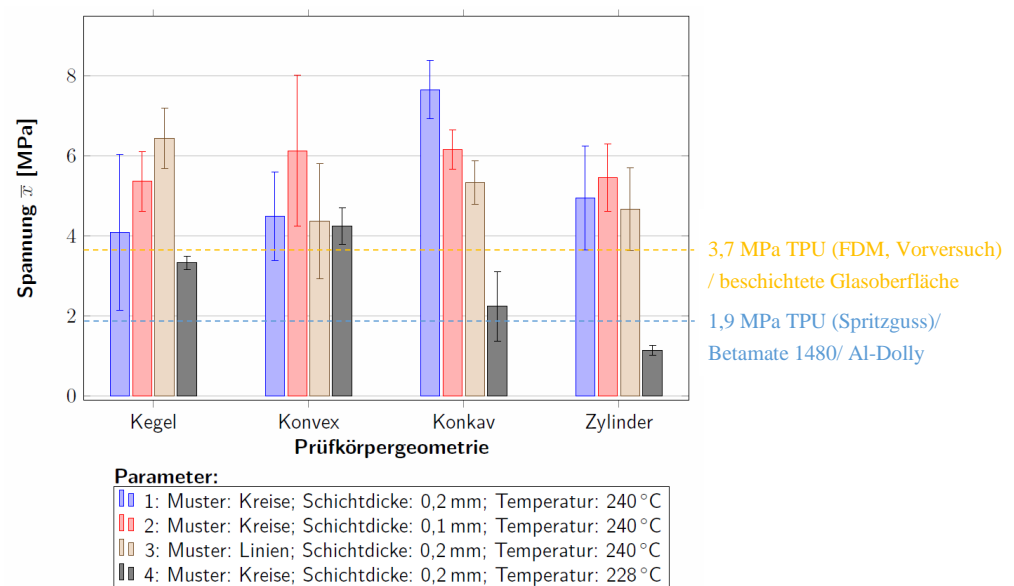


Abb. 7: Ergebnis der mechanischen Charakterisierung im Kopfzugversuch in Anlehnung an ASTM D 4541

Die darauffolgende Alterung der Proben führt zu einer Verringerung der Festigkeitswerte unter 7 MPa (siehe *Abb. 8*). Ein direkter Vergleich der Haftfestigkeiten ist nicht sinnvoll, da die Losgrößen im Falle der gealterten Proben nur 5 im Gegensatz zur den ungealterten 8 Proben betragen, was eine größere Streuung der Ergebnisse und eine kritische Hinterfragung der Einzelergebnisse erforderlich macht. Vor diesem Hintergrund erscheinen größere Losgrößen von etwa 8 bis 10 Proben für die Bestimmung der Haftfestigkeit von direkt mittels FDM angedruckten Probekörpern auf Oberflächen mit dieser Methode sinnvoll.

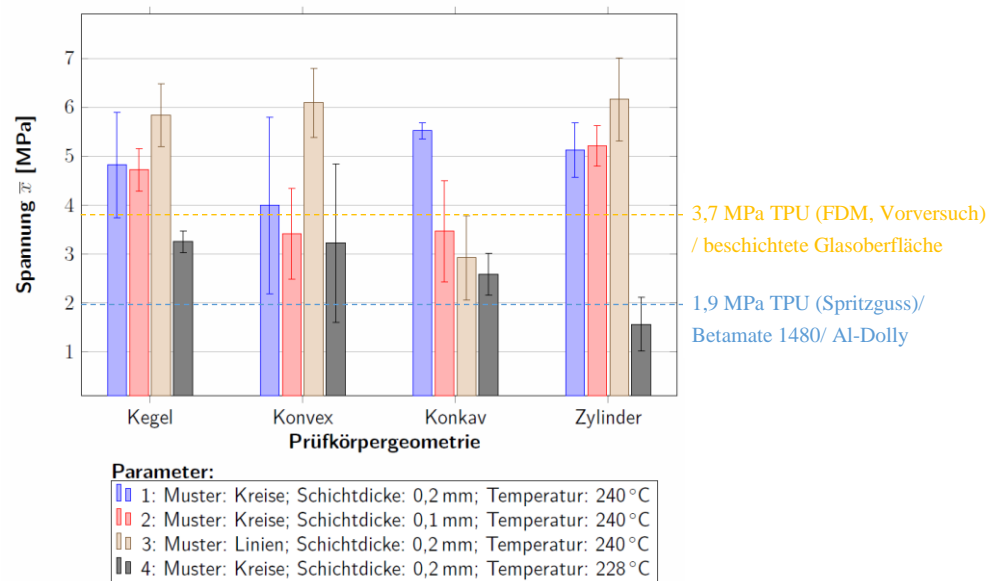


Abb. 8: Ergebnis der mechanischen Charakterisierung im Kopfzugversuch in Anlehnung an ASTM D 4541 nach vorangegangener Probenalterung

5 Ausblick

In folgenden Versuchen könnte der Anwendungsbereich des direkten Andruckens von Prüfkörpern auf Glas mittels Schmelzschtung auf andere thermoplastische Grundkörper als Alternative zu den von WATSCHKE et al. [10] beschriebenen Prüfverfahren für Kopfzugversuche in Anlehnung an DIN EN 12814-2 erweitert werden. Außerdem könnte die Probengeometrie beim wärmeunterstützten Pressfügen auf Glas oder glasierten Oberflächen genutzt werden.

Der Erfolg beim Drucken von Übergängen hängt im Wesentlichen von der Menge der gedruckten Masse ab. So verringern dünnere Schichtdicken aufgrund der schnelleren Abkühlung und des geringen aufliegenden Gewichts das Risiko für ein Absacken der Überhänge. Im Rahmen der durchgeführten Versuche blieben Temperatur, Düsendurchmesser und Druckgeschwindigkeit als Fertigungsparameter mit großem Einfluss auf die

Defektdichte, unberücksichtigt. Diese Größen sind in folgenden Untersuchungen eingehender zu betrachten.

Die Fügeverbindung zwischen einem thermoplastischen Kunststoffteil und einer mit Haftvermittler beschichteten anorganischen Oberfläche ist möglicherweise im Anwendungsfall polaren, unpolaren oder tensidhaltigen Medien ausgesetzt, die sich unter Umständen an der Grenzfläche zwischen thermoplastischem Polyurethan und der Glasoberfläche anlagern und deren übertragbare Lasten signifikant herabsetzen können. Die kompakte geometrische Form des Probekörpers ermöglicht hier die einfache Durchführung von Zeitstandversuchen bei gleichzeitiger Medieneinwirkung.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 527 - Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2012, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag 2012.
- [2] Franke, R.; Schob, D.; Ziegenhorn, M.: Prüfverfahren und numerische Simulation von mechanischen Eigenschaften 3D-gedruckter thermoplastischer Kunststoffe, in: Additive Fertigung von Bauteilen, Springer 2017 S.137-158.
- [3] Messener, J.; Kaufmann, T.; Christian, M.; Schmidt, A.; te Heesen, H.: Untersuchung der Zugfestigkeit von FLM-Zugproben aus PLA bei Variation von Schichtdicke und Füllgrad, RT-Journal – Forum für Rapid Technologie 2019.
- [4] Leuteritz, G.; Schudak, S.; Rohling, M.; Lachmayer, R.: Formschlüssige multimaterielle Additive Fertigung zur Realisierung funktionsintegrierter Hybridbauteile, in: Konstruktion für additive Fertigung, Springer 2018.
- [5] Koldrack, N.: Produktentwicklung für den Einsatz von Rapid Manufacturing bei der Entwicklung von hydraulischen Spannbuchsen. Universität Rostock 2019.
- [6] Ebel, E.; Sinnemann, T.: Fabrication of FDM 3D objects with ABS and PLA and determination of their mechanical properties, RT-Journal – Forum für Rapid Technologie 2014.
- [7] Jin, M.: Material development for extrusion-based 3D printing, Dissertation, Universität Bayreuth S. 60
- [8] Geißler, A.; Weber, A.-L.: Schlussbericht IGF-Vorhaben Nr.: 19315 BG, Thema: Verfahrenstechnische Grundlagen des Einsatzes additiver Fertigungsverfahren auf Papiersubstraten am Beispiel der lasergestützten Faltschachtelproduktion 1.2.2017-31.1.2019.

- [9] Zghair, Y. A.; Leuteritz, G.: Additive Repair von Multimaterial-Systemen im selektiven Laserstrahlschweißen, in: Additive Manufacturing Quantifiziert – Visionäre Anwendungen und Stand der Technik, Springer 2017.
- [10] Watschke, H.; Waalkes, L.; Schumacher, C.; Vietor, T.: Development of Novel Test Specimens for Characterization of Multi-Material Parts Manufactured by Material Extrusion, A. Sc Mdpi.
- [11] ASTM D1623-17, Standard Test Method for Tensile and Tensile Adhesion Properties of Rigid Cellular Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017

Autorenanschrift

Hartwig Schneider

Technische Universität Braunschweig

Institut für Füge-und Schweißtechnik

Langer Kamp 8

38106 Braunschweig

Telefon: 0531-391-65021

Telefax: 0531-391-95599

E-Mail: hartwig.schneider@tu-braunschweig.de