

Untersuchung der Kunststoff-Metall-Haftung bei der additiven Fertigung hybrider Spritzgussformen

Thomas Wendt, Alexander Dierle

Zitiervorschlag im APA Stil:

Wendt, T., & Dierle, A. (2025). Untersuchung der Kunststoff-Metall-Haftung bei der additiven Fertigung hybrider Spritzgussformen. *Tagungsband : 12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung*, 70–72. <https://doi.org/10.25673/120741>

Abstract

Zur Herstellung hybrider Spritzgussformen wird die Haftung verschiedener 3D-Druck-Filamente auf Metallmodulen untersucht. Mit einem modifizierten FFF-Drucker und roboterbasierter Abzugsprüfung wird die Verbindung bewertet. PA12+CF15 zeigte die besten mechanischen Eigenschaften und haftet am besten in Kombination mit Metallkleber auf Polychloropren Basis. Zukünftig soll das Verfahren auf ein robotergestütztes Mehrachs-System übertragen und um einen mechanischen Haftungsmechanismus ergänzt werden, um temperaturbedingte Haftkraftverluste auszugleichen.

Nutzungsbedingungen

Dieses Dokument wird unter diesen Bedingungen zur Verfügung gestellt:
Creative Commons - CC BY - Namensnennung 4.0 International
Für weitere Informationen siehe:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>



Kontakt

Hochschule Offenburg | Bibliothek
Badstraße 24
77652 Offenburg
Telefon: (0781) 205-240
E-Mail: bibliothek@hs-offenburg.de
www.hs-offenburg.de/bibliothek

Untersuchung der Kunststoff-Metall-Haftung bei der additiven Fertigung hybrider Spritzgussformen

Thomas M. Wendt, Alexander Dierle

Offenburg University of Applied Sciences, Badstraße 24, 77652 Offenburg

Zur Herstellung hybrider Spritzgussformen wird die Haftung verschiedener 3D-Druck-Filamente auf Metallmodulen untersucht. Mit einem modifizierten FFF-Drucker und roboterbasierter Abzugsprüfung wird die Verbindung bewertet. PA12+CF15 zeigte die besten mechanischen Eigenschaften und haftet am besten in Kombination mit Metallkleber auf Polychloropren Basis. Zukünftig soll das Verfahren auf ein roboterassistiertes Mehrachs-System übertragen und um einen mechanischen Haftungsmechanismus ergänzt werden, um temperaturbedingte Haftkraftverluste auszugleichen.

Einleitung

Die Umsetzung kleiner Spritzgussserien erfordert flexible, schnelle und kostengünstige Herstellungsverfahren, um eine wirtschaftliche Fertigung variabler Werkzeuggeometrien zu ermöglichen. Konventionell gefertigte Formen bestehen aus Stahl oder Aluminium und werden spanend hergestellt. Für Kleinserien von 10 bis 2.000 Teilen ist dieser Ansatz jedoch kosten- und ressourcenintensiv und zudem zeitaufwendig. [1]

Spritzgussformen aus additiver Fertigung werden insbesondere für Anwendungen im Rapid Tooling genutzt. Abhängig vom Anwendungsfall kommen unterschiedliche Verfahren und Materialien zum Einsatz, etwa PolyJet mit Digital ABS, Stereolithografie (SLA) mit hochfesten Harzen wie Rigid 10K Resin oder Fused Filament Fabrication (FFF) mit Hochleistungspolymeren wie PEEK. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine kosteneffiziente Herstellung von Spritzgussformen, ist jedoch durch eine begrenzte Standzeit eingeschränkt. [2]

Einen weiteren Ansatz stellen hybride Spritzgusswerkzeuge dar, bei denen additiv gefertigte Strukturen mit metallischen Modulen kombiniert werden [3]. Hier wird die thermische Stabilität und Robustheit klassischer Metallformen mit der Gestaltungsfreiheit, Flexibilität und Kosteneffizienz additiver Verfahren verbunden [3]. Untersuchungen zeigen, dass sich die Herstellungszeit und -kosten insbesondere für Kleinserien um bis zu 30 % reduzieren lassen, wenn gleich die Standzeit im Vergleich zu Stahlformen begrenzt bleibt (~1,3 %) [3]. Ergänzend verdeutlichen Forschungsprojekte wie rapidFORMtool, dass hybride Prozessketten – bestehend aus additiver Fertigung, partieller Nachbearbeitung und Oberflächenbehandlung – die Genauigkeit, Oberflächengüte und mechanischen Eigenschaften von Rapid-Tooling-Werkzeugen weiter verbessern können [4].

Methodik

Zur Untersuchung der Haftungseigenschaften wird ein FFF-3D-Drucker (Prusa MINI) so modifiziert, dass Kunststoff gezielt auf vorbereitete Probenkörper aus Warmarbeitsstahl 1.2343 extrudiert werden kann. Diese werden in eine ebenfalls aus 1.2343 gefertigte Grundplatte eingesetzt, die auf dem Heizbett des 3D-Druckers aufliegt und über Magnete fixiert wird. Bei der Filamentauswahl wird darauf geachtet, dass keine aufwändigen Umgebungsbedingungen wie eine beheizte Druckkammer erforderlich sind. So lassen sich die Ergebnisse auf industrielle Anwendungen übertragen, insbesondere auf den direkten 3D-Druck mit Industrierobotern, bei denen eine vollständige Einhausung kaum wirtschaftlich realisierbar ist. Eingesetzt werden daher PETG, ASA und PA12+CF15 (siehe [5]), die sowohl kostengünstig als auch ausreichend temperaturbeständig sind.

Zur Verbesserung der Adhäsion wurden zwei Ansätze verfolgt: (i) die Modifikation der Metalloberfläche (Polieren, Schleifen, Walzen) sowie (ii) der Einsatz von Haftvermittlern, darunter Sprühkleber, Metallkleber (Basis Polychloropren), 2K-Epoxidharzkleber oder eine Plasmaaktivierung. Der modifizierte Drucker ermöglicht den Überlappungsdruck auf Metallproben, die in die Grundplatte eingesetzt sind (vgl. Abb. 1). Um eine geschlossene Auflagefläche zu schaffen, wird neben den Prüfkörpern ein Platzhalter aus Stahl eingesetzt, der mit Malerband überklebt ist. Das Band sorgt dafür, dass das Filament dort temporär aufliegt, sich jedoch nach dem Druck rückstandsfrei ablösen lässt. Nach Entfernen des Platzhalters kann die Haftung ausschließlich an der Grenzfläche zwischen Prüfkörper und Filament untersucht werden. Zentrale Herausforderungen stellen die präzise Justierung des Düsenabstands sowie die exakte Temperaturführung des Druckbetts dar, da beide Parameter die Anbindung und Benetzung des Extrudats maßgeblich beeinflussen.

In einer systematischen Versuchsreihe werden verschiedene Kombinationen von Düsenabstand, Düsen- und Betttemperatur untersucht, um einen Parametersatz zu ermitteln, der eine reproduzierbare und homogene Haftung gewährleistet.

Die Temperaturkontrolle des Druckbetts ist ein kritischer Faktor. Messungen mit einem Infrarotthermometer zeigen, dass die tatsächliche Oberflächentemperatur zunächst von der Solltemperatur abweicht und sich erst nach einer Haltezeit von rund fünf Minuten stabilisiert. Diese Haltezeit stellt sicher, dass Temperaturgradienten minimiert und die Proben homogen durchwärmt werden.

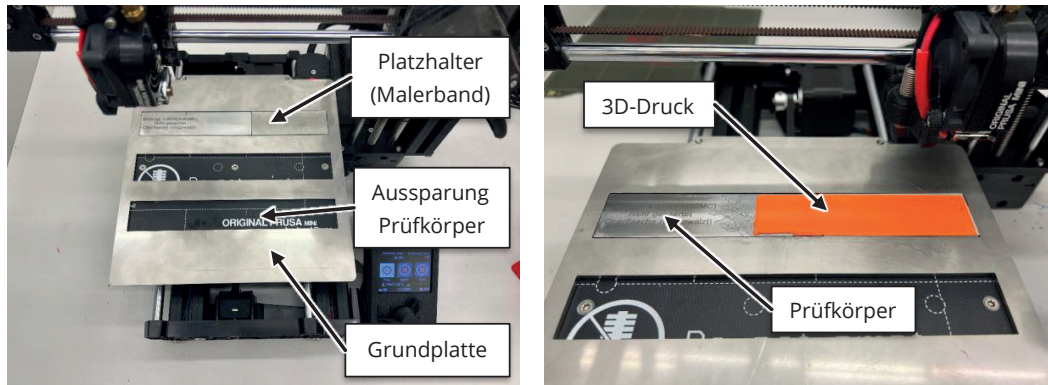


Abbildung 1: Versuchsaufbau für den Überlappungsdruck – eingesetzter Prüfkörper aus Stahl 1.2343 und Platzhalter (überklebt mit Malerband) in der Grundplatte

Zur Bestimmung der Haftkräfte wird eine roboterbasierte Messeinrichtung bestehend aus einem KUKA iisy, einer Kraftmessdose und einer Einspannvorrichtung eingesetzt (vgl. Abb. 2). Der Roboter verfährt mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit von 150 mm/min in negativer z-Richtung, bis die Verbindung zwischen Filament und Probenkörper versagt. Um Materialbruch auszuschließen und eine eindeutige Trennung der Grenzfläche zu gewährleisten, werden zusätzliche Stabilisierungsstrukturen integriert. Auf diese Weise kann die tatsächliche Haftkraft bestimmt werden. Die Versuche werden sowohl bei Raumtemperatur (23 °C) als auch bei erhöhter Temperatur (100 °C) durchgeführt, um die Temperaturabhängigkeit der Haftung zu bewerten.

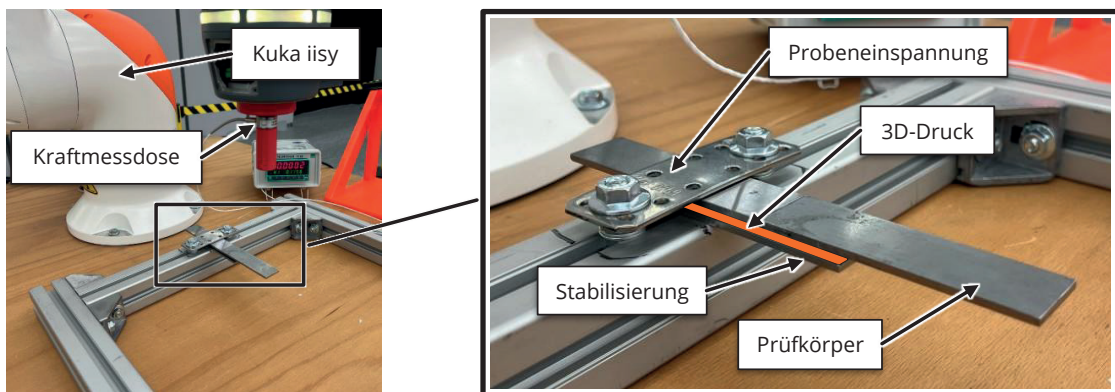


Abbildung 2: Roboterbasierter Prüfaufbau zur Bestimmung der Haftkräfte mit KUKA iisy, Kraftmessdose und Probenhalterung (Detailansicht mit Stabilisierung und Prüfkörper)

Ergebnisse

PETG erzielt als einziges Filament eine messbare Haftung auf geschliffenen und angerauten Oberflächen (Körnung 120 und 180). Die maximale Haftkraft beträgt 9,9 N bei 23 °C. Bei 100 °C sinkt die Haftkraft jedoch ab, sodass sich die Proben ohne äußere Krafteinwirkung lösen. Zudem treten thermische Deformationen auf, sodass PETG für den angestrebten Anwendungsfall ungeeignet ist.

ASA weist eine höhere Temperaturstabilität auf und erreicht bei 100 °C noch messbare Haftkräfte. Ohne Haftvermittler ist die Anbindung an die Metalloberfläche jedoch unzureichend, die Proben lösen sich bereits bei der Entnahme. Mit Metallkleber werden maximale Haftkräfte von 92,1 N bei 100 °C erzielt.

PA12+CF15 verfügt über die besten mechanischen Eigenschaften der untersuchten Filamente (Zugfestigkeit ca. 120 MPa, Temperaturbeständigkeit bis 170 °C), zeigt jedoch die geringste Eigenhaftung [5]. Unabhängig von der Oberflächenbearbeitung bildet sich ohne Haftvermittler keine Verbindung zum Metall. Mit Metallkleber werden die höchsten Haftkräfte aller untersuchten Proben erzielt (160,6 N bei 23 °C). Der Einsatz von 2K-Kleber führt in Kombination mit der rauen, faserverstärkten Filamentoberfläche zu 35 N. Plasmaaktivierung verbessert zwar die Benetzung, ermöglicht aber keine dauerhaft belastbare Verbindung.

Alle untersuchten Filamente zeigen eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit: Bei 23 °C werden die höchsten Haftkräfte erreicht, während bei 100 °C eine Reduktion von bis zu 50 % auftritt. Ursache sind thermisch bedingte Materialerweichung sowie veränderte Grenzflächeninteraktionen. Unabhängig vom eingesetzten Filament konnte ohne Haftvermittler keine belastbare Anhaftung erzielt werden, da das Extrudat zu zähflüssig ist, um in die angeraute Oberfläche einzudringen und sich mechanisch zu verzahnen. Eine Erhöhung der Verarbeitungstemperatur führte hierbei zu keiner nennenswerten Verbesserung.

Fazit und Ausblick

Die Haftungseigenschaften von 3D-gedruckten Filamenten auf Metall sind stark vom eingesetzten Material, der Temperatur sowie dem Einsatz geeigneter Haftvermittler abhängig. PETG ist aufgrund der geringen Temperaturbeständigkeit und ausgeprägten Deformationen für den industriellen Einsatz ungeeignet. ASA weist eine bessere thermische Stabilität auf, erfordert jedoch zwingend zusätzliche Oberflächenbehandlungen oder Haftvermittler. Das faserverstärkte PA12+CF15 erreicht in Kombination mit Metallklebern die höchsten Haftkräfte, weist zugleich die besten mechanischen Eigenschaften auf und stellt damit die vielversprechendste Lösung für den vorgesehenen Anwendungsfall dar.

Im nächsten Schritt wird das Verfahren auf ein robotergestütztes Mehrachs-System übertragen, um den Prozess auch für komplexe Geometrien nutzbar zu machen. Darüber hinaus soll ein mechanischer Haftungsmechanismus entwickelt werden, der temperaturbedingte Haftkraftverluste kompensiert und eine dauerhaft belastbare Verbindung sicherstellt. Langfristig eröffnet dies die Möglichkeit, additiv gefertigte Spritzgussformen in industriellen Anwendungen effizienter und flexibler einzusetzen.

Referenzen

- [1] G. Schuh, G. Bergweiler, G. Lukas, und J. A. Abrams, „Feasibility and Process capability of polymer additive injection molds with slide technology“, *Procedia CIRP*, Bd. 93, S. 102–107, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.03.057
- [2] D. Jimenez-Acosta, „Comparison of additive manufacturing technologies for injection molding“, Juni 2023, Zugegriffen: 19. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://hdl.handle.net/10171/66665>
- [3] C.-C. Kuo und X.-Y. Pan, „Development of a Rapid Tool for Metal Injection Molding Using Aluminum-Filled Epoxy Resins“, *Polymers*, Bd. 15, Nr. 17, S. 3513, Jan. 2023, doi: 10.3390/polym15173513.
- [4] „Additive-based, hybrid manufacturing of advanced, rapid tooling for metal forming“, SMART. Zugegriffen: 19. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.smartureka.com/projects/additive-based-hybrid-manufacturing-of-advanced-rapid-tooling-for-metal-forming/>
- [5] Fiberlab S.A., „Technical Data Sheet Nylon PA12+CF15“. Zugegriffen: 7. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://fiberlogy.com/wp-content/uploads/2022/12/FIBERLOGY_NYLON_PA12CF15_TDS.pdf