

Untersuchung der Bauteilhaftung in der Fused Filament Fabrication

Investigation of part adhesion in fused filament fabrication

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Genehmigte Dissertation von Daniel Laumann aus Buchen (Odenwald)

Tag der Einreichung: 21.02.2023, Tag der Prüfung: 17.05.2023

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold
Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Maschinenbau
Institut für Druckmaschinen
und Druckverfahren
Industrial Printing

Untersuchung der Bauteilhaftung in der Fused Filament Fabrication
Investigation of part adhesion in fused filament fabrication

Genehmigte Dissertation von Daniel Laumann

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Tag der Einreichung: 21.02.2023
Tag der Prüfung: 17.05.2023

Darmstadt

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-266459
URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/26645>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,
E-Publishing-Service der TU Darmstadt
<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>
tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:
Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Erklärungen laut Promotionsordnung

§8 Abs. 1 lit. c PromO

Ich versichere hiermit, dass die elektronische Version meiner Dissertation mit der schriftlichen Version übereinstimmt.

§8 Abs. 1 lit. d PromO

Ich versichere hiermit, dass zu einem vorherigen Zeitpunkt noch keine Promotion versucht wurde. In diesem Fall sind nähere Angaben über Zeitpunkt, Hochschule, Dissertationsthema und Ergebnis dieses Versuchs mitzuteilen.

§9 Abs. 1 PromO

Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Dissertation selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen verfasst wurde.

§9 Abs. 2 PromO

Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, 21.02.2023

Daniel Laumann

Kurzfassung

Fused Filament Fabrication (FFF) spielt eine immer wichtigere Rolle in der Industrie und ist mittlerweile in zahlreichen Branchen ein etabliertes Verfahren. Dennoch treten vor allem bei der Verarbeitung von Hochleistungspolymeren immer noch Prozessfehler wie ein ungewolltes Ablösen des zu fertigenden Bauteils von der Bauplattform auf. Solche Prozessfehler werden durch eine mangelnde Adhäsion zwischen Bauteil und Bauplattform verursacht. Obwohl Adhäsion eine zentrale Bedeutung im FFF-Prozess spielt, erfolgte bisher kaum eine wissenschaftliche Betrachtung dieses Aspekts. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Dissertation grundlegende Zusammenhänge im FFF-Prozess untersucht.

Um die auftretenden Adhäsionskräfte quantifizieren zu können wurde zuerst ein auf DIN EN 28510-1 basierendes Messverfahren entwickelt und ein entsprechender Prüfstand aufgebaut. Mit diesem Messverfahren wurden verschiedene Parameter identifiziert, die die Adhäsion im FFF-Prozess beeinflussen. Dazu zählt das Material der Bauplattform, die Verarbeitungstemperaturen, die Druckgeschwindigkeit sowie die Dicke der ersten Schicht, der Feuchtegehalt des Druckmaterials und die Kontaktzeit.

Zwischen diesen Einflussgrößen bestehen Wechselwirkungen. Dies bedeutet, dass das Verändern einer Größe den Zusammenhang zwischen der Bauteiladhäsion und einer zweiten Größe ändert. So kann eine Steigerung der Düsentemperatur um 40 °C eine Änderung der gemessenen Adhäsionskraft um rund 100 N bewirken. Wird die selbe Messreihe aber auf einem anderen Bauplattformmaterial oder bei einer anderen Düsentemperatur wiederholt, zeigt eine Steigerung der Düsentemperatur praktisch keine Wirkung mehr. Das Identifizieren und Charakterisieren solcher Wechselwirkungen zwischen den oben aufgelisteten Einflussgrößen ist ebenfalls Gegenstand dieser Arbeit.

Die Kenntnisse, welche Prozessparameter eine Rolle spielen und wie diese miteinander zusammenhängen, werden zu einer Klassifizierung und einem Ranking zusammengeführt. Dies erlaubt Anwendern eine gezielte Verbesserung der Prozessparameter im Falle einer zu geringen Adhäsion.

Durch die gewonnenen Erkenntnisse können auch Rückschlüsse auf die wirkenden Adhäsionsmechanismen gezogen werden: Für die Adhäsion zwischen Borosilikatglas und Pertinax als Bauplattformmaterial und dem verdruckten Material wird vorgeschlagen, dass Wasserstoffbrückenbindungen eine zentrale Rolle spielen. Wird hingegen Messing als Bauplattformmaterial genutzt, deuten die Ergebnisse dieser Dissertation auf eine Ionenbindung hin. Diese entsteht nach einer chemischen Reaktion der auf der Messingoberfläche befindlichen Oxide und funktionellen Gruppen des zu verdruckenden Kunststoffes. Mit diesen neuen Erkenntnissen können Anwender nun je nach zu verdruckendem Material ein optimales Bauplattformmaterial auswählen ohne zuvor die Eignung in Parameterstudien untersuchen zu müssen.

Abstract

FFF is playing an increasingly important role in industry and is now an established process in numerous sectors. Nevertheless, process errors such as unintentional detachment of the part to be printed from the build platform still occur, especially in the processing of high-performance polymers. Such process errors are caused by a lack of adhesion between the part and the build platform. Although adhesion plays a central role in the FFF-process, this aspect has hardly been considered scientifically so far. For this reason, fundamental relationships in the FFF-process are investigated in this dissertation.

In order to quantify the adhesive forces that occur, a measurement method based on DIN EN 28510-1 was first developed and a corresponding measurement device. This measurement method was used to identify various parameters that influence adhesion in the FFF-process. This includes the material of the build surface, the processing temperatures, the printing speed as well as the first layer's thickness, the moisture content of the printing material and the contact time.

There are interactions between these process parameters. This means that changing one parameter changes the relationship between the part adhesion and a second parameter. For example, an increase of the nozzle temperature by 40 °C can cause a change in the measured adhesion force by about 100 N. However, if the same series of measurements is repeated on a different build surface material or at a different build surface temperature, increasing nozzle temperatures will have nearly no effect. The identification and characterization of such interactions is also the subject of this work.

The knowledge of which process parameters play a role and how they are interrelated is combined to form a classification and ranking. This allows users to make targeted improvements to the process parameters in the event that adhesion is too low.

The knowledge gained also allows conclusions to be drawn about the acting adhesion mechanisms. For the adhesion between borosilicate glass and pertinax as build surface material and the printed material, it is suggested that hydrogen bonding plays a central role. If, on the other hand, brass is used as the build surface material, the results of this dissertation indicate that ionic bonding is involved. This is formed after a chemical reaction of the oxides present on the brass surface and functional groups of the plastic to be printed. With these new findings, users can now select an optimum build platform material depending on the material to be printed without having to investigate its suitability in parameter studies beforehand.

Inhaltsverzeichnis

1	Publikationsverzeichnis	1
2	Darstellung zum Eigenanteil an den Veröffentlichungen	3
3	Abkürzungsverzeichnis	5
4	Einleitung	7
4.1	Motivation	7
4.2	Grundlagen	8
4.2.1	Fused Filament Fabrication	8
4.2.2	Adhäsionsmechanismen	9
4.3	Wissenschaftliche Fragestellung	10
4.4	Zusammenfassung Veröffentlichung I	12
4.4.1	Beschreibung des neuen Messgeräts und Versuchsdurchführung	12
4.4.2	Validierung	13
4.5	Zusammenfassung Veröffentlichung II	15
4.5.1	Einfluss der Dicke der ersten Schicht	15
4.5.2	Einfluss der Druckgeschwindigkeit	18
4.5.3	Einfluss der Bauplattformtemperatur	19
4.5.4	Einfluss der Düsentemperatur	20
4.6	Zusammenfassung Veröffentlichung III	22
4.6.1	Einfluss der Kontaktzeit	22
4.6.2	Mögliche Adhäsionsmechanismen	24
4.7	Zusammenfassung Veröffentlichung IV	25
4.7.1	Filamentbox	26
4.7.2	Charakterisierung des Materials	26
4.7.3	Einfluss der Feuchtigkeit	26
4.8	Fazit	27
5	Synthese	29
5.1	Messung der Bauteilhaftung	29
5.2	Wechselwirkungen und Relevanz der Prozessparameter	29
5.2.1	Definition des Begriffs Wechselwirkung	30
5.2.2	Identifizierte Wechselwirkungen	31
5.2.3	Kategorisierung der Prozessparameter	32
5.2.4	Relevanz der Prozessparameter	36
5.3	Mögliche Ursachen der Adhäsion im FFF-Prozess	38
5.4	Zusammenfassung und Ausblick	40
6	Veröffentlichung I	47

7	Veröffentlichung II	49
8	Veröffentlichung III	51
9	Veröffentlichung IV	53

1 Publikationsverzeichnis

Die nachfolgende Liste gibt einen Überblick über alle Veröffentlichungen des Autors dieser Synopse, darunter Konferenz- und Zeitschriftenbeiträge sowie die Bachelor- und Masterarbeit. Die vier Publikationen, die Gegenstand dieser Synopse sind, sind fett gedruckt und als Veröffentlichung I-IV gekennzeichnet.

Daniel Laumann; Additive Fertigung mikroporöser Strukturen mittels Fused Deposition Modeling; Bachelor-Thesis; 2016; TU Darmstadt

Vinzenz Nienhaus, Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam; Herstellung von optimierten Mikrostrukturen mittels Schmelzschichtung; formnext - International exhibition and conference on the next generation of manufacturing technologies, Frankfurt, Deutschland, 15.-18. November 2016, [Konferenzveröffentlichung]

Vinzenz Nienhaus, Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam; Challenges in the fabrication of optimized microstructures via Fused Layer Modeling; 43rd International Research Conference of IARIGAI, Toronto, Canada, August 24 - 27, 2016, [Konferenzveröffentlichung]

Daniel Laumann; Qualifizierung eines additive Extrusionsdruckers zur Fertigung von Bauteilen aus Polyetheretherketon; Master-Thesis; 2019; TU Darmstadt

Daniel Laumann, Vinzenz Nienhaus, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam; Hybride Fertigung von Flachdichtungen mittels Fused Filament Fabrication; Fachtagung Werkstoffe und additive Fertigung der deutschen Gesellschaft für Materialkunde, Potsdam, Deutschland, 13. - 15. Mai 2020; [Konferenzveröffentlichung]

Veröffentlichung I: Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam; Device for measuring part adhesion in FFF process; HardwareX; Januar 2022; DOI: 10.1016/j.ohx.2022.e00258

Veröffentlichung II: Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam, Andreas Blaeser; Interaction of printing speed and temperature settings on the build plate adhesion of 3D printed polylactide acid parts; The Journal of Adhesion; Juni 2022; <https://doi.org/10.1080/00218464.2022.2093640>

Veröffentlichung III: Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam; Parameters influencing the temporal behavior of adhesion on the build plate in fused filament fabrication; The Journal of Adhesion; Oktober 2023; <http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2023.2268538>

Veröffentlichung IV: Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam; Influence of printing material moisture on part adhesion in fused filament fabrication; The Journal of Adhesion; Veröffentlichung akzeptiert aber noch nicht publiziert. Oktober 2023; <http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2023.2268531>

Heike Gute, Daniel Laumann; Technische Universität Darmstadt (Urheber); Produktschutz von additiv gefertigten Bauteilen mittels prozessintegrierter Kennzeichnung durch spez. Bauplattformen; Aktenzeichen 102021113603.2; Deutsches Patent- und Markenamt; 2022; <https://register.dpma.de/DPMAreger/pat/register?AKZ=1020211136032>; [Patentanmeldung]

2 Darstellung zum Eigenanteil an den Veröffentlichungen

Nachfolgend werden die Arbeitsanteile der einzelnen Autoren an den vier Veröffentlichungen aufgeschlüsselt, aus denen diese Dissertation besteht. Dies erfolgt nach dem CRediT-System (Contributors Roles Taxonomy [1])

Veröffentlichung I: Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam; Device for measuring part adhesion in FFF process; HardwareX; Januar 2022; DOI: 10.1016/j.ohx.2022.e00258

Daniel Laumann: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Writing Original Draft, Writing Review and Editing, Visualization

Dieter Spiehl: Resources, Writing Review and Editing, Supervision, Funding acquisition, Investigation

Edgar Dörsam: Resources, Writing Review and Editing, Supervision, Funding acquisition

Veröffentlichung II: Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam, Andreas Blaeser; Interaction of printing speed and temperature settings on the build plate adhesion of 3D printed polylactide acid parts; The Journal of Adhesion; June 2022; <https://doi.org/10.1080/00218464.2022.2093640>

Daniel Laumann: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Writing Original Draft, Writing Review and Editing, Visualization

Dieter Spiehl: Resources, Writing Review and Editing, Supervision, Funding acquisition, Investigation

Edgar Dörsam: Resources, Writing Review and Editing, Supervision, Funding acquisition

Andreas Blaeser: Writing Review and Editing

Veröffentlichung III: Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam; Parameters influencing the temporal behavior of adhesion on the build plate in fused filament fabrication; The Journal of Adhesion; Oktober 2023; <http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2023.2268538>

Daniel Laumann: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Writing - Original Draft, Writing - Review and Editing, Visualization

Dieter Spiehl: Resources, Investigation, Writing - Review and Editing, Supervision, Funding acquisition

Edgar Dörsam: Resources, Writing - Review and Editing, Supervision, Funding acquisition

Veröffentlichung IV: Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam; Influence of printing material moisture on part adhesion in fused filament fabrication; The Journal of Adhesion; Oktober 2023; <http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2023.2268531>

Daniel Laumann: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Writing - Original Draft, Writing - Review and Editing, Visualization

Dieter Spiehl: Resources, Investigation, Writing - Review and Editing, Supervision, Funding acquisition

Edgar Dörsam: Resources, Writing - Review and Editing, Supervision, Funding acquisition

3 Abkürzungsverzeichnis

FFF Fused Filament Fabrication

MEX Material Extrusion

PEEK Polyetheretherketon

PPSU Polyphenylsulfon

ABS Acrylnitril-Butadien-Styrol

PLA Polylactide

PC Polycarbonat

PE Polyethylen

PMMA Polymethylmethacrylat

PVA Polyvinylalkohol

PA Polyamid

PTFE Polytetrafluorethylen

PP Polypropylen

STL Standard-Tessellation-Language

IUPAC International Union of Pure and Applied Chemistry

SLA Stereolithografie

PMMA Polymethylmethacrylat

4 Einleitung

In der nachfolgenden Einleitung werden zuerst einige zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen Grundlagen erläutert. Anschließend wird die übergeordnete wissenschaftliche Fragestellung hergeleitet, die die einzelnen Veröffentlichungen dieser kumulativen Dissertation verbindet. Zudem wird dargelegt, welche Veröffentlichung welche Aspekte dieser Fragestellung beantwortet.

4.1 Motivation

Additiven Fertigungsverfahren zeichnen sich durch enorme Freiheit bei der Gestaltung der zu druckenden Bauteile aus. Bisher unmöglich zu fertigende Geometrien können wirtschaftlich selbst in kleinsten Stückzahlen hergestellt werden [2]. Leichtbau durch bionische Strukturen [3], patientenindividuell angepasste Implantate [4] oder On-Demand Produktion von Ersatzteilen [5] werden erst durch diese neuen Fertigungsverfahren ermöglicht. Dadurch findet additive Fertigung eine immer weitere Verbreitung in zahlreichen Branchen [6, 7]. Sicher eines der bekanntesten Verfahren ist dabei Fused Filament Fabrication (FFF). Maschinen, die nach diesem Prinzip arbeiten, sind in der Lage viele Materialien zu verarbeiten und dabei vergleichsweise einfach aufgebaut, kostengünstig [5, 2]. Durch diese Vorteile wird Fused Filament Fabrication nicht nur von Privatanwendern immer häufiger genutzt, sondern auch zur Herstellung von Flugzeugbauteilen [6] bis hin zu medizinischem Knochenersatz verwendet [8].

Um einen definierten Materialauftrag über den gesamten Prozess hinweg zu gewährleisten, muss das Bauteil sicher auf der Bauplattform fixiert sein. Daher ist der adhäsive Kontakt zwischen Bauteil und Bauplattform ein zentraler Punkt im FFF-Verfahren. Dennoch treten insbesondere bei der Verarbeitung von Hochleistungskunststoffen wie Polyetheretherketon (PEEK) häufig Prozessfehler auf [9]. Bedingt durch die Abkühlung und dem resultierenden thermischen Schrumpfen des Materials nach dem Aufbringen auf die Bauplattform bauen sich Eigenspannungen auf. Werden diese zu stark, kann sich das Bauteil verformen und sich von der Bauplattform ablösen. Eine solche Verformung des Bauteils wird Warping genannt [10]. Tritt Warping auf, sind die Bauteile in der Regel Ausschuss, da die tatsächlich gefertigte Geometrie von der Zielgeometrie abweicht [11]. Löst sich das Bauteil im Prozess bedingt durch Warping vollständig von der Bauplattform, so ist kein definierter Materialauftrag mehr möglich und der Prozess scheitert. Aus diesem Grund ist der adhäsive Kontakt zwischen zu fertigendem Bauteil und der Bauplattform entscheidend für eine sichere Prozessführung [12, 13].

Dennoch ist die Adhäsion zwischen Bauteil und Bauplattform bisher kaum wissenschaftlich untersucht. Wie die Prozessparameter verändert werden müssen, um die Bauteilhaftung zu verbessern oder warum das Bauteil auf der Bauplattform haftet sind bisher nahezu unbeantwortete Fragen. Genau hier setzt die vorliegende Dissertation an. Zuerst wird ein Messverfahren zusammen mit einem entsprechenden Messgerät entwickelt und validiert, sodass sich die Bauteilhaftung quantifizieren lässt. Damit wird der Einfluss von verschiedenen Prozessparametern auf die Bauteilhaftung ermittelt. Auch die für die Adhäsion verantwortlichen Mechanismen können mit diesen Erkenntnissen genauer verstanden werden.

4.2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis der vorliegenden Dissertation notwendigen Grundlagen erläutert. Dies umfasst zum einen die Funktion und den Aufbau eines FFF-Systems und zum anderen eine Beschreibung der wichtigsten Adhäsionsmodelle.

4.2.1 Fused Filament Fabrication

Nachfolgend soll die Funktionsweise und der Workflow eines FFF-Systems erläutert werden. Der Workflow im FFF-Prozess wird dabei in die drei Teilschritte Preprocess, In-Process und Postprocess gegliedert [14]. Alle Maschinenkomponenten werden nachfolgend entsprechend DIN EN ISO/ASTM 52900:2017 Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie [15] benannt. Die Adhäsion zwischen dem zu fertigenden Bauteil und der Bauplattform wird in dieser Dissertation auch als Bauteilhaftung bezeichnet.

Preprozess

Am Anfang der Prozesskette steht ein dreidimensionales Modell, welches z.B. mittels 3D-Scan erzeugt, aus einer Datenbank stammen oder mithilfe einer Software erstellt werden kann. Die so erzeugten 3D-Daten werden meist mit proprietären Dateiformaten beschrieben, weshalb in der Regel eine Konvertierung in das sogenannte Standard-Tessellation-Language (STL)-Format erfolgt, welches als Schnittstellenformat dient. Dabei werden die 3D-Daten des nativen Formates mithilfe eines Dreiecksnetzes approximiert und nur die Koordinaten der Dreieckspunkte sowie die Flächennormale jeder Dreiecksfacette gespeichert. Dieser Schritt wird Triangulierung genannt. Aus den approximierten Geometriedaten werden im Slice-Prozess oder auch Slicing die Werkzeugpfade für die 3D-Drucker generiert: Dazu wird eine Slicer genannte Software genutzt, die die Geometriedaten in Schichten aufteilt. Anhand vom Benutzer zu definierender Parameter wie Schichtdicke, Bauplattformtemperatur oder auch Druckgeschwindigkeit, berechnet der Slicer im Anschluss für jede Schicht die Werkzeugpfade und erstellt so eine Liste mit Befehlen für die Werkzeugmaschine. [2, 16, 17]

In-Prozess

Ein FFF-System verarbeitet thermoplastische Kunststoffe, die als Draht vorliegen (Abb. 4.1 Nr. 1). Eine Fördereinheit (Nr. 2) bewegt diesen Draht weiter vor in den Extrusionskopf (Nr. 3). Dort wird der Thermoplast erhitzt, verflüssigt und aus einer Düse extrudiert. Der extrudierte Kunststoff wird in der ersten Schicht auf eine Bauplattform (Nr. 5) aufgetragen. Der dazu notwendige Volumenstrom an Druckmaterial wird von der Steuerelektronik des Druckers berechnet. Um z.B. fertigungsbedingte Ungenauigkeiten im Drahtdurchmesser auszugleichen, kann der Anwender eine sogenannte Flussrate einstellen. Dies ist ein Faktor, mit dem der errechnete Volumenstrom multipliziert wird. Alle weiteren Schichten werden auf die zuvor extrudierte Lage aufgebracht und verbinden sich mit dieser. So entsteht nach und nach ein Bauteil (Nr. 4). [2, 16, 17]

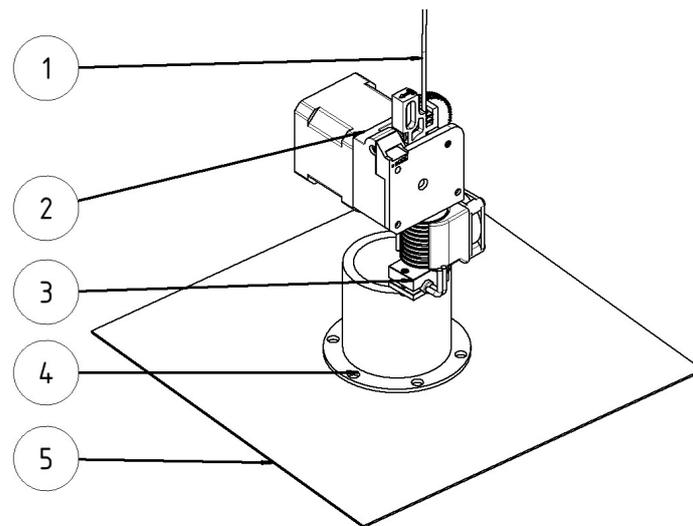


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau eines FFF-Systems. Nr. 1: drahtförmiger Thermoplast, Nr. 2: Förderreinheit für den Drahtvorschub, Nr. 3: Extrusionskopf, Nr. 4: zu druckendes Bauteil, Nr. 5: Bauplattform

Postprozess

Unter Postprozess werden alle Arbeitsschritte verstanden, die nach Ende des Druckvorganges noch ausgeführt werden müssen, um ein funktionsfähiges Bauteil zu erhalten. Darunter fällt z.B. das Entfernen von Supportstrukturen, die zur Fertigung von Überhängen benötigt werden, aber auch eventuelle spannende Nachbearbeitungen. [2, 16, 17]

4.2.2 Adhäsionsmechanismen

Reale Adhäsionskräfte sind nie auf nur einen einzelnen Wirkmechanismus zurückzuführen, sondern setzen sich in der Regel aus mehreren, sich überlagernden Kräften zusammen. In der Literatur werden mehrere grundlegende Mechanismen beschrieben, die zusammen die tatsächlich messbare Adhäsionskraft bilden. Diese Grundlagen werden nachfolgend erläutert. [18, 19]

Mechanisches Adhäsionsmodell

Das Mechanisches Adhäsionsmodell geht von einer mechanischen Verkrallen der Fügepartner ineinander aus. Da eine reale Oberfläche nicht glatt ist, sondern Poren, Risse und andere Unebenheiten aufweist, können sich mikroskopische Hinterschneidungen bilden. Dadurch entsteht ein Formschluss, der die Fügepartner verbindet. [18, 19]

Polarisationstheorie

Nach der Polarisationstheorie können Adhäsionskräfte auch durch intermolekulare Wechselwirkungen, den sog. Van-der-Waals-Kräften, entstehen [19]. Dabei können drei verschiedene Fälle unterschieden werden: Im ersten Fall haben beide Adhäsionspartner dauerhafte Dipole in ihren Molekülen, wie z.B. eine Hydroxylgruppe. Diese permanenten Dipole können nun eine sog. Wasserstoffbrückenbindung aufbauen. Dabei ziehen die stark elektronegativen Teile verschiedener Moleküle das selbe Wasserstoffmolekül an.

Im zweiten Fall besitzt nur ein Adhäsionspartner einen permanenten Dipol. Dieser induziert im Partnermolekül einen Gegendipol, sodass sich statische Anziehungskräfte ausbilden. Diese Adhäsionskräfte sind schwächer als Wasserstoffbrückenbindungen. Sie spielen vor allem bei der Adhäsion zwischen Metalloberflächen und polaren organischen Materialien eine Rolle.

Im dritten Fall verfügt kein Adhäsionspartner über einen permanenten Dipol, jedoch sind alle beteiligten Moleküle polarisierbar. Durch statistische Änderungen der Position Bindungselektronen treten kurzzeitig schwache Dipole in den Molekülen auf, die zu statischen Anziehungskräften zwischen den Adhäsionspartnern führen. Derartig hervorgerufene Adhäsionskräfte sind wesentlich schwächer als Wasserstoffbrückenbindungen. [18, 19]

Diffusionstheorie

Polymerwerkstoffe werden aus Molekülketten gebildet, die nicht starr im Materialverbund eingebettet sind, sondern eine gewisse Beweglichkeit haben. Werden zwei Polymerwerkstoffe kontaktiert, können Moleküle des einen Partners in den anderen hinein diffundieren. Hierbei bilden die amorphen Bereiche der Polymere Verschlaufungen, die die Fügepartner miteinander verbinden und so eine Adhäsionskraft erzeugen. Die Stärke dieser Adhäsionskraft hängt dabei von Molekularmasse, Kristallinität und zahlreichen weiteren Faktoren ab [18, 19]. Zudem wurde beobachtet, dass Metallatome in Polymere eindiffundieren und ebenfalls eine Adhäsionskraft ausbilden können.

[18, 19, 20]

Chemisorption

An Grenzflächen können auch chemische Bindungen entstehen. Dadurch sind Adhäsionskräfte, die durch Chemisorption hervorgerufen werden deutlich stärker, als jene, die durch die oben genannten Wirkmechanismen hervorgerufen werden [19]. Zudem benötigt eine Bindung durch Chemisorption oftmals eine Aktivierungsenergie um zu entstehen und ist nicht reversibel. Es ist auch möglich, dass Kunststoffe und Metalle (bzw. Metalloxide) durch chemische Bindungen aneinander haften. Ein Beispiel ist die Haftung von Polymethylmethacrylat (PMMA) auf einer Aluminiumoberfläche. Auf dieser Metalloberfläche befinden sich Metalloxide, die auch Hydroxylgruppen aufweisen. Zwischen diesen Hydroxylgruppen und den Ester-Gruppen der PMMA-Moleküle findet eine chemische Reaktion statt, die zur Bildung eines Aluminiumions und eines Carboxylations führt. Diese gehen dann eine Ionenbindung ein.

[18, 19, 21]

4.3 Wissenschaftliche Fragestellung

In diesem Kapitel wird zuerst der Stand der Forschung bezüglich der Haftung von Bauteilen im FFF-Prozess vorgestellt und daraus die wissenschaftliche Fragestellung dieser Dissertation hergeleitet. Eine wissenschaftliche Untersuchung der Adhäsion zwischen Bauteil und Bauplattform wurde von Kujawa [22] durchgeführt. Dabei wurde die Bauteilhaftung gemessen, indem Prüfkörper aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) auf eine Borosilikatglasplatte gedruckt und anschließend mittels einachsigen Zugversuch abgelöst wurden. Untersucht wurde dabei, wie sich unterschiedliche Verarbeitungstemperaturen, Druckgeschwindigkeiten, Schichtdicken sowie Flussraten auf die Bauteilhaftung auswirken. Dabei wurde festgestellt, dass viele Prozessparameter nur einen geringen Einfluss haben und nur die Flussrate die Bauteilhaftung relevant verändern kann. Als Hauptursache für die Haftung zwischen Bauteil und Bauplattform wird eine mechanische Adhäsion angenommen (siehe Kapitel 4.2.2). In weiteren Studien untersuchte Spörk [12, 13] ebenfalls die Adhäsion zwischen Bauteil und Bauplattform. Dabei wurde die Bauteilhaftung quantifiziert, indem einzelne Stränge auf eine Bauplattform

gedruckt, abgeschert und die wirkenden Kräfte gemessen wurden. Mit diesem Verfahren wurde ebenfalls der Einfluss von verschiedenen Prozessparametern wie den Verarbeitungstemperaturen oder der Schichtdicke auf die Bauteilhaftung bestimmt. Betrachtet wurde dabei ABS, Polylactide (PLA) oder Polypropylen (PP) als Druckmaterial, welches auf Bauplattformen aus Glas, PP und Polyimid aufgetragen wurde. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Kujawa wurde festgestellt, dass die Bauplattformtemperatur und die Dicke der ersten Schicht die wichtigsten Einflussparameter hinsichtlich der Bauteilhaftung sind. Als Ursache für die Adhäsion wurden teilweise Diffusionsprozesse vorgeschlagen. Für andere Materialkombinationen konnte ebenfalls eine mechanische Adhäsion beobachtet werden. Die Messmethoden zur Bestimmung der Bauteilhaftung beider vorangehend vorgestellten Studien prüfen bis zu einem Adhäsionsbruch des Bauteils. Dieser Adhäsionsbruch tritt dabei schlagartig über die gesamte Kontaktfläche auf. Warping im realen Druckprozess führt im Gegensatz dazu zu langsam fortschreitenden Adhäsionsbrüchen. Des Weiteren nutzen beide vorgestellten Studien uneinheitliche Prüfkörper, die keiner Norm entsprechen. Aus diesem Grund sollte ein neues Messverfahren zur Bestimmung der Bauteilhaftung entwickelt werden, das den im realen Druckprozess auftretenden Fehlern ähnlich ist und auf standardisierte Prüfkörpergeometrien zurückgreift. Durch eine derartige Standardisierung kann eine Vergleichbarkeit von Messergebnissen sichergestellt werden, die mit bisherigen Verfahren nicht gegeben ist. Die oben vorgestellten Studien geben einen ersten Überblick darüber, welche Prozessparameter einen Einfluss auf die Bauteilhaftung haben. Allerdings zeichnen die Studien kein einheitliches Bild darüber, wie stark sich eine Änderung der jeweiligen Prozessparameter auf die Bauteilhaftung auswirkt. Weitere Untersuchungen sind demnach notwendig um die Abhängigkeit der Bauteilhaftung von den Prozessparametern besser zu verstehen. Angesichts der Vielzahl an Prozessparametern im FFF-Verfahren ist festzustellen, dass bisher nur ein kleiner Anteil der Parameter auf ihren Einfluss auf die Bauteilhaftung untersucht wurde. Ebenfalls ungeklärt ist, ob es Wechselwirkungen zwischen den Parametern gibt. Unter einer solchen Wechselwirkung wird hier verstanden, dass das Variieren eines Prozessparameters den Einfluss eines Anderen auf die Bauteilhaftung verändert. Eine ausführlichere Definition wird in Kapitel 5.2.1 vorgestellt. Bisher unbekannt ist, aufgrund welcher Mechanismen die Adhäsion zwischen Bauteil und Bauplattform zustande kommt. Nur durch weitere Untersuchungen kann hier genauer bestimmt werden, welche Adhäsionsmodelle in Frage kommen. Kenntnisse über die Relevanz der Prozessparameter, ihren Wechselwirkungen untereinander und über die wirkenden Adhäsionsmechanismen würden es dem Anwender erlauben, eine mangelnde Bauteilhaftung gezielt zu beheben. Aufwändige Parameterstudien würden damit entfallen. Die beschriebene wissenschaftliche Fragestellung lässt sich für das FFF-Verfahren wie folgt zusammenfassen:

1. Wie kann die Bauteilhaftung möglichst aussagekräftig gemessen werden?
2. Welche Prozessparameter sind relevant für die Haftung?
3. Wie hängen die Prozessparameter zusammen?
4. Welche Mechanismen verursachen die Haftung?

Diese vier Fragen bilden die übergeordnete wissenschaftliche Fragestellung der vorliegenden Arbeit. Nachfolgend werden die einzelnen Veröffentlichungen aus denen diese kumulative Dissertation besteht, kurz umrissen. Hier wird dargelegt, welche einzelnen Aspekte der übergeordneten Fragestellung jede Publikation behandelt. Im Anschluss wird gezeigt, wie die vorgestellten Veröffentlichungen in ihrer Gesamtheit zur Beantwortung der formulierten Fragen beitragen.

4.4 Zusammenfassung Veröffentlichung I

Um die in Kapitel 4.3 formulierten Forschungsfragen beantworten zu können ist eine aussagekräftige Messung der Bauteilhaftung die Grundvoraussetzung. Nur so kann geklärt werden, ob ein Parameter Einfluss auf die Bauteilhaftung hat oder ob Wechselwirkungen mit anderen Parametern bestehen. Ebenfalls können mithilfe einer solchen Messung Rückschlüsse auf die wirkenden Adhäsionsmechanismen gezogen werden (siehe Kapitel 4.6). Damit bildet das in Veröffentlichung I beschriebene Messverfahren die Grundlage der hier vorliegenden Dissertation. Bisherige Methoden zur Messung der Haftung zwischen Bauplattform und Bauteil basieren wie in Kapitel 4.3 beschrieben auf einachsigen Zugversuchen oder auf Scherversuchen einzelner Stränge. Beide Methoden bilden die im tatsächlich auftretenden Fehler wie Warming nicht ab. Tritt Warming auf, beginnt das Bauteil ausgehend von einem Punkt zu delaminieren [11]. Ein schlagartiges Ablösen über die gesamte Kontaktfläche wie bei den eingangs beschriebenen Methoden tritt nicht auf. Aus diesem Grund muss ein Messverfahren entwickelt werden, dass die im realen Druckprozess auftretenden Versagensfälle möglichst gut abbildet. Ein in der Klebstoffindustrie verbreitetes Verfahren zur Messung von Adhäsionskräften sind 90°-Schälversuche. Hier wird ein Prüfkörper auf eine definierte Oberfläche geklebt, am Rand mit einer Zugkraft beaufschlagt und sukzessive abgelöst. Hierbei tritt ein Haftungsverlust ähnlich wie beim Warming im FFF-Prozess auf. In beiden Fällen startet die Delamination am Rand und schreitet über die gesamte Kontaktfläche fort. Aufgrund dieser Ähnlichkeit wurde der in DIN EN 28510-1 [23] beschriebene 90°-Schälversuch als Grundlage für eine neue Methode zur Messung der Bauteilhaftung gewählt. Nachfolgend wird nun beschrieben, wie genau das neu entwickelte Messverfahren funktioniert, wie das entsprechende Messgerät aufgebaut ist und es validiert wurde [24].

4.4.1 Beschreibung des neuen Messgeräts und Versuchsdurchführung

Wie eingangs beschrieben, beruht das neue Messverfahren auf einem 90°-Schälversuch, der gemäß Norm [23] mit einer Zugprüfmaschine durchgeführt wird. Um eine Messung möglichst nahe am realen Produktionsprozess durchführen zu können, wird daher ein FFF-System mit einer Zugprüfmaschine zusammengeführt (siehe Abb. 4.2).

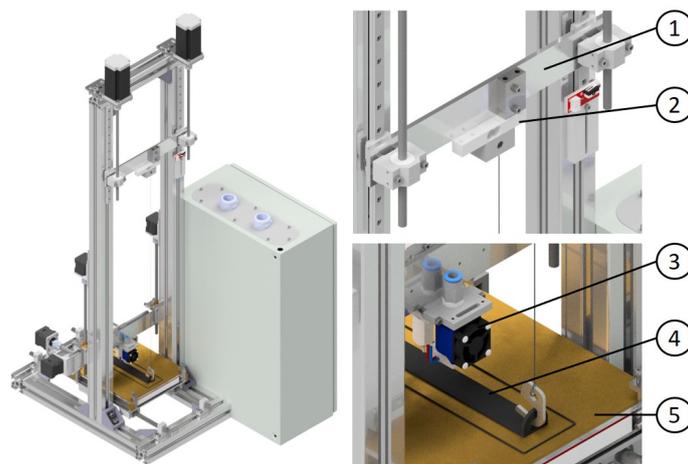


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des entwickelten Messgeräts. Nr. 1: Traverse der Zugprüfmaschine, Nr. 2: Wägezelle, Nr. 3: Extrusionskopf, Nr. 4: Gedruckter Prüfkörper, Nr. 5: Bauplattform

Eine Messung beginnt mit dem Druck eines Prüfkörpers. Die Geometrie der in dieser Dissertation genutzten Prüfkörper basiert auf der in DIN EN 28510-1 beschriebenen Form. Um Schälkräfte aufprägen zu können, wurde jedoch eine Öse ergänzt (siehe Abb. 4.3). Für eine Messung der tatsächlich gedruckten Dicke der ersten Schicht wird um jeden Prüfkörper ein einzelner Strang mitgedruckt. Dessen Dicke wird mittels Mikrometerschraube bestimmt.

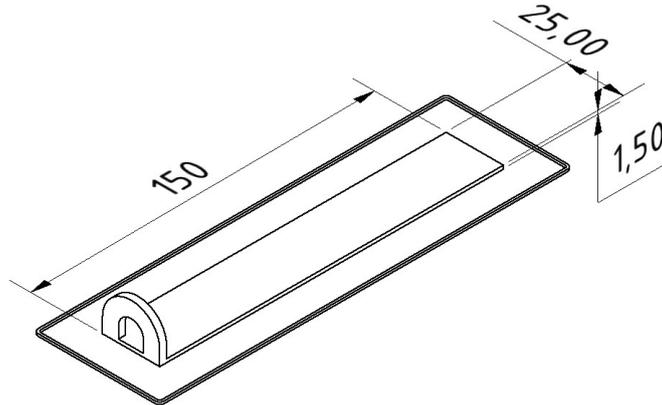


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der Prüfkörpergeometrie mit umliegendem Skirt (einzelner gedruckter Strang) zur Messung der Dicke der 1. Schicht. Alle Maße sind in Millimeter angegeben.

Nachdem der Prüfkörper (Abb. 4.2 Nr. 5) fertig gedruckt ist, wird eine Zeit von fünf Minuten verstreichen lassen, da die Bauteilhaftung zeitabhängig ist und ansonsten die Messergebnisse verfälscht werden (siehe auch Kapitel 4.4.2 und Veröffentlichung III). Nach der Wartezeit wird ein Haken in die Öse eingehängt und der Messvorgang gestartet. Im oberen Teil des Messgeräts befindet sich eine Zugprüfmaschine. Diese besteht aus einer auf Profilschienen geführten Traverse (Abb. 4.2 Nr. 1), die mittels zwei Spindeltrieben nach oben bewegt wird. An der Traverse ist eine Wägezelle (Abb. 4.2 Nr. 2) montiert, die mittels eines 600 mm langen Drahts mit dem Haken verbunden ist und die wirkenden Schälkräfte misst. Der Haken wird durch die Traversenbewegung während des Messvorganges nach oben bewegt und schält den Prüfkörper ab. Durch einen Arduino Uno und ein selbstgeschriebenes Python-Skript werden die wirkenden Kräfte während des Messvorganges zeitaufgelöst aufgezeichnet.

4.4.2 Validierung

Um möglichst zuverlässige Messwerte zu erhalten, wurde ein mehrstufiges Validierungsverfahren durchgeführt. Zuerst wurde die Präzision und Richtigkeit der einzelnen Sensoren bestimmt. Unter Richtigkeit wird hier die Differenz zwischen bekannten Werten und den von der Sensorik des Prüfstandes gemessenen Werten einer Prozessgröße verstanden. Als Präzision wird die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Wert innerhalb der Kontrollmessung der betrachteten Prozessgröße bezeichnet. Es wurden stets mehrere Kontrollmessungen durchgeführt, wobei die genaue Anzahl von Messgröße zu Messgröße variiert. Um die Qualität des entwickelten Messgerätes zu beurteilen, wurde stets die schlechteste gemessene Präzision herangezogen. [25]

Nachdem bestimmt wurde, wie gut die in der Software vorgegeben Prozessgrößen tatsächlich erreicht werden, wurde die Wiederholgenauigkeit der einzelnen Messungen überprüft. Zuletzt wurden bereits aus vorherigen Studien bekannte Zusammenhänge reproduziert.

Überprüfung der einzelnen Sensoren

Um reproduzierbare und belastbare Messungen sicherstellen zu können, wurde Präzision und Richtigkeit aller wichtigen Größen wie Bauplattformtemperatur, Druckgeschwindigkeit usw. sowie der Kraftmessung bestimmt. Als erstes wurden die Messung der Bauplattformtemperatur überprüft, indem mit einem kommerziellen Thermometer Vergleichsmessungen durchgeführt wurden. Außerdem wurden die Messwerte des Sensors für die Bauplattformtemperatur über einen Zeitraum von zehn Minuten gespeichert um die Schwankungen zu ermitteln. Die Präzision dieses Sensors wurde $\pm 0,4$ °C bestimmt, während die Richtigkeit bei rund 2 °C liegt. Da für den Extrusionskopf ein kommerzielles System der Firma E3D verwendet wurde, wird auf die Dokumentation des Herstellers verwiesen [26].

Präzision und Richtigkeit des Kraftsensors wurden überprüft, indem er mit einem bekannten Gewicht belastet wurde. Danach wurde bekanntes und gemessenes Gewicht miteinander verglichen. Dabei wurde eine Richtigkeit von $\pm 0,58$ Prozent gemessen und eine Präzision von unter 0,1 Prozent erreicht.

Die Positioniergenauigkeit wurde mittels Messuhr bestimmt. Da die gemessenen Abweichungen kleiner als die Messungenauigkeit von 0,01 mm sind, kann davon ausgegangen werden, dass Präzision und Richtigkeit kleiner als 0,01 mm sind.

Präzision und Richtigkeit der Druckgeschwindigkeit wurde ebenfalls bestimmt. Diese softwareseitig definierte Sollgeschwindigkeit wurde mit der tatsächlich gemessenen Geschwindigkeit verglichen. Präzision und Richtigkeit sind dabei stark von der Sollgeschwindigkeit abhängig. Für eine Sollgeschwindigkeit von 10 mm/s beträgt die Präzision ca. 3 Prozent bei einer Richtigkeit von 2 Prozent. Bei der Maximalgeschwindigkeit von 40 mm/s beträgt die Präzision und die Richtigkeit ca. 10 Prozent der in der Software vorgegeben Geschwindigkeit.

Der Abstand zwischen Düse und Bauplattform zu Beginn eines Druckprozesses bestimmt maßgeblich, wie dick die erste aufgetragene Schicht gedruckt wird. Dies wiederum hat einen Einfluss auf die erzielte Bauteilhaftung (siehe Abb. 4 in Veröffentlichung II). Daher wird bei jeder Messung ein einzelner Strang, der sogenannte Skirt, nahe um den Prüfkörper gedruckt und dessen Dicke mit einer Mikrometerschraube ermittelt. Zudem wird der Abstand zwischen Düse und Druckbett vor jedem Druck mit einem Sensor gemessen. Um die Variation der Dicke der ersten Schicht zu bestimmen, wurden 225 Skirts vermessen. Die Variation liegt bei rund 0.06 mm bei einer Solldicke von 0.5 mm bzw. bei rund 12 Prozent.

Da die erste Schichtdicke einen starken Einfluss auf die Bauteilhaftung hat, darf auch nach einem Wechsel der Bauplattform keine große Abweichung toleriert werden. Daher wurde untersucht, wie sich ein Wechsel der Bauplattform auf die Dicke der ersten Schicht auswirkt und ob die Sensorik eventuelle Abweichungen ausgleichen kann. Dazu wurden jeweils fünfzehn Probekörper samt Skirt auf zwei gleiche Bauplattformen aus Messing gedruckt und die Dicken der ersten Schichten bestimmt. Anschließend wurde jeweils der Mittelwert über die fünfzehn Einzelmessungen pro Bauplattform errechnet. Die zwei Mittelwerte weichen bei einer Solldicke von 0,5 mm um rund 0,03 mm bzw. sechs Prozent voneinander ab.

DIN EN 28510-1 fordert eine Richtigkeit der Kraftmessung von zwei Prozent und erlaubt Abweichungen von 0,5 mm bei der Prüfkörpergeometrie. Für die Trenngeschwindigkeit ist eine Richtigkeit von 5 mm/min bzw. zehn Prozent vorgeschrieben. Mit diesen Validierungsmessungen konnte gezeigt werden, dass die Sensorik des Prüfstands alle Messgrößen in der geforderten Qualität erfassen kann. Im nächsten Schritt wird daher überprüft, ob die Messmethode reproduzierbare Ergebnisse hinsichtlich der gemessenen Bauteilhaftung liefert.

Wiederholgenauigkeit

Nachdem sichergestellt wurde, dass alle Sensoren verlässliche Ergebnisse liefern, wurde die Reproduzierbarkeit der Messmethode überprüft.

In einem ersten Schritt wurde überprüft, ob die Messergebnisse zeitabhängig sind. Dabei wurden verschiedene Zeitspannen zwischen Ende des Druck des Probekörpers und Beginn des Schälversuchs verstreichen lassen. Für Messing als Druckplattform wurde dabei eine stetige Zunahme der gemessenen Bauteilhaftung um bis zu 30 Prozent nach zehn Minuten beobachtet. Damit wurde gezeigt, dass Messergebnisse nur vergleichbar

sind, wenn immer die selbe Zeit zwischen Ende des Druckvorgangs und Beginn des Schälversuchs liegt. Als Standard für alle folgenden Messungen wurde daher eine Zeit von fünf Minuten festgelegt. Dieser Zeitraum wurde gewählt, da je nach verwendetem Bauplattformmaterial auch nach mehreren Tagen keine Konvergenz der gemessenen Bauteilhaftung festgestellt wurde (siehe Kapitel 4.6).

Nachfolgend wurde untersucht, ob sich die gemessene Adhäsionskraft ändert, wenn mehrmals auf die selbe Stelle der Bauplattform gedruckt wird. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die gemessene Adhäsionskraft innerhalb der ersten sechs bis zehn Versuche ansteigt und danach um einen Mittelwert schwankt. Vergleichbare Ergebnisse können daher nur erzielt werden, wenn vor den Messungen mehrmals Prüfkörper gedruckt und verworfen werden. Nachfolgend wird mindestens zehnmal ein Prüfkörper gedruckt, bevor die Messergebnisse in die Auswertung einfließen.

Unter Beachtung der oben erläuterten Regeln wurde nun die Reproduzierbarkeit der Adhäsionsmessung bestimmt, indem auf zwei Messingplatten jeweils fünfzehn Messungen durchgeführt wurden. Die Mittelwerte aus den fünfzehn Einzelmessungen betragen 79,5 N und 75 N, was einer Abweichung von rund sechs Prozent entspricht.

Damit konnte gezeigt werden, dass das Adhäsionsverfahren reproduzierbare Messwerte liefert.

Reproduzieren bereits bekannter Ergebnisse

Als letzter Schritt zur Validierung des Verfahrens wurden Ergebnisse vorheriger Veröffentlichungen reproduziert. Aus den Untersuchungen von Spörk [13, 12] und Kujawa [22] ist bekannt, wie sich eine Erhöhung der Bauplattformtemperatur auf die Bauteilhaftung auswirkt: Steigende Temperaturen führen zunächst zu einer Zunahme der gemessenen Bauteilhaftung. Bei Temperaturen knapp oberhalb der Glasübergangstemperatur des verdruckten Polymers wird eine maximale Bauteilhaftung erreicht. Eine weitere Erhöhung der Bauplattformtemperatur führt nun zu geringeren Bauteilhaftungen.

Eine solche Versuchsreihe wurde mit dem neuen Messverfahren durchgeführt um zu prüfen, ob qualitativ der selbe Zusammenhang zwischen Bauplattformtemperatur und Bauteilhaftung festgestellt wird. Dazu wurden Prüfkörper aus PLA auf eine Bauplattform aus Messing bei verschiedenen Bauplattformtemperaturen gedruckt und anschließend deren Haftung gemessen. Auch hier wurde eine Zunahme der gemessenen Bauteilhaftung bis knapp oberhalb der Glasübergangstemperatur des Druckmaterials festgestellt. Bei einer weiteren Erhöhung der Bauplattformtemperatur wurde der erwartete Abfall der Bauteilhaftung gemessen. Qualitativ ist damit der selbe Zusammenhang zwischen Bauplattformtemperatur und Bauteilhaftung wie in den oben zitierten Veröffentlichungen festgestellt worden. Das in Veröffentlichung I beschriebene Messverfahren wird damit als valide betrachtet und für alle weiteren Veröffentlichungen dieser Dissertation genutzt.

4.5 Zusammenfassung Veröffentlichung II

In dieser Veröffentlichung wird untersucht, welche Relevanz die Dicke der ersten Schicht, die Düsen- und Bauplattformtemperatur sowie die Druckgeschwindigkeit im Hinblick auf die Bauteilhaftung haben. Zudem wird beschrieben, wie diese Parameter sich gegenseitig im Hinblick auf ihren Einfluss auf die Bauteilhaftung beeinflussen.

4.5.1 Einfluss der Dicke der ersten Schicht

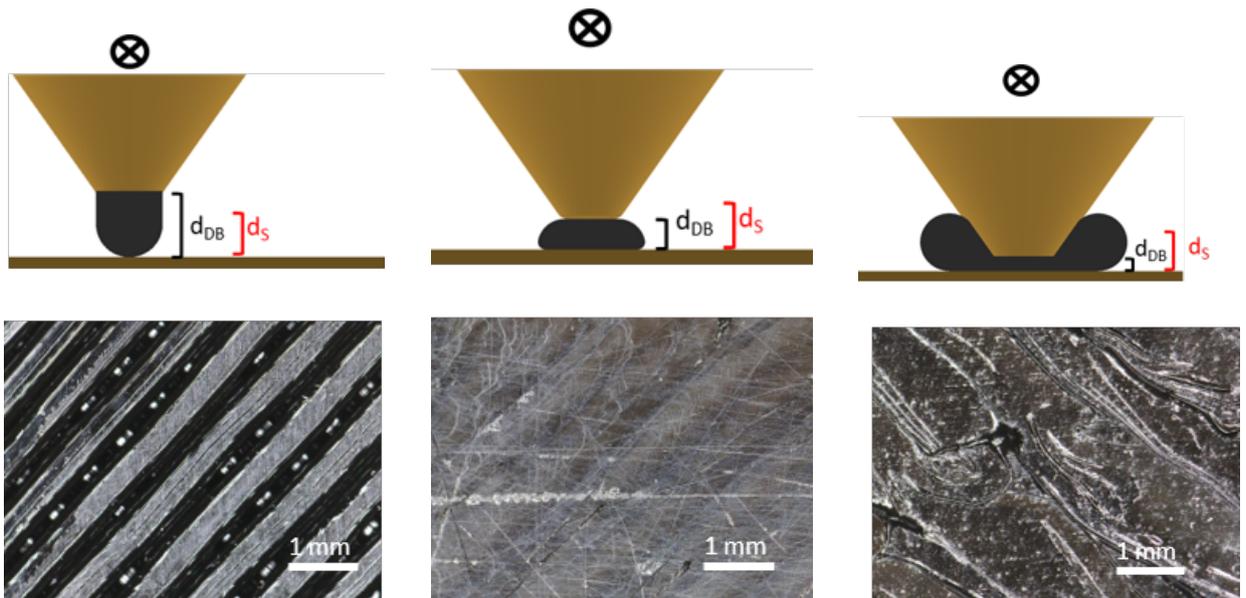
In der ersten Messreihe dieser Veröffentlichung wurde der Einfluss der Dicke der ersten Schicht auf die Bauteilhaftung untersucht. Dieser Parameter kann zwar im Slicer eingestellt werden, trotzdem hängt er auch stark vom anfänglichen Abstand zwischen Düse und Bauplattform ab (siehe Abb. 4.4). In dieser Messreihe wird daher die im Slicer eingestellte Schichtdicke konstant bei 0,5 mm belassen, während die gedruckte

Dicke der ersten Schicht variiert wird. Dies wird erreicht, indem der anfängliche Abstand zwischen Düse und Druckbett verändert wird. Der Volumenstrom an Material, der extrudiert werden soll, bleibt dabei konstant. Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, wird die tatsächlich gedruckte Dicke der ersten Schicht bestimmt, indem der um den Prüfkörper herum gedruckte Skirt mit einer Mikrometerschraube vermessen wird.

Eine maximale Bauteilhaftung wird erreicht, wenn die gedruckte Schichtdicke zwischen 70 % und 98 % der im Slicer eingestellten Schichtdicke beträgt. Der genaue Wert ändert sich dabei je nach verwendetem Bauplattformmaterial. Wird die gedruckte Schichtdicke ausgehend von diesem Maximum verkleinert oder vergrößert, sinkt die gemessene Bauteilhaftung um teilweise mehr als 50 %.

Nachfolgend wird auch eine mögliche Erklärung für das beobachtete Verhalten vorgestellt: Ist der Abstand zwischen Düse und Bauplattform größer als die im Slicer eingestellte Schichtdicke, wird das Material kaum auf die Bauplattform gepresst. Stattdessen wird es nur auf die Bauplattform abgelegt, sodass sich eine sehr kleine Kontaktfläche ausbildet (Abb. 4.4 a). Eine kleine Kontaktfläche führt wiederum zu einer kleinen Bauteilhaftung. Außerdem dringt das verdruckte Material kaum in die Mikrokavitäten der Bauplattform ein, sodass noch Lufteinschlüsse vorhanden sind. Diese können Startpunkte für mögliche Delaminationen sein. Wird im Gegensatz dazu der Abstand zwischen Düse und Bauplattform deutlich kleiner als die im Slicer eingestellte Schichtdicke gewählt, kann das Druckmaterial nur mit vergleichsweise hohem Druck aus der Düse extrudiert werden (Abb. 4.4 c). Dazu muss eine hohe Kraft von der Fördereinheit auf das Filament aufgebracht werden. Bei zu kleinen Schichtdicken kann die Fördereinheit keine zur Materialeextrusion ausreichende Kraft mehr aufbringen und der Materialfluss stoppt. Währenddessen bewegt sich aber der Extrusionskopf weiter, sodass eine Fehlstelle in der gedruckten Schicht erzeugt wird. Dies kann z.B. ein zu dünn gedruckter Strang sein, was zu einer reduzierten Kontaktfläche und damit zu einer reduzierten Bauteilhaftung führt.

Um diese Erklärung zu stützen, wurden Mikroskopbilder angefertigt, die die verschiedenen Strangformen zeigen. Sowohl bei kleinen als auch bei großen gedruckten Schichtdicken sind die reduzierten Kontaktflächen zu erkennen.



(a) Die Düse ist zu weit weg von der Bauplatzform

(b) Die Düse hat genau den richtigen Abstand zum Bauplatzform

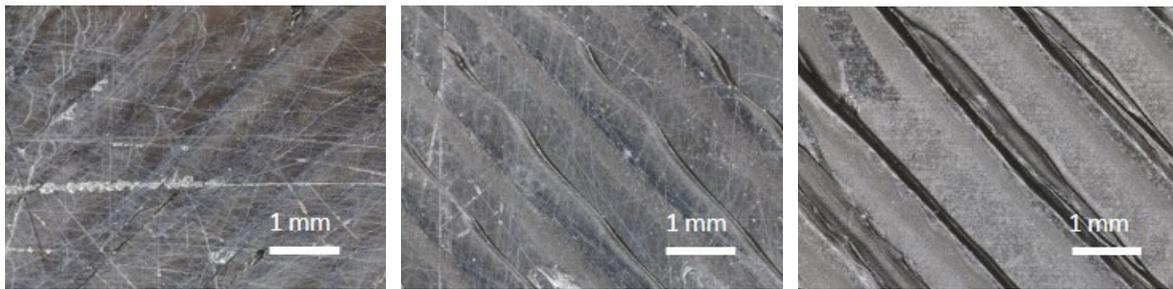
(c) Die Düse ist zu nah am Bauplatzform und wird blockiert

Abbildung 4.4: Schematische Darstellung des Abstandes zwischen Düse und Druckbett. Gekennzeichnet ist die im Slicer eingestellte Schichtdicke (rot, mit d_s abgekürzt) und der Abstand zwischen Düse und Bauplatzform (schwarz, mit d_{DB} abgekürzt). Für die verschiedenen Fälle wurden mit einem 3D-Profilometer bei einer 25-fachen Vergrößerung erstellt. Hier ist die verringerte Kontaktfläche zwischen den extrudierten Strängen und der Bauplatzform zu erkennen. Diese wird in Abb. a) durch den zu weiten Abstand verringert, sodass sich nur eine annähernd linienförmige Kontaktfläche ausbildet. In Abb. c) verursacht der zu geringe Abstand eine hohe Extrusionskraft, die zu einer pulsartigen statt konstanten Materialeextrusion führt. Es entstehen Lücken in der ersten Schicht, weshalb sich die Kontaktfläche zwischen dem zu fertigenden Bauteil und der Bauplatzform verkleinert.

4.5.2 Einfluss der Druckgeschwindigkeit

Um zu ermitteln, welchen Einfluss die Druckgeschwindigkeit auf die Bauteilhaftung hat, wurden Prüfkörper bei verschiedenen Druckgeschwindigkeiten gedruckt und deren Haftung gemessen. Diese Messreihe wurde bei unterschiedlichen Bauplattformtemperaturen wiederholt, um eventuelle Wechselwirkungen zwischen der Druckgeschwindigkeit und der Bauplattformtemperatur aufzudecken.

Dabei wurde festgestellt, dass eine Erhöhung der Druckgeschwindigkeit zu einer verringerten Bauteilhaftung führt. Dieser Zusammenhang wurde für alle getesteten Bauplattformmaterialien und -temperaturen beobachtet. Eine mögliche Erklärung für diesen Zusammenhang liefern die Ergebnisse von Nienhaus [27]: Wird die Druckgeschwindigkeit erhöht, muss ein höherer Volumenstrom an Druckmaterial durch den Extrusionskopf gefördert werden. Dies wird durch eine Vergrößerung der Geschwindigkeit, mit der das Filament bewegt wird, realisiert. Um das Filament immer schneller bewegen zu können, muss die Fördereinheit jedoch auch immer größere Kräfte auf das Filament aufbringen. Wird die Druckgeschwindigkeit zu hoch, übersteigen die zur Extrusion des Material erforderlichen Kräfte jene, die die Fördereinheit aufbringen kann. Damit setzt der Materialfluss aus, was Fehlstellen in der gedruckten Schicht verursacht. Solche Fehlstellen können als Startpunkt für Brüche dienen [28] und reduzieren damit die Bauteilhaftung. Mikroskopbilder von mit verschiedenen Geschwindigkeiten gedruckten Schichten bestätigen diese Erklärung (siehe Abb. 4.5). Je größer die Druckgeschwindigkeit ist, desto mehr Lücken sind zwischen den einzelnen Strängen zu erkennen.



(a) Druckgeschwindigkeit 10 mm/s (b) Druckgeschwindigkeit 20 mm/s (c) Druckgeschwindigkeit 40 mm/s

Abbildung 4.5: Gezeigt ist die Kontaktfläche von Prüfkörpern mit der Bauplattform bei einer 40-fachen Vergrößerung. Jede der gezeigten Kontaktflächen wurde mit einer unterschiedlichen Geschwindigkeit gedruckt. Zu erkennen ist, dass bei steigender Geschwindigkeit die Materialförderung immer öfter aussetzt. Dadurch entstehen Fehlstellen in der ersten Schicht, die die Größe der Kontaktfläche verringern und so die Adhäsionskraft reduzieren.

4.5.3 Einfluss der Bauplattformtemperatur

In diesem Kapitel wurde der Einfluss der Bauplattformtemperatur auf die Bauteilhaftung ermittelt. Zudem wurde untersucht, ob Wechselwirkungen mit der Düsentemperatur und der Druckgeschwindigkeit vorhanden sind.

Dazu wurde zuerst eine Messreihe durchgeführt, bei der Prüfkörper mit steigender Bauplattformtemperatur gedruckt wurden. Diese Messreihe wurde mehrmals wiederholt und dabei zwischen jedem Durchgang die Düsentemperatur erhöht.

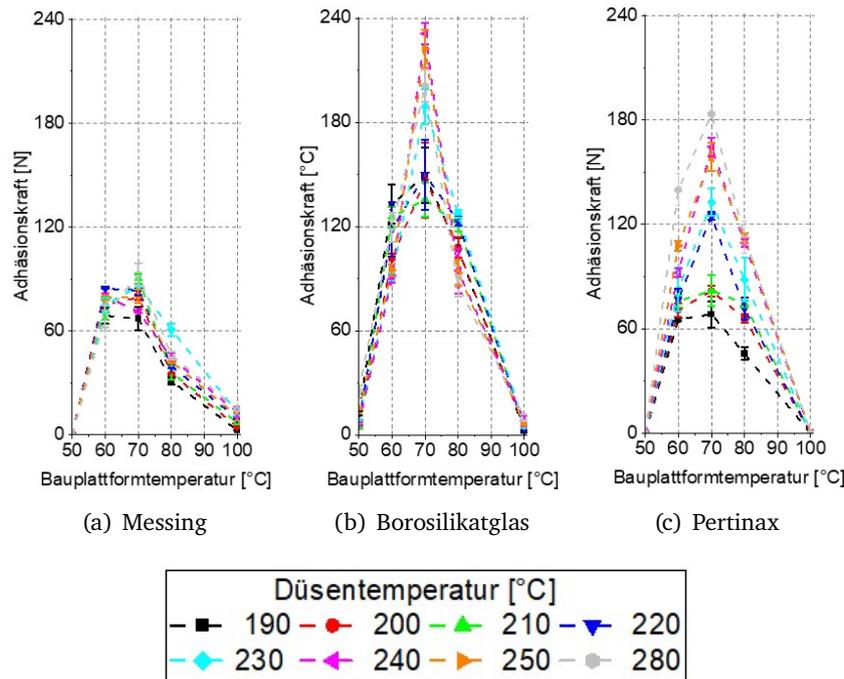


Abbildung 4.6: Einfluss der Bauplattformtemperatur auf die gemessene Adhäsionskraft gemessen für verschiedene Düsentemperaturen und Bauplattformmaterialien. Als Druckmaterial wurde PLA verwendet. Die gestrichelten Linien stellen keinen Fit dar, sondern dienen nur zur Führung des Auges

Alle Messreihen zeigen einen starken Einfluss der Bauplattformtemperatur auf die Bauteilhaftung. Steigende Bauplattformtemperaturen führen zunächst zu einer ansteigenden Bauteilhaftung (siehe Abb. 4.6). Wie in Kapitel 4.4.2 schon beschrieben wurde, erreicht die Bauteilhaftung ein Maximum für Bauplattformtemperaturen knapp oberhalb der Glasübergangstemperatur des Druckmaterials. Danach sinkt die gemessene Bauteilhaftung wieder. Dieser Zusammenhang ist unabhängig von der gewählten Düsentemperatur. Außerdem verändert sich die Position des Maximums nicht für wechselnde Düsentemperaturen oder Bauplattformmaterialien. Damit kann der Schluss gezogen werden, dass die Bauplattformtemperatur nicht mit der Düsentemperatur oder dem Bauplattformmaterial wechselwirkt.

In einer weiteren Messreihe wurde untersucht, ob es Wechselwirkungen zwischen der Druckgeschwindigkeit und der Bauplattformtemperatur gibt. Dazu wurden wieder Messreihen mit steigender Bauplattformtemperatur durchgeführt, aber diesmal nach jedem Durchgang die Druckgeschwindigkeit erhöht. Wie in der vorherigen Messreihe bereits beschrieben, kann eine maximale Bauteilhaftung für Bauplattformtemperaturen knapp oberhalb der Glasübergangstemperatur des verdrukten Materials beobachtet werden (siehe Abb.

4.7). Kältere oder wärmere Bauplattformtemperaturen führen zu einer verringerten Bauteilhaftung. Dieser qualitative Zusammenhang ist dabei für jede Druckgeschwindigkeit und für jedes getestete Bauplattformmaterial zu beobachten. Eine maximale Bauteilhaftung kann dabei für PLA als Druckmaterial unabhängig von der Druckgeschwindigkeit immer bei einer Bauplattformtemperatur von ca. 70 °C knapp oberhalb der Glasübergangstemperatur [13] erreicht werden.

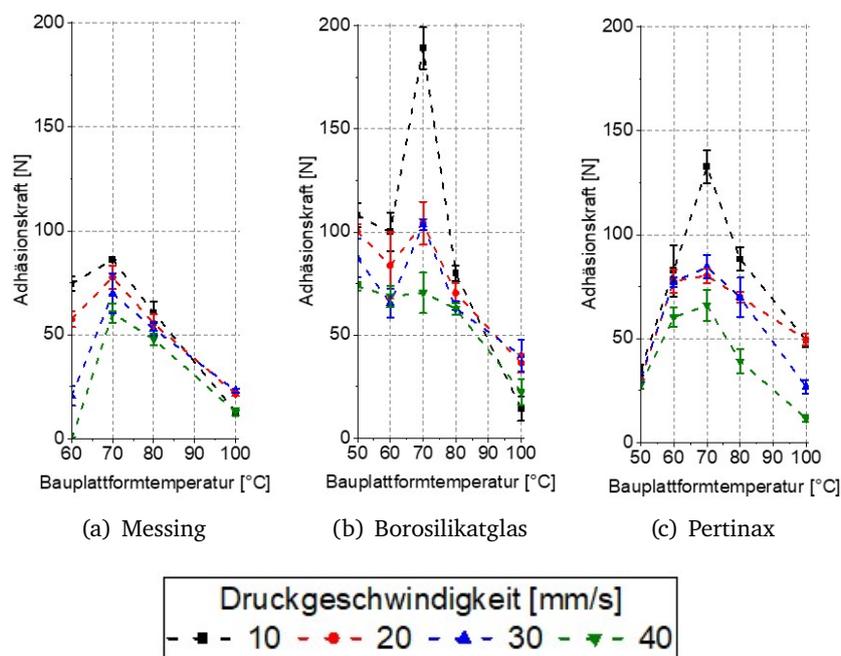


Abbildung 4.7: Einfluss der Bauplattformtemperatur auf die gemessene Adhäsionskraft gemessen für verschiedene Druckgeschwindigkeiten und Bauplattformmaterialien. Als Druckmaterial wurde PLA verwendet. Die gestrichelten Linien stellen keinen Fit dar, sondern dienen nur zur Führung des Auges

4.5.4 Einfluss der Düsentemperatur

In dieser Messreihe wird untersucht, wie stark die Düsentemperatur die Bauteilhaftung beeinflusst und welche Wechselwirkungen mit der Bauplattformtemperatur bestehen. Dazu wurden Messreihen mit steigender Düsentemperatur durchgeführt, die mit größer werdender Bauplattformtemperatur wiederholt wurden (siehe Abb. 4.8). Dabei wurde festgestellt, dass der Einfluss der Düsentemperatur auf die Bauteilhaftung abhängig vom gewählten Bauplattformmaterial ist. Für Pertinax gilt, dass höhere Düsentemperaturen zu einer höheren Bauteilhaftung führt (siehe Abb. 4.8 c). Durch eine Steigerung der Düsentemperatur von 190 °C auf 280 °C kann die gemessene Bauteilhaftung nahezu verdoppelt werden. Dieser Zusammenhang bleibt auch bestehen, wenn die Bauplattformtemperatur geändert wird.

Wird hingegen Messing als Bauplattformmaterial verwendet (siehe Abb. 4.8 a), führen gesteigerte Düsentemperaturen nur zu geringfügig erhöhten gemessenen Bauteilhaftungen. Der Einfluss der Düsentemperatur auf die Bauteilhaftung ist nur marginal.

Bei der Verwendung von Borosilikatglas als Bauplattformmaterial (siehe Abb. 4.8 b) hängt der Einfluss der Düsentemperatur auf die Bauteilhaftung davon ab, welche Bauplattformtemperatur gewählt wird. Für Bauplattformtemperaturen weit entfernt von der Glasübergangstemperatur ist die gemessene Bauteilhaftung

unabhängig von der Düsentemperatur nahezu konstant. Werden jedoch Bauplattformtemperaturen in der Nähe der Glasübergangstemperatur des gewählten Druckmaterials gewählt, kann die Bauteilhaftung stark durch die Wahl der Düsentemperatur beeinflusst werden. Hier weist der Verlauf der Düsentemperatur - Bauteilhaftung-Kurve ein Maximum auf. Bei welcher Düsentemperatur dieses Maximum beobachtet wird, ist dabei abhängig von der gewählten Bauplattformtemperatur.

Ob und wie sich ändernde Düsentemperaturen die Bauteilhaftung beeinflussen, hängt also stark vom gewählten Bauplattformmaterial ab. Eine mögliche Erklärung kann in der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit der Bauplattformmaterialien liegen. Weist es eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit auf, wie Messing, kühlt der extrudierte Kunststoff schnell auf die Bauplattformtemperatur ab. Dies kann zu thermischen Eigenspannungen führen, die die Bauteilhaftung reduzieren. Durch eine höhere Düsentemperatur wird die Abkühlzeit nur marginal vergrößert, weshalb die Bauteilhaftung nahezu konstant bleibt. Weist das gewählte Bauplattformmaterial jedoch eine vergleichsweise kleine Wärmeleitfähigkeit auf, wie etwa Pertinax oder Borosilikatglas, kann die Abkühlzeit des extrudierten Materials durch eine höhere Düsentemperatur deutlich verlängert werden. Dies wiederum führt zu verringerten Bildung thermischer Eigenspannungen und so zu einer vergrößerten Bauteilhaftung.

Zusammenfassend betrachtet lässt sich also eine Wechselwirkung der Düsentemperatur mit der Wahl des Bauplattformmaterials und situationsbedingt auch mit der Bauplattformtemperatur feststellen.

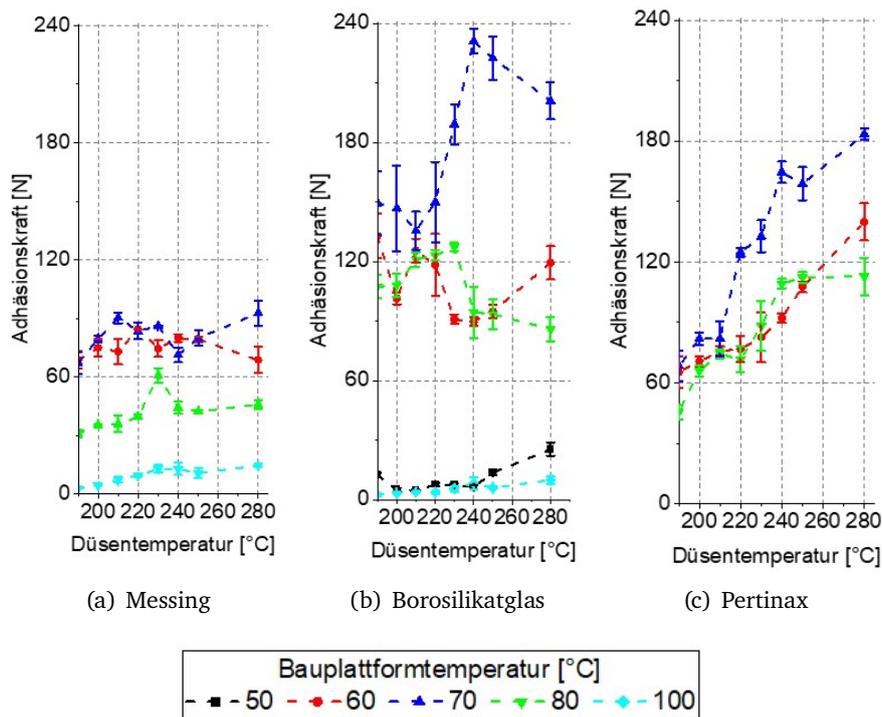


Abbildung 4.8: Einfluss der Düsentemperatur auf die gemessene Adhäsionskraft gemessen für verschiedene Bauplattformtemperaturen und Bauplattformmaterialien. Als Druckmaterial wurde PLA verwendet. Die gestrichelten Linien stellen keinen Fit dar, sondern dienen nur zur Führung des Auges

4.6 Zusammenfassung Veröffentlichung III

Die Fertigung eines Bauteils mittels FFF kann unter Umständen Tage dauern. Trotzdem ist bisher kaum untersucht worden, ob die Bauteilhaftung zeitabhängig ist. Erste Untersuchungen von Kujawa [22] zeigen, dass beim Drucken von ABS auf Borosilikatglas eine zeitabhängige Veränderung der gemessenen Bauteilhaftung zu beobachten ist. Ob diese zeitabhängige Änderung auch bei anderen Kombinationen aus Druckmaterial und Bauplattformmaterial vorhanden ist oder welchen Einfluss die Wahl der Prozessparameter darauf hat, ist bisher unbekannt. Daher werden in dieser Veröffentlichung Messreihen vorgestellt, bei denen die Kontaktzeit zwischen PLA und Polyamid (PA) als Druckmaterial und Bauplattformen aus Messing, Borosilikatglas und Pertinax variiert wird. Zudem können durch die gewonnen Erkenntnisse über den zeitlichen Verlauf der Bauteilhaftung mögliche Erklärungen für die wirkenden Adhäsionsmechanismen vorgeschlagen werden.

4.6.1 Einfluss der Kontaktzeit

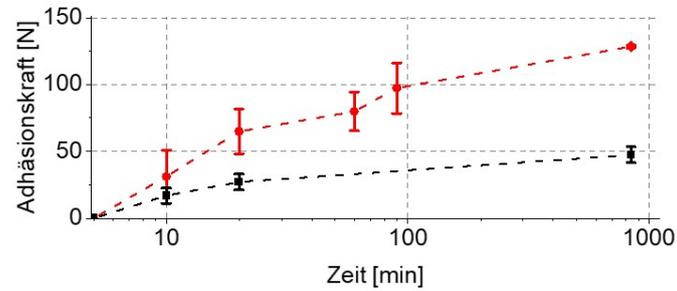
In dieser Messreihe wurde die Kontaktzeit zwischen dem extrudierten Material und der Bauplattform variiert, um die Zeitabhängigkeit der Bauteilhaftung zu ermitteln. Die Kontaktzeit setzt sich dabei aus zwei Anteilen zusammen: Zuerst muss der Probekörper gedruckt werden. Diese Fertigungszeit ist während allen Messreihen konstant, da sie nur durch eine Änderung der Prozessparameter beeinflusst werden kann. Diese sollen in der Messreihe aber konstant sein, sodass die Fertigungszeit für alle Messungen immer bei rund 20 Minuten liegt. Nachdem der Probekörper fertiggestellt wurde, wird erst nach einer Wartezeit die Bauteilhaftung gemessen. Die Kontaktzeit ergibt sich aus der Summe von Fertigungszeit und Wartezeit.

Wie bereits in ersten Untersuchungen durch Kujawa [22] nachgewiesen wurde, wird die Bauteilhaftung durch die Kontaktzeit beeinflusst. Die Art der zeitlichen Änderung hängt dabei jedoch vom gewählten Bauplattformmaterial ab. Für Messing, Borosilikatglas und Pertinax wurden unterschiedliche zeitliche Verläufe der Bauteilhaftung beobachtet (siehe Abb. 4.9).

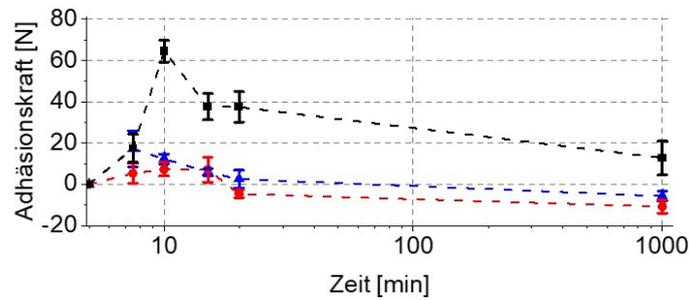
Wird Messing als Bauplattformmaterial verwendet, so ist immer eine stetige Steigerung der Bauteilhaftung zu beobachten (siehe Abb 4.9 a). Wie stark die Zunahme der Bauteilhaftung ist, hängt von der bereits vergangenen Kontaktzeit und der Bauplattformtemperatur ab. Für eine Bauplattformtemperatur von 60 °C und einer Wartezeit von 20 Minuten steigt die Adhäsionskraft um ca. 25 Prozent im Vergleich zu einer Wartezeit von fünf Minuten. Wird die Bauplattformtemperatur auf 70 °C erhöht, steigt die Adhäsionskraft innerhalb der selben Wartezeit um fast 100 Prozent im Vergleich zu einer Wartezeit von fünf Minuten. Mit zunehmenden Wartezeiten schwächt sich das Wachstum der Bauteilhaftung aber ab.

Auch bei der Verwendung von Borosilikatglas als Bauplattformmaterial ist zunächst ein Wachstum der Bauteilhaftung zu beobachten (siehe Abb. 4.9 b). Die Stärke dieses Wachstums hängt wie bei Messing wieder von der gewählten Bauplattformtemperatur und der bereits vergangenen Kontaktzeit ab. Im Gegensatz zu Messing wächst die Bauteilhaftung jedoch nur innerhalb der ersten fünf bis fünfzehn Minuten an. Hier wurde eine maximale Steigerung von 60 Prozent im Vergleich zu einer Wartezeit von fünf Minuten beobachtet. Danach reduziert sich die Bauteilhaftung. Je nach gewählter Bauplattformtemperatur kann die Bauteilhaftung auch geringer als zu Beginn werden. Dabei wurden Verluste im einstelligen Prozentbereich gemessen.

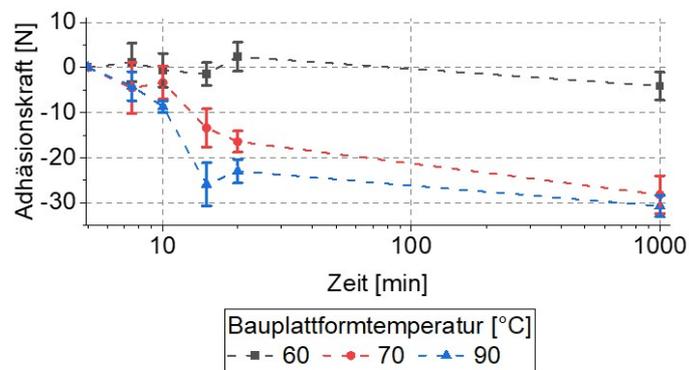
Für Pertinax wird je nach Bauplattformtemperatur entweder eine nahezu konstante Bauteilhaftung gemessen oder von Beginn an eine Reduktion der Bauteilhaftung (siehe Abb. 4.9 c). Auch hier schwindet die Bauteilhaftung schneller, wenn höhere Bauplattformtemperaturen gewählt werden.



(a) Messing



(b) Borosilikatglas



(c) Pertinax

Abbildung 4.9: Einfluss der Wartezeit gemessen für verschiedene Bauplattformtemperaturen und Bauplattformmaterialien. Dabei ist zu erkennen, dass das zeitliche Verhalten stark vom gewählten Bauplattformmaterial abhängt. Außerdem hängt die Geschwindigkeit, mit der sich die Adhäsionskraft zeitlich ändert von der Bauplattformtemperatur ab. Die gestrichelten Linien sind nur eine Führung für das Auge und kein Fit. Als Druckmaterial wurde PLA verwendet

4.6.2 Mögliche Adhäsionsmechanismen

Dass das extrudierte Polymer auf der Bauplattform haftet wird von früheren Veröffentlichungen unter anderem durch mechanisches Verkrallen erklärt [22]. Um diese Annahme zu überprüfen, wurden die Bauplattformen mittels Sandstrahlen aufgeraut. Durch die vergrößerte Oberflächenrauigkeit sollte das extrudierte Polymer sich entsprechend dem mechanischen Adhäsionsmodell besser mit der Bauplattform verkrallen können, was zu einer höheren Bauteilhaftung führen sollte (siehe auch Kapitel 4.2.2). Entgegen der Erwartungen ist nach dem Sandstrahlen der Bauplattformen aus Messing und Borosilikatglas praktisch keine Haftung mehr zwischen Druckmaterial und Bauplattform zu beobachten. Für Pertinax sind die gemessenen Werte nahezu unverändert. Diese Beobachtungen sind nicht mit einer mechanischen Adhäsion zu vereinbaren, sodass andere Mechanismen für die Bauteilhaftung verantwortlich sein müssen.

Eine möglicherweise wirkender Mechanismus, der die Haftung zwischen Messing und PLA erklären könnte, ist eine Ionenbindung infolge einer chemischen Reaktion. Verschiedene frühere Veröffentlichungen [29, 21, 30] beschreiben chemische Reaktionen zwischen Polymeren wie Polycarbonat (PC) und Metallen, die zur Bildung von Ionen und entsprechenden Bindungen führen. Nach den Untersuchungen von Konstadinidis [21] der Haftung zwischen PMMA und Aluminium spielen die Metalloxide an der Adhäsionsfläche dabei eine entscheidende Rolle.

Die Annahme, dass in einer chemischen Reaktion Ionen gebildet werden und dies Voraussetzung für die Haftung zwischen dem Druckmaterial und einer Bauplattform aus Messing ist, würde die gemachten Beobachtungen erklären. Erstens läuft eine chemische Reaktion umso schneller ab, je heißer die Umgebung ist, in der sie stattfindet [31]. Wird nun die Bauplattformtemperatur erhöht, läuft die für die Bauteilhaftung verantwortliche chemische Reaktion schneller ab und die Bauteilhaftung wächst schneller. Zweitens sinkt mit zunehmender Anzahl stattgefundenen Reaktionen die Wahrscheinlichkeit, dass sich passende Reaktionspartner finden, sodass die Reaktionsgeschwindigkeit im Laufe der Zeit abnimmt [31]. Dies spiegelt sich in dem zeitabhängigen Wachstum der Bauteilhaftung wieder. Drittens stützt der Verlust der Bauteilhaftung unmittelbar nach dem Sandstrahlen die Annahme, dass eine chemische Reaktion als Ursache in Frage kommt (siehe Veröffentlichung II). Durch das Sandstrahlen werden die für die Reaktion notwendigen Metalloxide entfernt, sodass ein Reaktionspartner fehlt und keine chemische Reaktion ablaufen kann. Viertens müsste eine Oxidation der Oberfläche im Laufe der Zeit nach dem Sandstrahlen wieder stattfinden, was ein Anstieg der Haftung im Laufe der Zeit bedeuten würde. Dieser Anstieg konnte im Laufe eines Jahres nach dem Sandstrahlen in der Tat beobachtet werden. Ein Nachweis, dass wirklich eine chemische Reaktion an der Adhäsion zwischen Druckmaterialien wie PLA und einer Messingoberfläche notwendig ist, könnte mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie erbracht werden.

Die Adhäsion zwischen Polymeren und Borosilikatglas wurde in früheren Veröffentlichungen [32] auf Wasserstoffbrückenbindungen zurückgeführt. Diese bilden sich zwischen Hydroxylgruppen in den Polymermolekülen und Wasser, das von Borosilikat absorbiert wurde, aus. Dass dies auch in dem hier vorliegenden adhäsiven Kontakt der Fall sein könnte, wird von den gemachten Beobachtungen gestützt: Nach Clark-Monks [33] wird Wasser von Borosilikatglas absorbiert und liegt danach fast nur in oberflächennahen Bereichen vor. Wird die Borosilikatglasplatte nun sandgestrahlt, sollte in der Oberfläche der Bauplattform kein Wasser mehr vorhanden sein, das als Partner zur Ausbildung von Wasserstoffbrücken dienen könnte. Dies würde erklären, wieso keine Probekörper nach dem Sandstrahlen gedruckt werden können. Im Laufe der Zeit diffundiert wieder Wasser in die Borosilikatglasplatte ein, sodass die Haftung wieder zunehmen sollte. Diese Zunahme konnte im Laufe mehrerer Monate nach dem Sandstrahlen beobachtet werden (siehe Abb. 4.10).

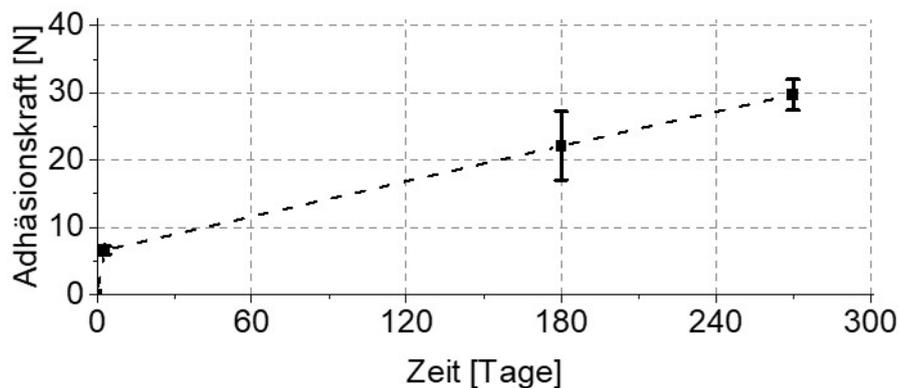


Abbildung 4.10: Zeitlicher Verlauf der Adhäsionskraft gemessen für PLA als Druckmaterial auf einer Bauplattform aus Borosilikatglas. Direkt nach dem Sandstrahlen ist keine Adhäsion zwischen dem Druckmaterial und der Bauplattform möglich. Im Verlauf eines Jahres wurde die Bauplattform mehrfach getestet, wobei eine zunehmende Bauteilhaftung beobachtet wurde. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass in der Oberfläche der Borosilikatglasplatte erneut Wasser absorbiert wird, wodurch wieder die für die Bauteilhaftung notwendigen Wasserstoffbrücken ausgebildet werden können. Die gestrichelte Linie stellt keinen Fit dar, sondern dient nur zur Führung des Auges

Wasserstoffbrückenbindungen könnten auch eine mögliche Erklärung für die adhäsive Bindung zwischen Pertinax und Druckmaterialien wie PLA oder PA sein. Pertinax basiert auf Phenolharz, welches ein Duroplast mit vielen Hydroxylgruppen in der Wiederholeinheit des Polymermoleküls ist. Hier könnten sich Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Hydroxylgruppen des Phenolharzes und denen des entsprechenden Druckmaterials ausbilden. Dafür sprechen die gemachten Beobachtungen: Wird Pertinax sandgestrahlt und die Oberfläche entfernt, hat das keinen Einfluss auf die Präsenz von Hydroxylgruppen. Daher sind auch unmittelbar nach dem Sandstrahlen Hydroxylgruppen vorhanden, sodass stets eine Bauteilhaftung gegeben ist.

Zusammenfassend betrachtet wurde eine Zeitabhängigkeit der Bauteilhaftung nachgewiesen. Es konnte gezeigt werden, dass das gewählte Bauplattformmaterial und die Bauplattformtemperatur die Charakteristik dieser Zeitabhängigkeit mitbestimmen. Außerdem lassen diese Ergebnisse Rückschlüsse auf die wirkenden Adhäsionsmechanismen zu.

4.7 Zusammenfassung Veröffentlichung IV

In den klassischen kunststoffverarbeitenden Verfahren wie Spritzguss sind die Auswirkungen von Feuchtigkeit im Druckmaterial auf die Eigenschaften des zu fertigenden Bauteils bereits gut untersucht. Eine solche breite Wissensbasis ist im Gegensatz dazu bei additiven Verfahren wie FFF noch nicht vorhanden. Zwar zeigen einige Studien, dass feuchtes Druckmaterial zu diversen Druckfehlern führen kann [34], aber der Einfluss von Feuchtigkeit im Druckmaterial auf die Bauteilhaftung ist noch unbekannt. Daher wird in dieser Veröffentlichung die Abhängigkeit der Bauteilhaftung von der Filamentfeuchte untersucht. Dazu wurden zuerst die Druckmaterialien, PLA, Polyvinylalkohol (PVA) und PA mittels thermogravimetrischer Analyse sowie mittels dynamischer Differenzkalorimetrie charakterisiert um den Feuchtegehalt und den Glasübergangspunkt zu bestimmen. Anschließend wurden Messungen mit getrocknetem, feuchtem und nassem Druckmaterial auf Bauplattformen aus Borosilikatglas und Pertinax durchgeführt und miteinander verglichen. Um das getrocknete

Material vor der Aufnahme von Feuchtigkeit während des Druckprozesses zu schützen, wurde der Prüfstand, der in Veröffentlichung I beschrieben wurde, um eine beheizte Filamentbox erweitert. Als getrocknet wird Material bezeichnet, dass zuvor 24 h bei 60 °C in einem Ofen gelagert und anschließend aus der beheizten Filamentbox heraus verarbeitet wurde. Feuchtes Material bedeutet, dass es unter Umgebungsbedingungen (Temperatur 19 °C - 23 °C; rel. Feuchte 30 % - 50 %) gelagert und verdrückt worden ist. Nass bedeutet, dass das Material zuerst für 24 h im Wasserbad (Leitungswasser bei 22 °C) gelagert wurde und anschließend auch aus diesem Wasserbad heraus verdrückt wurde. Da PVA wasserlöslich ist, wurden keine Versuche mit nassem PVA durchgeführt.

4.7.1 Filamentbox

Kunststoffe weisen ein hygroskopisches Verhalten auf und nehmen nach dem Trocknen wieder Feuchtigkeit auf [34]. Um die Messergebnisse nicht zu verfälschen, muss sichergestellt werden, dass über den gesamten Druckprozess nur getrocknetes Material verarbeitet wird. Dies wird im vorliegenden Versuchsaufbau durch eine Filamentbox sichergestellt. Diese besteht aus einem abgedichteten Stahlgehäuse, in dem das Filament gelagert wird. Der Innenraum der Filamentbox kann auf bis zu 65 °C beheizt werden, sodass eine Feuchtigkeitsaufnahme durch die erhöhte Temperatur verhindert wird. Außerdem wird die Luftfeuchtigkeit im Inneren der Filamentbox durch Silicagel-Perlen reduziert. Um reproduzierbare Lagerbedingungen sicherzustellen, wird sowohl die Luftfeuchtigkeit als auch die Temperatur im Inneren der Box alle zwanzig Sekunden durch Sensoren gemessen und aufgezeichnet.

Das Druckmaterial wird durch einen Polytetrafluorethylen (PTFE)-Schlauch von der Filamentbox über die Fördereinheit bis hin zum Extrusionskopf geführt. Lediglich an der Fördereinheit kommt das Druckmaterial für ca. 25 Sekunden in Kontakt mit der Umwelt und kann Feuchtigkeit aufnehmen. Da die Diffusionsgeschwindigkeit von Wasser in das Material vergleichsweise niedrig ist, kann dieser Kontakt vernachlässigt werden (siehe dazu Veröffentlichung IV).

4.7.2 Charakterisierung des Materials

Mittels thermogravimetrischer Analyse wurde der Feuchtegehalt des Druckmaterials nach der Trocknung und im feuchten Zustand gemessen. Hier wurde festgestellt, dass PLA einen sehr geringen Massenteil an Wasser aufweisen, während dieser für PA und PVA um eine Größenordnung höher liegt. Da bereits bekannt ist, dass absorbiertes Wasser die thermischen Eigenschaften von Polymeren verändern kann, wurde die Glasübergangstemperatur aller Druckmaterialien mittels dynamischer Differenzkalorimetrie bestimmt [35]. Dabei wurde eine deutliche Verschiebung der Glasübergangstemperatur für PA und PVA festgestellt, während für PLA keine Verschiebung gemessen wurde.

4.7.3 Einfluss der Feuchtigkeit

Da die Messungen mittels dynamischer Differenzkalorimetrie eine starke Verschiebung der Glasübergangstemperatur nach dem Trocknen ergeben haben, wurde ein starker Einfluss des Feuchtegehalts auf die Beziehung zwischen Bauplattformtemperatur und Bauteilhaftung erwartet. Wie vorherige Studien [12, 13, 22] gezeigt haben, wird die maximale Haftung bei einer Bauplattformtemperatur knapp oberhalb der Glasübergangstemperatur erreicht. Daher werden zur Ermittlung des Einflusses des Feuchtegehalts Messreihen durchgeführt, bei der die Bauteilhaftung bei verschiedenen Bauplattformtemperaturen gemessen wird. Diese Messreihen werden für PLA, PA und PVA jeweils getrocknet und feucht durchgeführt. PLA und PA werden zudem noch im nassen Zustand getestet.

Die unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalte der Druckmaterialien wirken sich auf zwei Arten aus: Sie verändern

die Größe der maximal gemessenen Adhäsionskraft und sie verschieben die optimale Bauplattformtemperatur, bei der dieses Maximum gemessen wird. Nimmt trockenes Druckmaterial PVA oder PA Feuchtigkeit auf, so steigt die maximal gemessene Adhäsionskraft und die optimale Bauplattformtemperatur verschiebt sich hin zu kleineren Werten. Diese Verschiebung stimmt gut mit der Verschiebung der Glasübergangstemperatur überein. Wird der Feuchtigkeitsgehalte jedoch noch weiter vergrößert, wie bei nassem PA, verschiebt sich die optimale Bauplattformtemperatur noch weiter nach unten. Dabei sinkt allerdings auch die maximal gemessene Adhäsionskraft stark ab.

Mittels thermogravimetrischer Analyse konnte gezeigt werden, dass das verwendete PLA kaum Feuchtigkeit durch die Lagerung unter Umgebungsbedingungen oder im Wasserbad aufnimmt. Dementsprechend sind die gemessenen Ergebnisse für alle drei Feuchtigkeitsgehalte sehr ähnlich. Dies zeigt, dass die beobachteten Veränderungen tatsächlich auf das von den Druckmaterialien PVA und PA absorbierte Wasser zurückzuführen ist.

Um die Verringerung der Bauteilhaftung zu erklären, die nach dem Trocknen gemessen wurde, wird der Einfluss von Feuchtigkeit auf die Beweglichkeit der Molekülketten näher betrachtet. Für eine starke Adhäsion müssen die Polymerketten einerseits beweglich genug sein, um eine möglichst große Kontaktfläche zum Adhäsionspartner ausbilden zu können. Andererseits ist eine gewisse Steifigkeit notwendig, um einen festen Verbund unter den Polymerketten zu gewährleisten. Eine Änderung der Polymerkettenbeweglichkeit kann daher zu einer Änderung der Bauteilhaftung führen [36, 37].

Die Glasübergangstemperatur ändert sich nach der Trocknung ebenfalls wegen der veränderten Beweglichkeit der Molekülketten [38, 39].

4.8 Fazit

Im Verlaufe von Kapitel 4.3 wurde dargelegt, wie die einzelnen Veröffentlichungen dazu beitragen, die eingangs gestellte wissenschaftliche Fragestellung zu beantworten: In Veröffentlichung I wird ein Messverfahren zur Bestimmung der Bauteilhaftung beschrieben und dargelegt, wie dieses validiert wurde. Damit konnten Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses verschiedener Prozessparameter wie Druckgeschwindigkeit, die Dicke der ersten Schicht oder der Verarbeitungstemperaturen bestimmt werden. Darüber hinaus wurde auch die zeitliche Abhängigkeit der Bauteilhaftung untersucht (siehe Veröffentlichung III) und die Auswirkung von Feuchtigkeit im Druckmaterial auf die gemessene Adhäsionskraft gemessen (siehe Veröffentlichung IV). Diese Erkenntnisse lassen Rückschlüsse auf die wirkenden Adhäsionsmechanismen zu.

In der nachfolgenden Synthese werden die in den einzelnen Veröffentlichungen dargestellten Ergebnisse zusammengeführt und daraus neue Erkenntnisse abgeleitet.

5 Synthese

In diesem Kapitel wird dargestellt, wie die vorgestellten Veröffentlichungen in ihrer Gesamtheit die in Kapitel 4.3 formulierte wissenschaftliche Fragestellung beantworten.

5.1 Messung der Bauteilhaftung

Der erste Punkt der in Kapitel 4.3 formulierten Fragestellung ist die Entwicklung eines geeigneten Messverfahrens zur Ermittlung der Bauteilhaftung. Nachfolgend werden die Ergebnisse aus allen Veröffentlichungen zusammengeführt und beschrieben, wie man reproduzierbar und vergleichbar die Bauteilhaftung bestimmt. Dazu gehört, welche Prüfkörper genutzt werden, wie dieser von der Bauplattform abgelöst wird, welche Größen dokumentiert werden müssen und welche Regeln darüber hinaus beachtet werden sollten. Bisherige Veröffentlichungen liefern teils kein eindeutiges Bild hinsichtlich der Relevanz einzelner Parameter [12, 13, 22]. Dies unterstreicht die Wichtigkeit eines vergleichbaren und reproduzierbaren Verfahrens. Veröffentlichung I beschreibt ein Messverfahren basierend auf DIN EN 28510-1: Hier wird die Prüfkörpergeometrie und der genaue Vorgang zur Bestimmung der Bauteilhaftung festgelegt. Um jedoch reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten, konnte gezeigt werden, dass eine Reihe an Punkten zu beachten sind: So ist die Bauteilhaftung zu einem gewissen Grad davon abhängig, wie häufig schon an eine bestimmte Stelle gedruckt wurde. Daher sollte vor jeder Messung zuerst mehrmals an die gewünschte Stelle gedruckt werden, bevor Messungen durchgeführt werden. Um eine noch bessere Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der gewonnenen Messergebnisse zu gewährleisten, sollten auch die Erkenntnisse aus Veröffentlichung II berücksichtigt werden. Hier konnte gezeigt werden, dass die tatsächlich gedruckte Dicke der ersten Schicht einen bedeutenden Einfluss auf die Bauteilhaftung hat. Diese sollte dementsprechend immer gemessen und dokumentiert werden. Zudem wurden Wechselwirkungen der Prozessparameter untereinander festgestellt, sodass diese vollständig dokumentiert werden sollten. Des Weiteren wurde in Veröffentlichung III eine Zeitabhängigkeit der Bauteilhaftung festgestellt. Vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse können demnach nur gewonnen werden, wenn in jeder Messreihe die Kontaktzeit zwischen Prüfkörper und Bauplattform gleich ist. Auch der Feuchtigkeitsgehalte des verdruckten Materials muss gemessen und dokumentiert werden, wie die Ergebnisse aus Veröffentlichung IV zeigen. Durch Feuchtigkeit kann sich je nach Material die Bauteilhaftung verschlechtern oder es werden andere Werte für Prozessparameter hinsichtlich einer maximalen Bauteilhaftung gefunden.

5.2 Wechselwirkungen und Relevanz der Prozessparameter

Da Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Prozessparametern bestehen, hängt der Einfluss eines Prozessparameters auf die Bauteilhaftung häufig von der jeweiligen Situation ab. Nachfolgend wird zuerst definiert, was eine Wechselwirkung ist. Um die Auswirkungen der Prozessparameter auf die Bauteilhaftung sinnvoll vergleichen zu können, werden daher anschließend die identifizierten Wechselwirkungen vorgestellt.

5.2.1 Definition des Begriffs Wechselwirkung

Der Einfluss eines Parameters auf die Bauteilhaftung wird in vielen Fällen davon bestimmt, wie andere Prozessparameter gewählt werden. Eine Wechselwirkung zwischen zwei Parametern ist daher definiert als Einfluss von Parameter A auf die Beziehung zwischen Parameter B und der Bauteilhaftung. Zur Verdeutlichung wird nachfolgend ein Beispiel gegeben: In Abbildung 5.1 sind die Ergebnisse dreier Messreihen dargestellt, die den Einfluss steigender Düsentemperaturen auf die Bauteilhaftung beschreiben. Sie unterscheiden sich dabei nur in der gewählten Druckgeschwindigkeit. Je nachdem wie die Druckgeschwindigkeit eingestellt ist verändert sich die Beziehung zwischen Düsentemperatur und Bauteilhaftung. Wird mit einer hohen Druckgeschwindigkeit von 40 mm/s gedruckt, so ist ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Düsentemperatur und Bauteilhaftung zu erkennen. Hier gilt, dass höhere Düsentemperaturen zu höheren Bauteilhaftungen führen. Bei einer auf 20 mm/s verringerten Druckgeschwindigkeit ist die Bauteilhaftung nahezu konstant. Änderungen der Düsentemperatur wirken sich plötzlich kaum noch auf die Bauteilhaftung aus. Bei einer weiteren Verringerung der Druckgeschwindigkeit auf 10 mm/s ändert sich die Beziehung zwischen Düsentemperatur und Bauteilhaftung erneut. Steigende Düsentemperaturen führen nun zuerst zu steigender Bauteilhaftung. Bei einer optimalen Düsentemperatur erreicht die Bauteilhaftung ein Maximum. Wird die Düsentemperatur darüber hinaus erhöht, sinkt die Bauteilhaftung wieder. Die Druckgeschwindigkeit hat also einen Einfluss darauf, wie die Beziehung zwischen der Düsentemperatur und der Bauteilhaftung ist. Es besteht also eine Wechselwirkung zwischen Druckgeschwindigkeit und Düsentemperatur.

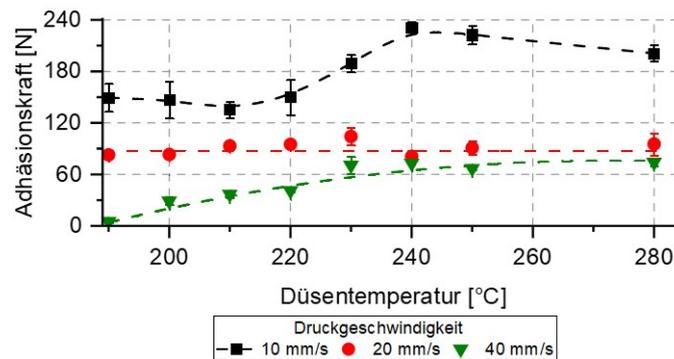


Abbildung 5.1: Gezeigt ist die gemessene Adhäsionskraft in Abhängigkeit der Düsentemperatur gemessen für verschiedene Druckgeschwindigkeiten (Druckmaterial PLA, Bauplattformmaterial Borosilikatglas). Zu erkennen ist, dass sich die Art des Zusammenhangs zwischen Düsentemperatur und Adhäsionskraft stark verändert, je nachdem bei welcher Druckgeschwindigkeit die Prüfkörper gedruckt wurden. Eine relativ langsame Druckgeschwindigkeit von 10 mm/s (schwarz) bedeutet, dass es eine optimale Düsentemperatur gibt, bei der die Bauteilhaftung maximal wird. Zudem kann die gemessene Adhäsionskraft um bis zu 100 N gesteigert werden (Differenz zwischen Minimum und Maximum bei der schwarzen Kurve). Bei 20 mm/s (rot) beeinflusst die Düsentemperatur die gemessene Adhäsionskraft praktisch kaum. Wird mit 40 mm/s (grün) schneller gedruckt, gilt, je heißer gedruckt wird, desto besser ist die Bauteilhaftung. Zusammenfassend lässt sich beobachten, dass der Einfluss der Düsentemperatur auf die Bauteilhaftung unter anderem davon abhängt, wie die Druckgeschwindigkeit gewählt wird. Dies wird als Wechselwirkung zwischen Düsentemperatur und Druckgeschwindigkeit verstanden. Die gestrichelten Linien stellen keinen Fit dar, sondern sollen nur die unterschiedlichen Zusammenhänge zwischen Düsentemperatur und gemessener Adhäsionskraft verdeutlichen.

5.2.2 Identifizierte Wechselwirkungen

Insgesamt wurden sieben Prozessparameter untersucht und mehrere Wechselwirkungen identifiziert. Diese sind in Tabelle. 5.1 schematisch dargestellt

Parameter 1	Parameter 2	Beschreibung
Feuchte des Druckmaterials	Bauplattformtemperatur	Diese Wechselwirkung tritt nur bei hygroskopischen Materialien wie PVA oder PA auf. Hier gilt, je feuchter das Druckmaterial, desto niedriger liegt die optimale Bauplattformtemperatur. [40]
	Düsentemperatur	Feuchtigkeit in Kunststoffen verringert deren Viskosität [41], was die Wahl der Düsentemperatur um die zur Extrusion notwendigen Kräfte zu reduzieren beeinflussen sollte [27, 42]. Ansonsten kann es zu einem Aussetzen der Materialförderung und Fehlstellen in der gedruckten Schicht kommen. Wie in Veröffentlichung II gezeigt, reduzieren Fehlstellen die Bauteilhaftung. Diese Wechselwirkung ist in der vorliegenden Arbeit experimentell nicht nachgewiesen worden.
	Druckgeschwindigkeit	Durch Änderungen der Viskosität des Druckmaterials [41] könnte Feuchte im Druckmaterial auch Einfluss auf die Wahl der Druckgeschwindigkeit haben [27]. Je nachdem wie feucht das Druckmaterial ist, muss mit einer anderen Geschwindigkeit gedruckt werden, um die zur Extrusion notwendigen Kräfte nicht zu groß werden zu lassen. Dies vermeidet Fehlstellen in der gedruckten Schicht, die ansonsten die Bauteilhaftung verringern [43]. Diese Wechselwirkung ist in der vorliegenden Arbeit experimentell nicht nachgewiesen worden. [43, 40]
	Dicke der ersten Schicht	Eine durch Feuchte verringerte Viskosität des Druckmaterials [41] verringert auch die zur Extrusion notwendige Kraft [27, 42]. Dadurch kann die tatsächlich gedruckte Dicke der ersten Schicht verringert werden, ohne dass die Materialförderung aussetzt. Dies führt zu einer größeren Kontaktfläche zwischen extrudiertem Material und Bauplattform, was die Bauteilhaftung erhöht. Diese Wechselwirkung ist in der vorliegenden Arbeit experimentell nicht nachgewiesen worden. [43, 40]
Bauplattformtemperatur	Kontaktzeit	Je höher die Bauplattformtemperatur ist, desto schneller ändert sich die Bauteilhaftung mit der Zeit. [44]
	Düsentemperatur	Die Bauplattformtemperatur bestimmt in manchen Fällen wie sich steigende Düsentemperaturen auf die Bauteilhaftung auswirken. Dies ist vor allem bei Borosilikatglas als Bauplattformmaterial zu beobachten [43].
Bauplattformmaterial	Kontaktzeit	Je nach gewähltem Bauplattformmaterial steigt oder fällt die Bauteilhaftung mit der Zeit. [44]
	Düsentemperatur	Wie sich steigende Düsentemperaturen auf die Bauteilhaftung auswirken, hängt vom gewählten Bauplattformmaterial ab. [43]
	Dicke der ersten Schicht	Die optimale Dicke der ersten Schicht ändert sich, wenn das Bauplattformmaterial getauscht wird. [43]

Düsentemperatur	Dicke der ersten Schicht	Höhere Düsentemperaturen verringern die Viskosität des Druckmaterials [27]. Dadurch könnte eine geringere Dicke der ersten Schicht gedruckt werden, ohne dass Fehlstellen auftreten (siehe Veröffentlichung II). Die im Slicer eingestellte Dicke der ersten Schicht und damit auch die Menge des geförderten Materials müssen konstant bleiben. Dadurch vergrößert sich die Kontaktfläche zwischen Druckmaterial und Bauplattform, was die Bauteilhaftung verbessert. Diese Wechselwirkung ist in der vorliegenden Arbeit experimentell nicht nachgewiesen worden. [43]
	Druckgeschwindigkeit	Durch die bei erhöhten Temperaturen verringerte Viskosität des Druckmaterials sinkt die zur Extrusion notwendige Kraft [27]. Dadurch kann schneller gedruckt werden, ohne dass Fördereinheit aussetzt. Diese Wechselwirkung ist in der vorliegenden Arbeit experimentell nicht nachgewiesen worden. [43]
Druckgeschwindigkeit	Dicke der ersten Schicht	Höhere Druckgeschwindigkeiten führen zu einer höheren Extrusionskraft [27]. Je schneller gedruckt wird, desto größer muss die tatsächlich gedruckte Dicke der ersten Schicht sein, um ein Aussetzen der Materialförderung zu vermeiden. Diese Wechselwirkung ist in der vorliegenden Arbeit experimentell nicht nachgewiesen worden. [43]

Tabelle 5.1: Liste aller Wechselwirkungen, die zwischen den Prozessparametern des FFF-Prozesses im Bezug auf die Bauteilhaftung nachgewiesen oder vermutet werden.

5.2.3 Kategorisierung der Prozessparameter

Anhand der nun bekannten Wechselwirkungen können die Prozessparameter in zwei Kategorien eingeteilt werden: **Situativ** relevante Prozessparameter und **generell** relevante Prozessparameter. Nachfolgend werden die Definitionen für die beiden Kategorien vorgestellt und anschließend eine Sortierung der untersuchten Prozessparameter vorgenommen.

Als relevant hinsichtlich der Bauteilhaftung wird ein Parameter eingestuft, wenn sich die Adhäsionskraft über das getestete Intervall um mehr als 60 N ändert. Der genaue Wert, an dem diese Grenze anzusetzen ist hängt dabei unter anderem von der zu fertigenden Geometrie und dem verarbeiteten Material ab. Wird zum Beispiel eine hohe Geometrie mit kleiner Kontaktfläche zur Bauplattform gedruckt, so muss die Bauteilhaftung vergleichsweise stark sein um ein Umkippen während der Fertigung zu vermeiden. Abweichungen wirken sich hier stärker aus, als wenn eine flache Geometrie mit großer Kontaktfläche gedruckt wird. Zudem wird bei Kunststoffen mit großem Wärmeausdehnungskoeffizient eine stärkere Bauteilhaftung benötigt. Auch hier werden Änderungen der Bauteilhaftung schneller relevant, als bei der Verarbeitung von Kunststoffen mit vergleichsweise kleiner Wärmeausdehnung. Für die gefertigte Prüfkörpergeometrie (siehe 4.3) liegt diese Grenze bei 60 N. Änderungen kleiner als 60 N sind für den Anwender dabei nicht wahrnehmbar und nur mit einem Messgerät nachweisbar.

Ein situativ relevanter Prozessparameter hat nur unter bestimmten Bedingungen einen relevanten Einfluss auf die Bauteilhaftung. Ein Beispiel hierfür ist die Düsentemperatur (siehe Abb. 5.2).

Ein Variieren der Düsentemperatur bei einer Bauplattformtemperatur von 70 °C und Borosilikatglas als Bauplattformmaterialien führt zu einer Änderung der Düsentemperatur von rund 95 N und wird damit als relevant eingestuft. Wird die Messreihe bei einer Bauplattformtemperatur von 100 °C wiederholt, so hängt die gemessene Adhäsionskraft kaum noch von der Düsentemperatur ab. Hier sind nur Änderungen

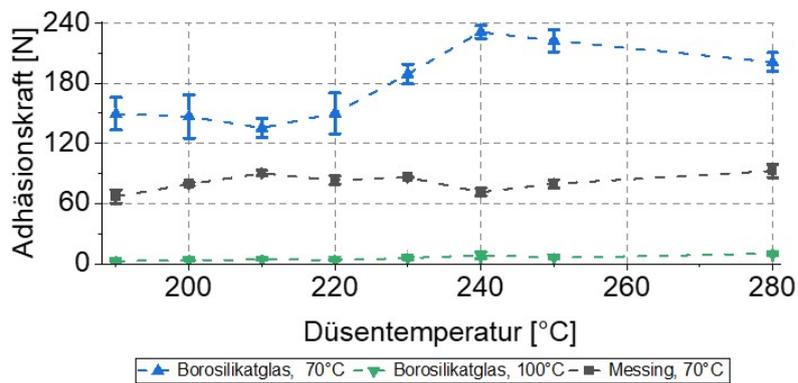


Abbildung 5.2: Der Einfluss der Düsentemperatur auf die Adhäsionskraft ist für verschiedene Bauplattformtemperaturen und -materialien gemessen worden. Wird mit einer Bauplattformtemperatur von 70 °C auf Borosilikatglas gedruckt (blaue Kurve), so ist eine starke Abhängigkeit der gemessenen Adhäsionskraft von der Düsentemperatur zu erkennen. Die gemessene Adhäsionskraft steigt um 95 °C, was einer relevanten Änderung entspricht. Ändert man allerdings die Bauplattformtemperatur, z.B. auf 100 °C (grüne Kurve), oder das Bauplattformmaterial (schwarze Kurve), so bleibt die gemessene Adhäsionskraft unabhängig von der Düsentemperatur nahezu konstant und ändert sich daher nicht relevant. Demnach hat die Düsentemperatur nur in bestimmten Situationen einen Einfluss auf die Adhäsionskraft. Die gestrichelten Linien stellen keinen Fit dar, sondern dienen nur zur Führung des Auges

von rund 10 N zu beobachten. Eine Änderung des Bauplattformmaterials wirkt sich ähnlich aus. Wird bei einer Bauplattformtemperatur von 70 °C auf Messing gedruckt, so hängt die gemessene Adhäsionskraft kaum von der Düsentemperatur ab. Die Düsentemperatur hat also nur in bestimmten Situationen einen relevanten Einfluss auf die Bauteilhaftung.

Dem gegenüber steht ein generell relevanter Prozessparameter: Er hat unabhängig von der spezifischen Situation einen relevanten Einfluss auf die gemessene Bauteilhaftung. Diese Definition wird am Beispiel der Bauplattformtemperatur veranschaulicht:

In den in Abb. 5.3 gezeigten Messreihen ist zu erkennen, dass der qualitative Zusammenhang zwischen der gemessenen Adhäsionskraft und der Bauplattformtemperatur auch für wechselnde Düsentemperaturen, Druckgeschwindigkeiten und Bauplattformmaterialien stets der gleiche ist. Auch die optimale Bauplattformtemperatur, bei der eine maximale Adhäsionskraft gemessen wird, liegt immer bei dem selben Wert. Damit spielt die Bauplattformtemperatur hinsichtlich der Adhäsionskraft unabhängig von der spezifischen Situation eine relevante Rolle.

Nachfolgend werden die untersuchten Prozessparameter in diese beiden Kategorien eingeteilt (siehe Abb. 5.4) und die Eingruppierung begründet. Zuerst wird die Gruppe der generellen Prozessparameter beschrieben: In den Ergebnissen von Veröffentlichung II konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Bauplattformtemperatur für die getesteten Materialien nicht von anderen Prozessparametern verändert wird. Auch die optimale Bauplattformtemperatur, bei der eine maximale Bauteilhaftung erreicht wird, verschiebt sich weder durch eine Änderung der Düsentemperatur, der Druckgeschwindigkeit oder mit der Wahl eines anderen Bauplattformmaterials. Daher wird die Bauplattformtemperatur in die Kategorie der generellen Prozessparameter eingruppiert.

Die Dicke der ersten Schicht wird ebenfalls in diese Kategorie einsortiert. Durch sie wird die Größe der Kontaktfläche zwischen dem extrudierten Material und der Bauplattform bestimmt, was sich wiederum auf die Bauteilhaftung auswirkt.

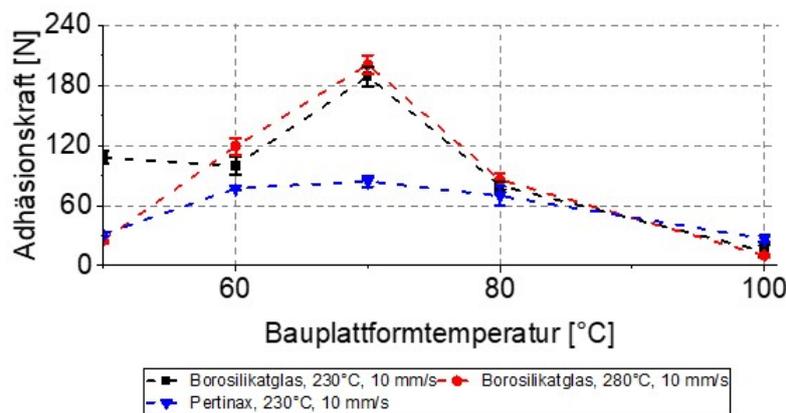


Abbildung 5.3: Einfluss der Bauplattformtemperatur auf die Adhäsionskraft gemessen für verschiedene Düsentemperaturen und Bauplattformmaterialien. Die Bauplattformtemperatur zeigt stets einen großen Einfluss auf die gemessene Adhäsionskraft (schwarze Kurve), unabhängig von der Düsentemperatur (rote Kurve) oder dem Druckmaterial (grüne Kurve). In jedem Fall kann die Adhäsionskraft um mehr als 60 N gesteigert werden, wenn die Bauplattformtemperatur optimiert wird. Auch die Position des Optimums, bei der eine maximale Adhäsionskraft gemessen wird, verschiebt sich nicht durch die zuvor genannten Änderungen der Prozessparameter. Die gestrichelten Linien stellen keinen Fit dar, sondern dienen nur zur Führung des Auges

Das Material der Bauplattform wird ebenfalls in die Gruppe der generellen Prozessparameter einsortiert, da die Paarung aus Druckmaterial und Bauplattformmaterial eine grundlegende Randbedingung im FFF-Prozess ist. Wie in den vorgestellten Veröffentlichungen gezeigt wurde, wird dadurch eine Vielzahl an Beziehungen zwischen den Prozessparametern und der Bauteilhaftung festgelegt. Dies ist in jedem Anwendungsfall zu beachten, weswegen das Bauteilmaterial als genereller Prozessparameter klassifiziert wird.

Nun wird begründet, wieso die anderen untersuchten Prozessparameter in die Kategorie der spezifischen Prozessparameter eingeteilt wurden:

Die Feuchte des verdruckten Materials wirkt sich nur bei Materialien wie PA oder PVA merklich aus, die eine relevante Menge an Wasser binden können. Materialien wie PLA nehmen hingegen nur so geringe Mengen an Wasser auf, dass keine Auswirkungen wie etwa eine Verschiebung der optimalen Bauplattformtemperatur nachgewiesen werden konnten. Daher muss der Feuchtegehalt im Druckmaterial nur in Anwendungsfällen mit entsprechenden Materialien beachtet werden.

Wie in Veröffentlichung II gezeigt wurde, kann die Bauteilhaftung unabhängig von Bauplattformtemperatur oder -material gesteigert werden, wenn langsamer gedruckt wird. Allerdings darf bei der Wahl der Druckgeschwindigkeit in einem realen Anwendungsfall nicht nur die Bauteilhaftung betrachtet werden. In einem realen Anwendungsfall muss die Druckgeschwindigkeit auch auf die zu fertigende Geometrie angepasst werden [45]. Dadurch kann die Druckgeschwindigkeit nur in manchen Situationen rein auf die Bauteilhaftung optimiert werden und ist deshalb als situativer Prozessparameter anzusehen.

Auch die Düsentemperatur ist ein solcher situativer Prozessparameter. Sie hat nur auf bestimmten Bauplattformmaterialien überhaupt einen Einfluss auf die Bauteilhaftung. Zudem kann auch sie nicht ausschließlich auf eine maximale Bauteilhaftung optimiert werden, da sie mit der gewählten Druckgeschwindigkeit wechselwirkt. Wie die Ergebnisse von Nienhaus [27] zeigen, bestimmen die Druckgeschwindigkeit und die Düsentemperatur zusammen die zur Materialeextrusion benötigte Kraft. Wird daher z.B. wie oben beschrieben die Druckgeschwindigkeit auf die zu fertigende Geometrie angepasst, kann die Düsentemperatur nicht mehr frei gewählt werden. Sie muss dann so gewählt werden, dass die notwendige Extrusionskraft noch von der Fördereinheit

bereit gestellt werden kann. Des Weiteren bestimmt die Düsentemperatur, wie stark die mechanische Belastbarkeit des gefertigten Bauteils ist [46, 9]. Aus diesen Gründen wird die Düsentemperatur bei den situativen Prozessparametern eingruppiert.

Die Kontaktzeit wird ebenfalls in die Gruppe der situativen Prozessparameter einsortiert. Sie wird maßgeblich von der Druckgeschwindigkeit bestimmt, die wie oben beschrieben in der Regel auf die zu fertigende Geometrie angepasst werden muss.

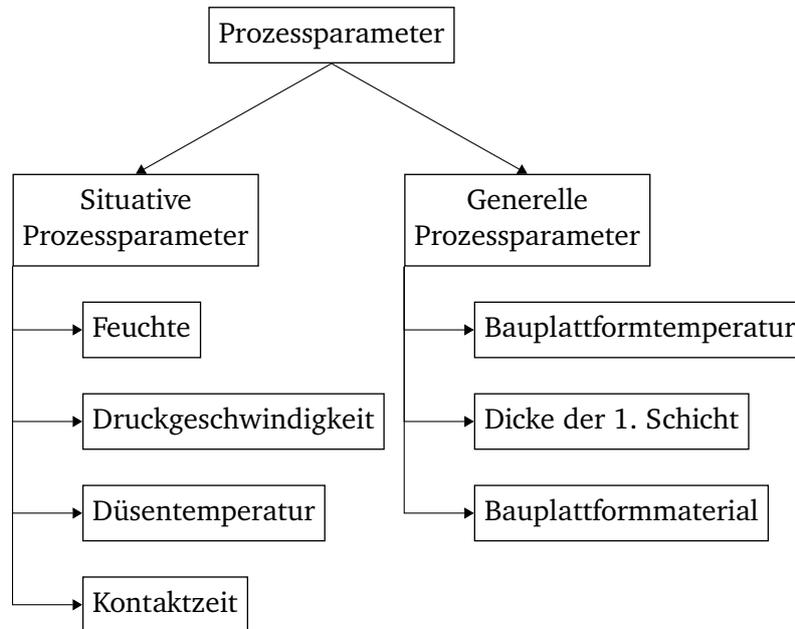


Abbildung 5.4: Kategorisierung der Prozessparameter

Mit Hilfe der in diesem Kapitel erstellten Kategorisierung kann nun beurteilt werden, für welche Prozessparameter ein allgemein gültiges Ranking hinsichtlich des Einflusses auf die Bauteilhaftung erstellt werden kann. Dies wird im nächsten Kapitel diskutiert.

Wie eingangs beschrieben, ist die Grenze, ab der eine Änderung als relevant einzustufen ist, unter anderem von der zu fertigenden Geometrie und dem verarbeiteten Material abhängig. Dennoch ist die gefundene Einteilung generell gültig:

Wie die Ergebnisse in Veröffentlichung III und IV nahelegen, sind Wasserstoffbrücken- oder Ionenbindungen zwischen verdrucktem Material und der Bauplattform der Grund für die Bauteilhaftung. Wird nun ein Bauplattformmaterial verwendet, das keine solchen Bindungen eingehen kann, so ist die Wahl aller anderen Prozessparameter irrelevant. Die Fähigkeit, solche Bindungen einzugehen und damit die richtige Wahl des Bauplattformmaterials ist generell eine Voraussetzung für eine Bauteilhaftung. Dabei gilt, je größer die Kontaktfläche zwischen verdrucktem Material und Bauplattform, desto stärker wird die Adhäsion. Die Größe dieser Kontaktfläche wird durch die Dicke der ersten Schicht bestimmt, die somit ebenfalls in jedem Szenario wichtig ist (siehe Veröffentlichung II und Kapitel 4.5.1).

Wie in Veröffentlichung IV dargelegt, spielt die Beweglichkeit der Molekülketten eine wichtige Rolle für die Stärke der adhäsiven Bindung zwischen Bauplattform und verdrucktem Material. Diese wird maßgeblich durch die Temperatur bestimmt. Daher spielt die Bauplattformtemperatur ebenfalls in jedem Fall eine relevante Rolle.

Diese qualitativen Erklärungen werden auch durch die Messreihen der vier Veröffentlichungen gestützt. In jedem getesteten Szenario verändern generelle Prozessparameter die gemessene Bauteilhaftung mindestens in der gleichen Größenordnung wie situative Prozessparameter. Umgekehrt ist das nicht der Fall.

5.2.4 Relevanz der Prozessparameter

Welche Prozessparameter wie relevant im Hinblick auf die Bauteilhaftung sind, kann nur für die generellen Prozessparameter umfassend diskutiert werden. Die Relevanz, also mit welcher Priorität der Anwender die Parameter optimieren sollte, eines generellen Prozessparameters wird anhand der folgenden vier Kategorien festgelegt:

1. Wie stark beeinflusst der betrachtete Parameter die gemessene Bauteilhaftung und wie groß ist das nutzbare Prozessfenster? Unter dem Begriff "Prozessfenster" wird das Intervall verstanden, in dem sich ein Prozessparameter bewegen muss, um einen erfolgreichen Druckprozess sicherzustellen. Je empfindlicher die Bauteilhaftung auf eine Änderung eines Prozessparameters reagiert, umso wichtiger ist er. Gleichzeitig muss dabei die Größe des nutzbaren Prozessfensters betrachtet werden: Ist der Druckprozess zum Beispiel nur erfolgreich, wenn für den betrachteten Parameter ein genauer Wert gefunden wird, ist die Optimierung dieses Parameters relevant. Dieser Fall entspricht einer hohen Empfindlichkeit und einem kleinem Prozessfenster. Hat ein Prozessparameter ein großes Prozessfenster, kann in der Regel bereits ohne Parameterstudie direkt ein passender Wert anhand von Kennwerten (z.B. der Glasübergangstemperatur) gewählt werden.
2. Wie stark hängt der Einfluss des betrachteten Parameters auf die Adhäsion von anderen Prozessparametern ab? Ein Parameter wird als umso relevanter eingestuft, desto weniger sein Einfluss auf die Bauteilhaftung von anderen Prozessparametern abhängt.
3. Wie stark beeinflusst der betrachtete Parameter selbst die Einflüsse anderer Prozessparameter auf die Adhäsion? Ein Parameter ist umso wichtiger, je stärker er die Beziehungen zwischen anderen Prozessparametern und der Bauteilhaftung prägt.

-
4. Wie stark kann man als Anwender den Parameter verändern? Je einfacher ein Parameter vom Anwender verändert werden kann, umso relevanter ist er. So kann z.B. die Bauplattformtemperatur einfach in der Software geändert werden, während z.B. der Feuchtegehalt des Druckmaterials nur mit großem Aufwand gezielt vom Anwender eingestellt werden kann.

Nachdem nun die Bewertungskriterien definiert sind, können die generellen Prozessparameter untereinander verglichen und eine Rangliste erstellt werden:

Den ersten Platz als wichtigster Parameter belegt dabei das Material der Bauplattform. In Veröffentlichung I konnte gezeigt werden, dass das Material der Bauplattform auf das Druckmaterial abgestimmt sein muss. Zum Beispiel haften auf Bauplattformen aus Messing nur solche Kunststoffe, die eine Ester-Gruppe in ihrer Wiederholeinheit haben (siehe auch Veröffentlichung III). Ist dies nicht der Fall, kann auch trotz einer Optimierung aller anderer Druckparameter keine ausreichende Bauteilhaftung erzielt werden. Eine falsche Paarung aus Druckmaterial und Bauplattformmaterial kann also den Druckprozess grundsätzlich verhindern. Des Weiteren bestimmt die Wahl des Bauplattformmaterials in vielen Fällen, in welcher Beziehung viele situative Prozessparameter mit der Bauteilhaftung stehen (siehe Veröffentlichung II) und wie groß die Prozessfenster sind. So zum Beispiel die Düsentemperatur: Wie in Veröffentlichung II gezeigt wurde, wirkt sich eine Steigerung der Düsentemperatur je nach gewähltem Bauplattformmaterial immer anders auf die Bauteilhaftung aus. Während für Pertinax mit steigenden Düsentemperaturen immer auch steigende Bauteilhaftungen einhergehen, ist dies für Messing nicht der Fall. Hier bleibt die gemessene Bauteilhaftung trotz sich ändernder Düsentemperatur nahezu konstant. Zudem kann das Material der Bauplattform in der Regel frei vom Benutzer gewählt werden. Lediglich bei der Verarbeitung von Hochtemperaturkunststoffen wie Polyetheretherketon (PEEK) oder Polyphenylsulfon (PPSU) muss darauf geachtet werden, dass das Material der Bauplattform hitzebeständig ist und die auftretenden mechanischen Belastungen aushält.

Den zweiten Platz nimmt die Dicke der ersten Schicht ein. Ihr Einfluss auf die Bauteilhaftung ist genauso groß wie der des Bauplattformmaterials, da falsch eingestellte Dicken der ersten Schicht ebenfalls einen vollständigen Verlust der Bauteilhaftung verursachen können. Die Beziehung zwischen der Dicke der ersten Schicht und der Bauteilhaftung ist aber abhängig vom Bauplattformmaterial. Wie in Veröffentlichung II gezeigt werden konnte, verschiebt sich das Optimum, wenn das Material der Bauplattform getauscht wird. Zudem legen die Ergebnisse von Nienhaus [27] nahe, dass weitere Wechselwirkungen mit der Düsentemperatur und der Druckgeschwindigkeit bestehen. Entsprechend der oben definierten Bewertungskriterien wird die Dicke der ersten Schicht daher auf dem zweiten Platz einsortiert.

Die Bauplattformtemperatur ist auf dem dritten Platz. Auch eine falsch gewählte Bauplattformtemperatur kann eine ausreichende Bauteilhaftung verhindern und den Prozess so zum Scheitern bringen. Wie in Veröffentlichung II und IV gezeigt wurde, ist das Prozessfenster, in dem ein stabiler Prozess gewährleistet werden kann, durch die Glasübergangstemperatur eindeutig gekennzeichnet. Im Gegensatz zur Dicke der ersten Schicht oder dem Bauplattformmaterial kann anhand bekannter Literaturwerte schnell ein Wert nahe des Optimums gefunden werden. Die Bauplattformtemperatur beeinflusst, wie situative Prozessparameter wie die Düsentemperatur und die Kontaktzeit mit der Bauteilhaftung zusammenhängen (siehe Veröffentlichung II und III). Außerdem kann der Anwender die Bauplattformtemperatur in vielen Fällen einfach ändern. Allerdings ist sie selbst auch Wechselwirkungen mit der Feuchte des Druckmaterials unterworfen (siehe Veröffentlichung IV). Dieses Ranking kann nun genutzt werden, um bei einer mangelnden Bauteilhaftung gezielte Verbesserungen vorzunehmen. Die nachfolgend auf Basis des Rankings vorgeschlagene Vorgehensweise ist dabei allgemein nutzbar:

Ist die Bauteilhaftung im spezifischen Anwendungsfall zu niedrig, sollte zuerst geprüft werden, ob Druck- und Bauplattformmaterial kompatibel sind oder ob eine bessere Kombination genutzt werden kann. Die Ergebnisse aus Veröffentlichung I und III können bei der Auswahl genutzt werden, um auch ohne vorherige Parameterstudien Materialpaarungen auszuwählen bzw. auszuschließen. Weißt ein Druckmaterial zum Beispiel keine Ester-Gruppen in der Wiederholeinheit auf, so ist zu erwarten, dass eine Haftung auf Bauplattformen

aus Messing nicht gegeben ist.

Ist eine passende Kombination aus Druck- und Bauplattformmaterial ausgewählt, aber die Bauteilhaftung immer noch zu niedrig, sollte die Dicke der ersten Schicht optimiert werden. Dabei helfen die Ergebnisse aus Veröffentlichung II. Die tatsächlich gedruckte Dicke der ersten Schicht sollte kleiner sein als in der Slicersoftware eingestellt. Der genaue Wert muss dabei in einer Parameterstudie ermittelt werden, allerdings erwies sich in den durchgeführten Studien ein Bereich von etwa 60 % bis 98 % der im Slicer eingestellten Schichtdicke als sinnvoller Ausgangswert.

Ist trotz Optimierung des Bauplattformmaterials und der Dicke der ersten Schicht immer noch keine ausreichende Bauteilhaftung erzielt worden, so sollte als nächstes die Bauplattformtemperatur optimiert werden. Wie die Ergebnisse aus Veröffentlichung II zeigen, ist ein Optimum in der Nähe der Glasübergangstemperatur zu erwarten. Entsprechend den Erkenntnissen aus Veröffentlichung IV sollte dabei der Feuchtegehalt des Druckmaterials konstant gehalten werden, da ansonsten keine reproduzierbaren Ergebnisse zu erwarten sind.



Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Optimierung der Bauteilhaftung. Zuerst sollte das Bauplattformmaterial auf das zu verdruckende Material abgestimmt und danach die Dicke der ersten Schicht optimiert werden. Im Anschluss daran kann die Bauteilhaftung durch ein Anpassen der Bauplattformtemperatur verbessert werden. Erst nach diesen drei Maßnahmen sollte eine Optimierung der situativen Prozessparameter durchgeführt werden.

Erst wenn alle generellen Prozessparameter optimiert sind und die Bauteilhaftung immer noch zu niedrig ist, sollte eine Anpassung der situativen Prozessparameter vorgenommen werden.

Wie in diesem Kapitel dargelegt, erlauben die Ergebnisse aller vier Veröffentlichungen eine gezielte Verbesserung der Bauteilhaftung. Parameterstudien müssen zwar immer noch durchgeführt werden, können aber durch die gewonnenen Erkenntnisse im Umfang deutlich verringert werden.

5.3 Mögliche Ursachen der Adhäsion im FFF-Prozess

Der aktuelle Stand der Forschung zur Frage, welche Mechanismen die Bauteilhaftung im FFF-Prozess verursachen, wird in Kapitel 4.3 und in Veröffentlichung III vorgestellt. An dieser Stelle wird diskutiert, inwiefern die Ergebnisse aller vier Veröffentlichungen die von anderen Studien vorgeschlagenen Erklärungen stützen oder in Frage stellen.

Vorherige Studien [22, 12, 13] erklären die Bauteilhaftung durch eine mechanische Adhäsion zwischen Druckmaterial und Bauplattform. Drei beobachtete Zusammenhänge stützen diese Erklärung:

Das erste Argument für die Richtigkeit dieser Erklärung ist der Zusammenhang zwischen der tatsächlich gedruckten Dicke der ersten Schicht und der Bauteilhaftung (siehe Kapitel 4.5). Die Dicke der ersten Schicht wurde verändert, indem der Abstand zwischen Düse und Bauplattform bei konstantem Volumenstrom immer weiter verkleinert wurde. Dass immer höhere Bauteilhaftungen bei kleiner werdenden Schichtdicken gemessen wurden, kann mit mechanischer Adhäsion erklärt werden. Je näher die Düse an der Bauplattform ist, desto stärker wird das extrudierte Material in die Mikrokavitäten der Oberflächenrauigkeit gepresst. Dabei wird auch die Kontaktfläche zwischen gedrucktem Strang und Bauplattform größer, was ebenfalls zu einer größeren Bauteilhaftung führt. Dieses Argument gilt aber ebenso für alle anderen Adhäsionsmechanismen.

Zweitens wurde in manchen Messreihen bei erhöhten Verarbeitungstemperaturen auch eine erhöhte Bauteil-

haftung beobachtet (siehe Kapitel 4.4 und 4.5) . Durch die erhöhten Temperaturen sinkt die Viskosität des extrudierten Materials, sodass es die Hohlräume auf der Oberfläche der Bauplattform besser ausfüllen kann. Wird die Bauplattformtemperatur allerdings zu hoch gewählt, sinkt die Festigkeit des extrudierten Materials und es kann beim Ablösen wieder leichter aus den Kavitäten entfernt werden. Dies erklärt den beobachteten Verlust von Bauteilhaftung bei hohen Bauplattformtemperaturen.

Drittens wurde in Veröffentlichung I beschrieben, dass die Bauteilhaftung bis zu einem gewissen Grad ansteigt, wenn mehrmals an die selbe Stelle gedruckt wird. Das lässt darauf schließen, dass Rückstände des verdruckten Materials in den Kavitäten auf der Oberfläche der Bauplattform verbleiben.

Mittels mechanischer Adhäsion als einzig relevanter bzw. wichtigster Mechanismus können aber einige gemachte Beobachtungen nicht erklärt werden:

Die stärksten Bauteilhaftungen wurden auf Bauplattformen aus Borosilikatglas gemessen (siehe Kapitel 4.4 und 4.5). Vergleicht man aber die Kennwerte der Oberflächenrauigkeiten der verwendeten Bauplattformen, so hat Glas die geringste Rauigkeit. Dieser Zusammenhang widerspricht der Annahme, dass mechanische Adhäsion die Hauptursache für die beobachtete Bauteilhaftung ist. Des Weiteren führt ein Aufrauen der Oberfläche in manchen Fällen zu einem Verlust der Bauteilhaftung (siehe 4.6). Eine Verschlechterung der Bauteilhaftung nach längeren Kontaktzeiten ist ebenfalls nicht mit einer mechanischen Adhäsion zu erklären. Neben mechanischer Adhäsion wurden in vorherigen Studien auch Diffusionsprozesse ([12]) als Ursache für die Bauteilhaftung in Betracht gezogen. Gestützt wird diese Erklärung durch folgende Beobachtung: Die Bauteilhaftung wird maximal, wenn die Bauplattformtemperatur knapp oberhalb der Glasübergangstemperatur des Druckmaterials liegt. Damit ist die Beweglichkeit der Polymermolekülketten maximal, was Diffusionsprozesse begünstigt [47]. Allerdings kann auch diese Annahme nicht alle Beobachtungen erklären. Feuchtigkeit im Druckmaterial führt zu einer verringerten Beweglichkeit der Molekülketten (siehe Veröffentlichung IV). Demnach sollten Diffusionsprozesse behindert werden und die Bauteilhaftung sollte für getrocknetes Material mit geringerem Wassergehalt höher sein. Allerdings wurde in Veröffentlichung IV das Gegenteil gemessen. Außerdem wurde bei Verwendung von Pertinax als Bauplattform eine zeitliche Abnahme der Bauteilhaftung gemessen. Mit der Annahme, dass Diffusionsprozesse verantwortlich für die Bauteilhaftung sind, sollte eigentlich das Gegenteil der Falls sein. Im Laufe der Zeit sollten sich die Polymerketten von Bauplattform und Druckmaterial immer weiter verschlaufen [20].

Daher muss die Schlussfolgerung gezogen werden, dass neben Diffusionsprozessen und mechanischer Adhäsion noch weitere Mechanismen eine Rolle spielen. In Veröffentlichung III werden Wasserstoffbrücken als mögliche Ursache für die Bauteilhaftung auf Bauplattformen aus Borosilikatglas oder Pertinax diskutiert. Bei Bauplattformen aus Messing findet zuerst eine chemische Reaktion zwischen den Hydroxylgruppen der Oxidschicht und der Ester-Gruppe in der Wiederholeinheit des Druckmaterials statt. Daraus resultiert eine Ionenbindung, die die Bauteilhaftung verursacht. Diese vorgeschlagenen Mechanismen können alle oben genannten Beobachtungen widerspruchsfrei erklären:

Eine optimal eingestellte Dicke der ersten Schicht führt zu einer maximal großen Kontaktfläche zwischen Druckmaterial und Bauplattform. Dadurch maximiert sich die Anzahl Bindungen, was die Bauteilhaftung vergrößert.

Wie oben beschrieben führen höhere Verarbeitungstemperaturen dazu, dass das verdruckte Material besser in die Mikrokavitäten der Bauplattform eingebracht werden kann. Auch dadurch vergrößert sich die Kontaktfläche und somit die Anzahl Bindungen. Außerdem führen höhere Temperaturen zu schneller ablaufenden Reaktionen, sodass sich in der selben Zeit mehr Bindungen ausbilden. Zu hohe Bauplattformtemperaturen lösen diese Bindungen auf [48], sodass die Bauteilhaftung sinkt.

Wie in Veröffentlichung III beschrieben, kann Wasser in Borosilikatglas eindiffundieren und sammelt sich dann hauptsächlich an der Oberfläche. Mikrokavitäten sind für eine Bauteilhaftung nicht zwingend notwendig. Daher ist es kein Widerspruch, dass auf der glattesten Bauplattform die höchste Adhäsionskraft gemessen wird. Dass das zeitliche Verhalten der Bauteilhaftung und die Auswirkungen von Sandstrahlen mit diesen

vorgeschlagenen Erklärungen kompatibel ist, wird in Kapitel 4.6 näher erläutert.

Auch die Zunahme der Bauteilhaftung mit steigendem Wassergehalt kann erklärt werden. Durch die veränderte Mobilität der Polymerketten interagieren die Moleküle des verdrukten Kunststoffes stärker mit der Bauplattform. Außerdem sind Wassermoleküle polar und können dazu führen, dass mehr Bindungen entstehen.

Die in dieser Dissertation gewonnenen Erkenntnisse ergeben ein umfassenderes Bild von den wirkenden Adhäsionsmechanismen. Sie legen nahe, dass neben mechanischer Adhäsion und Diffusion weitere Mechanismen wie Wasserstoffbrücken oder Ionenbindungen eine Rolle spielen. Diese Erkenntnisse erlauben eine gezieltere Verbesserung der Bauteilhaftung wie in Kapitel 5.2.4 beschrieben wurde.

5.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Dissertation beleuchtet die Haftung von Bauteilen auf der Bauplattform im FFF-Prozess. Die Bauteilhaftung stellt einen adhäsiven Kontakt zwischen dem extrudierten Kunststoff und der Bauplattform dar und ist von zentraler Bedeutung für eine sichere Prozessführung. Trotzdem umfasst der Stand der Wissenschaft nur wenige Quellen, sodass aufwendige Parameterstudien zur Optimierung der Bauteilhaftung immer noch Standard sind. Welche Prozessparameter von Bedeutung für die Bauteilhaftung sind, wie diese untereinander wechselwirken oder weshalb Kunststoffe auf der Bauplattform haften sind immer noch weitgehend ungeklärte Fragen. In einer umfassenden Einflussparameteranalyse werden diese Fragen näher untersucht.

Für eine Untersuchung dieser Fragen wurde zuerst ein auf DIN EN 28510-1 basierendes Messverfahren entwickelt, mit dem die Bauteilhaftung reproduzierbar quantifiziert werden kann. Hier werden Prüfkörper zuerst auf eine zu testende Bauplattform gedruckt, sukzessive abgeschält und die dabei wirkenden Kräfte gemessen. Je größer die beim Abschälen wirkenden Kräfte sind, desto besser die Bauteilhaftung, sodass eine objektive Vergleichbarkeit gegeben ist.

Mit diesem Verfahren wurde der Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Bauteilhaftung sowie die Wechselwirkungen der Prozessparameter untereinander untersucht.

Die tatsächlich gedruckte Dicke der ersten Schicht kann bei falscher Einstellung zu einem nahezu vollständigen Verlust der Bauteilhaftung führen. Zudem gibt es eine optimale Einstellung, bei der die Bauteilhaftung maximal wird. Je nach gewähltem Bauplattformmaterial sollte die tatsächlich gedruckte Dicke der ersten Schicht zwischen 62 % und 98 % der im Slicer eingestellten Dicke für die erste Schicht liegen. Als nächster Prozessparameter wurde die Druckgeschwindigkeit untersucht. Hier wurde festgestellt, dass schnellere Druckgeschwindigkeiten zu einer niedrigeren Bauteilhaftung führen. Neben der Dicke der ersten Schicht und der Druckgeschwindigkeit wurden auch der Einfluss der Verarbeitungstemperaturen beleuchtet. Steigende Bauplattformtemperaturen führen zuerst zu einer steigenden Bauteilhaftung. Nachdem ein Maximum erreicht wird, kehrt sich dieser Trend um und höhere Bauplattformtemperaturen verringern die Bauteilhaftung. Die optimale Bauplattformtemperatur, bei der eine maximale Bauteilhaftung erreicht wird, liegt in der Nähe der Glasübergangstemperatur des Druckmaterials [22, 12, 13]. Zudem zeigen Messungen, dass die optimale Bauplattformtemperatur unabhängig vom Bauplattformmaterial, der Druckgeschwindigkeit und der Düsentemperatur ist. Der Einfluss der Bauplattformtemperatur auf die Bauteilhaftung ist dabei maximal, da eine falsch eingestellte Temperatur zu einem vollständigen Verlust der Bauteilhaftung führt. Neben der Bauplattformtemperatur wurde auch der Einfluss der Düsentemperatur auf die Bauteilhaftung untersucht. Dieser hängt von der Bauplattformtemperatur und vom Bauplattformmaterial ab. Je nachdem wie diese Parameter gewählt wurden kann die Bauteilhaftung um mehr als das Doppelte gesteigert werden oder nahezu unabhängig von der Düsentemperatur sein. Auch die Kontaktzeit zwischen der Bauplattform und dem extrudierten Druckmaterial wurde als Einflussparameter identifiziert. Der Zusammenhang zwischen der Kontaktzeit und der Bauteilhaftung hängt dabei vom gewählten Bauplattformmaterial und der Bauplattformtemperatur ab. Als weiterer Einflussparameter wurde der Feuchtegehalt des verdrukten Kunststoffes identifiziert. Feuchtigkeit

im Druckmaterial führt zu einer Verschiebung der Glasübergangstemperatur, weshalb auch die optimale Bauplattformtemperatur entsprechend der Feuchte angepasst werden muss.

Die durchgeführten Versuche erlauben auch Rückschlüsse auf die wirkenden Adhäsionsmechanismen: Es wurde festgestellt, dass auf Bauplattformen aus Messing nur Kunststoffe mit einer Ester-Gruppe in der Wiederholeinheit haften. Dies kann durch eine chemische Reaktion erklärt werden, bei der diese Ester-Gruppen mit den Hydroxylgruppen der Metalloxide auf der Messingoberfläche reagieren und nachfolgend eine Ionenbindung ausbilden. Im Gegensatz dazu kann die Bauteilhaftung auf Bauplattformen aus Borosilikatglas und Pertinax durch Wasserstoffbrücken erklärt werden. Polare Gruppen in der Wiederholeinheit des verdruckten Polymers bilden dabei Wasserstoffbrücken zu Hydroxylgruppen auf der Bauplattformoberfläche aus. In weiterführenden Versuchen sollten diese Erklärungsansätze mittels Röntgenspektroskopieanalysen weiter untersucht werden, um die entsprechenden Bindungen direkt nachzuweisen.

Die in dieser Dissertation durchgeführten Untersuchungen der Bauteilhaftung im FFF-Prozess führen zu neuen Forschungsansätzen und erlauben es, weiterführende Versuche vorzuschlagen:

In weiterführenden Versuchen sollte die Relevanz hinsichtlich der Bauteilhaftung und eventuelle Wechselwirkungen der Schichtdicke sowie des Düsendurchmesser mit anderen Prozessparametern aufgeklärt werden. Wie die bereits gesammelten Erkenntnisse zeigen, verursachen Fehlstellen durch eine unterbrochene Materialextrusion zu einer verringerten Bauteilhaftung. Der Düsendurchmesser und die Schichtdicke haben einen direkten Einfluss auf die zur Materialextrusion benötigte Kraft. Daher sind Wechselwirkungen mit anderen in dieser Hinsicht relevanten Parametern wie Düsentemperatur oder Druckgeschwindigkeit zu erwarten. Zwischen den bisher untersuchten Prozessparametern können anhand der bereits gewonnenen Erkenntnisse ebenfalls Wechselwirkungen vorhergesagt werden (siehe Tabelle 5.1), die experimentell nachgewiesen werden sollten.

Um eine mangelnde Bauteilhaftung zu beheben ist es ebenfalls Stand der Technik Hilfsstrukturen wie sogenannte Brims oder Rafts einzusetzen (siehe Abb. 5.6). Unter einem Brim versteht man die konzentrische Vergrößerung der ersten Schicht zur Vergrößerung der Kontaktfläche. Ein Raft hingegen besteht in der Regel aus mehreren Schichten, die zwischen Bauteil und Bauplattform gesetzt werden. Auch hier ist das Ziel eine Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen zu druckendem Objekt und Bauplattform. Wann welche Hilfsstruktur benutzt werden sollte und wie diese zu dimensionieren sind, ist bisher nicht wissenschaftlich untersucht worden. Dies hat zur Folge, dass der Einsatz immer mit zahlreichen Versuchen verbunden ist und die steigende Prozessdauer mit der größeren Prozesssicherheit abgewogen werden muss.

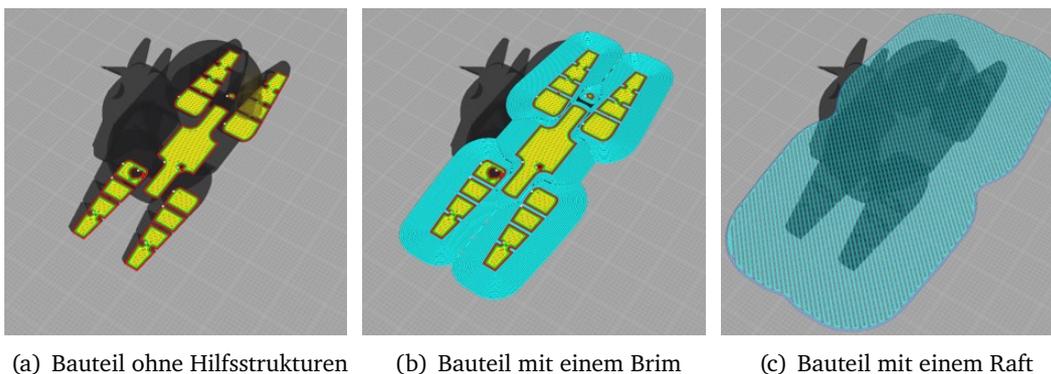


Abbildung 5.6: Verschiedene Hilfsstrukturen zur Verbesserung der Bauteilhaftung: Ein Brim (b) bezeichnet zusätzliche Stränge nur in der ersten Schicht, die konzentrisch um das Bauteil gedruckt werden. Im Gegensatz dazu versteht man unter einem Raft (c) eine zusätzliche Schicht, die unter das Bauteil gesetzt wird und die ebenfalls die Kontaktfläche vergrößert.

Ein weiterer Forschungsansatz, der sich aus der vorliegenden Dissertation ergibt, ist das Übertragen der Methodik und des entwickelten Messverfahrens auf weitere additive Fertigungsverfahren. Warping und die daraus resultierenden Probleme treten nicht nur beim FFF-Prozess auf, sondern beispielsweise auch bei harzbasierten Verfahren, wie Stereolithografie (SLA) [49, 50, 51]. Wissenschaftliche Untersuchungen, wie sich verschiedene Prozessparameter auf die Bauteilhaftung auswirken oder ob hier Wechselwirkungen bestehen sind bisher nicht durchgeführt worden. Die in dieser Dissertation vorgestellte Methodik kann in zukünftigen Untersuchungen als Vorlage genutzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] <https://credit.niso.org/>. Abgerufen am 20.07.2022.
- [2] A. Gebhardt. *Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion*. Carl Hanser Verlag, München, 5 edition, 2016.
- [3] R. Lachmayer. *3d-druck beleuchtet: Additive manufacturing auf dem weg in die anwendung*. Springer, [Place of publication not identified], 2016.
- [4] Hans Albert Richard, Britta Schramm, and Thomas Zipsner. *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- [5] J. Breuninger. *Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion durch Selektives Lasersintern*. Springer, Berlin, 2013.
- [6] C. Lim, K. Le, Q. Lu, and C. Wong. An overview of 3-d printing in manufacturing, aerospace, and automotive industries. *IEEE Potentials*, 35(4):18–22, 2016.
- [7] M. Wirth. *Additive Fertigung Technologie, Markt und Innovation*. Dissertation, Julius- Maximilians-Universität, Würzburg, 2017.
- [8] N. Söhling, J. Neijhoft, V. Nienhaus, V. Acker, J. Harbig, F. Menz, J. Ochs, R. Verboket, U. Ritz, A. Blaeser, E. Dörsam, J. Frank, I. Marzi, and D. Henrich. 3d-printing of hierarchically designed and osteoconductive bone tissue engineering scaffolds. *Materials (Basel, Switzerland)*, 13(8), 2020.
- [9] C. Yang, X. Tian, D. Li, Y. Cao, F. Zhao, and C. Shi. Influence of thermal processing conditions in 3d printing on the crystallinity and mechanical properties of peek material. *Journal of Materials Processing Technology*, 248:1–7, 2017.
- [10] Y. Zhou, H. Lu, G. Wang, J. Wang, and W. Li. Voxelization modelling based finite element simulation and process parameter optimization for fused filament fabrication. *Materials & Design*, 187:108409, 2020.
- [11] F. R. Ramli, M. A. Nazan, M. R. Alkahari, M. N. Sudin, M. A. Abdullah. Investigation of warping deformation in fused deposition modelling by sago starch adhesion. *International Conference on Design and Concurrent Engineering*, 2017.
- [12] M. Spoerk, J. Gonzalez-Gutierrez, C. Lichal, H. Cajner, G. R. Berger, S. Schuschnigg, L. Cardon, and C. Holzer. Optimisation of the adhesion of polypropylene-based materials during extrusion-based additive manufacturing. *Polymers*, 10(5), 2018.
- [13] M. Spoerk, J. Gonzalez-Gutierrez, J. Sapkota, S. Schuschnigg, and C. Holzer. Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication. *Plastics, Rubber and Composites*, 47(1):17–24, 2018.
- [14] VDI-Richtlinie 3405. Additive fertigungsverfahren: Grundlagen, begriffe, verfahrensbeschreibung.

-
- [15] DIN EN ISO 52900:2017 Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie.
- [16] P. Fastermann. *3D-Drucken: Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert*. Technik im Fokus. Springer Vieweg, Berlin and Heidelberg, 2016.
- [17] R. Lachmayer, R. Lippert, and T. Fahlbusch, editors. *3D-Druck beleuchtet: Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [18] W. Brockmann. *Klebtechnik: Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*. Wiley-VCH, Weinheim, 1. nachdr edition, 2008.
- [19] J. Großmann. *Einfluß von Plasmabehandlungen auf die Haftfestigkeit vakuumtechnisch hergestellter Polymer-Metall-Verbunde*. Dissertation, Friedrich- Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2009.
- [20] F. Faupel, R. Willecke, and A. Thran. Diffusion of metals in polymers. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 22(1):1–55, 1998.
- [21] K. Konstadinidis, B. Thakkar, A. Chakraborty, L. Potts, R. Tannenbaum, M. Tirrell. Segment level chemistry and chain conformation in the reactive adsorption of poly(methyl methacrylate) on aluminum oxide surfaces. *Langmuir*, 8(5):1307–1317, 1992.
- [22] M. Kujawa. The influence of first layer parameters on adhesion between the 3d printer's glass bed and abs. 2017.
- [23] DIN EN 28510-1. Klebstoffe - schälprüfung für flexibel/starr geklebte proben - teil 1: 90°-schälversuch.
- [24] D. Laumann, D. Spiehl, and E. Dörsam. Device for measuring part adhesion in fff process. *HardwareX*, 2022.
- [25] ISO 5725-1 :1994. Genauigkeit (richtigkeit und präzision) von messverfahren und messergebnissen: Teil 1: Allgemeine grundlagen und begriffe.
- [26] https://wiki.e3d-online.com/E3D_v6_Documentation. Abgerufen am 05.07.2022.
- [27] V. Nienhaus, K. Smith, D. Spiehl, and E. Dörsam. Investigations on nozzle geometry in fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 28:711–718, 2019.
- [28] N. Naat, Y. Boutar, S. Naimi, S. Mezlini, L. da Silva. Effect of surface texture on the mechanical performance of bonded joints: a review. *The Journal of Adhesion*, pages 1–93, 2021.
- [29] C. Bischof, A. Bauer, W. Possart, R. Kapelle, R. Schulze. Zur adhäsion in metall-polymer-grenzschichten und ihrer praktischen nutzung. *Acta Polymerica*, 40(3):214–221, 1989.
- [30] S. Sedelmeier. *Adhäsion und Wechselwirkungen von Polycarbonat und Polyamid auf Stahloberflächen*. Dissertation, Technische Universität Clausthal, Clausthal, 2017.
- [31] A. McNaught and A. Wilkinson. *IUPAC compendium of chemical terminology*. Blackwell Science, Oxford, 2nd ed. edition, 1997.
- [32] H. Park and S. Lee. Review on interfacial bonding mechanism of functional polymer coating on glass in atomistic modeling perspective. *Polymers*, 13(14), 2021.

-
- [33] C. Clark-Monks and B. Ellis. Adhesion of polymers and adsorption on glass-like surfaces: Part i. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 28(5):23N–28N, 1969.
- [34] E. Kim, Y. Shin, and S. Ahn. The effects of moisture and temperature on the mechanical properties of additive manufacturing components: fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 22(6):887–894, 2016.
- [35] A. Sambale, M. Kurkowski, and M. Stommel. Determination of moisture gradients in polyamide 6 using stepscan dsc. *Thermochimica Acta*, 672:150–156, 2019.
- [36] X. Wan, Z. Gu, F. Zhang, D. Hao, X. Liu, B. Dai, Y. Song, and S. Wang. Asymmetric janus adhesive tape prepared by interfacial hydrosilylation for wet/dry amphibious adhesion. *NPG Asia Materials*, 11(1), 2019.
- [37] Z. Gu, X. Wan, L. Zhou, F. Zhang, L. Shi, S. Li, B. Dai, G. Shen, and S. Wang. Skin adhesives with controlled adhesion by polymer chain mobility. *ACS applied materials & interfaces*, 11(1):1496–1502, 2019.
- [38] P. Sharma and S. Diebels. A mixture theory for the moisture transport in polyamide. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 33(4):1891–1905, 2021.
- [39] C. Wu and W. Xu. Atomistic simulation study of absorbed water influence on structure and properties of crosslinked epoxy resin. *Polymer*, 48(18):5440–5448, 2007.
- [40] D. Laumann, D. Spiehl, E. Dörsam, and A. Blaeser. Influence of printing material moisture on part adhesion in fused filament fabrication. *The Journal of Adhesion*, 2023.
- [41] V. Titone, A. Correnti, and F. La Mantia. Effect of moisture content on the processing and mechanical properties of a biodegradable polyester. *Polymers*, 13(10), 2021.
- [42] V. Nienhaus. *Untersuchung und Modellierung von Kunststoffextrusionssystemen in der Fused Filament Fabrication*. PhD thesis, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2020.
- [43] D. Laumann, D. Spiehl, E. Dörsam, and A. Blaeser. Interaction of printing speed and temperature settings on the build plate adhesion of 3d printed polylactide acid parts. *The Journal of Adhesion*, 2022.
- [44] D. Laumann, D. Spiehl, E. Dörsam, and A. Blaeser. Parameters influencing the temporal behavior of adhesion on the build plate in fused filament fabrication;. *The Journal of Adhesion*, 2023.
- [45] H. Rother. *3D-Drucken...und dann?* CARL HANSER Verlag GMBH &, München, 2017.
- [46] A. Lepoivre, N. Boyard, A. Levy, and V. Sobotka. Heat transfer and adhesion study for the fff additive manufacturing process. *Procedia Manufacturing*, 47:948–955, 2020.
- [47] W. Hellerich, G. Harsch, and S. Haenle. *Werkstoffführer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfung, Kennwerte*. Hanser, München, 10. aufl. edition, 2010.
- [48] Q. Yuan, T. Zhou, L. Li, J. Zhang, X. Liu, X. Ke, and A. Zhang. Hydrogen bond breaking of tpu upon heating: understanding from the viewpoints of molecular movements and enthalpy. *RSC Advances*, 5(39):31153–31165, 2015.
- [49] J. Ullett, R. Chartoff, A. Lightman, J. Murphy, and J. Li. Reducing warpage in stereolithography through novel draw styles. 1994.

-
- [50] V. Pateloup, P. Michaud, and T. Chartier. Optimization of part orientation and adapted supports for manufacturing of ceramic parts by stereolithography using finite element simulations. *Open Ceramics*, 6:100132, 2021.
- [51] C. Cramer, J. Wilt, Q. Campbell., L. Han, T. Saito, and A. Nelson. Accuracy of stereolithography printed alumina with digital light processing. *Open Ceramics*, 8:100194, 2021.



6 Veröffentlichung I

Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam; Device for measuring part adhesion in FFF process; HardwareX; Januar 2022; <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00258>

Veröffentlicht unter Creative Commons BY 4.0



7 Veröffentlichung II

Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam, Andreas Blaeser; Interaction of printing speed and temperature settings on the build plate adhesion of 3D printed polylactide acid parts; The Journal of Adhesion; June 2022; DOI 10.1080/00218464.2022.2093640

8 Veröffentlichung III

Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam; Parameters influencing the temporal behavior of adhesion on the build plate in fused filament fabrication; The Journal of Adhesion; Oktober 2023;
DOI <http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2023.2268538>

9 Veröffentlichung IV

Daniel Laumann, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam; Influence of printing material moisture on part adhesion in fused filament fabrication; The Journal of Adhesion; Oktober 2023;
DOI <http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2023.2268531>