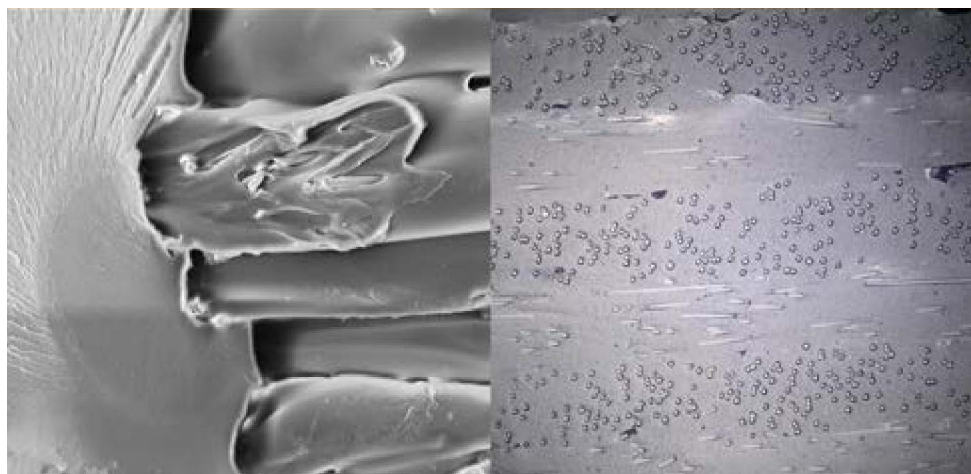


Jens Klaski

Herstellung und Eigenschaften von Spritzguss-Formteilen mit 3D-gedruckten Inserts zur lokalen Verstärkung



Jens Klaski

**Herstellung und Eigenschaften von Spritzguss-Formteilen
mit 3D-gedruckten Inserts zur lokalen Verstärkung**

Die *Schriftenreihe Kunststoff-Forschung* wird herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Auhl

Jens Klaski

**Herstellung und Eigenschaften von Spritzguss-Formteilen
mit 3D-gedruckten Inserts zur lokalen Verstärkung**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Universitätsverlag der TU Berlin, 2020

<http://verlag.tu-berlin.de>

Fasanenstr. 88, 10623 Berlin

Tel.: +49 (0)30 314 76131 / Fax: -76133

E-Mail: publikationen@ub.tu-berlin.de

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2020

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Auhl

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Gleiter (Hochschule Heilbronn)

Die Arbeit wurde am 19. Juni 2020 an der Fakultät III unter Vorsitz

von Prof. Dr. rer. nat. W. Reimers erfolgreich verteidigt.

Diese Veröffentlichung – ausgenommen Zitate und anderweitig gekennzeichnete Teile – ist unter der CC-Lizenz CC BY lizenziert.

Lizenzvertrag: Creative Commons Namensnennung 4.0

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Umschlagfoto:

Jens Klaski | CC BY 4.0

http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

Druck: docupoint GmbH

Satz/Layout: Jens Klaski

ISBN 978-3-7983-3164-8 (print)

ISBN 978-3-7983-3165-5 (online)

ISSN 0174-4003 (print)

ISSN 2197-814X (online)

Zugleich online veröffentlicht auf dem institutionellen Repositorium

der Technischen Universität Berlin:

DOI 10.14279/depositonce-10395

<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-10395>

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in den Jahren 2015 bis 2020 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Polymer-Institut Kunststofftechnik der Hochschule Heilbronn.

Mein besonderer Dank gilt vor allem Prof. Dr.-Ing. Dietmar Auhl von der Technischen Universität Berlin und Prof. Dr.-Ing. Uwe Gleiter von der Hochschule Heilbronn. Diese haben mir durch das entgegengebrachte Vertrauen die Durchführung der Dissertation ermöglicht und durch konstruktive Bemerkungen und Gespräche zum Gelingen beigetragen. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Walter Reimers für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Kollegen an der Hochschule Heilbronn für die gute Zusammenarbeit und hervorragende Arbeitsatmosphäre bedanken. Insbesondere bei den Kollegen M. Altmann, S. Barth, B. Bauer, R. Dauth, M. Diesse, J. Gerdes, M. Gysin, D. Hoch, L. Herrmann, M. Krieg, F. Marner, A. Müller, G. Schröder und G. Wörle möchte ich mich für die tatkräftige Unterstützung, Bereitstellung von Gerätschaften, Fertigungsarbeiten und fachlichen Diskussionen bedanken.

Den Mitarbeitern des Fachgebiets Polymertechnik und Polymerphysik der Technischen Universität Berlin und Herrn Prof. Dr. G. Clauß möchte ich ebenfalls für die fachlichen Ratschläge und kritischen Rückfragen bedanken.

Weiterhin gilt mein Dank den Firmen BASF SE und SIMONA AG für die Bereitstellung von Versuchsmaterialien, der Firma Multec GmbH für die Drucker und der Experimenta gGmbH Heilbronn für die Nutzung ihres Mikroskops.

Auch möchte ich mich bei meiner Familie, insbesondere meiner Frau Sonja und meinen Eltern, bedanken, welche mir den nötigen Rückhalt während meiner Arbeit gegeben haben.

Kurzfassung

In der vorliegenden Dissertation wird die Kombination der Fertigungsverfahren Spritzguss und 3D-Druck untersucht. Es werden einige Anwendungen für die Verfahrenskombination aufgezeigt, wobei die Untersuchung der lokalen Verstärkung von Spritzgussteilen im Fokus steht. Für die Untersuchung der Verstärkung werden Inserts, welche mittels des Verfahrens Fused Deposition Modeling hergestellt werden, in einem zur Herstellung von Hybridbauteilen angepassten Zugprüfstabwerkzeug umspritzt. Dabei wurden Materialien und Geometrien variiert, um Effekte, Wechselwirkungen und die Grenzen des Prozesses zu untersuchen.

Die verwendeten Materialien werden hierzu umfassend charakterisiert und die Fertigungsprozesse näher betrachtet, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Verfahren Fused Deposition Modeling liegt. Dieses Verfahren wird anhand umfangreicher Recherchen näher beschrieben und durch Versuche ergänzt.

Es konnte gezeigt werden, dass bei bestimmten Materialkombinationen und Geometrien Festigkeitssteigerungen bei Hybridbauteilen gegenüber rein spritzgegossenen Bauteilen erreicht werden können. Jedoch zeigte sich, dass die Kombination von glasfaserverstärkten Insertmaterial mit Spritzgießmaterialien aufgrund herausragender Glasfasern zum vorzeitigen Versagen der Hybridbauteile bei ungünstiger Auslegung führen kann.

Abstract

In this dissertation, the combination of injection molding and 3D printing is examined. Some applications for the process combination are shown with a focus on the investigation of the local reinforcement of injection molded parts. For the investigation of the reinforcement, 3D-printed inserts (fused deposition modeling) are overmolded in a tensile test tool adapted for the production of hybrid components. Different materials and geometries were used in order to investigate effects, interactions and the limits of the process.

The utilized materials are comprehensively characterized and the manufacturing processes are closely examined, with the main focus on the process of fused deposition modeling. This process is described in more detail based on extensive research and tests.

It could be shown that with certain material combinations and geometries, strength increases can be achieved in hybrid components compared to purely injection molded components. However, it turned out that the combination of glass fiber reinforced insert material with injection molding materials due to outstanding glass fibers can lead to premature failure of hybrid components with an unfavorable design.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
Kurzfassung	VIII
Abstract	VIII
Inhaltsverzeichnis	IX
Formelzeichen und Abkürzungen	XII
1 Spritzguss mit 3D-gedruckten Inserts	1
1.1 Verfahrensbeschreibung	1
1.2 Möglichkeiten des Verfahrens	3
1.2.1 Kostengünstige und optimierte Festigkeitssteigerung	3
1.2.2 Integration komplexer Geometrien	4
1.2.3 Veränderung weiterer Eigenschaften	4
1.2.4 Anpassung optischer Eigenschaften	5
1.2.5 Verschiedene Materialkombinationen	5
1.3 Nachteile des Verfahrens	5
1.3.1 Kosten	5
1.3.2 Fertigungszeit	5
1.3.3 Positionierung der Inserts	6
1.3.4 Qualität 3D Druck	6
1.4 Spritzgießverfahren	6
1.4.1 Mehrkomponentenspritzguss	6
1.4.2 Kombinationstechnologien	7
1.4.3 Insert-/ Outsert-/ Hybridtechnik	7
1.4.4 Spritzguss mit Füllstoffen, Fasern und Additive	7
1.5 Formfüllung und Faserorientierung	7
1.6 Adhäsionstheorien	9
1.6.1 Mechanisches Adhäsionsmodell	9
1.6.2 Polarisationsstheorie	9
1.6.3 Elektrostatische Theorie	10
1.6.4 Diffusionstheorie	10
1.6.5 Chemiesorption	10
1.6.6 Thermodynamische Interpretation	10
2 Fused Deposition Modeling	11
2.1 Aufbau und Funktionsweise	12
2.1.1 Bewegungseinheit	13
2.1.2 Extruder	14
2.1.3 Druckbett	15
2.1.4 Slicer	15

2.2	Einflussparameter	16
2.2.1	Ausbildung Extrusionslinien	16
2.2.2	Aufbau gedruckter Bauteile	18
2.2.3	Druckraum	20
2.2.4	Temperaturführung	22
2.2.5	Zusammenfassung Druckparameter	24
2.2.6	Einfluss von Drucker und Software	26
2.2.7	Orientierung faserverstärkter Filamente	28
2.3	Verwendete Drucker und Einstellparameter	29
3	Versuchsmaterialien	31
3.1	Prüfeinrichtungen	31
3.1.1	Mechanische Prüfungen	31
3.1.2	Thermische Prüfungen	32
3.2	Polylactid	33
3.2.1	Kennwerte Polylactid	33
3.2.2	Schrumpungsverhalten von Polylactid	35
3.3	Polyamid 6 mit Glasfasern	36
3.3.1	Kennwerte Polyamid 6 mit Glasfasern	36
3.3.2	Glasfaserausrichtung	38
3.4	Polyamid 6	39
3.4.1	Kennwerte Polyamid 6	39
3.5	Polymethylmethacrylat	41
3.5.1	Kennwerte Polymethylmethacrylat	41
3.5.2	Crazing und Scherfließen	43
3.6	Mischbarkeit der Polymere	43
3.7	Herstellung Filament	45
3.7.1	Einfluss Filament auf Bauteilgewicht und Dichte	48
3.7.2	Einfluss Gewicht auf Festigkeit	51
3.7.3	Feuchtigkeitsaufnahme Polyamid	54
4	Spritzgießen	59
4.1	Spritzgießwerkzeug	59
4.1.1	Werkzeugeinsatz für Vielzweckprüfkörper	60
4.1.2	Wechseleinsatz langer Hybridprüfkörper	61
4.1.3	Wechseleinsatz kurzer Hybridprüfkörper	63
4.2	Formfüllung unterschiedlicher Angusskonzepte	64
4.2.1	Filmanguss	65
4.2.2	Doppelseitig fächerförmiger Filmanguss	65
4.2.3	Einseitig fächerförmiger Filmanguss	67
4.2.4	Doppelseitiger Stangenanguss	69
4.2.5	Diskussion Fließverhalten und Simulation	70

4.3	Umspritzen unterschiedlicher Geometrien	72
4.3.1	Umspritzung rechteckiger Inserts	72
4.3.2	Umspritzung rautenförmiger Inserts	73
4.3.3	Effekte beim Umspritzen	74
4.3.4	Simulation der Durchbiegung von Inserts	75
4.3.5	Auswurfsproblematik	75
4.3.6	Verzugsverhalten	75
4.3.7	Innere Spannungen	76
5	Untersuchung an Hybridbauteilen	77
5.1	Haftungsuntersuchung	77
5.1.1	Geometrien Haftfestigkeitsuntersuchung	77
5.1.2	Haftfestigkeitsuntersuchung zwischen Polyamid 6 und Polyamid 6 mit Glasfasern	78
5.1.3	Haftfestigkeitsuntersuchung zwischen Polyamid 6 und Polylactid	80
5.1.4	Haftfestigkeitsuntersuchung zwischen Polymethylmethacrylat und Polylactid	81
5.1.5	Haftfestigkeitsuntersuchung zwischen Polymethylmethacrylat und Polyamid 6 mit Glasfasern	83
5.1.6	Zusammenfassung der Haftfestigkeitsuntersuchung	84
5.2	Untersuchung zur Festigkeitssteigerung	84
5.2.1	Berechnung der zu erwartenden Festigkeiten	85
5.2.2	Insertgeometrie für Hybridprüfkörper	88
5.2.3	Hybridprüfkörper aus Polyamid 6 und Polyamid 6 mit Glasfasern	90
5.2.4	Hybridprüfkörper aus Polyamid 6 und Polylactid	97
5.2.5	Hybridprüfkörper aus Polymethylmethacrylat und Polylactid	100
5.2.6	Hybridprüfkörper aus Polymethylmethacrylat und Polyamid 6 mit Glasfasern	103
5.3	Bewertung der Hybridprüfkörper	106
5.3.1	Zugmodul	106
5.3.2	Erreichbare Festigkeiten	108
5.3.3	Vergleich Konzepte	108
5.3.4	Vergleich Gewichtstheorem	110
6	Zusammenfassung und Ausblick	111
	Literaturverzeichnis	113
	Abbildungsverzeichnis	118
	Tabellenverzeichnis	121

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Formel	Einheit	Erklärung
A_i	mm ²	Querschnittsfläche Insert
A_s	mm ²	Querschnittsfläche Spritzgießmaterial
E_{HPK}	MPa	Zugmodul Hybridprüfkörper
E_i	MPa	Zugmodul Insert
E_s	MPa	Zugmodul Spritzgießmaterial
$g(x)$		Dichtefunktion nach Gauß
$K_{Reduktion}$	%	Reduktionsfaktor
$L_{Bauteil}$	mm	Errechnete (Slicer) Filamentlänge für Druckprozess
$L_{Filament}$	mm	Länge verwendetes Filamentstück
$m_{Filament}$	g	Gewicht verwendetes Filamentstück
$V_{Bauteil}$	mm ³	Bauteilvolumen
$X_{Extrusion}$	%	Ausgleichsfaktor für Extrusion
μ		Mittelwert
ρ_{PA6GF}	g/cm ³	Dichte von Polyamid 6 mit Glasfasern
σ		Standardabweichung
$\sigma_{(t)}$	MPa	Spannung in Abhängigkeit der Dehnung des Inserts
$\sigma_{S(t)}$	MPa	Spannung in Abhängigkeit der Dehnung des Spritzgießmaterials

Abkürzungen

Abb.	Abbildung	PEEK	Polyetheretherketon
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol	PLA	Polylactid
CAD	Computer-Aided Design	PMMA	Polymethylmethacrylat
DSC	Differential Scanning Calorimetry	PTFE	Polytetrafluorethylen
FDM	Fused Deposition Modeling	STL	Standard Triangulation Language
HPK	Hybridprüfkörper	Tab.	Tabelle
HPKR	Hybridprüfkörper-Referenz	TPU	Thermoplastisches Polyurethan
Kap.	Kapitel	V[Zahl]	Variante [Zahl]
PA6	Polyamid 6	Vgl.	Vergleiche
PA6GF	Polyamid 6 mit Glasfasern		

1 Spritzguss mit 3D-gedruckten Inserts

Spritzguss gehört in der Kunststoffverarbeitung zu den bedeutendsten Fertigungsverfahren. Es lassen sich durch dieses Fertigungsverfahren in sehr kurzer Zeit nahezu beliebig große, präzise Formteile herstellen, welche viele geometrische Elemente beinhalten können. Als Massenartikel sind diese Kunststoffteile in der heutigen Gesellschaft kaum wegzudenken.

Das 3D-Drucken bzw. die additive Fertigung gilt trotz der Entwicklung in den späten 1980er Jahren als ein Verfahren der Neuzeit. Dieses ist ein wichtiger Baustein in der neuen digitalen industriellen Revolution „Industrie 4.0“ geworden und wird im industriellen Einsatz immer relevanter. Es lassen sich mit dieser Technologie ressourcenfreundlich nahezu beliebig komplexe Geometrien ab Stückzahl eins produzieren, wobei die Fertigungszeit pro Teil vergleichsweise hoch ist.

Bei dem angestrebten Verfahren werden 3D-Druck und Spritzguss kombiniert, um Bauteile herzustellen, welche die Vorzüge beider Fertigungstechnologien umfassen. Die im 3D-Druck hergestellten Bauteile werden in ein Spritzgusswerkzeug eingelegt und umspritzt, wodurch ein Hybridbauteil entsteht, dessen Materialeigenschaften sich aus denen der Einzelkomponenten zusammensetzen. Die 3D-gedruckten Bauteile sollen unterschiedliche Eigenschaften in das Spritzgussbauteil bringen, welche nicht allein durch den konventionellen Spritzguss erreicht werden können oder wofür andere kostenintensive Verfahren benötigt werden.

Im Laufe dieses Kapitels wird daher im Allgemeinen näher auf das angestrebte Verfahren eingegangen, wobei Möglichkeiten und Herausforderungen aufgezeigt werden. Die weiteren Forschungen der nachfolgenden Kapitel beschränken sich jedoch auf die Untersuchung der Verstärkung von Spritzgießbauteilen mittels der FDM-Technologie. Ziel ist es hierbei die prinzipielle Möglichkeit der Verstärkung durch Inserts und das Verbinden der Einzelkomponenten anhand einer Zugprüfstabgeometrie aufzuzeigen und näher zu untersuchen. Es wird daher auf den Herstellungsprozess und die mechanischen Eigenschaften des Hybridbauteils detailliert eingegangen.

Die Fokussierung stellt hierbei keine Einschränkung der vorgestellten Verfahrenskombination auf Festigkeitssteigerung oder das FDM-Verfahren dar. Die im weiteren Verlauf vorgestellten Möglichkeiten wurden anhand von simplen Beispielen demonstriert, wobei ebenfalls die prinzipielle Möglichkeit besteht andere additive Verfahren wie z. B. Selektives Lasersintern (SLS) oder Stereolithografie (SLA) einzusetzen.

1.1 Verfahrensbeschreibung

Bauteile, welche aufgrund diverser Eigenschaften oder Anforderungen nicht ausschließlich durch die Spritzgießfertigung hergestellt werden können, könnten durch die hier angestrebte Verfahrenskombination ermöglicht werden. Z. B. können in Spritzgussbauteile, welche lokal unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten aufweisen müssen, 3D-gedruckte Inserts mit entsprechend angepassten Polymeren integriert werden. Ebenfalls können Verstärkungsmaßnahmen durch die Integration hochfester 3D-gedruckter Inserts in einem Hybridbauteil ermöglicht werden.

Basierend auf dem zu fertigenden Bauteil müssen hierbei die für den Spritzguss und 3D-Druck herzustellenden Einzelkomponenten definiert werden, welche in der späteren Fertigung ein Hybridbauteil ergeben. Die jeweiligen Einzelkomponenten müssen dabei aufeinander abgestimmt werden. Hierzu muss eine zuverlässige Verbindung zwischen diesen bestehen, welche entweder mechanisch oder über Adhäsion erfolgt.

Die im Spritzguss verwendeten Inserts werden mittels eines oder mehrerer 3D-Drucker hergestellt, wobei dies, je nach Taktzeit des 3D-Drucks im Vergleich zum Spritzguss, vorab oder parallel dazu durchgeführt werden kann. Die Inserts werden vor einem Spritzgusszyklus manuell oder per Automation in das Spritzgusswerkzeug eingelegt und mittels integrierter Haltepunkte innerhalb von diesem fixiert. Danach wird das Insert mit Polymer umspritzt und nach Erreichung einer entsprechenden Temperatur

aus den Werkzeug entnommen. Eventuell anfallende Nacharbeiten oder Fertigungsschritte können anschließend durchgeführt werden.

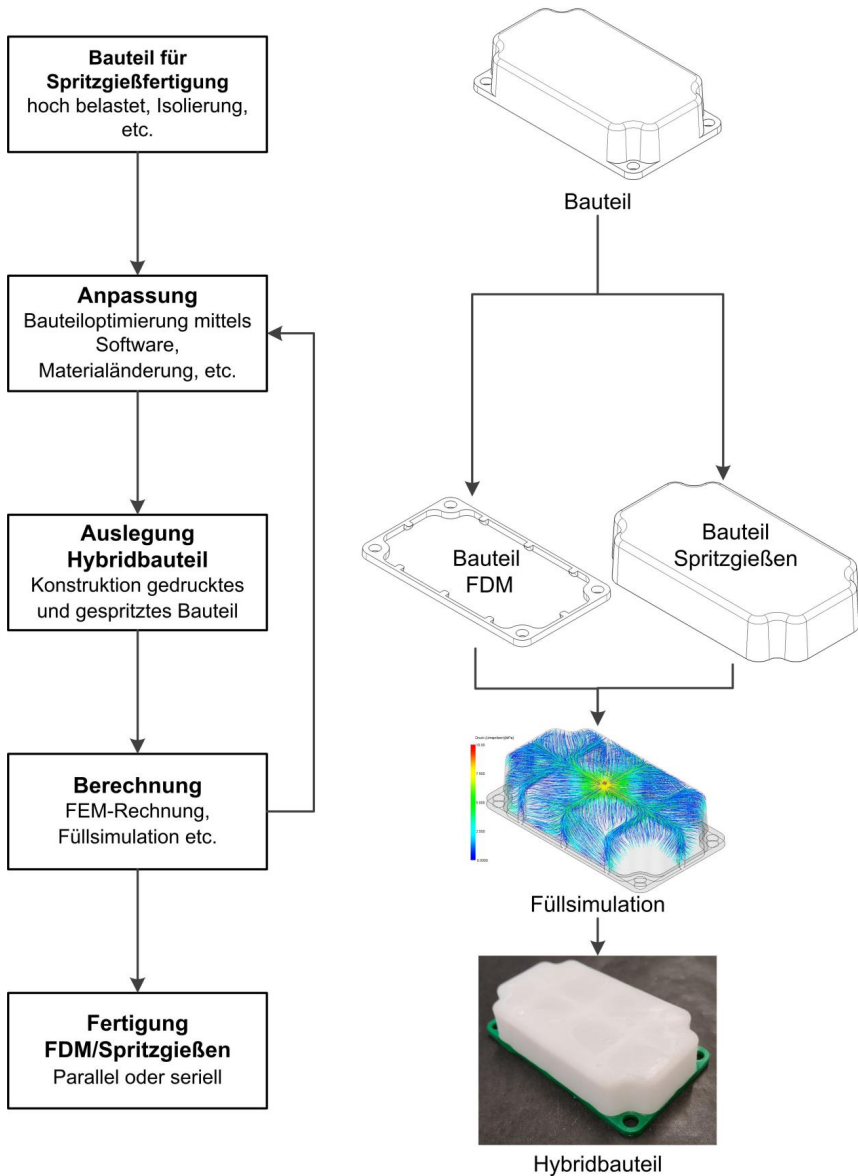


Abb. 1: Verfahrensablauf der kombinierten Fertigung

Die Aufgabe des Spritzgusses ist hierbei die endgültige Formgebung des Hybridkörpers und die Fixierung des Inserts in der jeweiligen Position. Die Vorteile des Spritzgusses liegen in der schnellen Verarbeitung großer Mengen thermoplastischer Polymere sowie der sehr guten Maßhaltigkeit und einer hohen Oberflächenqualität. Durch dieses Verfahren kann eine hohe Anzahl an Bauteilen kostengünstig und schnell erzeugt werden.

Die Aufgabe der 3D-gedruckten Inserts ist die lokale Modifikation bestimmter Eigenschaften des Hybridkörpers, welche nicht allein durch den Spritzguss hergestellt werden können. Die Vorteile des 3D-Druckes sind die Möglichkeit komplexe Geometrien zu erzeugen sowie die einfache und schnelle Anpassung der Geometrie oder des verwendeten Materials.

Die Vorteile, welche sich durch die Kombination der beiden Verfahren ergeben sind somit vielseitig. Es kann als eine Erweiterung der Sonderverfahren des Spritzgusses, welche in Kap. 1.4 beschrieben sind, angesehen werden.

1.2 Möglichkeiten des Verfahrens

1.2.1 Kostengünstige und optimierte Festigkeitssteigerung

Durch den Hybridkörper besteht die Möglichkeit im Spritzguss ein kostengünstiges Polymer zu verwenden, welches geringere Festigkeiten aufweisen kann als benötigt. Das Insert sorgt dann innerhalb des Hybridkörpers dafür, dass die notwendigen Festigkeiten erreicht werden, sodass das Bauteil unter Belastung nicht versagt. Das Insert kann hierbei mittels Bauteiloptimierung ausgelegt werden, sodass dieses ausschließlich die belasteten Bereiche verstärkt. Ein mit Fusion 360 optimiertes Bauteil ist in Abb. 2 abgebildet.

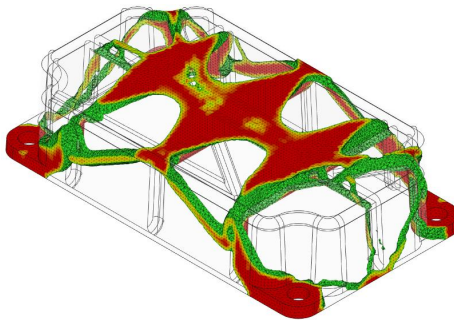


Abb. 2: Berechneter Lastpfad einer Abdeckung mit 30 % Restvolumen; mittige Last mit Lagerung an seitlichen Bohrungen

Bauteile, welche aufgrund von Festigkeitsanforderungen mittels glasfaserverstärkter Polymere hergestellt werden, könnten somit durch dieses Verfahren optimiert werden. Der Vorteil ist hierbei eine höhere Standzeit des kostenintensiven Spritzgusswerkzeugs, da durch Reduktion von bzw. Verzicht auf Glasfasern der Verschleiß im Werkzeug deutlich abnimmt. Zudem kann das Bauteilgewicht reduziert werden, da die relativ schweren Glasfasern nur an den benötigten Stellen vorhanden sind.

Des Weiteren kann die Orientierung der Glasfasern durch 3D-Druck besser beeinflusst werden als beim Spritzguss, da diese sich durch die Strömungsrichtung ausrichten. An zusammenlaufenden Fließfronten bildet sich beim Spritzguss eine Bindenaht mit quer liegenden Glasfasern aus, welche gegenüber Bereichen ohne Bindenaht eine deutlich reduzierte Festigkeit aufweist. 3D-gedruckte Inserts, deren Glasfasern durch eine entsprechende Druckstrategie lastgerecht ausgerichtet sind, können an kritischen Bindenähten eingesetzt werden und somit diese Bereiche verbessern.

1.2.2 Integration komplexer Geometrien

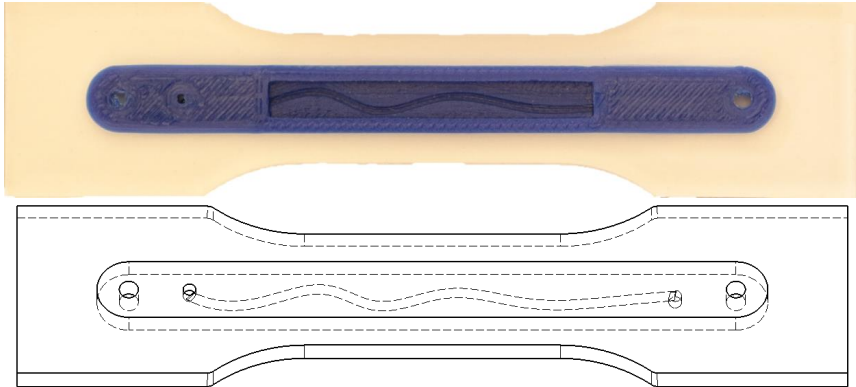


Abb. 3: Umspritztes Insert mit 3D-Kanal. Oben: gefertigtes Bauteil mit Sichtfenster; unten: CAD-Modell

Aufgrund des Fertigungsverfahrens haben Spritzgussbauteile hinsichtlich der Geometrie konstruktive Einschränkungen. Es ist oftmals schwierig und kostenintensiv, Hinterschnitte innerhalb eines Bauteils zu realisieren. Die Wandstärken der Bauteile sind aufgrund der Schwindung auf wenige Millimeter beschränkt und komplexe Hohlräume innerhalb eines Bauteils kaum zu realisieren.

Die Verfahrenskombination kann diese Einschränkungen reduzieren bzw. beseitigen. Hohlräume, Hinterschnitte oder Bereiche mit hoher Wandstärke können im Vorab mittels 3D-Druck aus dem gleichen oder einem kompatiblen Polymer gefertigt und als Insert im Spritzgießwerkzeug eingesetzt werden. Beispielsweise zeigt Abb. 3 ein Hybridbauteil, bei welchem im umspritzten Insert ein 3D-Kanal eingebracht ist. Durch reine Spritzgießfertigung ist dieses Bauteil nur mit mehreren Formteilen und anschließender Montage fertigbar.

1.2.3 Veränderung weiterer Eigenschaften

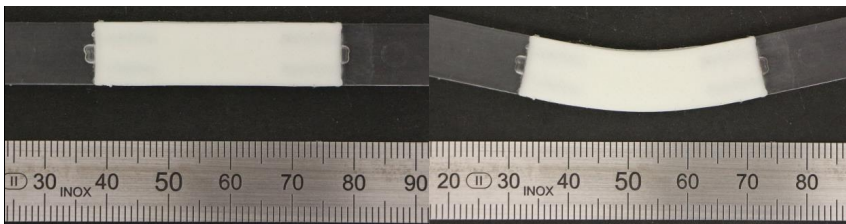


Abb. 4: Umspritztes Insert aus TPU als flexibles Element

Werden in einem spritzgegossenen Bauteil bereichsweise veränderte Eigenschaften benötigt, kann dies durch diese Verfahrenskombination ermöglicht werden. Denkbare Möglichkeiten sind die Anpassung des elektrischen Widerstands, der Wärmeleitfähigkeit, Steifigkeit und vieles mehr. Abb. 4 zeigt ein Hybridbauteil, bei welchem ein elastisches Element aus TPU mit spritzgegossenen PMMA verbunden ist. Hierdurch wird das Hybridbauteil biegsam.

1.2.4 Anpassung optischer Eigenschaften



Abb. 5: Optisch angepasste Spritzgussbauteile

Die Verfahrenskombination ermöglicht es, die optischen Eigenschaften eines spritzgegossenen Bauteils einfach zu verändern, wodurch die Möglichkeit besteht, individuell angepasste Spritzgussbauteile kostengünstig zu erstellen. Somit können auf dem gleichen Werkzeug unterschiedliche Bauteile erzeugt werden. In Abb. 5 sind solch angepasste Spritzgießbauteile zu sehen.

1.2.5 Verschiedene Materialkombinationen

Der 3D-Druckprozess ermöglicht eine einfache Herstellung geometrisch komplexer Bauteile. Somit können Hinterschnitte oder andere Geometrien erzeugt werden, welche beim Spritzgussprozess mit der flüssigen Schmelze infiltriert werden können, wodurch sehr gute mechanische Verbunde entstehen. Dies ermöglicht es Materialien, welche ansonsten keine chemische Verbindung miteinander eingehen, mechanisch miteinander zu kombinieren.

1.3 Nachteile des Verfahrens

1.3.1 Kosten

Als größter Nachteil können die Kosten des Hybridbauteils angesehen werden. Die Fertigungskosten eines Hybridbauteils sind aufgrund des langsamen Fertigigungsprozesses des Inserts, der zusätzlichen Energiekosten, der zusätzlich benötigten Peripherie, dem hohen Entwicklungsaufwand und der Materialkosten deutlich erhöht gegenüber einem rein spritzgegossenen Bauteil.

1.3.2 Fertigungszeit

Die Prozesszeit beim Spritzguss kann, je nach Bauteilgeometrie, nur wenige Sekunden bis zu Minuten betragen, wobei viele Werkzeuge Mehrfachkavitäten beinhalten. Der Produktionsprozess beim 3D-Druck hingegen ist vergleichsweise langsam und wird maßgeblich von der Bauteilgröße beeinflusst. Daher muss bei einer wirtschaftlichen Betrachtung der Verfahrenskombination darauf geachtet werden, dass die Herstellung der Inserts die Produktionszeit nicht signifikant erhöht. Dies kann durch volumetrisch kleine Inserts oder einer hohen Anzahl an parallellaufenden Drucken bewältigt werden. Zusätzlich muss die zu erwartende Fertigungszeiterhöhung aufgrund des Einlegevorgangs der Inserts berücksichtigt werden.

1.3.3 Positionierung der Inserts

Eine große Herausforderung besteht darin, die Inserts innerhalb der Spritzgussform zu positionieren. Aufgrund der hohen Drücke, welche beim Spritzgussprozess innerhalb des Werkzeugs vorherrschen, könnten die Inserts, bei falscher Positionierung, verschoben oder teilweise zerstört werden. Hierdurch bestehen sowohl Einschränkungen bei der Auslegung der Inserts als auch bei der Auslegung des Spritzgusswerkzeuges.

1.3.4 Qualität 3D Druck

Die Qualität 3D-gedruckter Bauteile hinsichtlich Optik, Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit sind, je nach 3D-Druckverfahren, unterschiedlich gut. Es entstehen somit Herausforderungen in der Auslegung kombinierter Bauteile, bei welchen diese Kriterien beachtet werden müssen.

1.4 Spritzgießverfahren

Nach DIN 8580¹ wird das Spritzgießverfahren der urformenden Fertigungsverfahren zugeordnet. Aufgrund der Maßgenauigkeit, Wirtschaftlichkeit und Prozessschnelle ist es eines der am weitesten verbreiteten Fertigungsverfahren. Der Spritzgießprozess wird meist in die drei Phasen Plastifizierung, Formgebung und Entformung unterteilt.

Bei der Plastifizierung wird thermoplastisches Granulat aufgeschmolzen und innerhalb der Schnecke dosiert. Dieses wird anschließend in der Formgebungsphase und unter hohem Druck in das Werkzeug eingespritzt bis dieses komplett gefüllt ist. Nach Beenden der Formfüllung wird in der Nachdruckphase über einen kurzen Zeitraum, genauer bis zum Erreichen des Siegelpunktes, weiterhin Schmelze in das Werkzeug gedrückt, um die Volumenkontraktion der Abkühlgeschwindigkeit des Polymers auszugleichen. Das Werkzeug wird nach der Abkühlzeit, bei welcher das Polymer so lange gekühlt wird bis es die Entformungstemperatur erreicht hat, geöffnet und das fertige Bauteil mittels Auswerfer aus der Form gedrückt.

Bei Sonderverfahren des Spritzgießens werden verschiedene Prozessschritte zusätzlich integriert, um Zeit, Kosten, Aufwand zu verringern oder komplexere, anderweitig nicht herstellbare Bauteile zu ermöglichen. Eine gute Übersicht über Sonderverfahren bieten W. Michaeli und C. Lettowsky². Nachfolgend werden die wichtigsten Sonderverfahren kurz beschrieben.

1.4.1 Mehrkomponentenspritzguss

Der Mehrkomponentenspritzguss bezeichnet die Fertigung von Spritzgussbauteilen, welche aus mehreren, verschiedenen, spritzgegossenen Kunststoffen bestehen. Das Verfahren bietet die Möglichkeit unterschiedliche Funktionalitäten in einem Spritzgussbauteil oder die Montage mehrerer Komponenten kostengünstig zu ermöglichen.

Das Verfahren wird weiterhin in viele Unterverfahren unterteilt, je nachdem ob die Komponenten einzeln oder gleichzeitig eingespritzt werden, eine Haftung zwischen den Komponenten besteht oder nicht, wie der Verbund ermöglicht wird oder ob weitere Technologien zum Einsatz kommen. Oftmals können für gleiche Verfahren mehrere Bezeichnungen vorliegen oder Unterschiede einzelner Verfahren nur im Detail festgestellt werden.³

¹ Vgl. [1]

² Vgl. [2]

³ Vgl. [2]; [3]

1.4.2 Kombinationstechnologien

Bei den Kombinationstechnologien werden zum Spritzgießen eine oder mehrere Verfahrenstechnologien zu einem In-Line-Verfahren integriert. Dies kann innerhalb einer Anlage oder durch hintereinander geschaltete Anlagen geschehen. Beispiele für diese Technologie sind Bauteile aus Organoblechen. Organobleche sind Endlosfasergewebestrukturen mit thermoplastischer Matrix, welche mittels Pressverfahren vorgeformt und anschließend umspritzt werden, um ein lokal verstärktes Bauteil zu generieren. Das Buch „Kombinationstechnologien auf Basis des Spritzgießverfahrens“⁴ bietet eine gute Übersicht zu diesen Verfahren.

1.4.3 Insert-/ Outsert-/ Hybridtechnik

Bei Insert-, Outsert- oder Hybridtechnik wird das Verfahren beschrieben, bei welchem ein meist metallischer Gegenstand im Spritzgießwerkzeug eingebracht und umspritzt wird, um hybride Bauteile zu generieren. Es wird hierbei zwischen verschiedenen Einbringungsarten und Funktionen unterschieden.

Inserttechnik beschreibt das Einlegen kleiner metallischer Bauteile (z. B. Gewindebuchsen) welche umspritzt werden, um lokale Eigenschaften zu verbessern.

Unter Outserttechnik wird das Ein- oder Anspritzen von Kunststoffelementen an anderer Bauteile (z. B. Metallplatten), welche in der Regel keine Spritzgussbauteile sind, bezeichnet.

Bei der Hybridtechnik wird ein Hybridkörper aus Metall und Kunststoff erzeugt. Ein bekanntes Bauteil stellt der „Erlanger Träger“ dar.⁵

1.4.4 Spritzguss mit Füllstoffen, Fasern und Additive

Spritzguss mit Füllstoffen, Fasern oder Additive stellt im eigentlichen Sinne kein Sonderspritzgussverfahren dar, sondern ein Spritzgussverfahren mit Zusatzstoffen zum Spritzgießmaterial, um dessen Eigenschaften zu modifizieren. So können unter anderem durch Beimengen solcher Stoffe thermische, mechanische und optische Eigenschaften der Polymere verbessert bzw. verändert werden.⁶

1.5 Formfüllung und Faserorientierung

Charakteristisch für den Fließvorgang einer Polymerschmelze im Spalt ist der sogenannte Quellfluss. Bei diesem wird davon ausgegangen, dass zwischen kühler Werkzeugwand und Schmelze eine vollständige Haftung besteht und die Schmelze zwischen den erstarrten Randschichten hindurchfließt. Entsprechend bildet sich ein parabelförmiger Geschwindigkeitsverlauf der Schmelze aus. Dieser ist in Abb. 6 dargestellt.

Des Weiteren ist die Dehnströmung zur Beschreibung des Fließverhaltens der Schmelze relevant. Diese tritt zum einen an der Fließfront auf, wie in Abb. 6 zu sehen. Hierbei wird infolge der erstarrten Randschicht die in der Werkzeugmitte fließende Schmelze zur Werkzeugwand umgelenkt und erfährt dadurch eine Dehnung. Ebenfalls tritt diese Strömungsart bei Erweiterung des Fließkanals, z. B. wenn ein Angusspunkt in eine breitere Platte mündet, auf. Infolge der radialen Ausbreitung der Schmelze dehnt sich diese, aufgrund des größer werdenden Umfangs, quer zur Ausbreitungsrichtung aus.

⁴ Vgl. [4]

⁵ Vgl. [2]

⁶ Vgl. [5]

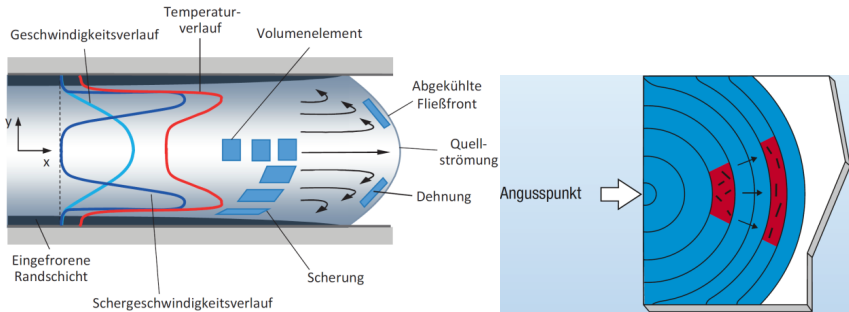


Abb. 6: Strömungsvorgang einer Kunststoffschmelze im Spalt⁷ (links) und Dehnströmung⁸ (rechts)

Zusätzlich spielt die Strukturviskosität der Kunststoffe eine entscheidende Rolle bei der jeweiligen Ausprägung der Quell- und Dehnströmung. Kunststoffe deren Viskosität eine geringere Scherratenabhängigkeit aufweisen, können sich strömungstechnisch anders verhalten wie Kunststoffe deren Viskosität stärker von den Scherraten abhängt.⁹

Relevanz hat die Kenntnis über das Strömungsverhalten der Schmelze bei Füllstoffen. Diese werden i. d. R. durch deren Ausprägung im Bauteil orientiert, wodurch lokale Eigenschaften beeinflusst werden. Insbesondere bei der Verarbeitung von Fasern zur Verstärkung der Festigkeit, wie z. B. Glasfasern, kann, je nach Orientierung, die Festigkeit des Grundpolymers verstärkt oder ggf. geschwächt werden. Es existieren hierzu einige Modelle, welche die Orientierung der Fasern anhand von verschiedenen Schichten im Spritzgießbauteil beschreiben.¹⁰

Da diese Modelle meist auf Platten basieren und reale Bauteile i. d. R. deutlich komplexer sind, ist eine Abschätzung der Orientierung und der somit zu erwartenden Festigkeit des Bauteils meist nur durch Simulation möglich. Oftmals ist es zudem nicht möglich die Schmelze so in ein Werkzeug einströmen zu lassen, dass diese die Fasern optimal orientiert. Es müssen Bindenähte bei Zusammentreffen zweier Fließfronten in Kauf genommen werden, welche häufig, durch die Querorientierung der Fasern, als Schwachstelle fungieren.

⁷ Entnommen aus [6] S.48

⁸ Entnommen aus [7]

⁹ Vgl. [8] S. 103ff; [6] S. 47 ff.; [7]

¹⁰ Vgl. [9]

1.6 Adhäsionstheorien

Als Adhäsion werden die Wechselwirkungskräfte in der Grenzschicht zweier, gefügter Stoffe bezeichnet, welche dafür sorgen, dass ein Zusammenhalt zwischen diesen besteht. Bis heute ist dieser Vorgang nicht vollständig untersucht. Es existieren daher verschiedene Adhäsionstheorien, welche unterschiedliche Mechanismen der Haftung beschreiben. Eine gute Übersicht bietet hierzu Abb. 7.

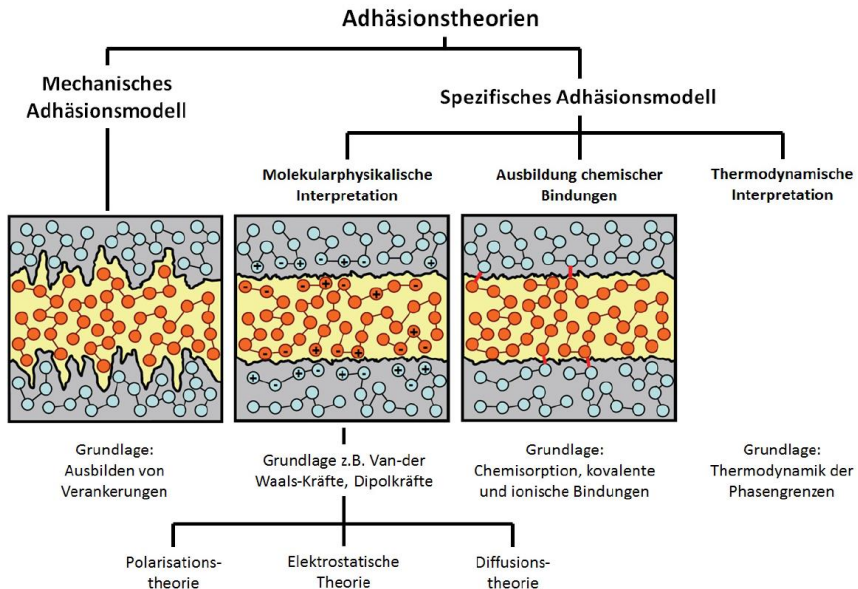


Abb. 7: Adhäsionstheorien¹¹

1.6.1 Mechanisches Adhäsionsmodell

Das mechanische Adhäsionsmodell beschreibt die Verklammerung zweier Phasen aufgrund von Verankerungen bzw. Verzahnungen. Hierbei dringt das zu fügende Material in Poren, Hohlräume und Vertiefungen des Fügepartners ein und bildet somit einen mechanischen Verbund.

1.6.2 Polarisierungstheorie

Die Polarisierungstheorie wurde von De Bruyne¹² aufgestellt und basiert auf molekularphysikalischen Wechselwirkungen in der Grenzfläche zweier Fügepartner. Aufgrund der elektrischen Polarität von Atomen bzw. Molekülen entstehen Wechselwirkungen, wobei eine optimale Haftung nur entstehen kann, wenn beide Fügepartner die gleiche Polarität aufweisen. Bei diesem Modell wird die Adhäsion unpolarer Körper nicht erklärt.¹³

¹¹ Entnommen aus [10] S.5

¹² Vgl. [11]

¹³ Vgl. [10] S. 9

1.6.3 Elektrostatische Theorie

Aufgrund von thermodynamischen Potentialdifferenzen entsteht eine Ladungsträgerdiffusion zwischen den Fügepartnern. Diese führt zur Entstehung einer elektrischen Doppelschicht, einer elektrisch geladenen Zone, in der Grenzfläche. Aufgrund der unterschiedlichen Ladungen entsteht eine Anziehungskraft zwischen den Fügepartnern, welche der Adhäsion entspricht. Dieses Modell wird hauptsächlich für unähnliche Fügepartner, wie Metall mit Kunststoff, verwendet.¹⁴

1.6.4 Diffusionstheorie

Die Diffusionstheorie nach Vojuzkij¹⁵ beschreibt die Diffusion von Makromolekülen, aufgrund von mikrobrownschen Molekularbewegungen, in den Grenzflächen zweier Fügepartner. Hierbei diffundieren Moleküle oder Segmente von Molekülen in den jeweiligen Fügepartner, wodurch es zu Verschlaufungen kommt. Diese Theorie beschreibt hauptsächlich den Polymer-Polymer-Verbund und wird bei identischen Polymeren als Autohäsion und bei verschiedenen Polymeren als Heterohäsion bezeichnet. Voraussetzung für die Diffusion sind ausreichende Bewegungsmöglichkeiten der Makromoleküle, welche durch Temperatur, Zeit, Molekulargewicht und Molekulargewichtsverteilung beeinflusst werden, und die Affinität der Fügepartner.¹⁶

1.6.5 Chemisorption

Bei der Chemisorption wird davon ausgegangen, dass an den Grenzflächen der Fügepartner chemische Bindungen ausgebildet werden. Die hohen Adhäsionskräfte, welche bei Metall-Polymer-Verbindungen zu Kohäsionsbrüchen im Polymer führen, gelten als Nachweis für die Chemisorption. Bei Polymer-Polymer-Verbindungen wurden diese nicht nachgewiesen.¹⁷

1.6.6 Thermodynamische Interpretation

Die thermodynamische Interpretation der Adhäsion basiert auf der Benetzung der Fügepartner. Für die Ausbildung von zwischenmolekularen Wechselwirkungen, deren Wirkbereich unterhalb eines Nanometers liegt, müssen sich die Fügepartner hinreichend nähern. Dies wiederum erfordert die Ausbildung einer geeigneten Grenzfläche, der sogenannten Benetzung, welche auf den Oberflächenenergien der jeweiligen Partner basiert.¹⁸

¹⁴ Vgl. [12] S. 331; [13] S. 19

¹⁵ Vgl. [14]

¹⁶ Vgl. [13] S. 19f; [15] S.15

¹⁷ Vgl. [12] S. 323 ff; [16] S.21 f

¹⁸ Vgl. [10] S.10; [15] S. 15 f

2 Fused Deposition Modeling

Das FDM¹⁹ (Fused Deposition Modeling) gehört zu den additiven Fertigungsverfahren (alt. generative Fertigungsverfahren engl. Additive Manufacturing), welche dadurch gekennzeichnet sind, dass Bauteile über Hinzufügen von Volumenelementen oder Schichten aufgebaut werden. Ein wesentliches Merkmal dabei ist, dass keine bauteilbezogenen Werkzeuge benötigt werden²⁰. Nach DIN EN ISO/ASTM 52900²¹ lässt sich das Verfahren als polymerbasiertes, thermisches Extrusionsverfahren beschreiben. Die allgemeine Prozesskette beim FDM ist in Abb. 8 veranschaulicht.

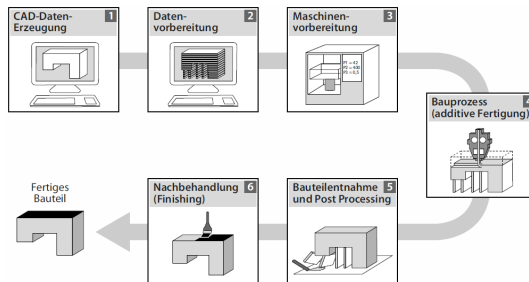


Abb. 8: Prozesskette der additiven Fertigung²²

Zu Beginn der Prozesskette müssen die CAD-Daten des Bauteils (1) erzeugt werden. Diese werden über CAD-Systeme oder mittels 3D-Scan eines bestehenden Bauteils generiert. Die Daten werden anschließend in ein für die FDM-Software, Slicer genannt, verwendbares Format, in der Regel STL, konvertiert. Der Slicer (2) zerlegt das Modell in einzelne Schichten und berechnet den Druckprozess anhand definierter Parameter.

Vor dem Druck muss der Drucker (3) vorbereitet werden. Dies beinhaltet z. B. eine Kalibrierung des Druckers oder ein Materialwechsel. Die Bauteilgenerierung (4) findet anschließend mit den vom Slicer übertragenen Daten automatisch vom FDM-Drucker statt.

Nach dem Druck muss das Bauteil (5) entnommen und eventuelle Stützstrukturen entfernt werden. Es können anschließend noch weitere Fertigungsschritte (6) mit anderen Verfahren erfolgen, um gewünschte Bauteileigenschaften/-qualitäten zu erreichen.

¹⁹ Die Bezeichnung Fused Deposition Modeling bzw. FDM ist eine geschützte Marke der Firma Stratasys Ltd.. Aufgrund der Akzeptanz und Popularität in Büchern und Forschungsarbeiten wird dieser Begriff dennoch (fälschlicherweise) verwendet. Weitere Bezeichnungen dieses Verfahrens sind FFF (Fused Filament Fabrication), FLM (Fused Layer Modeling/Manufacturing) oder Schmelzschichtung.

²⁰ Vgl. [17] S.7; [18]

²¹ Vgl. [19]

²² Entnommen aus [17] S.10

2.1 Aufbau und Funktionsweise

Es gibt unterschiedliche Bauarten von FDM-Druckern, welche jeweils Vor- und Nachteile bieten. Jede Bauart beinhaltet jedoch dieselben Baugruppen bzw. Funktionsprinzipien. Diese sind in Abb. 9 dargestellt.

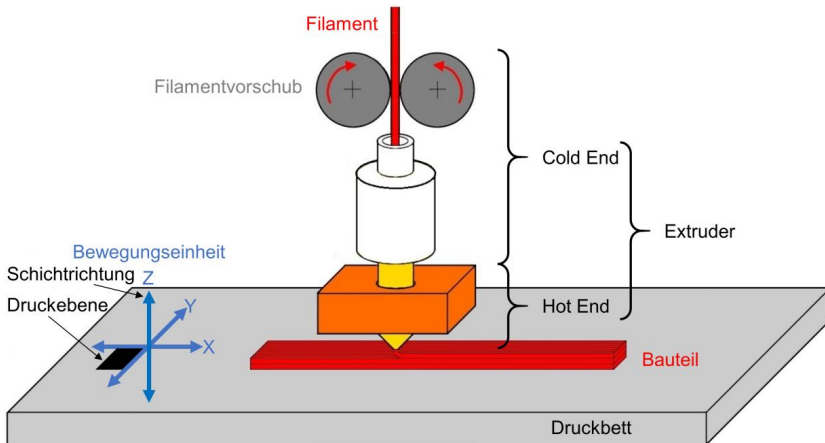


Abb. 9: Prinzipskizze FDM²³

Das Polymer, welches zum Drucken verwendet wird, wird beim FDM in Form eines Drahtes, Filament genannt, zugeführt. Die typischen Durchmesser des Filaments sind 2,85 mm und 1,75 mm mit einer Toleranz von $\pm 0,05$ mm. Die am meisten eingesetzten Polymere sind ABS und PLA.

Das Filament wird über eine Transporteinheit dem Extruder zugeführt und in diesem aufgeschmolzen. Dieser ist in Relation zum Druckbett verfahrbar. Über eine Düse wird das hochviskose Polymer auf dem Druckbett schichtweise abgelegt, wobei dieses verfestigt. Das Bauteil wird somit über mehrere Schichten aufgebaut.

²³ Die Nennung der X-, Y- und Z-Achse bezieht sich im Weiteren auf dieses Koordinatensystem.

2.1.1 Bewegungseinheit

Die Bewegungseinheit realisiert die Relativbewegung zwischen Extruder und Druckbett. Diese sollte eine hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit aufweisen, wobei ebenfalls eine hohe Geschwindigkeit angestrebt wird. Sie beeinflusst maßgeblich die Baugeschwindigkeit und Oberflächenqualität des Bauteils. Derzeit finden vier verschiedene Bauformen (vgl. Abb. 10) der Bewegungseinheit Verwendung²⁴.

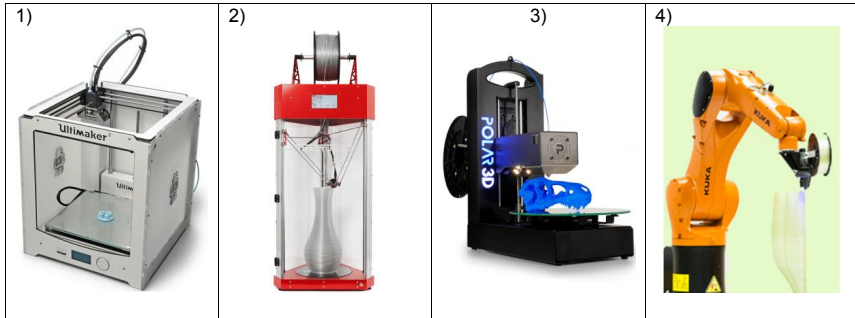


Abb. 10: Unterschiedliche Arten von FDM Bewegungseinheiten²⁵

1. Kartesische Drucker

Am weitesten verbreitet ist die kartesische Bauform. Bei dieser werden die Relationsbewegungen über drei Linearachsen ermöglicht, welche in X-, Y- und Z- Richtung angeordnet sind. Es kann sowohl der Extruder, als auch das Druckbett über die Linearachsen bewegt werden. Am häufigsten kommt eine Mischform vor, bei welcher der Extruder oder das Druckbett über die X- und Y-Achse und der zugehörige Gegenpart über die Z-Achse bewegt wird.

2. Delta Drucker

Der Delta 3D-Drucker verwendet drei Arme, welche aus jeweils einem Parallelogramm bestehen. Die Positionierung erfolgt über die Veränderung der Winkel der Parallelogramme, wobei nur der Extruder, seltener das Druckbett bewegt wird.

3. Polare Drucker

Der polare 3D-Drucker ist ein weniger verbreitetes Model, bei welchem die Positionierung auf der X-Y-Ebene über eine Linear- und eine Rotationsachse erfolgt. Die Z-Achse wird meist am Extruder angebracht.

4. Drucker mit Roboterarm

Beim Roboterarm ist der Extruder auf einem Mehrachsroboterarm montiert, welcher die Positionierung übernimmt. Diese Bauform kommt meist bei sehr großen FDM-Druckern oder bei experimentellen Druckern vor, da diese, im Gegensatz zu den anderen Bauformen, Rotationen des Extruders zulässt.

²⁴ Vgl. [20]

²⁵ Entnommen aus [21]; [22]; [23]; [20]

2.1.2 Extruder

Die Hauptfunktionen des Extruders sind Transport und Aufschmelzen des Filaments. Dieser wird in die Bereiche „Cold End“ und „Hot End“ aufgeteilt. Dem Cold End wird der Filamenttransport und die thermische Abtrennung zum Hot End zugeordnet und dem Hot End alle Funktionen, welche zum Aufschmelzen des Filaments benötigt werden

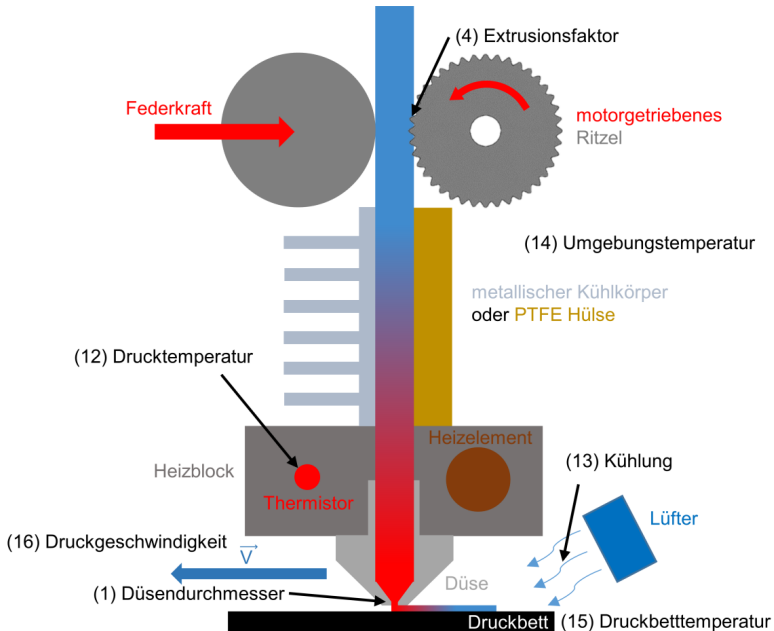


Abb. 11: Schnittbild Extruder mit Einflussparameter

Der Filamenttransport wird über einen Schrittmotor realisiert, welcher, oft über ein Getriebe ein Ritzel antreibt. Das Filament wird mittels einer federgelagerten Anpressrolle an das Ritzel gepresst, wodurch eine Kraftübertragung von Ritzel zu Filament ermöglicht wird. Diese Kraftübertragung besteht aus einer Mischform von Reib- und Formkontakt und ist abhängig von der Anpresskraft, Form des Ritzels und Festigkeit des Filaments.

Der Filamenttransport ist entscheidend für die Druckqualität des Bauteils. Nur bei perfekten Zusammenspiel zwischen dem vorgeschobenen Filament und der Relativbewegung zwischen Druckbett und Extruder können gute Bauteile entstehen. Wird die Leistungsfähigkeit des Filamenttransports überschritten kann es zum Abrutschen des Ritzels und zum Abtrag am Filament kommen. Dies führt zu Fehlstellen im Bauteil oder, falls der Abtrag am Filament zu hoch ist, zum Erliegen des Filamenttransports.

Derzeit kommen zwei Bauarten vor. Bei der ersten, dem Direktextruder, wird der Filamenttransport nahe am Hot End montiert, wodurch die Distanz zwischen Filamenttransport und Aufschmelzbereich sehr kurz gehalten wird. Bei der zweiten wird der Filamenttransport am Gehäuse des 3D-Druckers befestigt und mittels eines flexiblen Rohres, meist aus PTFE, mit dem Hot End verbunden. Dieser wird als Bowden-Extruder bezeichnet.

Die Anbindung zum Hot End dient als thermische Trennung. Diese soll verhindern, dass das Filament frühzeitig aufschmilzt, wodurch es zum Verstopfen des Extruders oder zum ungewollten Auslaufen des geschmolzenen Kunststoffes kommen kann. Dies wird entweder über eine PEEK oder PTFE Hülse

realisiert, welche eine extrem niedere Wärmeleitfähigkeit hat. Alternativ kann eine metallische Anbindung mit geringer Wärmeleitfähigkeit (z. B. Edelstahl) und aktiver Kühlung mittels Lüfter in Kombination mit Kühlrippen eingesetzt werden.

Das Hot End dient zum Aufschmelzen des Filaments. Es besteht bei den meisten Extrudern aus je einem Heizelement, Thermistor, Heizblock und einer Düse. Die vordefinierte Temperatur wird mittels Heizelement und Thermistor geregelt, welche im Heizblock befestigt sind. Die Düse reduziert den Durchmesser des Filaments auf das gewünschte Maß herunter. Der Großteil der Düsen hat eine Düsenöffnung zwischen 0,2 mm und 1,0 mm.

2.1.3 Druckbett

Auf dem Druckbett wird das Bauteil aufgebaut. Es muss eine hohe Ebenheit aufweisen, da beim Drucken von geringen Schichthöhen diese einen hohen Einfluss auf die Qualität des Bauteils hat. Bei einem Druckbett mit geringer Ebenheit kann es vorkommen, dass das Bauteil nicht auf dem Druckbett haftet. Oftmals werden daher Glasplatten als Druckbett verwendet.

Des Weiteren sollte das Druckbett so beschaffen sein, dass das verwendete Filament auf diesem eine gute Haftung hat. Für die Haftung spielen hierbei zwei Faktoren eine wichtige Rolle. Zum einen sollte die Temperatur des Druckbetts dem jeweiligen Material angepasst sein, damit dieses nicht zu schnell bzw. zu stark abkühlt. Aufgrund der Schrumpfung der abgelegten Extrusionslinien beim Abkühlen könnte ansonsten eine Ablösung vom Druckbett erfolgen. Zum anderen muss die Oberfläche des Druckbetts an das jeweilige Filament angepasst werden. Hierzu kann dieses z. B. aufgeraut, mit Kaptonband oder „Blue Tape“ beklebt oder ein Klebestift verwendet werden. Teilweise kommen auch Dauerdruckplatten zum Einsatz, welche an bestimmte Polymere angepasst sind.

2.1.4 Slicer

Der Slicer dient als Schnittstelle zwischen CAD-Modellen und 3D-Drucker. Die zu druckenden Modelle werden im Slicer, auf Basis eingestellter Parameter, in einzelne Schichten zerlegt. Diese wiederum werden weiter in einzelne, meist zusammenhängende Linien zerteilt, welchen Eigenschaften und Druckparameter zugeordnet werden. Hieraus wird ein G-Code mit allen dazugehörigen Informationen erzeugt, welcher vom 3D-Drucker interpretiert werden kann.

Basierend auf dem verwendeten Slicer kann eine Vielzahl von Parametern verändert werden, welche Einfluss auf das zu druckende Objekt haben können. Die Herausforderung für den Bediener besteht hierbei in der optimalen Auslegung der Parameter, sodass das zu druckende Objekt das Maximum der gewünschten Eigenschaften erreicht.

2.2 Einflussparameter

Die Qualität eines 3D-gedruckten Bauteils hängt von einer Vielzahl an Parametern ab, welche überwiegend softwarebasiert sind. Hierbei muss zwischen verschiedenen Zielgrößen differenziert werden, welche je nach Verwendungszweck des Bauteils eine unterschiedliche Gewichtung haben.

Folgende Zielgrößen sind beim 3D-Drucken häufig relevant:

- Druckzeit
Die Zeit welche ein 3D-Drucker benötigt um ein oder mehrere Bauteile zu erstellen. Es wird in der Regel ein Minimum angestrebt.
- Oberflächenqualität
Die Qualität der Oberfläche ist abhängig von den Anforderungen an das Bauteil. Oftmals wird eine möglichst glatte und ebenmäßige Oberfläche gewünscht, welche aufgrund der typischen Stufen beim Druckprozess schwer zu verwirklichen ist.
- Festigkeit
Die maximale Belastung, welche das Bauteil aushält, bevor es versagt. In der Regel wird eine möglichst hohe Festigkeit angestrebt.
- Bauteilgewicht
Das Gewicht des Bauteils. In der Regel wird hierbei ein Minimum angestrebt, um Kosten und Zeit zu sparen.
- Maßhaltigkeit
Der Unterschied zwischen der Vorgabegeometrie der CAD-Datei und der Istgeometrie des gedruckten Bauteils. Die Differenz sollte hierbei minimalst sein.
- Kosten
Die Kosten für ein einzelnes Bauteil, die oftmals von vielen Faktoren abhängig sind. Diese sollten möglichst gering sein.

Voraussetzung zur Optimierung dieser Zielgrößen ist ein funktionierender Druckprozess. Daher muss bei den einzustellenden Parametern darauf geachtet werden, dass Druckfehler nicht entstehen. Hierzu existieren einige Ratgeber, welche auf Fehlerbilder und deren Einflussfaktoren eingehen.²⁶

Für die Verstärkung von Spritzgussteilen mittels 3D gedruckter Inserts ist hauptsächlich die Festigkeit der Inserts ausschlaggebend. Daher werden im nachfolgenden die Druckparameter, welche die höchste Auswirkung auf die Festigkeit haben, auf Grundlage von Recherchen und eigenen Untersuchungen, näher betrachtet.

2.2.1 Ausbildung Extrusionslinien

Im FDM Prozess wird jedes Bauteil aus einer Vielzahl von Extrusionslinien, welche schichtweise abgelegt werden, aufgebaut. Die jeweilige Geometrie der einzelnen Extrusionslinien kann sich auf die Festigkeit auswirken und wird hauptsächlich über die Parameter Schichthöhe, Linienbreite, Düsendurchmesser, Überlappung/Luftspalt und Extrusionsfaktor bestimmt.

Der **Düsendurchmesser**²⁷ (vgl. Abb. 9 (1)) ist der Durchmesser der Düse, durch welchen das geschmolzene Filament gedrückt wird, bevor es auf das Druckbett oder einer bereits gedruckten Schicht abgelegt wird. Er hat Einfluss auf die Auslegung weiterer Parameter. Ein größerer Düsendurchmesser kann die Festigkeit positiv beeinflussen. Gängige Düsendurchmesser liegen zwischen 0,2 mm und 1,0 mm.

²⁶ Simplify 3D- <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/> [24]

Rigid.ink - <https://rigid.ink/pages/ultimate-troubleshooting-guide#issue-walls-caving-in-16> [25]

all3dp - <https://all3dp.com/1/common-3d-printing-problems-troubleshooting-3d-printer-issues/> [26]

²⁷ Vgl. [27]

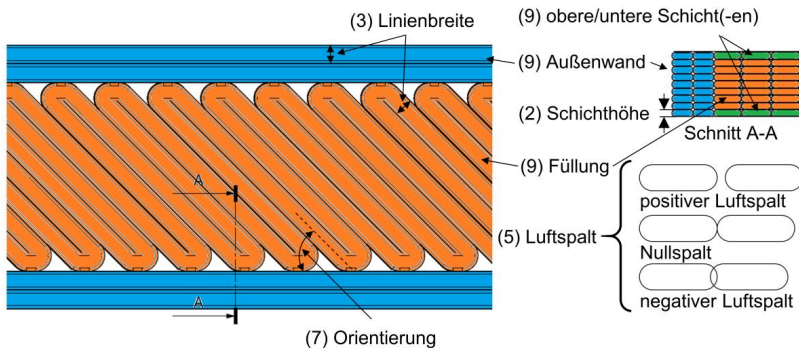


Abb. 12: Parameter der Extrusionslinien

Die **Schichthöhe**²⁸ (vgl. Abb. 12 (2)) ist die Höhe der gedruckten Einzelschichten. Bei der Auslegung der Schichthöhe sollte darauf geachtet werden, dass diese deutlich geringer als der Düsendurchmesser ist, da ansonsten die Haftung zwischen den Schichten negativ beeinflusst werden kann. Gängige Schichtdicken liegen zwischen 0,05 mm und 0,6 mm.

Ergebnisse von veröffentlichten Studien weisen darauf hin, dass mit einer Erhöhung der Schichtdicke eine Reduktion der Festigkeit einhergeht. Dieser Effekt ist bei den Studien unterschiedlich stark ausgeprägt und kann sich unter bestimmten Versuchskonfigurationen auch umkehren. Es ist davon auszugehen, dass die Einflüsse, je nach Druckrichtung (vgl. Bauteilorientierung (10)), unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

Die **Linienbreite**²⁹ (vgl. Abb. 12 (3)) ist die Breite der jeweiligen Extrusionslinien und kann innerhalb eines Bauteils, je nach Zuordnung der Extrusionslinie zur Außenwand oder Füllung, unterschiedlich sein. Die Linienbreite ist vom Düsendurchmesser bedingt abhängig und es gibt unterschiedliche Methoden diese auszuliegen.

Die erste Methode wird z. B. vom Slicer Simplify3D und Slic3r standardisiert verwendet und basiert auf der Quellung durch Überextrusion. Die Linienbreite wird hierbei größer als der Düsendurchmesser (Simplify3D ca. 20 %/ Slic3r ca. 5 %) gewählt. Durch eine verstärkte Extrusion des geschmolzenen Thermoplasts wird dieser zwischen Düse und bereits abgelegter Schicht zu einer seitlichen Quellung gezwungen. Vorteilhaft ist hierbei, dass aufgrund der erhöhten Extrusion der Kunststoff an die bereits liegende Schicht stärker angedrückt wird, wodurch eine Verbesserung der Schichthaftung zu erwarten ist. Diese Methode kann auch negative Effekte haben. Bei einem zu hohen Verhältnis von Linienbreite zu Düsendurchmesser, kleinen Schichtdicken oder hochviskosen Materialien kann u. U. deutlich weniger Thermoplast gefördert werden wie erforderlich, wodurch Fehlstellen im Bauteil entstehen.

Bei der zweiten Methode wird die Linienbreite kleiner als der Düsendurchmesser ausgelegt, wodurch die Düsenöffnung mit bereits abgelegten Extrusionslinien überlappen kann. Hierdurch ist ein besserer Kontakt der Extrusionslinien innerhalb einer Schicht und eine bessere Ausfüllung der für den FDM-Druck typischen Lücken, zu erwarten. Diese Strategie wird vom Slicer Cura (Linienbreite ca. 12 % größer als Düsendurchmesser) standardisiert verwendet.

Der Einfluss der Linienbreite auf die Festigkeit divergiert in Studien, wobei Interaktionen mit weiteren Parametern zu beobachten ist. Der Einfluss ist unterschiedlich ausgeprägt, je nachdem ob die Belastung quer oder in Richtung der Extrusionslinie vorliegt. In Schichtrichtung und in Richtung der Extrusionslinie ist bei zunehmender Linienbreite eine Festigkeitssteigerung zu erwarten.

²⁸ Vgl. [28]; [29]; [30]; [31]; [32]; [33]; [34]

²⁹ Vgl. [32]; [35]; [36]

Beim **Extrusionsfaktor**³⁰ (vgl. Abb. 11 (4)) handelt es sich um einen Korrekturfaktor, welcher die Menge des zu extrudierenden Materials beeinflusst. Aufgrund der Eingabeparameter und den Kalkulationen des Slicers wird eine bestimmte Menge Kunststoff pro abgefahrene Wegstrecke extrudiert. Entspricht diese nicht den Vorgaben kann mittels des Extrusionsfaktors die Menge angepasst werden. Dies kann u. U. erforderlich sein, wenn z. B. der Realdurchmesser des Filaments nicht mit dem Sollwert übereinstimmt.

Kritisch bei diesem Parameter ist, dass es keine allgemeingültigen Qualitätskriterien zu FDM gedruckten Bauteilen gibt. D.h. die Auslegung erfolgt individuell, je nach Ermessen des Bedieners, wodurch häufig eine Vergleichbarkeit von Ergebnissen unterschiedlicher Studien/Materialien/Drucker erschwert bis unmöglich wird, da Effekte und Wechselwirkungen stark von diesem Parameter abhängen. Grundsätzlich gilt, dass mit einer Erhöhung des eingebrachten Materials die Festigkeit zunimmt, wobei darauf geachtet werden sollte, dass eine Überextrusion vermieden wird. Diese äußert sich meist durch Materialanhäufung in der obersten Druckschicht oder seitlich herausquellenden Extrusionslinien.

Der **Luftspalt bzw. die Überlappung**³¹ (vgl. Abb. 12 (5)) bezeichnet den Spalt bzw. die Überschneidung zwischen nebeneinanderliegenden Extrusionslinien. Oftmals wird der jeweils vorliegende Zustand als positiver (Lücke) oder negativer (Überschneidung) Luftspalt bezeichnet. Prinzipiell wird die Festigkeit der Bauteile erhöht, wenn sich die Extrusionslinien überschneiden, jedoch kann sich dies negativ auf die Bauteilqualität auswirken. Dies zeigen auch einige Studien, welche den Einfluss des Luftspalts untersuchen.

2.2.2 Aufbau gedruckter Bauteile

3D-gedruckte Bauteile werden meist in Außenwand und Füllung separiert. Die Außenwand, welche die obere, untere Schicht und die Wanddicke (engl. Perimeter) beinhaltet, befindet sich an der äußersten Kontur des Bauteils und bildet beim Druck die Form des Objektes ab. Als Füllung wird der innenliegende Teil bezeichnet. Dieser wird häufig, im Gegensatz zur Außenwand, nicht komplett ausgefüllt, um Material und Gewicht zu sparen. Wichtige Einflussfaktoren auf die Festigkeit sind hierbei die Orientierung, das Druckmuster, die Füllichte und das Verhältnis von Außenwand zur Füllung.

Das **Druckmuster**³² (vgl. Abb. 13 (6)) legt das jeweilige Muster fest nach welchem die Düse in der Druckebene verfährt und somit das Bauteil aufbaut. Dieses kann für Füllung und die obere und untere Schicht meist separat definiert werden. Die verbreitetsten Muster sind Rechteck-, Linien-, Bienenwaben- und Dreiecksmuster sowie das konzentrische Muster. Es existieren jedoch noch eine Vielzahl an weiteren Mustern, welche je nach verwendeten Slicer, verfügbar sind. B. Akhouni et al.³³ bietet eine gute Übersicht zu derzeitigen Druckmustern. Zu beachten ist, dass manche Muster sich teilweise über mehrere Schichten aufbauen können und andere in jeder Schicht gleich sind. Zusätzlich interagiert das Druckmuster mit den Parametern Orientierung und Füllichte stark.

Eine Abhängigkeit von Druckmuster und Festigkeit abzuleiten ist aufgrund der Interaktionen mit anderen Parametern schwierig. Eine Auslegung des Druckmusters, bei welchem die einzelnen Extrusionslinien möglichst in Belastungsrichtung liegen, empfiehlt sich. Bei einer Belastung in Schichtrichtung sollte zudem darauf geachtet werden, dass eine maximal mögliche Fläche entsteht.

³⁰ Vgl. [34]; [37]

³¹ Vgl. [36]; [38]

³² Vgl. [39]

³³ Vgl. [39]

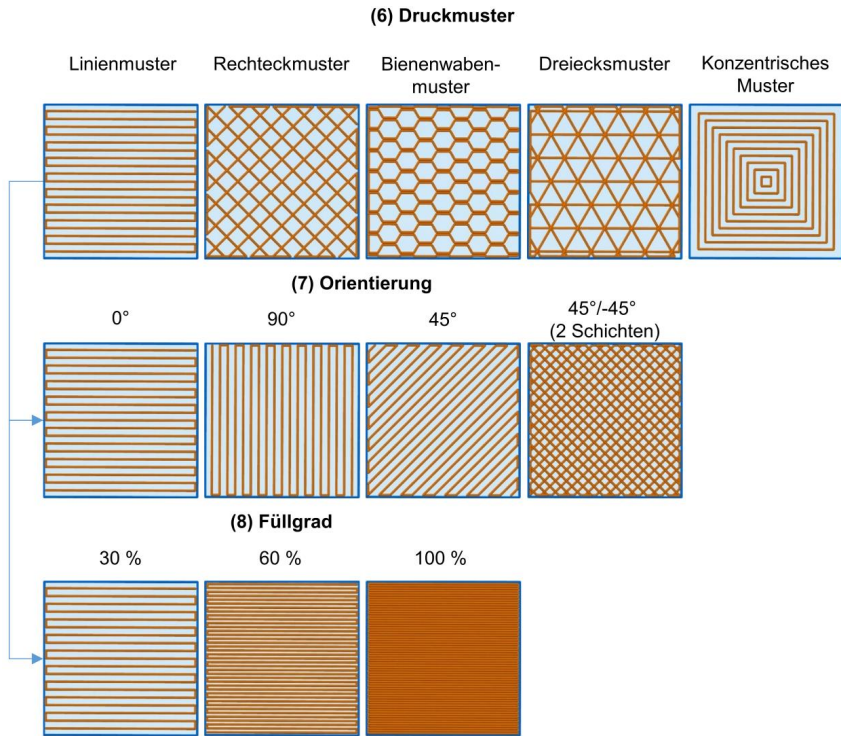


Abb. 13: Einfluss Druckmuster, Orientierung und Füllgrad

Über die **Orientierung**³⁴ (vgl. Abb. 13 (7)) wird die Ausrichtung der Extrusionslinien in Druckebene beeinflusst. Diese kann für alle Schichten gleich oder auch unterschiedlich festgelegt werden und wird über Winkel angegeben. Aufgrund unklarer Definitionen in der Literatur und der Möglichkeit Bauteile beliebig auf dem Druckbett auszurichten gelten im Rahmen dieser Arbeit folgende Regeln für die Orientierung:

- Winkel 0°: Extrusionslinien liegen entlang der Hauptbelastungsrichtung.
- Winkel 90°: Extrusionslinien liegen quer zur Hauptbelastungsrichtung.
- Unterschiedliche Winkel für Schichten werden mittels Trennstrich verdeutlicht und wiederholen sich. Bsp.: -45°/45° → Schicht 1: -45°; Schicht 2: 45°; Schicht 3: -45°; Schicht 4: 45°; ...
- Orientierung der oberen und unteren Schicht sowie der Füllung sind gleich.

Um eine möglichst hohe Festigkeit zu erreichen, sollte die Orientierung so gewählt werden, dass die Extrusionslinien in Belastungsrichtung abgelegt werden.

Der **Füllgrad**³⁵ (vgl. Abb. 13 (8)) bezeichnet den prozentualen Anteil der gedruckten Füllung. Dieser kann zwischen einem hohlen (0%) bis zu einem komplett gefüllten Bauteil (100%) eingestellt werden. Grundsätzlich wird die Festigkeit mit einem höheren Füllgrad tendenziell erhöht, was durch viele Studien bereits ausgiebig untersucht wurde. Es können jedoch Wechselwirkungen mit anderen Parametern auftreten, wodurch eine Festigkeitssteigerung bei einem höheren Füllgrad per se nicht zutrifft.

³⁴ Vgl. [28]; [39]; [32]; [40]

³⁵ Vgl. [28]; [39]; [41]; [31]; [33]

Vergleicht man unter der Annahme, dass alle Extrusionslinien perfekt gleich sind, die Einflüsse auf die Festigkeit von Füllgrad (0-100%) und Orientierung (0° ; 90°) anhand der Ablagestrategie so können folgende Effekte gezeigt werden. Ausgehend von einem Mindestkraftniveau, welches über die Außenwände übertragen wird und bei den betrachteten Modellen gleich ist, steigt bei einer 0° Orientierung die übertragbare Kraft mit der Füllung relativ linear an. Eine Diskreditierung besteht nur hinsichtlich der Entscheidung des Slicers ab welcher Füllung eine neue Extrusionslinie hinzugefügt wird oder nicht. Bei 90° Orientierung findet hingegen fast über dem gesamten Füllgrad keine Kraftsteigerung statt, da sich die Extrusionslinien nicht berühren und somit die kraftübertragbare Fläche nicht zunimmt. Erst bei extrem hohen Füllgraden kommt es infolge einer seitlichen Anbindung der Extrusionslinien zu einer Festigkeitssteigerung des Bauteils.

Das **Verhältnis**³⁶ (vgl. Abb. 12 (9)) von Außenwand zu Füllung ist ebenfalls ein wichtiger Einflussfaktor, welcher oftmals vernachlässigt wird. Prinzipiell kann dieser Faktor unter der Prämisse, dass die Druckeinstellungen von Außenwand und Füllung identisch sind, vernachlässigt werden, was in den meisten Fällen nicht zutrifft. Wichtig ist die Kenntnis über das Verhältnis beim Drucken von unterschiedlichen Bauteilen mit gleichen Einstellungen. Ausgehend von einer 1 mm starken Außenwand beträgt die Querschnittsfläche der Füllung bei einem $4 \times 10 \text{ mm}^2$ Querschnitt 40 % und hat somit einen Einfluss auf die Gesamtbauteilfestigkeit. Wird ein Bauteil mit der gleichen Querschnittsfläche jedoch den Abmaßen von $2 \times 20 \text{ mm}^2$ gedruckt beträgt der Anteil an Füllung 0 % und die Füllung hat somit keinen Einfluss auf die Gesamtbauteilfestigkeit.

2.2.3 Druckraum

Die **Bauteilorientierung**³⁷ (vgl. Abb. 14 (10)) gibt die Orientierung des Bauteils im Drucker an. Durch den Aufbau mittels Schichten entsteht in Schichtrichtung ein deutlich schlechterer Materialverbund wie auf der Druckebene, da sich in Schichtrichtung immer eine komplette Trennebene der Extrusionslinien befindet. Je nach Einstellung weiterer Parameter kann die Festigkeit in Schichtrichtung gegenüber der Festigkeit, welche auf Druckbetzebene erreichbar ist, stark reduziert sein.

Ebenfalls kann die Festigkeit auch aufgrund verschiedener Bauteildrehungen über die X- oder Y-Achse beeinflusst werden, da hierbei z. B. das zuvor genannte Verhältnis zwischen Außenwand und Füllung verändert wird.

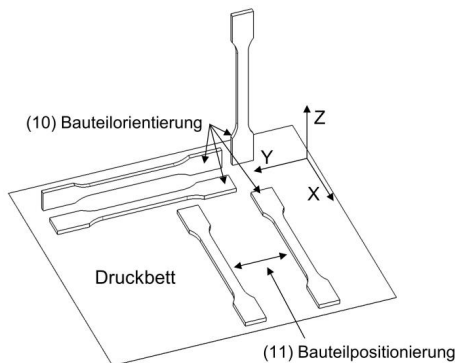


Abb. 14: Bauteilorientierung und -positionierung auf dem Druckbett

³⁶ Vgl. [42]; [43]

³⁷ Vgl. [29]; [44]; [31]; [45]; [34]; [46]

Ein weiterer Einflussfaktor kann die **Bauteilpositionierung** (vgl. Abb. 14 (11)) eines Bauteils im Bauraum bzw. zweier Objekte zueinander sein. Hierbei kann sich die Ablagestrategie der Außenwand und Füllung anhand kleinster Positionsänderungen der Bauteile verändern, wodurch die Bauteilfestigkeit negativ beeinflusst werden kann.

Versuche mit dem Slicer Simplify3D haben ergeben, dass das Versagensverhalten eines Zugprüfstabes insofern beeinflusst wird, dass dieser entweder ein sprödes Verhalten oder einen geringen duktilen Bereich aufweist. Es wurden hierzu jeweils zwei Zugprüfstäbe mit Linienmuster und 0° Orientierung gleichzeitig gedruckt. Die Positionierung wurde bei ersten Versuchen von Simplify3D übernommen. In weiteren Versuchen wurde die Position eines Zugprüfstabes (vgl. Tab. 1 Position 1) um jeweils 0,2 mm und 0,7 mm zur ersten Position verschoben. Nach jeder Modifikation wurde die Ablagestrategie neu berechnet, wobei sich diese bei jeder Positionsänderung, sowohl beim verschobenen (Position 1) als auch beim nicht verschobenen Zugprüfstab (Position 2), veränderte.

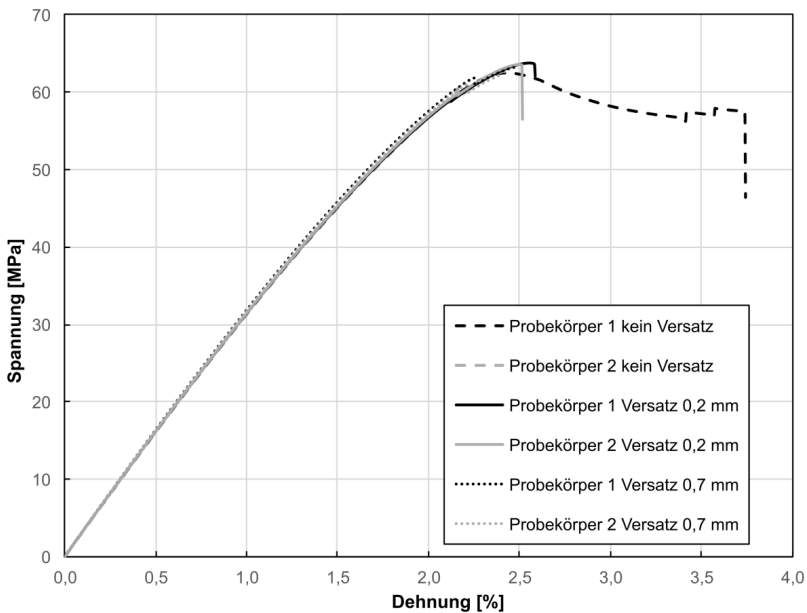
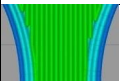
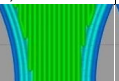
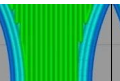


Abb. 15: Spannungs-Dehnungs-Diagramm unterschiedlich positionierter Zugprüfkörper (Mittelwerte)

Es entstanden hierbei minimale Abweichungen des theoretischen Materialverbrauchs und der Druckzeit. Kritischer hingegen ist die Anordnung der Extrusionslinien im Übergang von Einspannbereich zu Messbereich der Zugprüfstäbe. Diese werden, je nach Positionierung, teilweise unterbrochen oder zusammengeführt.

Bei Prüfung der Zugprüfstäbe hat sich gezeigt, dass die Bruchstellen stark vom Druckbild abhängig sind. Nur bei einer Konfiguration kam es zu einer des Polymers typischen leichten Einschnürung nach Erreichen der Streckspannung. Alle weiteren Konfigurationen sind am Spannungsmaximum spröde gebrochen (vgl. Abb. 15).

Tab. 1: Vergleich unterschiedlicher Bauteilpositionierungen

	Position 1	Position 2	Position 1	Position 2	Position 1	Position 2
Abstand [mm]	25		25,2		25,7	
Filament [mm]	2896,4		2896,5		2852,6	
Druckbild obere/untere Schicht						
Druckbild Füllung						
Zugfestigkeit [MPa]	62,0 – 63,4	58,3 – 62,6	59,0 – 63,7	59,8 – 63,7	62,9 – 63,2	62,2 – 62,2
Bruchdehnung [%]	3,4 – 3,7	2,1 – 2,4	2,1 – 2,6	2,2 – 2,5	2,3 – 2,5	2,2 – 2,4
Gewicht [g]	11,94 – 12,54	11,84 – 12,44	12,17 – 12,27	12,16 – 12,27	12,07 – 12,13	12,08 – 12,18

Hauptsächlich traten die Bruchstellen im Bereich von unterbrochenen Extrusionslinien am Übergang zum Prüfbereich auf, wobei die Unterbrechungen im Druckbild der Füllung ausschlaggebend waren. Die Risse verlaufen zwischen den Endungen der Extrusionslinien zu beiden Seiten des Zugprüfstabes. Einzig die Konfiguration mit der leichten Einschnürung weist nur einseitig eine solche Endung auf. Die Vermutung besteht, dass an den Endungen Spannungsspitzen entstehen, da der Kraftfluss unterbrochen bzw. umgelenkt wird. Somit dienen unterbrochene Extrusionslinien als Brucheinleitungsstelle und können u. U. die Bauteilfestigkeit signifikant reduzieren. Die in den Versuchen teilweise höheren maximalen Spannungen der unvorteilhaft gedruckten Zugprüfstäbe können an einer höheren Dichte (vgl. Kap.3.7.2) der geprüften Bauteile liegen.

Andere Studien³⁸ haben bereits Hinweise auf die Entstehung von Spannungsspitzen geliefert, jedoch wurden diese nicht näher betrachtet. Eine Vermeidung kann durch die Auswahl eines geeigneten Druckmusters erfolgen. So ist das konzentrische Druckmuster dem Linienmuster bei einer lastorientierten Ausrichtung im Zugprüfstab vorzuziehen, da dieses unabhängig von der Positionierung generiert wird.

2.2.4 Temperaturführung

Die Temperaturführung spielt beim 3D-drucken eine wichtige Rolle, da das Bauteil aus vielen Extrusionslinien aufgebaut wird, welche miteinander verschweißen. Die Güte der Verschweißung hängt hierbei maßgeblich vom Temperaturverlauf ab. Oftmals werden hierfür Diffusionsmodelle zur Beschreibung der Verschweißung verwendet, bei welchen Interdiffusion zwischen den einzelnen Extrusionslinien stattfindet, die sowohl temperatur- als auch zeitabhängig verläuft (vgl. Abb. 16). Unter der Temperaturführung müssen Kühlung, Druck-, Druckbett- und Umgebungstemperatur betrachtet werden.

³⁸ Vgl. [32]; [40]; [47]

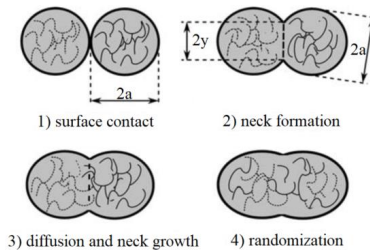


Abb. 16: Verschmelzung von Polymeren durch Interdiffusion beim FDM³⁹

Die **Drucktemperatur**⁴⁰ (vgl. Abb. 11 (12)) ist die Temperatur, welche am Hot-End bzw. am Thermistor anliegt und zum Aufschmelzen des Polymers dient. Diese ist in der Regel deutlich höher als die eigentliche Schmelztemperatur des Polymers, damit auch bei hohen Druckgeschwindigkeiten genügend thermische Energie zum aufschmelzen abgegeben werden kann. Die Drucktemperatur wird häufig von Filamentherstellern als Temperaturbereich angegeben, da in Abhängigkeit von anderen Parametern, höhere oder geringere Temperaturen notwendig sein können. Ebenfalls kann sich die eingestellte Drucktemperatur, je nach verwendeten Extruderaufbau, anders zur Geltung kommen.

Über die Drucktemperatur wird im Wesentlichen die Temperatur des Extrudats gesteuert. Je höher die Temperatur ist, desto dünnflüssiger wird dieses. Viele Studien haben gezeigt, dass eine höhere Temperatur zu einer Steigerung der Bauteilfestigkeit führt. Die Steigerung der Festigkeit wird oftmals darin begründet, dass zum einen durch das dünnflüssigere Extrudat sich dieses an die bereits erkalteten Extrusionslinien besser anlegt, wodurch eine größere Kontaktfläche entsteht. Die zweite Begründung erfolgt aufgrund der Interdiffusion. Bei höheren Temperaturen sind die Molekülketten beweglicher, wodurch die Interdiffusion und somit die Festigkeit gesteigert wird. Bei extrem hohen Drucktemperaturen kann die Festigkeit des Bauteils wieder abnehmen, da eine Schädigung des Polymers auftreten kann.

Die **Kühlung**⁴¹ (vgl. Abb. 11 (13)) wird am Extruder meist über einen oder mehrere Lüfter realisiert. Die Kühlung wird dazu verwendet, die abgelegten, heißen Extrusionslinien möglichst schnell abzukühlen, um ein Verfließen zu verhindern. Hierbei ist eine Verminderung der Festigkeit zu erwarten, da die Interdiffusion, aufgrund schnelleren Temperaturverlustes, gemindert wird.

Die **Umgebungstemperatur**⁴² (vgl. Abb. 11 (14)) beeinflusst die Abkühlungsrate und die Endtemperatur des Extrudats, wodurch Schrumpfung und somit der Verzug des Bauteils verringert werden können. Zudem kann die Verbindung zwischen den Extrusionslinien beeinflusst werden, da bei erhöhter Temperatur die Molekülketten beweglicher sind. Studien zeigen, dass die Festigkeit mit höherer Umgebungstemperatur positiv beeinflusst wird.

Die **Druckbetttemperatur**⁴³ (vgl. Abb. 11 (15)) beeinflusst hauptsächlich die untersten Schichten des Druckteils und wird im Wesentlichen dazu verwendet eine gute Haftung zwischen der untersten Schicht und dem Druckbett zu erzielen. Hierzu wird eine erhöhte Druckbetttemperatur gewählt, welche teilweise über der Glasübergangstemperatur liegt, um Schrumpfungseffekte der unteren Schichten zu minimieren und eine gute Benetzung durch ein weniger schnell erstarrendes Extrudat zu erzeugen. Die Auswirkungen der Druckbetttemperatur sind ähnlich zu interpretieren wie die der Umgebungstemperatur, wobei der Einflussbereich schwer zu definieren ist, da sich oberhalb des Druckbetts ein Temperaturgradient in den einzelnen Schichten hin zur Umgebungstemperatur einstellt.

³⁹ Entnommen aus [48]

⁴⁰ Vgl. [28]; [30]; [49]; [50]; [37]; [34]; [51]

⁴¹ Vgl. [50]; [37]

⁴² Vgl. [52]; [37]; [34]

⁴³ Vgl. [49]

Die **Druckgeschwindigkeit**⁴⁴ (vgl. Abb. 11 (16)) ist die Geschwindigkeit mit welcher der Extruder in Relation zum Druckbett bewegt wird. Je höher die Geschwindigkeit ist, desto schneller wird das Bauteil erstellt, daher werden in der Regel hohe Geschwindigkeiten angestrebt. Je höher die Geschwindigkeit ist, desto schneller wird das Filament durch den Extruder gedrückt, wodurch die Geschwindigkeit meist begrenzt wird, da der Extruder nur eine gewisse Menge Filament pro Zeiteinheit aufschmelzen kann. Zusätzlich kann die Oberflächenqualität des Bauteils bei hohen Geschwindigkeiten negativ beeinflusst werden, da es zu Unregelmäßigkeiten kommen kann. Die Druckgeschwindigkeiten sind für verschiedene Bereiche einstellbar, wodurch es möglich ist, die Außenwand und Füllung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu drucken.

Eine Korrelation zwischen Druckgeschwindigkeit und Festigkeit haben einige Studien nachgewiesen. Bei Betrachtung von größeren Geschwindigkeitsveränderungen nimmt die Festigkeit in der Regel ab, wobei Interaktionen mit anderen Parametern ebenfalls betrachtet werden müssen. In Schichtrichtung kann bei kleinen Querschnitten u. U. eine Festigkeitssteigerung mit zunehmender Geschwindigkeit auftreten, da bei erhöhter Druckgeschwindigkeit die Druckzeit der Einzelschichten verringert wird. Hierdurch ist die Temperatur der jeweils zu bedruckenden Schicht höher als bei langsamen Druckgeschwindigkeiten, da diese weniger Zeit zur Auskühlung haben, wodurch Effekte wie Interdiffusion verstärkt werden.

2.2.5 Zusammenfassung Druckparameter

Der Einfluss der Druckparameter auf diverse Ausgangsgrößen ist ein umfangreiches Forschungsthema, da Zusammenhänge oftmals komplex sind und die Effekte einzelner Einstellparameter mit anderen interagieren können. Je nach Größe und Ausrichtung des Bauteils können somit unterschiedliche, nicht immer offensichtliche Effekte entstehen.

Es wurde zudem festgestellt, dass das Gewicht bzw. die Dichte des jeweilig gedruckten Bauteils eine zusätzliche Rolle bei der Interpretation von Ergebnissen bezüglich der Festigkeit spielt. Beim Vergleich von der maximal erreichten Kraft von liegend gedruckten Zugprüfstäben mit deren Gewicht wurde ein linearer Zusammenhang festgestellt, welcher auch bei Variation von bestimmten Druckparametern vorhanden war. Der Zusammenhang von Zugkraft und Gewicht spiegelt sich auch in den Ergebnissen von Studien wieder.

P.Pinter⁴⁵ zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Dichte auf, wobei keine Parametervariation verwendet wurden.

V. E. Kuznetsov⁴⁶ weist einen Zusammenhang von Gewicht und Zugfestigkeit bei Parametervariation von Düsentemperatur und Kühlung auf. Bei der untersuchten Druckgeschwindigkeit ist dieser Zusammenhang nicht vorhanden, was jedoch auf andere Effekte zurückgeführt wird.

A. E. Costa⁴⁷ untersucht die vorhandenen Leerstellen innerhalb der Drucke und die Zugfestigkeit. Es gibt hierbei eine Abhängigkeit zwischen den vorhandenen Leerstellen und der gemessenen Zugfestigkeit.

B. Akhoundi⁴⁸ zeigt bei seinen Untersuchungen auf, dass sich Ergebnisse von verschiedenen Füllraten und Mustern bei der Referenzierung auf das Gewicht angleichen.

Es hat sich gezeigt, dass bestimmte Druckparameter sich auf die Extrusionsmenge und somit auf das Endgewicht der Proben auswirken können. Hierdurch wird wiederum die Festigkeit der Proben beeinflusst. Beispiele von solchen Parametern sind Schichtdicke, Druckgeschwindigkeit oder Düsentemperatur, welche je nach Variation die Extrusion verbessern oder verschlechtern können.

⁴⁴ Vgl. [29]; [30]; [50]; [53]; [33]; [34]

⁴⁵ Vgl. [54]

⁴⁶ Vgl. [50]

⁴⁷ Vgl. [37]

⁴⁸ Vgl. [39]

Bei höherer Druckgeschwindigkeit oder Schichtdicke wird der zu extrudierende Volumenstrom erhöht, wodurch Fehler bei der Förderung wahrscheinlicher werden und somit das Gesamtgewicht des Bauteils reduziert ist. Bei Erhöhung der Düsentemperatur hingegen wird der Förderwiderstand verringert, da das Polymer dünnflüssiger wird. V. Nitzenz⁴⁹ hat zur Extrusionsgeschwindigkeit und Düsentemperatur Messungen durchgeführt, welche den Zusammenhang mit der erforderlichen Kraft für die Extrusion aufzeigen.

Tab. 2: Variationsparameter

		Parameter		
Drucker		Ultimaker 2	Ultimaker 2+	Ultimaker 3
Geschwindigkeit	mm/s	20	60	100
Schichtdicke	mm	0,1		0,3
Drucktemperatur	°C	190		220

Eine durchgeführte DOE-Analyse mit drei unterschiedlichen Druckern unterstützt diese These. Bei dieser wurden verkleinerte Zugprüfstäbe mit einem Prüfquerschnitt von $4 \times 7 \text{ mm}^2$ und einer Prüflänge von 56 mm verwendet. Es wurden dabei die in Tab. 2 angegebenen Parameter in einem vollfaktoriellen Versuchsplan variiert, wobei bei jedem Versuchspunkt drei Prüfkörper gleichzeitig gedruckt wurden. Die Orientierung der Extrusionslinien entsprach der Lastrichtung (0° - Orientierung) und die Füllung 100 %, wobei die weiteren Parameter auf Standardeinstellung der Software (Cura Version 4.2.1) belassen wurden. Das für die Tests verwendete Material war ein grün eingefärbtes PLA, welches im vorab vermessen wurde, um Einflüsse von Materialschwankungen aufgrund von Durchmesserschwankungen zu detektieren.

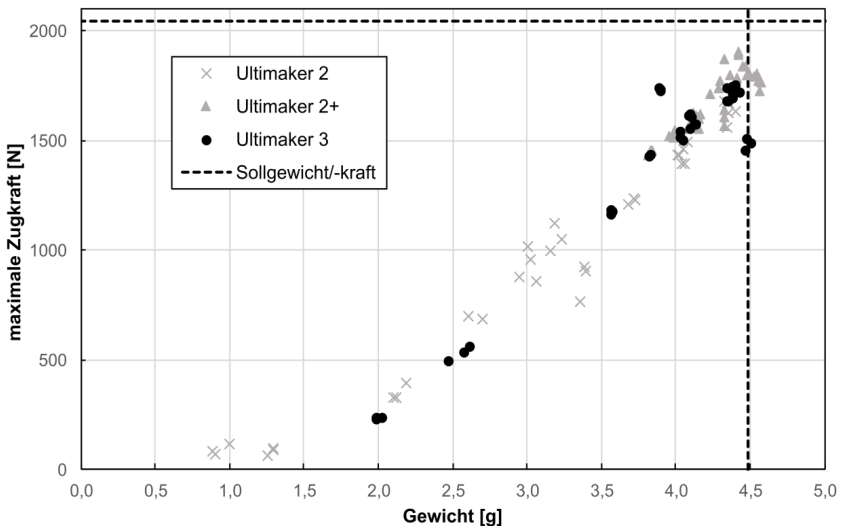


Abb. 17: Maximale Zugkraft in Abhängigkeit des Zugprobengewichts unterschiedlicher 3D-Drucker und Parameter⁵⁰

Der Vergleich der maximal erreichten Zugkraft der Probekörper mit dem jeweiligen Probengewicht (vgl. Abb. 17) zeigt bereits deutlich die jeweilige Abhängigkeit beider Parameter, wobei die verwendeten Drucker unterschiedliche Bereiche abdecken. Während die Ergebnisse des Ultimaker 2+ nur geringere

⁴⁹ Vgl. [55]

⁵⁰ Die Sollkraft wurde basierend auf der Streckgrenze (73 MPa) des Datenblatts ermittelt.

Streuungen aufweisen, weisen die beiden anderen Druckern, bei bestimmter Parameterkonfigurationen, größere Extrusionsschwierigkeiten auf, wodurch es zu einer deutlichen Reduktion der Festigkeit kommt. Dies verdeutlicht die Signifikanz der Dokumentation des Gewichts zur Beurteilung von Parameterauswirkungen. Eine optische Beurteilung der Proben ist hierbei meist relativ schwierig, da erst bei Unterschreitung eines gewissen Gewichts optische Mängel ersichtlich werden.

Wie in Abb. 18 ersichtlich ist der Einfluss der jeweiligen Parameter bei allen Druckern tendenziell gleich und entsprechen den Aussagen anderer veröffentlichter Studien, welche die Festigkeitssteigerungen jedoch nur auf die Druckparameter beziehen. Fraglich ist, ob dies nun als Einfluss der Druckparameter bezeichnet werden kann, oder dies die Korrelation aus Effekten von Software, Drucker und Druckparameter ist.

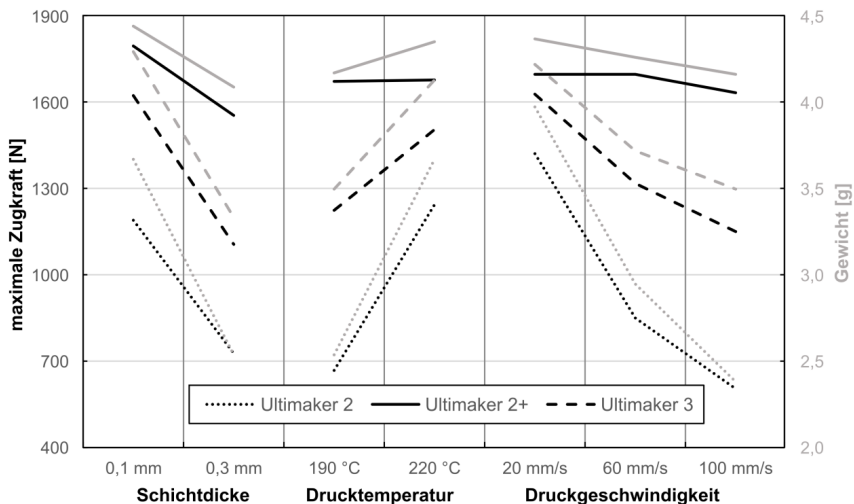


Abb. 18: Maximale Zugkraft in Abhängigkeit verschiedener Parameter

2.2.6 Einfluss von Drucker und Software

Drucker und Software haben zusätzlich zu den Einstellparametern einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Festigkeit der Bauteile (vgl. Kap. 2.2.5 Studie).

Unterschiedliche Slicer weisen oftmals dieselben Einstellungsparameter auf, wobei diese unterschiedlich verarbeitet werden können. D.h. trotz theoretisch identischer Einstellparameter können durch unterschiedliche Slicer, unterschiedliche Bauteile entstehen. Daher ist ein Abgleich der Druckstrategien empfehlenswert, um auf Slicer basierende Effekte ausschließen zu können.

Beispielsweise wird beim Slicer Cura (Version 3.6.0) bei einem Füllgrad von 100 % alle Druckschichten der unteren Schicht zugeordnet und bei 99 % getrennt betrachtet (Zuordnung untere/obere Schicht und Füllung bleibt bestehen). Differenzieren die Einstellungen zwischen Füllung und der oberen/unteren Schicht voneinander so werden je nach verwendeten Füllgrad im Bereich 0 % bis 99 % andere Einstellungen der eigentlichen Füllung zugeordnet wie bei 100 %. Andere Slicer weisen diesen Effekt nicht auf.

Ebenfalls kann der Aufbau des Druckers einen starken Einfluss auf die Festigkeit haben. Viele Bauteilkomponenten unterscheiden sich bei unterschiedlichen Druckerherstellern stark voneinander, da es keine einheitlichen Vorgaben für die Gestaltung gibt. Ergebnisse von Probekörper, welche auf unterschiedlichen Druckern gedruckt werden sind daher oftmals nicht oder nur schwierig vergleichbar.

Beispiele für Komponenten, welche einen Einfluss haben können, werden im Folgenden aufgelistet und kurz beschrieben.

Hot-End

Beim Hot End wird die eingestellte Drucktemperatur an einem Thermistor gemessen und nach diesem geregelt. Je nach Aufbau z. B. Länge des Hot-Ends, Lage Thermistor, Lage Heizelement, Abschirmung gegen Zugluft, Wärmeleitfähigkeit der Komponenten, etc. können sich innerhalb des Hot Ends unterschiedliche Temperaturprofile ausbilden. Der Wärmeeintrag und somit die Temperatur des Extrudats können, je nach verwendeten Hot End, trotz gleich eingestellter Drucktemperatur unterschiedlich sein. Dies kann die Verschweißung der einzelnen Extrusionslinien immens beeinflussen.

Düse

Je nach Toleranz der Austrittsöffnung (vgl. Abb. 19), Länge und Übergangswinkel kann die Ausführung der Düse ebenfalls einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss haben. Oftmals sind diese nicht strömungs- sondern fertigungsoptimiert ausgelegt, wodurch der Übergang vom Filament zum eigentlichen Düsendurchmesser mit einem Winkel von 118° erfolgt, welche dem Spitzenwinkel eines Standardbohrers entspricht.

Lüfter für Kühlung

Je nach Größe, Leistung, Anzahl und Anbringung der Lüfter, welche das Extrudat nach Austritt kühlen, stellt sich eine andere Kühlleistung ein, wodurch sich das Abkühlverhalten des Extrudats bei unterschiedlichen Druckern stark unterscheiden kann. Softwaretechnisch lässt sich meist ein prozentualer Wert festlegen, welcher sich jedoch nicht linear zum Luftvolumenstrom verhält bzw. vergleichbar bei unterschiedlichen Druckermodellen ist.

Umgebung

Die Umgebungsbedingungen spielen ebenfalls eine Rolle, da je nach Aufstellungsort die Raumtemperatur oder eventuelle Zugluft den Druckvorgang beeinflussen können. Hierbei sind komplett offene Drucker anfälliger gegen Veränderungen als Drucker, welche einen komplett oder teilweise abgeschotteten Druckraum haben.

Zur Veranschaulichung der Einflüsse des Druckeraufbaus wurde bereits im vorangegangenen Kapitel der Vergleich von drei Druckern der Firma Ultimaker B.V. durchgeführt, welche große Differenzen aufwiesen. Zusätzlich wurde ein Vergleich der Düsen durchgeführt, wobei festgestellt wurde, dass vermutlich fertigungsbedingt der Realdurchmesser deutlich vom Solldurchmesser abweicht.

Um den Einfluss der Düsen aufzuzeigen wurden Zugprüfstäbe nach ISO 527 Typ 1A mittels unterschiedlicher Originaldüsen gefertigt. Die optisch gemessenen Durchmesser der Düsen betragen hierbei 0,37 mm und 0,43 mm bei Nenndurchmesser 0,4 mm.

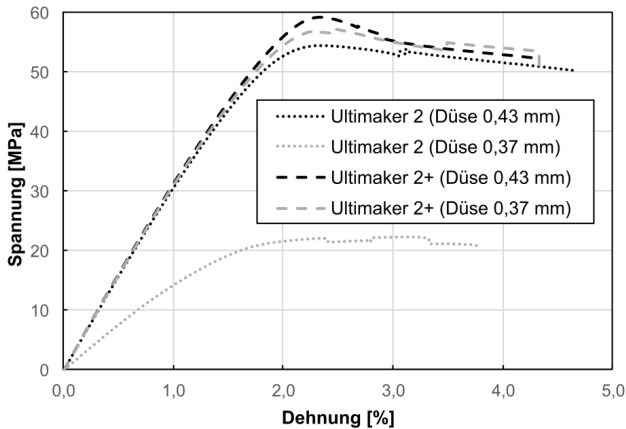


Abb. 19: Einfluss des Düsendurchmessers auf die Zugeigenschaften (Mittelwerte)

Es wurde dabei festgestellt, dass bereits die geringfügigen Unterschiede im Düsendurchmesser signifikante Einflüsse auf das Festigkeitsverhalten gedruckter Proben haben. Während beim Ultimaker 2+ die Kennwerte nur geringfügig verändert wurden, entstand beim Ultimaker 2 bei Düsengröße von 0,37 mm ein Extrusionsproblem. Aufgrund zu hoher Kräfte setzte die Extrusion an mehreren Stellen aus, wodurch Fehlstellen innerhalb der Schichten (vgl. Abb. 20) entstanden sind, welche für die starke Reduktion der Festigkeit verantwortlich sind. Die Einstellungen der Drucker entsprachen der Einstellungen von Kap. 2.2.5, wobei die Orientierung der Schichten auf $-45^\circ/45^\circ$ geändert wurde. Das verwendete PLA war hierbei nicht eingefärbt.

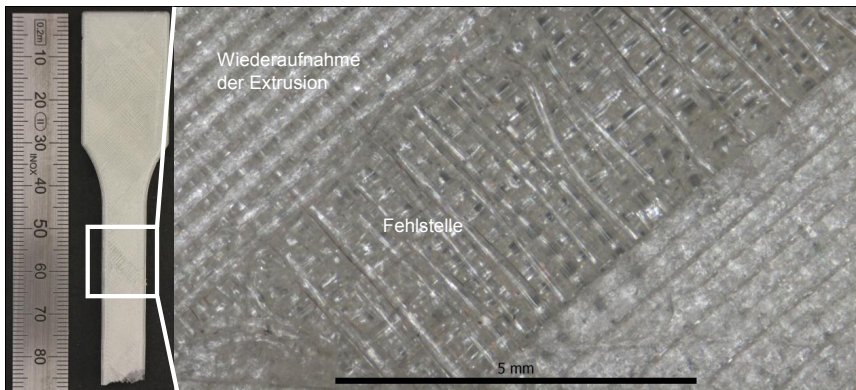


Abb. 20: Fehlstellen aufgrund Extrusionsschwierigkeiten

2.2.7 Orientierung faserverstärkter Filamente

Ein weiterer Einfluss auf die Festigkeit besteht bei faserverstärkten Filamenten in der Orientierung der Fasern, da in Abhängigkeit der Faserorientierung die Festigkeit des Materials variiert. Die Fasern sollten für die optimale Festigkeit in Belastungsrichtung orientiert sein. Bei einer Orientierung quer zur Belastungsrichtung kann u. U. die Festigkeit der reinen polymeren Matrix unterschritten werden.

Die Orientierung der Fasern erfolgt beim FDM während der Extrusion durch den Druckkopf und wird durch Strömungsverhältnisse innerhalb der Düse beeinflusst. Hierdurch lässt sich eine hohe Ausrichtung in Extrusionslinienrichtung erzeugen, wobei diese in Abhängigkeit der Düse, des Polymers, des Fasergehalts und der Faserart differenzieren kann.⁵¹

Vorteilhaft gegenüber dem Spritzgießprozess ist, dass die Orientierung des Bauteils hierdurch besser gesteuert werden kann. Es ist somit möglich lastpfadgerechte Orientierungen der Fasern zu erzeugen. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Festigkeit quer zur Extrusionslinie oder in Schichtrichtung deutlich reduziert ist.

2.3 Verwendete Drucker und Einstellparameter

Für die Herstellung der Inserts wurden zwei Drucker verwendet, welche jeweils nur ein Material mit den gleichen Einstellungen drucken, um eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Parameter sind in Tab. 3 dargestellt. Drucke, welche nicht auf Festigkeit untersucht wurden, können mit anderen Druckern oder Parametern gefertigt worden sein. Diese sind explizit gekennzeichnet und die verwendeten Parameter angegeben.

Bei den für die Untersuchungen verwendeten Parametern handelt es sich um Standard- bzw. empirisch ermittelte Werte, welche nicht auf die maximale Festigkeit optimiert wurden. Diese wurden so festgelegt, dass möglichst maßhaltige, reproduzierbare Druckergebnisse erzeugt werden können.

Es werden bei den weiteren Versuchen jeweils zwei Ablagestrategien verwendet. Zum einen eine direkte Ausrichtung der Extrusionslinien in Belastungsrichtung, welche mittels des konzentrischen Musters ermöglicht wird. Dieses wird in allen HPK verwendet. Zum anderen wurde das Druckmuster Linie mit der Orientierung von $-45^\circ/45^\circ$ verwendet. Dieses wird hauptsächlich bei den Haftfestigkeitsprüfkörpern angewendet, da dieses gegenüber dem konzentrischen Muster besser druckbar ist. Die Oberfläche, welche mit der Schmelze in Kontakt kommt, ist gegenüber dem konzentrischen Muster dennoch identisch.

Die für die Untersuchung verwendeten Drucker sind von der Firma Multec GmbH und wurden modifiziert. Der M420 wurde für die Drucke aus PLA verwendet und hat einen umgebauten Extruder. Dieser wurde dahingehend modifiziert, um eine Kühlung über Druckluft zu ermöglichen anstelle des vorhandenen elektrischen Lüfters. Die Kühlung per Druckluft erfolgt über vier Düsen, welche symmetrisch um die Druckdüse angeordnet sind (vgl. Abb. 21). Die zur Kühlung verwendete Luft ist mittels Druckminderer regulierbar. Zusätzlich wurde eine weitere Heizpatrone im Heizblock verbaut, um eine homogenere Temperaturverteilung zu erreichen. Das Druckbett ist mit „Blue Tape“ präpariert, wodurch eine gute Haftung der ersten Schicht gewährleistet ist. Bei jedem Druck wurde zusätzlich ein Skirt⁵² gedruckt.

⁵¹ Vgl. [56]; [57]; [58]

⁵² Beim Skirt wird vor dem Drucken des Objekts einige Linien auf das Druckbett extrudiert. Dies dient dazu, das beim Aufheizen in der Düse befindliche Material im vorab zu extrudieren und einen konstanten Volumenstrom aufzubauen.

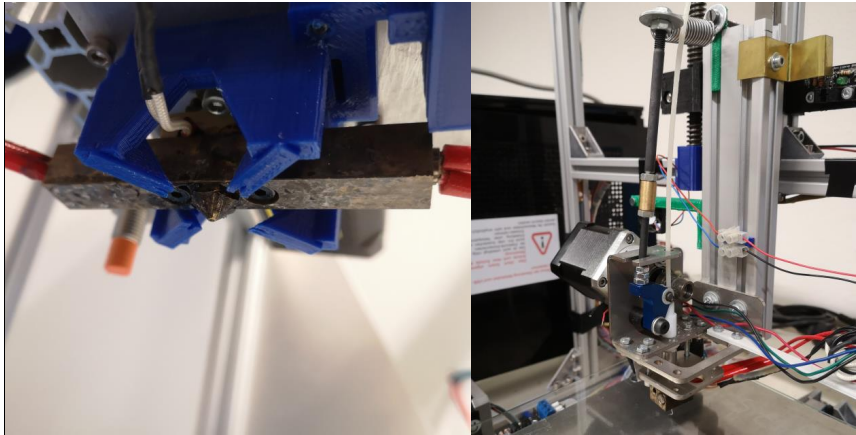


Abb. 21: Verwendete Drucker. Links: M420; rechts: M300

Der M300 ist die kleinere Variante des M420 und wird für die Drucke aus PA6GF verwendet. Dieser Drucker wurde softwaretechnisch angepasst, sodass höhere Drucktemperaturen möglich sind (Original max. 240°C). Zusätzlich wurde die Filamentklemmung am Extruder verstärkt und die Kühlung demontiert (vgl. Abb. 21). Das Druckbett wurde mit einer Glasplatte erweitert auf welcher Klebstoff mit einem Klebestift vor den Drucken aufgebracht wurde, um eine optimale Haftung zwischen PA6GF und dem Druckbett zu erreichen. Zusätzlich wurde ein Brim⁵³ erzeugt, welches ein Ablösen der Ecken, sogenanntes Warping, unterbinden soll.

Beide Drucker verwenden ein in X-Y-Richtung verfahrbares Druckbett und einen in Z-Richtung verfahrbaren Extruder. Der Druckraum ist offen.

Tab. 3: Druckparameter

		Multec M420	Multec M300
Konfiguration		Software	Druckkopf
Druckmaterial		PLA	PA6GF
Slicer		Simplify3D	
Düsendurchmesser	[mm]	0,5	
Schichthöhe	[mm]	0,2	
Linienbreite	[mm]	0,6	
Druckmuster		Linie -45°/45°	
		Linie 0°	
		Konzentrisch	
Füllgrad	[%]	100	
Anzahl Extrusionslinien Wand		3	1
Untere/Obere Schichten		3	
Drucktemperatur	[°C]	195	250
Druckbett		60 °C + Blue Tape	50°C + Glas + Klebestift
Kühlung		Druckluft 1 bar	Keine
Umgebung		Raumbedingungen	
Druckgeschwindigkeit	[mm/s]	40	20
Geschwindigkeit Wand	[mm/s]	20	10
Geschwindigkeit 1. Schicht	[mm/s]]	20	10

⁵³ Als Brim wird ein um das Druckobjekt zusätzlich gedruckten Rand bezeichnet, welcher die Haftung zwischen Druckobjekt und Druckbett verbessern soll. Zusätzlich werden die gleichen Aufgaben wie beim Skirt erfüllt.

3 Versuchsmaterialien

Beim FDM- Verfahren werden Polymere durch Wärmeeintrag aufgeschmolzen und im verflüssigten Zustand auf dem Druckbett abgelegt. Hierdurch lassen sich theoretisch alle Materialien verarbeiten, welche thermoplastische Eigenschaften aufweisen. Einschränkungen gibt es nur innerhalb der Verarbeitbarkeit aufgrund diverser Eigenschaften wie z. B. einer hohen Wärmeausdehnung bzw. Erstarrungsschrumpfung, wodurch sich gedruckte Teile stark verziehen können.

Im Gegensatz zu anderen additiven Fertigungsverfahren zeichnet sich das FDM durch einen breiten Bereich an verfügbaren Materialien aus. In Abb. 22 sind die derzeit verfügbaren FDM Materialien aufgelistet und kategorisiert.

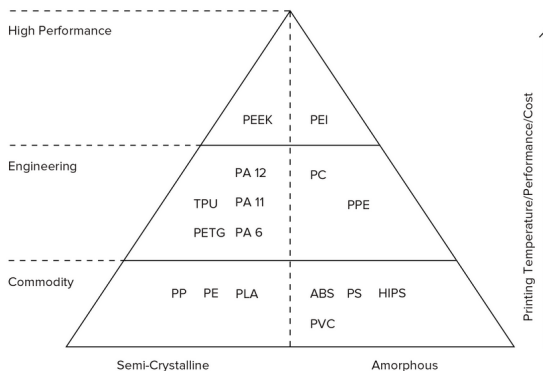


Abb. 22: Verfügbare Materialien für FDM (Stand 2018)⁵⁴

Für die Untersuchungen wurden die Materialien PLA und PA6GF ausgewählt.

3.1 Prüfeinrichtungen

3.1.1 Mechanische Prüfungen

Zugversuch

Für die Untersuchung der Festigkeit wurde eine Universalzugprüfmaschine 81565 mit Extensometer der Firma Karl Frank GmbH (modernisiert von Kögel GmbH) verwendet. Gemäß DIN EN ISO 527⁵⁵ wurde bei den Versuchen das Sekantenmodul bzw. Zugmodul im Dehnungsbereich zwischen 0,05 % und 0,25 % Dehnung mit einer geringen Dehnrate ermittelt und nach Erreichen der 0,3 % Grenze auf eine höhere Prüfgeschwindigkeit umgeschaltet. Aufgrund unterschiedlicher Zugprüfkörper (vgl. Kap. 4) wurde darauf geachtet, dass die Dehnraten für die Ermittlung der Kennwerte gleich sind, um eine optimale Vergleichbarkeit zu erhalten. Die verwendeten Prüfgeschwindigkeiten sind in Tab. 4 aufgelistet. Für die späteren Versuche haben hauptsächlich die niedrigeren Prüfgeschwindigkeiten Relevanz. Die höheren dienen zur Charakterisierung der Materialeigenschaften.

⁵⁴ Entnommen aus [59]

⁵⁵ Vgl. [60]

Die Haftfestigkeitsuntersuchung der Materialien wurde mit einer einheitlich geringen Prüfgeschwindigkeit durchgeführt, da der eigentliche Prüfbereich die Trennebene zwischen den gefügten Materialien darstellt und ein sprödes Verhalten erwartet wurde.

Tab. 4: Angaben zur Werkstoffprüfung

	ISO 527 Typ 1A	HPK	Haftfestigkeit
Prüflänge [mm]	80	40	-
Geschwindigkeit Zugmodul [mm/min]	1	0,5	1
Prüfgeschwindigkeiten [mm/min]	(50) / 10	(25) / 5	1

Dreipunktbiegeversuch

Zusätzlich wurden auf der Universalprüfmaschine, mittels entsprechender Vorrichtung, die Biegeigenschaften gemäß DIN EN ISO 178⁵⁶ für die Druckmaterialien ermittelt. Diese werden benötigt, um bei Füllsimulationen die Durchbiegung der Inserts berechnen zu können. Die Probekörper wurden nach den bevorzugten Probekörpermaßen von 80x10x4 mm³ gedruckt und bei einer Auflagedistanz von 64 mm geprüft. Die Prüfgeschwindigkeiten wurden nach Verfahren B mit 2 mm/min zur Ermittlung des Biegemoduls und 10 mm/min für den verbleibenden Prüfweg festgelegt.

Da die Biegeigenschaften der gedruckten Bauteile richtungsabhängig sind, werden diese sowohl in der Norm vorgesehenen flachen Position (Kürzel: F; Auflageseite 10 mm), als auch in der seitlichen Position (Kürzel: S; Auflageseite 4 mm) gemessen. Es wurde hierbei festgestellt, dass vor allem bei den seitlich liegenden Prüfkörpern aufgrund der gedruckten Oberfläche im niedrigen Dehnungsbereich oftmals keine lineare Steigung gemessen wird, sondern eine progressive. Daher wurde zusätzlich zum Biegemodul (Dehnungsbereich 0,05 % - 0,25 %) ein Hilfsmodul im Dehnungsbereich 0,5 % - 1,0 % ermittelt. Bei Auflageart F sind i. d. R. beide Moduln gleich hoch und unterscheiden sich kaum in der Standardabweichung. Bei Auflageart S ist der Hilfsmodul i. d. R. höher als das Biegemodul, wobei die Standardabweichung deutlich abnimmt.

Messung des Gewichts

Das Gewicht wurde mit Analysewaage der AE200 der Mettler-Toledo GmbH durchgeführt. Dies diente unter anderem zur Bestimmung des Feuchtegehalts der Proben.

3.1.2 Thermische Prüfungen

Differenzkalorimetrie

Die Differenzkalorimetrie (kurz DSC; engl. **differential scanning calorimetry**) ist ein Prüfverfahren, um thermische Effekte aufgrund endothermer oder exothermer Reaktionen von Polymeren zu messen.

Hierzu werden in einem Ofen zwei Tiegel, ein Tiegel mit der zu messenden Polymerprobe und ein Referenztiegel, mittels, mit Thermoelementen ausgestatteten, Sensorflächen gemessen. Diese Tiegel durchlaufen ein zuvor definiertes Temperaturprogramm, wobei Temperaturunterschiede der Tiegel gemessen werden. Basierend auf den Messdaten können polymertypische Kennwerte wie Glasübergangstemperatur oder Schmelztemperatur ermittelt werden. Ebenfalls kann ein Abbau der Polymerketten durch thermische bzw. mechanische Schädigung gemessen werden.

Das verwendete Gerät war eine DSC 214 Polyma der NETZSCH GmbH. Für die durchgeführten Messungen wurde eine Aufheiz- und Abkühlungsrate von 10 °C pro Minute gewählt, wobei der Ofen permanent mit Stickstoff gespült wurde. Es wurden vor der eigentlichen Messung ein Aufheiz- und ein Abkühlzyklus durchlaufen, um Effekte der Verarbeitung zu neutralisieren, wobei zwischen den Zyklen eine isotherme Phase von 5 Minuten eingebaut wurde. Es werden hauptsächlich die Schmelztemperatur als Peak und die Glasübergangstemperatur als Wendepunkt gemäß DIN 51007⁵⁷ bestimmt.

⁵⁶ Vgl. [61]

⁵⁷ Vgl. [62]

Thermogravimetrische Analyse

Die thermogravimetrische Analyse (kurz TGA) dient zur Bestimmung der Masseänderung einer Probe bei verschiedenen Temperaturen. Eine in einem Ofen befindliche Feinwaage misst die Masseänderung einer Probe während eines Temperaturzyklus, wobei die Möglichkeit besteht die Messzelle mittels unterschiedlicher Gase zu spülen. Es kann hierdurch z. B. der Wassergehalt einer Probe, Anteile von Blends oder Füllstoffe bestimmt werden.

Für die Messung des Glasfasergehalts von PA6GF wurde eine kontinuierliche Aufheizrate von 10 °C pro Minute gewählt und die Messzelle mit Stickstoff gespült. Die Messungen wurden auf einer TGA 2 der Mettler-Toledo GmbH durchgeführt.

3.2 Polylactid

Polylactid (PLA), auch Polymilchsäure genannt, ist neben ABS das am häufigsten verwendete Polymer im FDM. Es ist ein nicht natürlich vorkommender Polyester und wird über eine mehrstufige Synthese aus Zucker hergestellt. Es existieren zwei Formen von Polylactiden, das D- oder L-Lactid, je nachdem ob sich diese von D- oder L-Milchsäuren ableiten. Kommerzielle Typen sind in der Regel Copolymere aus diesen, wobei das Verhältnis der Anteile einen Einfluss auf die Eigenschaften wie z. B. Schmelztemperatur, Kristallinitätsgrad, etc. hat.⁵⁸

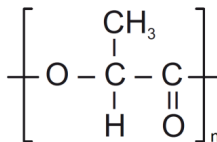


Abb. 23: Strukturformel PLA

Das in dieser Dissertation verwendete PLA-Filament ist SIMOGREEN PLA von der Simona AG und hat einen Nenndurchmesser von 2,85 mm mit einer Toleranz von ±0,05 mm.

3.2.1 Kennwerte Polylactid

Erwartungsgemäß ist bei Zugprüfungen mit PLA Zugprüfkörpern die erreichbare Spannung der konzentrischen Ausrichtung höher als die der -45°/45° Ausrichtung (vgl. Abb. 24; Tab. 5), da die Extrusionslinien beim konzentrischen Druckmuster in Richtung der Belastung ausgerichtet sind. Ebenfalls ist der Zugmodul bei der konzentrischen Ausrichtung höher. Daher ist diese Druckstrategie bei einachsiger Belastung vorzuziehen.

⁵⁸ Vgl. [63] S. 655f; [64]

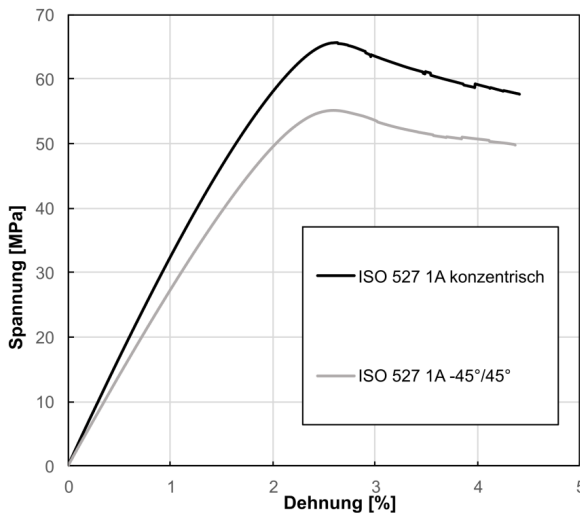


Abb. 24: Spannungs-Dehnungs-Diagramm 3D-gedruckter PLA Zugprüfstäbe (Mittelwerte)

Tab. 5: Zugeigenschaften 3D-gedruckter PLA Zugprüfstäbe

	Zugfestigkeit [MPa]	Dehnung [%]	Zugmodul [MPa]
ISO 527 1A konzentrisch	65,8 ± 1,30	2,64 ± 0,10	3380 ± 110,2
ISO 527 1A -45°/45°	55,3 ± 1,03	2,29 ± 0,03	3193 ± 78,1

Bei der Biegefestigkeit zeigt sich bei flacher Auflage (F) nur für die -45°/45° Ausrichtung eine Festigkeitsreduktion um ca. 10 % gegenüber den anderen Versuchen (vgl. Tab. 6). Die Abweichung bei der nach Norm gemessenen Biegemoduln ist bei den unterschiedlichen Auflagen deutlich erhöht. Bei den Hilfsmoduln hingegen sind die Abweichungen der Ausrichtungen geringfügiger ausgeprägt und die Standardabweichung ebenfalls reduziert.

Tab. 6: Biegeeigenschaften 3D-gedruckter PLA Biegeproben

	F/S	Biegefestigkeit [MPa]	-dehnung [%]	-modul [MPa]	Hilfsmodul [MPa]
-45°/45°	F	100,9 ± 5,3	4,66 ± 0,14	2800 ± 192	3035 ± 157
	S	109,1 ± 3,3	5,14 ± 0,15	2318 ± 152	2862 ± 71
0°	F	108,1 ± 3,4	4,79 ± 0,09	3015 ± 86	3141 ± 93
	S	110,6 ± 3,1	5,96 ± 0,67	2350 ± 128	2774 ± 110

Die Schmelztemperatur ist mit 148,9 °C (vgl. Abb. 25) bei PLA relativ gering, wodurch die Gefahr besteht, dass dieses beim Umspritzen an kritischen Stellen wie z. B. Dünnstellen oder Kanten schmilzt und es zur Vermischung mit der Schmelze kommt. Die DSC weist zusätzlich einen Kristallisationspeak auf, woraus sich schließen lässt, dass das verwendete PLA nicht vollständig amorph ist.

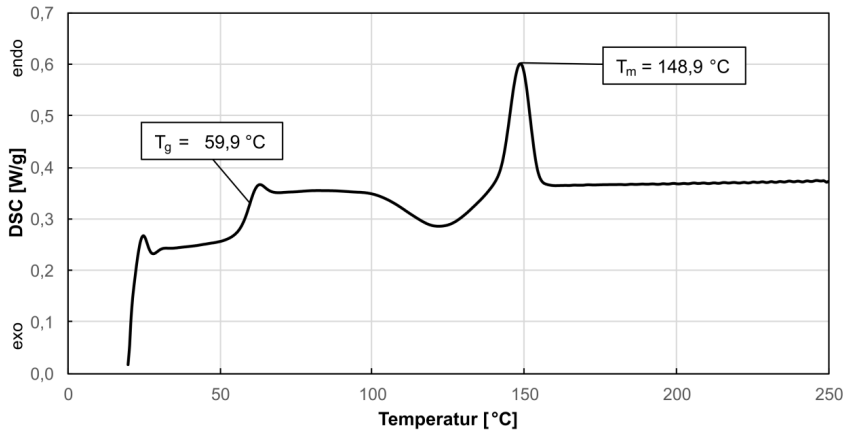


Abb. 25: DSC-Analyse PLA

3.2.2 Schrumpfungsverhalten von Polylactid

Bei PLA gedruckten Probekörpern wurde bei thermischer Einwirkung eine Schrumpfung festgestellt, welche deutlich über der Abkühlungsschwindung liegt. In Abb. 26 sind hierzu einige PLA-Inserts dargestellt, welche aufgrund Wärmeeinwirkung geschrumpft sind. Zum Vergleich wurden Referenzen daneben positioniert.

Für eine nähere Charakterisierung der Schrumpfung wurden Probekörper mit der Abmessung 50x10x4 mm³ hergestellt und diese bei 100°C eine Stunde lang temperiert. Beim nachfolgenden Vergleich wurde bei gedruckten Probekörpern in 0° Orientierung eine Schrumpfung von 9,1 % und bei gedruckten Probekörpern in -45°/45° Orientierung von 5,9 % festgestellt.



Abb. 26: Schrumpfung verschiedener PLA Inserts aufgrund Wärmeeinwirkung mit Referenzen

Bei dieser Schrumpfung handelt es sich vermutlich um innere Spannungen, welche durch starke Aufheiz- und Abkühlprozesse, sowie Verstreckung während der Fertigung eingebracht worden sind. Bei Erhitzung oberhalb der Glasübergangstemperatur finden Umlagerungsvorgänge statt, wodurch sich das gedruckte Bauteil zusammenzieht.

Diese Schrumpfung kann in Hybridbauteilen bei unsymmetrischer Auslegung zu geometrischen Abweichungen führen, da der genaue Wärmeeintrag und somit die Größe der Schrumpfung undefiniert sind. Vorteilhaft kann sich die Schrumpfung des Inserts auf die Spannungen im Spritzgießmaterial

auswirken. Infolge der Schrumpfung des Inserts blockiert dieses im geringeren Maße die Erstarrungsschrumpfung des Spritzgießmaterials, wodurch weniger Spannungen im erstarrten Zustand resultieren.

Beim zweiten Druckmaterial PA6GF konnte nur eine geringe Wärmeschrumpfung festgestellt werden, welche je nach Orientierung bei 0° 0,1 % und bei -45°/45° 0,4 % betrug.

3.3 Polyamid 6 mit Glasfasern

Polyamid ist aufgrund seiner Eigenschaften ein in der Technik häufig eingesetzter Thermoplast. Es wird meist über Polykondensation hergestellt, wobei es zwei Ausgangsstoffe gibt. Die Nomenklatur des Polyamids erfolgt in Abhängigkeit dieser Ausgangsstoffe. Die erste Zahl bezieht die Anzahl der C – Atome des Diamin und die zweite die der Dicarbonsäure. Polyamide besitzen sehr gute mechanische Eigenschaften, welche sich in Abhängigkeit des Feuchtegehalts (vgl. Kap. 3.7.3) verändern können.⁵⁹

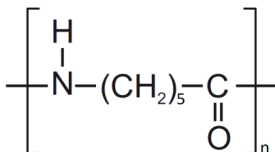


Abb. 27: Strukturformel Polyamid 6

Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführungen der Dissertation (2018) existierten bereits einige kommerziell erhältliche Polyamidfilamente, welche teilweise faserverstärkt waren. Dennoch wurde aufgrund folgender Gegebenheiten entschieden, Filament eigenständig herzustellen:

- Ungenaue Angaben zum Grundpolymer. Oftmals wird die Bezeichnung „Nylon“ für alle Polyamidtypen verwendet.
- Keine/ungenau Angaben zum Fasergehalt/Faserart.
- Keine plausiblen Datenblätter. Dehnungen trotz hohem Fasergehalt hoch. Keine Angaben zum Feuchtigkeitszustand der Kennwerte.
- Verfügbarkeit meist nicht gewährleistet.
- Extrem hohe Kosten für Filament (ohne Verstärkung >50 €/kg; mit Verstärkung >100 €/kg).

Für die Untersuchungen wurde ein PA6 mit einem Glasfasergehalt von 15 % verwendet. Dieses wurde als Granulat von der BASF SE (Ultramid B3EG3) bereitgestellt und mittels Extruder zu Filament verarbeitet (vgl. Kap. 3.7). Der geringe Fasergehalt wurde zur Vermeidung von Verstopfung am Extruder gewählt.

3.3.1 Kennwerte Polyamid 6 mit Glasfasern

Für die Überprüfung des Nennfasergehalts des Granulats von 15 % wurden mehrere Proben in verschiedenen Zuständen (Granulat, Filament, gedruckter Probekörper) mittels TGA und Schnellverascher getestet. Die Messungen ergaben einen Faseranteil von $14,4 \pm 0,18$ Gew.-%, welcher in einem akzeptablen Bereich liegt. Die mittlere Faserlänge beträgt gemäß Angaben 200 µm mit einem Durchmesser von 10 µm.

Um die Festigkeit der HPK gut abschätzen zu können, wurden Kennwerte für gedruckte PA6GF Probekörper bei unterschiedlicher Druckausrichtung und Konditionierzuständen geprüft. Die Festigkeit nimmt bei den Zugprüfkörpern durch die nicht lastgerechte Ausrichtung von -45°/45° gegenüber der lastgerechten Ausrichtung mit konzentrischem Druckmuster ab (vgl. Abb. 28; Tab. 7).

⁵⁹ Vgl. [65] S. 373 ff; [63] S. 55 ff.

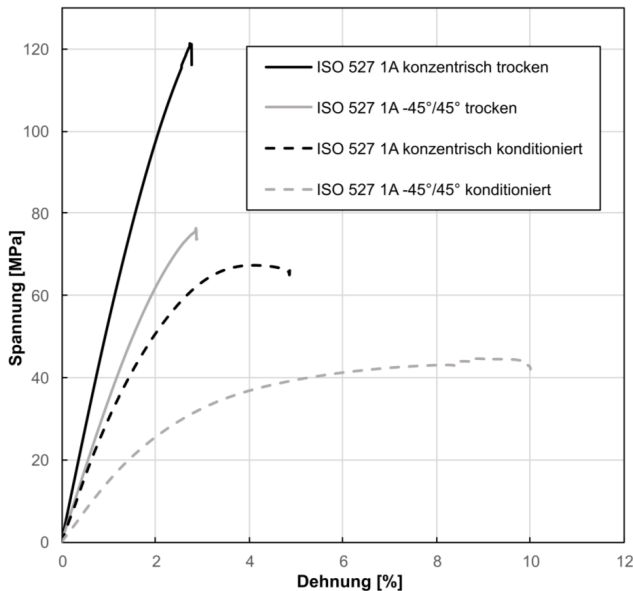


Abb. 28: Spannungs-Dehnungs-Diagramm 3D-gedruckter PA6GF Zugprüfstäbe

Tab. 7: Zugeigenschaften 3D-gedruckter PA6GF Zugprüfstäbe

	Zugfestigkeit [MPa]	Dehnung [%]	Zugmodul [MPa]
ISO 527 1A konzentrisch trocken	117,6 ± 3,62	2,65 ± 0,11	5388 ± 44,0
ISO 527 1A -45°/45° trocken	76,0 ± 2,87	2,90 ± 0,10	3490 ± 131,9
ISO 527 1A konzentrisch kond.	67,4 ± 3,81	4,10 ± 0,04	3073 ± 155,4
ISO 527 1A -45°/45° kond.	43,3 ± 3,29	8,77 ± 0,85	1490 ± 87,3

Bei den Biegefestigkeiten und Hilfsmoduln zeigt eine deutliche Abhängigkeit der Druckausrichtung. Sowohl Biegefestigkeit als auch Hilfsmodul ist bei der konzentrischen Ausrichtung gegenüber der -45°/45° Ausrichtung erhöht, wodurch diese Druckstrategie vorzuziehen ist.

Tab. 8: Biegeeigenschaften 3D-gedruckter PA6GF Biegeproben

	F/S	Biegefestigkeit [MPa]	-dehnung [%]	-modul [MPa]	Hilfsmodul [MPa]
-45°/45° kond.	F	67,9 ± 6,9	7,92 ± 0,15	1389 ± 139	1437 ± 145
	S	73,3 ± 4,9	11,33 ± 1,40	872 ± 158	1458 ± 86
-45°/45° trocken	F	112,6 ± 2,8	5,27 ± 0,35	2763 ± 134	2981 ± 124
	S	115,7 ± 4,9	4,42 ± 0,17	1893 ± 302	2895 ± 174
0° kond.	F	115,2 ± 3,5	5,35 ± 0,17	3032 ± 59	3043 ± 66
	S	108,5 ± 8,1	7,27 ± 0,36	1469 ± 176	2069 ± 126
0° trocken	F	178,7 ± 7,4	3,71 ± 0,11	5157 ± 107	5435 ± 164
	S	168,5 ± 5,0	4,81 ± 0,23	2724 ± 491	3891 ± 203

Die Glasübergangs- und Schmelztemperatur liegen bei den Messungen in einem für PA6 typischen Bereich (vgl. Abb. 29).

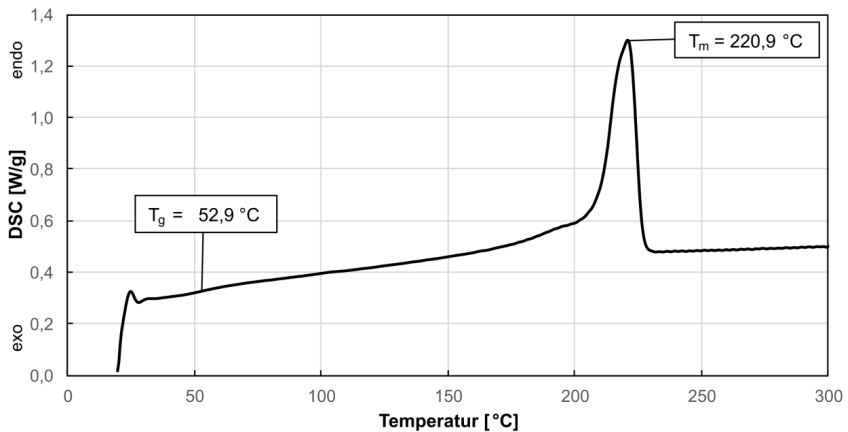


Abb. 29: DSC-Analyse PA6GF

3.3.2 Glasfaserausrichtung

Wie in Kap. 2.2.7 beschrieben orientieren sich Fasern beim Druck hauptsächlich in Extrusionslinienrichtung, wodurch eine gute Orientierung in Lastrichtung ermöglicht wird. Schnittbilder an verschiedenen Probekörpern verdeutlichen dies. Bei der $-45^\circ/45^\circ$ ausgerichteten Probe in Abb. 30 sind die einzelnen Schichten deutlich durch die Ausrichtung der Glasfasern unterscheidbar.

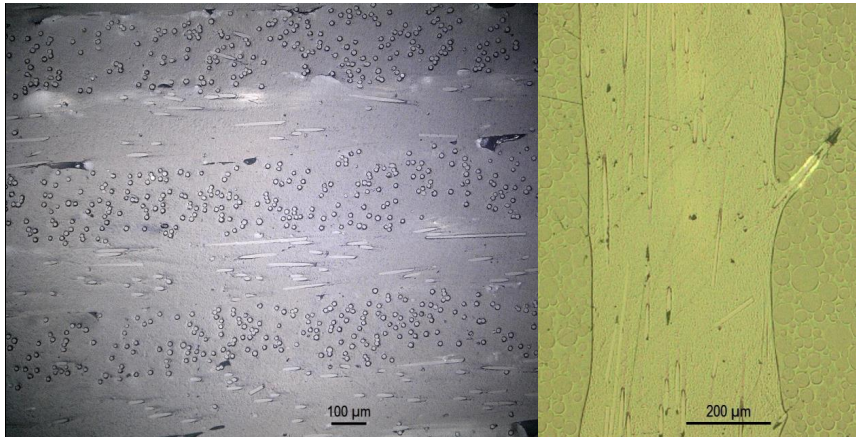


Abb. 30: Schnittbild durch Proben aus PA6GF; links: $-45^\circ/45^\circ$ Orientierung (der Schnitt wurde entlang einer Ausrichtung durchgeführt); rechts: einzelne Extrusionslinie mit seitlich herausragender Faser

Vereinzelte konnten ebenfalls von der Vorzugsrichtung abweichende Fasern detektiert werden, welche auch teilweise aus den Extrusionslinien herausragten. Komplett quer liegende Fasern wurde bei den Schnitten nicht gefunden.

3.4 Polyamid 6

Als erstes Spritzgussmaterial wurde ein unverstärktes PA6 verwendet, welches eine besonders hohe Zähigkeit aufweist und leicht zu verarbeiten ist. Es basiert auf demselben PA6 wie das PA6GF für das Filament, wodurch eine gute Komptabilität gewährleistet wird. Dieses wurde ebenfalls von der BASF SE (Ultramid B3K) zur Verfügung gestellt.

Verglichen mit dem faserverstärkten PA6GF sind die Zugeigenschaften wie Zugfestigkeit und -modul von PA6 deutlich geringer, wodurch bei späteren Messungen eine mögliche Festigkeitssteigerung gut nachweisbar ist. Das Polyamid ist naturbelassen und aufgrund der teilkristallinen Struktur nicht transparent. Hierdurch wird die Bewertung der Lage umspritzter Inserts erschwert.

3.4.1 Kennwerte Polyamid 6

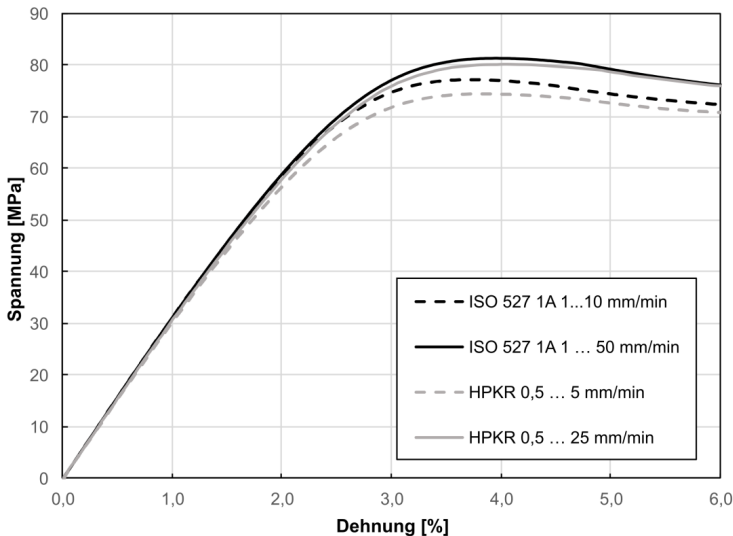


Abb. 31: Spannungs-Dehnungs-Diagramm gespritzter PA6 Zugprüfstäbe

Für einen guten Vergleich der Kennwerte wurden unterschiedliche Zugprüfungen an dem fürs Spritzguss verwendeten Polyamid durchgeführt. Es zeigt sich, dass aufgrund der Änderung der Probekörper eine leichte Veränderung der Kennwerte zu erwarten ist. Während Zugmodul und Zugfestigkeit sinken, erhöht sich die Dehnung der Probekörper (vgl. Abb. 31; Tab. 9). Ähnliche Ergebnisse bezüglich geometrischer Änderung von Zugprüfkörpern zeigen andere Studien⁶⁰ ebenfalls auf.

⁶⁰ Vgl. [66]

Tab. 9: Zugeigenschaften gespritzter PA6 Zugprüfstäbe⁶¹

	Zugfestigkeit [MPa]	Dehnung [%]	Zugmodul [MPa]
ISO 527 A1 1...10 mm/min	77,3 ± 1,63	3,70 ± 0,04	3188 ± 36,7
ISO 527 A1 1...50 mm/min	81,4 ± 2,01	3,97 ± 0,06	3171 ± 39,8
HPKR 0,5...5 mm/min	74,5 ± 1,64	3,82 ± 0,07	3100 ± 25,0
HPKR 0,5...25 mm/min	80,1 ± 0,60	3,99 ± 0,05	3123 ± 29,2
Bindenaht 1...10 mm/min	76,3	3,85	3021
Bindenaht 1...50 mm/min	79,7	4,00	2987

Durch die verwendeten Inserts wurde der Fließkanal der Schmelze verengt, wodurch sich aufgrund des gleichbleibenden Volumenstroms die mittlere Geschwindigkeit der Schmelze im parallelen Teil des Probekörpers geringfügig verändert (vgl. Kap. 4). Dies kann sich unter Umständen auf die Kennwerte der Materialien auswirken, da sich die Randbedingungen beim Spritzgussprozess geringfügig verändern. Daher wurde in Tab. 10 die Messwerte der unterschiedlichen HPKR verglichen. Diese zeigten nur marginale Unterschiede bei den Kennwerten von PA6 bei variierenden mittleren Geschwindigkeiten. Der Einfluss der unterschiedlichen Fließgeschwindigkeit kann somit für weitere Betrachtungen vernachlässigt werden.

Tab. 10: Kennwerte gespritzter PA6 Zugprüfkörper mit unterschiedlichen mittleren Einspritzgeschwindigkeiten

	Mittlere Geschwindigkeit ⁶² [mm/s]	Zugfestigkeit [MPa]	Dehnung [%]	Zugmodul [MPa]
HPKR ohne Insert	133	75,1 ± 0,48	3,82 ± 0,02	3129 ± 6,5
HPKR Insert 16 mm ²	147	73,0 ± 0,95	3,80 ± 0,04	3097 ± 34,1
HPKR Insert 32 mm ²	165	73,8 ± 0,32	3,79 ± 0,02	3111 ± 25,1
HPKR Insert 48 mm ²	189	73,5 ± 0,76	3,78 ± 0,04	3115 ± 17,8

Die Kennwerte der DSC Messung (vgl. Abb. 32) des PA6 Spritzgießmaterials entsprechen der Kennwerte der Messung des PA6GF für FDM.

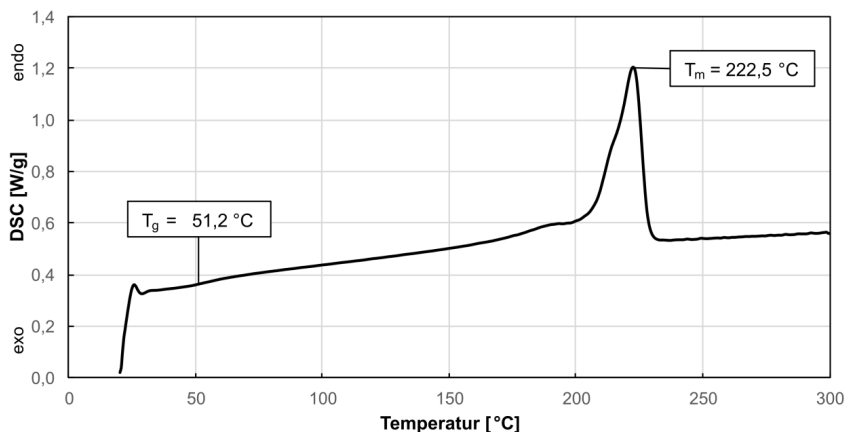


Abb. 32: DSC-Analyse PA6

⁶¹ Aufgrund geringen Probenumfangs wird auf die Angabe der Standardabweichung für Bindenähte verzichtet.

⁶² Für die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit wird die Querschnittsfläche ((2x) 4x20 mm²) im Prüfbereich verwendet, wobei die Querschnittsfläche der Inserts abgezogen wird.

3.5 Polymethylmethacrylat

Das zweite im Spritzguss eingesetzte Material ist ein schlagzäh modifiziertes PMMA (Degalan GSZ1160⁶³ von Degussa). PMMA wird mittels Block-, Emulsions- oder Suspensionspolymerisation aus Methacrylsäuremethylester polymerisiert. Durch die amorphe Struktur besitzt PMMA ausgezeichnete optische Eigenschaften mit einer Lichtdurchlässigkeit von ca. 92 %. Hierdurch haben mit PMMA gespritzte Hybridkörper den Vorteil, dass diese, ohne mechanische Eingriffe, hinsichtlich Lunker, Grenzflächen und Positionierung des Inserts bewertet werden können. Zudem können innere Spannungen mittels polarisiertem Licht sichtbar gemacht werden.⁶⁴

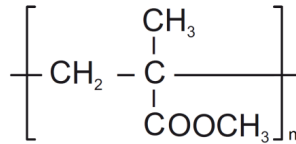


Abb. 33: Strukturformel PMMA

Vorversuche haben zudem gezeigt, dass eine Affinität zwischen PLA und PMMA besteht. Zusätzlich existieren Blends auf PMMA und PLA Basis.⁶⁵

3.5.1 Kennwerte Polymethylmethacrylat

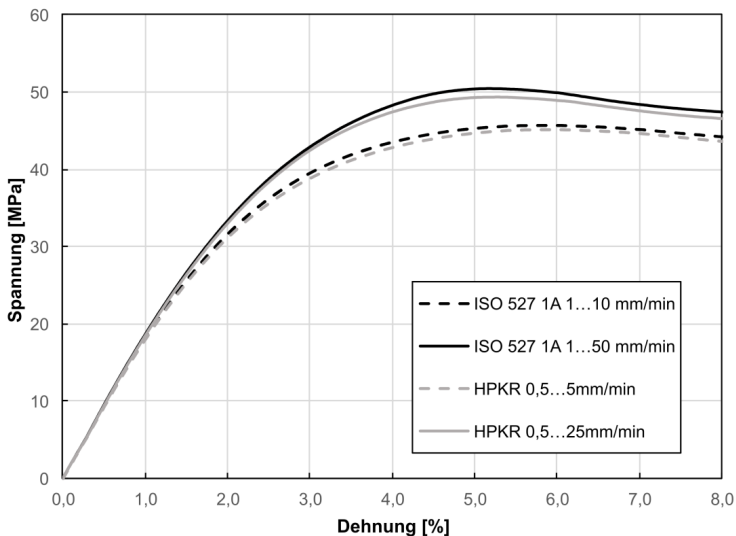


Abb. 34: Spannungs-Dehnungs-Diagramm gespritzter PMMA Zugprüfstäbe

⁶³ Vergleichbar mit PLEXIGLAS® zk40 von Evonik GmbH.

⁶⁴ [65] S. 355 ff.

⁶⁵ [63] S. 655

Gleich den Versuchen mit PA6 weisen die veränderten Zugprüfkörper (vgl. Kap. 4) geringe Festigkeitseinbußen gegenüber dem ISO 527 Typ 1A Prüfkörper auf. Ebenfalls sinkt die Zugfestigkeit bei geringeren Geschwindigkeiten, wobei die Dehnung wiederum erhöht wird (vgl. Abb. 34; Tab. 11).

Tab. 11: Zugeigenschaften gespritzter PMMA Zugprüfstäbe

	Zugfestigkeit [MPa]	Dehnung [%]	Zugmodul [MPa]
ISO 527 A1 1...10 mm/min	45,7 ± 0,29	5,87 ± 0,07	1841 ± 8,2
ISO 527 A1 1...50 mm/min	50,5 ± 0,33	5,16 ± 0,05	1840 ± 14,0
HPKR 0,5...5 mm/min	45,2 ± 0,74	5,89 ± 0,15	1829 ± 22,5
HPKR 0,5...25 mm/min	49,3 ± 0,28	5,26 ± 0,07	1811 ± 6,3
Bindenaht 1...10 mm/min	45,3 ± 0,23	5,68 ± 0,08	1818 ± 6,9
Bindenaht 1...50 mm/min	50,2 ± 0,28	4,97 ± 0,16	1815 ± 7,6

Wie Tab. 12 zeigt, ist der Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit auf die Kennwerte, wie bei PA6, gering und wird in den weiteren Versuchen nicht explizit betrachtet.

Tab. 12: Kennwerte gespritzter PMMA Zugprüfkörper mit unterschiedlichen mittleren Einspritzgeschwindigkeiten

	Mittlere Geschwindigkeit [mm/s]	Zugfestigkeit [MPa]	Dehnung [%]	Zugmodul [MPa]
HPKR Ohne Insert	133	44,6 ± 0,38	5,93 ± 0,16	1813 ± 16,4
HPKR Insert 16 mm²	147	45,4 ± 0,77	5,86 ± 0,15	1836 ± 22,2
HPKR Insert 32 mm²	165	45,3 ± 0,71	5,89 ± 0,15	1831 ± 25,1
HPKR Insert 48 mm²	189	45,2 ± 0,75	5,91 ± 0,14	1829 ± 20,4

Der Glasübergang von PMMA liegt bei 120,3 °C (vgl. Abb. 35), wobei aufgrund der amorphen Struktur kein Schmelzpunkt gemessen werden kann.

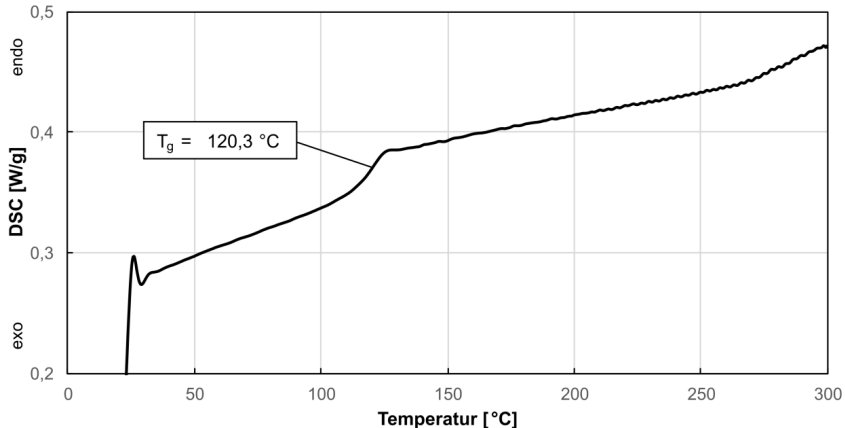


Abb. 35: DSC-Analyse PMMA

3.5.2 Crazing und Scherfließen

Als Crazing wird die Umorientierung von Polymerketten entlang einer eingebrachten Belastung bezeichnet. Die einzelnen Polymerketten ordnen sich hierbei in Bündeln, sogenannten Fibrillen, in Richtung der Belastung aus. Dieser Vorgang ist plastisch und es entstehen Hohlräume zwischen den Fibrillen, wodurch es zu einer lokalen Reduktion der Dichte im Bereich des Crazing kommt. Der Vorgang erfordert die Beweglichkeit der Polymerketten und ist somit von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit abhängig.

Die zweite typische Versagensart von Polymeren ist das Scherfließen, bei welchem es ebenfalls zu einer Umlagerung der Polymerketten kommt. Im Gegensatz zum Crazing, kommt es jedoch nicht zu einer Reduktion der Dichte, sondern zu einer Einschnürung kombiniert mit der Ausbildung von Scherzonen, welche typischerweise im 45° Winkel zur Belastung verlaufen.⁶⁶

Bei PMMA äußert sich die plastische Verformung visuell durch die Trübung des ansonsten transparenten Polymers in stark gedehnten Bereichen. In Abhängigkeit der Dehnung ist ein milchiger Schleier (leichte Dehnung) bis hin zur kompletten Weißfärbung (starke Dehnung) eines aus PMMA bestehenden Bauteils ersichtlich. Hierdurch kann PMMA sehr gut für die Bewertung von Geometrien von Hybridkörpern verwendet werden, da eine ungleiche Dehnung verschiedener Bereiche visuell sichtbar sein kann.

3.6 Mischbarkeit der Polymere

Für eine gute Abschätzung der mechanischen Belastbarkeit und Funktionalität von Hybridkörpern ist die Kenntnis über Kompatibilität der Materialien eine wichtige Voraussetzung. Es kann somit besser abgeschätzt werden, inwiefern die beiden Fügepartner mechanisch zueinander verankert werden müssen oder ob eine rein adhäsive Kraftübertragung ausreicht.

Für die Interdiffusion zweier Fügepartner ist eine Mischbarkeit die Voraussetzung. Diese kann durch thermoanalytische Untersuchungen ermittelt werden.⁶⁷ Das gebräuchlichste Verfahren ist hierbei die Untersuchung der Glasübergangstemperatur mittels DSC.

Eine vollständige Mischbarkeit der Polymere ist gegeben, wenn ein einziger Glasübergang der Polymermischung zwischen den Glasübergängen der reinen Polymere auftritt. Dieser ist hierbei vom Mischungsverhältnis abhängig.

Treten jedoch zwei Glasübergänge bei der Polymermischung an gleicher Stelle wie die der reinen Polymere auf so ist von einer vollständigen Unmischbarkeit auszugehen. Des Weiteren kann eine partielle Mischbarkeit vorliegen, wenn zwei Glasübergänge, die zueinander verschoben sind, auftreten.

Für die Untersuchung sollten die Glasübergänge der Einzelkomponenten eine möglichst große Differenz, mindestens jedoch 20 °C, aufweisen, da es ansonsten schwierig ist diese ausreichend aufzulösen.⁶⁸

Für die Untersuchung der verwendeten Polymere wurden diese in gleichen Teilen miteinander vermengt. Es wurden hierbei die jeweils verwendeten Spritzgießmaterialien mit Insertmaterialien analysiert, wobei auf die Untersuchung von PA6 mit PA6GF verzichtet wurde.

⁶⁶ Vgl. [67] S. 239 f.; [68]

⁶⁷ Vgl. [15] S. 26

⁶⁸ Vgl. [69] S. 29f

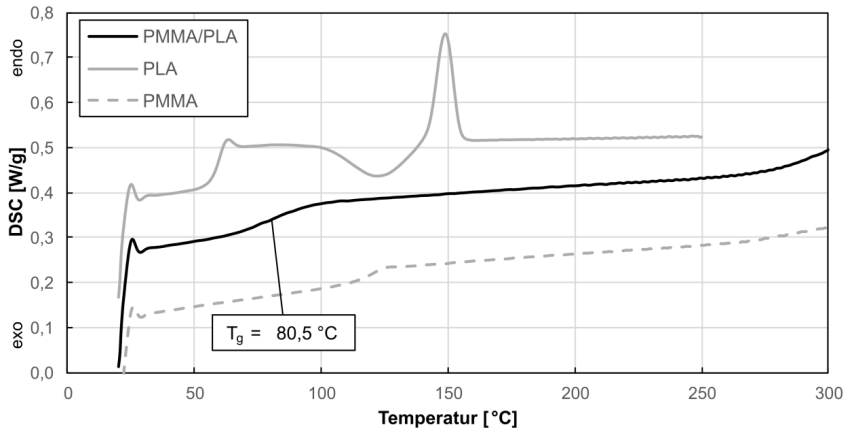


Abb. 36: DSC-Analyse PMMA/PLA-Blend mit Referenzen

Die DSC Messung der Kombination von PMMA und PLA weist nur eine Glasübergangstemperatur zwischen den Glasübergangstemperaturen der reinen Polymere auf (vgl. Abb. 36). Es ist daher davon auszugehen, dass diese vollständig mischbar sind. Es besteht somit die Voraussetzung zur Interdiffusion der Fügepartner beim Umspritzen.

Interessanterweise ist bei der Mischung weder ein Kristallisations- noch Schmelzpeak ersichtlich, was auf einen rein amorphen Charakter hinweist.

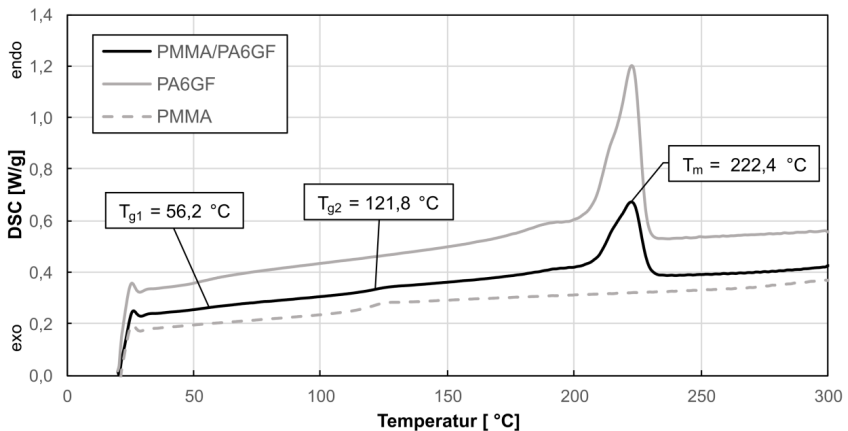


Abb. 37: DSC-Analyse PMMA/PA6GF-Blend mit Referenzen

Die Mischung aus PMMA und PA6GF weist hingegen zwei Glasübergänge auf, wobei der erste geringfügig ausfällt (vgl. Abb. 37). Es ist von einer Inkompatibilität auszugehen, welche auch durch die Literatur bestätigt wird.⁶⁹

⁶⁹ Vgl. [15] S. 11

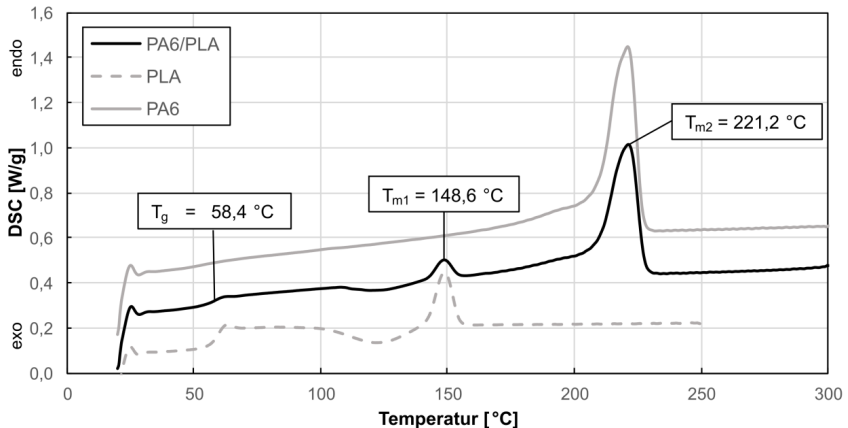


Abb. 38: DSC-Analyse PA6/PLA-Blend mit Referenzen

Bei PA6 mit PLA ist die Bestimmung der Mischbarkeit über die Glasübergangstemperatur aufgrund der geringen Differenz der Glasübergänge der reinen Polymere nicht möglich (vgl. Abb. 38). Anstelle dessen kann aufgrund der beiden isolierten Schmelzpeaks des Gemischs auf eine Inkompatibilität der Einzelkomponenten geschlossen werden.⁷⁰

3.7 Herstellung Filament

Für die Herstellung des Filaments aus PA6GF Granulat wurde ein zweizonen Filamentextruder der Firma Noztek verwendet, welcher eine maximale Temperatur von 600 °C erreichen kann. Die dabei verwendete Düse hat einen Durchmesser von 3,2 mm.

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 39 dargestellt. Der Extruder wurde auf einer Höhe von ca. 2,38 m positioniert, wodurch das Eigengewicht des Filaments als Abzugskraft verwendet werden konnte. Der Versuchsaufbau wurde gewählt, da das PA6GF Filament, aufgrund der Verarbeitung im getrockneten Zustand, eine hohe Steifigkeit aufweist und bei kleinen Biegeradien zum Brechen neigt. Vorangegangene Versuche mittels Wasserbad und automatischer Spulenaufwicklung scheiterten aufgrund dieser Eigenschaft.

Die Höhe des Aufbaus wurde so ausgelegt, dass das Filament ohne Fremdeinwirkung in Bahnen abgelegt wurde. Zusätzlich wurde über die Höhe sichergestellt, dass das Aufstellverhalten des Filaments nicht die Extrusion beeinflussen konnte. Vorangegangene Versuche haben gezeigt, dass hierdurch extrem hohe Durchmesserschwankungen erzeugt werden.

⁷⁰ Vgl. [69] S.71 ff.

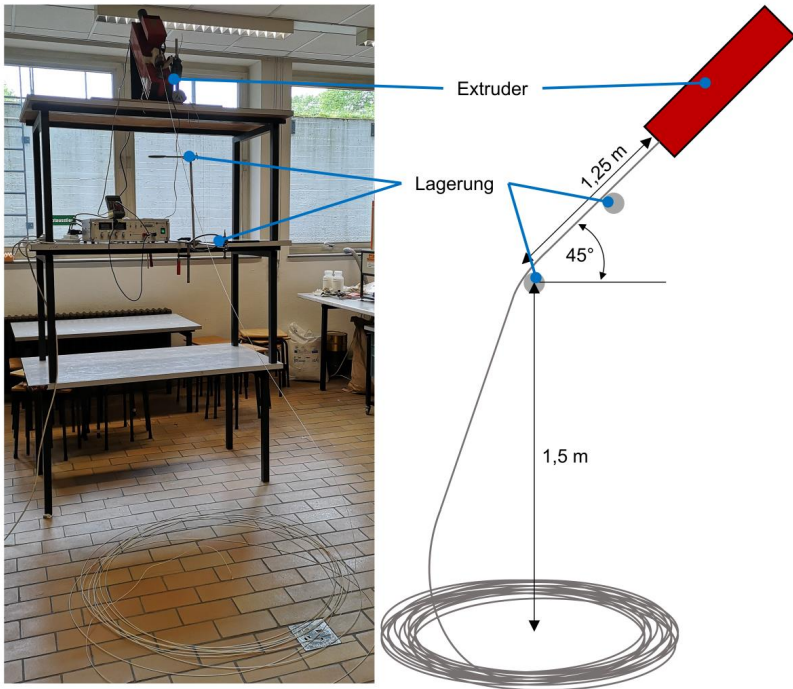


Abb. 39: Aufbau Extrusion PA6GF Filament

Um eine schnellere Abkühlung und somit bessere Formkonstanz zu erhalten ist nach der Düse im Extruder ein Lüfter integriert. Dieser wurde mit einem zusätzlichen externen Lüfter unterstützt, um die Kühlleistung zu steigern.

Vor der Verarbeitung wurde das Granulat mind. 24 h bei 80°C in einem Trockner getrocknet. Dies soll gewährleisten, dass keine Restfeuchtigkeit im Granulat vorhanden ist, da diese die Filamentqualität deutlich beeinflusst. In Abb. 40 ist vergleichsweise ein feucht und ein trocken extrudiertes Filament dargestellt, wobei das feuchte deutliche Einfallstellen (vgl. Abb. 40 linkes Bild) aufweist. Diese sind durch ein Aufblähen und Zusammenfallen des Filaments nach dem Extrusionsprozess entstanden und auf die Feuchtigkeit zurückzuführen. Im Schnittbild sind beim feucht extrudierten Filament deutliche Lunker erkennbar. Das getrocknete Filament hingegen ist bezüglich Rundheit und Lunker deutlich besser.

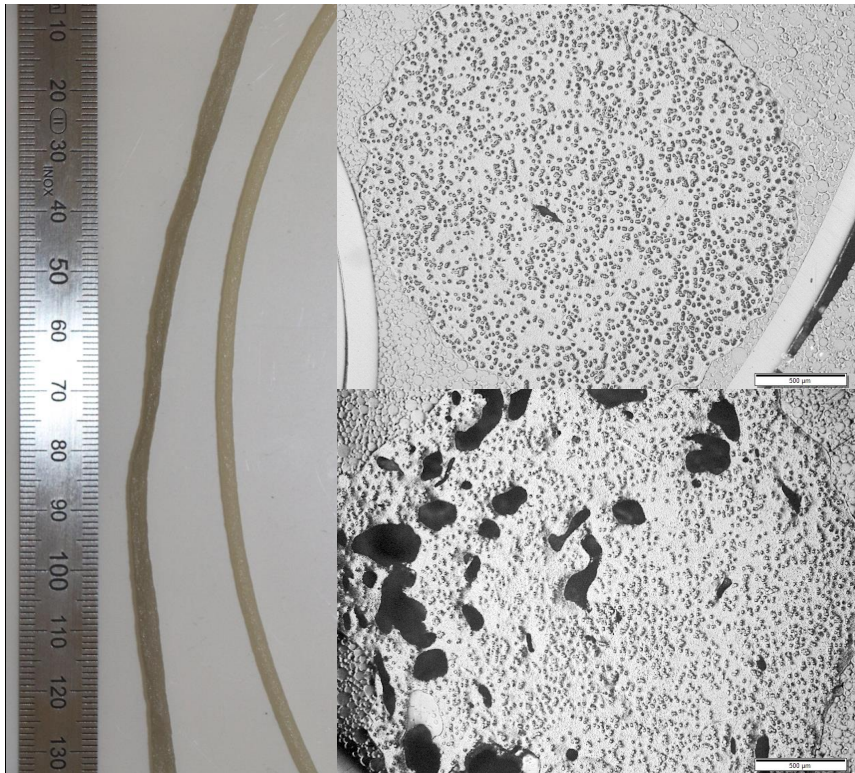


Abb. 40: Vergleich trocken (oben, rechts) und feucht (unten, rechts) extrudiertes Filament

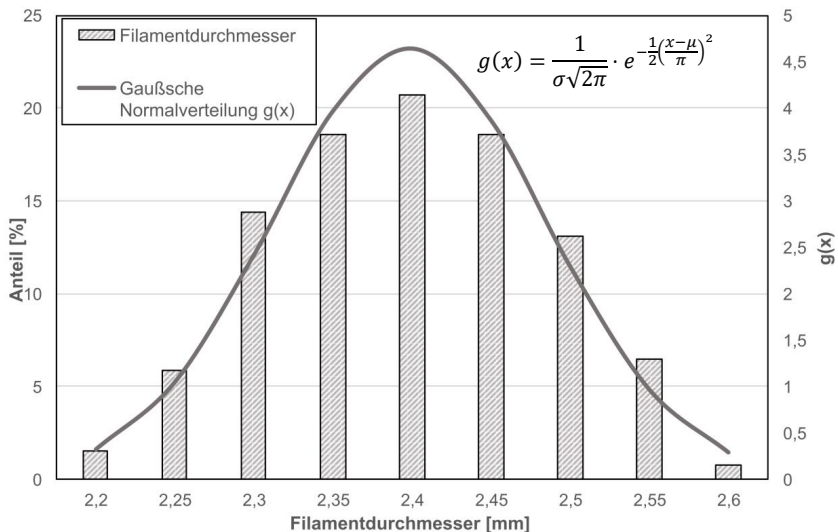


Abb. 41: Durchmesserverteilung extrudiertes PA6GF Filament; Bestehend aus 527 Einzelmessungen

Das beste Ergebnis bezüglich eines einheitlichen Filamentdurchmessers konnte bei Temperaturen zwischen 250 °C und 260 °C und einer Schneckendrehzahl von 10 U/min (geringste einstellbare Drehzahl) erreicht werden. Die Filamente, welche mit diesen Einstellungen hergestellt wurde, weisen einen mittleren Durchmesser von 2,4 mm auf, wobei die Toleranz mit $\pm 0,2$ mm im Vergleich zu Angaben aus kommerziellen Bereichen, relativ hoch ist. Die Ermittlung der Messwerte erfolgte hierbei anhand von 527 Einzelmessungen an extrudierten Filamenten. Die Häufung der Messwerte folgen hierbei der Gaußschen Normalverteilung (vgl. Abb. 41; Mittelwert 2,4; Standardabweichung 0,08589).

Mit dem mittleren Durchmesser von 2,4 mm ist das Filament deutlich kleiner als die kommerziell erhältlichen 2,85 mm. Dies beeinträchtigt die Druckbarkeit nicht, da die Extrusionsmenge softwaretechnisch an das dünnere Filament angepasst werden kann. Die relativ hohen Durchmesser-schwankungen können einen Einfluss auf die Festigkeit gedruckter Teile haben, da die Schwankungen direkt auf die Dichte der gedruckten Bauteile Einfluss nimmt. Um diesen Einfluss abschätzen zu können wurden daher bei allen verwendeten Probekörper das Gewicht ermittelt.

3.7.1 Einfluss Filament auf Bauteilgewicht und Dichte

Die Extrusion wird über den Vorschub des Filaments gesteuert. Der Slicer berechnet anhand der vorgegebenen Druckparameter den jeweils benötigten Vorschub pro abgelegter Wegstrecke. Hierdurch hat das Filament einen direkten Einfluss auf das Bauteilgewicht und die daraus resultierende Bauteildichte.

Bei einem Filament mit Nenndurchmesser von 2,85 mm sind Toleranzen von $\pm 0,05$ mm üblich, teilweise werden auch größere Toleranzen von $\pm 0,1$ mm angegeben. Hieraus folgt, dass bei einem herkömmlichen Filament der Materialeinsatz um bis zu 7 % (+3,5 %; -3,5 % bezogen auf den Nenndurchmesser) schwanken kann. Kritischer ist hierbei das hergestellte PA6GF Filament, welches bei 2,4 mm Nenndurchmesser eine Toleranzschwankung von $\pm 0,2$ mm aufweist. Hieraus resultiert eine maximale Gewichtsschwankung der Bauteile von 33,3 % (-16,0 %; +17,4 % bezogen auf den Nenndurchmesser). Dies hat einen Einfluss auf die Festigkeit der Probekörper, wodurch es notwendig ist das genaue Bauteilgewicht zu ermitteln, um Rückschlüsse auf gemessene Bauteilkennwerte zu erhalten.

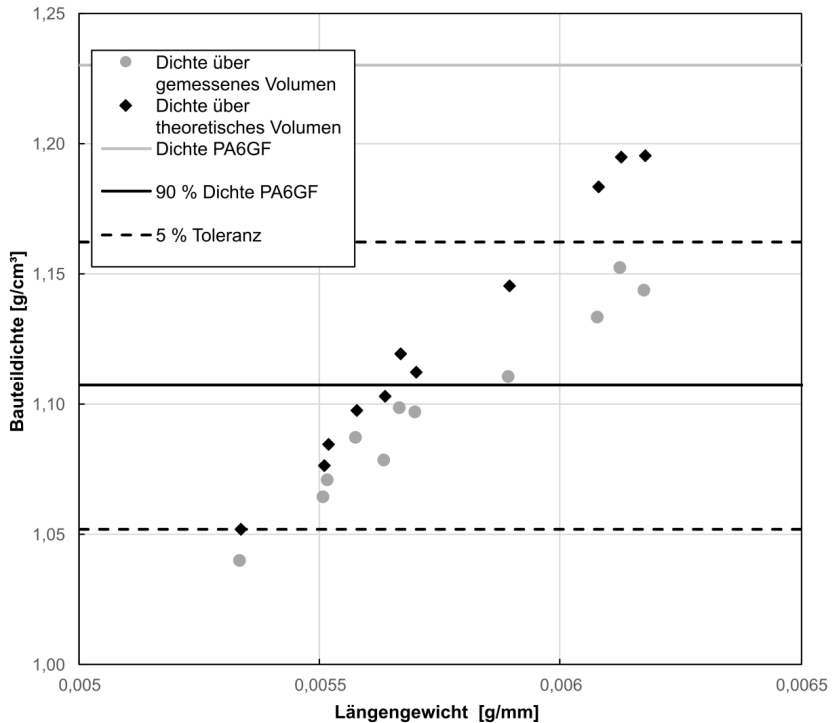


Abb. 42: Bauteildichte von Würfeln im Vergleich zum Längengewicht des eingesetzten Filaments bei PA6GF

Messungen an gedruckten Würfeln ($20 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$) aus PA6GF haben gezeigt, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen dem verwendeten Filament und dem resultierenden Bauteilgewicht gibt. Hierzu wurde das verwendete Filament auf die für das Drucken erforderliche Länge gekürzt und das Gewicht gemessen, um ein Längengewicht ermitteln zu können.

Das Längengewicht wurde mit der resultierenden Dichte der Probe anschließend verglichen (vgl. Abb. 42). Es wurden hierbei zwei Dichten des jeweiligen Probenkörpers dargestellt. Die Dichte über das theoretische Volumen bezieht sich auf die Abmessungen des Modells. Die Dichte über das gemessene Volumen hingegen bezieht sich auf die Messwerte, welche mittels Mikrometer am Würfel ermittelt wurden (vgl. 3.7.2).

Es zeigt deutlich die zu erwartende Steigerung der Dichte mit zunehmenden Längengewicht des Filaments. Der betrachtete Dichtenbereich der Bauteile liegt zwischen 84,5 % - 93,7 % der Dichte von PA6GF und weist ein annähernd lineares Verhalten auf. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Kurve bei höheren Werten abflacht, da eine Dichte von 100 % nicht überschritten und voraussichtlich nicht erreicht werden kann.

Es hat sich gezeigt, dass Bauteile, welche bei ca. 90 % der theoretischen Dichte liegen ein guter Kompromiss zwischen Druckbarkeit, Maßhaltigkeit und hoher Dichte darstellen. Proben, welche eine höhere Dichte als 90 % haben weisen vermehrt Ausstülpungen (engl. blobs; zits) an der Bauteiloberfläche (seitlich oder an der obersten Schicht) auf. Diese sind auf den stark schwankenden Filamentdurchmesser zurückzuführen. Wird eine Dickstelle des Filaments durch die Düse extrudiert erhöht sich der Volumenstrom an dieser Stelle und somit die Querschnittsfläche des Extrudats. Ist dieser deutlich höher wie der verfügbare Platz können zwei Effekte auftreten.

1. Die Kraft, welche zum Vorschub des Filaments benötigt wird, erhöht sich aufgrund des zu hohen Volumenstroms und des zu geringen verfügbaren Platzes (ähnlich einer Verstopfung der Düse). Überschreitet diese einen gewissen Schwellwert kann die zum Abgleiten des Vorschubrades am Filament führen, wodurch der Volumenstrom reduziert oder die Extrusion komplett gestoppt wird.
2. Das Extrudat breitet sich in Richtung von verfügbarem Platz aus. Bei Extrusionslinien der Außenwand wird dies über Ausstülpungen ersichtlich. Dies kann sich je nach vorhandenen Platz bzw. Volumenstrom über größere oder kleinere Bereiche erstrecken.

Bei Bauteilen mit einer geringeren Dichte tritt dieser Effekt nicht bzw. kaum auf, da auch bei erhöhten Volumenströmen ausreichend Platz vorhanden ist in welcher das überschüssige Extrudat fließen kann.

Um den Einfluss des Durchmessers auf das Bauteilgewicht bzw. die Dichte gering zu halten und die negativen Effekte bei erhöhten Bauteildichten zu vermeiden kann der Extrusionsfaktor an das jeweilige verwendete Filament angepasst werden. Hierzu wird im vorab das Filament auf die für den Druck benötigte Länge (Drucklängenvorgabe vom Slicer + 20 % Zusatz) abgelängt und das Gewicht gemessen. Über die Formel

$$X_{\text{Extrusion}} = \frac{V_{\text{Bauteil}} \cdot \rho_{\text{PA6GF}} \cdot K_{\text{Reduktion}} \cdot L_{\text{Filament}}}{m_{\text{Filament}} \cdot L_{\text{Bauteil}}}$$

kann somit ein Extrusionsfaktor bestimmt werden, welcher die Dickenschwankungen des Filaments weitestgehend ausgleicht. Die Schwankungen des Bauteilgewichts konnten somit deutlich reduziert werden.

Aufgrund von Filamentreststücken, welche in das Längengewicht mit einfließen, jedoch nicht verdichtet werden und weiterer Effekte wie z. B. Durchrutschen des Filaments am Vorschubrad, konnten die Gewichtsschwankungen gedruckter Bauteile mit PA6GF auf maximal $\pm 5\%$ eingegrenzt werden. Es ist daher dennoch notwendig, das jeweilige Bauteilgewicht zu dokumentieren.

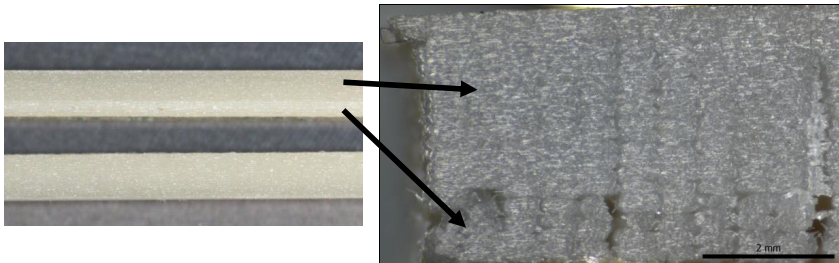


Abb. 43: Vergleich lokal unterschiedlicher Dichten im Bauteil. Der untere Bereich ist weniger kompakt als der obere und am Bauteil durch eine weißliche Färbung ersichtlich. Zusätzlich ist ein Bauteil mit homogenerer Dichteverteilung dargestellt.

Die Dichte des Gesamtbauteils entspricht jedoch nicht der Dichte in einzelnen Bereichen des Bauteils. Die jeweils lokale Dichte resultiert aus dem lokal verarbeiteten Filamentdurchmesser und der Ablagestrategie. Visuelle Effekte können bei PA6GF darauf hinweisen, welche Bereiche kompakter gedruckt sind als andere. In Abb. 43 ist ein Bauteil dargestellt, bei welchem sich der Filamentdurchmesser während des Druckens stark verändert hat. Es ist eine deutliche Trennung der einzelnen Bereiche ersichtlich, welche lokal unterschiedliche Dichten aufweisen.

Ebenso können durch die Ablagestrategie kompaktere Bereiche entstehen. Bei Bereichen in welchen aufgrund der Bauteilabmaße und der Einstellparameter die Extrusionslinien nicht in einer Ganzzahl teilbar sind, muss der Slicer entscheiden, ob zusätzliche, enger gepackte Extrusionslinien abgelegt werden oder nicht. Bei zusätzlichen Extrusionslinien ist somit die Dichte lokal erhöht wobei beim anderen Fall in diesem Bereich eine kleine Lücke entstehen kann. Dies ist in Abb. 44 dargestellt.

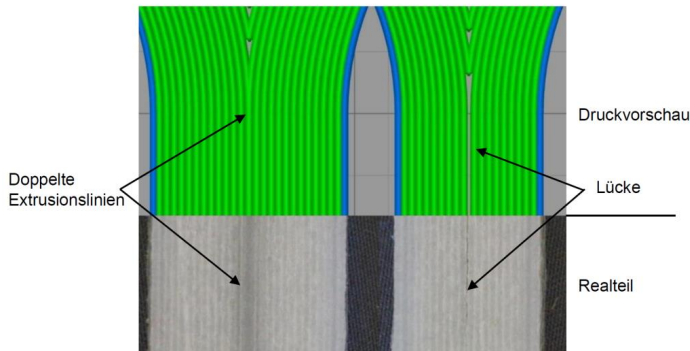


Abb. 44: Vergleich Druckbild mit Bauteilbreiten 16 mm (links) und 12 mm (rechts)

Die lokal variablen Dichtebereiche können in Abhängigkeit von der Ablagestrategie und vom Bauteil einen mehr oder weniger ausgeprägten Einfluss auf die Festigkeit haben. Bei Bauteilen, welche einen sehr dünnen Belastungsquerschnitt aufweisen können Bereiche mit geringerer Dichte vorzeitige Brüche einleiten. Bei größeren Querschnitten können solche Bereiche durch dichtere Bereiche ausgeglichen werden, vorausgesetzt es liegt keine Häufung der geschwächten Bereiche vor.

Die Ablagestrategie muss so gewählt werden, dass eine Dünn- bzw. Dickstelle des Filaments sich nicht auf einen lokalen Belastungsbereich auswirkt. Anhand des DIN 527 1A Zugprüfstabes kann eine Orientierung der Extrusionslinien in Belastungsrichtung einen starken Einfluss der Dichteschwankungen auf die Festigkeit unterbinden, da sich Dünnstellen des Filaments auf den kompletten Zugprüfstab verteilen und die Wahrscheinlichkeit, dass ein agglomerierter Effekt auftritt, sehr gering ist. Hingegen ist eine Orientierung des Zugprüfstabes in Z-Richtung, sodass der zu belastende Querschnitt in den Schichten liegt, als sehr kritisch zu betrachten. Im Falle von 0,2 mm dicken Schichten und der Querschnittsfläche von 40 mm² wird ein Volumen von nur 8 mm³ benötigt um diese Schicht zu füllen. Dies entspricht einer Filamentlänge von 1,77 mm (Durchmesser 2,4 mm). Die Wahrscheinlichkeit, dass sich somit eine Dünnstelle des Filaments auf die Festigkeit auswirkt, ist hoch, da eine Dünnstelle problemlos eine komplette Schicht betreffen kann.

Verschiedene Untersuchungen⁷¹ an in Z-Richtung ausgerichteten PLA Zugprüfkörpern mit unterschiedlichen Geometrien haben gezeigt, dass die Abweichungen der Zugfestigkeit signifikant sind. Bei Versuchen mit identischen Einstellungen konnten, trotz geringer Gewichtsunterschiede der einzelnen Zugprüfstäbe (<3 %), Festigkeitsschwankungen von über 20 % bezogen auf den Mittelwert, festgestellt werden. Die Bruchstellen befanden sich bei diesen Prüfungen nicht nur im verengten Prüfbereich, sondern auch teilweise im Übergang zum Einspannbereich.

Aufgrund dieser Problematik wird die Schichthftung der Probekörper in dieser Dissertation nicht betrachtet. Es ist davon auszugehen, dass je geringer die Schwankungen im Durchmesser des Filaments sind, desto höher ist die Reproduzierbarkeit in Z-Richtung.

3.7.2 Einfluss Gewicht auf Festigkeit

Aufgrund des Aufbaus der gedruckten Teile entsteht keine komplett gefüllte Struktur wie bei extrudierten Platten oder Spritzguss, sondern eine mit kleinen Hohlräumen behaftete Struktur. Je nach Druckparameter können diese größer oder kleiner ausgeprägt sein. Die Dichte der gedruckten Probekörper ist somit gegenüber der theoretischen Materialdichte reduziert. Hieraus folgt, dass gedruckte Probekörper mit denselben Abmaßen wie anders hergestellte Probekörper eine reduzierte Festigkeit aufweisen können. Weitere Eigenschaften können hiervon ebenfalls betroffen sein. Dies wurde bereits

⁷¹ Vgl. [70]

in weiteren Arbeiten (vgl. Kap. 2.2.5) untersucht, wobei der Füllgrad auch als künstliche Beeinflussung der Probendichte interpretiert werden kann.

Für Interpretationen der Ergebnisse FDM gedruckter Bauteile ist die Kenntnis über die Dichte ein durchaus wichtiger Faktor, welcher nicht zu vernachlässigen ist und in der Regel in Korrelation mit der Festigkeit steht. Jedoch ist die Dichte bei FDM gedruckten Bauteilen ein schwer zu bestimmender Wert, da das Volumen kaum zu ermitteln ist.

Aufgrund der meist komplexen Geometrie der gedruckten Bauteile sind äußere Abmaße schwer mit herkömmlichen Methoden zu messen. Zusätzlich stellen Druckfehler und die Struktur der Bauteile eine weitere Herausforderung dar (vgl. Abb. 45).

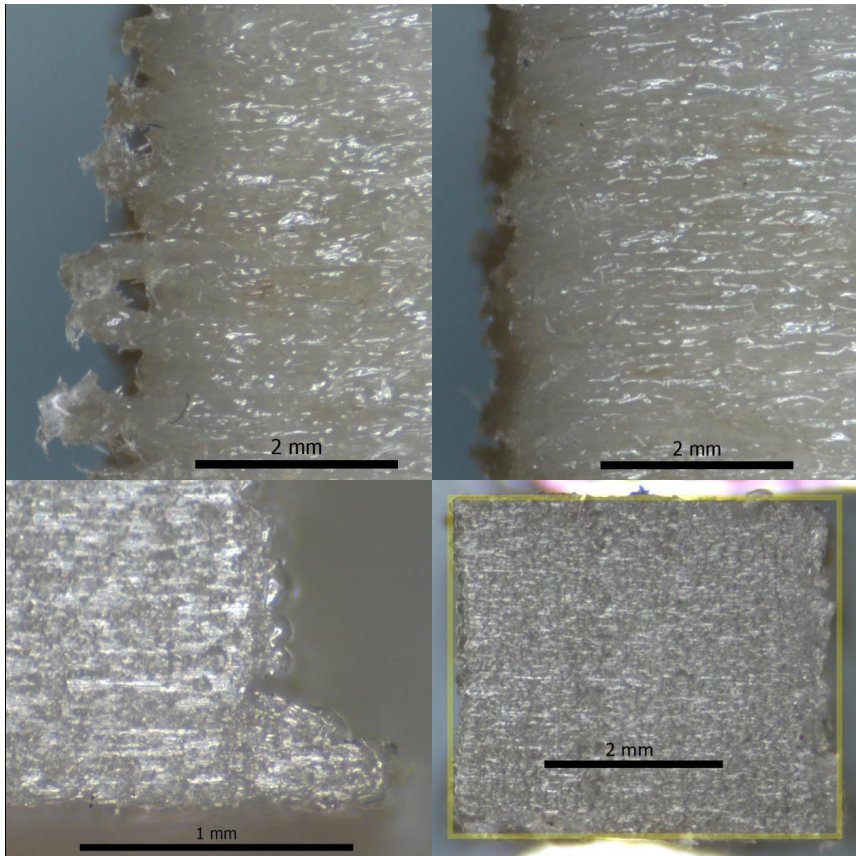
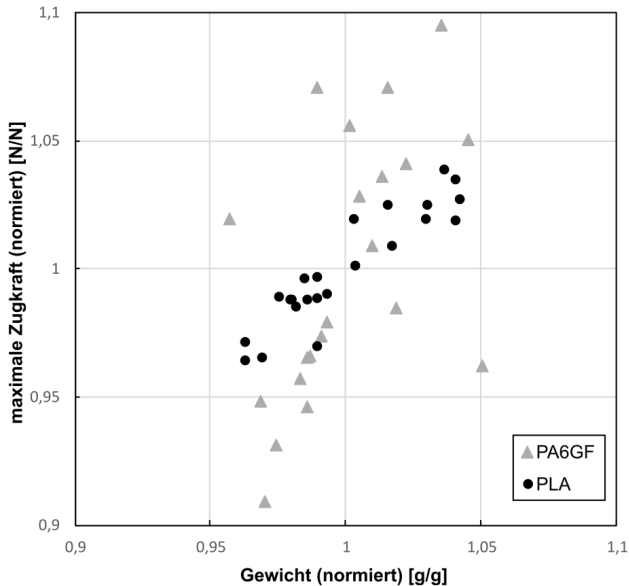


Abb. 45: Bauteilfehler: Kante mit Ausstülpungen (oben links); Kante ohne Ausstülpungen (oben rechts); Elefantenfuß (unten links); Querschnittsfläche 4x4 mm² mit Referenzgeometrie (unten rechts)

Die Wellenstrukturen in Z-Richtung, welche infolge der schichtweisen Fertigung entstehen, stellen eine Schwierigkeit dar. Zum einen wird bei zwei gegenüberliegenden Flächen die genaue Definition des zu messenden Abstands notwendig. Es muss hierbei zwischen einem maximalen (Messung an Hochpunkten der Wellenstruktur), minimalen (Messung an Tiefpunkten der Wellenstruktur) und interpolierten Abstand differenziert werden, da diese Maße nicht nur vom Bauteil, sondern auch von Druckparametern wie z. B. Schichthöhe abhängen. Hinzu kommt, dass

Fertigungsfehler wie seitliche Ausstülpungen, Positioniergenauigkeit der Düse und Elefantenfüße bei taktilen Messverfahren das Ergebnis deutlich verfälschen können.

Tauchverfahren hingegen haben den Nachteil, dass Poren, welche an der Oberfläche bzw. im Bauteilinneren liegen und durch Fehlstellen mit der Oberfläche verbunden sind, ebenfalls geflutet werden. Daher ist eine genaue Bestimmung des Volumens mit einfachen Methoden kaum möglich. Messungen mittels μ -CT könnten hierbei bessere Ergebnisse liefern.



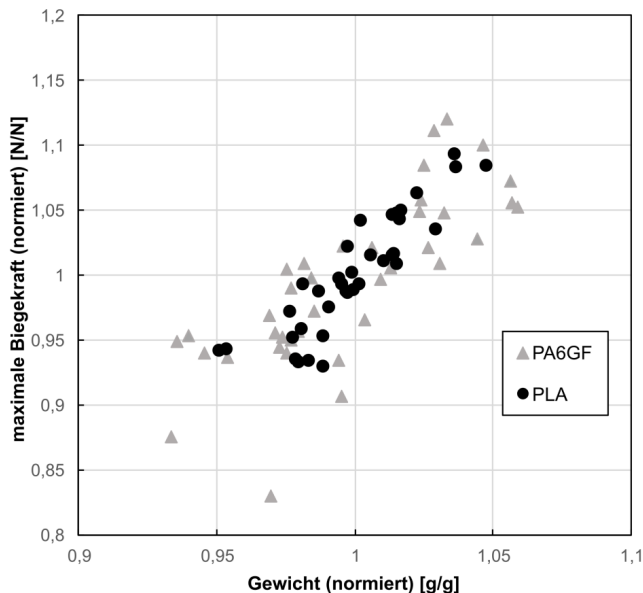


Abb. 47: Normierter Vergleich der maximalen Biegekraft 3D-gedruckter Zugprüfstäbe aus PLA und PA6GF mit deren Gewicht

3.7.3 Feuchtigkeitsaufnahme Polyamid

Polyamid ist ein hygroskopisches Material und kann somit Wasser reversibel aufnehmen. Dieses lagert sich hauptsächlich in den amorphen Bereichen ab. Dieser Effekt wirkt sich vor allem auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs aus (vgl. Abb. 49), wobei mit zunehmender Wasseraufnahme die Zugfestigkeit und Steifigkeit abnehmen und die Zähigkeit zunimmt.⁷² Zusätzlich wird die Verarbeitung von Polyamid durch die Wasseraufnahme beeinträchtigt, wodurch es erforderlich ist, das zu verarbeitende Material vorab zu trocknen. In Abb. 48 sind hierzu Bauteile zu sehen, welche mit getrockneten und feuchten Filament gedruckt wurden.

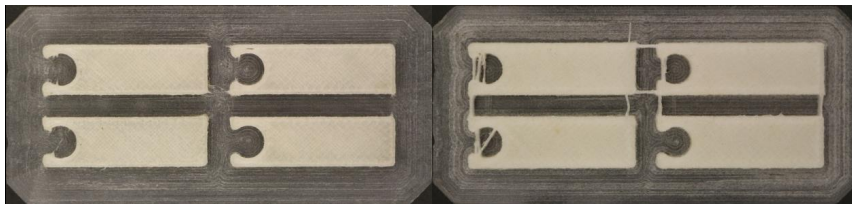


Abb. 48: Vergleich 3D-Druck mit trockenem (links) und feuchtem (rechts) Filament

⁷² Vgl. [67] S. 228 f.

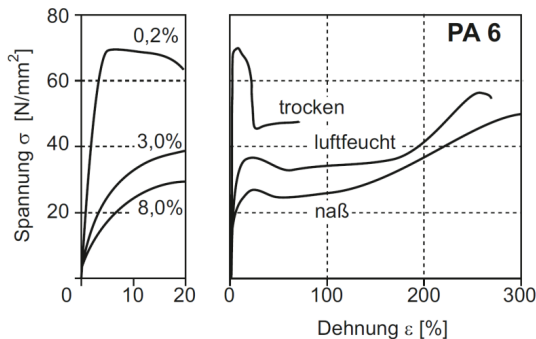


Abb. 49: Spannungs-Dehnungs-Kurven von trockenem, luftfeuchtem und nassem PA6⁷³

Die Wasseraufnahme der Polyamide hängt maßgeblich von der jeweiligen Umgebung (Temperatur, Luftfeuchte) ab, wobei die Sättigung des Polyamids mit zunehmender Umgebungsfeuchte zunimmt. Daher gibt es drei vordefinierte Konditionierungszustände, welche eine Vergleichbarkeit von Versuchen gewährleisten. Diese sind in Tab. 13 dargestellt. Für die Versuche haben nur die Zustände trocken und luftfeucht Relevanz.

Tab. 13: Definierte Feuchtigkeitszustände von Polyamid

Zustand	Umgebung	Wassergehalt [Gewicht - %]	
		PA6	PA6GF
trocken	keine Feuchte	< 0,2	
luftfeucht	23 °C / 50 % r. F.	2,6 – 3,4	2,3 – 2,9
nass	Wasser	9,0 – 10,0	7,7 – 8,3

Für den luftfeuchten Zustand wird in DIN EN ISO 291⁷⁴ ein Normalklima von 23 °C und 50 % r.F. angegeben, wobei zwei Grenzklassen bestehen. In Ermangelung eines Klimaschranks wurde das Normalklima in Anlehnung an DIN EN ISO 483⁷⁵ mit Hilfe eines Exsikkators und Magnesiumnitrat erzeugt, wobei die Temperatur und die Luftfeuchte regelmäßig überprüft wurden. In Anlehnung an die DIN EN ISO 291⁷⁶ blieb die Temperatur innerhalb der zweiten und die Luftfeuchte innerhalb der ersten Klasse.

Die Wasseraufnahme von Polyamiden erfolgt in Abhängigkeit der Dicke und kann bei reiner Lagerung innerhalb des Normalklimas sehr lange dauern. Daher kann die Konditionierung beschleunigt werden. In DIN EN ISO 1110⁷⁷ wird eine beschleunigte Konditionierung beschrieben, bei welcher Probekörper aus Polyamid bei 70 °C und 62 % r.F. gelagert werden, bis eine Feuchtigkeitsaufnahme von 95 % erreicht wird. Der Probekörper wird anschließend so lange im Normalklima verwahrt bis die Masseänderung von diesem innerhalb von 0,1 % bei drei hintereinander folgenden Messungen liegen. Die Zeitdauer der Messabstände ist hierbei von der Probekörperdicke abhängig.

Die Konditionierung erfolgt in der Regel nach dem Fick'schen Gesetz. Daher wird bei den Schnellkonditionierverfahren die Konzentration des Wassers und die Temperatur erhöht, um eine beschleunigte Diffusion der Teilchen zu erreichen. Die Dicke der zu konditionierenden Bauteile spielt

⁷³ Entnommen aus [67] S. 229

⁷⁴ Vgl. [71]

⁷⁵ Vgl. [72]

⁷⁶ Bei Entnahme oder Zugabe von Probekörper konnte kurzfristig (< 30 min) eine größere Abweichung entstehen.

⁷⁷ Vgl. [73]

hierbei eine maßgebliche Rolle, da bei größeren Dicken das Wasser deutlich länger benötigt, um bis zum Kern zu diffundieren.

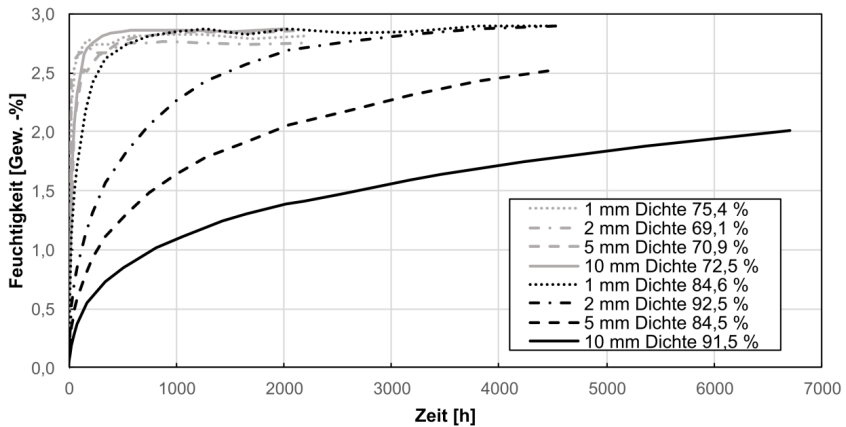


Abb. 50: Feuchtigkeitsaufnahme über Zeit bei unterschiedlichen Probendicken und -dichten im Normalklima

Der Aufbau gedruckter Bauteile bietet hierbei deutliche Vorteile gegenüber Bauteile aus der konventionellen Fertigung. Durch den schichtweisen und teilweise fehlstellenbehafteten Aufbau über Extrusionslinien besteht die Möglichkeit die Dichte der Bauteile zu beeinflussen, wodurch wiederum die Wasseraufnahme beeinflusst wird. Sehr dickwandige Bauteile könnten bei Herstellung über additive Fertigung somit in einem Bruchteil der ansonsten benötigten Zeit konditioniert werden. Vorausgesetzt, dass diese mit entsprechend poröser Struktur gefertigt werden.

Versuche mit unterschiedlich starken Platten und Dichten zeigten, dass Platten, welche nur rund 70 % der Dichte⁷⁸ des Ausgangsmaterials aufwiesen, bereits nach 500 h, bei Lagerung im Normalklima, den Gleichgewichtsfeuchtegehalt erreichen konnten. Bei Platten mit höherer Dichte wird hierzu deutlich mehr Lagerzeit benötigt (vgl. Abb. 50).

⁷⁸ Die Dichte wurde hierbei über das Volumen der Sollgeometrie ermittelt.

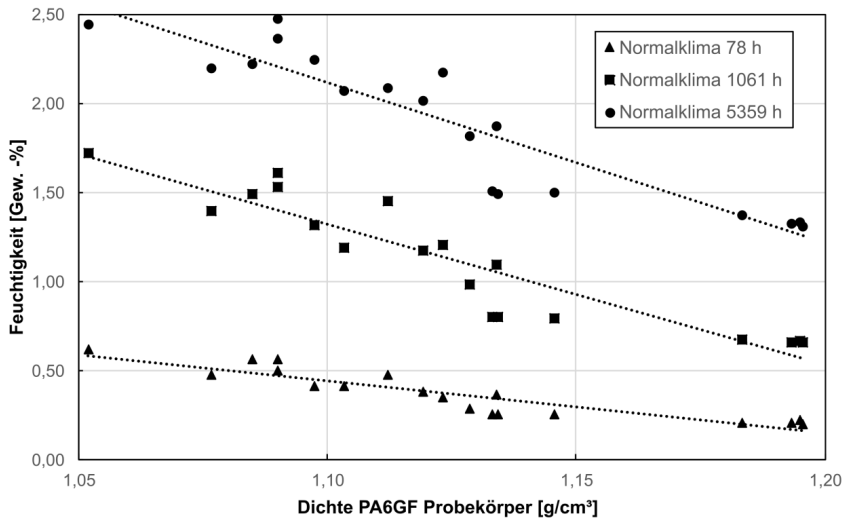


Abb. 51: Feuchtigkeitsaufnahme PA6GF in Abhängigkeit der Probendichte

Der Vergleich mehrerer 10 mm dicker Platten bei unterschiedlicher langer Konditionierdauer zeigte, dass bereits bei geringeren Dichteschwankungen die Konditionierzeit signifikant beeinflusst wird. Je höher die Dichte war, desto geringer war der gemessene Feuchtigkeitsgehalt der Probe bei gleicher Lagerdauer (vgl. Abb. 51). Es zeigte sich hierbei eine annähernd lineare Abhängigkeit zwischen Dichte und erreichbarem Feuchtigkeitsgehalt.

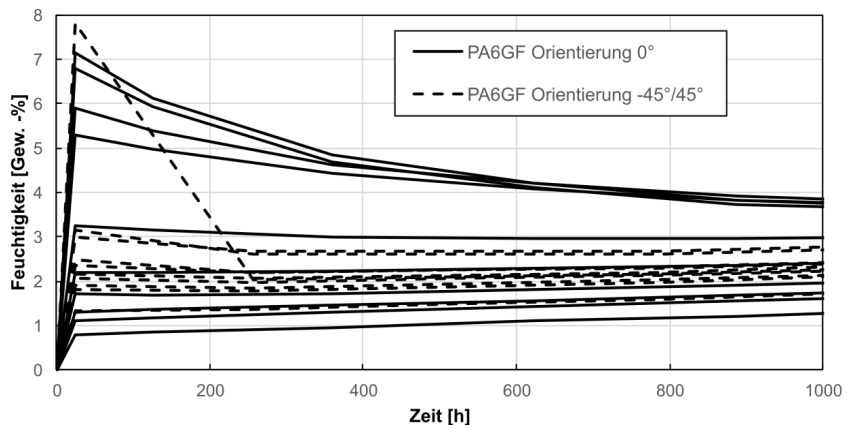


Abb. 52: Feuchtigkeitsaufnahme PA6GF in Abhängigkeit der Zeit bei Schnellkonditionierung

Gleiches Verhalten zeigt die Untersuchung der Schnellkonditionierung von Probekörpern. Es wurden hierbei mehrere Stäbe mit den Abmessungen 4x10x80 mm³ für 24 h in 20 °C warmes Wasser eingelegt und danach in Normalklima gelagert (vgl. Abb. 52). Probekörper mit geringeren Dichten nahmen hierbei bereits mehr Feuchte auf und gaben diese im Laufe der Zeit ab, während dichter gedruckte Probekörper weniger Feuchte im Wasser aufnahmen und nach Lagerung bei Normalklima weiterhin Feuchte anreicherten.

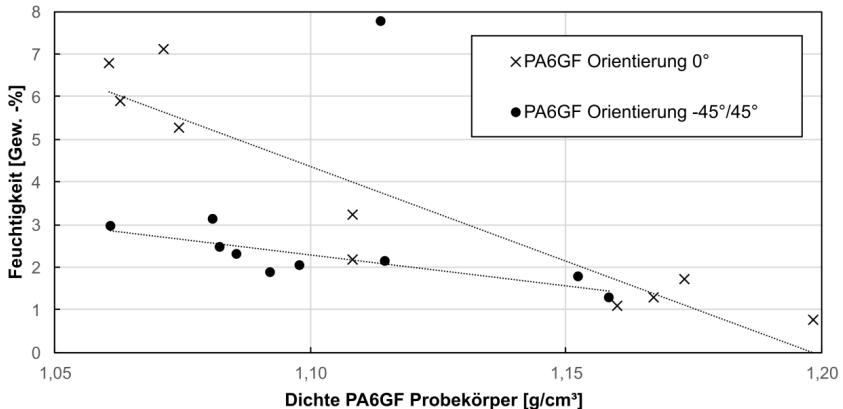


Abb. 53: *Feuchtigkeitsaufnahme PA6GF in Abhängigkeit der Orientierung und Dichte*

Zusätzlich wurden bei dieser Untersuchung weitere Einflüsse festgestellt. Basierend auf der gewählten Druckstrategie war die Konditionierung ebenfalls verschieden. Bei einer 0° Druckmustersausrichtung war der erreichte Feuchtigkeitsgehalt nach 24 h bei geringeren Dichten deutlich höher als bei einer -45°/45° Ausrichtung (vgl. Abb. 53). Dies liegt an der Ausbildung der Hohlräume im Bauteil, welche die Dichte reduzieren. Bei der 0° Ausrichtung scheint die Ausbildung dieser Hohlräume die Konditionierung positiver zu beeinflussen als bei einer -45°/45° Ausrichtung. Des Weiteren weist der Verlauf der Konditionierung einer PA6GF Probe mit -45°/45° Ausrichtung auf die Einlagerung von Wasser hin. Es ist zu vermuten, dass sich in einem Hohlraum Wasser bei der Konditionierung eingelagert hat, welches im Laufe der Zeit verdampft ist.

Die auf Festigkeit untersuchten Hybrid- und Haftungsprüfkörper wurden, so weit nicht anders gekennzeichnet, im trockenen Zustand geprüft. Dies ist darin begründet, dass keine Möglichkeit bestand die Probekörper zuverlässig und in einer tolerierbaren Zeitspanne auf den Feuchtigkeitsgehalt des Normklimas zu bringen, da, wie die Untersuchungen gezeigt haben, eine lange Zeitspanne von Nöten wäre. Zusätzlich erschwert die Kombination der verschiedenen Materialien die Konditionierung. Beispielsweise bei PA6 mit PA6GF benötigen beide Materialien unterschiedlich lange, um die Gleichgewichtsfeuchte zu erreichen, wobei aufgrund der unterschiedliche schnellen Wasseraufnahme eine Schnellkonditionierung ausgeschlossen ist.

Zur Sicherstellung des trockenen Zustandes wurden nach der Verarbeitung die Probekörper in Beutel luftdicht verpackt und in Exsikkatoren mit Silikagel gelagert. Die maximale Zeit an der Luft zwischen Fertigung und Prüfung betrug somit weniger als 10 min und kann vernachlässigt werden. 3D-gedruckte PA6GF Bauteile wurden aufgrund der langen Druckzeit zusätzlich mind. 48 h bei 60 °C in einem Trockenlufttrockner nach dem Druck nachgetrocknet.

4 Spritzgießen

Für die Spritzgießversuche stand eine Spritzgießmaschine des Typs Allrounder 320 C der Firma Arburg zur Verfügung, welche eine Schließkraft von 500 kN hat. Der Schneckendurchmesser der Plastifiziereinheit betrug 30 mm und beinhaltet sechs verschieden einstellbare Heizzonen. Die Spritzgießparameter für die beiden Spritzgießmaterialien sind in Tab. 14 aufgelistet.

Tab. 14: Spritzgießparameter für Herstellung von Probekörpern

		PA6	PMMA
Volumengeschwindigkeit	[cm ³ /s]	21,2	21,2
Massetemperatur	[°C]	260	250
Werkzeugwandtemperatur	[°C]	60	60
Nachdruck	[bar]	300	600
Kühlzeit	[s]	30	50

4.1 Spritzgießwerkzeug

Das für die Versuche verwendete Werkzeug ist ein Universalwerkzeug für Normproben mit verschiedenen Werkzeugwechseleinsätzen (vgl. Abb. 54). Die Düsenseite besteht hierbei aus einer geschliffen Platte mit einem 54 mm langen, konischen Angusskanal, welcher mittig ins Werkzeug mündet. Auf der Auswerferseite kann über vertikal angebrachte Schienen ein Werkzeugeinsatz mit einer projizierten Fläche von 120 mm x 246 mm eingeschoben werden. An der Auswerferplatte sind 11 Auswerfer eingebracht, welche bei Bedarf im Werkzeugeinsatz verwendet werden konnten. Beide Seiten sind über Kühlkanäle temperierbar.

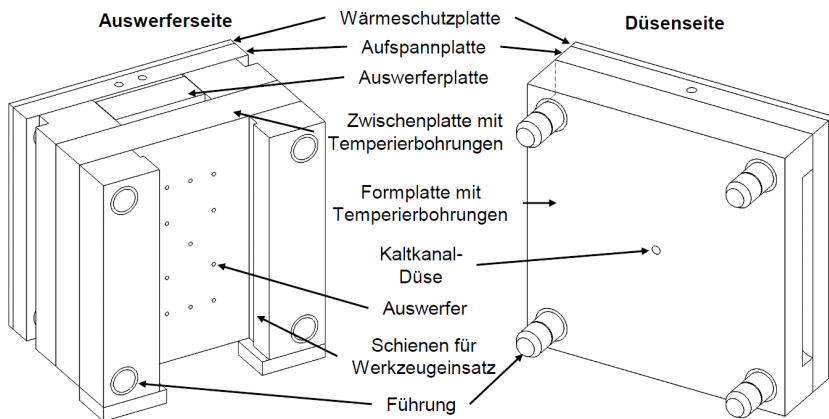


Abb. 54: Universalwerkzeug für Wechseleinsätze

4.1.1 Werkzeugeinsatz für Vielweckprüfkörper

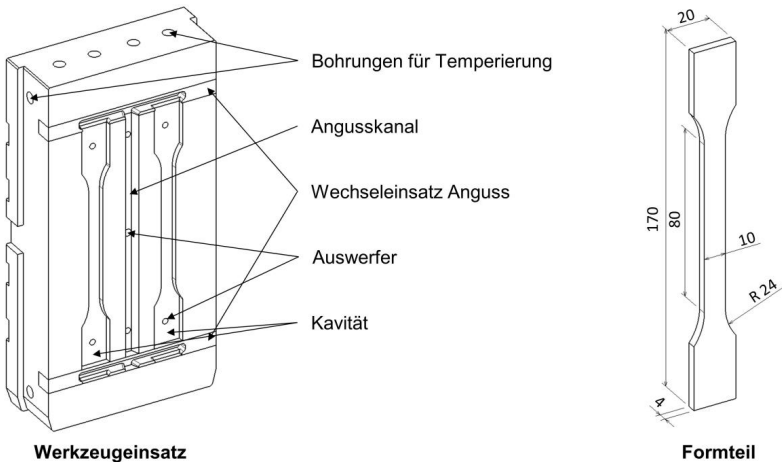


Abb. 55: Werkzeugeinsatz und Formteil für Vielweckprüfkörper

Der Wechseleinsatz für Vielweckprüfkörper Typ A1 (vgl. Abb. 55) nach DIN EN ISO 20753⁷⁹ bestand aus einem Zweifachwerkzeug mit T-Verteiler aus dem Kaltarbeitsstahl 1.2767. Der Verteiler kann zusätzlich angepasst werden, sodass Probekörper mit mittiger Bindenaht gespritzt werden können. Der Wechseleinsatz wurde verwendet um Referenzzugproben zu erzeugen, welche mit den Zugprüfkörpern der angepassten Geometrie, welche im Nachfolgenden beschrieben werden, verglichen werden konnten. Zusätzlich wurden die in Kap. 5.1 verwendeten Haftprüfkörper mit diesem Werkzeugeinsatz gefertigt.

Für die Spritzgießversuche wurde für dieses Werkzeug eine Volumengeschwindigkeit von $21,2 \text{ cm}^3/\text{s}$ festgelegt, wodurch die Schmelzegeschwindigkeit bei 265 mm/s im kritischen Bereich (Prüfbereich) liegt und somit dem vorgegebenen Wert der DIN EN ISO 294⁸⁰ von $200 \text{ mm/s} \pm 100 \text{ mm/s}$ entspricht.

⁷⁹ Vgl. [74]; Entspricht dem Probekörper 1A nach DIN EN ISO 527 [60]

⁸⁰ Vgl. [75]

4.1.2 Wechseleinsatz langer Hybridprüfkörper

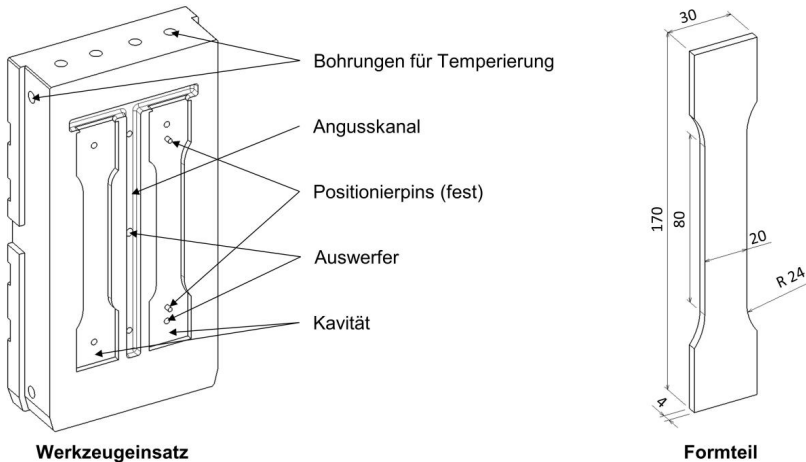


Abb. 56: Werkzeugeinsatz und Formteil für langen Hybridprüfkörper

Für die HPK aus 3D-gedruckten Insert und Spritzgussmaterial wurde der Vielzweckprobekörper verbreitert (vgl. Abb. 56). Der zu messende parallele Teil betrug somit 20 mm in der Breite, wodurch dieser Platz bot, um ein Insert einzubringen. Zusätzlich wurden in den breiten Spannflächen Pins eingebracht, die die Positionierung der Inserts ermöglichen. Bezüglich der weiteren Abmaße wurden keine relevanten Veränderungen durchgeführt.

Die Volumengeschwindigkeit wurde, gleich wie beim Vielzweckprüfkörper, auf $21,2 \text{ cm}^3/\text{s}$ festgelegt, wodurch bei einer Formfüllung eine Geschwindigkeit an der kritischen Querschnittsfläche von $132,5 \text{ mm/s}$ anliegt. Werden zusätzlich Inserts eingesetzt reduziert sich die Fläche jeweils um die vom Insert eingenommene Querschnittsfläche, wodurch die Geschwindigkeit variiert. Die Einspritzgeschwindigkeiten befinden sich dennoch in den der Norm vorgeschriebenen Bereich. Eine starke Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften aufgrund der Einspritzgeschwindigkeit wurde in diesem geringen Variationsbereich nicht festgestellt, wie die Untersuchung der Grundmaterialien zeigte (vgl. Kap. 3.4.1 und 3.5.1).

Erste Spritzgießversuche mit dem Werkzeugeinsatz des langen HPKs und PMMA zeigten, dass es zu einer inhomogenen Füllung des Werkzeugs kommt. Die aus dem T-Verteiler kommende Schmelze breitet sich radial um den Angusspunkt aus (vergleichbar mit Abb. 60). Hierdurch erfolgt eine einseitig vorseilende Fließfront der Schmelze, welche innerhalb des gesamten Zugprüfkörper bestehen bleibt. Die leicht innenseitig vorseilende Fließfront hat einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die mechanischen Kennwerte der Zugprüfkörper, wie Zugprüfungen im Vergleich zu Vielzweckprüfkörper Typ A1 gezeigt haben (vgl. Kap. 3.4.1 und 3.5.1).

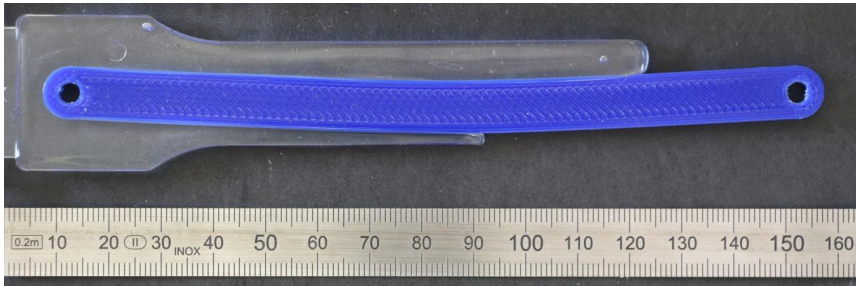


Abb. 57: Durchbiegung PLA Insert bei Spritzgießversuchen mit langen HPK-Werkzeug

Kritischer hingegen ist der Einfluss der innenseitig, voreilenden Schmelze auf die Inserts. Bei Versuchen mit Inserts aus PLA und einer Querschnittsfläche von $4 \times 10 \text{ mm}^2$ hat sich gezeigt, dass diese sich zur außenseitigen Wand durchbiegen (vgl. Abb. 57). Aufgrund der am Insert anliegenden Druckdifferenz und der relativ geringen Biegesteifigkeit der Insertmaterialien wird eine Durchbiegung des eingesetzten Inserts bewirkt. Diese kann so stark ausgeprägt sein, dass sich das Insert an die Wand anlegt und den Fließkanal einseitig vollständig verschließt.

Weitere Versuche haben gezeigt, dass PA6GF Inserts trotz höherer Biegesteifigkeit, ebenfalls zu starken Durchbiegungen neigen. Teilweise wiesen die PA6GF Inserts an hoch belasteten Stellen Brüche auf.

Eine weitere Interpretation der Durchbiegung bestand auf Basis thermischer Ausdehnungseffekte. Infolge der bei Raumtemperatur eingelegten Inserts und der erhöhten Temperatur des Werkzeuges und der Schmelze könnte eine thermische Ausdehnung, verbunden mit den beiden festen Einspannpunkten, zu einer Durchbiegung führen. Dies konnte jedoch aufgrund des ermittelten Schrumpfungseffektes (vgl. Kap.3.2.2) der gedruckten PLA Inserts ausgeschlossen werden.

Die Verhinderung der Durchbiegung durch Klemmung der Inserts zwischen den Werkzeughälften konnte bei PLA Inserts erfolgreich getestet werden. Hierbei wurden die Inserts mit einem leichten Aufmaß gefertigt, wodurch diese beim Schließen des Werkzeugs durch die Haltekraft geklemmt wurden. Diese Vorgehensweise wurde jedoch verworfen.

4.1.3 Wechseleinsatz kurzer Hybridprüfkörper

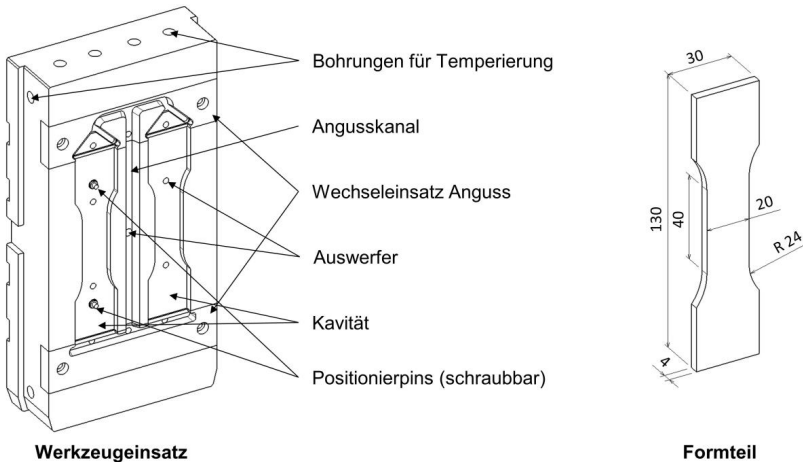


Abb. 58: Werkzeugeinsatz und Formteil für kurzen Hybridprüfkörper

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Studie wurde ein kurzer HPK entwickelt (vgl. Abb. 58). Dieser hat im Vergleich zum vorangegangenen einen verkürzten Prüfbereich von 40 mm, wodurch die Lagerlänge der Inserts von 140 mm auf 95 mm reduziert werden konnte. Hierdurch wird die Durchbiegung der Inserts verringert. Die eingebrachten Positionierpins sind bei diesem Werkzeugkonzept schraubbar ausgeführt. Daher besteht die Möglichkeit deren Geometrie anzupassen.

Zusätzlich wurden im oberen und unteren Bereich der Zugprüfkörper Taschen eingebracht, wodurch das Angusskonzept bei Bedarf verändert werden konnte. Durchgeführte Simulationen mit unterschiedlichen Angussystemen, zeigten eine Verbesserung der Schmelzfront bei Anpassung des Angusskonzeptes.

Während sich die Formfüllung beim ursprünglichen Filmanguss als inhomogen erwies, berechnete die Simulation eine homogene Fließfront bei anderen Konzepten. Es wurden hierbei auch Parametervariationen wie Veränderung der Fließgeschwindigkeit, Temperaturen und Materialien simuliert, welche sich nicht signifikant auf die Ausbildung der Fließfront auswirkten. Vielversprechende Konzepte wurden als Wechseleinsatz gefertigt und auf der Spritzgießmaschine getestet, um die Simulationen zu verifizieren.

4.2 Formfüllung unterschiedlicher Angusskonzepte

Aufgrund des inhomogenen Schmelzflusses wurden verschiedene Angusskonzepte (vgl. Abb. 59), hauptsächlich mit PMMA, getestet und deren Auswirkung auf die Ausbildung deren Schmelzfront dokumentiert. Mittels Bildverarbeitung wurde die Form der Schmelzfront der einzelnen Füllstudien ausgelesen und übereinandergelegt. Zusätzlich wurden die unterschiedlichen Angusskonzepte simuliert, um einen Abgleich zu ermöglichen. Es wurde bei der Simulation festgestellt, dass weder Material (PMMA/PA6)⁸¹, Netzgröße (Elementkantenlänge 1/0,8/0,6/0,4/0,2 mm) noch Einspritzgeschwindigkeit (1/21,2/100 cm³/s) die Ausbildung der Fließfront signifikant beeinflussen. Nur geringfügig wurde bei der Netzverfeinerung eine Tendenz festgestellt, auf welche in Kap. 4.2.5 näher eingegangen wird.

Zusätzlich wurden bei einigen Versuchen mit PMMA Farbpigmente beigelegt, um eine optische Visualisierung des Schmelzflusses innerhalb der Bauteile zu erhalten. Anzumerken ist hierbei, dass aufgrund der Beimengung der Farbpigmente in das Granulat und der erst nachfolgenden Aufschmelzung innerhalb der Schnecke die Farbmischung nicht homogen verläuft. Es werden daher nur Effekte beschrieben, welche wiederholbar in mehreren Probekörpern vorkamen.

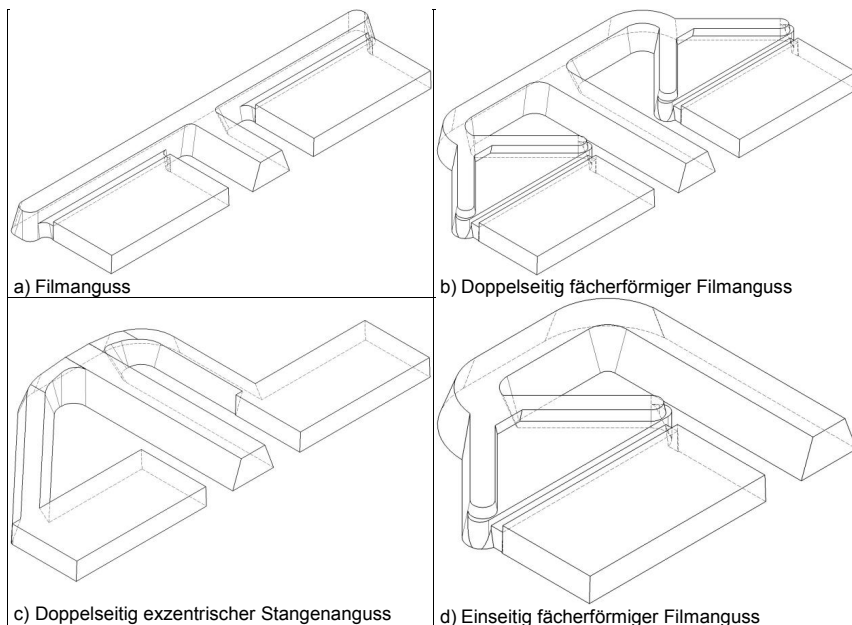


Abb. 59: Verwendete Angusskonzepte

⁸¹ Für die Simulationen wurden die Molflowdatensätze Ultramid B3K von BASF Engineering Plastics und PLEXIGLAS® Resist zk40 von Evonik Industries AG verwendet.

4.2.1 Filmanguss

Dieser Filmanguss entspricht der nach DIN EN ISO 294⁸² empfohlenen Ausführung für Normprüfkörper. Infolge der innenseitig beginnenden Befüllung der Kavität erfolgt bei der Simulation eine innenliegend voreilende Schmelzfront, welche sich im Prüfbereich der außenseitigen Fließfront angeglichen hat.

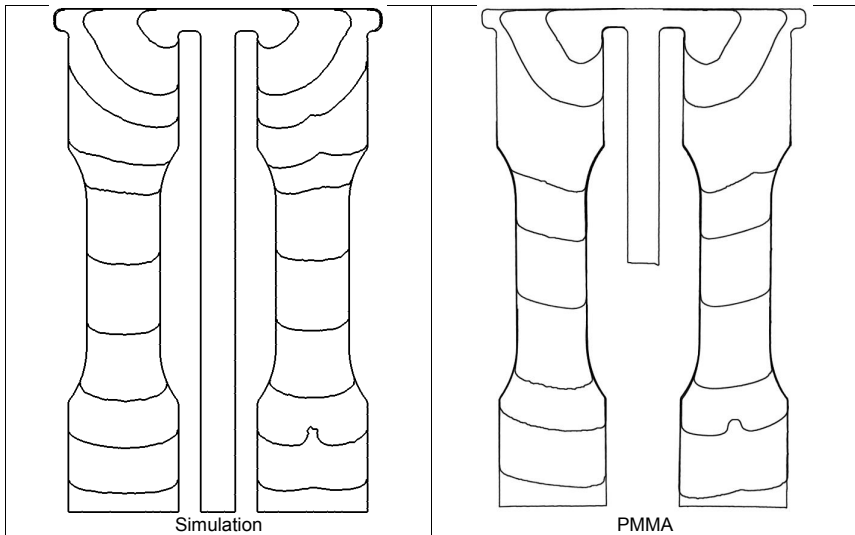


Abb. 60: Vergleich von Simulation und Füllstudie beim Filmanguss

Bei der realen Füllstudie mit PMMA gleicht sich diese jedoch nicht aus, sondern bleibt als voreilende Schmelzfront bis zum Ende der Füllung bestehen. Da diese Unregelmäßigkeit bereits zu Füllbeginn stark ausgeprägt ist, werden eingesetzte Inserts bereits zu Einspritzbeginn, infolge der Druckdifferenz, verbogen, wodurch der außenliegende Kanal verengt wird. Dies verstärkt den Effekt zusätzlich, da der Schmelzfluss im breiteren Kanal höher ist als beim Verengten. Dieses Angusskonzept ist daher für Probekörper mit Einleger ungeeignet und wird im Weiteren nicht verwendet.

4.2.2 Doppelseitig fächerförmiger Filmanguss

Dieses Konzept ist eine Ableitung des ursprünglichen Filmangusses. Durch den fächerförmigen, abgestuften Übergang zwischen Verteilerkanal und Filmanguss wird eine gleichmäßigere Befüllung im Angussbereich ermöglicht. Diese ist gemäß Simulation nahezu symmetrisch bezogen auf die Prüfkörpermittellachse. Einzig durch den Radius entsteht eine marginale Unregelmäßigkeit bei den Simulationen, da die Schmelze im inneren Radius einen geringfügig kürzeren Weg hat als die Schmelze am äußeren Radius.

Die Füllstudie mit PMMA zeigt, gegensätzlich zur Simulation, eine leicht an der Innenseite vorlaufende Schmelzfront, wodurch wiederum eine Druckdifferenz an den Inserts zu erwarten ist. Gegenüber dem Filmanguss ist die Inhomogenität beim fächerförmigen Filmanguss am Anschnitt geringer ausgeprägt. Versuche mit Inserts haben gezeigt, dass die hierbei entstehende Durchbiegung nur geringfügig ausfällt.

⁸² Vgl. [75]

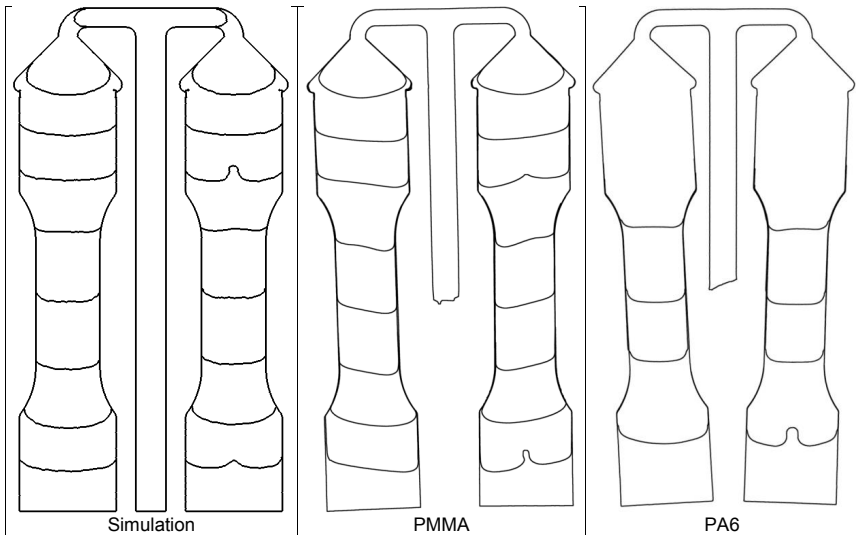


Abb. 61: Vergleich von Simulation und Füllstudie beim doppelseitig fächerförmigen Filmanguss

Zusätzliche Füllstudien mit PA6 zeigten, dass die Ausbildung der Fließfront, im Gegensatz zu den Simulationen, stark von den eingesetzten Materialien abhängt. Während bei PMMA eine deutliche Inhomogenität ersichtlich ist, egalisiert sich diese bei PA6 im Prüfbereich beinahe vollständig und ist im Allgemeinen nur geringfügig ausgeprägt.



Abb. 62: Füllverhalten von PMMA und PA6 beim doppelseitig fächerförmigen Filmanguss. Oben: Füllung PMMA mit Pigmenten; Unten: Bindenähte von PA6 (links) und PMMA (rechts) aufgrund Positionierpins

Dies zeigt sich auch bei Betrachtung der Bindenähte, welche infolge des Zusammenflusses der Schmelze nach umfließen der Inserts bzw. der Pins entstehen. Während diese bei PMMA außermittig verläuft ist diese bei PA6 relativ mittig(vgl. Abb. 62). Zusätzlich zieht sich die Bindenaht des angussnahen Pins bei PMMA bis zum Probekörperende durch, wodurch eine doppelte Bindenaht am zweiten Pin entsteht. Diese ist darin begründet, dass die innenliegende Schmelze leicht vorausseilt und somit die Bindenaht des ersten Pins aus der Mitte verdrängt, wodurch nur die innenliegende Schmelze den zweiten Pin umfließt. Über die beigemengten Farbpigmente wird dieser Effekt deutlich visualisiert. Es ist ebenfalls die Inhomogenität innerhalb des Schmelzflusses ersichtlich.

Weitere Versuche mit PMMA und variierenden Einspritzgeschwindigkeiten zeigten, dass im Gegensatz zur Simulation, der inhomogene Schmelzfluss von der Volumengeschwindigkeit abhängig ist. Während bei der Erhöhung der Volumengeschwindigkeit bis auf $70,7 \text{ cm}^3/\text{s}$ die Ausprägung der Fließfront unverändert blieb, konnte durch eine Reduktion eine homogenere Fließfront erreicht werden. Bei Volumengeschwindigkeiten von $3,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ war die Fließfront homogen, wobei diese Volumengeschwindigkeiten deutlich zu gering für einen funktionierenden Spritzgießprozess sind, da die Schmelze bereits während des Füllens stark erkaltet.

Bei Veränderungen von Masse- als auch Werkzeugwandtemperatur konnte wiederum keine signifikante Veränderung der Fließfront festgestellt werden. Die hierbei getesteten Temperaturen lagen bei der Masstemperatur für PMMA zwischen 240 °C und 270 °C und der Werkzeugtemperatur zwischen 20 °C und 80 °C .

Das Angusskonzept wurde trotz des inhomogenen Schmelzflusses für die Herstellung der Hybridbauteile verwendet, da die Durchbiegungen an getesteten Inserts nur minimal bis teilweise nicht vorhanden waren. Zusätzlich bietet das Konzept die Möglichkeit den Spritzgussprozess durch Vergleich der Probekörper der zweiten Kavität (HPKR) zu überwachen.

4.2.3 Einseitig fächerförmiger Filmanguss

Aufgrund der bestehenden Inhomogenität beim doppelseitig, fächerförmigen Anguss wurde bei diesem Angusskonzept die Befüllung einer einzigen Kavität betrachtet. Um die Fließgeschwindigkeit innerhalb des Werkzeugs vergleichbar zu machen, wurde die Einspritzgeschwindigkeit halbiert. Anzumerken ist hierbei, dass durch die Reduzierung die Fließgeschwindigkeit im Verteiler geringer ist, als bei den anderen Konzepten. Es wurde zudem nur PMMA getestet, da die Fließeffekte, welche zu Inhomogenität führen, bei PA6 nur geringfügig ausgeprägt sind.

Im Gegensatz zum doppelseitigen Angusskonzept kann der Verlauf der Fließfront als nahezu homogen angesehen werden (vgl. Abb. 63). Einzig der unterschiedlich lange Fließweg, infolge des Bogens im Verteiler, führt zu Beginn zu einer leicht inhomogenen Fließfront, welche bei der Simulation ebenfalls ersichtlich ist.

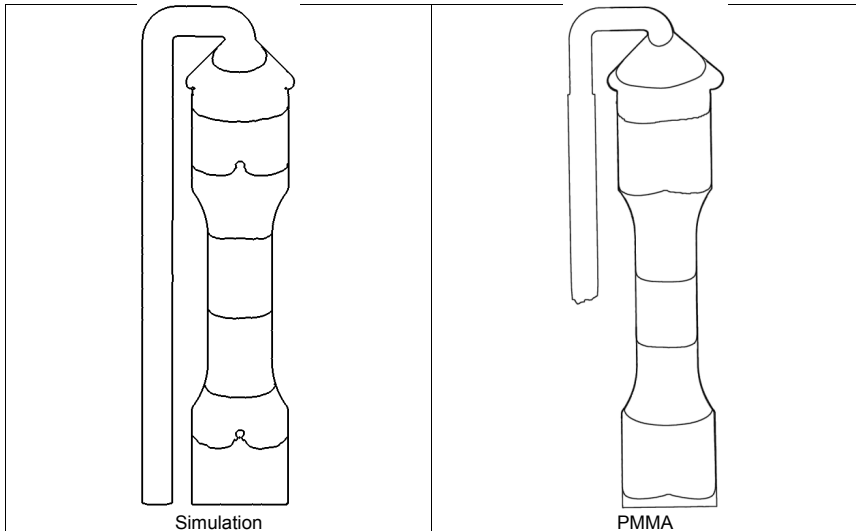


Abb. 63: Vergleich von Simulation und Füllstudie beim einseitig fächerförmigen Filmanguss

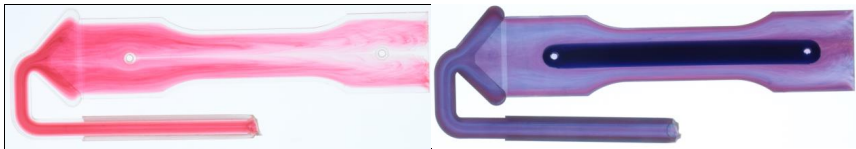


Abb. 64: Füllverhalten von PMMA mit Pigmenten beim einseitig fächerförmigen Filmanguss

Den homogenen Fließverlauf zeigt ebenfalls die mittig verlaufende Bindenaht beim Umspritzen von Inserts bzw. der Pins am Ende des Prüfkörpers. Die zusätzlich beigemengten Farbpigmente weisen ebenfalls auf einen gleichmäßig verlaufenden Füllvorgang hin. Demzufolge liegt eine der Hauptursachen für die inhomogenen Strömungsverhältnisse beim Verteiler.

Zusätzlich zeigen umspritzte Inserts, dass der Fließverlauf von diesen beeinflusst werden kann. Infolge leichter Unterschiede der umspritzten Flächen und der Genauigkeit der Positionierbohrungen kann die Position der Bindenaht leicht verschoben werden (vgl. Abb. 64). Diese Effekte sind aufgrund des Herstellungsprozesses der Inserts nicht zu vermeiden.

4.2.4 Doppelseitiger Stangenanguss

Dieser Anguss dient zum Testen des Verhaltens der Schmelze bei exzentrischer Anspritzung. Hierfür wurde jeweils ein Stangenanguss an der innenliegenden und außenliegenden Seite des Zugprüfstabes positioniert.

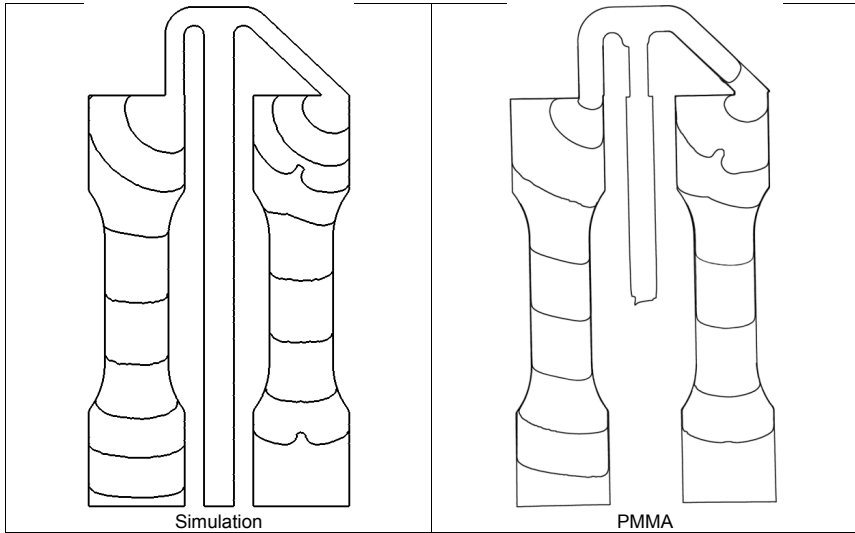


Abb. 65: Vergleich von Simulation und Füllstudie beim doppelseitigen Stangenanguss

Bei der innenliegenden Positionierung des Angusses hat sich der Effekt der innenliegend vorausschmelzenden Schmelzfront verstärkt. Bis zum Erreichen des Prüfbereichs existiert eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und realem Bauteil. Im Prüfbereich des Zugprüfstabes hingegen bleibt bei der realen Füllstudie die vorausschmelzende Schmelzfront erhalten, während bei der Simulation diese ausgeglichen wird. Beim außenliegenden Kanal erscheint die Schmelzfront hingegen relativ homogen nachdem der parallele Teil des gespritzten Zugprüfstabes erreicht wird.

Die Visualisierung mittels Farbpigmenten zeigt (vgl. Abb. 66), dass die Schmelzen sich nicht homogen verhalten, sondern dass, gleich den vorangegangenen Angusskonzepten, die innenseitige Schmelze vorausfließt. Verglichen mit den Fließlinien der Simulation zeigen sich wiederum die Unterschiede. Bei der Simulation entsteht die homogene Fließfront aufgrund relativ zeitlich ankommender Fließlinien, wohingegen bei der realen Füllstudie andere Effekte für die Ausprägung der Fließfront sorgen.

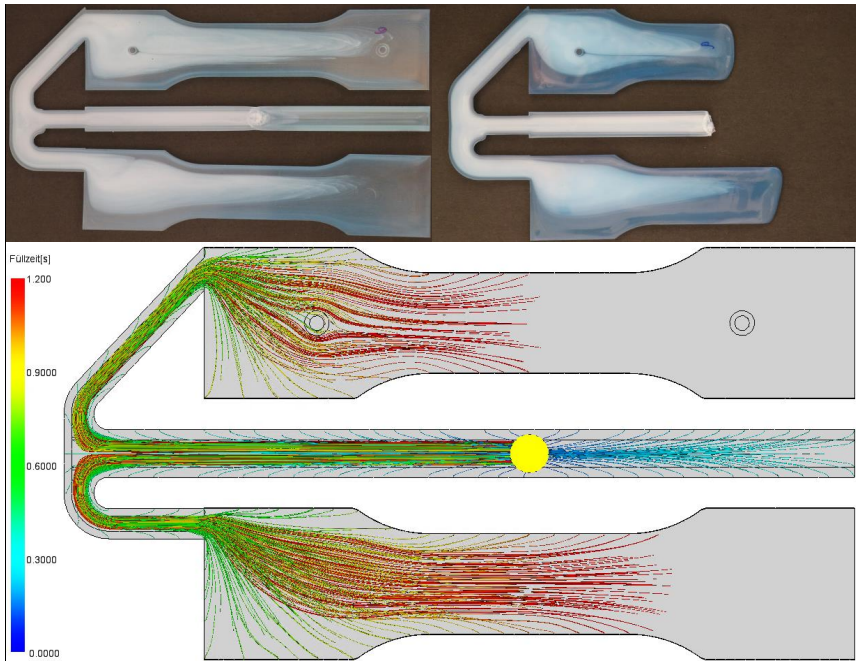


Abb. 66: Füllverhalten beim doppelseitigen Stangenanguss. Oben: PMMA mit Pigmenten; Unten: simulierte Fließlinien

4.2.5 Diskussion Fließverhalten und Simulation

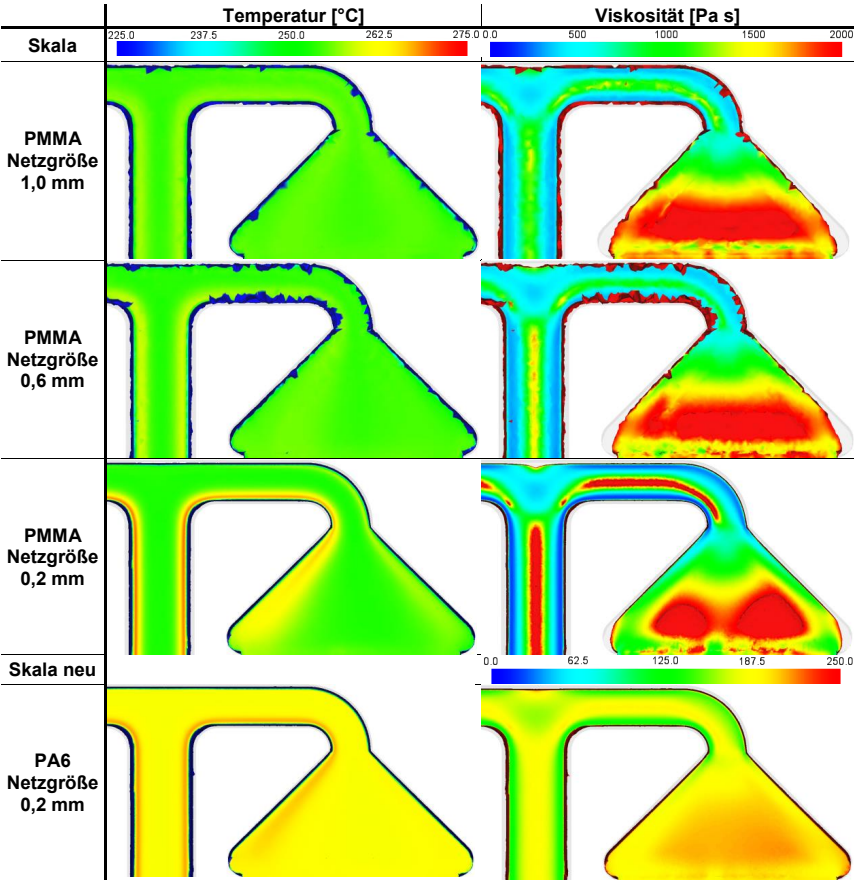
Das Fließverhalten der Schmelze lässt sich auf die Strukturviskosität der Thermoplaste zurückführen. Durch Scherung wird zum einen die Viskosität der Schmelze herabgesetzt und zum anderen Energie eingebracht, wodurch eine Temperaturerhöhung und wiederum eine Abnahme der Viskosität resultiert. D.h. die Viskosität der Schmelze ist in einem durchströmten Querschnitt lokal different. Am stärksten betroffen ist die Schicht zwischen der erstarrten Randschicht und dem Kern der Strömung an welcher die Viskosität die niedrigsten Werte erreichen dürfte (vgl. Abb. 6). Solange sich die Schmelze nur in einem Kanal befindet sind die Auswirkung der lokal indifferenten Viskosität geringfügig, da diese, sofern der Kanal symmetrisch vorliegt, ebenfalls symmetrisch ist. Bei einer Spaltung des Schmelzestroms aufgrund eines Verteilers hingegen wirkt sich die unterschiedliche Viskosität deutlich stärker aus, da nun keine symmetrische Viskositätsverteilung mehr vorliegt. Der Bereich mit der geringeren Viskosität bietet der nachdrückenden Schmelze geringeren Widerstand, wodurch diese Bereiche stärker durchströmt wird. Dies kann den Effekt verstärken, da hierdurch Scherung, Temperatur und somit die Viskosität wiederum beeinflusst wird.

Somit ist der Verlauf der Schmelze der verschiedenen Angussysteme erklärbar und verdeutlicht den Unterschied im Verlauf bei PMMA im Gegensatz zum PA6. Während PMMA eine starke Abhängigkeit der Viskosität von der Scherung aufweist ist der Effekt bei PA6 nur geringfügiger ausgeprägt, wodurch bei PA6 weniger Viskositätsabweichungen entstehen wie bei PMMA. Ebenfalls wird die Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit verdeutlicht, da die Scherrate und somit der verdünnende Effekt stark von dieser abhängen.

J. Beaumont⁸³ beschreibt in seinem Werk „Auslegung von Anguss und Angusskanal“ diesen Effekt und liefert Konzepte wie MeltFlipper und iMARC, welche die scherbelasteten Schichten innerhalb des Angusskanals umwälzen um die Inhomogenität zu minimieren. Hierzu wird meist eine geometrische Rotation der Schmelze über zwei Kanäle und zwei Ebenen verwendet.

Simulationstechnisch ist dieses Verhalten nur schwer dazustellen, da es ein sehr feines Netz benötigt, um scherbelastete Schichten gut zu berechnen. Bei nicht ausreichender Netzverfeinerung werden scherbelastete Schichten mit anderen Schichten verrechnet, wodurch das Ergebnis verfälscht wird. Somit können Temperaturen der scherbelasteten Schichten gemäß Simulation bei einer feinen Auflösung im zweistelligen Prozentbereich höher sein als bei einer relativ groben Auflösung (vgl. Tab. 15).

Tab. 15: Vergleich unterschiedlicher Netzgrößen und Materialien bei Simulation des Fließverhaltens



⁸³ Vgl. [76]

Negativ hierbei ist die Simulationszeit, welche bei jeder Netzverkleinerung extrem steigt, wodurch die feinen Netze sehr aufwendig sind. Zudem wird die Ausbildung der Fließfront nur minimalst durch die Netzanpassung beeinflusst. Erst bei einer Netzgröße von 0,4 mm konnte eine minimale Ausprägung der innenliegend voreilenden Fließfront erreicht werden (vgl. Abb. 67). Diese ist jedoch nur im Ansatz ersichtlich und entspricht nicht der Größenordnung realer Versuche.

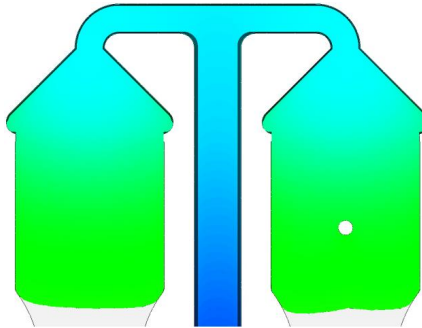


Abb. 67: Innenseitig voreilende Schmelzfront bei PMMA (Füllzeit 1,058 s, Netzgröße 0,4 mm)

Anzumerken ist hierbei, dass die Detektion nur aufgrund einer gewissen Erwartungshaltung gegenüber der Simulation möglich war. Simulationen, bei welchen die Erwartungshaltung nicht vorhanden ist, bzw. bei komplexeren Geometrien, kann eine solche Ausprägung leicht übersehen bzw. als Rechengenauigkeit bewertet werden.

Die Viskosität bietet bei Beurteilung des Schmelzefflusses bessere Möglichkeiten. Es ist hierbei ersichtlicher in welchen Bereich die Schmelze, durch geringere Viskosität, besser fließen kann. Dies zeigt auch der Vergleich von PMMA mit PA6. Während die Verteilung der Viskosität im Angussbereich bei PMMA stark different ist und somit ein ungleicher Schmelzeffluss entsteht, sind die Viskositätsunterschiede bei PA6 deutlich geringer.

4.3 Umspritzen unterschiedlicher Geometrien

Vor den eigentlichen Festigkeitsuntersuchungen wurden verschiedene Geometrien auf die prinzipielle Eignung als Prüfkörper getestet, da aufgrund der hohen Temperaturen beim Spritzgießen und den relativ geringen Biegesteifigkeiten der Insertmaterialien Komplikationen entstehen können. Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, genügt hierfür bereits eine geringe Inhomogenität in der Schmelze, um die Position der Inserts zu beeinflussen.

Die Untersuchungen wurden vorrangig mit PMMA als Spritzgießmaterial und PLA als FDM Material durchgeführt.

4.3.1 Umspritzung rechteckiger Inserts

Beim angestrebten Verfahren soll bevorzugt das komplette Insert vom Spritzgießmaterial umhüllt werden, da hierdurch bessere Oberflächeneigenschaften des HPKs zu erwarten sind. Daher wird untersucht, ob Inserts mit kleineren, rechteckigen Querschnitten, wie die der verwendeten Spritzgießform, komplett umspritzt werden können. Diese werden hierfür mit Abstandhaltern an den Positionierpins mittig in der Form gelagert. Hauptsächlich wurden hierfür Inserts mit einem Querschnitt von 3x10 mm² und 2x10 mm² verwendet.

Versuche mit solchen Inserts zeigten, dass diese Möglichkeit prinzipiell nicht für reproduzierbare Probekörperherstellung geeignet ist. Aufgrund geringfügiger Unterschiede, z. B. in der Druckverteilung der Schmelze oder im Aufbau der gedruckten Inserts, wurden diese im mittleren Teil immer an eine der

Werkzeugwände gepresst. Versuche mit PA6 als Spritzgießmaterial brachten gegenüber PMMA keine signifikante Verbesserung. In Abb. 68 ist ein Insert mit $3 \times 10 \text{ mm}^2$ zu erkennen, welches mit PA6 umspritzt wurde. Im mittleren Bereich ist deutlich zu erkennen, dass dieses sich seitlich an die Form angelegt hat. Die weißen Bereiche deuten hierbei auf eine Ablösung von Insert zum Spritzgießmaterial hin.

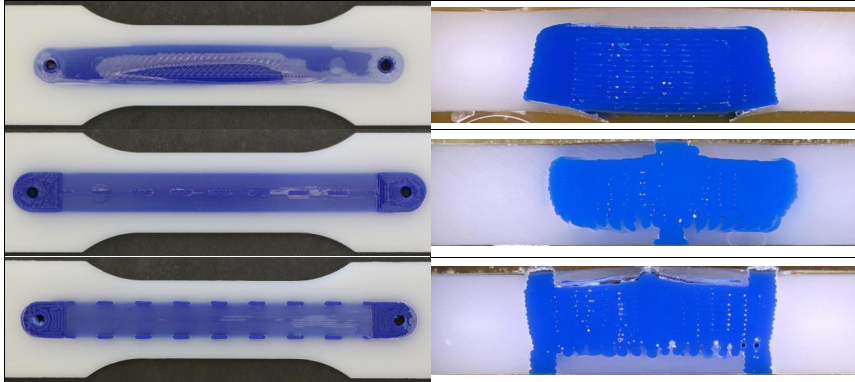


Abb. 68: Draufsicht (links) und Schnittbild (rechts) unterschiedlicher, umspritzter Inserts mit rechteckiger Geometrie; oben: $3 \times 10 \text{ mm}^3$ PLA Insert; Mitte: $3 \times 10 \text{ mm}^3$ PLA Insert mit mittleren unterbrochenen Stegen; unten: $3 \times 10 \text{ mm}^3$ PLA Insert mit am Rand unterbrochenen Stegen

Das Anlegeverhalten der Inserts konnte insofern beeinflusst werden, dass bereits im Vorab das im Werkzeug eingelegte Insert an einer Seite des Werkzeugs ausgerichtet und somit die anzulegende Seite vorgegeben werden konnte. Jedoch war eine allseitige Umspritzung somit nicht möglich.

Nachteilig bei einem einseitig anliegenden Insert ist das Verzugsverhalten des HPKs. Aufgrund des asymmetrisch aufgebauten Querschnitts und dem Schrumpfungsverhalten beim Abkühlen der Schmelze führt dies zu einem ungewollten Verzug des HPKs. Dies wird in Kap. 4.3.6 näher betrachtet.

Um dennoch eine nahezu komplette Umspritzung des Inserts zu erhalten, können Distanzelemente mitgedruckt werden. Diese sind wie in Abb. 68 zu sehen mittig vom Insert und an der Seite eingefügt worden. Durch diese kann zwar eine nahezu vollständige Umspritzung erreicht werden, jedoch sind die Distanzelemente ebenfalls an der Bauteiloberfläche vorhanden und können u. U. Bindenähte erzeugen. Zusätzlich müssen beim Druck der Inserts Supportstrukturen verwendet werden, wodurch die Oberfläche der Inserts zusätzlich verschlechtert wird.

4.3.2 Umspritzung rautenförmiger Inserts

Rautenförmige Inserts bieten prinzipiell die Möglichkeit mit relativ wenig Wandkontakt (Linienkontakt) einen HPK zu fertigen. Gegenüber den zuvor beschriebenen Inserts besteht bei den rautenförmigen die Möglichkeit durch sinnvolles Ausrichten im Bauraum ohne Stützstruktur zu drucken.

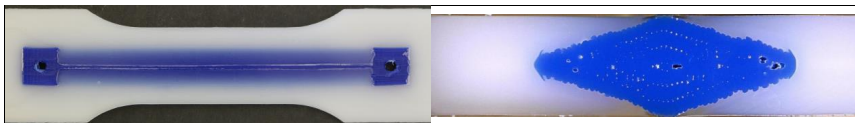


Abb. 69: Draufsicht und Schnittbild eines umspritzten Inserts mit rautenförmiger Geometrie

Spritzgießversuche mit verschiedenen rautenförmigen Inserts haben gezeigt, dass diese bis auf den Linienkontakt reproduzierbar umspritzt lassen (vgl. Abb. 69). Hierbei kann es jedoch zu leichten Torsionen in der Mitte der Probekörper kommen, welche durch kleine Druckabweichung bzw. Maßungenaugkeiten der Inserts entstehen. Die Reproduzierbarkeit ist somit stark eingeschränkt, wodurch diese Geometrie nicht weiterverfolgt wurde.

4.3.3 Effekte beim Umspritzen

Bei sehr dünnwandigen Strukturen bzw. Strukturen mit harter Strömungsumlenkung wie z. B. Ecken kann es bei PLA Inserts zur Aufschmelzung an diesen kritischen Bereichen kommen. Dies kann zum einen ein unkritischer Nebeneffekt sein, welcher dazu führt, dass das Insert sich in diesem Bereich minimalst verformt. Zum anderen hat sich gezeigt, dass ebenfalls Bereiche soweit aufgeschmolzen wurden, dass diese sich vom Insert ablösen. Das geschmolzene Insertmaterial war dann im erstarrten Spritzgießmaterial vorhanden (vgl. Abb. 70). Dies ist kritischer zu bewerten und sollte vermieden werden, da diese Einschlüsse die Festigkeit des Spritzgießmaterials vermindern können.

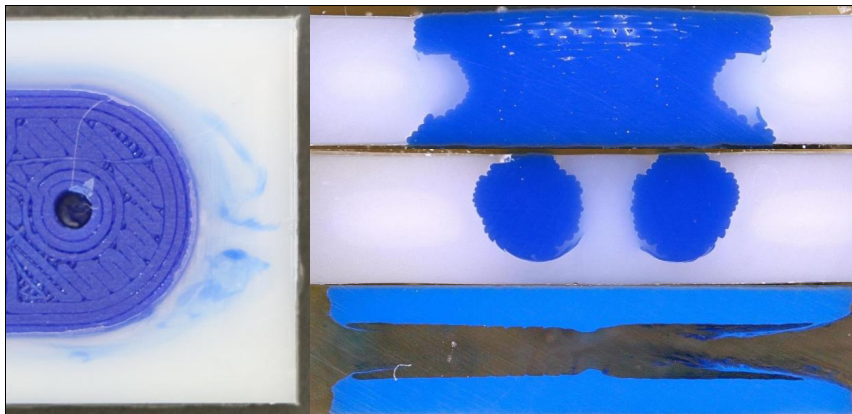


Abb. 70: *Anschmelzung beim Umspritzen und weitere Geometrien; rechts oben: Insert mit Nut; rechts Mitte: Insert mit zwei Zylindern; rechts unten: Anschmelzung PLA in PMMA bei doppelseitiger Platte; links: Anschmelzung von PLA in PA6 nach einer scharfen Kante*

Es wurden zudem noch weitere geometrische Strukturen wie Kanäle, oberflächenvergrößernde Maßnahmen etc. getestet. Diese bieten zwar prinzipiell die Möglichkeit die Haftung zwischen Insert und Spritzgießmaterial zu verbessern, benötigen jedoch meist Stützmaterial. Hierdurch ist die Reproduzierbarkeit solcher Inserts meist vermindert. Ebenfalls ist das Entfernen solcher Stützen an filigranen Stellen häufig nicht ohne Schaden am Insert durchzuführen oder es verbleiben Rückstände des Stützmaterials am Inserts. Daher wurde für weitere Untersuchungen an HPKN auf komplexere Seitenstrukturen verzichtet.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass das verwendete PA6 zum Umspritzen von FDM gedruckten Inserts besser geeignet ist. Dies liegt hauptsächlich an der geringeren Viskosität und der geringeren Scherratenabhängigkeit, welche geringere Spritzgießdrücke und eine gleichmäßigere Verteilung der Schmelze ermöglichen. Dünne Strukturen können somit besser gefüllt werden.

4.3.4 Simulation der Durchbiegung von Inserts

Es wurde, trotz des ungenügend simulierbaren Schmelzefflusses, versucht die Durchbiegung der Inserts simulationstechnisch zu reproduzieren. Dies konnte auch mit einer guten Übereinstimmung zur Realität bei der Angussart „Filmanguss“ simuliert werden, da bei dieser die Ausprägung des Schmelzefflusses hauptsächlich durch den ungleichmäßigen Aufbau am Anschnitt erfolgt. Jedoch zeigte sich bei der Simulation, dass ein rechentechnischer Fehler⁸⁴ zu einer unzulässigen Durchbiegung des Inserts führte. Dieses bog sich geringfügig in eine Richtung, in welche keine Kräfte/Druck wirkte. Es wurde somit verworfen, die Versuche durch Simulationen abzugleichen.

4.3.5 Auswurfsproblematik

Die Kombination aus PMMA als Spritzgieß- und PA6GF als Insertmaterial erwies sich bei der Entformung aus dem Spritzgießwerkzeug als problematisch. Die umspritzten Probekörper klemmten stark in der Kavität und mussten teilweise durch Aufbringung hoher Kräfte an den Auswerferstiften entfernt werden. Dies führte teilweise zu Schädigungen, welche sich durch leichte Eindrücke, hervorgerufen durch die Auswerferstifte, bis hin zum Durchstoßen des Probekörpers äußerten. Die Klemmung ist hierbei von der Insertgröße und Geometrie abhängig. Je größer das Insert ist, desto höher die Klemmung im Werkzeug. Hauptursache für die starke Klemmung ist vermutlich die Schrumpfung des PMMA kombiniert mit einer Ablösung vom Insert.

4.3.6 Verzugsverhalten

Aufgrund unsymmetrisch gestalteter Inserts kann es zu Verzug des HPKs kommen, welcher je nach Materialkombination unterschiedlich ausfällt. Grundsätzlich hat PA6 eine höhere Verarbeitungsschwindung wie PMMA, da PA6 teilkristallin ist und PMMA amorph⁸⁵.

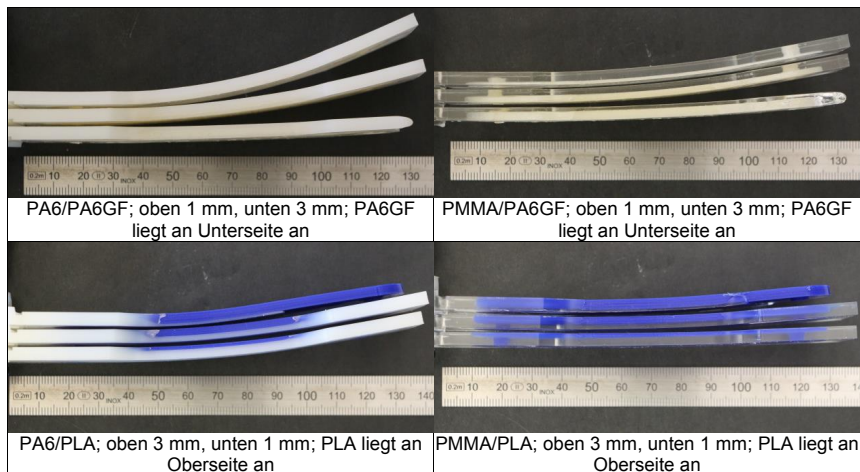


Abb. 71: Verzugsverhalten einseitig eingelegter Inserts in Abhängigkeit der Insertdicke; Staffelung 1 mm, 2 mm, 3 mm

⁸⁴ Fehler wurde gemeldet und seitens Moldflow bestätigt. Version: Moldflow Insight 2019 40.0.26.0

⁸⁵ Literaturwerte zur Schrumpfung von PMMA und PA6 weichen stark voneinander ab. Da keine eigenen Werte zu den Spritzgießeinstellungen ermittelt wurden, wird auf die quantitative Angabe verzichtet.

Der HPK kann sich, je nach eingesetzter Materialkombination, unterschiedlich verhalten. PA6GF weist bezüglich der Maße nur eine geringe Veränderung bei unterschiedlichen Temperaturen auf, wodurch HPK mit einseitig eingelegten PA6GF Insert sich in Richtung des Spritzgießmaterials durchbiegen. HPK mit PLA Inserts biegen sich hingegen in Richtung Insert durch, da aufgrund der thermischen Schrumpfung des PLA (vgl. Kap. 3.2.2), sich das Insert stärker zusammenzieht als das Spritzgießmaterial.

Hierbei können verschiedene Einflussfaktoren das Ergebnis des Verzugs beeinflussen. So gestaltet sich die Ausprägung des Verzugs aufgrund des Querschnittverhältnisses zwischen Spritzgießmaterial und Insert jeweils anders. Ebenfalls können Werkzeugwandtemperatur, Massetemperatur und Prozesszeiten den Verzug beeinflussen.

Um starken Verzug bei HPK zu vermeiden, empfiehlt es sich diese symmetrisch zu gestalten, sodass ein Kräftegleichgewicht bei Schrumpfung entsteht. Es können jedoch innere Spannungen im Bauteil entstehen.

4.3.7 Innere Spannungen

Durch die Inserts wird die Schrumpfung der Schmelze verhindert. Je nach Größe und Ausführung der Inserts und der Schrumpfung des Materials können innere Spannungen entstehen, welche im schlechtesten Fall die Festigkeit des HPKs verringern. Diese können sich u. a. durch starkes Risswachstum bzw. sprödes Verhalten bei PA6 äußern. Bei PMMA können diese über polarisiertes Licht oder den Alkoholtest sichtbar gemacht werden⁸⁶.

In Abb. 72 sind mit PMMA umspritzte 4x8 mm² Inserts abgebildet, welche dem Alkoholtest unterzogen wurden. Deutlich zu sehen ist, dass das PMMA bei PA6GF Risse nach dem Alkoholtest aufweist und das PMMA bei PLA nicht. Es ist anzunehmen, dass HPK mit Inserts aus PLA durch das Schrumpfungsverhalten des Inserts zu geringeren Eigenspannungen neigen als HPK mit PA6GF als Insertmaterial.

Eine Verringerung der Eigenspannungen könnte beispielsweise durch Tempern von PMMA und PA6 oder durch Konditionieren von PA6 erzielt werden. Tempern hat hierbei jedoch den Nachteil, dass das PLA durch die eingebrachte Temperatur weiter schrumpfen und dies zur Trennung zwischen Insert und Spritzgießmaterial führen könnte. Zusätzlich liegen gängige Tempertemperaturen von PA6 nahe der Schmelztemperatur von PLA, wodurch das Tempern nur eingeschränkt anwendbar wäre. Die Konditionierung für PA6 Probekörper könnte durchaus angewandt werden, benötigt jedoch einen hohen Zeitaufwand, um einen definierten Konditionierzustand zu erreichen (vgl. Kap. 3.7.3). Es wird daher auf beide Möglichkeiten zur inneren Spannungsreduzierung verzichtet.

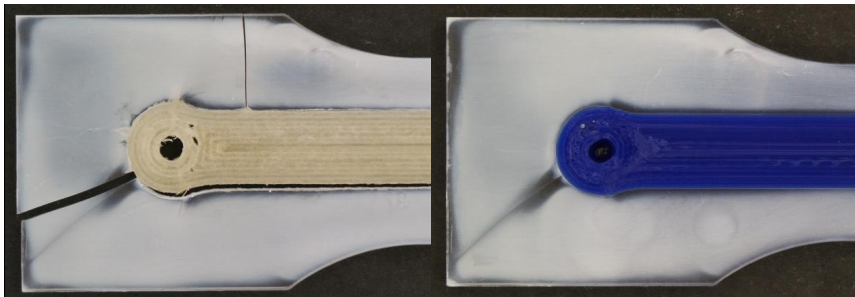


Abb. 72: Alkoholtest bei PMMA mit PA6GF (links) und PLA (rechts) als Insertmaterial

⁸⁶ Vgl. [77] S. 806

5 Untersuchung an Hybridbauteilen

Es werden zwei verschiedene Eigenschaften der Hybridbauteile untersucht. Zum einen wird getestet wie gut sich die gedruckten Inserts mit den Spritzgießmaterialien verbinden. Hierbei werden geometrische Modifikationen der Inserts vorgenommen um deren Einfluss zu bestimmen. Als weiteres wird die Festigkeit von HPK in Abhängigkeit der Materialkombination und der geometrischen Auslegung getestet, um aufzuzeigen inwiefern eine Verbesserung durch Inserts möglich ist.

5.1 Haftungsuntersuchung

Bei der Haftungsuntersuchung werden Inserts mit unterschiedlichen Geometrien angespritzt, um deren Haftung mit dem jeweils verwendeten Spritzgießmaterial zu untersuchen. Für die Probenherstellung wird der Wechseleinsatz für den Vielzweckprobekörper verwendet. Die jeweiligen Inserts werden so gefertigt und positioniert, dass diese den Querschnitt des parallelen Teils eines Zugprüfstabes ausfüllen (Querschnitt $4 \times 10 \text{ mm}^2$). Beim Spritzgießprozess wurden die Inserts im kalten Zustand in das Werkzeug eingelegt und direkt angespritzt. Die Inserts wurden mit der $-45^\circ/45^\circ$ Orientierung gedruckt, da nur die Kontaktstellen zwischen Inserts und Spritzgießprobekörper getestet werden soll. Diese sind in Abb. 73 grau hinterlegt. Bei den Zugversuchen wurde eine Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min verwendet.

5.1.1 Geometrien Haftfestigkeitsuntersuchung

Die Geometrien wurden so gewählt, dass bei den vier möglichen Materialkombinationen jeweils unterschiedliche Ergebnisse aufgrund verschiedener Mechaniken entstehen und ausgewertet werden können. Die jeweils wirksame Kontaktfläche wurde zu jeder Geometrie basierend auf den Modelldaten ermittelt. Hierbei ist anzumerken, dass diese nicht der wahren Kontaktfläche entspricht, da aufgrund von Stufeneffekten und der runden Form der Extrusionslinien eine deutlich größere Kontaktfläche entsteht.

Stumpfe Geometrie

Die ersten beiden Probegeometrien wurden zur Kontaktfläche hin als Stumpfstoß ausgeführt. Die anzuspritzende Querschnittsfläche betrug hierbei jeweils 40 mm^2 . Bei einer Variante wurde die gedruckte Wellenstruktur der Oberfläche mittels Nassschleifen (Körnung 320) eingeebnet, um gegenüber der unbearbeiteten ersten Variante einen Einfluss der gedruckten Struktur feststellen zu können.

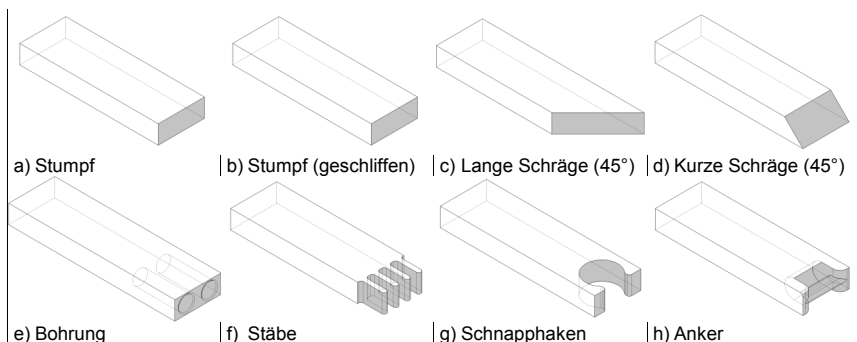


Abb. 73: Geometrie für Haftungsuntersuchung; Kontaktflächen grau gefärbt

Schräge Geometrie

Bei diesen Varianten wurde die Kontaktstelle zwischen Insert und Spritzgießmaterial jeweils zur kurzen und langen Seite hin um 45° abgeschrägt. Dies vergrößert die jeweils wirksame Kontaktfläche auf $56,57 \text{ mm}^2$. Zusätzlich ist durch die entstehenden Stufeneffekte der 3D-gedruckten Bauteile an der kurzen Schräge eine weitere Verbesserung der Haftung zu erwarten.

Oberflächenvergrößernde Strukturen

Bei diesen Varianten wurde die Kontaktfläche durch geometrische Elemente vergrößert, wobei kein konstruktionsbedingter Hinterschnitt vorgesehen ist. Aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit des Drucks können hierbei dennoch Hinterschnitte generiert werden. Bei der Auslegung wurde zudem auf eine gute Druckbarkeit der Geometrien geachtet.

Bei der ersten Variante werden zwei Bohrungen mit Durchmesser $3,2 \text{ mm}$ und einer Tiefe von 10 mm eingebracht. Die Stirnseite hat somit $23,9 \text{ mm}^2$ Kontaktfläche, welche mit $217,1 \text{ mm}^2$ in den Bohrungen erweitert wird. Die zweite Variante sieht kleine Stäbe vor, welche die wirksame Kontaktfläche auf $180,3 \text{ mm}^2$ erweitern.

Hinterschnitt

Bei diesen Varianten soll durch einen Hinterschnitt die Haftkraft der Materialkombinationen gesteigert werden, wobei diese bevorzugt bei inkompatiblen Materialien eingesetzt werden können. Die erste Ausführung sieht einen doppelseitigen Schnapphaken mit einer Kontaktfläche von $91,8 \text{ mm}^2$ vor. Die zweite Variante einen komplett umströmten Anker mit einer Gesamtkontaktfläche von $127,7 \text{ mm}^2$.

5.1.2 Haftfestigkeitsuntersuchung zwischen Polyamid 6 und Polyamid 6 mit Glasfasern

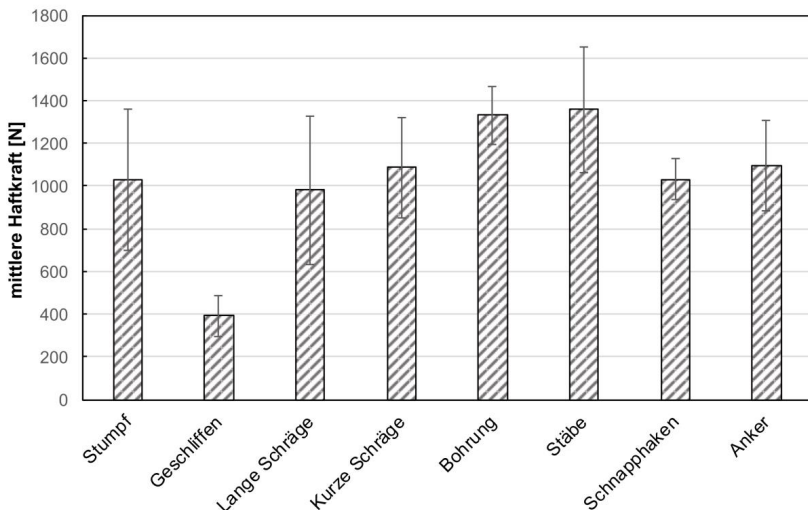


Abb. 74: Haftkraft unterschiedlicher Geometrien bei PA6/PA6GF

Die Haftfestigkeitsuntersuchung zeigt, dass PA6 und PA6GF (vgl. Abb. 74) sich grundsätzlich gut miteinander verbinden und im Vergleich zu den weiteren die beste Materialkombination ist.

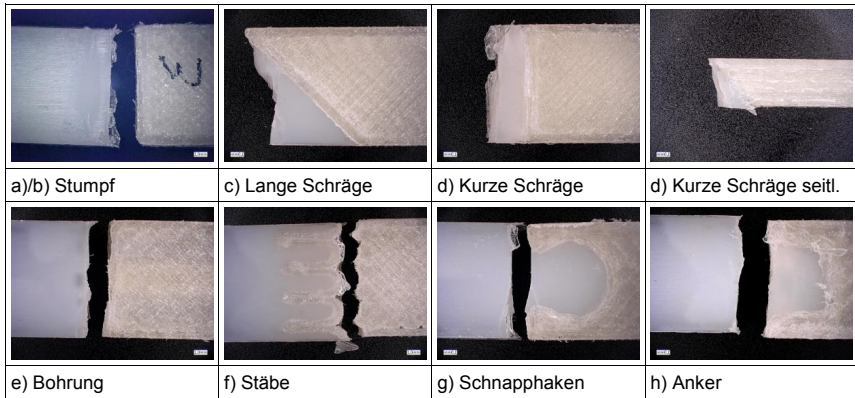


Abb. 75: Versagensverhalten Haftfestigkeitsuntersuchung PA6/PA6GF

Der hauptsächliche Versagensgrund der Prüfkörper war ein Bruch innerhalb des PA6, welcher von der Grenzfläche zwischen den beiden Materialien ausging. Dieser erfolgte in allen Varianten außer bei beiden stumpfen Geometrien, welche an der Grenzfläche brachen und den Stäben, bei welchen es zum Versagen innerhalb des gedruckten Bauteils kam.

Bei mikroskopischer Betrachtung der Bruchflächen zeigt sich, dass bei Brüchen von PA6 der Ausgangspunkt des Bruchs immer an einer Grenzfläche zum Insert liegt. Häufig sind Glasfasern in den Brüchen zu finden, welche vom Insert ins PA6 hereinragen (vgl. Abb. 76).

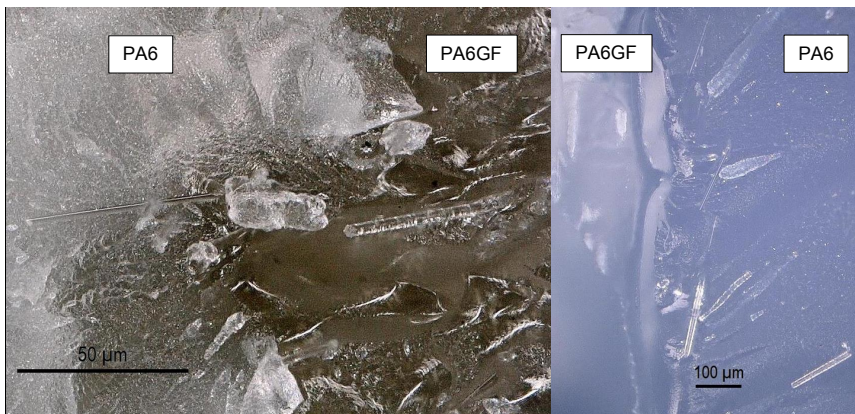


Abb. 76: In PA6 ragende Glasfasern in Bruchstellen der Haftfestigkeitsuntersuchung; links: Bohrung, rechts kurze Schräge

Ob diese den Bruch begünstigen bzw. die Festigkeit signifikant beeinflussen ist unklar. Es zeigt sich jedoch, dass bei Bruchflächen der stumpfen Geometrie der Bruch nicht nur an der Grenzfläche zwischen PA6 und PA6GF verläuft, sondern teilweise durch PA6GF hindurch, wobei Glasfasern, welche quer zur Lasttrichtung liegen, an den Kohäsionsbrüchen sichtbar werden. Es ist davon auszugehen, dass diese aufgrund der ungünstigen Lage, den Kohäsionsbruch in PA6GF begünstigen. Die Reststücke des PA6GF haften am PA6 an (vgl. Abb. 77).

Aufgrund der geschliffenen Oberfläche bei Variante b) haften hierbei, gegenüber der nicht geschliffenen Oberfläche, deutlich weniger PA6GF Bruchstücke an der PA6 Seite an. Es zeigt sich dadurch, dass die

Oberfläche des Drucks zur Erzeugung eines Verbundes deutlich günstiger, gegenüber glatten Oberflächen, ist.

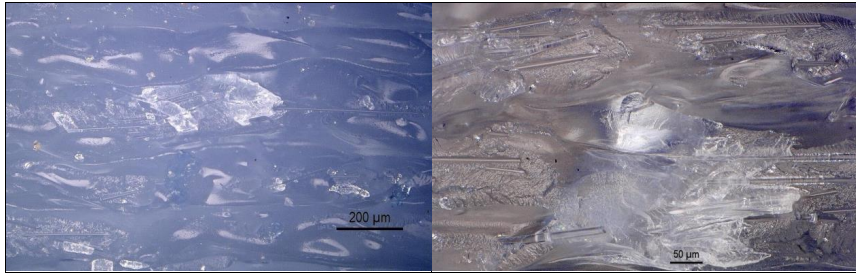


Abb. 77: Kontaktfläche von PA6 und PA6GF; links: Spitzgussseite mit Reststücken von PA6GF; rechts: Insertseite mit Kohäsionsbrüchen und freigelegten Glasfasern

5.1.3 Haftfestigkeitsuntersuchung zwischen Polyamid 6 und Polylactid

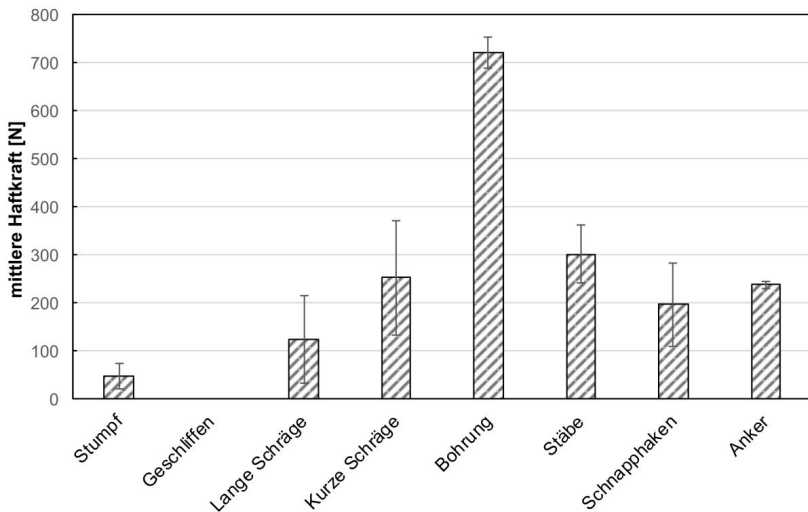


Abb. 78: Haftkraft unterschiedlicher Geometrien bei PA6/PLA

Die Haftfestigkeit zwischen PA6 und PLA ist relativ gering und es kann davon ausgegangen werden, dass diese sich nicht chemisch miteinander verbinden (vgl. Abb. 78). Bedingt durch die gedruckte Struktur und der guten Fließigenschaften der PA6 Schmelze lassen sich dennoch schwache Verbunde erzeugen, welche nicht auf Hinterschnitte des CAD-Modells basieren. Die Trennung bei Zugversuchen erfolgt i. d. R. an der Grenzfläche zwischen PA6 und PLA (vgl. Abb. 79).

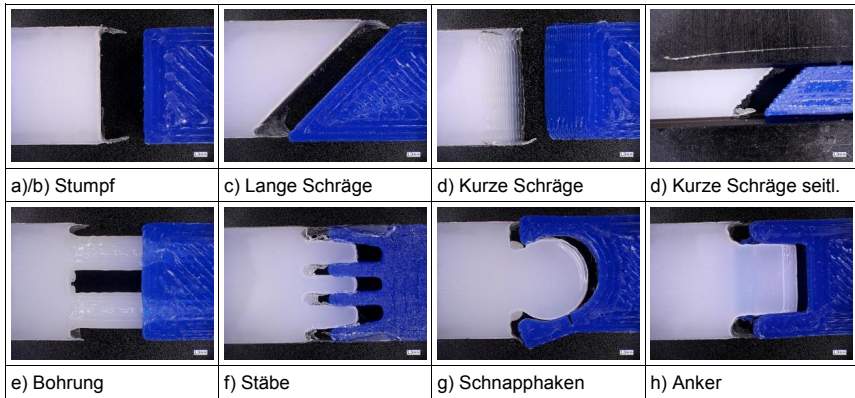


Abb. 79: Versagensverhalten Haftfestigkeitsuntersuchung PA6/PLA

Interessanterweise lassen sich durch oberflächenvergrößernde Maßnahmen wie den Schrägen ähnliche hohe Haftungen generieren wie bei konstruktiven Hinterschnitten. Das Bohrungskonzept stellte sich hierbei als bestes Verbindungsprinzip heraus. Es zeigte sich, dass aufgrund der gedruckten Struktur geringe Hinterschnitte in den Bohrungen entstanden. Diese bewirkten eine mechanische Verklammerung mit dem eingespritzten PA6. Beim Zugversuch äußerten sich die Hinterschnitte durch einen schwingend, abfallenden Kraftverlauf nach dem ersten Kraftpeak (vgl. Abb. 80).

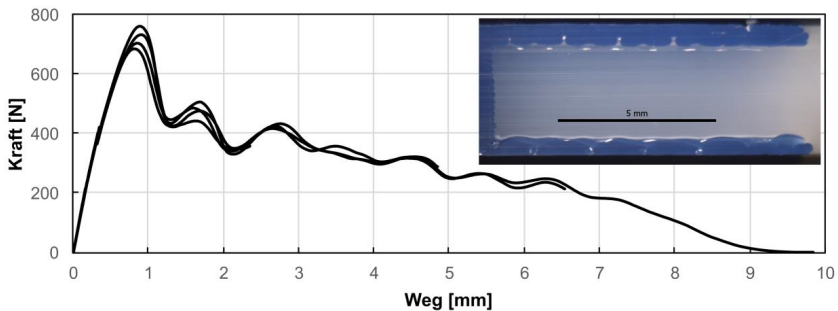


Abb. 80: Kraft-Weg-Diagramm der Haftfestigkeitsuntersuchung der Bohrung mit Schnittbild der Bohrung

5.1.4 Haftfestigkeitsuntersuchung zwischen Polymethylmethacrylat und Polylactid

Die Brüche zwischen PMMA und PLA ähneln der Brüche von PA mit PA6GF, wobei die Haftkraft ein geringeres Niveau aufweist (vgl. Abb. 75 und Abb. 82). Während der Hauptteil der Probekörper durch einen Riss innerhalb des PMMA bricht, erfolgt bei den stumpfen Geometrien der Riss an der Trennebene und bei den Stäben innerhalb des PLA. Die höchste Haftfestigkeit wird bei dieser Materialkombination bei der kurzen Schräge erreicht (vgl. Abb. 81).

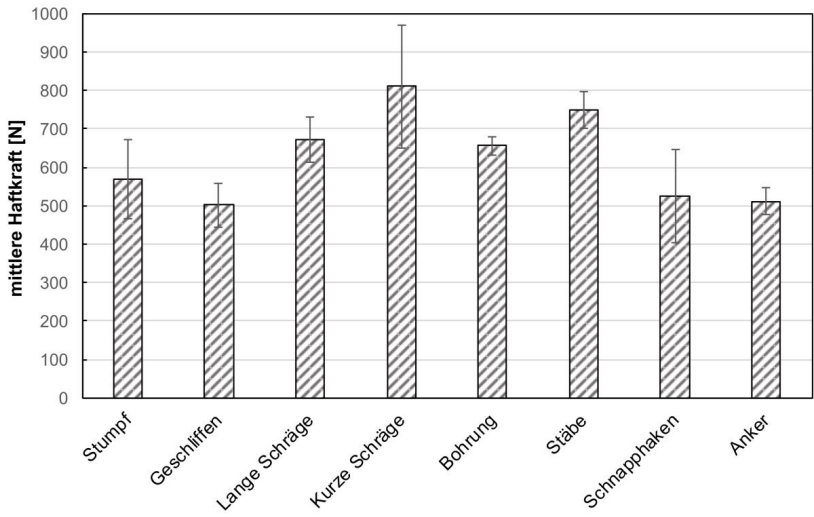


Abb. 81: Haftkraft unterschiedlicher Geometrien bei PMMA/PLA

Trotz der relativ langsamen Zugprüfgeschwindigkeit von 1 mm/min bilden sich im PMMA keine milchigen Verfärbungen aus, welche auf Scherfließen oder Crazes hinweisen (vgl. Kap. 3.5.2). Es ist daher davon auszugehen, dass die Brüche, welche durch PMMA verlaufen, schlagartig entstanden sind.

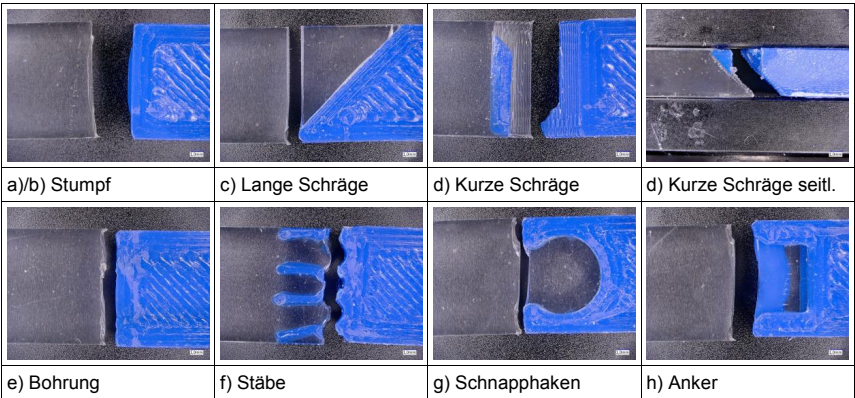


Abb. 82: Versagensverhalten Haftfestigkeitsuntersuchung PMMA/PLA

5.1.5 Haftfestigkeitsuntersuchung zwischen Polymethylmethacrylat und Polyamid 6 mit Glasfasern

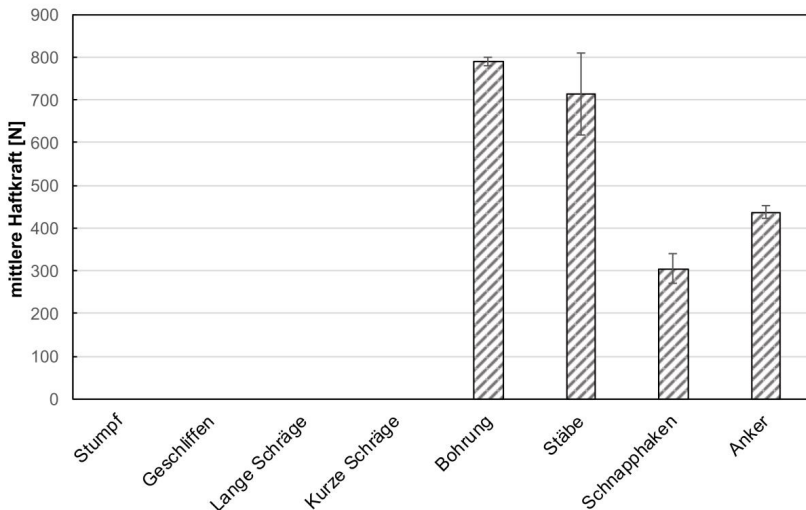


Abb. 83: Haftkraft unterschiedlicher Geometrien bei PMMA/PA6GF

Die Haftfestigkeitsuntersuchung von PMMA und PA6GF zeigt deutlich, dass diese Materialien ausschließlich über direkte mechanische Verklammerung verbunden werden können (vgl. Abb. 83 und Abb. 84). Alle nicht mechanisch verbundenen Probekörper lösten sich bereits bei Entnahme aus dem Spritzgießwerkzeug voneinander.

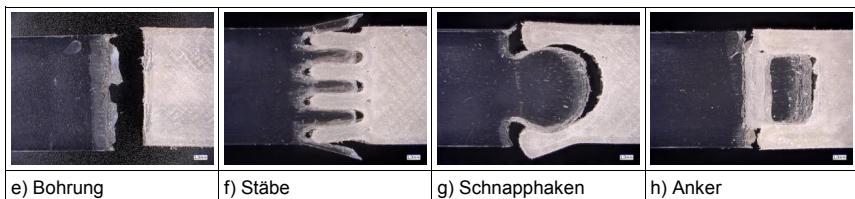


Abb. 84: Versagensverhalten Haftfestigkeitsuntersuchung PMMA/PA6GF

Die Bohrung ist, wie bereits bei der Kombination von PLA mit PA6, das mechanisch beste Konzept, wobei bei dieser Materialkombination der Bruch des PMMA der Versagensgrund war und nicht ein Herausziehen des in der Bohrung vorhandenen Materials. Ähnlich wie bei den Proben mit PA6 und PA6GF wurde an Bruchflächen Glasfasern des PA6GF gefunden, welche ins PMMA hineinragten (vgl. Abb. 85). Bei den Brüchen von PMMA war hierbei immer eine Weißfärbung zu beobachten.



Abb. 85: Bruchfläche Bohrung bei Haftfestigkeitsuntersuchung zwischen PMMA und PA6GF; links: Übersichtsbild; rechts: Detailaufnahme der Bruchfläche mit Glasfasern, welche ins PMMA hineinragen

5.1.6 Zusammenfassung der Haftfestigkeitsuntersuchung

Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist eine gute Verbindung zwischen einem eingelegten Insert und dem Spritzgießmaterial zu erzeugen. Die ermittelten Haftfestigkeiten liegen jedoch deutlich unter der Bindenahtfestigkeit, welche für die beiden Spritzgießmaterialien festgestellt wurden.

Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass die gedruckte Struktur bei der Kombination einen positiven Effekt hat, welche zum einen die theoretische Verbindungsfläche durch deren Unebenheiten erhöht und zum anderen Möglichkeiten bietet mechanische Verbunde wie z. B. Hinterschnitte in der Bohrung zu ermöglichen. Durch einfache Maßnahmen, wie geometrische Oberflächenvergrößerung kann gegenüber dem Stumpfstoß zusätzlich die Haftfestigkeit gesteigert werden.

Die Varianten Bohrung und Stäbe haben sich bei den Untersuchungen als vorteilhaft herausgestellt. Diese erreichen bei allen untersuchten Varianten sehr gute Haftfestigkeitswerte, wobei die Variante Bohrung vor allem bei nicht kompatiblen Polymerkombinationen zu bevorzugen ist.

Es wurde zudem festgestellt, dass Verbindungen, welche hauptsächlich auf Adhäsion basieren, höheren Schwankungen bei den Messwerten unterliegen, als mechanisch basierte. Dies kann u. U. durch unterschiedliche Oberflächenstrukturen, aufgrund von Ungenauigkeiten der gedruckten Bauteile, hervorgerufen werden. Leichte Verunreinigungen während der Verarbeitung sind zudem nicht auszuschließen.

Weitere Verbesserungen bei der Haftung können z. B. durch eine Temperierung der einzulegenden Inserts im Vorab ermöglicht werden, um Effekte wie Interdiffusion zu steigern. Eine Veränderung der Schichtdicke, um andere Oberflächen an den Inserts zu generieren wäre ebenfalls eine Möglichkeit. Zudem würde eine Anpassung der Geometrie an die jeweils verwendete Materialkombination ebenfalls die Haftfestigkeit erhöhen. So wäre bei der Kombination PA6 mit PLA ein kleinerer und bei PMMA mit PA6GF ein größerer Bohrungsdurchmesser vorteilhaft.

5.2 Untersuchung zur Festigkeitssteigerung

Bei der Untersuchung der Festigkeitssteigerung wurden unterschiedliche Inserts gedruckt und diese anschließend umspritzt. Es wurden hierbei alle Materialkombinationen auf deren Eigenschaften getestet. Um ein besseres Verständnis unterschiedlicher Verstärkungsfaktoren zu erhalten, wurde je Geometrie jeweils Inserts getestet, welche 20 %, 40 % und 60 % der Querschnittsfläche des HPKS ausfüllen.

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass, bei allen nachfolgenden Versuchen, die Messung der Querschnittsfläche zur Berechnung der Spannung mittig im Prüfbereich durchgeführt wurden. Diese entsprechen z.T. nicht der wahren Bruchquerschnittsfläche, wenn der Probekörper im Einspannbereich gerissen ist. Ebenfalls können Abweichungen zur wahren Querschnittsfläche aufgrund der Unebenheit

der gedruckten Inserts und bei Spaltbildung zwischen Spritzgießmaterial und Insert bei nicht-kompatiblen Materialien entstehen.

5.2.1 Berechnung der zu erwartenden Festigkeiten

Basierend auf den Kennwerten der Einzelmaterialien können mittels Berechnung die jeweils zu erwartenden Kennwerte der HPK kalkuliert werden. Die wichtigsten Kennwerte, auf welche im Weiteren eingegangen wird, sind der Zugmodul, die maximal erreichbare Spannung und deren dazugehörige Dehnung.

Bei der Dehnung kann davon ausgegangen werden, dass der HPK zerstört bzw. soweit geschädigt ist, dass dieser als zerstört gilt, wenn eine kritische Dehnung der weniger dehnbaren Komponente des HPKs überschritten wird. Die kritische Dehnung kann hierbei hauptsächlich den Inserts zugeordnet werden und liegt bei PA6GF bei der Bruchdehnung und bei PLA bei der Streckdehnung. Nach Erreichen dieser Dehnungen kann davon ausgegangen werden, dass der HPK zerstört ist. Für die Berechnungen des Zugmoduls und der maximalen Spannung wird davon ausgegangen, dass beide Materialien des HPKs die jeweils gleiche Dehnung erfahren. Abhängig von stark unterschiedlichen Zugmodulen einzelner Materialien und der jeweiligen Haftung von Insert und Spritzgießmaterial kann dieser Ansatz fehlerbehaftet sein.

Für den Zugmodul gilt somit die einfache Mischregel, welche bereits aus der Berechnung von Faser-Kunststoff-Verbunden bekannt ist. Es wird jedoch im Gegensatz zur Berechnung von Faser-Kunststoff-Verbunden nicht das Volumenverhältnis, sondern das im Belastungsquerschnitt vorhandene Flächenverhältnis von Insert zu Spritzgießmaterial verwendet. Hieraus ergibt sich die Gleichung für die Berechnung des Zugmoduls⁸⁷:

$$E_{\text{HPK}} = E_I \cdot \frac{A_I}{A_I + A_S} + E_S \cdot \frac{A_S}{A_I + A_S}$$

Die berechneten Werte der Zugmoduln für die verwendeten Materialkombinationen sind in Tab. 16 abgebildet.

Die jeweiligen Spannungen des HPKs können ebenfalls über die Mischungsregel berechnet werden. Hierbei bietet es sich an diese als Graph in Abhängigkeit von der Dehnung zu berechnen:

$$\sigma_{\text{HPK}}(\epsilon) = \sigma_I(\epsilon) \cdot \frac{A_I}{A_I + A_S} + \sigma_S(\epsilon) \cdot \frac{A_S}{A_I + A_S}$$

Die Graphen der einzelnen Materialkombinationen sind in Abb. 86, Abb. 87, Abb. 88 und Abb. 89 dargestellt.

Tab. 16: Kalkulierte Kennwerte unterschiedlicher HPKs

Flächenanteil Insert [%]	Erreichbare Spannung [MPa]			Zugmodul [MPa]		
	20	40	60	20	40	60
PLA						
PMMA	45,6	49,3	54,0	2139	2449	2760
PA6	68,6	67,8	66,9	3156	3212	3268
PA6GF						
PMMA	54,0	70,6	87,2	2541	3253	3964
PA6	79,7	89,9	100,1	3558	4015	4473

⁸⁷ Vgl. [78] S.170 ff.

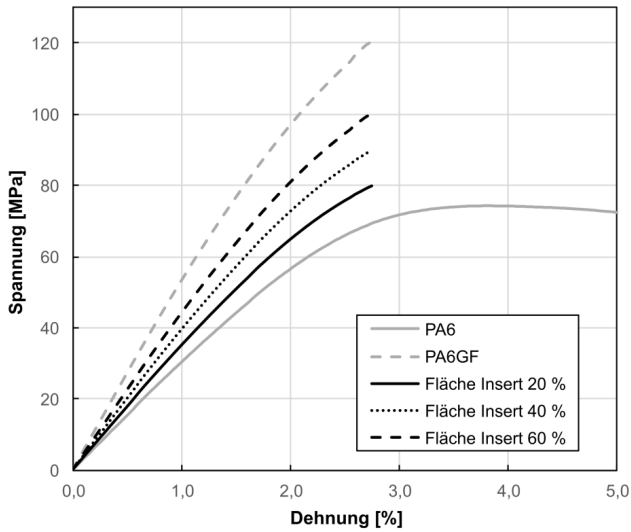


Abb. 86: Kalkuliertes Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit PA6 umspritzter, unterschiedlicher Inserts aus PA6GF

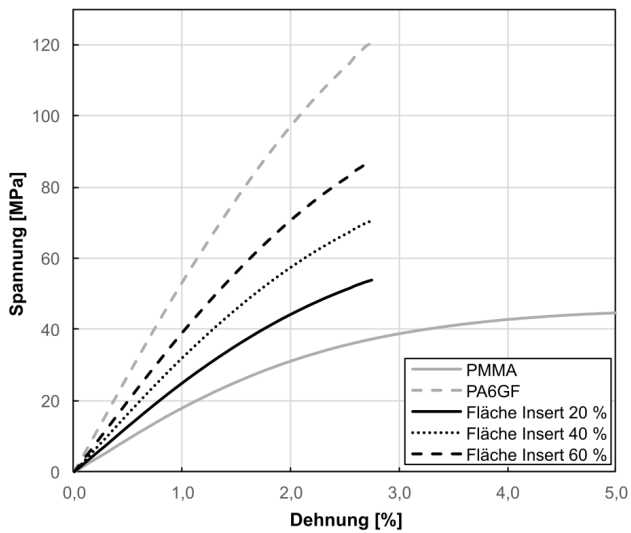


Abb. 87: Kalkuliertes Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit PMMA umspritzter, unterschiedlicher Inserts aus PA6GF

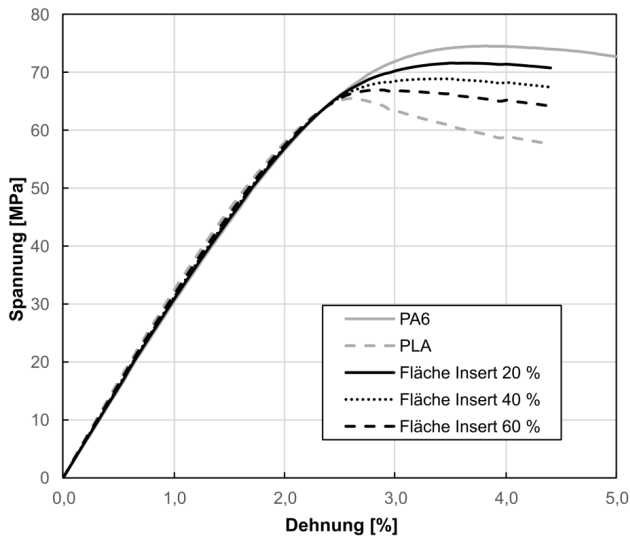


Abb. 88: Kalkuliertes Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit PA6 umspritzter, unterschiedlicher Inserts aus PLA

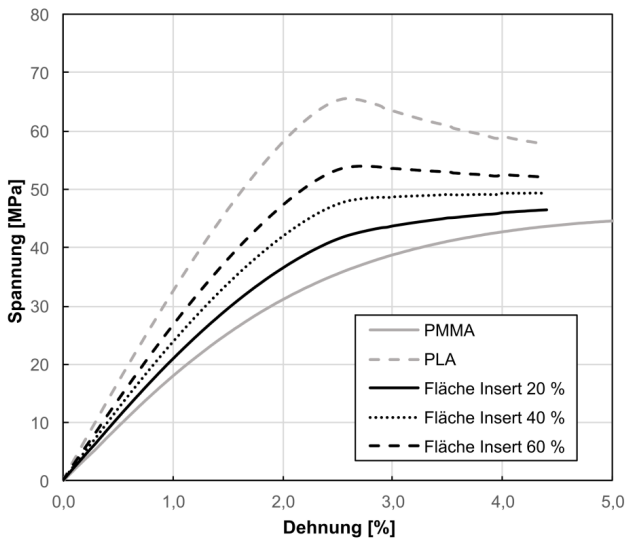


Abb. 89: Kalkuliertes Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit PMMA umspritzter, unterschiedlicher Inserts aus PLA

Wie die Spannungs-Dehnungs-Diagramme zeigen ist es sinnvoll Materialien so auszuwählen, dass diese sich gut ergänzen. Die maximalen Spannungen der Einzelmaterialien sollten im besten Fall bei derselben Dehnung erreicht werden. Bei stark unterschiedlichen Materialkombinationen kann die Festigkeit des HPKs sogar unterhalb der Festigkeit der Einzelkomponenten liegen.

5.2.2 Insertgeometrie für Hybridprüfkörper

Basierend auf Vorversuchen wurden unterschiedliche Geometrien für den HPK entwickelt. Diese wurden anschließend hergestellt und getestet, wobei nicht jede Variante mit jeder Materialkombination getestet wurde.

Variante 1 (V1)

Die erste Variante der Inserts bestand aus einem 4 mm hohem, quadratischen Stab, bei welchen jeweils die Breite variiert wurde, um das entsprechende Flächenverhältnis von Spritzgießmaterial und gedruckten Material zu erhalten. Hierbei wurden jeweils nur die Seitenflächen umspritzt. Die für die Positionierung erforderlichen Löcher wurden im Abstand von 95 mm gedruckt und anschließend aufgebohrt. Bei den Varianten 4x4 mm² und 4x8 mm² wurden zudem die Wandung an der Bohrung verstärkt, damit diese beim umspritzen nicht reißen.

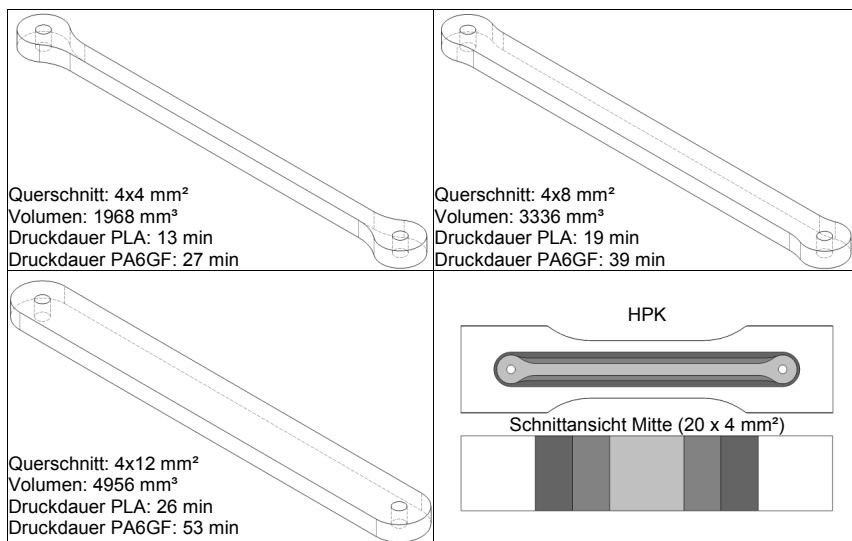


Abb. 90: Insertgeometrie V1 mit Kennwerten

Variante 2 (V2)

Bei der zweiten Variante wurde gegenüber der ersten Variante der Einspannbereich der Zugprüfkörper vergrößert, um eine bessere Kraftübertragung im Einspannbereich zu erreichen. Negativ ist gegenüber den anderen Varianten das relativ hohe Druckvolumen.

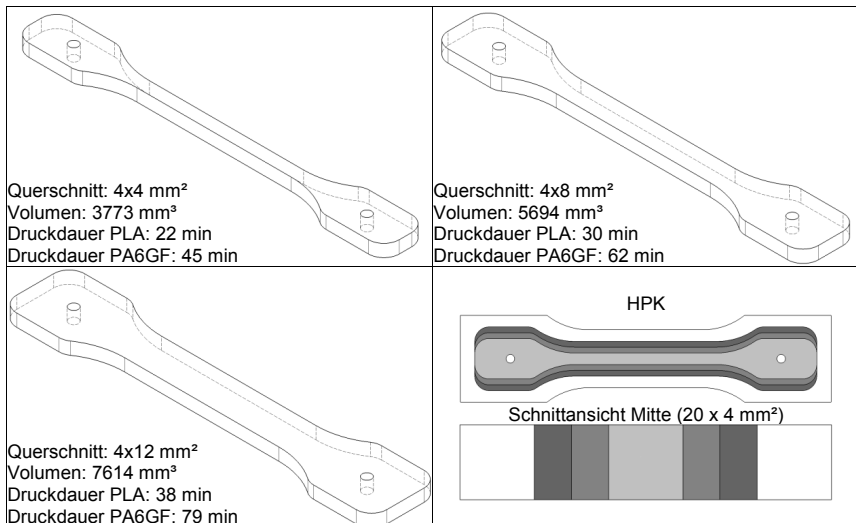


Abb. 91: Insertgeometrie V2 mit Kennwerten

Variante 3 (V3)

Bei der dritten Variante wurde der Einspannbereich überarbeitet, sodass der Übergang zum Prüfbereich weniger ausgeprägt ausfällt. Die Bohrungen wurden nicht im Druckbauteil vorgesehen, da diese das konzentrische Druckmuster negativ beeinflusst haben. Diese wurden mittels Schablone nachträglich gebohrt.

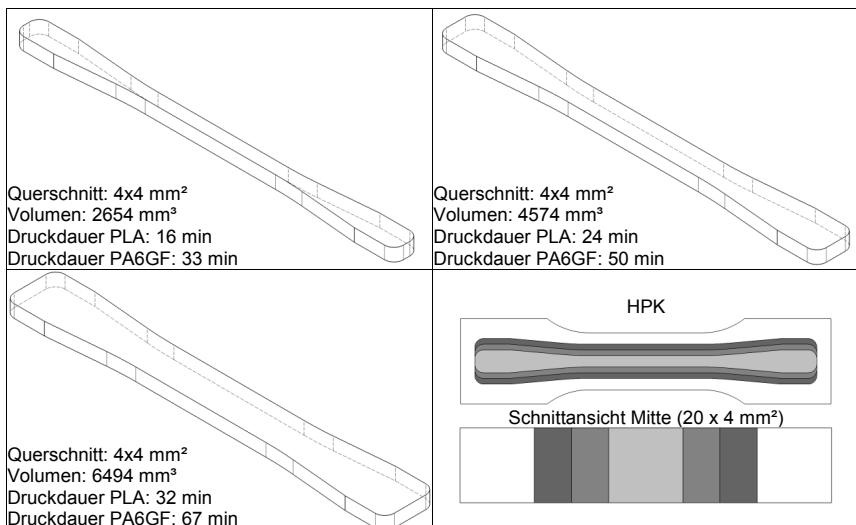


Abb. 92: Insertgeometrie V3 mit Kennwerten

Variante 4 (V4)

Bei dieser Variante sollte mittels Sandwichbauweise eine verbesserte Haftung zwischen Insert und Spritzgießmaterial erzielt werden. Pro Probekörper wurden hierzu zwei identische Hälften gedruckt, welche mit Abstandhalter an den Positionslöchern versehen waren. Die Abstandshalter sind notwendig, um die beiden Hälften miteinander zu verbinden (kleben) und die Aufnahme über die einseitigen Pins zu ermöglichen, da andernfalls in beide Werkzeughälften Pins eingebracht werden müssten.

Aufgrund der Schichthöhe von 0,2 mm müssen die Druckhöhen der Inserts auf diese angepasst werden, wodurch bei dem kleinsten und größten Insert eine Abweichung des Prüfquerschnitts gegenüber anderer Varianten besteht. Für die Übersichtlichkeit werden diese im nachfolgenden dennoch gleich betrachtet.

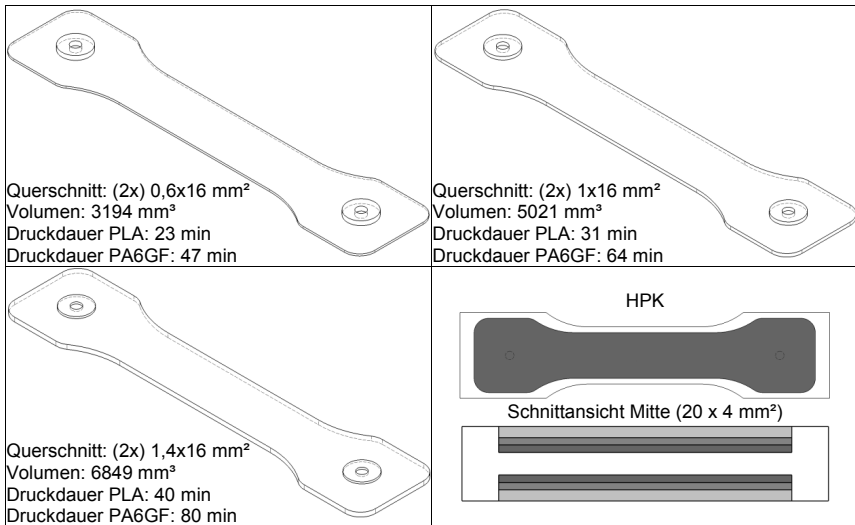


Abb. 93: Insertgeometrie V4 mit Kennwerten

5.2.3 Hybridprüfkörper aus Polyamid 6 und Polyamid 6 mit Glasfasern

Bei der Untersuchung der Materialkombination zwischen PA6 und PA6GF sollte die Möglichkeit eines Verbunds zwischen zwei identischen Grundmaterialien mit anderen Festigkeitskennwerten untersucht werden. Es soll gezeigt werden, dass eine solche Verbindung für hoch beanspruchte Bauteile sinnvoll sein kann.

Variante 1

Die Untersuchung mit Inserts der V1 zeigte, dass die HPK erhebliche Mängel aufwiesen. Es hat sich herausgestellt, dass trotz guter Adhäsion zwischen Insert und Spritzgießmaterial, diese nicht ausreicht um die eingeleitete Last über die Einspannflächen zum Prüfbereich ausreichend gut zu übertragen. Der hauptsächliche Versagensgrund der HPK bestand in der Ablösung des jeweiligen Inserts vom Spritzgießmaterial in der Nähe des Einspannbereichs (vgl. Abb. 95). Dieser Effekt wird vermutlich durch die unterschiedliche Steifigkeit der Materialien begünstigt

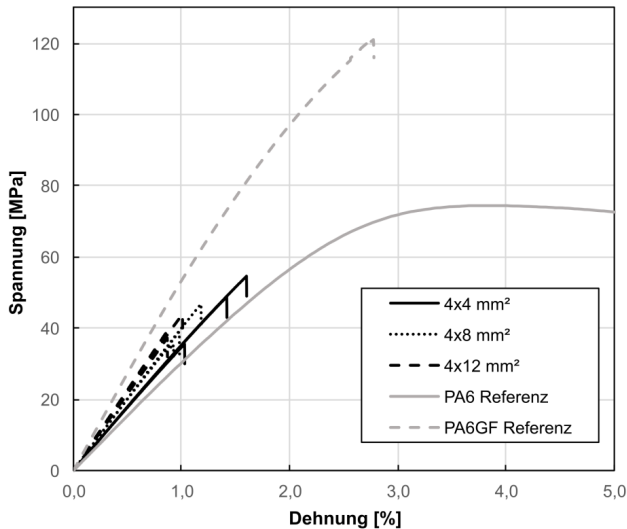


Abb. 94: Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V1 PA6/PA6GF

Infolge der Ablösung wurde die eingeleitete Last, welche zuvor in Kombination von Insert und Spritzgießmaterial getragen wurde, schlagartig auf das Spritzgießmaterial aufgebracht, wodurch dieses in der Nähe der Ablösestelle spröde bricht. Der Sprödebruch des PA6 lässt sich hierbei durch eine kurzzeitig lokal hohe Dehngeschwindigkeit erklären, welche bei Kunststoffen in der Regel die Bruchmechanik⁸⁸ beeinflusst. Bei hohen Dehngeschwindigkeiten können sich die Polymerketten nicht schnell genug verlagern, wodurch es zum Sprödebruch kommt. Nachfolgende Untersuchungen zeigten, dass die Brüche ebenfalls von Glasfasern des Inserts beeinflusst wurden.

Die Inserts wiesen nach den Tests in der Regel keine Bruchstellen auf. Nur einzelne Inserts mit der Querschnittsfläche 4x12 mm² zeigten Bruchspuren an querliegenden Extrusionslinien auf (vgl. Abb. 95).

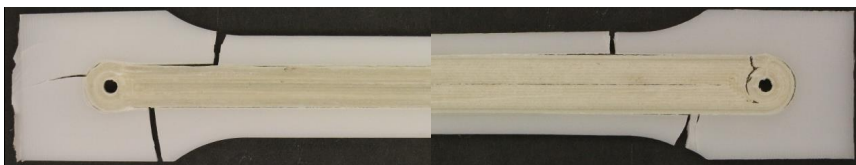


Abb. 95: Bruch PA6/PA6GF V1. Links: Insert 4x8 mm² rechts: Insert 4x12 mm²

Die Abnahme der erreichbaren Festigkeit in Abb. 94 und Tab. 17 bei größeren Inserts lässt sich am konstruktionsbedingten Hinterschnitt am Pin erklären, welcher infolge der Verstärkung der Wandung entstand. Dieser begünstigt die Kraftübertragung vom Spritzgießmaterial auf das Insert bei den kleineren Querschnitten.

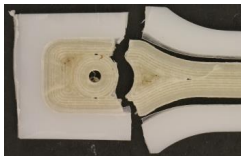
⁸⁸ Vgl. [67] S. 226f.

Tab. 17: Kennwerte HPK V1 PA6/PA6GF

	Insert 4x4 mm ²			Insert 4x8 mm ²			Insert 4x12 mm ²		
	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.
Spannung [MPa]	35,6	46,3	54,6	35,5	40,4	46,8	37,3	40,0	43,9
Dehnung [%]	1,03	1,35	1,60	0,90	1,02	1,18	0,86	0,91	1,01
Zugmodul [MPa]	3589	3594	3597	4024	4042	4061	4340	4467	4535

Variante 2

Die zweite Variante der Insertgeometrien zeigte deutliche Verbesserungen gegenüber der ersten, wobei die Festigkeiten der HPK hauptsächlich geringer waren als die der Einzelkomponenten (vgl. Abb. 97). Die ersten Probekörper dieser Konfiguration zeigten Mängel an der Auslegung der Inserts. Durch die Kombination zwischen der konzentrischen Druckstrategie und den im Insert vorhandenen Bohrung, entstand eine Ablage der Extrusionslinien quer zur Lastrichtung. Diese fungierte bei Belastung der Probe als Sollbruchstelle. Obwohl der Querschnitt an dieser Stelle deutlich größer ist als der des eigentlichen Prüfbereichs, verliefen die Brüche meist durch diesen Bereich wie in Abb. 96 zu sehen ist.

Abb. 96: Bruch PA6/PA6GF V2 Insert 4x8 mm²

Hierdurch war es erforderlich die Bohrungen aus dem Druckobjekt zu entfernen und nachträglich einzubringen. Alternativ hätte das Druckmuster in ein Linienmuster mit einer Orientierung von 0° geändert werden können.

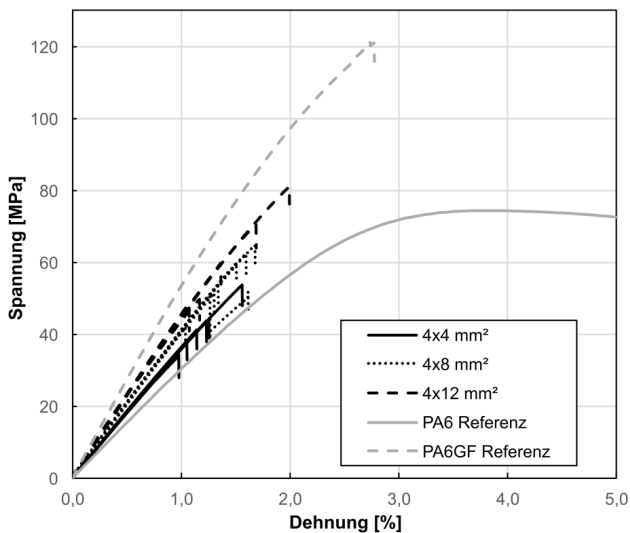


Abb. 97: Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V2 PA6/PA6GF

Die Tests der Inserts mit nachträglich eingebrachter Bohrung wiesen gegenüber der vorangegangenen keine Veränderungen hinsichtlich der erreichbaren Festigkeiten auf. Der Bruch des HPKs hat sich durch diese Maßnahme auf das Spritzgießmaterial verlagert, welches bereits bei geringeren Dehnungen hauptsächlich an den Radien und teils im Prüfbereich des Inserts spröde gebrochen ist. Highspeed Aufnahmen zeigen, dass das PA6 ohne die typische Einschnürung über den Querschnitt schlagartig bricht (vgl. Abb. 98).

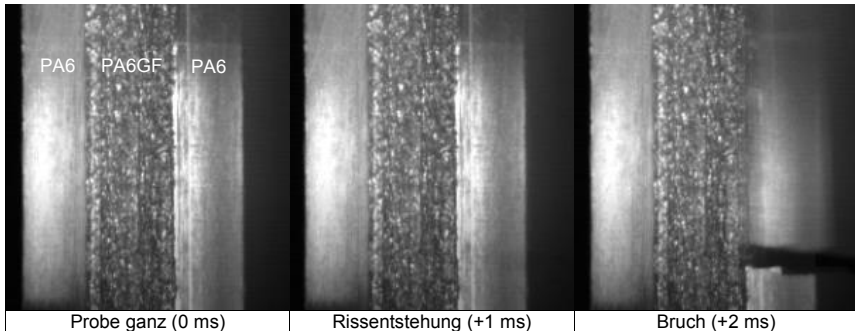


Abb. 98: Highspeedaufnahme Sprödbbruch PA6 mit Insert 4x8 mm²

Es besteht hierbei die Vermutung, dass Glasfasern, welche aus dem Insert herausragen als Defekte im Spritzgießmaterial fungieren und ähnlich einer Kerbe wirken. Kombiniert mit einer ruckartigen Ablösung des Spritzgießmaterials vom Insert und hierdurch hervorgerufene lokal hohe Dehngeschwindigkeiten kann dies zu einem Sprödbbruch des eigentlich zähen Materials führen.

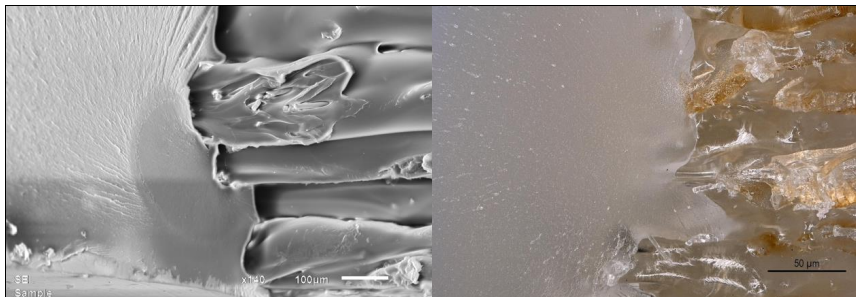


Abb. 99: Freiliegende Glasfasern an Bruchstellen bei Materialkombination PA6/PA6GF

Unterstützt wird die Annahme darin, dass der Bruch immer dem Insert zugewandt entstand und Glasfasern im Spritzgießmaterial an der Bruchstelle gefunden wurden (vgl. Abb. 99). Die Anhäufung der Brüche an den Radien des Inserts spricht ebenfalls dafür, da aufgrund der Eigensteifigkeit der Glasfasern die Wahrscheinlichkeit, dass diese aus dem Insert herausragen, an diesen Stellen erhöht ist. An Schlifffildern von intakten Radien wurden vom Insert in Spritzgießmaterial ragende Glasfasern gefunden (vgl. Abb. 100).

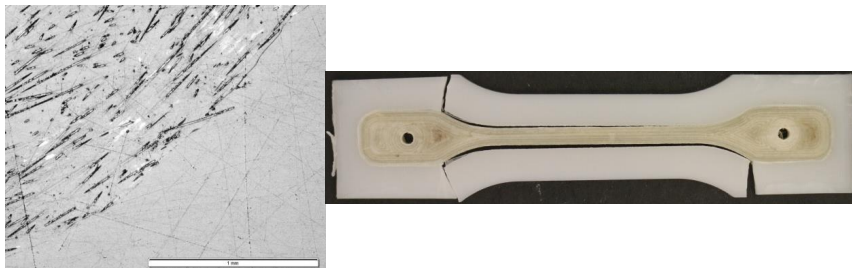


Abb. 100: Glasfaserbedingter Bruch von PA6; links: Schnittbild am Radius mit in PA6 ragender Glasfaser; rechts: typischer Bruch des Spritzgießmaterials bei PA6/PA6GF mit Insert 4x4 mm² V2 am Radius

Zusätzlich zeigen weder HPKR, noch durchgeführte DSC-Analysen Auffälligkeiten, welche auf eine Schädigung des PA6 durch z. B. die Verarbeitung hinweisen könnten. Das Verhalten des PA6, bei Umspritzung von PLA Inserts, mit gleichen Einstellungen und Geometrie (vgl. Kap.5.2.4) wies ebenfalls auf keine Schädigung durch den Verarbeitungsprozess hin.

Tab. 18: Kennwerte HPK V2 PA6/PA6GF

	Insert 4x4 mm ²			Insert 4x8 mm ²			Insert 4x12 mm ²		
	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.
Spannung [MPa]	33,9	41,4	53,8	42	55	64,8	48,9	62,1	81,1
Dehnung [%]	0,98	1,17	1,56	1,04	1,39	1,68	1,07	1,46	2,00
Zugmodul [MPa]	3617	3659	3720	4082	4154	4187	4569	4630	4723

Versuche mit HPK_n, welche 30 Tage in Wasser eingelegt wurden, wiesen dieses Verhalten nicht mehr auf. Anstelle des Bruchs des Spritzgießmaterials, brach bei diesen Proben immer zuerst das Insert. Infolge des Bruchs löste sich das Insert häufig vom Spritzgießmaterial ab, wobei seltener der Verbund bestehen blieb (vgl. Abb. 101 und Abb. 102).

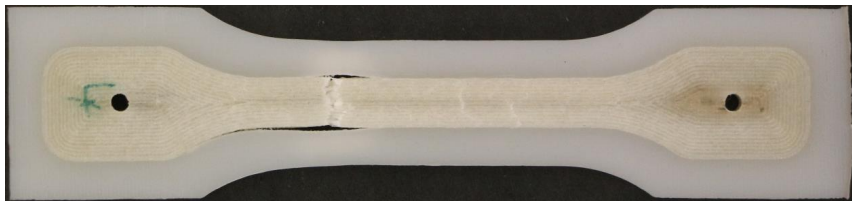


Abb. 101: Bruch PA6/PA6GF V2. Insert 4x8 mm² nach 30 Tagen in Wasser

Dies bestärkt die Vermutung, dass der Bruch des PA6 im trockenem Zustand stark durch Glasfasern des Inserts beeinflusst wurde, da im nassen Zustand die Kerbempfindlichkeit deutlich verringert ist, wodurch der Effekt nicht zu Tragen kommt.

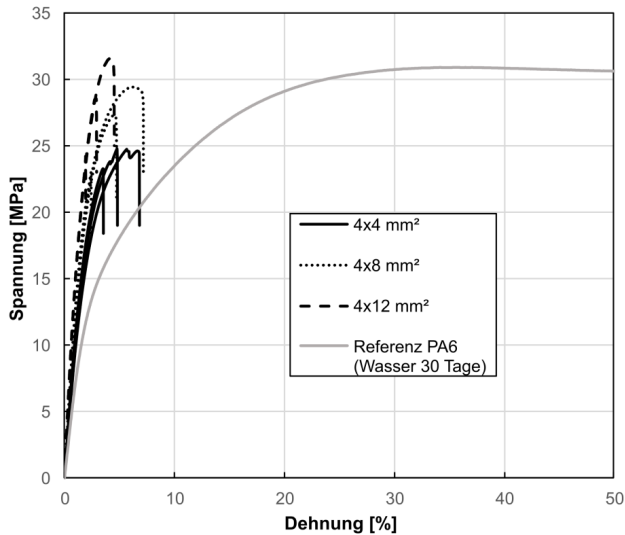


Abb. 102: Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V2 PA6/PA6GF nass

Variante 3

Bei V3 stellt sich erstmals eine Festigkeitssteigerung ein, welche die Grundfestigkeit von PA6 deutlich übersteigt. Dies zeigt, dass die grundsätzliche Möglichkeit besteht, über FDM hergestellte Inserts ein Spritzgießbauteil zu verstärken (vgl. Abb. 103 und Tab. 19).

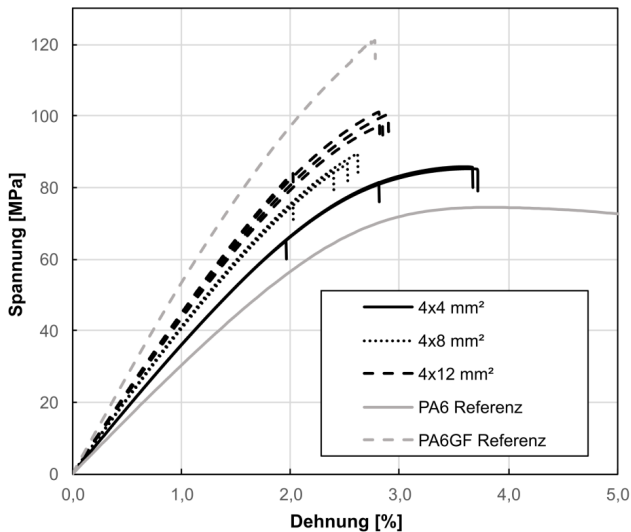


Abb. 103: Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V3 PA6/PA6GF

Im Gegensatz zu V1 und V2 fand, bis auf wenige Ausnahmen, der Bruch im eigentlichen Prüfbereich statt. Bruchursache war hauptsächlich die Überschreitung der kritischen Dehnung des jeweiligen Inserts (vgl. Abb. 104). Das Spritzgießmaterial wurde infolge der schlagartig anliegenden Energie in mehrere Teile gesprengt.

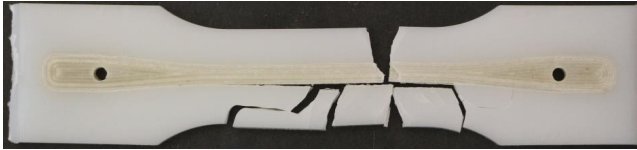


Abb. 104: Bruch PA6/PA6GF V3 Insert 4x4 mm²

Tab. 19: Kennwerte HPK V3 PA6/PA6GF

	Insert 4x4 mm ²			Insert 4x8 mm ²			Insert 4x12 mm ²		
	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.
Spannung [MPa]	65,1	79,4	85,8	75,7	84	89,6	84,2	89,6	101,1
Dehnung [%]	1,96	3,00	3,64	2,02	2,39	2,62	2,02	2,64	2,89
Zugmodul [MPa]	3661	3671	3680	4148	4194	4223	4444	4531	4603

Variante 4

Die vierte Variante erzielt ähnlich hohe Festigkeiten wie die dritte (vgl. Abb. 106 und Tab. 20), jedoch bricht diese hauptsächlich in der Einspannung. Die Kontaktfläche zwischen den zylindrischen Abstandshaltern und dem Spritzgießmaterial fungiert in den meisten Fällen als Sollbruchstelle (vgl. Abb. 105). Bei Reduktion dieser Problematik könnte daher noch eine geringfügige Festigkeitssteigerung zu erwarten sein.

Beim Vergleich mit der Materialkombination PMMA mit PA6GF mit identischen Inserts und Brüchen im Prüfbereich ist jedoch kaum eine Steigerung von PA6 mit PA6GF zu erwarten, da bei PMMA mit PA6GF die erreichten Dehnungen nur geringfügig höher liegen.

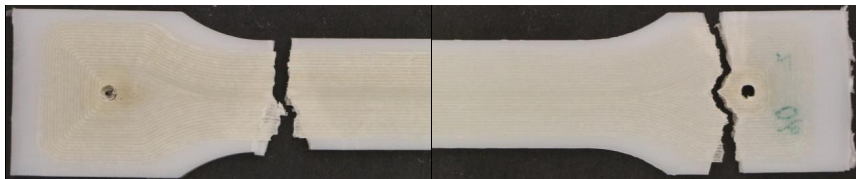


Abb. 105: Bruch PA6/PA6GF V4. Links: Insert (2x) 1,4x16 mm²; rechts: Insert (2x) 0,6x16 mm²

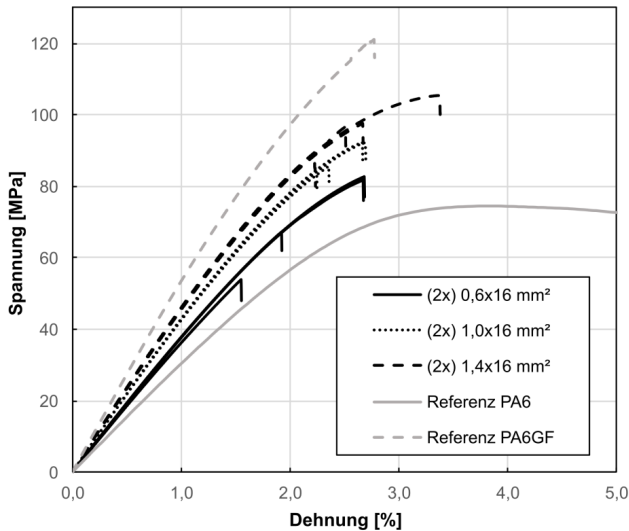


Abb. 106: Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V4 PA6/PA6GF

Für die Herstellung von Prüfkörpern mit dieser Geometrie ohne den Abstandshalter würde ein Werkzeug mit beidseitig angebrachten Positionierpins benötigt. Da dies aufgrund des vorhandenen Werkzeuges schwierig umsetzbar ist, wurde auf weitere Verbesserungen in dieser Hinsicht verzichtet.

Tab. 20: Kennwerte HPK V4 PA6/PA6GF

	Insert (2x) 0,6x16 mm ²			Insert (2x) 1,0x16 mm ²			Insert (2x) 1,4x16 mm ²		
	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.
Spannung [MPa]	54,0	71,4	82,7	84,2	88,6	92,3	89,5	97,3	105,4
Dehnung [%]	1,55	2,21	2,68	2,25	2,49	2,69	2,23	2,70	3,37
Zugmodul [MPa]	3711	3823	3869	4368	4379	4399	4664	4715	4756

5.2.4 Hybridprüfkörper aus Polyamid 6 und Polylactid

Wie in der Haftfestigkeitsuntersuchung und den DSC-Analysen gezeigt, gehen PA6 und PLA keine direkte Verbindung ein und müssen mechanisch verbunden werden. Da das PLA Insert der schwächere Verbundpartner darstellt, ist diese Konfiguration für eine mechanische Steigerung prinzipiell ungeeignet. Zum Vergleichen von Effekten anderer Materialkombinationen werden hierzu dennoch einige Varianten getestet.

Variante 1

Die Messung der Verbundprüfkörper der ersten Variante zeigt, dass sich die Festigkeit der Verbundprüfkörper zwischen den Festigkeiten der beiden Ausgangsmaterialien befindet. Durch den schwachen Verbund zwischen Insert und Spritzgießmaterial, welcher hauptsächlich auf Unebenheiten auf der Oberfläche des Inserts basiert, ist keine gute Kraftübertragung zu erwarten. Dies zeigt sich am Zugmodul der Verbundprüfkörper, welcher höher ist als die Moduln der Ausgangsmaterialien (vgl. Abb. 107). Es ist davon auszugehen, dass sich während des Versuchs das Insert weniger gedehnt hat als das Spritzgießmaterial. Da die Messung des Dehnmessaufnehmers am Insert stattfand wurde somit eine höhere Spannung der jeweils gemessenen Dehnung zugeordnet, wodurch die Zugmoduln höher sind.

Der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurven im Modulbereich ist sehr unstat und mit geringfügigen Spannungssprüngen behaftet, wodurch die Vermutung bestätigt wird. Es wird daher auf eine Auswertung der Dehnung und des Moduls verzichtet.

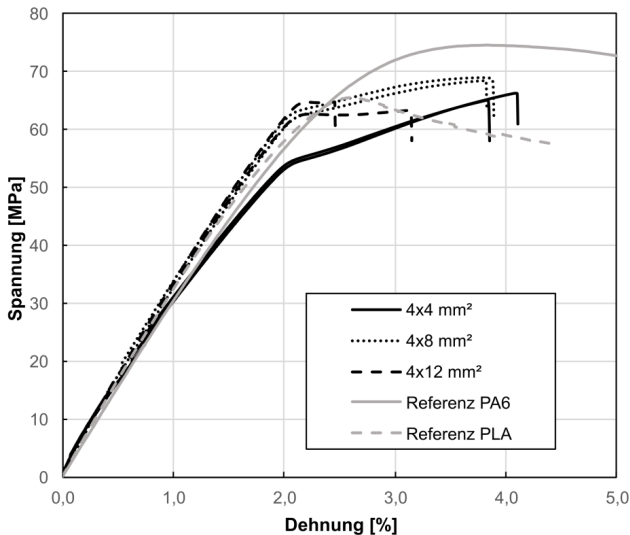


Abb. 107: Spannungs-Dehnungs-Diagramm HPK V1 PA6/PLA

Tab. 21: Kennwerte HPK V1 PA6/PLA

	Insert 4x4 mm ²			Insert 4x8 mm ²			Insert 4x12 mm ²		
	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.
Spannung [MPa]	47,9	48,4	48,7	49,5	50,4	51,0	53,1	53,8	54,2

Das Versagen des HPKs erfolgte bei den Messungen aufgrund des Bruchs des Inserts (vgl. Abb. 108). Das PA6 blieb beim Bruch unversehrt und schnürte sich nach Erreichen der kritischen Dehnung ein. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven wurden in Abb. 107 nach Bruch des Inserts abgeschnitten.

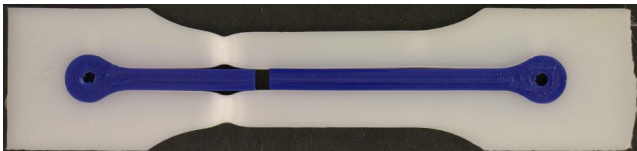


Abb. 108: Bruch PA6/PLA V1 Insert 4x4 mm²

Variante 2

Die zweite Variante wurde hauptsächlich zur Untersuchung der Bruchmechanik des HPKs von PA6 mit PA6GF getestet. Es sollte gezeigt werden, dass weder die Geometrie des Inserts, noch eine eventuelle Schädigung während des Spritzgießprozesses zum vorzeitigen Bruch des PA6 führt.

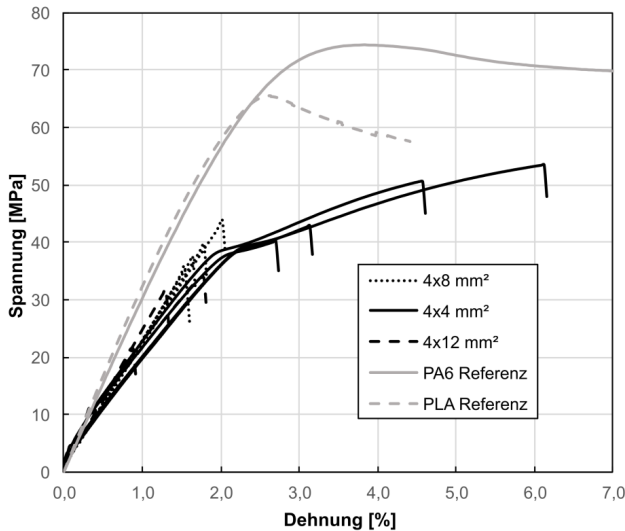


Abb. 109: Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V2 PA6/PLA

Die HPK aus PLA und PA6 zeigten, dass V2 für diese Materialkombination gänzlich ungeeignet ist. Aufgrund der geringen Anhaftung von PLA und PA6 wurden diese bereits bei geringen Dehnungen voneinander getrennt. Aufgrund des Übergangs von Einspannbereich zum Prüfbereich entstand bereits zu Beginn der Prüfung ein Abheben des PA6 vom Insert (vgl. Abb. 110), wodurch das PA6 kaum zur Gesamtfestigkeit beigetragen hat. Erst nach Erreichung der Strecklage des PA6, welche erst nach Bruch des Inserts geschah, wurde das PA6 vollständig belastet und schnürte sich ein. Hierdurch waren die gemessenen Moduln deutlich zu gering.

Den relativ frühzeitigen Bruch der PLA Inserts vor Erreichen der üblichen Bruchdehnung liegt hierbei wiederum am Druckbild. Dieses hat aufgrund der quer zur Belastungsrichtung liegenden Extrusionslinien am Pin einen geschwächten Bereich. Vergleichbar mit den PA6GF Inserts in Kap. 5.2.3.



Abb. 110: Bruch PA6/PLA V2 Insert 4x4 mm²

Die Versuche zeigen, dass die Sprödbüche bei PA6 und PA6GF bei V2 nicht aufgrund der Geometrie oder der Verarbeitung entstehen konnten, sondern rein auf der Materialkombination basieren müssen. Da die Versuche nur zum Abgleich der Effekte bei anderen Materialkombinationen durchgeführt wurden, wurde auf die Versuche von V3 und V4 verzichtet.

5.2.5 Hybridprüfkörper aus Polymethylmethacrylat und Polylactid

Wie bereits bei der Haftfestigkeitsuntersuchung gezeigt wurde, existiert eine gute Adhäsion zwischen PMMA und PLA, wodurch die beiden Materialien ideale Verbundpartner darstellen. Negativ ist hierbei, dass zum einen die erreichbare Festigkeitssteigerung aufgrund der geringen Unterschiede in der maximalen Festigkeit nur minimal ausfällt und zudem die Spannungsmaxima von PMMA und PLA bei stark unterschiedlichen Dehnungen auftreten.

Variante 1

Die Ergebnisse der V1 zeigen, dass diese Materialkombination hinsichtlich der Funktionalität des HPKs gut ist (vgl. Abb. 111 und Tab. 22). Die anliegende Last wird sowohl über Insert als auch Spritzgießmaterial gleichmäßig getragen, wodurch eine gute Übereinstimmung mit dem in Kap. 5.2.1 berechneten Verlauf vorliegt.

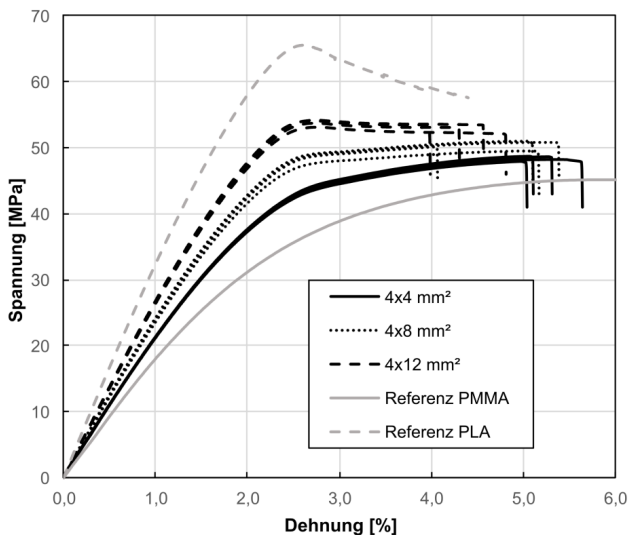


Abb. 111: Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V1 PMMA/PLA

Nachteilig bei dieser Materialkombination sind die Spannungsmaxima, welche bei unterschiedlichen Dehnungen auftreten. HPK mit kleineren Inserts weisen Spannungsmaxima bei höheren Dehnungen auf, da hierbei das PMMA überwiegt. Bei größeren Inserts hingegen tritt das Spannungsmaxima bei geringeren Dehnungen auf, da hierbei das PLA dominiert.

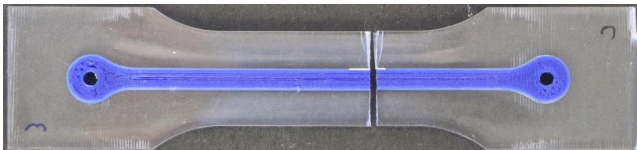


Abb. 112: Bruch PMMA/PLA V1 Insert 4x4 mm²

Beim Bruch der HPK zeigt sich, dass das PMMA deutlich mehr Dehnung aufnehmen könnte. Anstelle der typischen Weißfärbung der stark gedehnten Bereiche wie bei PMMA-Zugprüfkörpern, bleibt die Bruchstelle beim HPK transparent. Der Bruch erfolgt somit spröde und wird beim PMMA durch Spannungsumlagerungen aufgrund des Insertbruchs eingeleitet.

Da V1 bereits sehr gute Ergebnisse lieferte wurde V2 im verkürzten Umfang und V3 nicht getestet, da der Querschnitt im Prüfbereich gleich ist und nur Maßnahmen zur besseren Kraftübertragung hinzugefügt wurden. Eine Änderung der Kennwerte ist daher nicht zu erwarten.

Tab. 22: Kennwerte HPK V1 PMMA/PLA

	Insert 4x4 mm ²			Insert 4x8 mm ²			Insert 4x12 mm ²		
	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.
Spannung [MPa]	47,9	48,4	48,7	49,5	50,4	51,0	53,1	53,8	54,2
Dehnung [%]	4,97	5,16	5,34	4,02	4,83	5,16	2,69	2,73	2,75
Zugmodul [MPa]	2166	2172	2185	2423	2468	2498	2715	2746	2769

Variante 2

Einzig aufgrund des Vergleichs der Bruchdynamik anderer Materialkombinationen wurde für V2 einzelne Versuche durchgeführt. Diese lieferte ähnliche Werte wie V1 (vgl. Abb. 113 und Tab. 23).

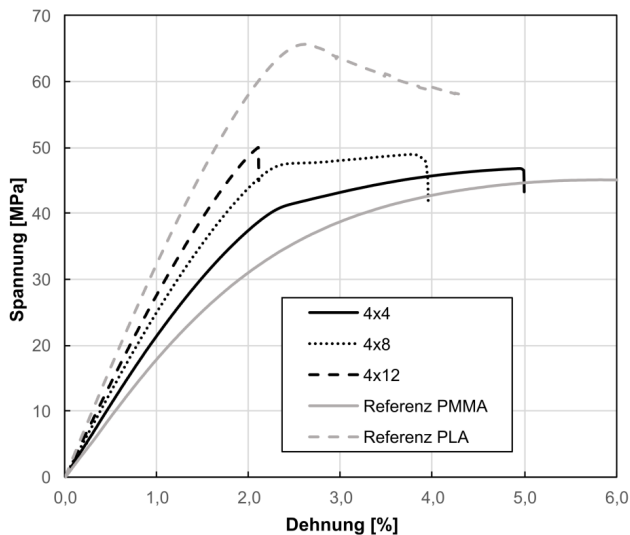


Abb. 113: Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V2 PMMA/PLA

Die Brüche erfolgten bis auf den HPK mit 4x12 mm² Insert im eigentlichen Prüfbereich. Bei der 4x12 mm² Variante riss der HPK, aufgrund der Ablagestrategie an der Bohrung, im Einspannbereich (vgl. Abb. 114).

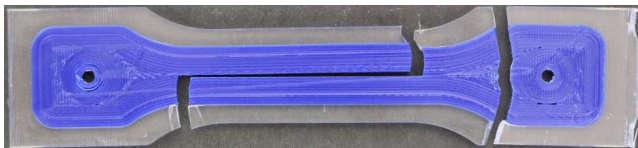


Abb. 114: Bruch PMMA/PLA V2 Insert 4x12 mm²

Tab. 23: Kennwerte HPK V2 PMMA/PLA

	Insert 4x4 mm ²	Insert 4x8 mm ²	Insert 4x12 mm ²
Spannung [MPa]	46,8	49,0	50,0
Dehnung [%]	4,94	3,77	2,11
Zugmodul [MPa]	2208	2592	2884

Variante 4

Die V4 wurde zusätzlich getestet, um Einflüsse der Anordnung der Inserts aufzuzeigen. Gegenüber den weiteren Varianten wurde festgestellt, dass die Bruchdehnung verringert ist. Es ergeben sich hierdurch jedoch keine wesentlichen Änderungen für die Festigkeitsparameter (vgl. Abb. 115 und Tab. 24).

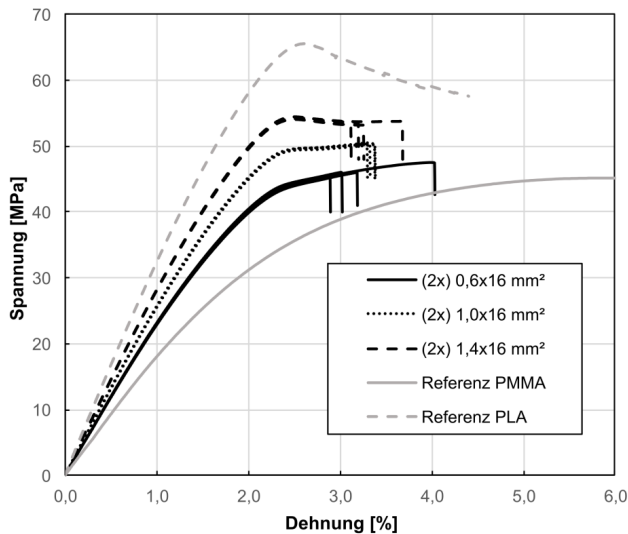


Abb. 115: Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V4 PMMA/PLA

Alle HPK rissen wie in Abb. 116 zu sehen im Prüfbereich.

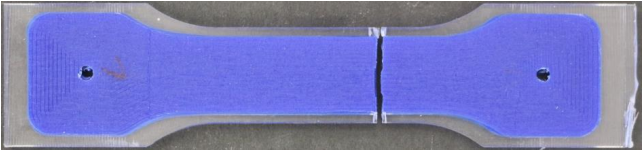


Abb. 116: Bruch PMMA/PLA V4 Insert (2x) 1,0x16 mm²

Tab. 24: Kennwerte HPK V4 PMMA/PLA

	Insert (2x) 0,6x16 mm ²			Insert (2x) 1,0x16 mm ²			Insert (2x) 1,4x16 mm ²		
	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.
Spannung [MPa]	45,2	46,2	47,5	50,2	50,4	50,5	54,1	54,3	54,5
Dehnung [%]	2,87	3,26	3,99	3,29	3,34	3,38	2,49	2,50	2,51
Zugmodul [MPa]	2358	2370	2377	2624	2643	2665	2898	2904	2909

5.2.6 Hybridprüfkörper aus Polymethylmethacrylat und Polyamid 6 mit Glasfasern

Die Kombination von PMMA und PA6GF wiesen bezüglich der Haftung die geringsten Werte der untersuchten Kombinationen auf. Zusätzlich sind die mechanischen Kennwerte dieser Materialien sehr unterschiedlich, wodurch die Kombination dieser Materialien hohe Festigkeitssteigerungen bei geringen Volumenverhältnissen von Insert zu Spritzgießmaterial zulassen.

Variante 1

Die Untersuchung der V1 der Kombination von PMMA und PA6GF lieferte keine verwertbaren Kennwerte. Aufgrund der relativ geringen Haftung von PMMA und PA6GF, des geringen Flächenanteils des Inserts im Einspannbereich und der stark unterschiedlichen Moduln kam es bereits bei geringen Dehnungen zur vollständigen Ablösung von Insert und Spritzgießmaterial. Häufig geschah dies schlagartig, sobald die eingebrachte Spannung im Insert die Haftfestigkeit im Einspannbereich überschritten hat. Dies führte meist zum Bruch des Spritzgießmaterials, da die schlagartige Spannungsverteilung nicht ausgeglichen werden konnte (vgl. Abb. 117). Da dieser Zeitpunkt unterschiedlich stattfand, kam es teilweise zu einer Weißfärbung des PMMAs.

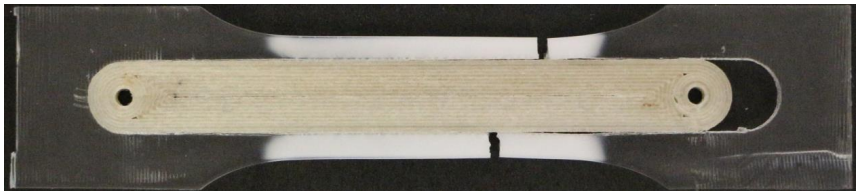


Abb. 117: Bruch PMMA/PA6GF V1 Insert 4x12 mm² durch schlagartiges Abrutschen des Inserts aus der Einspannung

Die höchsten Festigkeitswerte, welche maximal 45,4 MPa betrugen, wurden von HPKn mit 4x4 mm² Inserts erreicht. Dies wurde hauptsächlich aufgrund des konstruktionsbedingten Hinterschnitts bei den Positionierpins ermöglicht, welche das Abrutschen des Inserts aus der Einspannung behinderten.

Variante 2

Die Untersuchung der V2 diente hauptsächlich zum Abgleich des Versagenverhaltens der Kombination aus PA6 und PA6GF. Wie in diesem Abschnitt beschrieben kam es bei dieser Kombination zu einem Bruch des Spritzgießmaterials bei untypisch geringen Dehnungen. Dieses Verhalten wurde bei derselben Geometrie und Spritzgießmaterial, jedoch mit PLA als Insertmaterial nicht beobachtet.

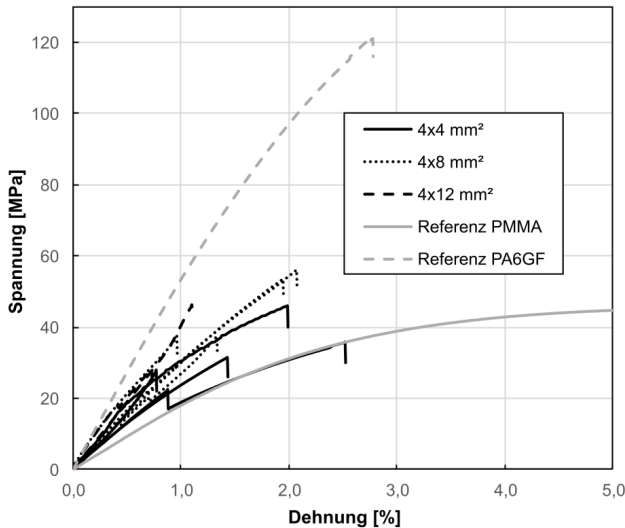


Abb. 118: Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V2 PMMA/PA6GF

Bei den HPKs mit PMMA und PA6GF zeigte sich, dass ein ähnliches Schadensbild erfolgte. Alle Probekörper rissen an den Übergängen des Inserts, wobei die Ausbildung von weißlichen Trübungen in diesen Bereich auf eine lokal erhöhte Dehnung des Spritzgießmaterials hinwiesen. Teilweise zeigten Rissstellen jedoch keine bzw. kaum Trübungen, was die Schlussfolgerung zulässt, dass diese Brüche spröde entstanden (vgl. Abb. 119).

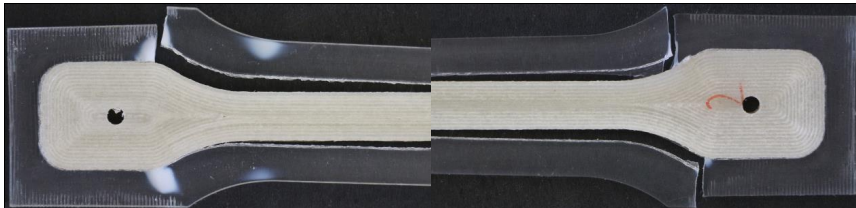


Abb. 119: Bruch PMMA/PA6GF V2. Links: Insert 4x8 mm² mit sichtbarer Weißfärbung; rechts: Insert 4x8 mm² ohne Weißfärbung

Gegenüber der ersten Variante konnten höhere Spannungen von 56,4 MPa mit 4x8 mm² Inserts erreicht werden (vgl. Abb. 118). Es ist anzunehmen, dass die 4x12 mm² Inserts bei den Zugversuchen weitaus bessere Ergebnisse geliefert hätten, jedoch wurden diese Probekörper bei der Entnahme aus der Werkzeugform zerstört oder geschädigt (vgl. Kap. 4.3.5).

Variante 3

V3 dieser Materialkombination diene als Abgleich zur Materialkombination aus PA6 und PA6GF, da diese die besten Ergebnisse lieferte. Bei den Versuchen wurde jedoch, gegenüber dem reinen PMMA, nur geringe Festigkeitssteigerungen erzielt (vgl. Abb. 120), da die HPK meist nicht im vorgesehenen Prüfbereich brachen. In den meisten Fällen wurden die Inserts aus dem umspritzten PMMA, ähnlich V1, gezogen, wodurch das PMMA spröde brach. Nur beim Querschnitt 4x4 mm² konnte teilweise ein Insertbruch im Prüfbereich erreicht werden (vgl. Abb. 121). Aufgrund des Herausziehens konnten bei dieser Variante keine korrekten Zugmodule ermittelt werden.

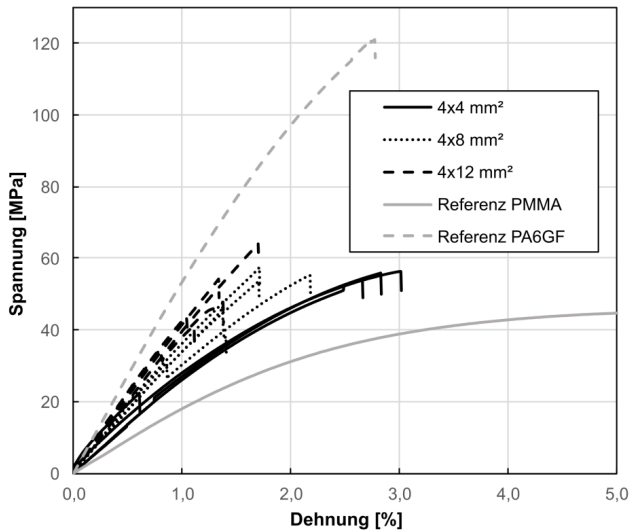


Abb. 120: Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V3 PMMA/PA6GF

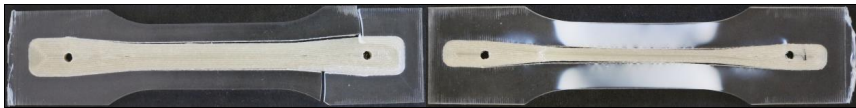


Abb. 121: Bruch PMMA/PA6GF V3; links: Insert 4x4 mm² mit Sprödbbruch von PMMA an der Einspannstelle; rechts: Insert 4x8 mm² Insertbruch

Variante 4

Die V4 zeigte bereits bei vorangegangenen Untersuchungen, dass diese bezüglich der Kraftübertragung gute Ergebnisse lieferte. Dies ist auch bei der Materialkombination von PMMA und PA6GF der Fall. Es konnten beim Versuch die angestrebten Festigkeitssteigerungen bei allen Insertgrößen erzielt werden. Wie in Abb. 123 zu sehen brachen alle Probekörper im vorgesehenen Prüfbereich.

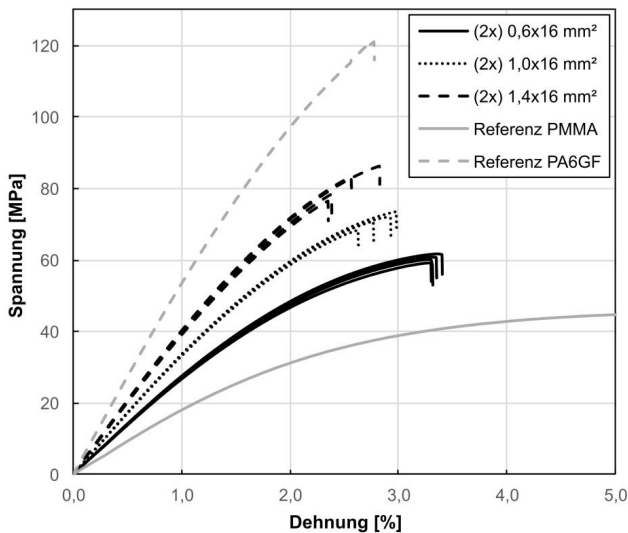


Abb. 122: Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V4 PMMA/PA6GF

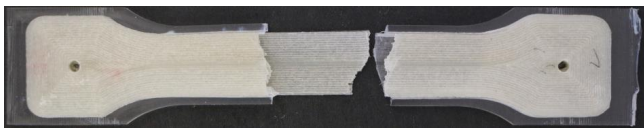


Abb. 123: Bruch PMMA/PA6GF V4 Insert (2x) 1,0x16 mm²

Tab. 25: Kennwerte HPK V4 PMMA/PA6GF

	Insert (2x) 0,6x16 mm²			Insert (2x) 1,0x16 mm²			Insert (2x) 1,4x16 mm²		
	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.
Spannung [MPa]	59,2	60,5	61,7	68,3	71,2	73,6	76,5	81,1	86,3
Dehnung [%]	3,28	3,31	3,36	2,63	2,82	2,98	2,35	2,53	2,82
Zugmodul [MPa]	2743	2781	2809	3397	3431	3446	4006	4079	4137

5.3 Bewertung der Hybridprüfkörper

5.3.1 Zugmodul

Vergleicht man die gemessenen Zugmoduln der HPK mit Zugmoduln, welche aus den Kennwerten der Grundmaterialien mit der Verhältnisgleichung ermittelt wurden (vgl. 5.2.1), so zeigt sich eine gute Übereinstimmung bei allen erfolgreich getesteten Varianten (vgl. Abb. 124). Grundsätzlich kann diese Kalkulation zur Vorhersage des zu erwartenden Zugmoduls eines HPKs verwendet werden, wobei die Voraussetzung einer guten Kraftübertragung zwischen Spritzgießmaterial und Insert besteht.

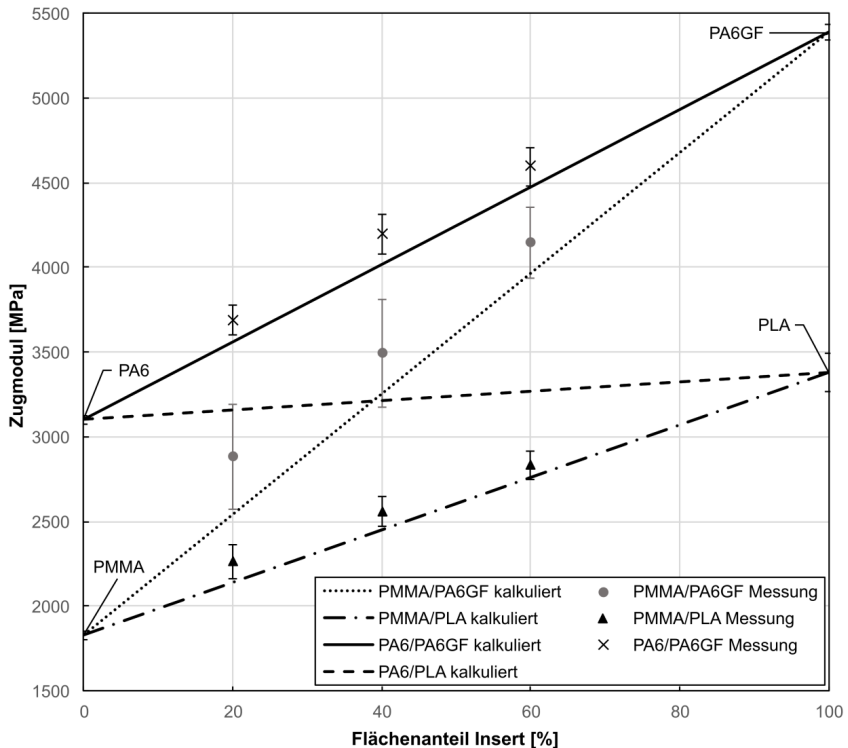


Abb. 124: Vergleich zwischen gemessenen und kalkulierten Zugmoduln von HPK

Die leicht höheren Zugmodulwerte der HPK gegenüber den kalkulierten bei einigen Inserts können z. B. durch ein unterschiedliches Abkühlverhalten erklärt werden. Bei den HPK ist der Abkühlvorgang der Schmelze durch die kalt eingelegten Inserts gegenüber dem Abkühlvorgang der DIN EN ISO 527 1A Zugprüfkörper und der HPKR verändert. Hierdurch kann bereits eine Diskrepanz zwischen den für die Berechnung verwendeten Kennwerten und den realen Kennwerten im Spritzgussmaterial des HPK entstehen.

Dies zeigt auch der Vergleich zwischen den ISO 527 Typ A1 Zugprüfkörpern gegenüber den HPKR (vgl. Kap. 3.4.1 und 3.5.1), bei welchen bereits unterschiedliche Zugmoduln gemessen wurden. Daher können die Zugmoduln der Referenzen von den wahren Zugmoduln des Spritzgießmaterials der HPK abweichen.

Des Weiteren kann die Messmethodik zu diesem Effekt führen. Die Dehnungsmessaufnehmer liegen hauptsächlich am Insert an, welches meist den höheren Zugmodul aufweist. Verteilt sich Gesamtdehnung des HPKs ungleich kann dies ebenfalls einen leicht erhöhten Wert erklären. Ebenfalls kann ein Abgleiten des Inserts vom Spritzgießmaterial zu ungleichen Dehnungsverhältnissen führen. Dies zeigt sich an den hohen Abweichungen der Zugmoduln bei der Kombination von PMMA mit PA6GF der Varianten 2 und 3. Bei PA6 mit PLA, war dieses Problem ebenfalls vorhanden, wodurch keine plausiblen Moduln gemessen werden konnten.

5.3.2 Erreichbare Festigkeiten

Die erreichbaren Festigkeiten der HPK zeigen eine gute Übereinstimmung mit den jeweils kalkulierten Werten. Es wurden hierbei nur Konzepte verglichen, bei welchen der Großteil der Prüfkörper im Prüfbereich gerissen sind.

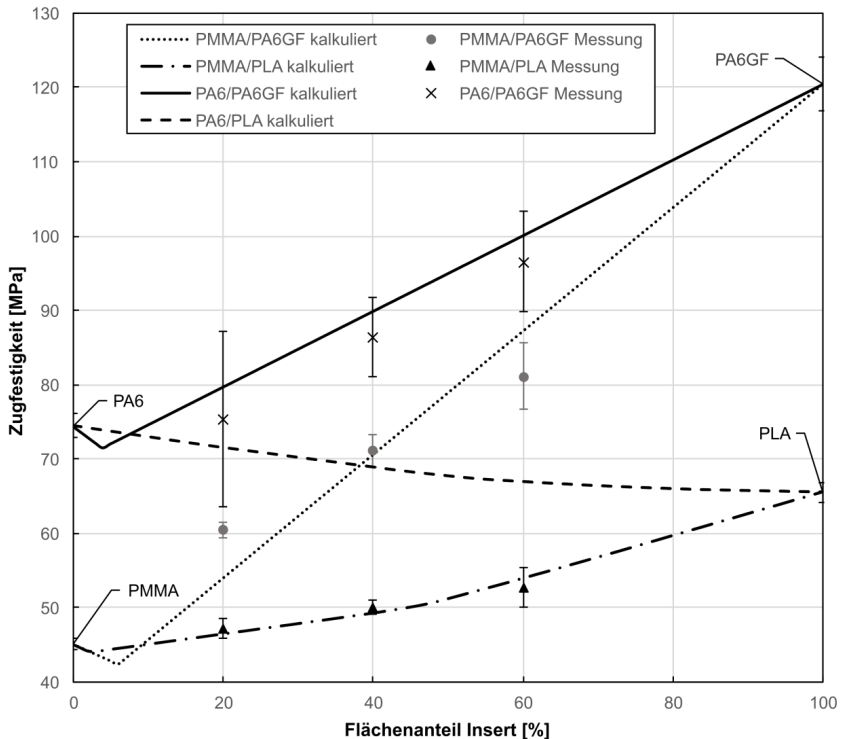


Abb. 125: Vergleich gemessener mit kalkulierter Zugfestigkeit verschiedener HPK

5.3.3 Vergleich Konzepte

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die vorgestellten Varianten nur eingeschränkt für die unterschiedlichen Materialkombinationen eingesetzt werden können.

V1 konnte nur bei der Kombination mit PLA und PMMA erfolgreich getestet werden. Bei den weiteren Kombinationen stellte sich die Kraftübertragung an der Einspannung als unvorteilhaft heraus. Bei den beiden nicht kompatiblen Materialkombinationen, PMMA mit PA6GF und PA6 mit PLA, erfolgte bereits bei geringen Dehnungen eine Trennung von Insert und Spritzgießmaterial.

Bei V2 wurde die Fläche im Einspannbereich des Inserts deutlich vergrößert, wodurch eine bessere Kraftübertragung auf das Insert erfolgen sollte. Aufgrund dieser konstruktiven Maßnahme wurden Radien beim Übergang vom Einspann- zum Prüfbereich notwendig. Diese hatten bei Inserts aus PA6GF fundamentale Auswirkungen auf die Bruchmechanik des Spritzgießmaterials. Bedingt durch höhere Spannungen nahe der Radien, aufgrund der Überlagerung der eigentlichen Zugspannung mit einer durch die Ablösung von Insert und Spritzgießmaterial bedingten Biegespannung, kombiniert mit herausragenden Glasfasern, welche Kerben im Material verursachten, führte dies beim

Spritzgießmaterial bereits zu vorzeitigen spröden Brüchen. Es konnte wiederum nur die Materialkombination von PMMA mit PLA bei V2 erfolgreich getestet werden.

V3 wurde nur an PA6GF Inserts getestet, da dies eine Kombination aus V1 und V2 ist. Es konnte gezeigt werden, dass der Sprödebruch des PA6 bei V2 hauptsächlich von den Radien des Inserts abhängig ist, da V3 erwartungsgemäß erst bei Erreichen der kritischen Dehnung des PA6GF im Prüfbereich gebrochen ist. Die Kombination aus PMMA und PA6GF konnte hierbei nicht erfolgreich getestet werden, da aufgrund des sehr steifen PA6GF Inserts und des verhältnismäßig weichen PMMA die Kraftübertragung bei V3 nicht optimal war.

V4 stellte sich als die für die Herstellung von HPKn vielversprechendste Variante heraus. Alle getesteten Materialkombinationen erreichten die zu erwartenden Festigkeitswerte, wobei die Kombination PA6 mit PA6GF bezüglich der Bruchstelle ein suboptimales Verhalten aufwies. Dies könnte durch Anbringung von Positionierpins auf beiden Werkzeughälften gelöst werden. Nachteilig ist bei dieser Variante der höhere Aufwand gegenüber den vorangegangenen, da zwei Inserts pro HPK gedruckt und positioniert werden mussten.

Zu beachten ist, dass die Beurteilung der Konzepte auf Basis der vorherrschenden Situation getätigt wurde. Die Kraftübertragung erfolgte hierbei mit pneumatischen Klemmen am Einspannbereich der HPK. Andere Arten die Kraft zu übertragen wie z. B. über Verschraubung oder Verklebung könnten andere Ergebnisse liefern.

Hinsichtlich Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit wiesen alle HPK Mängel auf. Hingegen des angestrebten Ziels der kompletten Umspritzung des Inserts, wodurch die Oberfläche und Maßhaltigkeit hauptsächlich vom Spritzgießmaterial und der Form abhängig sind, sind bei den verwendeten Varianten immer Oberflächen der gedruckten Bauteile vorhanden. Diese weisen in Abhängigkeit von Material und Druckrichtung unterschiedlich gute Oberflächen auf. Die auf der Druckplatte befindliche Seite ist dabei i. d. R. deutlich besser, da diese die glatte Oberfläche der Druckplatte abformt. Daher weist auch V4 gegenüber den anderen Varianten deutlich bessere Oberflächen auf, da auf beiden Seiten nur die zur Druckplatte gewandte Seite des jeweiligen Drucks an der Oberfläche des HPKs ist.

Die Maßhaltigkeit stellt jedoch ein größeres Problem dar. Bei nicht aufeinander haftender Materialkombinationen kann es zum partiellen Ablösen von Insert und Spritzgießmaterial kommen, wodurch Maße von Bauteilen beeinträchtigt werden. Insbesondere HPK mit der Kombination von PMMA und PA6GF wiesen diese Probleme auf. Ebenfalls kann die Dicke der Inserts bei V1, V2 und V3 die Dicke der HPK beeinflussen, da die Maßhaltigkeit der HPK hauptsächlich von der Maßhaltigkeit der gedruckten Objekte abhängt. Die V4 lieferte hinsichtlich Maßhaltigkeit ebenfalls das beste Ergebnis, da die Dickenschwankung der Druckobjekte durch den Schichtaufbau ausgeglichen werden konnte.

5.3.4 Vergleich Gewichtstheorem

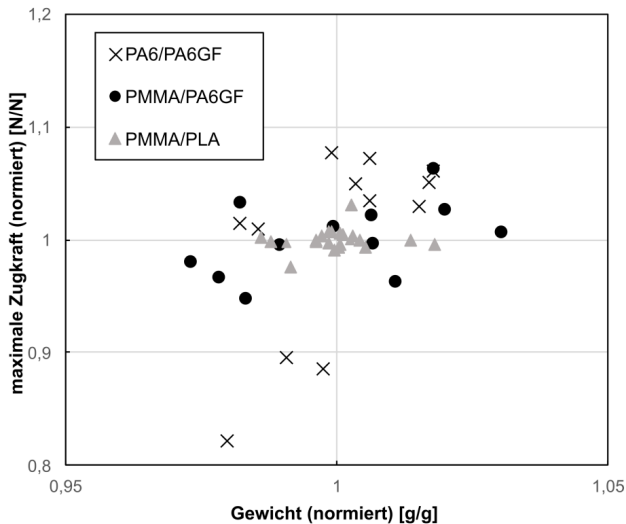


Abb. 126: Vergleich maximaler Zugkraft mit Insertgewicht von HPKn

Die in Kap. 3.7.2 aufgestellte Abhängigkeit der maximalen Zugkraft gedruckter Zugprüfkörper in Abhängigkeit von deren Gewicht ist bei den HPKn nur bedingt gültig. Es zeigte sich, dass die erreichbare maximale Kraft der HPK nur bedingt von dem Gewicht der Inserts abhängig ist (vgl. Abb. 126). Die Übereinstimmung mit der These ist bei Inserts aus PA6GF größer als bei Inserts aus PLA. Es wurden hierbei nur Varianten verglichen, welche hauptsächlich im Prüfbereich gebrochen sind. Zudem konnte die Kraft des HPKs nur mit dem Gewicht des eingesetzten Inserts verglichen werden, da aufgrund der Abtrennung des Angusses Ungenauigkeiten bei der Bestimmung des Gewichts des HPKs entstanden sind.

Da das Volumen des Spritzgießmaterials aufgrund des eingenommenen Volumens des Inserts in der Spritzgießform geringfügig variiert; könnte dies die Diskrepanz erklären.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Dissertation wird die Kombination zweier kunststoffverarbeitender Verfahren untersucht, um Hybridkörper zu erzeugen, welche die Vorteile beider Verfahren beinhalten. Der Spritzgussprozess, welcher zur schnellen Herstellung von Massenartikeln eingesetzt wird, wird durch die Integration von 3D-gedruckten Inserts erweitert. Hierdurch wird es möglich, das gespritzte Formteil durch Eigenschaften zu ergänzen, welche nicht durch reine Spritzgießfertigung herstellbar sind. Nach der Vorstellung des prinzipiellen Verfahrens in Kap. 1 wird im Weiteren der Fokus auf die Untersuchung von Festigkeitssteigerung für Spritzgießteile durch FDM-gedruckte Inserts gelegt.

Da, im Gegensatz zum Spritzguss, die FDM-Technologie weniger Bekanntheit besitzt und in der Literatur unterrepräsentiert ist, wird in Kap. 2 näher auf diese eingegangen. Es wird der Aufbau und Funktion von FDM-Druckern beschrieben. Zudem wird auf die Einstellparameter und deren Auswirkung auf die Festigkeit 3D-gedruckter Bauteile näher eingegangen. Hierzu werden Ergebnisse zahlreicher veröffentlichter Studien verglichen, zusammengefasst und mit eigenen Studien ergänzt, wodurch eine Auflistung festigkeitsrelevanter Parameter, nach derzeitigen Stand der Technik, generiert wird. Es kann hierbei gezeigt werden, dass bei gewissen Rahmenbedingungen das Gewicht der gedruckten Bauteile eine signifikante Rolle für deren Festigkeit spielt. Hierbei ist fraglich, ob Druckparameter, welche in der Literatur oftmals als signifikante Einstellparameter dargestellt werden, eher Störfaktoren sind, welche aufgrund unvorteilhafter Auslegung zur Gewichtsvariation gedruckter Bauteile führen und somit die Festigkeit beeinflussen.

Zudem zeigt die Recherche, dass viele Studien auf reinen DOE-Analysen basieren, welche Schlussfolgerungen auf quantitativer Basis durchführen. Interaktionen von Druckparametern werden häufig nicht genannt oder näher betrachtet. Ebenfalls bestehen derzeit keine Qualitätsanforderungen an gedruckte Objekte bzw. Prüfkörper, welche ein Mindestmaß an Vergleichbarkeit oder Reproduzierbarkeit gewährleisten⁸⁹. Es können somit gedruckte Prüfkörper mit starken Mängeln verglichen werden, bei welchen ein unzureichend eingestellter Druckprozess vorliegt. Die Ergebnisse aus solchen Vergleichen ist daher kritisch zu hinterfragen. Zudem sind sehr viele verwendete Parameter unbekannt. Häufig sind auch Bezeichnungen in der Literatur stark unterschiedlich, da diese meist nicht näher definiert sind. Häufig können diese nur im entsprechenden Kontext verständlich werden.

Für die Untersuchung der Hybridbauteile werden in Kap. 3 vier Materialien näher charakterisiert. Für den Spritzguss werden PA6 und PMMA und für die FDM-Fertigung die Materialien PLA und PA6GF verwendet. Das für die Verarbeitung entsprechende Filament aus PA6GF wird aus Granulat extrudiert und der Einfluss der Dickenschwankungen des Filaments auf das Bauteilgewicht und somit dessen Festigkeit näher untersucht. Es zeigt sich, dass die Konditionierung aufgrund unterschiedlich gedruckter Bauteile Schwierigkeiten mit sich bringt.

In Kap 4 werden Spritzgießversuche durchgeführt und unterschiedliche Inserts getestet. Es konnte somit ein Spritzgießwerkzeug entwickelt werden, mit welchem anschließend HPK erzeugt werden. Zudem konnten weitere Herausforderungen beim Einsatz von gedruckten Inserts, wie z. B. ungleicher Verzug, aufgezeigt werden. Auch hat es sich herausgestellt, dass eine vollständige Umspritzung von Inserts, mit der verwendeten Geometrie, nicht möglich ist.

Der Schmelzeffluss spielt beim Umspritzen eine signifikante Rolle. Aufgrund der typischen Strukturviskosität von Polymeren kommt es zu einer ungleichen Schmelzefront bei Füllung der Kavitäten, welche näher untersucht und veranschaulicht wird. Die Nachbildung dieser Fließfront mittels Simulation kann nur mit starken Einschränkungen durchgeführt werden. Der Effekt wird erst bei sehr feinen Netzen sichtbar, jedoch entspricht die Stärke der Ausprägung nicht der der realen Versuche.

⁸⁹ Vergleichsweise müssen beim Spritzguss Probekörper mit offensichtlichen Mängeln von der Prüfung ausgenommen werden. DIN EN ISO 294 [75] liefert hierzu entsprechende Vorgaben.

Bei der Haftfestigkeitsuntersuchung in Kap. 5.1 wird, basierend auf unterschiedlichen Geometrien, die Haftung zwischen Insert und Spritzgießmaterial untersucht. Es kann hierbei gezeigt werden, dass diese sich ausreichend gut miteinander verbinden lassen, wobei die Geometrie und die Adhäsion der Materialien eine wichtige Rolle spielen. Außerdem erwies sich die 3D-Druckstruktur aufgrund der Oberflächenunebenheiten als vorteilhaft. Um die Haftung weiter zu steigern, könnten die Inserts im vorgewärmten Zustand ins Werkzeug gelegt werden, um eine eventuelle Interdiffusion zu begünstigen. Weiterhin könnte die mit dem Spritzgießmaterial kontaktierte Fläche des Inserts durch verschiedene Maßnahmen, wie z. B. Beschichtung, Aktivierung, Funktionalisierung, behandelt werden.

Bei Untersuchung der Festigkeit konnte bewiesen werden, dass ein durch ein Insert verstärktes Hybridbauteil deutlich mehr Festigkeit aufweist, als das reine Spritzgießbauteil. Die richtige Auslegung spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Bei kompatiblen Materialien lassen sich die induzierten Kräfte besser vom Spritzgießmaterial auf das Insert übertragen als bei inkompatiblen, wobei bei beiden Kombinationen ein möglichst großer Kontaktbereich zwischen Insert und Spritzgießmaterial vorteilhaft ist.

Es hat sich herausgestellt, dass im Insertmaterial vorhandene Glasfasern die Eigenschaften von HPK, aufgrund der Beeinflussung des Bruchverhaltens des Spritzgießmaterials, negativ beeinflussen können. Einzelne Glasfasern können aus dem Insert herausragen und somit zu einer Schwächung des Spritzgießmaterial führen, welches dadurch bereits bei geringen Dehnungen spröde bricht. Durch Optimierung der Insertgeometrie kann dies unterbunden werden. Ebenfalls hat sich bei PA6 gezeigt, dass eine Konditionierung mit Wasser die Empfindlichkeit gegenüber hereinragenden Fasern deutlich reduziert. Fraglich ist, wie sich diese Beeinflussung bei steigendem Fasergehalt auswirkt, da das verwendete Granulat mit 15 % Glasfasern nur einen geringen Anteil aufweist. Meist werden höhere Fasergehalte zwischen 30 % und 50 % bei gängigen Polymeren verwendet.

Die Versuche werden im trockenen Zustand von PA6 und PA6GF durchgeführt, da die Konditionierung zum Sättigungszustand bei Normalklima zu zeitintensiv und aufgrund der Materialkombination unsicher ist. Um genauere Aussagen über Kennwerte bei realen Einsatz zu erhalten sollten daher noch ergänzende Versuche bei Normalklima durchgeführt werden.

Bei der Untersuchung der Festigkeit wird das Hauptaugenmerk auf die Machbarkeit und auf die Festigkeitssteigerung des Spritzgießmaterials durch das Insert gelegt. Hierdurch werden einige Aspekte nicht betrachtet bzw. ignoriert, welche für einen sinnvollen Einsatz dieser Verfahrenskombination unerlässlich sind. So ist die Druckzeit mit 13 min bis 40 min für PLA und 27 min bis 80 min für PA6GF pro Insert deutlich reduzierbar. Ebenfalls müssten qualitative Mängel, welche hauptsächlich durch Filamentdickenschwankungen entstehen, näher betrachtet werden, um eine bessere Reproduzierbarkeit der Hybridkörper zu gewährleisten.

Die Kombination der Auslegung der Inserts mit Hilfe von Lastpfadoptimierung wird in Kap. 1 erwähnt. Die Versuche werden basierend auf einer Zugstabgeometrie getätigt, welche eine Lastpfadoptimierung entbehrlich machen. Ergänzende Versuche an anderen Probekörpergeometrien mit entsprechender Auslegung über Lastpfadoptimierung könnten weitere Herausforderungen des vorgestellten Verfahrens aufzeigen.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 8580-Begriffe, Einteilung: Fertigungsverfahren“, 2003.
- [2] Michaeli, Walther and Lettowsky, Christoph, „Sonderverfahren des Spritzgießens“ in *Medizintechnik: Life Science Engineering*, Wintermantel, Erich and Ha, Suk-Woo, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 597–639.
- [3] C. Hopmann und W. Michaeli, „Verarbeitungsverfahren für Kunststoffe“ in *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017, S. 111–245.
- [4] *Kombinationstechnologien auf Basis des Spritzgießverfahrens*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016.
- [5] Baur, Brinkmann, Osswald, Rudolph und Schmachtenberg, „Additive, Füllstoffe und Fasern“ in *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013, S. 723–783.
- [6] T. Schröder, *Rheologie der Kunststoffe: Theorie und Praxis*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2018.
- [7] BASF, „Technische Information- Verzugverhalten von faserverstärkten Spritzgussteilen“, 2014.
- [8] G. Menges, W. Michaeli, E. Haberstroh und E. Schmachtenberg, *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe*, 6. Aufl. München: Hanser, 2011.
- [9] G. Menges, *Die Glasfaserorientierung und ihr Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften thermoplastischer Spritzgießteile — Eine Abschätzmethode*.
- [10] B. Bonpain, „Entwicklung und prozesstechnische Analyse eines festen und mediendichten Kunststoff - Metall - Verbundes“. Dissertation, Universitätsbibliothek Dortmund, Dortmund, 2016.
- [11] N A de Bruyne, „The Physics of Adhesion“, *Journal of Scientific Instruments*, Jg. 24, Nr. 2, S. 29–35, <https://doi.org/10.1088%2F0950-7671%2F24%2F2%2F301>, 1947.
- [12] G. Habenicht, *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [13] T. Härtig, *Stoffübertragung beim Spritzgießen*. @Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2013.
- [14] S. S. Voyutskii und V. L. Vakula, „The role of diffusion phenomena in polymer-to-polymer adhesion“, *Journal of Applied Polymer Science*, Jg. 7, Nr. 2, S. 475–491, 1963.
- [15] M. Schuck, „Kompatibilitätsprinzipien beim Montagespritzgießen“. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 2009, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Univ. Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2009.
- [16] H. Gleich, „Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie“. Duisburg, Essen, Univ., Diss., 2004.
- [17] M. Kumke, *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [18] Verein Deutscher Ingenieure e.V., „VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren“, 2014.
- [19] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO/ASTM 52900: Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie“, 2017.
- [20] Raphael S., *Die vier verschiedenen Typen FDM Drucker*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.3dnatives.com/de/typen-fdm-drucker-310520171/>. Zugriff am: Mai. 14 2019.

-
- [21] Philip Steffan, *3D-Drucker Ultimaker 2*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.heise.de/ct/ausgabe/2014-14-Test-3D-Drucker-Ultimaker-2-2234301.html>. Zugriff am: Jun. 29 2019.
- [22] Tractus3D, *Desk Series 3D Printers - T1250*. [Online] Verfügbar unter: <https://tractus3d.com/our-industrial-3d-printers/industrial-3d-printer/>. Zugriff am: Jun. 29 2019.
- [23] Sam Westin, *The Ultimate Polar 3D Printer Review*. [Online] Verfügbar unter: <https://total3dprinting.org/the-ultimate-polar-3d-printer-review-youll-want-to-read/>. Zugriff am: Jun. 29 2019.
- [24] Simplify3D, *Print Quality Troubleshooting Guide*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>. Zugriff am: Mai. 15 2019.
- [25] rigid.ink, *The Ultimate 3D Print Quality Troubleshooting Guide 2019*. [Online] Verfügbar unter: <https://rigid.ink/pages/ultimate-troubleshooting-guide#issue-walls-caving-in-16>. Zugriff am: Mai. 15 2019.
- [26] Alastair Jennings, *3D Printing Troubleshooting 41 Common Problems in 2019*. [Online] Verfügbar unter: <https://all3dp.com/1/common-3d-printing-problems-troubleshooting-3d-printer-issues/>. Zugriff am: Mai. 15 2019.
- [27] V. Kuznetsov, A. Solonin, O. Urzhumtsev, R. Schilling und A. Tavitov, *Strength of PLA components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3D printer as a function of geometrical parameters of the process*.
- [28] M. Leite, j. fernandes, A. Deus, L. Reis und M. F. Vaz, „STUDY OF THE INFLUENCE OF 3D PRINTING PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PLA“ in *3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing*, 2018.
- [29] J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza und P.J. Núñez, „Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection“, *Materials & Design*, Jg. 124, S. 143–157, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517303143>, 2017.
- [30] Fuda Ning, Weilong Cong, Yingbin Hu und Hui Wang, „Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties“, *Journal of Composite Materials*, Jg. 51, Nr. 4, S. 451–462, 2017.
- [31] A. Rodriguez-Panes, J. Claver und A. M. Camacho, „The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis“ (eng), *Materials (Basel, Switzerland)*, Jg. 11, Nr. 8, 2018.
- [32] Rajpurohit, Shilpesh R. and Dave, Harshit K., „Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 101, Nr. 5, S. 1525–1536, 2019.
- [33] H. Li, T. Wang, J. Sun und Z. Yu, „The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties“, *Rapid Prototyping Journal*, Jg. 24, S. 0, 2017.
- [34] F. Johansson, „Optimizing Fused Filament Fabrication 3D printing for durability : Tensile properties and layer bonding“, Blekinge Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering; Department of Mechanical Engineering.
- [35] K. D. Pham, „Quasi-Static Tensile and Fatigue Behavior of Extrusion Additive Manufactured ULTEM 9085“, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [36] A. W. Gebisa und H. G. Lemu, „Investigating Effects of Fused-Deposition Modeling (FDM) Processing Parameters on Flexural Properties of ULTEM 9085 using Designed Experiment“ (eng), *Materials (Basel, Switzerland)*, Jg. 11, Nr. 4, 2018.
- [37] A. Elisa Costa, A. Ferreira da Silva und O. Carneiro, „A study on extruded filament bonding in fused filament fabrication“, *Rapid Prototyping Journal*, 2018.

- [38] Rayegani, Farzad and Onwubolu, Godfrey C., „Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE)“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 73, Nr. 1, S. 509–519, 2014.
- [39] Akhoundi, B. and Behraves, A. H., „Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products“, *Experimental Mechanics*, 2019.
- [40] Sung-Hoon Ahn, Michael Montero, Dan Odell, Shad Roundy und Paul K. Wright, „Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS“, *Rapid Prototyping Journal*, Jg. 8, Nr. 4, S. 248–257, 2002.
- [41] L. Baich, G. Manogharan und H. Marie, „Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts“, *International Journal of Rapid Manufacturing*, Jg. 5, S. 308, 2015.
- [42] Dario Croccolo, Massimiliano De Agostinis und Giorgio Olmi, „Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30“, *Computational Materials Science*, Jg. 79, S. 506–518, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927025613003741>, 2013.
- [43] Christian Lubombo und Michel A. Huneault, „Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts“, *Materials Today Communications*, Jg. 17, S. 214–228, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492818301600>, 2018.
- [44] Suraj Ravindrababu, Yunus Govdeli, Zhuo Wei Wong und Erdal Kayacan, „Evaluation of the influence of build and print orientations of unmanned aerial vehicle parts fabricated using fused deposition modeling process“, *Journal of Manufacturing Processes*, Jg. 34, S. 659–666, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612518308764>, 2018.
- [45] Kate Iren Byberg, Aboma Wagari Gebisa und Hirpa G. Lemu, „Mechanical properties of ULTEM 9085 material processed by fused deposition modeling“, *Polymer Testing*, Jg. 72, S. 335–347, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941818312923>, 2018.
- [46] G D Kim und Y T Oh, „A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: Quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Jg. 222, Nr. 2, S. 201–215, 2008.
- [47] Rankouhi, Behzad and Javadpour, Sina and Delfanian, Fereidoon und Letcher, Todd, „Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation“, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Jg. 16, Nr. 3, S. 467–481, 2016.
- [48] B. Turner, R. Strong und S. Gold, „A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling“, *Rapid Prototyping Journal*, Jg. 20, 2014.
- [49] C. Benwood, A. Anstey, J. Andrzejewski, M. Misra und A. K. Mohanty, „Improving the Impact Strength and Heat Resistance of 3D Printed Models: Structure, Property, and Processing Correlations during Fused Deposition Modeling (FDM) of Poly(Lactic Acid)“, *ACS Omega*, Jg. 3, Nr. 4, S. 4400–4411, 2018.
- [50] V. E. Kuznetsov, A. N. Solonin und A.G. Tavitov, „Increasing Strength of FFF 3D Printed Parts by Influencing on Temperature-Related Parameters of the Process“, 2019.
- [51] R. A. Wach, P. Wolszczak und A. Adamus-Wlodarczyk, „Enhancement of Mechanical Properties of FDM-PLA Parts via Thermal Annealing“, *Macromolecular Materials and Engineering*, Jg. 303, Nr. 9, S. 1800169, 2018.
- [52] S.F. Costa, F.M. Duarte und J.A. Covas, „Estimation of filament temperature and adhesion development in fused deposition techniques“, *Journal of Materials Processing Technology*, Jg. 245, S. 167–179, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013617300791>, 2017.

-
- [53] A. Tsouknidas *et al.*, „Impact absorption capacity of 3D-printed components fabricated by fused deposition modelling“, *Materials & Design*, Jg. 102, S. 41–44, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516304282>, 2016.
 - [54] P. Pinter *et al.*, „Mechanical Properties of Additively Manufactured Polymer Samples Using a Piezo Controlled Injection Molding Unit and Fused Filament Fabrication Compared with a Conventional Injection Molding Process“.
 - [55] Vinzenz Nienhaus, Kevin Smith, Dieter Spiehl und Edgar Dörsam, „Investigations on nozzle geometry in fused filament fabrication“, *Additive Manufacturing*, Jg. 28, S. 711–718, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221486041930048X>, 2019.
 - [56] Halil L. Tekinalp *et al.*, „Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing“, *Composites Science and Technology*, Jg. 105, S. 144–150, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353814003716>, 2014.
 - [57] Blake P. Heller, Douglas E. Smith und David A. Jack, „Effects of extrudate swell and nozzle geometry on fiber orientation in Fused Filament Fabrication nozzle flow“, *Additive Manufacturing*, Jg. 12, S. 252–264, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860416301166>, 2016.
 - [58] A. Heuer, P. Pinter und K. A. Weidenmann, „Analysis of the Effects of Raster Orientation in Components Consisting of Short Glass Fibre Reinforced ABS of Different Fibre Volume Fraction Produced by Additive Manufacturing“ in *21st Symposium on Composites*, 2017, S. 482–489.
 - [59] Alkaios Bournias Varotsis, *Introduction to FDM 3D printing*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>.
 - [60] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 527: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften“, 2012.
 - [61] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 178: Kunststoffe –Bestimmung der Biegeeigenschaften“, 2013.
 - [62] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 51007: Thermische Analyse (TA) – Differenz-Thermoanalyse (DTA) und Dynamische Differenzkalorimetrie(DSC) - Allgemeine Grundlagen“, 2019.
 - [63] *Saechting Kunststoff Taschenbuch*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013.
 - [64] O Martin und L Avérous, „Poly(lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems“, *Polymer*, Jg. 42, Nr. 14, S. 6209–6219, 2001.
 - [65] W. Kaiser, *Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung*, 4. Aufl. München: Hanser, 2016.
 - [66] Y. Vordermann, „Probekörperdicke beeinflusst mechanische Eigenschaften“, *Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, Nr. 103, S. 170–174, 2013.
 - [67] G. W. Ehrenstein, *Polymer Werkstoffe: Struktur Eigenschaften Anwendung*, 3. Aufl. München: Hanser Verlag, 2011.
 - [68] J. Hertling, *Ausbreitungsgeschwindigkeit von instabilen Rissen in Polymeren bei tiefen Temperaturen*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 1999. Karlsruhe, 1999.
 - [69] T. Curcic, „Synthese und Charakterisierung von amphipolaren Blockcopolymeren und Untersuchung des Phasenverhaltens in Mischungen mit Polypropylen“. Stuttgart, Universität Stuttgart, Diss., 2012, Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2012.
 - [70] R. Dauth, „Entwicklung eines Probekörpers zur Ermittlung der Verbundfestigkeit im FDM Prozess“. Bachelorthesis, Hochschule Heilbronn, 2017.
 - [71] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 291: Kunststoffe -Normalklimate für Konditionierung und Prüfung“, 2008.

- [72] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 483: Kunststoffe – Kleine Kammern für die Konditionierung und Prüfung bei konstanter relativer Luftfeuchte über wässrigen Lösungen“, 2006.
- [73] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 1110: Polyamide - Beschleunigte Konditionierung von Probekörpern“, 1998.
- [74] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 20753: Kunststoffe - Probekörper“, 2019.
- [75] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 294-1: Kunststoffe – Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten“, 2017.
- [76] J. P. Beaumont, *Auslegung von Anguss und Angusskanal*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.
- [77] *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, 6. Aufl. Berlin: Springer, 2005.
- [78] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faserverbundwerkstoffen*, 1. Aufl. Berlin: Springer, 2004.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Verfahrensablauf der kombinierten Fertigung	2
Abb. 2:	Berechneter Lastpfad einer Abdeckung mit 30 % Restvolumen; mittige Last mit Lagerung an seitlichen Bohrungen	3
Abb. 3:	Umspritztes Insert mit 3D-Kanal. Oben: gefertigtes Bauteil mit Sichtfenster; unten: CAD-Modell.....	4
Abb. 4:	Umspritztes Insert aus TPU als flexibles Element	4
Abb. 5:	Optisch angepasste Spritzgussbauteile.....	5
Abb. 6:	Strömungsvorgang einer Kunststoffschmelze im Spalt (links) und Dehnströmung (rechts).....	8
Abb. 7:	Adhäsionstheorien	9
Abb. 8:	Prozesskette der additiven Fertigung	11
Abb. 9:	Prinzipskizze FDM	12
Abb. 10:	Unterschiedliche Arten von FDM Bewegungseinheiten.....	13
Abb. 11:	Schnittbild Extruder mit Einflussparameter	14
Abb. 12:	Parameter der Extrusionslinien.....	17
Abb. 13:	Einfluss Druckmuster, Orientierung und Füllgrad	19
Abb. 14:	Bauteilorientierung und -positionierung auf dem Druckbett.....	20
Abb. 15:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm unterschiedlich positionierter Zugprüfkörper (Mittelwerte)	21
Abb. 16:	Verschmelzung von Polymeren durch Interdiffusion beim FDM.....	23
Abb. 17:	Maximale Zugkraft in Abhängigkeit des Zugprobengewichts unterschiedlicher 3D-Drucker und Parameter.....	25
Abb. 18:	Maximale Zugkraft in Abhängigkeit verschiedener Parameter	26
Abb. 19:	Einfluss des Düsendurchmessers auf die Zugeigenschaften (Mittelwerte)	28
Abb. 20:	Fehlstellen aufgrund Extrusionsschwierigkeiten	28
Abb. 21:	Verwendete Drucker. Links: M420; rechts: M300.....	30
Abb. 22:	Verfügbare Materialien für FDM (Stand 2018).....	31
Abb. 23:	Strukturformel PLA	33
Abb. 24:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm 3D-gedruckter PLA Zugprüfstäbe (Mittelwerte)	34
Abb. 25:	DSC-Analyse PLA	35
Abb. 26:	Schrumpfung verschiedener PLA Inserts aufgrund Wärmeeinwirkung mit Referenzen	35
Abb. 27:	Strukturformel Polyamid 6.....	36
Abb. 28:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm 3D-gedruckter PA6GF Zugprüfstäbe	37
Abb. 29:	DSC-Analyse PA6GF.....	38
Abb. 30:	Schnittbild durch Proben aus PA6GF; links: -45°/45° Orientierung (der Schnitt wurde entlang einer Ausrichtung durchgeführt); rechts: einzelne Extrusionslinie mit seitlich herausragender Faser.....	38
Abb. 31:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm gespritzter PA6 Zugprüfstäbe	39
Abb. 32:	DSC-Analyse PA6	40
Abb. 33:	Strukturformel PMMA.....	41
Abb. 34:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm gespritzter PMMA Zugprüfstäbe	41
Abb. 35:	DSC-Analyse PMMA.....	42
Abb. 36:	DSC-Analyse PMMA/PLA-Blend mit Referenzen.....	44
Abb. 37:	DSC-Analyse PMMA/PA6GF-Blend mit Referenzen	44
Abb. 38:	DSC-Analyse PA6/PLA-Blend mit Referenzen	45
Abb. 39:	Aufbau Extrusion PA6GF Filament	46
Abb. 40:	Vergleich trocken (oben, rechts) und feucht (unten, rechts) extrudiertes Filament	47
Abb. 41:	Durchmesserverteilung extrudiertes PA6GF Filament; Bestehend aus 527 Einzelmessungen.....	48
Abb. 42:	Bauteildichte von Würfeln im Vergleich zum Längengewicht des eingesetzten Filaments bei PA6GF.....	49
Abb. 43:	Vergleich lokal unterschiedlicher Dichten im Bauteil. Der untere Bereich ist weniger kompakt als der obere und am Bauteil durch eine weisse Färbung ersichtlich. Zusätzlich ist ein Bauteil mit homogenen Dichteverteilung dargestellt.....	50

Abb. 44:	Vergleich Druckbild mit Bauteilbreiten 16 mm (links) und 12 mm (rechts)	51
Abb. 45:	Bauteilfehler: Kante mit Ausstülpungen (oben links); Kante ohne Ausstülpungen (oben rechts); Elefantenuß (unten links); Querschnittsfläche 4x4 mm ² mit Referenzgeometrie (unten rechts)	52
Abb. 46:	Normierter Vergleich der maximalen Zugkraft 3D-gedruckter Zugprüfstäbe aus PLA und PA6GF mit deren Gewicht	53
Abb. 47:	Normierter Vergleich der maximalen Biegekraft 3D-gedruckter Zugprüfstäbe aus PLA und PA6GF mit deren Gewicht	54
Abb. 48:	Vergleich 3D-Druck mit trockenem (links) und feuchtem (rechts) Filament	54
Abb. 49:	Spannungs-Dehnungs-Kurven von trockenem, luftfeuchtem und nassem PA6	55
Abb. 50:	Feuchtigkeitsaufnahme über Zeit bei unterschiedlichen Probendicken und -dichten im Normalklima	56
Abb. 51:	Feuchtigkeitsaufnahme PA6GF in Abhängigkeit der Probendichte	57
Abb. 52:	Feuchtigkeitsaufnahme PA6GF in Abhängigkeit der Zeit bei Schnellkonditionierung	57
Abb. 53:	Feuchtigkeitsaufnahme PA6GF in Abhängigkeit der Orientierung und Dichte	58
Abb. 54:	Universalwerkzeug für Wechseleinsätze	59
Abb. 55:	Werkzeugeinsatz und Formteil für Vielzweckprüfkörper	60
Abb. 56:	Werkzeugeinsatz und Formteil für langen Hybridprüfkörper	61
Abb. 57:	Durchbiegung PLA Insert bei Spritzgießversuchen mit langen HPK-Werkzeug	62
Abb. 58:	Werkzeugeinsatz und Formteil für kurzen Hybridprüfkörper	63
Abb. 59:	Verwendete Angusskonzepte	64
Abb. 60:	Vergleich von Simulation und Füllstudie beim Filmanguss	65
Abb. 61:	Vergleich von Simulation und Füllstudie beim doppelseitig fächerförmigen Filmanguss	66
Abb. 62:	Füllverhalten von PMMA und PA6 beim doppelseitig fächerförmigen Filmanguss. Oben: Füllung PMMA mit Pigmenten; Unten: Bindenähte von PA6 (links) und PMMA (rechts) aufgrund Positionierpins	66
Abb. 63:	Vergleich von Simulation und Füllstudie beim einseitig fächerförmigen Filmanguss	68
Abb. 64:	Füllverhalten von PMMA mit Pigmenten beim einseitig fächerförmigen Filmanguss	68
Abb. 65:	Vergleich von Simulation und Füllstudie beim doppelseitigen Stangenanguss	69
Abb. 66:	Füllverhalten beim doppelseitigen Stangenanguss. Oben: PMMA mit Pigmenten; Unten: simulierte Fließlinien	70
Abb. 67:	Innenseitig voreilende Schmelzfront bei PMMA (Füllzeit 1,058 s, Netzgröße 0,4 mm)	72
Abb. 68:	Draufsicht (links) und Schnittbild (rechts) unterschiedlicher, umspritzter Inserts mit rechteckiger Geometrie; oben: 3x10 mm ³ PLA Insert; Mitte: 3x10 mm ³ PLA Insert mit mittleren unterbrochenen Stegen; unten: 3x10 mm ³ PLA Insert mit am Rand unterbrochenen Stegen	73
Abb. 69:	Draufsicht und Schnittbild eines umspritzten Inserts mit rautenförmiger Geometrie	73
Abb. 70:	Anschmelzung beim Umspritzen und weitere Geometrien; rechts oben: Insert mit Nut; rechts Mitte: Insert mit zwei Zylindern; rechts unten: Anschmelzung PLA in PMMA bei doppelseitiger Platte; links: Anschmelzung von PLA in PA6 nach einer scharfen Kante	74
Abb. 71:	Verzugsverhalten einseitig eingelegter Inserts in Abhängigkeit der Insertdicke; Staffelung 1 mm, 2 mm, 3 mm	75
Abb. 72:	Alkoholtest bei PMMA mit PA6GF (links) und PLA (rechts) als Insertmaterial	76
Abb. 73:	Geometrie für Haftungsuntersuchung; Kontaktflächen grau gefärbt	77
Abb. 74:	Haftkraft unterschiedlicher Geometrien bei PA6/PA6GF	78
Abb. 75:	Versagensverhalten Haftfestigkeitsuntersuchung PA6/PA6GF	79
Abb. 76:	In PA6 ragende Glasfasern in Bruchstellen der Haftfestigkeitsuntersuchung; links: Bohrung, rechts kurze Schräge	79
Abb. 77:	Kontaktfläche von PA6 und PA6GF; links: Spitzgussseite mit Reststücken von PA6GF; rechts: Insertseite mit Kohäsionsbrüchen und freigelegten Glasfasern	80
Abb. 78:	Haftkraft unterschiedlicher Geometrien bei PA6/PLA	80
Abb. 79:	Versagensverhalten Haftfestigkeitsuntersuchung PA6/PLA	81
Abb. 80:	Kraft-Weg-Diagramm der Haftfestigkeitsuntersuchung der Bohrung mit Schnittbild der Bohrung	81
Abb. 81:	Haftkraft unterschiedlicher Geometrien bei PMMA/PLA	82
Abb. 82:	Versagensverhalten Haftfestigkeitsuntersuchung PMMA/PLA	82
Abb. 83:	Haftkraft unterschiedlicher Geometrien bei PMMA/PA6GF	83

Abb. 84:	Versagensverhalten Haftfestigkeitsuntersuchung PMMA/PA6GF	83
Abb. 85:	Bruchfläche Bohrung bei Haftfestigkeitsuntersuchung zwischen PMMA und PA6GF; links: Übersichtsbild; rechts: Detailaufnahme der Bruchfläche mit Glasfasern, welche ins PMMA hineinragen	84
Abb. 86:	Kalkuliertes Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit PA6 umspritzter, unterschiedlicher Inserts aus PA6GF	86
Abb. 87:	Kalkuliertes Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit PMMA umspritzter, unterschiedlicher Inserts aus PA6GF	86
Abb. 88:	Kalkuliertes Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit PA6 umspritzter, unterschiedlicher Inserts aus PLA	87
Abb. 89:	Kalkuliertes Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit PMMA umspritzter, unterschiedlicher Inserts aus PLA	87
Abb. 90:	Insertgeometrie V1 mit Kennwerten	88
Abb. 91:	Insertgeometrie V2 mit Kennwerten	89
Abb. 92:	Insertgeometrie V3 mit Kennwerten	89
Abb. 93:	Insertgeometrie V4 mit Kennwerten	90
Abb. 94:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V1 PA6/PA6GF	91
Abb. 95:	Bruch PA6/PA6GF V1. Links: Insert 4x8 mm ² rechts: Insert 4x12 mm ²	91
Abb. 96:	Bruch PA6/PA6GF V2 Insert 4x8 mm ²	92
Abb. 97:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V2 PA6/PA6GF	92
Abb. 98:	Highspeedaufnahme Sprödbbruch PA6 mit Insert 4x8 mm ²	93
Abb. 99:	Freiliegende Glasfasern an Bruchstellen bei Materialkombination PA6/PA6GF	93
Abb. 100:	Glasfaserbedingter Bruch von PA6; links: Schnittbild am Radius mit in PA6 ragender Glasfaser; rechts: typischer Bruch des Spritzgießmaterials bei PA6/PA6GF mit Insert 4x4 mm ² V2 am Radius	94
Abb. 101:	Bruch PA6/PA6GF V2. Insert 4x8 mm ² nach 30 Tagen in Wasser	94
Abb. 102:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V2 PA6/PA6GF nass	95
Abb. 103:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V3 PA6/PA6GF	95
Abb. 104:	Bruch PA6/PA6GF V3 Insert 4x4 mm ²	96
Abb. 105:	Bruch PA6/PA6GF V4. Links: Insert (2x) 1,4x16 mm ² ; rechts: Insert (2x) 0,6x16 mm ²	96
Abb. 106:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V4 PA6/PA6GF	97
Abb. 107:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V1 PA6/PLA	98
Abb. 108:	Bruch PA6/PLA V1 Insert 4x4 mm ²	98
Abb. 109:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V2 PA6/PLA	99
Abb. 110:	Bruch PA6/PLA V2 Insert 4x4 mm ²	99
Abb. 111:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V1 PMMA/PLA	100
Abb. 112:	Bruch PMMA/PLA V1 Insert 4x4 mm ²	100
Abb. 113:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V2 PMMA/PLA	101
Abb. 114:	Bruch PMMA/PLA V2 Insert 4x12 mm ²	101
Abb. 115:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V4 PMMA/PLA	102
Abb. 116:	Bruch PMMA/PLA V4 Insert (2x) 1,0x16 mm ²	102
Abb. 117:	Bruch PMMA/PA6GF V1 Insert 4x12 mm ² durch schlagartiges Abrutschen des Inserts aus der Einspannung	103
Abb. 118:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V2 PMMA/PA6GF	104
Abb. 119:	Bruch PMMA/PA6GF V2. Links: Insert 4x8 mm ² mit sichtbarer Weisfärbung; rechts: Insert 4x8 mm ² ohne Weisfärbung	104
Abb. 120:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V3 PMMA/PA6GF	105
Abb. 121:	Bruch PMMA/PA6GF V3; links: Insert 4x8 mm ² mit Sprödbbruch von PMMA an der Einspannstelle; rechts: Insert 4x4 mm ² Insertbruch	105
Abb. 122:	Spannung-Dehnungs-Diagramm HPK V4 PMMA/PA6GF	106
Abb. 123:	Bruch PMMA/PA6GF V4 Insert (2x) 1,0x16 mm ²	106
Abb. 124:	Vergleich zwischen gemessenen und kalkulierten Zugmoduln von HPK	107
Abb. 125:	Vergleich gemessener mit kalkulierter Zugfestigkeit verschiedener HPK	108
Abb. 126:	Vergleich maximaler Zugkraft mit Insertgewicht von HPKn	110

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Vergleich unterschiedlicher Bauteilpositionierungen	22
Tab. 2:	Variationsparameter	25
Tab. 3:	Druckparameter	30
Tab. 4:	Angaben zur Werkstoffprüfung	32
Tab. 5:	Zugeigenschaften 3D-gedruckter PLA Zugprüfstäbe	34
Tab. 6:	Biegeeigenschaften 3D-gedruckter PLA Biegeproben	34
Tab. 7:	Zugeigenschaften 3D-gedruckter PA6GF Zugprüfstäbe	37
Tab. 8:	Biegeeigenschaften 3D-gedruckter PA6GF Biegeproben	37
Tab. 9:	Zugeigenschaften gespritzter PA6 Zugprüfstäbe	40
Tab. 10:	Kennwerte gespritzter PA6 Zugprüfkörper mit unterschiedlichen mittleren Einspritzgeschwindigkeiten	40
Tab. 11:	Zugeigenschaften gespritzter PMMA Zugprüfstäbe	42
Tab. 12:	Kennwerte gespritzter PMMA Zugprüfkörper mit unterschiedlichen mittleren Einspritzgeschwindigkeiten	42
Tab. 13:	Definierte Feuchtigkeitszustände von Polyamid	55
Tab. 14:	Spritzgießparameter für Herstellung von Probekörpern	59
Tab. 15:	Vergleich unterschiedlicher Netzgrößen und Materialien bei Simulation des Fließverhaltens	71
Tab. 16:	Kalkulierte Kennwerte unterschiedlicher HPKs	85
Tab. 17:	Kennwerte HPK V1 PA6/PA6GF	92
Tab. 18:	Kennwerte HPK V2 PA6/PA6GF	94
Tab. 19:	Kennwerte HPK V3 PA6/PA6GF	96
Tab. 20:	Kennwerte HPK V4 PA6/PA6GF	97
Tab. 21:	Kennwerte HPK V1 PA6/PLA	98
Tab. 22:	Kennwerte HPK V1 PMMA/PLA	101
Tab. 23:	Kennwerte HPK V2 PMMA/PLA	102
Tab. 24:	Kennwerte HPK V4 PMMA/PLA	102
Tab. 25:	Kennwerte HPK V4 PMMA/PA6GF	106

01: Biangardi, Harald J.: Bestimmung der Orientierung und molekularen Ordnung in Polymeren. - 1980. - 145 S.

ISBN 3-7983-0737-7

vergriffen

02: Kristukat, Peter: Verhalten von teilkristallinen Thermoplasten beim Pressrecken und dabei erreichbare Eigenschaften von POM. - 1980. - 137 S.

ISBN3-7983-0738-5

vergriffen

03: Arnold, Gerhart: Pressrecken zum Einbringen orientierter Bereiche für Konstruktionsteile aus teilkristallinen Thermoplasten. - 1980. - 140 S.

ISBN 3-7983-0739-3

vergriffen

04: Käufer, Helmut; Burr, August; Hüppe, Reinhard u. a.: Wissenschaftliche Arbeiten und Einrichtung der Kunststofftechnik. - 1980. - 118 S.

ISBN 3-7983-0740-4

vergriffen

05: Hofbauer, Lothar: Entwicklung einer Kalenderausformtheorie und beispielhafte technische und wirtschaftliche Erprobung an PVC-Folien. - 1981. - 210 S.

ISBN 3-7983-0750-4

vergriffen

06: Jitschin, Michael: Entwicklung eines Konstruktionskatalogs mit Lösungssammlungen schnappbarer Form- und Kraftschlussverbindungen an Kunststoffteilen und beispielhafte Anwendungen. - 1981. - 129 S.

ISBN 3-7983-0763-6

vergriffen

07: Zapf, Wolfgang: Verhalten und Beurteilung stoßbelasteter Kunststoffbauteile. - 1981. - 127 S.

ISBN 3-7983-0764-4

vergriffen

08: Naranjo-Carvajal, Alberto; Burr, August: Abkühlungsbeschreibung bei Thermoplasten im Spritzgieß-Prozess durch Kombinierung experimenteller und rechnerischer Methoden in FORTRAN IV. - 1981. - 49 S.

ISBN 3-7983-0771-7

vergriffen

09: Rautenberg, Lutz: Walzgereckte Thermoplastplatten, ihre Technologie, Eigenschaften und Strukturen. - 1982. - 205 S.

ISBN 3-7983-0810-1

vergriffen

10: Burr, August: Spritzgießpressrecken thermoplastischer Formteile am Beispiel von Zahnrädern aus Polyoximethylen. - 1983. - 148 S.

ISBN 3-7983-0811-X

vergriffen

11: Käufer, Helmut; Huppe, Reinhard; Mähler, Dieter u. a.: Anwendungstechnische Arbeiten aus der Polymertechnik. - 1983. - 123 S.

ISBN 3-7983-0835-7

vergriffen

12: Käufer, Helmut; Thomssen, Udo u. a.: Verarbeitungstechnische und konstruktive Arbeiten aus der Polymertechnik. - 1983. - 127 S.

ISBN 3-7983-0938-8

vergriffen

13: Käufer, Helmut; Fischer, Klaus D.; u. a.: Erarbeitung von Beurteilungsverfahren für angeklebte Fassaden-Verkleidung. - 1984. - 90 S.

ISBN 3-7983-0965-5

vergriffen

14: Woite, Bernd F.: Beitrag zur Dimensionierung statisch und stoßartig belasteter Platten und Sandwichplatten aus Thermoplasten. - 1984. - 275 S.

ISBN 3-7983-0966-3

vergriffen

15: Thomssen, Udo: Gestaltung gewölbter Körper am Beispiel spritzgegossener Halbkugelschalen aus Thermoplasten. - 1984. - 186 S.

ISBN 3-7983-1033-5

vergriffen

16: Hüppe, Reinhard: Sensoreinsatz zur direkten, kontinuierlichen Erfassung und Regelung von Produkteigenschaften beim Spritzgießen. - 1985. - 252 S.

ISBN 3-7983-1034-3

vergriffen

17: Lemke, Hans-Jürgen: Qualitätsabhängige Regelung und Überwachung des Spritzgießprozesses mittels Rechneinsatz. - 1985. - 190 S.

ISBN 3-7983-1063-7

vergriffen

18: Fischer, Klaus-Dieter: Stahl-Thermoplast-Leichtbauträger in wirtschaftlicher recycling-freundlicher Verbundkonstruktion mit Belastungs- und Anwendungsanalyse. - 1986. - 173 S.

ISBN 3-7983-1111-0

vergriffen

19: Bonau, Hugo: Recycling von Alt-Thermoplasten mit Aufwertung für gezielte Anwendungen am Beispiel von Polypropylen. - 1988. - 126 S.

ISBN-10: 3-7983-1112-9

vergriffen

20: Fischer, Hans-Joachim: Versteifungswirkung gewölbter Flächen am Beispiel von Halbkugelschalen aus faserverstärkten Kunststoffen. - 1989. - 186 S.

ISBN 3-7983-1238-9

vergriffen

21: Münnich, Janos: Prozessorientierte Untersuchungen zum Walzpreßrecken von teilkristallinen Thermoplasten. - 1989. - 142 S.

ISBN 3-7983-1285-0

vergriffen

- 22: Kipfelsberger, Christian: Fertigung und Schrumpfverhalten spritzgießpressgerechter Flachstäbe und Folgerungen für Schrumpfteile.** - 1989. - 174 S.
ISBN 978-3-7983-1286-9 vergriffen
- 23: Jahnke, Joachim: Federelemente aus eigenverstärkten Thermoplasten, ihre Optimierung und Herstellung.** - 1989. - 196 S.
ISBN 978-3-7983-1287-7 vergriffen
- 24: Frey, Gerhard: Eigenverstärken des Gesamtvolumens von komplexen Bauteilen aus teilkristallinen Thermoplasten durch Umformen.** - 1990. - 180 S.
ISBN 978-3-7983-1288-5 vergriffen
- 25: Leyrer, Karl-Hans: Verfahrensentwicklung für dickwandige, eigenverstärkte Präzisionsformteile (Thermoplastische Zahnräder).** - 1990. - 170 S.
ISBN 978-3-7983-1355-5 vergriffen
- 26: Tiemann, Uwe: Plastographie von teilkristallinen Thermoplasten am Beispiel von Polypropylen-Recyclaten.** - 1990. - 124 S.
ISBN 978-3-7983-1356-3 vergriffen
- 27: Mokrani, Gerhard: Kontinuierliches Walzpressrecken eigenverstärkter Thermoplastbleche.** - 1991. - 166 S.
ISBN 978-3-7983-1426-8 vergriffen
- 28: Elsner, Helmut: Grundlegende Untersuchungen an Kunststoff-Metall-Kleblagen als Basis einer Entwicklungsmethodik.** - 1991. - 133 S.
ISBN 978-3-7983-1436-5 vergriffen
- 29: Chemnitius, Reiner: Das wissensbasierte CAD-System ICX zur Entwicklung von Kunststoff-Klebeverbindungen.** - 1991. - 183 S.
ISBN 978-3-7983-1437-3 vergriffen
- 30: Voßhenrich, Bruno: Verarbeitung flüssigkristalliner Thermoplaste zu hochfesten technischen Teilen.** - 1991. - 162 S.
ISBN 978-3-7983-1454-3 vergriffen
- 31: Piotter, Volker: Flüssigkristalline Thermoplaste und Blends verarbeitet zu optimal eigenverstärkten Teilen.** - 1994. - 158 S.
ISBN 978-3-7983-1552-3 vergriffen
- 32: Heschke, Peer: Demontage von Klebverbindungen für eine praktikablere Instandhaltung und ein optimiertes Recycling.** - 1995. - 160 S.
ISBN 978-3-7983-1663-8 vergriffen
- 33: Karras, Wolf: Differenzierte Aufbereitung zum wirtschaftlichen Recycling von Polyolefinen.** - 1996. - 204 S.
ISBN 978-3-7983-1671-3 vergriffen
- 34: Kämmler, Georg: Fixierzeitmodulierte Präziseinstellung von Kunststoffgleitlagern.** - 1996. - 172 S.
ISBN-13: 978-3-7983-1679-9 vergriffen
- 35: Xing, Zhijie: Verarbeitung, Struktur und Eigenschaften von hochgefüllten teilkristallinen Thermoplasten.** - 1996. - 152 S., zahlr. Photos, z.T. farbig.
ISBN 978-3-7983-1675-1 vergriffen
- 36: Quast, Oliver von: Universelle Methode zur Dehalogenierung von Thermoplasten.** - 1996. - 197 S.
ISBN 978-3-7983-1689-8 vergriffen
- 37: Weinlein, Roger: Vergleichende Umweltanalyse von Thermoplast-Bauteilen aus Recyclat und Neuware.** - 1996. - 224 S.
ISBN 978-3-7983-1697-3 vergriffen
- 38: Martin, Jan: Kunststoff und Holz als Werkstoffe für den Baubereich – ein technischer Vergleich.** - 1996. - 140 S.
ISBN 978-3-7983-1704-8 vergriffen
- 39: Wagenblast, Joachim: Verfahrens- und maschinentechnische Verbesserungen bei der Verarbeitung von Thermoplasten mit Schneckenmaschinen.** - 1997. - 188 S.
ISBN 978-3-7983-1718-5 vergriffen
- 40: Zoll, Günther B.: Entwicklung von Kunststoffprodukten mit systemtechnischen Methoden.** - 1997. - 170 S.
ISBN 978-3-7983-1729-1 vergriffen
- 41: Siebert, Martin: Entfärben von Thermoplasten beim Recycling über Lösen.** - 1997. - 140 S.
ISBN 978-3-7983-1723-9 vergriffen
- 42: Giese, Dagmar: Recycling über Lösen von Elastomeren und faserverstärkten Thermoplasten. Konzeption einer Technikumsversuchsanlage.** - 1998. - 160 S.
ISBN 978-3-7983-1770-3 vergriffen
- 43: Bongers, Alexander: Polymere Implantate durch spezielle Oberflächenfibrillierung.** - 1997. - 132 S.
ISBN 978-3-7983-1756-7 vergriffen
- 44: Sambale, Harald: Recycling von Thermoplasten durch Direktverarbeitung von Lösungen.** - 1999. - 120 S.
ISBN 978-3-7983-1797-0 vergriffen
- 45: Tief, Kerstin: Variable Kalkulationsmethodik zur Analyse von Kunststoffrecyclingverfahren anhand von wirtschaftlichen und umweltrelevanten Kriterien.** - 1998. - 206 S.
ISBN 978-3-7983-1777-2 vergriffen
- 46: Bosewitz, Stefan: Kapselungstechnik zur Optimierung der Aufstellung von Anlagen am Beispiel Recycling über Lösen.** - 1999. - 192 S.
ISBN 978-3-7983-1807-6 vergriffen
- 47: Shaik-El-Eid, Sliman: Biokompatibilität und Zellzahlbestimmung von Fibroblasten auf integralen und normalen Polymerimplantaten.** - 1998. - 132 S.
ISBN 978-3-7983-1788-8 vergriffen

- vergriffen

- vergriffen

- vergriffen

- vergriffen

- vergriffen

- vergriffen

- vergriffen

- vergriffen

1. 1980. ff.

- vergriffen

- vergriffen

- vergriffen

- vergriffen

- vergriffen

- EUR 5.00

- EUR 5.00

- EUR 5.00

- EUR 5,00

- EUR 5,00

- EUR 5,00

- EUR 5.00

68: Rolón Garrido, Víctor Hugo: Molecular Structure and Constitutive Modelling of Polymer Melts. - 2007. - VII, 147 S.

ISBN 978-3-7983-2064-2 EUR 5,00

69: Müller, Marco: Thermoplastische Elastomere als neuartige Additive für die Kunststoffverarbeitung. - 2009. - 161 S.

ISBN 978-3-7983-2172-4 EUR 5,00

70: Navarro Gonzáles, Manuel: Rheology and engineering parameters of bitumen modified with polyolefins, elastomers and reactive polymers. - 2010. - VIII, 187 S.

ISBN 978-3-7983-2229-5 EUR 5,00

71: Kübler, Michael: Verfahrensentwicklung zur Herstellung gebrauchsbeständiger kleinststrukturierter Kunststoffbauteile. - 2010. - XVIII, 136 S.

ISBN 978-3-7983-2270-7 EUR 5,00

72: Schubert, Mario: Biopolymere als definierte Permeationsschicht für aktive Lebensmittelverpackungen. - 2010. - 180 S.

ISBN 978-3-7983-2271-4 EUR 5,00

73: Akier, Amer H.: Untersuchungen zum Materialverhalten von Rapsstroh-Polypropylen Compounds. - 2011. - XII, 93 S.

ISBN 978-3-7983-2309-4 (online)
ISBN 978-3-7983-2308-7 (print) EUR 5,00

74: Greger, Marcus: Entwicklung einer verstellbaren Dispergierringtechnik für Planetwalzenextruder. - 2012. - 136 S., zahlr. Abb.

ISBN 978-3-7983-2386-5 (print) EUR 5,00

75: Kismet, Yilmaz: Entwicklung eines Verfahrens für die Verwertung von Pulverlackrecyclaten. - 2012. - 164 S.

ISBN 978-3-7983-2480-0 (online)
ISBN 978-3-7983-2479-4 (print) EUR 5,00

76: Himmel, Tobias: Über die Wirkung thermoplastischer Elastomere als Additive zur Unterdrückung des sharkskin-Effekts. - 2013. - VIII, 119 S.

ISBN: 978-3-7983-2515-9 (online)
ISBN: 978-3-7983-2514-2 (print) EUR 12,00

77: Kurz, Alexander: Rheologische Untersuchungen zum Einfluss des TBPMN-Netzwerkes auf die scherinduzierte Kristallisation von Polypropylen. - 2013. - VIII, 149 S.

ISBN 978-3-7983-2643-9 (online)
ISBN 978-3-7983-2642-2 (print) EUR 12,90

78: Taufertshöfer, Thomas: Einfluss der Verfahrenstechnik eines Planetwalzenextruders auf die elektrische Leitfähigkeit rußgefüllter Polyolefine. - 2014. - VII, 147 S.

ISBN 978-3-7983-2690-3 (online)
ISBN 978-3-7983-2689-7 (print) EUR 12,00

79: Scheuerle, Volker: Verbesserung der Haltbarkeit von Dokumenten mit Hilfe polymerer Schichten. - 2014. - 176 S.

ISBN 978-3-7983-2680-4 (online)
ISBN 978-3-7983-2679-8 (print) EUR 18,00

80: Mohammed, Nabilah Adel: Rheology, Processing and Properties of Polymer Nanocomposites Based on POSS and Boehmite. - 2014. - 225 S.

ISBN 978-3-7983-2681-1 (online)

81: Kruse, Matthias: From linear to long-chain branched poly(ethylene terephthalate) – reactive extrusion, rheology and molecular characterization. - 2017. - XVI, 169 S.

ISBN 978-3-7983-2892-1 (online)
ISBN 978-3-7983-2891-4 (print) EUR 12,00

82: Rohnstock, Falk: Über den Wirkmechanismus von Polyethylenglykol als Additiv zur Gefügeverdichtung im Rotationsformverfahren. - 2018. - 116 S.

ISBN 978-3-7983-2961-4 (online)
ISBN 978-3-7983-2960-7 (print) EUR 12,00

Schriftenreihe Kunststoff-Forschung

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Auhl

Fakultät: III – Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin

Institut für Werkstoffwissenschaften und -technologien

Fachgebiet: Polymertechnik/-physik

ISSN 0174-4003 (print)

ISSN 2197-814X (online)

83: Ai, Qingfeng: Variotherme Verarbeitung von Epoxidharz zur Zyklusverkürzung im RTM Prozess. - 2018. - XIII, 100 S.

ISBN 978-3-7983-2982-9 (print) EUR 11,00

ISBN 978-3-7983-2983-6 (online)

DOI 10.14279/depositonce-6664

84: John-Müller, Astrid: Analytische Charakterisierung und Modifizierung von Pulverlack-Overspray zum Einsatz als Füllstoff für Polyethylen. - 2018. - 201 S.

ISBN 978-3-7983-2990-4 (print) EUR 14,00

ISBN 978-3-7983-2991-1 (online)

DOI 10.14279/depositonce-6859

85: Butzke, Jens: Verfahrenstechnische Weiterentwicklung des Fused Layer Manufacturing zur Reduzierung der Anisotropie im Bauteil. - 2019. - IV, iv, 192, A18 S.

ISBN 978-3-7983-3041-2 (print) EUR 12,00

ISBN 978-3-7983-3042-9 (online)

DOI 10.14279/depositonce-7651

86: Dill, Svenja: Verarbeitung und Charakterisierung von Polyamid 6-Polyhydroxybutyrat-Blends. - 2020. - X, 165, xxxiv S.

ISBN 978-3-7983-3139-6 (print) EUR 12,00

ISBN 978-3-7983-3140-2 (online)

DOI 10.14279/depositonce-9680

Herstellung und Eigenschaften von Spritzguss-Formteilen mit 3D-gedruckten Inserts zur lokalen Verstärkung

In der vorliegenden Dissertation wird die Kombination der Fertigungsverfahren Spritzguss und 3D-Druck untersucht. Es werden einige Anwendungen für die Verfahrenskombination aufgezeigt, wobei die Untersuchung der lokalen Verstärkung von Spritzgussteilen im Fokus steht. Für die Untersuchung der Verstärkung werden Inserts, welche mittels des Verfahrens Fused Deposition Modeling hergestellt werden, in einem zur Herstellung von Hybridbauteilen angepassten Zugprüfstabwerkzeug umspritzt. Dabei wurden Materialien und Geometrien variiert, um Effekte, Wechselwirkungen und die Grenzen des Prozesses zu untersuchen.

Die verwendeten Materialien werden hierzu umfassend charakterisiert und die Fertigungsprozesse näher betrachtet, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Verfahren Fused Deposition Modeling liegt. Dieses Verfahren wird anhand umfangreicher Recherchen näher beschrieben und durch Versuche ergänzt.

ISBN 978-3-7983-3164-8 (print)

ISBN 978-3-7983-3165-5 (online)



ISBN 978-3-7983-3164-8



<http://verlag.tu-berlin.de>