

**Ein Beitrag zur Materialqualifizierung von Hochleistungsthermoplasten für das
FDM-Verfahren**

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Julian Wächter, M. Sc.
aus Warstein

Tag des Kolloquiums:	19.03.2024
Referent:	Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Direct Manufacturing Research Center (DMRC) in der Arbeitsgruppe Kunststofftechnik Paderborn (KTP) der Universität Paderborn.

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer, meinem Doktorvater, für die Möglichkeit der Promotion, die wertvollen Anregungen und die kontinuierliche Unterstützung bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die freundliche Übernahme des Korreferats. Auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Obermann möchte ich mich für die Mitwirkung in der Promotionskommission bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinen ehemaligen Arbeitskollegen vom DMRC und KTP für das stets angenehme Arbeitsklima und die freundschaftliche Zusammenarbeit. In meiner Zeit konnte ich viele schöne Momente mit euch erleben. An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Andre Hirsch, Christian Elsner, Felix Hecker und Christian Schumacher für die vielfältige Unterstützung bedanken.

Den zahlreichen Studierenden, die durch ihre tatkräftige Unterstützung als studentische Hilfskräfte oder mit ihren Studien- und Abschlussarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, sei ebenfalls gedankt. Stellvertretend für sie möchte ich Marcel Neugebauer aufgrund der guten Zusammenarbeit und des Engagements bei den experimentellen Untersuchungen besonders hervorheben.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden für die Motivation, die Unterstützung und die Geduld während der gesamten Zeit herzlich bedanken. Mein besonderer Dank gilt meiner Partnerin Melanie für ihren uneingeschränkten Zuspruch, ihre Rücksichtnahme und ihre dauerhafte Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Paderborn, Juni 2024

Julian Wächter

Zusammenfassung

Das Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren erfährt aufgrund der Weiterentwicklung des additiven Fertigungsverfahrens zum Direct Manufacturing einen wachsenden Bedarf an und eine gesteigerte Nachfrage nach Hochleistungsthermoplasten. Der Einsatz und die Verwendung neuartiger Werkstoffe erfordert eine Materialqualifizierung für den FDM Prozess. In diesem Zusammenhang sind die Charakterisierung der materialbedingten Verarbeitungseignung sowie die Prozessparameteroptimierung essentielle Bestandteile der Materialqualifizierung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Vorgehensweise für die Materialqualifizierung von Hochleistungsthermoplasten vorgestellt und validiert. Das Ziel ist es, den FDM Prozess auf die vorhandenen Materialien abzustimmen, indem die Schweißnahtqualität und der Bauteilverzug analysiert werden. Anhand dieser Bewertungsmerkmale ist es möglich, die Verarbeitungseignung der verwendeten Materialien zu quantifizieren. Auf diesem Weg werden Wechselwirkungen zwischen Material und Prozess herausgestellt, ein ganzheitliches Prozessverständnis aufgebaut, die Beherrschbarkeit des FDM Prozesses verbessert und die grundlegende Verarbeitbarkeit sichergestellt. Anschließend wird ein Konzept zur Vorhersage der Schweißnahtfestigkeit faserverstärkter Materialien im FDM entwickelt und validiert. Die Materialauswahl setzt sich zusammen aus einem amorphen Polyphenylensulfon (PPSU) und einem teilkristallinen Polyetheretherketon (PEEK) in verschiedenen Materialmodifikationen. Abschließend wird ein systematischer Ansatz zur Beurteilung der Verarbeitungseignung von Multimaterialkombinationen für das FDM entwickelt.

Summary

Fused Deposition Modeling (FDM) is experiencing a growing need and demand for high performance thermoplastics due to the further development of the additive manufacturing process into Direct Manufacturing. The application and use of novel materials require a material qualification for the FDM process. In this context, the characterization of the material-related processability as well as the process parameter optimization are essential elements of the material qualification.

In this work a procedure for the material qualification of high-performance thermoplastics is presented and validated. The aim is to adapt the FDM process to the available materials by analyzing the weld seam quality and the component warpage. Based on these evaluation characteristics, it is possible to quantify the processability of the used materials. In this way, interactions between material and process are highlighted, a holistic understanding of the process is established, the reliability of the FDM process is improved and the basic processability is ensured. Subsequently, a concept for modeling the weld seam strength of fiber-reinforced materials in FDM is developed and validated. The material selection is composed of an amorphous polyphenylene sulfone (PPSU) and a semi-crystalline polyetheretherketone (PEEK) in different material modifications. Finally, a systematic approach to evaluate the processing suitability of multi-material combinations for FDM is developed.

Liste der Vorveröffentlichungen

- [MWE19] MORITZER, E.; WÄCHTER, J.; ELSNER, M.: Investigation of the Processability of Different PEEK Materials in the FDM Process with Regard to the Weld Seam Strength. Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin (USA), 2019, S. 856-863
- [MEW+21] MORITZER, E.; ELSNER, C. L.; WÄCHTER, J.; KNOOP, F.: Investigation and Realization of Watertight FDM Structures Made of Ultem 9085 in Pressurized Systems. Proceedings of the 79th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC), 2021, S.45-51, ISBN: 978-1-7138-3075-7
- [MWE21] MORITZER, E.; WÄCHTER, J.; ELSNER, C. L.: Investigation of Specific FDM Process Parameters to Optimize the Polymer Discharge of Carbon Fiber Reinforced PEEK. Macromolecular Symposia, Band 395, Heft 1, 2021, S. 1-4, DOI: 10.1002/masy.202000269
- [MWF21] MORITZER, E.; WÄCHTER, J.; FUHRMANN, C.: Investigation of the Processability of different High-performance Materials in the FDM Process with Regard to the Shrinkage Behaviour, Materials, Methods & Technologies, Journal of International Scientific Publications, 15. Band, 2021, ISSN: 1314-7269
- [MHW+22] MORITZER, E.; HECKER, F.; WÄCHTER, J.; KNAUP, F.: Investigation of the Deposition Velocity Related Temperature Deviations for High Temperature Materials in the FDM Process. Proceedings of the 37th International Conference of the Polymer Processing Society, Fukuoka (Japan), 2022
- [MW22] MORITZER, E.; WÄCHTER, J.: Development of a Procedure for the Assessment of Material Potentials Under Consideration of the Weld Seam Quality for Multimaterial Applications in the FDM Process. Macromolecular Symposia, Band 404, Heft 1, 2022, S. 2100389-1-2100389-4, DOI: 10.1002/masy.202100389
- [MWK22] MORITZER, E.; WÄCHTER, J.; KISTER, N.: Qualification of Different Carbon Fiber Reinforced Polyether Ether Ketone Materials for the FFF Process. Proceedings of the 37th International Conference of the Polymer Processing Society, Fukuoka (Japan), 2022

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	3
2.1 Grundlagen der additiven Fertigung	3
2.1.1 Begriffsdefinition und Einordnung	3
2.1.2 Funktionsprinzip additiver Fertigungsverfahren.....	4
2.2 Fused Deposition Modeling (FDM).....	5
2.2.1 Verfahrensprinzip und Maschinenkomponenten	6
2.2.2 Prozessphasen	8
2.2.3 Einflussfaktoren im Fused Deposition Modeling.....	10
2.2.3.1 Einfluss durch das Material	10
2.2.3.2 Einfluss durch den Prozess.....	12
2.2.3.3 Einfluss durch die Maschine.....	14
2.2.4 Verfügbare Werkstoffe	15
2.2.5 Filament als FDM-Halbzeug.....	17
2.3 Schweißen von Kunststoffen	17
2.3.1 Adhäsion.....	18
2.3.2 Einordnung des FDM als Schweißprozess.....	19
2.4 Bauteilverzug als Merkmal des Abkühlprozesses im FDM	20
2.4.1 Grundlagen Schwindung und Verzug.....	20
2.4.2 Einordnung Schwindung und Verzug im FDM-Prozess.....	21
3 Forschungsbedarf, Zielsetzung und Vorgehensweise.....	23
3.1 Forschungsbedarf	23
3.2 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	25
4 Fertigungsrandbedingungen der experimentellen Untersuchungen.....	27
4.1 Materialien.....	27
4.1.1 Polyetheretherketon (PEEK)	27
4.1.2 Polyphenylsulfon (PPSU)	28
4.2 Materialeigenschaften	29
4.2.1 Thermische Analyse (DSC-Messung).....	29
4.2.2 Materialabbau (TGA-Messung).....	31
4.3 Verwendete FDM-Maschine und Wahl der Prozessparameter.....	32
4.3.1 FDM-Maschine.....	32
4.3.2 Prozessparameter.....	33

4.4	Filamentherstellung	34
4.4.1	Aufbau der Extrusionslinie und Herstellung der Filamente	35
4.4.2	Qualitätsüberwachung	36
4.4.2.1	Durchmesserüberwachung der hergestellten Filamente	36
4.4.2.2	MVR-Messung zur Analyse der Materialschädigung	37
4.4.2.3	Zugversuche zur Analyse der Materialschädigung	38
4.5	Trocknungsbedingungen	39
5	Untersuchung der Schweißnahtqualität zur Beurteilung der Verarbeitungseignung im FDM	42
5.1	Stand der Forschung	42
5.2	Methode zur Ermittlung der Schweißnahtqualität	43
5.2.1	Experimentelle Vorgehensweise	44
5.2.2	Bestimmung der Schweißnahtqualität	46
5.2.3	Prozesseinstellungen und Auswahl der Verarbeitungstemperaturen	48
5.3	Auswertung der Schweißnahtqualität	50
5.3.1	PPSU	50
5.3.1.1	Schweißbreitenfaktor	50
5.3.1.2	Schweißnahtfestigkeit	51
5.3.1.3	Schweißfaktor	53
5.3.2	PEEK	53
5.3.2.1	Schweißbreitenfaktor	54
5.3.2.2	Schweißnahtfestigkeit	54
5.3.2.3	Schweißfaktor	57
5.4	Analyse und Simulation des Aufschmelzprozesses	58
5.4.1	Analyse der Einflussfaktoren	58
5.4.1.1	Maschine	59
5.4.1.2	Material	61
5.4.2	Simulation und Analyse der Ergebnisse	62
5.4.2.1	Aufbau des Simulationsmodells	62
5.4.2.2	Temperaturverläufe	63
5.4.2.3	PPSU	63
5.4.2.4	PEEK	64
5.4.3	Experimentelle Validierung des Simulationsmodells	65
5.5	Untersuchung der Schweißnahtfestigkeit nach Temperprozess	67
5.5.1	Aufbau der experimentellen Untersuchungen	67
5.5.2	Experimentelle Untersuchung der Schweißnahtfestigkeit	68
5.5.2.1	Einfluss der Bauraumtemperatur	69
5.5.2.2	Einfluss des Temperprozesses	71
5.5.3	Verarbeitungsempfehlung	73
5.6	Einfluss von Faserverstärkungen auf die Schweißnahtqualität	74

5.6.1	Aufbau der experimentellen Untersuchungen	75
5.6.2	Auswertung des Fasereinflusses auf die Schweißnahtqualität.....	75
5.6.2.1	Schweißnahtfestigkeit	76
5.6.2.2	Schweißfaktor	78
6	Untersuchung des Verzugsverhaltens zur Beurteilung der Verarbeitungseignung im FDM	79
6.1	Methode zur Bewertung des Verzugsverhaltens	80
6.1.1	Experimenteller Aufbau zur Bestimmung des Bauteilverzugs	80
6.1.2	Vorgehen zur Quantifizierung der Bauteilverzugs	82
6.1.3	Prozesseinstellungen und Auswahl der Verarbeitungstemperaturen	84
6.2	Auswertung und Einordnung des Verzugsverhaltens	84
6.2.1	PPSU	85
6.2.1.1	Einfluss der Verarbeitungsparameter	85
6.2.1.2	Einfluss der Position im Bauraum	85
6.2.2	PEEK	86
6.2.2.1	Einfluss der Verarbeitungsparameter	86
6.2.2.2	Einfluss der Position im Bauraum	88
6.3	Einfluss eines nachgelagerten Temperprozesses auf den Bauteilverzug	89
6.3.1	Aufbau der experimentellen Untersuchungen	90
6.3.2	Experimentelle Untersuchungen des Bauteilverzugs	90
6.3.2.1	Einfluss der Bauraumtemperatur.....	90
6.3.2.2	Einfluss des Temperprozesses	91
6.4	Zusammenfassung und abgeleitete Verarbeitungsempfehlung.....	92
7	Modellbildung zur Prädiktion der Schweißnahtfestigkeit faserverstärkter Materialien ..	94
7.1	Vorgehensweise zur Entwicklung des Vorhersagemodells.....	94
7.1.1	Statistische Versuchsplanung	94
7.1.2	Auswahl der Prozessparameter und experimentelle Vorgehensweise....	95
7.2	Auswertung der experimentellen Ergebnisse	96
7.3	Modellierung der Schweißnahtfestigkeit	99
7.4	Ansatz zur Modellierung der Schweißnahtfestigkeit faserverstärkter Materialien	101
7.4.1	Hypothese zur Auswirkung der Faserverstärkung auf die Schweißnaht.....	101
7.4.2	Erweiterung des Modells und Vorgehensweise zur Modellvalidierung ..	102
7.4.3	Modellvalidierung	104
8	Entwicklung einer Methode zur Beurteilung der Verarbeitungseignung von Multimaterialkombinationen	106
8.1	Rahmenbedingungen für die Beurteilung von Multimaterialkombinationen	106
8.1.1	Einordnung der Multimaterialkombinationen für das FDM-Verfahren....	106

8.1.2	Experimentelle Vorgehensweise	108
8.2	Entwicklung eines Systems zur Düsenkalibrierung	110
8.2.1	Iterative Kalibrierungsmethode.....	111
8.2.2	Kamerabasierte Kalibrierungsmethode	114
8.3	Untersuchung und Identifizierung von Einflussfaktoren	117
8.3.1	Einflussfaktoren auf den Kalibrierungsprozess	117
8.3.2	Einflussfaktoren auf die Fertigungsqualität der Multimaterialbauweise	119
8.4	Validierung der Multimaterialqualifizierung	121
8.4.1	Validierung für den Standardtemperaturbereich.....	121
8.4.2	Validierung für den Hochtemperaturbereich.....	123
9	Zusammenfassung	126
10	Literaturverzeichnis.....	130
Anhang	140
A1	Prozesseinstellungen der Filamentextrusion	140
A2	Untersuchung der Schweißnahtqualität.....	141
A3	Untersuchung des Verzugsverhaltens.....	145
A4	Modellierung der Schweißnahtfestigkeit	146
A5	Methode zur Beurteilung von Multimaterialkombinationen	149

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

ABS		Acrylnitril-Butadien-Styrol
AM		Additive Manufacturing
CAD		Computer Aided Design
CCD		Central Composite Design
CF		Carbonfaser
c_p	J/(g*K)	Spezifische Wärmekapazität
DMRC		Direct Manufacturing Research Center
DSC		Differential Scanning Calorimetry
et al.		Et alii, et aliae, et alia (lateinisch, entspricht „und andere“)
f.		folgend
ff.		fortfolgend
FDM		Fused Deposition Modeling
FFF		Fused Filament Fabrication
FLM		Fused Layer Modeling
R^2		Bestimmtheitsmaß (statistisch)
ρ_{Faser}	kg/m ³	Dichte Faser
ρ_{Matrix}	kg/m ³	Dichte Matrix
REM		Rasterelektronenmikroskop
σ_{SN}	MPa	Schweißnahtfestigkeit
STL		Standard Triangulation Language
T	°C	Temperatur
T_D	°C	Düsentemperatur
T_B	°C	Bauraumtemperatur
T_g	°C	Glasübergangstemperatur
T_m	°C	Schmelztemperatur
TGA		thermogravimetrische Analyse
PAEK		Polyaryletherketone
PEEK		Polyetheretherketon
φ_{Faser}	%	Faservolumenanteil
φ_{Matrix}	%	Matrixvolumenanteil
PPSU		Polyphenylsulfon
ψ	%	Fasergewichtsanteil
TP		Temperaturprofil
v	m ³ /kg	spezifische Volumen
$v_{\text{Strangablage}}$	mm/s	Strangablagegeschwindigkeit
z. B.		zum Beispiel

1 Einleitung

Die additive Fertigung umfasst eine Vielzahl von Fertigungsverfahren, die durch eine schichtweise Herstellung von Bauteilen aus dreidimensionalen, geometrischen Daten gekennzeichnet sind [Geb16, S. 3]. Im deutschsprachigen Raum sind die additiven Fertigungsverfahren der Öffentlichkeit unter den Begriffen Rapid Prototyping und 3D-Druck bekannt geworden [FGK18, S. 8]. Charakteristisch für diese Verfahren ist, dass sie Bauteile durch einen überwiegend schichtweisen Aufbau und die iterative Zugabe von Material erzeugen. Durch die Schichtbauweise kann auf bauteilspezifische, formgebende Werkzeuge verzichtet werden, um komplexe Bauteile herzustellen. Es entstehen fertigungsbedingte konstruktive Freiheiten, die eine Herstellung von z. B. innenliegenden Strukturen oder Hohlräumen ermöglichen. [GRS15, S. 9ff.]

Seit der Einführung des ersten additiven Fertigungsverfahrens, der Stereolithografie im Jahr 1987, hat sich die Technologie mit der Vorstellung neuer Verfahren kontinuierlich weiterentwickelt [WG16-ol, S. 1]. Ursprünglich war für die additive Fertigung der Einsatz im Produktentwicklungsprozess von Prototypen vorgesehen. Bedingt durch die stetige Weiterentwicklung verschiedener Verfahren werden diese heute allerdings auch zur Herstellung von Werkzeugen und Endprodukten eingesetzt. Somit findet ein Wandel vom Rapid Prototyping in Richtung der Fertigung von funktionalen Bauteilen im Sinne des Rapid Manufacturing oder Direct Manufacturing statt [Vv21, S. 1]. Der werkzeuglose Prozess ermöglicht eine wirtschaftliche Fertigung von Einzelteilen und Kleinserien [Geb14, S. 79].

Eine Auswertung des Wohlers Reports aus dem Jahr 2018 ergab, dass der Anteil der additiv gefertigten Funktionsbauteile mit 33,1 % bereits den Anteil der Anwendungen im Bereich der Prototypen (31,1 %) hinter sich gelassen hat [Wat19, S. 1]. Zudem konnte die globale 3D-Druckindustrie trotz COVID-19 im Jahr 2020 ein Branchenwachstum von 7,5 % auf ein Marktvolumen von 12,8 Milliarden \$ verzeichnen [Reg21-ol, S. 1]. Die weltweit meistverwendeten Materialien zur Anwendung und Nutzung der additiven Fertigung sind nach einer statistischen Erhebung in 2020 Kunststoffe [Sta20-ol, S. 16].

Insbesondere die extrusionsbasierten Verfahren haben sich industriell zur Verarbeitung von Kunststoffen bewährt [FGK18, S. 9ff.]. Eines der weitverbreitetsten additiven Fertigungsverfahren ist das Fused Deposition Modeling (FDM) [RSZ17, S. 138], [Scu21-ol, S. 8]. Die Abkürzung FDM ist eine Markenbezeichnung der Firma Stratasys. Das Unternehmen hat das FDM Verfahren entwickelt, patentiert und seit 1991 kommerziell vertrieben. Die Firma Stratasys ist aufgrund einer Vielzahl von Patenten zum Marktführer im Bereich der FDM Maschinen sowie Materialien aufgestiegen und versteht sich als Systemdienstleister. Das Geschäftsmodell sieht vor, die FDM Maschine, das Material und die Verarbeitungsparameter als Paket in einem geschlossenen System zu vertreiben. Dadurch können Materialien von Drittanbietern nicht mit den Anlagen von Stratasys verarbeitet werden [SG16, S. 285]. Die Materialauswahl war daher lange eingeschränkt und erlebt erst nach dem Auslaufen

erster Patente eine wachsende Nachfrage. So sind verstärkte Aktivitäten im Bereich der Materialforschung zu erkennen [Bäh20, S. 13f.].

Neben der Verfügbarkeit geeigneter Materialien ist auch die Verarbeitbarkeit der Materialien für den Einsatz im FDM Verfahren von signifikanter Bedeutung. Insbesondere das 2021 ausgelaufene Stratasys Patent (US6722872B1, [STL+00]) spielt für die zukünftige Entwicklung von FDM Maschinen eine wichtige Rolle. Nun dürfen Anlagenhersteller einen aktiv beheizten Bauraum nutzen und müssen sich nicht mehr mit alternativen Lösungen, wie eine durch die Bauplattform passiv beheizte Bauumgebung, behelfen. Dies eröffnet die Möglichkeit, deutlich höhere Temperaturen im Bauraum zu generieren und verbessert infolgedessen die Verarbeitung von Hochleistungskunststoffen. Somit wird durch die Weiterentwicklung der Fertigungsanlagen die Verarbeitung von Hochleistungskunststoffen in den Fokus rücken. Hochleistungskunststoffe weisen eine Vielzahl von technisch relevanten Eigenschaften auf. Sie besitzen zum Beispiel eine hohe Festigkeit, haben ein hohes Leichtbaupotenzial und sind chemisch, thermisch sowie biologisch resistent.

Dies führt zu der Motivation dieser Arbeit, den Materialqualifizierungsprozess von Hochleistungsthermoplasten für den FDM Prozess anhand von ausgewählten Merkmalen zu untersuchen und das FDM Materialportfolio zu erweitern. Auf der Grundlage von experimentellen Untersuchungen werden material- und prozessspezifische Einflussfaktoren analysiert und die Verarbeitungseignung bewertet. Der Fokus liegt hierbei auf den temperaturbedingten Prozessparametereinflüssen, da diese im Hochtemperaturbereich bisher unzureichend untersucht sind. So können sowohl Anforderungen an den Prozess als auch an das Material identifiziert werden. In den Untersuchungen werden die Hochleistungsthermoplaste Polyetheretherketon (PEEK) und Polyphenylsulfon (PPSU) verwendet. Das Ziel ist es, ein detailliertes Prozesswissen bereitzustellen, die Verarbeitbarkeit zu verbessern und die Verwendung von Hochleistungskunststoffen im FDM langfristig zu steigern. Zusätzlich soll die Vorgehensweise der Materialqualifizierung um eine Methode zur Beurteilung der Verarbeitungseignung von Multimaterialkombinationen erweitert werden.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden Grundlagen vorgestellt, die zur Einordnung der Untersuchungen und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit benötigt werden. Dies erfolgt unter der Berücksichtigung des Stands der Technik sowie aktueller Forschungsarbeiten mit dem Hauptaugenmerk auf Dissertationen, die den Fokus auf das Fused Deposition Modeling Verfahren gelegt haben. Im Verlauf des Kapitels werden zunächst die Grundlagen der additiven Fertigung beschrieben und die Fertigungstechnologien eingeordnet. Weiterführend wird das Fused Deposition Modeling Verfahren detailliert betrachtet und verfahrensspezifische Besonderheiten sowie Einflussfaktoren herausgestellt.

2.1 Grundlagen der additiven Fertigung

Der Oberbegriff additive Fertigung umfasst eine Vielzahl an Fertigungsverfahren und Begriffen mit unterschiedlichen Bedeutungen. Aus diesem Grund wird zunächst die additive Fertigung als Begriff definiert und als Fertigungsverfahren klassifiziert. Darauf aufbauend erfolgt die Vorstellung des grundlegenden Funktionsprinzips additiver Fertigungsverfahren.

2.1.1 Begriffsdefinition und Einordnung

Der Begriff additive Fertigung ist in der [DIN EN ISO/ASTM 52900] festgelegt und klassifiziert. In der additiven Fertigung, auch generative Fertigung oder im englischen Sprachgebrauch Additive Manufacturing (AM) genannt, finden additive Fertigungsverfahren Anwendung. Diese Fertigungsverfahren zeichnen sich durch eine schichtweise Herstellung von Bauteilen aus. Der schichtweise Aufbau erfolgt durch das Aneinanderfügen einzelner Volumenelemente. Aufgrund der vereinfachten Vorstellung des Verfahrens als Drucken von 3D-Bauteilen, ist im Kontext der additiven Fertigung der Begriff 3D-Drucken gebräuchlich. Insbesondere in Medien mit einem geringen technischen Hintergrund hat sich dieser Begriff etabliert. [Geb16, S. 3], [DIN EN ISO/ASTM 52900, S. 9], [VDI 3405, S. 3]

Additive Fertigungsverfahren lassen sich unter anderem gemäß der [DIN 8580] oder der [DIN EN ISO 17296-2] einordnen. Nach der [DIN 8580] zählen die additiven Fertigungsverfahren zu der ersten Hauptgruppe der urformenden Fertigungsverfahren. Aus einem Ausgangsmaterial, welches in der Regel aufgeschmolzen oder abgelegt wird, entsteht eine neue Geometrie [Kum19, S. 45]. In Anlehnung an diese Einteilung ist, wie in Bild 2-1 dargestellt, eine weiterführende Unterteilung möglich. Die additiven Fertigungsverfahren werden nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials, der Anlagenzuführung, der Erscheinungsform des Werkstoffs sowie dem Mechanismus der Schichtbildung systematisiert [Geb16, S. 47]. [Fri18, S. 116f.]

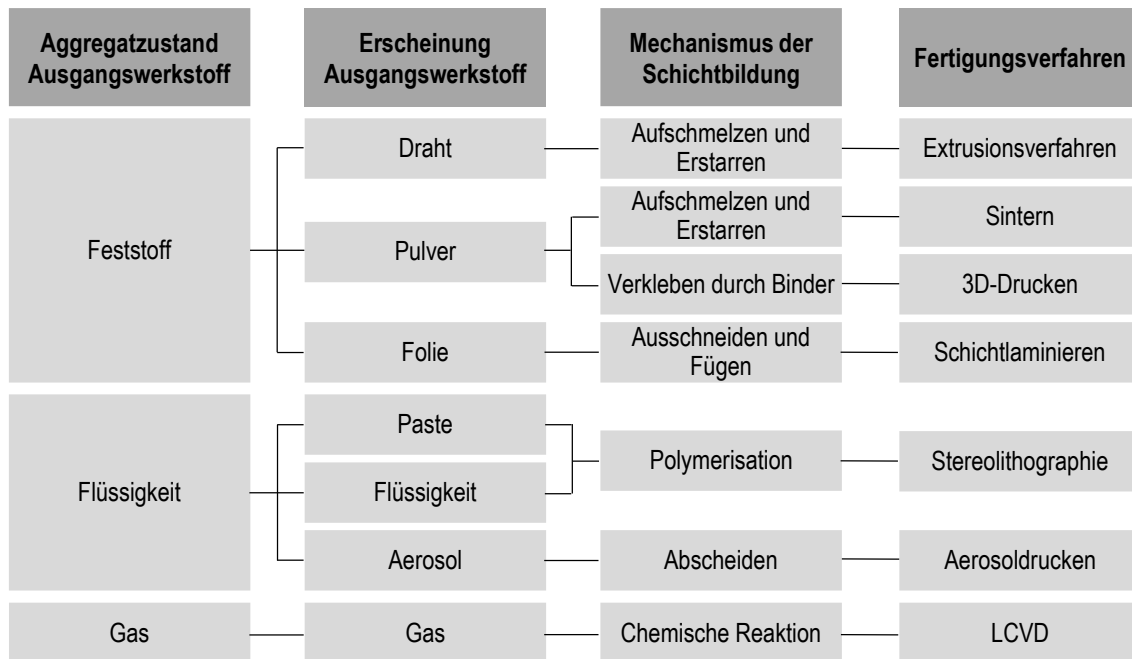


Bild 2-1: Einteilung additiver Fertigungsverfahren nach dem Aggregatzustand des Ausgangswerkstoffs nach [Geb16, S. 94]

Eine spezifische Einteilung der additiven Fertigungstechnologien wird in der [DIN EN ISO 17296-2] vorgenommen. Die Norm setzt eine mehrjährige Etablierung der Fertigungsverfahren am Markt voraus und kategorisiert diese in sieben Kategorien. Additive Fertigungsverfahren, die thermoplastische Kunststoffe verarbeiten, sind der Norm entsprechend das laserbasierte Pulverbettsschmelzen und Verfahren, die dem Prinzip der Werkstoffextrusion zugeordnet werden können. [DIN EN ISO 17296-2, S. 7ff.]

2.1.2 Funktionsprinzip additiver Fertigungsverfahren

Nach der VDI-Richtlinie 3405 lässt sich der Prozessablauf additiver Fertigungsverfahren in die Teilprozesse Pre-, In- und Post-Prozess gliedern [VDI 3405, S. 6f.]. Durch das im Folgenden beschriebene Funktionsprinzip wird eine individualisierte und schnelle Fertigung von komplexen Bauteilen ermöglicht [Ada15, S. 1]. Basierend auf 3D-CAD-Daten wird die Herstellung von Bauteilen umgesetzt. Im Pre-Prozess erfolgt die Aufbereitung der CAD-Konstruktionsdatei. Die CAD-Datei wird hierbei in das STL-Format konvertiert. Im STL-Format wird die Oberfläche des Bauteils durch Dreieckfacetten approximiert. Diese Darstellungsweise wird auch Triangulation genannt. In dem darauffolgenden Schritt wird das Bauteil in Schichten konstanter Dicke geschnitten. Dieser Vorgang wird als Slicen bezeichnet und ist die Grundlage für den schichtweisen Aufbau der Bauteile [BHS17, S. 130]. Auf diese Weise wird eine dreidimensionale Geometrie auf zweidimensionale Geometrien mit definierten Dicken reduziert [Geb16, S. 3]. Durch die Erzeugung von Einzelschichten können die benötigten geometrischen Informationen für die iterative Schichtbauweise

generiert werden. Anschließend werden diese Schichten während des Bauprozesses zu einem Bauteil zusammengefügt und das Bauteil Schicht für Schicht gefertigt. Bild 2-2 veranschaulicht diesen Prozess. [GRS15, S. 45ff.], [FG17, S. 27f.]

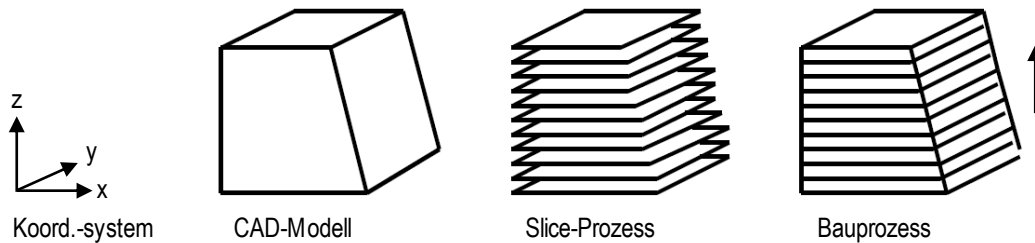


Bild 2-2: Prozess zur Generierung der Fertigungsdaten [VDI 3405]

Im In-Prozess erfolgt schichtweise die Herstellung des Bauteils. Dieser Prozessschritt beinhaltet die Erzeugung einer einzelnen Schicht und die stoffschlüssige Verbindung der neuen Schicht mit der zuvor hergestellten Schicht. Damit sich die Schichten miteinander verbinden können, muss eine bestimmte Energiemenge bereitgestellt werden. Das Ziel ist es, dass sich das Material sowohl innerhalb einer Schicht miteinander verbindet als auch mit der zuvor hergestellten Schicht. Arbeitsschritte zur Entnahme des Bauteils aus dem Bauraum werden dieser Prozessphase ebenfalls zugeordnet. [GRS+21, S. 178]

Der Post-Prozess beinhaltet die Nacharbeit eines Bauteils, nachdem es der Fertigungsanlage entnommen wurde. Die Nacharbeit schließt unter anderem das Entfernen von Materialrückständen sowie von Stützstrukturen ein. Stützstrukturen oder Hilfsgeometrien können notwendig sein, um einen robusten Fertigungsprozess der Bauteile zu gewährleisten [GRS15, S. 55f.]. Es können noch weitere Nachbehandlungsschritte folgen, bevor das Bauteil seinen Einsatzzweck erfüllen kann. So kann durch Sandstrahlen, Fräsen oder andere Fertigungsverfahren die Oberflächenqualität eingestellt oder durch eine Wärmebehandlung Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften genommen werden. [VDI 3405, S. 6f.], [WW11, S. 264]

2.2 Fused Deposition Modeling (FDM)

Das Fused Deposition Modeling (FDM) ist eine geschützte Markenbezeichnung des US-amerikanischen Herstellers Stratasys und beinhaltet ein durch CRUMP patentiertes Verfahren (US5121329A, [Cru92]). Hierbei werden dreidimensionale Bauteile durch das Fertigen und Stapeln einzelner Schichten aufgebaut. Ein in der Regel thermoplastisches Material wird aufgeschmolzen und definiert als Strang aufgetragen. Der FDM-Prozess kann gemäß der [DIN EN ISO/ASTM 52900] in die Prozesskategorie der Werkstoffextrusion eingeordnet werden [Fas12, S. 120]. Prozesse, die der Gruppe der Werkstoffextrusion zugeordnet werden können, werden in der Literatur und in der Normung als Fused Layer Modeling (FLM) oder Fused Filament Fabrication (FFF) bezeichnet. Unter der von der Fa. Stratasys

angebotenen und geschützten Marke FDM ist somit ein FLM Prozess zu verstehen. Da das FDM-Verfahren bereits seit 1991 kommerzialisiert wird und der erste am Markt erhältliche FLM-Prozess gewesen ist, wird FDM als Synonym und als generische Bezeichnung für FLM geführt [GKS19, S. 71]. [Geb16, S. 259]

2.2.1 Verfahrensprinzip und Maschinenkomponenten

Im FDM-Verfahren werden drahtförmige Halbzeuge aus einem thermoplastischen Ausgangsmaterial aufgeschmolzen und die Schmelze als Strang durch eine Düse auf einer Bauunterlage abgelegt [Geb14, S. 51]. Dieser Kunststoffdraht wird als Filament bezeichnet und liegt üblicherweise mit einem Durchmesser von 1,5 mm bis 3,0 mm konfektioniert auf Spulen vor [TSG14, S. 193]. Das Filament wird im Prozess kontinuierlich über Schlauchführungen dem Filamentextruder zugeführt. Der Filamentextruder bildet das Werkzeug im FDM-Prozess und kann innerhalb der xy-Bauebene verfahren werden, um den zugeführten Kunststoff in schmelzflüssiger Form strangweise abzulegen (siehe Bild 2-3). Diese horizontale Bewegung wird meistens über Riemensysteme, welche durch Servomotoren gesteuert werden, kinematisch umgesetzt. Nach dem Beenden einer Schicht wird die Bauplattform um eine definierte Schichtdicke in z-Richtung abgesenkt, um auf diese Weise Platz für eine neue Schicht zu schaffen. Die Verfahrbewegung in z-Richtung wird durch Gewindespindeln realisiert. [GRS15, S. 148ff.]

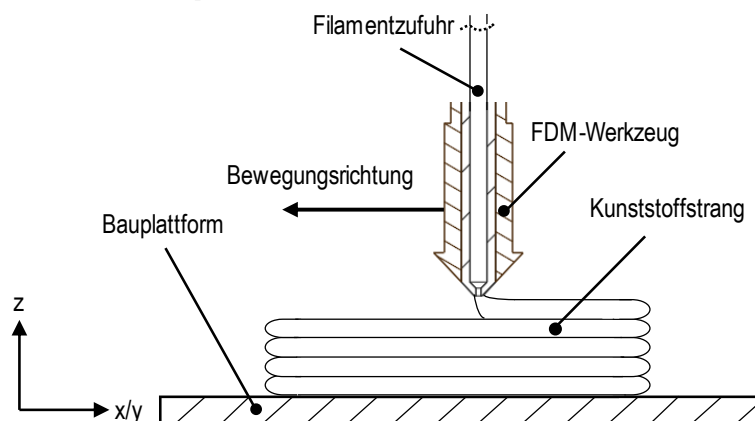


Bild 2-3: Schematische Darstellung des Verfahrensprinzips

Prozessbedingt ist es nach einer allgemein geltenden Handlungsempfehlung notwendig, Hohlräume oder Bauteilüberhänge mit einem Winkel kleiner als 45° zur horizontalen xy-Ebene mithilfe von Stützstrukturen zu unterbauen. Das Stützmaterial dient zur Stabilisierung und zum Abstützen des Bauteilüberhangs gegen die wirkende Schwerkraft. Industrielle Anlagen verfügen zu diesem Zweck über zwei Filamentextruder. Dies ermöglicht die Verwendung eines separaten Stützmaterials. Das Stützmaterial sollte im Vergleich zum Baumaterial unterschiedliche Materialeigenschaften aufweisen. Eine geringere Festigkeit des Stützmaterials ermöglicht eine mechanische Entfernung nach dem Fertigungsprozess. Damit dieser Vorgang beschädigungsfrei erfolgen kann, ist es notwendig, dass die

Verbundfestigkeit zwischen Stützstruktur und Bauteil schwächer ist als die Festigkeit zwischen den Bauteilschichten. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, durch unterschiedliche chemische Eigenschaften die Stützstruktur durch ein Lösemittel, gegen welches das Baumaterial beständig ist, zu entfernen [BBW+12, S. 33]. Dies kann z. B. in Wasser oder in Natriumhydroxid erfolgen und ermöglicht es, Stützstrukturen in schwer zugänglichen Bereichen des Bauteils aufzulösen. [GRS+21, S. 179f.], [Wen09, S. 13]

Während des FDM-Prozesses wird das Filament durch Zahnräder in den Filamentextruder eingezogen, dort plastifiziert und anschließend wird die Kunststoffschmelze durch eine Düse auf die Bauplattform gedrückt (vgl. Bild 2-4). Der Vorschub des Filaments um eine definierte Länge wird durch spezielle Zahnräder in einem federdruckbasierten Rollensystem umgesetzt [GRS15, S. 153]. Das Ziel ist es, durch den Vorschub des noch nicht plastifizierten Filaments eine exakte Menge an Material zu liefern [AJL+96, S. 14]. Der Aufschmelzvorgang des Materials erfolgt in der Plastifiziereinheit des Filamentextruders, welche sich in einen gekühlten Bereich und einen beheizten Bereich unterteilen lässt. Der gekühlte Bereich dient dazu, dass eine gleichmäßige Menge an nicht plastifiziertem Material bereitgestellt werden kann und das Aufschmelzen lokal definiert eingeleitet wird.

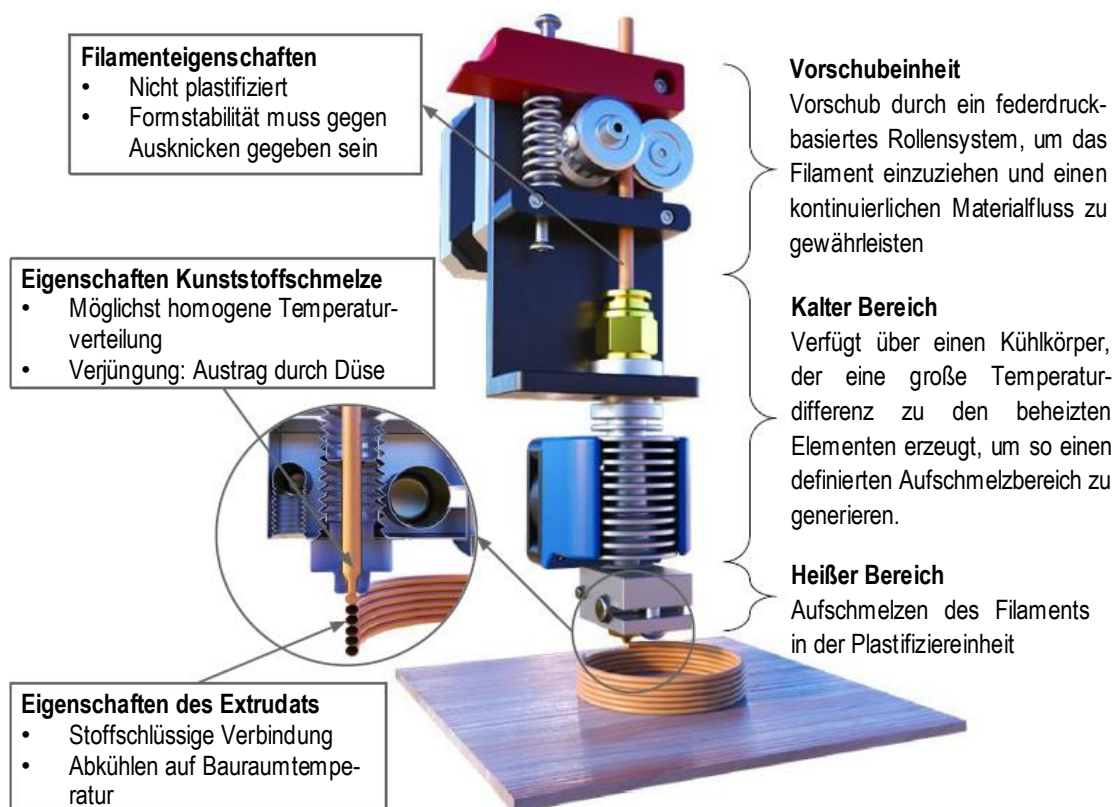


Bild 2-4: Darstellung des Filamentextruders in Anlehnung an [SAA+21, S. 1281]

Der Materialaustrag erfolgt, indem das noch nicht aufgeschmolzene Filament als eine Art Kolben genutzt wird, um die Schmelze aus der Düse zu drücken. Für einen Schmelzeaustrag muss durch den Vorschubmechanismus ausreichend Kraft aufgebracht werden, um

den Gegendruck der Düse zu überwinden. Im heißen Bereich der Plastifiziereinheit kommt es zum Aufschmelzen des Filaments und der Bereitstellung von zähflüssiger Kunststoffschmelze. Die konduktive Erwärmung erfolgt in einem Heizblock über Heizpatronen, die die notwendige thermische Energie zur Verfügung stellen. [GRS+21, S. 173ff.], [TSG14, S. 194ff.]

Mit dem Austritt der Kunststoffschmelze durch eine Düse wird eine stoffschlüssige Verbindung des extrudierten Strangs mit der bereits abgelegten Struktur erzeugt. Der Strang besitzt eine höhere Temperatur als die bestehende Schichtstruktur und es kommt zu einer lokalen Erwärmung. Dies führt zu einer Schweißung zwischen den Oberflächen. Die Verwendung eines beheizten Bauraums kann die thermische Schweißung begünstigen, da durch eine erhöhte Bauraumtemperatur zusätzliche thermische Energie eingebracht wird. Die Temperierung des Bauraums verringert somit die Temperaturdifferenz zwischen der abgekühlten Schicht und den neu aufgetragenen Strängen. Dadurch wird zudem die Bauteilqualität verbessert, da prozessbedingte Eigenspannungen reduziert werden, die zu einem Bauteilverzug führen können. Mit dem Abkühlen auf die Bauraumtemperatur verfestigt sich das Material und eine solide Bauteilstruktur entsteht. [TSG14, S. 194], [Klo16, S. 9]

2.2.2 Prozessphasen

Das in Kapitel 2.1.2 beschriebene Verfahrensprinzip führt zu charakteristischen Prozessphasen im FDM, die nachfolgend definiert werden und deren Berücksichtigung in den experimentellen Untersuchungen einen essentiellen Bestandteil darstellt. Im Gegensatz zu konventionellen Extrusionsverfahren wird im FDM kein konstant anhaltender, stationärer Materialaustrag erreicht. Während der Fertigung kommt es zu einer Vielzahl von verschiedenen, wiederkehrenden Extrusionsphasen. Diese Prozessphasen sind zurückzuführen auf ein Zusammenspiel zwischen Verfahrensbewegung des Filamentextruders in der xy-Ebene und der Extrusionsrate an Kunststoffschmelze durch die Düse während der Strangablage. Aufgrund von Richtungswechseln wie z. B. bei 90°-Umlenkungen kommt es zu Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen des Filamentextruders. Um einen möglichst gleichmäßigen Materialaustrag zu erhalten, muss der Volumenstrom der Kunststoffschmelze unter Berücksichtigung des Geschwindigkeitsprofils adaptiert werden. Die Strangablage im FDM lässt sich in drei Prozessphasen untergliedern: pausierte Strangextrusion, instationäre Strangextrusion und stationäre Strangextrusion. [GRS+21, S. 171], [SSG17, S. 472]

Die pausierte Strangextrusion ist gekennzeichnet durch ein gezieltes Aussetzen der Strangablage. Gleichzeitig können aber Verfahrensbewegungen des Filamentextruders in der xy-Ebene durchgeführt werden, um in einer Schicht ein anderes Bauteilsegment anzusteuern oder um eine neue Schicht zu beginnen. In der Regel wird die pausierte Strangextrusion durch eine Rückzugsbewegung des Filaments eingeleitet. Dies führt dazu, dass das verwendete Material aus der heißen Zone der Plastifiziereinheit gezogen wird. Durch die

Rückzugsbewegung wird zudem der Druck in der Düse reduziert und ein unkontrolliertes Austreten von Kunststoffschmelze während der ausgesetzten Materialeextrusion verhindert. [Sch20, S. 26]

Die stationäre Extrusion beschreibt den Vorgang der Strangablage, bei der ein konstanter Materialaustrag ohne sich ändernde Verfahrensgeschwindigkeiten realisiert wird. Folglich wirkt dieser Faktor insbesondere bei linearen Verfahrenswegen, bei denen der Filamentextruder die vorgegebenen Sollgeschwindigkeiten erreicht. Es stellt sich eine gleichmäßige Geometrie des abgelegten Kunststoffstrangs ein. [MWE21, S. 2]

Während der instationären Extrusion wird Material zu einem Strang abgelegt. Die instationäre Strangablage umfasst Bereiche, in denen der Austrag der Kunststoffschmelze über die Zeit nicht konstant ist. Dementsprechend kommt es vor allem in Ecken und bei Umlenkungen zu instationären Extrusionsvorgängen. Das bedeutet, dass sich die Bewegungsgeschwindigkeit des Filamentextruders in der xy-Ebene und der daran gekoppelte Austrag der Kunststoffschmelze durchgehend ändert. Es wird versucht, eine möglichst gleichmäßige Geometrie des Kunststoffstrangs zu generieren, indem die Geschwindigkeit des Filamentvorschubs auf die Geschwindigkeit des Filamentextruders abgestimmt wird. Dieser Vorgang ist komplex, sodass sich der instationäre Extrusionszustand in abweichenden Austrittsquerschnitten des Strangs widerspiegelt. [SSG17, S. 472ff.], [MWE21, S. 2f.]

In Bild 2-5 sind exemplarisch die zuvor beschriebenen verschiedenen Prozessphasen anhand einer 90°-Umlenkung dargestellt.

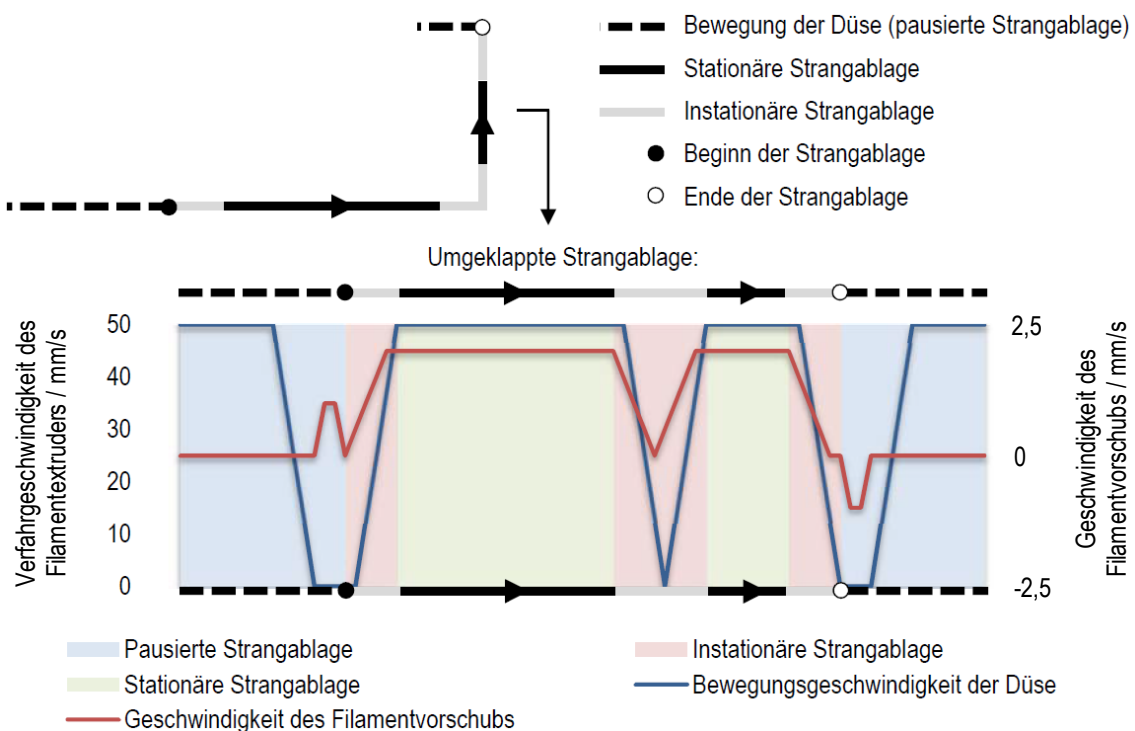


Bild 2-5: Visualisierung der Prozessphasen während Strangablage nach [Sch20, S. 26]

Zur Bewegung des Filamentextruders entlang der vorgegebenen Strangablage wird der Filamentextruder zu Beginn der Strangablage und nach der Umlenkung beschleunigt. Die dargestellten Verfahrensgeschwindigkeiten des Filamentextruders sowie die Vorschubgeschwindigkeiten des Filaments in den einzelnen Prozessphasen sind beispielhaft aufgeführt und unterscheiden sich aufgrund von maschinen- und materialspezifischen Eigenschaften je nach verwendeter Maschine, eingesetztem Material oder ausgewählten Prozesseinstellungen.

2.2.3 Einflussfaktoren im Fused Deposition Modeling

Im FDM-Prozess gibt es eine Vielzahl an Parametern, die das Fertigungsergebnis beeinflussen können und in direkter oder indirekter Beziehung zueinander stehen [Wen09, S. 14]. Diese Parameter können einzelnen Einflussfaktoren zugeordnet werden. Die Einflussfaktoren lassen sich beispielsweise in Material, Prozess und Maschine gliedern [CPT94, S. 42ff.]. Eine weitere Möglichkeit zur Kategorisierung der Einflussfaktoren ist die 6M-Methode und die Klassifizierung nach Mensch, Material, Messung, Maschine, Milieu und Methode [Kno20, S. 12]. KLOKE teilt die Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität in Einflüsse durch das Material, den Prozess und die Maschine ein [Klo16, S. 3]. Zur Beurteilung der Bauteilqualität können Geometriewerte oder mechanische Eigenschaften hinzugezogen werden. Im Folgenden wird diese Klassifizierung der Einflussfaktoren übernommen und es werden einzelne Parameter, die im Bezug zur vorliegenden Arbeit stehen, erläutert.

2.2.3.1 Einfluss durch das Material

Das im FDM verwendete Material bzw. eingesetzte Filament muss prozessspezifische Anforderungen erfüllen. So kann nur ein thermoplastischer Kunststoff verwendet werden, da er im Prozess aufgeschmolzen und anschließend verschweißt wird. Des Weiteren hat das Material während der Erzeugung der Bauteile mit seinen thermodynamischen, rheologischen und mechanischen Eigenschaften einen direkten Einfluss auf den Prozess und die Bauteilqualität [Klo16, S. 10]. Aber auch die Filamentqualität sowie das Handling des Filaments vor und während der Verarbeitung beeinflussen die Qualität des Bauteils. Bild 2-6 gibt einen Überblick über die genannten Einflussfaktoren.

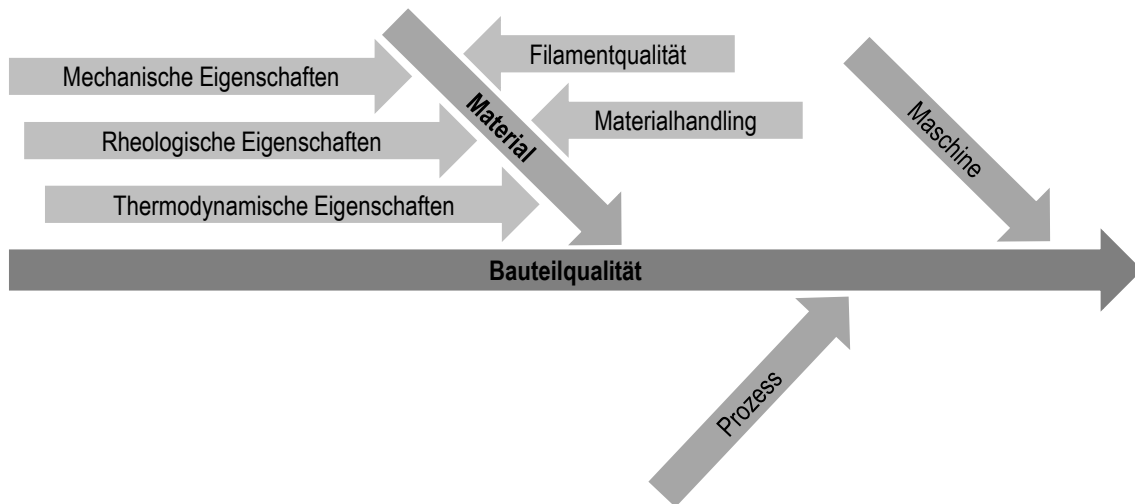


Bild 2-6: Einfluss des Materials auf die Bauteilqualität

Zur Betrachtung des Materialeinflusses ist es erforderlich auch verfahrensspezifische Einflüsse zu berücksichtigen. So kann die Verarbeitung des Filaments mithilfe der Plastifiziereinheit zu Veränderungen der physikalischen Materialeigenschaften führen, z. B. zu einer Abnahme der Viskosität infolge von thermischer Degradation [BLS+04, S. 176f.]. Eine Differenzierung kann folglich zwischen Ausgangsmaterial und dem gefertigten Bauteil erfolgen [Kno20, S. 13]. In den experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit werden daher Änderungen der physikalischen Materialeigenschaften aufgrund der Prozessführungen berücksichtigt und analysiert.

Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften werden Prozesstemperaturen im FDM festgelegt. Zu den thermodynamischen Materialeigenschaften zählt beispielsweise die Schmelztemperatur [Bon09, S. 10]. Diese Eigenschaft nimmt für den FDM-Prozess eine wichtige Rolle ein, da in Abhängigkeit von der materialspezifischen Schmelztemperatur die Düsentemperaturen definiert werden: Das Material muss vollständig aufgeschmolzen sein, allerdings können zu hohe Temperaturen zu einer Materialersetzung führen. [GRS+21, S. 173], [CLL03, S. 129]

Die rheologischen Eigenschaften des Materials beeinflussen die Auswahl der Verarbeitungsparameter hinsichtlich Prozesstemperaturen und -geschwindigkeiten. Ein Aspekt der rheologischen Eigenschaften stellt das Fließverhalten dar, das zusammen mit der Geschwindigkeit des Filamentvorschubs für einen konstanten Materialfluss von Bedeutung ist [Bon09, S. 23f.]. Die Fließfähigkeit der Schmelze wird durch die Viskosität des Materials bestimmt [HHH04, S. 439]. Durch eine geringere Schmelzviskosität wird eine höhere Fließfähigkeit erzielt. Für die Verarbeitung im FDM ist ein semiflüssiger Zustand anzustreben. Ein Mittel zwischen zähflüssig und dünnflüssig sorgt dafür, dass das Material mit moderater Kraft extrudierbar ist und der ausgetragene Strang eine ausreichende Formstabilität für den FDM-Prozess aufweist, also ausreichend fest ist und gleichzeitig nicht zerfließt [Klo16, S. 11].

Als mechanische Eigenschaften sind z. B. die Festigkeit, die Bruchdehnung oder der Elastizitätsmodul des Ausgangsmaterials von Bedeutung [Bon09, S. 158]. Diese beeinflussen mit der Bauteilanordnung und der Aufbaurichtung die mechanischen Eigenschaften des FDM-Bauteils [Klo16, S. 37f.]. Darüber hinaus wirken sich die mechanischen Eigenschaften auch auf den Verarbeitungsprozess aus, z. B. inwieweit sich das Filament auf Spulen konfektionieren lässt und dem Filamentextruder ohne Knicken zugeführt werden kann [CPT94, S. 43].

Für die Filamentqualität ist ein konstanter und gleichmäßiger Durchmesser von Bedeutung. Das ist erforderlich, da Unregelmäßigkeiten im Durchmesser des Filaments zu einem ungleichmäßigen Materialvolumenausstrag führen. Dies resultiert dann in einer Unter- oder Überextrusion von Material, da der gesteuerte Filamentvorschub an den Filamentdurchmesser gekoppelt ist, um ein definiertes Volumen an Kunststoffschmelze auszutragen. Zudem ist die Wasseraufnahme von einigen Kunststoffen bei der Verarbeitung im FDM zu berücksichtigen. Die Ausgangsmaterialien müssen ausreichend trocken sein, um ein Ausgasen von Wasser zu vermeiden. Eine Zunahme des Feuchtigkeitsgehalts kann ansonsten zu einer Verringerung der Steifigkeit und einer Abnahme der Zugfestigkeit führen [KSA16, S. 893]. [Sch20, S. 20]

2.2.3.2 Einfluss durch den Prozess

Der Einflussfaktor Prozess umfasst neben den maschinenspezifischen Parametern wie Temperaturen oder Geschwindigkeiten auch die Beeinflussung des FDM-Fertigungsprozesses durch die Datenaufbereitung und die daraus resultierende Strangablage. Bild 2-7 zeigt eine Auswahl von Parametern, die die Bauteilqualität beeinflussen können und die für die experimentelle Vorgehensweise zur Beurteilung der Verarbeitungseignung in dieser Arbeit relevant sind.

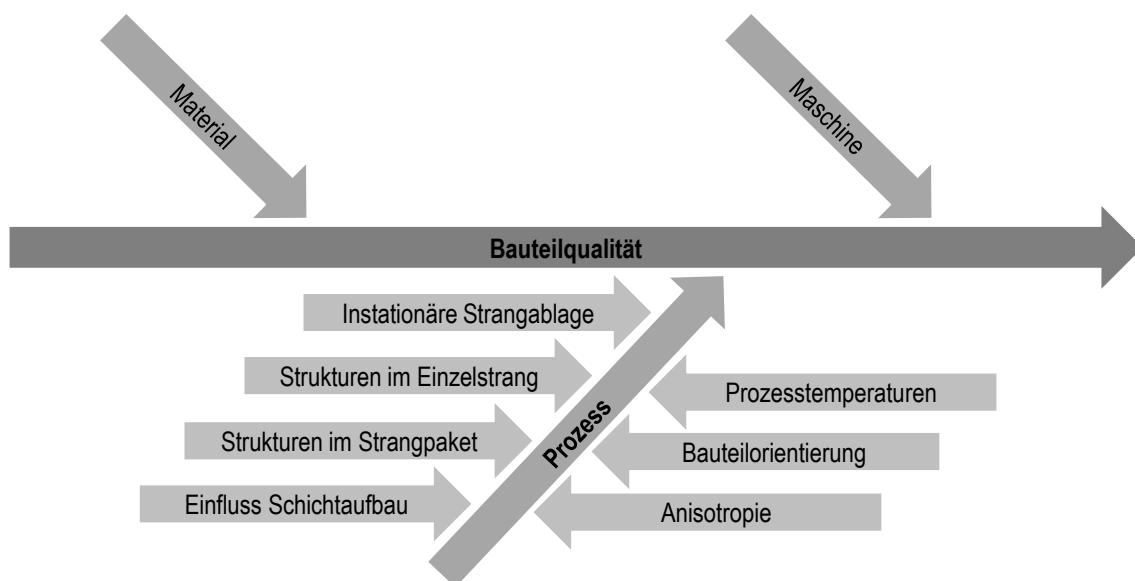


Bild 2-7: Einfluss des Prozesses auf die Bauteilqualität

In Bereichen der instationären Strangablage wird der Prozess durch maschinen- und softwarespezifische Einflüsse beeinträchtigt. Die entstehenden Bauteilprägungen sind nicht durch den schichtweisen Aufbau und die Strangablagestrategie vorgegeben und müssen gesondert betrachtet werden. In den Untersuchungen von SCHUMACHER wird eine Differenzierung zwischen entstehenden Strukturen im Einzelstrang und zwischen Strukturen mehrerer Stränge in einem Strangpaket vorgenommen [Sch20, S.31ff.]. Diese müssen zur Beurteilung der Verarbeitungseignung von Materialien für den FDM-Prozess berücksichtigt werden.

Aufgrund von Beschleunigungsvorgängen des Filamentextruders kann es während des gleichzeitigen Austrags der Kunststoffschmelze zu Pulsationen und somit zu ungleichmäßigen Strangbreiten kommen [SSG17, S. 474]. Durch eine Reduzierung der Verfahrensgeschwindigkeiten oder durch eine gesonderte Optimierung des Materialaustrags lässt sich eine gleichmäßigere Strangbreite erzielen [MWE21, S. 4f.]. Die maximalen Geschwindigkeiten und die Beschleunigungsprozesse sind durch die verwendete Maschine festgelegt [Sch20, S. 32]. Bei der Strangablage um Kanten kommt es an der Innenseite zu Materialstauchungen und an der Außenseite entsteht, bedingt durch Materialstreckung, ein Radius [Geb16, S. 264]. Dies führt dazu, dass keine scharfen Außenkanten hergestellt werden können [GRS15, S. 164]. Zudem wird aufgrund von Überschneidungen der Fahrwege an der Radiusinnenseite mehr Material abgelegt als benötigt wird.

Innerhalb eines Bauteils können durch die Interaktion von mehreren Einzelsträngen im Strangpaket FDM-spezifische Charakteristiken auftreten. Es können sich z. B. Lücken in einer Bauteilschicht oder innere Kerben bilden. Lücken in Bauteilbereichen entstehen, wenn es nicht möglich ist, das Innenmaß durch ein ganzzahliges Vielfaches der verwendeten Strangbreite abzubilden [HRE+13, S. 385]. Dies gilt, wenn die Stränge des Innenrasters parallel zum Konturstrang ausgerichtet sind. Des Weiteren kann es bei nebeneinander abgelegten Strängen zu einer Zwillingsbildung kommen. Das bedeutet, dass sich nebeneinanderliegende Stränge zu Zwillingspaaren gruppieren. In Folge von Zwillingsbildungen kommt es zu Kerbgeometrien im Bauteil und die Porenstruktur wird somit beeinflusst. [SSG17, S. 475f.]

Der Einfluss der Flächenfüllung bzw. des Schichtaufbaus auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften des FDM-Bauteils ist signifikant und wurde umfangreich in der Literatur untersucht. Parameter wie Schichthöhe, Strangbreite, Strangabstand und Füllmuster können durch gezielte Anpassungen zu einer Steigerung der mechanischen Eigenschaften führen. [AMO+02, S. 252], [CLH07, S. 309], [Klo16, S. 48ff.], [MRO+01, S. 20], [SOM09, S. 292ff.]

Darüber hinaus beeinflusst die Bauteilorientierung durch die Aufbaurichtung die mechanischen Eigenschaften. Für FDM-Bauteile ist eine Anisotropie gegeben, also eine Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften [BYP+98, S. 561]. Die Anisotropie ist auf

den strukturellen Aufbau der Schichten zurückzuführen. Es lassen sich drei grundlegende Bauteilorientierungen festlegen. Wie in Bild 2-8 dargestellt ist, kann eine Einteilung in x-, y- und z-Richtung erfolgen.

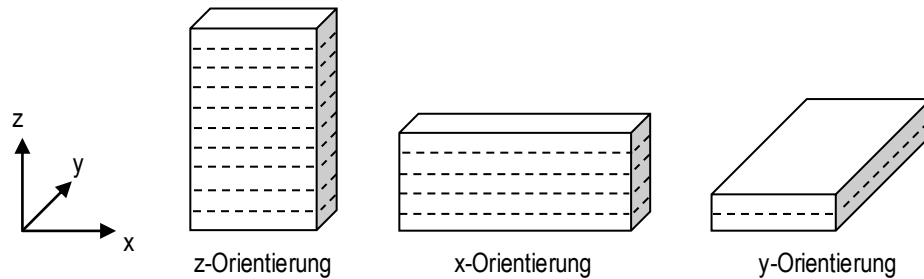


Bild 2-8: Schematische Darstellung der Bauteilorientierung in x-, y- und z-Richtung

Unter der Annahme, dass die Lastrichtung der Bauteilorientierung entspricht, weisen Bauteile bzw. Probekörper, die entlang der z-Achse orientiert sind, geringere mechanische Kennwerte auf als Probekörper, die in x-Orientierung (seitlich stehend) oder in y-Orientierung (flach liegend) gefertigt worden sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Kraftfluss bei den Probekörpern der z-Orientierung orthogonal zur Strangablagerichtung über die einzelnen Schichten erfolgt. Infolgedessen kommt es zu einem verfrühten Bauteilver sagen. [CLH07, S. 309ff.], [FS17, S. 565], [Wen09, S. 48f.]

Die Festigkeit ist somit von der Güte der Verschweißung zwischen den Schichten abhängig. Die Qualität der Schweißverbindungen wird insbesondere durch die Prozesstemperaturen, wie die Düsen- und Bauraumtemperatur, beeinflusst und wird aufgrund der signifikanten Bedeutung für den FDM-Prozess in Kapitel 2.3.2 gesondert betrachtet.

2.2.3.3 Einfluss durch die Maschine

Die FDM-Maschine nimmt mit ihren Komponenten Einfluss auf die Bauteilqualität. Daher ist es für die Ermittlung von Materialkennwerten und für einen Materialvergleich erforderlich, die maschinenspezifischen Einflüsse zu berücksichtigen.

Am Markt gibt es verschiedene Maschinenkonzepte zur Umsetzung der Bewegungen in der xy-Ebene und in z-Richtung. Eine Gemeinsamkeit aller Maschinen besteht in der Anforderung, dass hohe Bewegungsgeschwindigkeiten und Positioniergenauigkeiten umgesetzt werden sollen. Die möglichen Beschleunigungswerte und maximalen Verfahrensgeschwindigkeiten des Filamentextruders in der xy-Ebene können je nach Maschine unterschiedlich groß ausfallen und sind häufig durch die Steifigkeit der Maschine begrenzt. Denn Schwingungen der Maschine führen dazu, dass die Stränge nicht mehr positionsgenau aneinander und aufeinander abgelegt werden können [TSG14, S. 194]. Eine reproduzierbare Fertigung ist somit nicht möglich. [GRS+21, S. 192]

Auch das Design sowohl der Plastifiziereinheit als auch der Düse können die Bauteilqualität beeinflussen. Die maschinenbauliche Umsetzung der Plastifiziereinheit hat einen direkten Einfluss auf die Aufschmelzleistung des Filamentextruders, denn es muss eine ausreichende Menge an thermischer Energie bereitgestellt und ein konstanter Vorschub des Filaments gewährleistet werden. Der entstehende Gegendruck während des Strangaustrags und die resultierenden Schergeschwindigkeiten innerhalb der Schmelze stehen in einem direkten Zusammenhang mit der Düsengeometrie. [Sch20, S. 41], [TSG14, S. 194]

Durch einen aktiv beheizten Bauraum und eine definiert einstellbare Temperatur innerhalb der Bauumgebung ist es möglich, auch Hochtemperaturkunststoffe zu verarbeiten [Kno20, S. 16]. Die Temperierung des Bauraums erfolgt über einen Luftwärmestrom, der mithilfe eines Gebläses in den Bauraum geleitet wird. Die Verwendung von definierten Temperaturen im Bauraum eröffnet die Möglichkeit, das Schwindungsverhalten des FDM-Materials und somit den resultierenden Verzug des zu fertigenden Bauteils zu beeinflussen [WXJ07, S. 1093f.]. Zudem wirkt sich die Bauraumtemperatur positiv auf die Schweißnahtqualität aus [TSG14, S. 201].

2.2.4 Verfügbare Werkstoffe

Im FDM-Prozess kommen vorwiegend thermoplastische Kunststoffe in Form eines Filaments zum Einsatz [AJL+96, S. 8]. Thermoplaste setzen sich aus langen, fadenförmigen, linearen oder verzweigten Kettenmolekülen zusammen. Die Molekülketten sind räumlich nicht vernetzt und werden aufgrund von Van-der-Waals-Kräften zusammengehalten. Die Zuführung von Energie, beispielsweise Wärme, führt zu einer Vergrößerung des Kettenabstands und die zwischenmolekularen Kräfte nehmen ab. Das Material wird plastisch formbar. Dieser Vorgang ist, solange die Temperaturen unterhalb der Zersetzungstemperaturen liegen, reversibel und ermöglicht somit den Einsatz von Thermoplasten im FDM-Prozess. [Sch07, S. 84]

Thermoplastische Kunststoffe lassen sich in amorph und teilkristallin unterteilen. Die Verarbeitung im FDM-Prozess erfolgt im semi-flüssigen Zustand. Dieser wird bei den amorphen Thermoplasten bereits nach der Erweichungstemperatur erreicht, wohingegen bei den teilkristallinen Materialien eine materialspezifische Schmelztemperatur benötigt wird. Generell werden amorphe Thermoplaste als Werkstoff bevorzugt, da sie aufgrund des nicht vorhandenen Schmelzpunktes einen weniger eingeschränkten Verarbeitungsbereich besitzen und zudem während des Abkühlvorgangs eine geringere Materialschrumpfung aufweisen als teilkristalline Thermoplaste [Klo16, S. 10]. [DEE+12, S. 37ff.]

Das FDM-Verfahren bietet die Möglichkeit, ein weites Spektrum an Materialien zu verwenden. Die verarbeitbaren thermoplastischen Ausgangswerkstoffe lassen sich in verschiedene Kunststoffklassen unterteilen. Unterschieden werden Standardkunststoffe,

technische Kunststoffe und Hochleistungskunststoffe [Geb16, S. 271]. Einen Überblick über die Klassifizierung der thermoplastischen Kunststoffe ist in Bild 2-9 gezeigt.

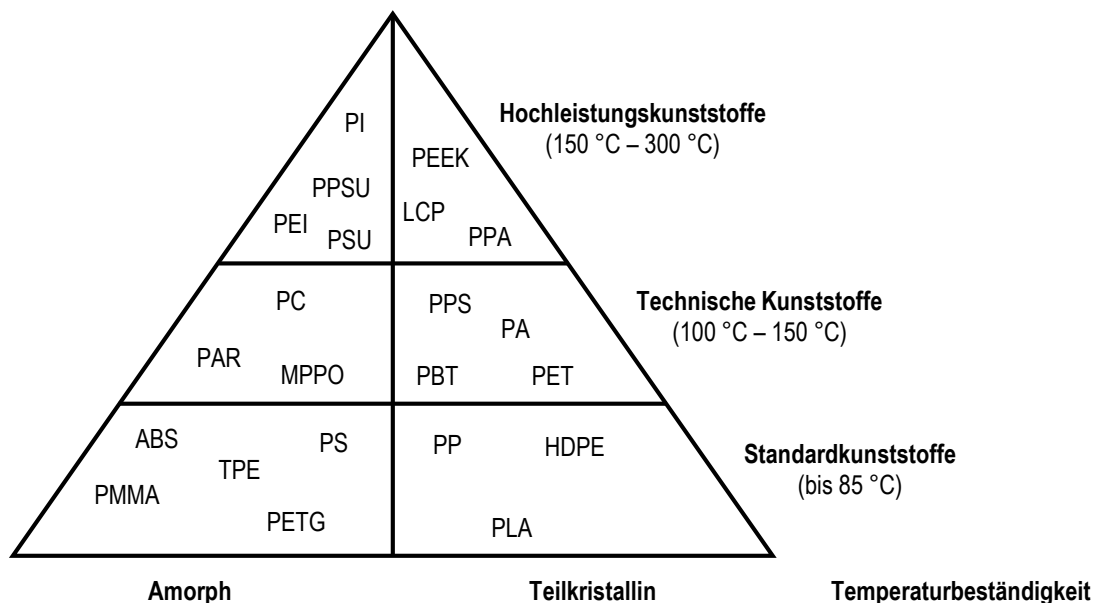


Bild 2-9: Eigenschaftspyramide und Einteilung der thermoplastischen Kunststoffe für das FDM in Anlehnung an [Geb16, S. 181]

Standardkunststoffe zeigen bis zu einer Dauergebrauchstemperatur von maximal 85 °C ein formbeständiges Verhalten. Technische Thermoplaste können bis zu einer Temperatur von 150 °C eingesetzt werden und behalten ihre mechanischen Kennwerte. Aufgrund dieser Eigenschaften sind sie für Konstruktionszwecke geeignet [Sch03, S. 298]. An Hochleistungskunststoffen werden noch höhere Ansprüche gestellt. Hochleistungskunststoffe sind auch noch bei Temperaturen von über 150 °C dauerhaft wärmeformbeständig. Bei der Verwendung von Hochleistungskunststoffen wird der Fokus meistens auf einzelne Materialeigenschaften gelegt, die für die vorgesehene Anwendung von besonderer Bedeutung sind. Im Vergleich zu anderen Thermoplasten sind Hochleistungskunststoffe deutlich teurer und für die Verarbeitung werden an die FDM-Maschinen hohe materialspezifische Anforderungen gestellt [DEE+12, S. 676]. [HHH04, S. 110ff.]

Die Basiskunststoffe können mit Füllstoffen oder Additiven modifiziert werden. Durch eine Materialmodifizierung mit Füllstoffen ist es möglich, die mechanischen Eigenschaften zu verbessern und die Bauteileigenschaften anzupassen. Füllstoffe können z. B. in Form von Partikeln, kurzen oder langen Fasern oder als organische bzw. anorganische Kugeln vorliegen. Die Zugabe von Additiven kann die Verarbeitbarkeit im FDM beeinflussen. So lässt sich das Kristallisationsverhalten durch gezielt eingesetzte Additive hemmen. [EHE08, S. 138ff.]

Neben Materialmodifikationen kann auch die gezielte Anpassung und Optimierung des Verarbeitungsprozesses die Verarbeitbarkeit der Materialien verbessern oder generell erst

ermöglichen. Die prozessspezifische Untersuchung der Verarbeitungseignung wird in dieser Arbeit für zwei ausgewählte Hochleistungskunststoffe durchgeführt.

2.2.5 Filament als FDM-Halbzeug

Der draht- bzw. filamentförmige Ausgangswerkstoff des FDM-Verfahrens wird mittels eines Profilextrusionsprozesses hergestellt [Dud13, S. 1416]. Dazu werden Standardgranulate oder Pulver genutzt und mithilfe eines Extruders unter Wärmezufuhr plastifiziert sowie anschließend durch ein formgebendes, kreisrundes Werkzeug gefördert [WW11, S. 213]. Das Ausgangsmaterial wird als Filament bezeichnet und hat die idealisierte Form eines endlos langen Rundzylinders. Die im FDM-Verfahren verarbeitbaren und am Markt erhältlichen Filamente haben einen Durchmesser von 1,75 mm oder 2,85 mm [SAA+21, S. 1281]. Die meistverwendeten Filamente haben einen mittleren Durchmesser von 1,75 mm mit einer Fertigungsabweichung von höchstens $\pm 0,05$ mm. Diese Toleranz entspricht in Relation zur Querschnittsfläche einer Abweichung von $-5,6\%$ / $+5,8\%$. Die Filamente der Firma Stratasys stellen den Industriestandard dar und können mit einer Toleranz von $\pm 0,03$ mm als Benchmark für die Qualitätsanforderungen an den Filamentdurchmesser dienen. [Sch20, S. 20]

Darüber hinaus werden weitere Anforderungen an die Qualität des Filaments gestellt und es sind weitere Qualitätsmerkmale definierbar. Für das FDM-Verfahren ist es wichtig, dass die Filamentquerschnittsfläche möglichst gleichmäßig und eine Rundheit des Filaments gegeben ist. Die Rundheit ist von Bedeutung, damit das Filament widerstandslos und passgenau durch die Schlauchführungen der FDM-Maschine geführt und durch den Vorschubmechanismus gleichmäßig sowie zuverlässig vorgeschoben werden kann. Abweichungen der Filamentquerschnittsfläche führen zu einer Über- bzw. Unterextrusion an Material und somit zur Fertigungsungenauigkeiten [Bäh20, S. 69]. Somit stellen geringe Durchmesser-schwankungen ein Qualitätsmerkmal dar. Auch Porosität im Filament beeinträchtigt die Gleichmäßigkeit des Schmelzeaustrags während des Fertigungsprozesses und ist zu vermeiden [PRD21, S. 206].

2.3 Schweißen von Kunststoffen

Das Schweißen von Kunststoffen ermöglicht eine stoffschlüssige Verbindung verschiedener Fügepartner und wird nachfolgend fügetechnisch eingeordnet. Gemäß [DIN 8580] kann mit dem Begriff „Fügen“ das Verbinden von mehreren Halbzeugen oder Werkstücken beschrieben werden und bildet nach der Norm die vierte Hauptgruppe der Fertigungsverfahren. Der geschaffene Zusammenhalt erfolgt lokal sowie permanent. Das „Schweißen“ wiederum bildet eine Untergruppe der Hauptgruppe Fügen und beschreibt alle Verfahren, welche die Verbindung von zwei Werkstoffen infolge von Wärmeeinbringung und/oder Kraftereinwirkung mit oder ohne Schweißzusatz herstellen. Die Schweißverfahren zum Fügen von

Kunststoffen unterscheiden sich durch die Art der in die Grenzfläche eingebrachten Wärmeenergie. Der Zusammenhalt wird infolge eines Stoffschlusses zwischen den beiden Fügepartnern erreicht. [FSS14, S. 27ff.]

Zur Erzielung einer Materialverbindung sind unterschiedliche Adhäsionsmechanismen, die gesonderte Betrachtung der Diffusion sowie im Kontext dieser Arbeit der FDM-spezifische Fügeprozess zu beachten.

2.3.1 Adhäsion

Adhäsion ist definiert als die Haftung zwischen zwei Werkstoffen, wobei der Zusammenhalt sowohl auf atomaren als auch molekularen Wechselwirkungen der Moleküle an der Grenzfläche beider Fügepartner beruht. POTENTE teilt die Adhäsion in drei Gruppen ein und unterscheidet zwischen chemischer, physikalischer und mechanischer Adhäsion. Diese Einteilung wird von SCHUCK konkretisiert. Er klassifiziert ebenfalls in mechanische Adhäsion, also der Verankerung durch formschlüssige Verbindungen, und in spezifische Adhäsion. Der spezifischen Adhäsion werden verschiedenen Adhäsionstheorien zugeordnet, wobei für die Verbindung von Polymeren lediglich die Adsorptions-, Diffusions- und Polarisations-theorie von Bedeutung sind. [Pot04, S. 41ff.], [Sch09, S. 12ff.]

Eine wichtige Voraussetzung für die Adhäsionsmechanismen stellt eine Benetzung, also die Ausbildung einer Grenzfläche zwischen den Fügepartnern, dar. Die Benetzung ist in diesem Zusammenhang von den Oberflächenenergien der Fügepartner abhängig. Dabei kann die Oberflächenenergie als Differenz des energetischen Zustands von gesättigten Molekülen im Werkstoffinnern und ungesättigten Molekülen an der Oberfläche beschrieben werden. Infolgedessen üben oberflächennahe Moleküle aufgrund des energetisch ungünstigen Profils eine Anziehungskraft aus, um andere Moleküle an die Oberfläche zu binden. Je größer die Anziehungskraft zwischen den Fügepartnern ist, desto besser ist die Benetzung [Sch09, S. 15]. Mit einer ausreichenden Benetzung bestimmen in der Adsorptionstheorie interatomare und -molekulare Kräfte die Verbundfestigkeit [Wat19, S. 19]. Die resultierende adhäsive Haftung wird auch als Adhäsionsarbeit bezeichnet und kennzeichnet das Maß der Arbeit, welches notwendig ist, um die Grenzflächen der Fügepartner A und B zu trennen. Diese Adhäsionsarbeit (W_a) kann durch die Dupré-Gleichung beschrieben werden: [Pot04, S. 41ff.]

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (1)$$

Es lassen sich Bedingungen für die Werkstoffauswahl hinsichtlich der Ausbildung einer guten Adhäsion formulieren. Zum einen sollte die Grenzflächenenergie (γ_{12}) auf ein Minimum reduziert werden, sodass die notwendige Arbeit zur Trennung des Verbunds möglichst groß wird. Dies kann durch das Fügen eines gleichartigen Werkstoffs oder durch die Wahl eines Fügepartners mit ähnlicher Polarität erreicht werden. Zum anderen sollten die

Oberflächenenergien der Werkstoffe (γ_i) möglichst groß sein, um eine hohe Adhäsionsarbeit zu realisieren. [Pot04, S. 46ff.]

Die der Diffusion zugrunde liegende Theorie basiert für Polymere auf der Annahme, dass die Makromoleküle der thermoplastischen Kunststoffe während des Fügevorgangs an der Grenzfläche ineinander diffundieren (Interdiffusion). Hierbei findet ein Eindringen der Makromoleküle bzw. Polymerketten über die Grenzfläche hinweg in den Fügepartner statt. Der Interdiffusionsvorgang wird durch die mikrobrownsche Bewegung der Makromoleküle ermöglicht [Wat19, S. 19]. Damit dieser Vorgang stattfinden kann, müssen die Polymere ineinander löslich sein und die Makromoleküle benötigen eine ausreichend hohe Beweglichkeit, die temperaturabhängig ist. [Sch09, S. 15]

Die Polarisierungstheorie basiert auf dem Dipolcharakter der Moleküle. Die Verbundfestigkeit wird durch Wechselwirkungen in der Grenzschicht aufgrund von Polymerpolaritäten beeinflusst. Funktionelle Gruppen wie z. B. Hydroxyl- oder Carboxylgruppen sollen zu einer verbesserten Verbundhaftung führen. [Wat19, S. 19]

2.3.2 Einordnung des FDM als Schweißprozess

Die Fertigung von Bauteilen mit dem FDM-Verfahren ist durch den iterativen Fügeprozess von Einzelsträngen gekennzeichnet. Die schichtweise Bauteilgenerierung erfolgt durch eine quasi drucklose Ablage von aufgeschmolzenen Materialsträngen. Durch das Einbringen von thermischer Energie werden bereits erstarrte Stränge wieder aufgeschmolzen und es bilden sich Interdiffusionszonen aus [Wat19, S. 19]. Dabei werden sowohl die einzelnen nebeneinander abgelegten Stränge in einer Schicht als auch die aufeinanderliegenden Schichten miteinander verschweißt [HM20, S. 709]. Demnach kann das entstehende Bauteilgefüge nach dem Fertigungsprozess durch eine Vielzahl von Schweißverbindungen beschrieben werden.

Nach SUN et al. lässt sich der Schweißprozess im FDM in drei verschiedene Phasen klassifizieren. In der ersten Phase kommt es zunächst zu einer Benetzung, also einem Kontakt der Oberflächen, durch die Ablage eines Schmelzestrangs. Anschließend findet zwischen den beiden Fügepartnern eine Koaleszenz der beiden Oberflächen statt. In der darauffolgenden dritten Phase läuft eine intermolekulare Diffusion von Makromolekülen über die Grenzfläche in beide Richtungen ab und es bildet sich eine Grenzschicht aus. [SRB+08, S. 73]

Für den Prozess der intermolekularen Diffusion ist es erforderlich, dass vom abgelegten Schmelzestrang durch Konduktion und Wärmestrahlung so viel thermische Energie in den darunterliegenden Strang eingebracht wird, um diesen anzuschmelzen. Für eine gute Verbundfestigkeit muss nach WENDEL die Wärmeenergie des schmelzförmigen Strangs in der Lage sein, den bereits erstarrten Strang mindestens auf die Erweichungstemperatur zu

erwärmen [Wen09, S. 66f.]. Eine weitere temperaturspezifische Einordnung ist hinsichtlich der Glasübergangstemperatur und der sogenannten kritischen Sintertemperatur nach BELLEHUMEUR möglich [BLS+04, S. 173f.]. Unterhalb der Glasübergangstemperatur sind die Ketten unbeweglich, weshalb intermolekulare Diffusionsvorgänge nur oberhalb der Glasübergangstemperatur stattfinden [CK17a, S. 552]. Hierbei wird der Grad der Diffusion von der Zeit beeinflusst, in der die Grenzfläche der Fügepartner eine Temperatur oberhalb der kritischen Sintertemperatur besitzt. Bis zum Erreichen der Sintertemperatur wird die Form der Grenzfläche bzw. die Geometrie der Schweißnaht ausgebildet und es sind erhebliche Diffusionsvorgänge möglich. Je länger der intermolekulare Diffusionsprozess ablaufen kann, desto größer wird die resultierende Festigkeit. Die entstehende Verbundfestigkeit ist dementsprechend zum einen von der Größe der Grenzfläche und zum anderen von der Anzahl an ineinander diffundierenden Makromolekülen abhängig. Infolgedessen wird die Qualität der Schweißverbindungen im FDM maßgeblich sowohl durch den Aufbau- als auch durch den Abkühlprozess beeinflusst. [Bäh20, S. 72ff.], [YLF+18, S. 106ff.]

Zusammenfassend ist die Schweißnahtqualität in z-Richtung, also zwischen den Schichten, ein wichtiges Merkmal für eine ausreichende Bauteilfestigkeit und muss zur Bewertung der Verarbeitungseignung von Materialien im FDM-Prozess berücksichtigt werden.

2.4 Bauteilverzug als Merkmal des Abkühlprozesses im FDM

Maßhaltigkeit und Prozesssicherheit spielen für die Beurteilung additiver wie konventioneller Fertigungsverfahren eine wichtige Rolle. Beide Kriterien werden durch einen Verzug von Bauteilstrukturen während und nach der Fertigung negativ beeinflusst. In diesem Zusammenhang müssen Verzugerscheinungen minimiert und im besten Fall vermieden werden, um eine prozesssichere Fertigung zu gewährleisten. Verzug kann als auftretende Bauteilverformung beschrieben werden, die auf materialspezifische Schwindungsprozesse und daraus resultierende innere Spannungen zurückzuführen ist. Der FDM-typische Schichtaufbau und der Abkühlprozess der einzelnen Stränge nach der Ablage begünstigt den Aufbau von inneren Spannungen, denn jeder Strang kühlt für sich ab und erzeugt dadurch im Schichtverbund Kräfte. Folglich ist die Untersuchung des Schwindungs- und Verzugsverhaltens ein elementarer Bestandteil der Materialqualifizierung für das FDM-Verfahren. Daher werden nachfolgend die Grundlagen von Schwindung und Verzug erarbeitet, um diese anschließend für den FDM-Prozess einordnen zu können.

2.4.1 Grundlagen Schwindung und Verzug

In der Kunststofftechnik versteht man unter dem Begriff Schwindung die Volumenabnahme von Kunststoffen beim Abkühlen und Erstarren, welche mit einer Erhöhung der Dichte verknüpft ist. Es handelt sich hierbei um einen physikalischen Prozess aufgrund der Verringerung des Volumens bedingt durch eine Temperaturdifferenz. Kristallisations- oder

Vernetzungsprozesse führen hierbei zu einer gesteigerten Packungsdichte der Makromoleküle während des Abkühlens. Der Prozess ist materialabhängig, da jeder Kunststoff eine eigene Schwindungscharakteristik aufweist. Zudem ist das Schwindungsverhalten durch die Prozessführung beeinflussbar. Eine Reduzierung der Abkühlgeschwindigkeit kann z. B. zu einer Erhöhung der Schwindungscharakteristiken führen. [EHE08, S. 34]

Das Schwindungspotenzial und die Kompressibilität von Kunststoffen kann mithilfe eines p - v - T -Diagramms ermittelt werden [Sch07, S. 386]. Das p - v - T -Diagramm visualisiert den Zusammenhang des spezifischen Volumens (v) bei verschiedenen Drücken (p) in Abhängigkeit von der Temperatur (T) und unterscheidet sich bei amorphen und teilkristallinen Thermoplasten. Charakteristisch für amorphe Thermoplaste ist, dass bei einem bestimmten Druck sowohl im festen als auch im schmelzflüssigen Zustand eine lineare Abhängigkeit des Kurvenverlaufs zwischen spezifischem Volumen und Temperatur zu erkennen ist. Der Unterschied zu amorphen Thermoplasten liegt für teilkristalline Materialien in einem exponentiellen Abfall des spezifischen Volumens unterhalb der Kristallisationstemperatur (T_K). Wird der Schmelzpunkt der kristallinen Phase unterschritten, werden chemisch regelmäßige Bereiche mit einer dichten Packung und Ausrichtung der Moleküle gebildet. Aus diesem Grund weisen teilkristalline Thermoplaste bei der Verarbeitung eine größere auftretende Schwindung auf als amorphe Thermoplaste [BBO+07, S. 81]. [WH09, S. 562]

Verzug ist eine mögliche Folge der materialspezifischen Schwindung und bezeichnet die Abweichung eines Bauteils von einer Sollgestalt. Dies kann sich durch das Wölben von Flächen oder Winkelmaßänderungen äußern. Als Ursachen für fertigungsbedingte Verzugserscheinungen können Schwindungsunterschiede im Bauteil aufgrund von lokal unterschiedlichen Abkühlverhältnissen, Einflüssen durch die Geometrie oder verschiedenen Druckverhältnissen angeführt werden [Ehr11, S. 189]. So entstehen durch den Schwindungsprozess im Bauteil Spannungen, die in Abhängigkeit von der Bauteilsteifigkeit in einer Deformation der Struktur resultieren. [Sch20, S. 138]

2.4.2 Einordnung Schwindung und Verzug im FDM-Prozess

Während des FDM-Prozesses wird die Ausprägung der Schwindung und der daraus resultierende Bauteilverzug durch die Materialeigenschaften, die Geometrie des Bauteils, die Prozessparameter und die Strangablagestrategie beeinflusst. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus erfährt jeder abgelegte Materialstrang und jede Bauteilschicht einen individuellen Abkühlprozess. Die sequentielle Abkühlung erfolgt parallel zur Bauteilfertigung.

Im Prozess kühlt jeder Strang nach der Strangablage von der Schmelzetemperatur auf die Temperatur des Bauraums ab und verfestigt sich. Durch den Temperaturabfall sowie Erstarrungs- und Kristallisationsvorgänge beim Wechsel aus der schmelzflüssigen Phase in die Feststoffphase kommt es zu einem Großteil der im FDM-Prozess auftretenden Schwindung [KK13, S. 48f.]. Die FDM-spezifische Aufbauweise führt dazu, dass bei der

Strangextrusion Schweißverbindungen mit teilweise geschwundenen Bauteilbereichen erzeugt werden. Infolgedessen ist die Schwindung der abgelegten Stränge gehemmt und es treten fertigungsbedingte Spannungen im Bauteil auf. [TG15, S. 252ff.]

Durch die sich stetig summierenden Schwindungsprozesse der Schichtbauweise steigen die Eigenspannungen im Bauteil. Sofern die Spannungen zu groß, nicht kompensiert und infolgedessen freigesetzt werden, können daraus Verformungen resultieren. Fehlerbilder sind Delamination oder das Ablösen des Bauteils von der Bauplattform. Es kann zu einer Delamination zwischen den Bauteilschichten in der Fertigungsebene kommen, wenn die Schweißnahtfestigkeiten nicht ausreichen, um die entstehende Spannung aufzunehmen [TG15, S. 254]. Bei auftretenden Verformungserscheinungen kann es zu einem Hochbiegen von Bauteilbereichen in den Verfahrensweg der Düse kommen. Dadurch kollidiert die Düse mit bereits gefertigten Bauteilbereichen und der Fertigungsprozess muss abgebrochen werden. Daher werden in dieser Dissertation die Auswirkungen von Verarbeitungsparameteranpassungen im Hochtemperaturbereich auf das Schwindungs- und Verzugsverhalten betrachtet, um einen Beitrag zur Materialqualifizierung von Hochleistungsthermoplasten zu leisten und gleichzeitig die Prozessstabilität während der Verarbeitung zu verbessern. [WXJ07, S. 1088f.]

3 Forschungsbedarf, Zielsetzung und Vorgehensweise

Der aktuelle Trend, dass sich der FDM-Prozess und die additive Fertigung im Allgemeinen von einer Technik für den Prototypenbau hin zur Herstellung voll funktionsfähiger Bauteile für High-End-Anwendungen entwickeln, führt zwangsläufig dazu, dass mehr technische und Hochleistungskunststoffe eingesetzt werden. Für die wirtschaftliche Umsetzung spielt hierbei das Zusammenwirken von Material, Prozess und Bauteilgestaltung eine wichtige Rolle. Eine aufeinander abgestimmte Anpassung dieser drei Kenngrößen führt zu einem qualitativ hochwertigen Produkt [Geb16, S. 45]. Untersuchungen der Einflüsse und Abhängigkeiten von Material und Prozess bilden in diesem Zusammenhang einen essentiellen Bestandteil der Materialqualifizierung ab. Im Folgenden wird ein Forschungsbedarf konkretisiert und die Zielsetzung sowie die Vorgehensweise dieser Arbeit im Kontext der Materialqualifizierung von Hochleistungsthermoplasten vorgestellt.

3.1 Forschungsbedarf

Mit der Entwicklung vom Rapid Prototyping zum Direct Manufacturing wächst der Bedarf und die Nachfrage an Hochleistungsthermoplasten. Dies ist insbesondere auf Anwendungen in der Medizintechnik und der Automobilindustrie zurückzuführen. Das verfügbare Materialportfolio der technischen und Hochleistungskunststoffe für den FDM-Prozess ist aktuell noch eingeschränkt, wobei das Verfahren die Möglichkeit bietet, eine viel breitere Palette an Materialien zu verarbeiten [Vv21, S. 3f.]. Im FDM-Verfahren können sowohl amorphe als auch teilkristalline thermoplastische Filamente als Ausgangsmaterial verwendet werden, was im Vergleich zu einigen anderen polymerbasierten additiven Fertigungsverfahren eine größere Bandbreite an Materialien ermöglicht. Die Verwendung von Hochleistungspolymeren wird nach TOFAIL et al. dadurch vorangetrieben, dass eine Nachfrage nach Bauteilen besteht, die unter sehr anspruchsvollen Bedingungen eingesetzt werden können. Die additiv gefertigten Komponenten sollen bei hohen Temperaturen, hohen Drücken und in verschiedenen Medien eine gute mechanische, dimensionale sowie chemische Stabilität aufweisen. Für ein derartiges Anforderungsprofil kommen z. B. amorphe Polymere wie Polysulfon oder Polyetherimid sowie teilkristalline Polymere wie Polyphenylensulfid oder Polyetheretherketon in Frage [TKB+18, S. 28]. In der Theorie sind derartige thermoplastische Kunststoffe mit dem FDM-Verfahren verarbeitbar, allerdings ist die Entwicklung von Hochtemperaturanlagen patentrechtlich lange eingeschränkt worden, wodurch es für die Materialhersteller nicht interessant war, eine Materialentwicklung in diesem Bereich zu betreiben [SAA+21, S. 1279f.]. Zusammen mit der daraus resultierenden geringen Materialverfügbarkeit von Filamenten aus Hochleistungsthermoplasten sind dies Restriktionen, die die Erforschung verschiedener Anwendungsbereiche behindern [SRS17, S. 199f.].

Mit dem im Jahr 2021 ausgelaufenen Patent der Firma Stratasys (vgl. Kapitel 1) ist die Grundlage für eine verstärkte Materialentwicklung im Bereich der Hochleistungskunststoffe

geschaffen worden. Maschinenherstellern ist es nun maschinenbautechnisch möglich, einfacher und kostengünstiger eine aktiv beheizte Bauraumumgebung umzusetzen. Die Anlagentechnik ist damit in der Lage, Hochleistungskunststoffe zu verarbeiten und die Anzahl derartiger FDM-Maschinen am Markt steigt. Zudem sind immer mehr Hochtemperaturanlagen verfügbar, die parameteroffen sind. Parameteroffene FDM-Maschinen ermöglichen es, Materialien beliebiger Hersteller zu verarbeiten und die Verarbeitungsparameter individuell, im Rahmen der maschinenspezifischen Umsetzbarkeit, anzupassen. Zusammenfassend bieten die neueren und zukünftigen Maschinengenerationen das Potenzial, beliebige Hochleistungsthermoplaste zu verarbeiten und das Materialportfolio signifikant zu erhöhen. Bedingt durch die Möglichkeit industriell technische Bauteile zu fertigen, wird die Nachfrage nach neuen Materialien steigen. Die Materialien müssen entweder an den Prozess angepasst werden oder die Verarbeitungsparameter müssen für eine möglichst prozesssichere Verarbeitung analysiert und optimiert werden. Eine hierfür notwendige gezielte Untersuchung der Verarbeitbarkeit und eine Prozessparameteroptimierung von Hochleistungsthermoplasten auf einer Maschine mit industrienahen Randbedingungen fehlt in der Literatur und stellt somit eine Forschungslücke dar.

Basierend auf den zunehmenden Aktivitäten in der Materialforschung entsteht der Bedarf, Materialqualifizierungen für den FDM-Prozess durchzuführen. Das branchenübliche Vorgehen einer Materialqualifizierung ist dadurch gekennzeichnet, dass definierte mechanische Eigenschaften wie z. B. die Zugfestigkeit bestimmt und analysiert werden. Die resultierenden Kennwerte, die in Anlehnung an konventionelle Normen sowie den dazugehörigen Probekörpern ermittelt werden, dienen dann als Vergleichsgröße, um die Verarbeitbarkeit eines Materials einordnen zu können. Allerdings ist mit diesem Vorgehen, das aktuell am Markt noch sehr etabliert ist, nur bedingt eine Aussage über die Eignung des Materials für den FDM-Prozess möglich. Zahlreiche Einflussfaktoren können die Ergebnisse beeinflussen und es gibt kein einheitliches Vorgehen bei der Auswahl von prozessrelevanten Verarbeitungsparametern. Zudem ist aus den Materialdatenblättern teilweise nicht ersichtlich, welche Prozesseinstellung zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte genutzt worden sind. So können die Ergebnisse stark abweichen und mit ausreichender Prozess Erfahrung gezielt beeinflusst werden. Dies erschwert bzw. verhindert eine Bewertung sowie einen objektiven Vergleich zwischen verschiedenen Materialien. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Materialqualifizierung zur Charakterisierung der materialbedingten Verarbeitungseignung von Hochleistungsthermoplasten in der Literatur bisher unzureichend betrachtet worden. Es gilt, zentrale und essentielle Prozesseigenschaften des FDM-Verfahrens während der Verarbeitung von Hochleistungskunststoffen zu berücksichtigen.

Die Anisotropie von FDM-Bauteilen (vgl. Kapitel 2.2.3.2) aufgrund von unzureichenden Zwischenschichtbindungen ist einer der signifikantesten Nachteile des FDM-Prozesses [Vv21, S. 3]. Insbesondere die Aufbaurichtung in z-Orientierung besitzt in der Regel die schwächsten Eigenschaften in Bezug auf die mechanischen Kennwerte. Hier spielen die

Festigkeitskennwerte, die auf die prozessbedingten Schweißnahtfestigkeiten zwischen den Schichten zurückzuführen sind, eine entscheidende Rolle für die Verwendung des FDM Prozesses. Die Bauteilfestigkeit ist stets so hoch wie die schwächste Stelle im Gefüge. Mit einer Verbesserung der Schweißnahtqualität und einer daraus folgenden Reduzierung der Anisotropie, wird das FDM-Verfahren für weitere Anwendungsfelder interessant. Doch gerade für Hochleistungsthermoplaste wie PEEK gibt es nahezu keine Untersuchungen in der Literatur zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften in z-Aufbauichtung. Diese Lücken in der Literatur gilt es in den nachfolgenden Untersuchungen zu schließen. In den entsprechenden Fachkapiteln werden die präsentierten Forschungslücken noch einmal detailliert aufgegriffen und im Kontext der experimentellen Arbeiten eingeordnet.

3.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Der erarbeitete Forschungsbedarf deckt sich mit den Ergebnissen einer Umfrage, in der ein Bedarf an zuverlässigen Technologien und neuen Materialien erfasst worden ist, damit die 3D-Druckindustrie weiter wachsen kann [Sta20-ol, S. 18]. Das Ziel der Arbeit ist es, Wechselwirkungen zwischen Material und FDM-Prozess herauszustellen und die Verarbeitungseignung von ausgewählten Hochleistungsthermoplasten zu bewerten. In den experimentellen Untersuchungen werden daher Änderungen der physikalischen Materialeigenschaften aufgrund der Prozessführung berücksichtigt und analysiert. Dies ist erforderlich, da die Verarbeitung von Hochleistungsthermoplasten im FDM-Prozess nicht direkt mit der Verarbeitung dieser Materialien durch konventionelle Verfahren verglichen werden kann [TKB+18, S. 24]. Die Auswertung der Verarbeitungseignung im FDM erfolgt anhand der Schweißnahtqualität und des auftretenden Verzugsverhaltens unter Verwendung einer methodischen Vorgehensweise. Dieses Vorgehen ist Bestandteil eines Materialqualifizierungsprozesses für das FDM-Verfahren. Die Verarbeitung von Hochleistungsthermoplasten unter der Berücksichtigung von spezifischen Randbedingungen des FDM-Verfahrens ermöglicht auf diesem Weg den Aufbau eines ganzheitlichen Prozessverständnisses, die Ermittlung von Materialprofilen und die Verbesserung der Beherrschbarkeit des Prozesses.

In den experimentellen Untersuchungen werden verschiedene PEEK Materialien und ein Filament aus PPSU verwendet, um sowohl ein teilkristallines als auch ein amorphes Material aus dem Hochleistungsbereich abzudecken. Die verwendeten Materialien sind teilweise nicht kommerziell als FDM-Materialien erhältlich und die Filamente müssen im Vorfeld selbst hergestellt werden. Daher werden in Kapitel 4 auch die Einflüsse auf die Qualität des Ausgangsmaterials, welche sich als wichtige Einflussfaktoren herauskristallisiert haben, betrachtet. Die Verarbeitung erfolgt auf einer Hochtemperaturanlage der Firma Gewo mit industrienahen Fertigungsbedingungen. Die FDM-Maschine ermöglicht aufgrund eines aktiv beheizten Bauraums einen homogenen thermischen Verlauf über das gesamte Bauteil und somit eine ganzheitliche Auswertbarkeit der Schweißnahtqualität und des Verzugsverhaltens.

In Kapitel 5 wird die Schweißnahtqualität analysiert. Bestandteile der Untersuchungen sind die Auswertung der Schweißnahtfestigkeit, die Ermittlung eines Schweißnahtbreitenfaktors und die Bestimmung eines Schweißfaktors. Durch diesen Ansatz und die Fokussierung auf die Materialeigenschaften in z-Aufbauichtung soll die Anisotropie im FDM-Prozess reduziert und die Auswirkungen definierter Verarbeitungsparameter ermittelt werden. Im Fokus stehen insbesondere die Düsen- und die Bauraumtemperatur. Zudem werden weiterführend Modellierungsansätze zur Bestimmung der Schweißnahtfestigkeit erarbeitet (vgl. Kapitel 7).

Die Qualität der Schweißung im FDM wird maßgeblich durch den Aufbau- und Abkühlprozess beeinflusst. Auch für das Verzugsverhalten, das auf Materialschwindungen z. B. aufgrund von Kristallisationsvorgängen zurückzuführen ist, haben diese Prozesse eine signifikante Bedeutung. Die Kristallisation verleiht teilkristallinen Polymeren ein besonderes Eigenschaftsprofil, das sich von amorphen Materialien unterscheidet, kann aber auch zu Schwierigkeiten bei der Verarbeitung führen. Ein Verständnis über das Verhalten teilkristalliner Materialien während der FDM-Verarbeitung ist daher eine Voraussetzung, um ihr volles Potenzial auszuschöpfen. Hierfür werden umfassende Untersuchungen der auftretenden Verzugsausprägungen durchgeführt (Kapitel 6).

Abschließend wird in Kapitel 8 eine Vorgehensweise für die Materialqualifizierung von Multimaterialkombinationen im FDM vorgestellt. Das FDM-Verfahren bietet die Möglichkeit der Kombination mehrerer Materialien innerhalb eines Bauteils ohne zusätzlichen Fertigungsschritt. Das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Materialien unter Berücksichtigung ihrer Verarbeitbarkeit ist für den Einsatz des Multimaterialdrucks von entscheidender Bedeutung. Die Beurteilung der Verarbeitbarkeit und der Kompatibilität der Materialkombinationen erfolgt anhand der Schweißnahtfestigkeit. Die Umsetzung erfordert die Entwicklung einer Methode zur exakten Kalibrierung der Strangablage bei der Verwendung verschiedener Filamentextruder.

4 Fertigungsrandbedingungen der experimentellen Untersuchungen

In diesem Kapitel werden die Rahmenbedingungen für die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit dargestellt. In diesem Zusammenhang werden nachfolgend die zu untersuchenden Materialien, die Materialeigenschaften, die verwendete FDM-Maschine, die Verarbeitungsparameter, die Halbzeugherstellung sowie spezifische Untersuchungen zur Filamentqualität vorgestellt. In den folgenden Kapiteln werden die ermittelten Verarbeitungseigenschaften und Materialkennwerte aufgegriffen und verwendet. Die Erläuterung und Beschreibung der experimentellen Methoden samt zugehöriger Probekörper erfolgt in den entsprechenden Fachkapiteln, um einen direkten inhaltlichen Bezug herzustellen. Die Baujob-Datenaufbereitung ist während der experimentellen Untersuchungen mit dem Slicer Simplify3D in der Version 4.0.0 durchgeführt worden.

4.1 Materialien

Die Materialauswahl beschränkt sich auf den Bereich der Hochleistungsthermoplaste, weil in diesem Feld ein signifikanter Forschungsbedarf vorliegt (vgl. Kapitel 3.1). Die Verwendung von einer Hochtemperaturanlage ermöglicht es, das Prozessverhalten der Polymere unter hohen Temperaturen im Bauraum zu untersuchen. Da teilkristalline und amorphe Thermoplaste aufgrund ihrer Struktur verschiedene Verarbeitungseigenschaften aufweisen, sind für die experimentellen Untersuchungen die Materialien PEEK (teilkristallin) und PPSU (amorph) ausgewählt worden. Auf diese Weise ist ein Vergleich zwischen den zwei Hauptgruppen im Hochtemperaturbereich möglich. Bedingt durch die materialspezifischen Schwierigkeiten während der Verarbeitung von teilkristallinen Materialien im FDM-Prozess, ist die sich ergebende, notwendige Forschungstiefe in den experimentellen Untersuchungen von PEEK größer. Im Rahmen dieser Arbeit werden außerdem kohlenstofffaserverstärkte PEEK Materialien untersucht und die Verarbeitungseignung unter der Berücksichtigung der Schweißnahtqualität ausgewertet.

4.1.1 Polyetheretherketon (PEEK)

Das Polymer PEEK gehört zur Gruppe der Polyaryletherketone (PAEK) und besitzt ausgezeichnete Eigenschaften aus mechanischer, chemischer und thermischer Sicht. Es lassen sich exemplarisch hohe Schlagzähigkeiten, hohe mechanische Wechselfestigkeiten, Dauergebrauchstemperaturen über 200 °C, eine gute chemische Beständigkeit und eine schwere Entflammbarkeit hervorheben. Zu den Anwendungsbereichen von PEEK zählt die Luft- und Raumfahrt, die Maschinen- und Automobilindustrie, die Elektronikindustrie sowie die Medizintechnik. Insbesondere durch das biologisch inerte Verhalten, spielt PEEK als Alternative für Edelmetalle eine zunehmende Rolle bei der Herstellung von Implantaten. [Kai11, S. 451f.], [Vv21, S. 4]

In den experimentellen Untersuchungen werden verschiedene PEEK Typen der Firma Evonik Industries AG verwendet. Das thermoplastische PEEK gehört zur Gruppe der Hochleistungskunststoffe. Die Firma Evonik vertreibt unter dem Handelsnamen VESTAKEEP® eine Reihe von PEEK Granulaten für verschiedenste Anwendungsbereiche. Ausgewählt sind zwei unverstärkte, mittelviskose PEEK Materialien zur Herstellung von Formteilen in Spritzgieß- und Extrusionsanwendungen. Dabei handelt es sich beim VESTAKEEP 2000G und dem VESTAKEEP 3300G um zwei Materialien aus unterschiedlichen Viskositätsreihen. Zudem werden die Untersuchungen um zwei kohlenstofffaserverstärkte Materialien erweitert, um Rückschlüsse und Erkenntnisse aufgrund der Faserverstärkung zu ziehen. Das VESTAKEEP 2000G bildet in diesem Zusammenhang das Matrixmaterial der kurzfaserverstärkten Materialien. Der Masseanteil der Kohlenstofffasern variiert, mit dem Ziel, den Einfluss der Fasergehalte auf die Materialeigenschaften und auf die Verarbeitbarkeit im FDM Prozess untersuchen zu können. Es liegen Ausgangsmaterialien mit einem Fasergehalt von 15 (VESTAKEEP 2000 CF15) und 20 Masseprozent (VESTAKEEP 2000 CF20) vor. Die verschiedenen VESTAKEEP-Typen müssen vor den experimentellen Untersuchungen mit der Hilfe einer Filamentextrusionslinie zu Filamenten verarbeitet werden (Kapitel 4.4).

In Tabelle 4-1 ist eine Auswahl an mechanischen Kennwerten zusammengetragen und dargestellt.

Tabelle 4-1: Materialkennwerte der VESTAKEEP-Typen [Evo18], [Evo21a-ol]

Material	Zugfestigkeit / MPa	E-Modul / MPa	Dichte / g/cm ³	Glasübergang / °C	MVR / cm ³ /10 min
VESTAKEEP 3300G	98	3600	1,3	k. A.	20 (380 °C, 5 kg)
VESTAKEEP 2000G	100	3700	1,3	k. A.	70 (380 °C, 5 kg)
VESTAKEEP 2000 CF15	203	15195	1,341	k. A.	34,2 (400 °C, 5 kg)
VESTAKEEP 2000 CF20	227	17227	1,356	k. A.	29,4 (400 °C, 5 kg)

Die Kennwerte dienen zur Einordnung der mechanischen Eigenschaften und werden während den experimentellen Untersuchungen berücksichtigt. Insbesondere die Glasübergangstemperatur ist für die Materialqualifizierung von Bedeutung und muss im Vorfeld ermittelt werden.

4.1.2 Polyphenylsulfon (PPSU)

Das Material PPSU ist ein amorpher Thermoplast, der zur Gruppe der Polysulfone (PSU) gehört [BBO+07, S. 509]. Am Markt erhältliche PPSU-Typen für die konventionellen, kunststoffverarbeitenden Verfahren zeichnen sich durch sehr gute thermische und hydrolytische

Beständigkeiten aus. Zudem besitzt der Hochleistungskunststoff ausgezeichnete mechanische Kennwerte, die auch bei hohen Umgebungstemperaturen erhalten bleiben.

In den Untersuchungen dieser Arbeit wird ein PPSU der Firma BASF 3D Printing Solutions GmbH verwendet. Das Material wird unter dem Handelsnamen Ultrafuse PPSU vertrieben und liegt als Filament mit einem Durchmesser von 1,75 mm vor. Die in Tabelle 4-2 aufbereiteten mechanischen Kennwerte sind von BASF bereitgestellt worden und entsprechen dem Materialdatenblatt der Version 2.0.

Tabelle 4-2: Materialkennwerte Ultrafuse PPSU [BAS21-ol]

Material	Zugfestigkeit / MPa	E-Modul / MPa	Dichte / g/cm ³	Glasübergang / °C	MVR / cm ³ /10 min
Ultrafuse PPSU	74,5 / 49 (x-Orientierung / z-Orientierung)	2221 / 2150 (x-Orientierung / z-Orientierung)	1,272	222	16,4 (360 °C, 5 kg)

Die Untersuchungen des Materials fanden zum Zeitpunkt der Markteinführung statt und die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sind teilweise für die Aktualisierung der Datenblätter berücksichtigt worden. Aufgrund der Materialverfügbarkeit als Filament existieren Verarbeitungsempfehlungen, die bei der Wahl der Verarbeitungsparameter für den FDM-Prozess als Orientierung dienen. Die Prozessparameter sind dem Kapitel 4.3.2 und dem Kapitel 5.2.3 zu entnehmen.

4.2 Materialeigenschaften

In diesem Abschnitt werden Materialkennwerte, die für die anstehenden Untersuchungen von Relevanz sind, vorgestellt. Der Fokus liegt hierbei auf dem thermischen Materialverhalten. Die ermittelten Materialeigenschaften bilden sowohl die Grundlage für die Festlegung von Verarbeitungsparametern im FDM als auch die Basis zum Aufbau eines materialspezifischen Prozessverständnisses.

4.2.1 Thermische Analyse (DSC-Messung)

Die dynamische Differenzkalorimetrie (Differential Scanning Calorimetry, DSC) ist ein thermisches Analyseverfahren, mit dem die Differenz zwischen dem Wärmestrom eines inerten Referenztiegels und eines Probenziegels ermittelt wird. Wenn ein Material seinen physikalischen Zustand ändert, wird entweder eine spezifische Wärmemenge abgegeben oder es muss eine Wärmemenge aufgebracht werden [FS13, S. 21f.]. In dieser Arbeit wird die DSC verwendet, um charakteristische Temperaturen wie die Glasübergangstemperatur zu ermitteln und um Rückschlüsse auf das Kristallisationsverhalten der verwendeten Materialien zu ziehen. Hierzu wird in den Untersuchungen die Kristallisationsenthalpie bestimmt, mit

der ein Kristallisationsgrad berechnet werden kann. In Kapitel 5.5 wird der Kristallisationsgrad zur Auswertung und Analyse der Schweißnahtqualität verwendet. Darüber hinaus finden DSC-Messungen zur Untersuchung der Kristallinität unter Berücksichtigung von auftretenden Verzugerscheinungen Anwendung (vgl. Kapitel 6.3).

Die Messungen wurden mit dem Analysegerät DSC 214 Polyma des Herstellers Netzsch durchgeführt. Der Messvorgang einer DSC ist gekennzeichnet durch definierte Aufheiz- und Abkühlvorgänge. Als Aufheiz- und Abkühlrate ist für alle Messungen 20 K/min unter Stickstoffatmosphäre gewählt worden. Abschließend ist die Auswertung der Messdaten mit der Software Netzsch Proteus Analysis erfolgt. Eine DSC-Kurve des VESTAKEEP 3300G ist in Bild 4-1 dargestellt.

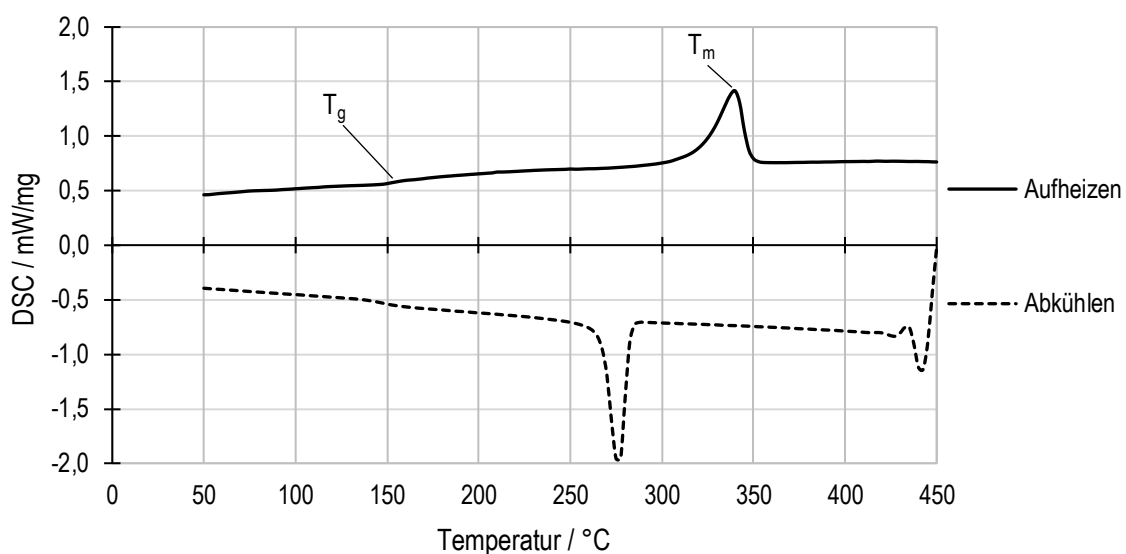


Bild 4-1: DSC-Messung des VESTAKEEP 3300G (in Zusammenarbeit mit MÜLLER, vgl. [Mue19])

Das Material besitzt bei 339,8 °C einen deutlichen endothermen Schmelzpeak, der die Schmelztemperatur (T_m) des Materials definiert. Anhand des Verlaufs lässt sich zudem die Glasübergangstemperatur (T_g) von 153,7 °C ableiten. Während der Abkühlphase kristallisiert das Material mit einem Kristallisationspeak bei 275,0 °C. In Tabelle 4-3 sind die ermittelten Glasübergangstemperaturen und Schmelztemperaturen der verwendeten Materialien zusammengefasst.

Tabelle 4-3: Glasübergangs- und Schmelztemperaturen der untersuchten Materialien (in Zusammenarbeit mit MÜLLER, KISTER und KNAUP, vgl. [Mue19], [Kis20], [Knau21])

Material	Glasübergangstemperatur: T_g / °C	Schmelztemperatur: T_m / °C
VESTAKEEP 3300G	153,7	339,8
VESTAKEEP 2000G	151,4	345,14
VESTAKEEP 2000 CF15	153,8	342,8
VESTAKEEP 2000 CF20	159,4	342,3
Ultrafuse PPSU	221	-

Für die DSC-Probenpräparation der faserverstärkten Materialien ist es notwendig, den Masseanteil der Fasern zu berücksichtigen. Die Glasübergangstemperaturen dienen als Orientierung für die Auswahl der Bauraumtemperaturen und sind zur Interpretation der Schweißnahtqualitäten sowie vor allem für die Untersuchungen des Verzugsverhaltens von Bedeutung.

4.2.2 Materialabbau (TGA-Messung)

Die thermogravimetrische Analyse (TGA) ist ein Verfahren, um die Masseänderung einer Probe in kontrollierter Atmosphäre als Funktion der Zeit und der Temperatur zu bestimmen. TGA-Messungen werden zur Untersuchung des Zersetzungsverhaltens, der thermischen Stabilität oder der Materialzusammensetzung eingesetzt. In dieser Arbeit wird das Verfahren verwendet, um die Temperaturen von einsetzenden Materialschädigungen zu ermitteln. Die Ergebnisse werden dann zur Bestimmung der maximalen Düsentemperaturen im FDM-Prozess genutzt.

Während der TGA-Analyse werden die Proben bis zu einer Temperatur von 1000 °C mit einer Aufheizrate von 10 K/min erhitzt. Der Messvorgang ist ein zweistufiger Prozess, denn bis 600 °C erfolgt die Messung unter Stickstoffatmosphäre und ab 600 °C wird zur Zersetzung von Ruß Sauerstoff eingeleitet. In Bild 4-2 sind die TGA-Messungen, der in dieser Arbeit verwendeten Materialien dargestellt.

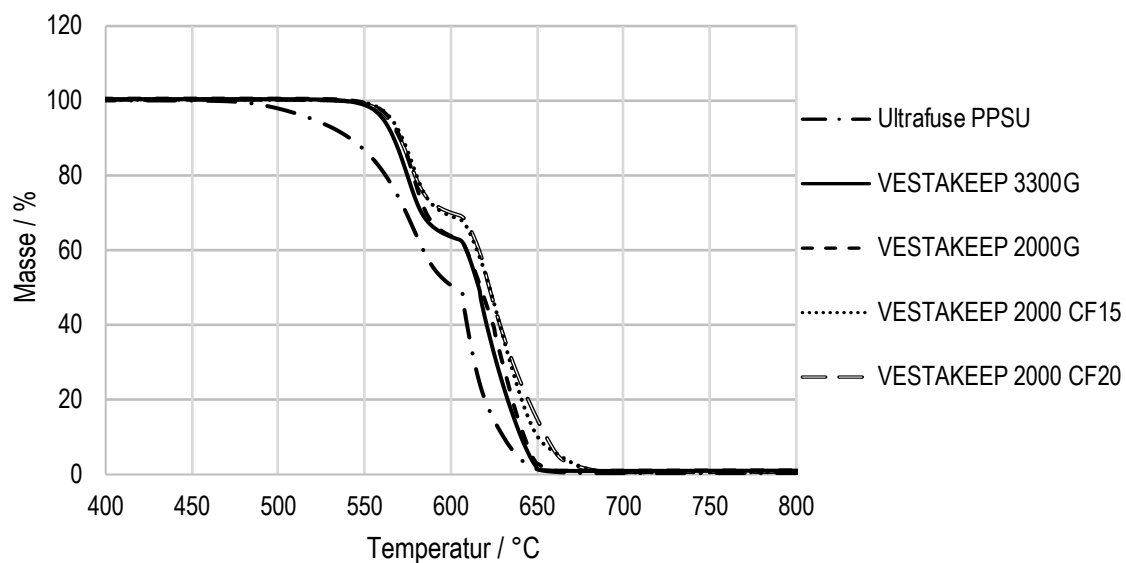


Bild 4-2: TGA-Messung: Gegenüberstellung der untersuchten Materialien

Die Zersetzung der PEEK Proben beginnt ab einer Temperatur von ca. 530 °C. Für das PPSU ist ab 460 °C ein Masseverlust festzustellen. Es sind deutliche Umschaltunkte nach dem Übergang von der inerten Atmosphäre zur Sauerstoffatmosphäre zu erkennen. Das Verfahren eignet sich nicht, um den Fasergehalt in den kohlenstofffaserverstärkten Materialien zu überprüfen, da sich die Fasern während der Messung vollständig thermisch zersetzen und ein Masseanteil von 0 % detektiert werden kann.

4.3 Verwendete FDM-Maschine und Wahl der Prozessparameter

Im nachfolgenden Kapitel wird die in den experimentellen Untersuchungen verwendete FDM-Maschine vorgestellt und Besonderheiten der Anlage erläutert. Zudem werden die genutzten Prozessparameter beschrieben und die Auswahl begründet.

4.3.1 FDM-Maschine

In dieser Arbeit wird eine industrielle FDM-Maschine des Typs HTP260 der Firma GEWO Feinmechanik GmbH verwendet. Die Anlage ist in der Lage, Filamente mit einem Durchmesser von 1,75 mm zu verarbeiten. Es handelt sich um eine Fertigungsmaschine mit einem offenen Materialsystem. Dies ermöglicht es, beliebige Materialien mit selbst definierten Prozessparametern zu verarbeiten.

Die Anlage besitzt einen mittels Druckluft gekühlten Filamentextruder mit zwei Plastifiziereinheiten. Zudem wird trockene Luft durch die filamentführenden Schläuche geleitet, um den Kunststoff ausreichend trocken zu halten. Zum Aufschmelzen des Kunststoffs lässt sich eine Düsentemperatur von bis zu 450 °C einstellen. Neben dem Bauraum, welcher bis auf 260 °C aufheizbar ist, lässt sich auch das Heizbett separat temperieren. Hier sind

Temperaturen von bis zu 270 °C realisierbar. Mit diesen Rahmenbedingungen ist es möglich, den Einfluss eines aktiv beheizten Bauraums auf die Verarbeitung von Hochleistungskunststoffen, die Schweißnahtqualität und das Verzugsverhalten im FDM-Prozess zu untersuchen. Die Bewegung der Filamentextruder sowie der Bauplattform erfolgt über ein Linearachsensystem mit Spindelantrieb. Weitere Daten können dem technischen Datenblatt der Anlage entnommen werden [GEW19-ol].

4.3.2 Prozessparameter

Die Auswahl der Prozessparameter erfolgt unter der Berücksichtigung von Anlagenrestriktionen und Industriestandards. Das Ziel ist es, sich auf Prozessparameter zu beschränken, die einen hohen Erkenntnisgewinn für die Materialqualifizierung von Hochleistungsthermoplasten versprechen. Wenn es nicht anders angegeben ist, finden diese Parameter in den Untersuchungen der Arbeit Verwendung. In Tabelle 4-4 sind die Prozessparameter zur Verarbeitung der Materialien Ultrafuse PPSU, VESTAKEEP 3300G, VESTAKEEP 2000G, VESTAKEEP 2000 CF15 und VESTAKEEP 2000 CF20 aufgelistet.

Tabelle 4-4: Übersicht Prozessparameter

Prozessparameter	Ultrafuse PPSU	VESTAKEEP 3300G	VESTAKEEP 2000G	VESTAKEEP 2000 CF15	VESTAKEEP 2000 CF20
Düsendurchmesser / mm	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6
Schichthöhe / mm	0,25	0,25	0,375	0,375	0,375
Strangbreite / mm	0,5	0,5	0,75	0,75	0,75
Düsentemperatur / °C	380, 400, 420	430, 440, 450	430, 440, 450	430, 450	430, 450
Bauraumtemperatur / °C	180 - 220	Vgl. Kap. 5	Vgl. Kap. 7	Vgl. Kap. 5	Vgl. Kap. 5
Strangablagegeschwindigkeit / mm/s	30	30	30	30	30

Ein Düsendurchmesser von 0,4 mm gilt als Standardgröße und wird von vielen Herstellern genutzt. Für die Verarbeitung der faserstärkten Materialien ist ein größerer Düsendurchmesser notwendig, um ein Verstopfen der Düse aufgrund der Fasern zu vermeiden. In Voruntersuchungen hat sich ein Durchmesser von 0,6 mm bewährt. Das VESTAKEEP 2000G wird ebenfalls mit einem Düsendurchmesser von 0,6 mm verarbeitet, um eine Basis für die Vergleichbarkeit zwischen dem Matrixmaterial und den kohlenstofffaserverstärkten Typen zu schaffen.

Die Festlegung sowohl der Schichthöhe als auch der Strangbreite ist an den verwendeten Stranggeometrien der Firma Stratasys orientiert, da dies dem aktuellen Industriestandard entspricht. Auch das von Stratasys gewählte Verhältnis aus Strangbreite zu Schichthöhe von 2/1 wird berücksichtigt und umgesetzt. Durch eine Anpassung der Düsengröße ist eine Justierung der Geometrie des abgelegten Strangs notwendig. Die Materialien mit einem

Düsendurchmesser von 0,6 mm werden bei einer Schichthöhe von 0,375 mm und einer Strangbreite von 0,75 mm verarbeitet.

Die Wahl der Verarbeitungstemperaturen ist primär abhängig von den verwendeten Materialien. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Düsen- und der Bauraumtemperatur. Die Düsentemperaturen im FDM liegen deutlich oberhalb der materialspezifischen Schmelztemperatur, da der extrudierte Schmelzestrang viel Energie benötigt, um bereits abgelegte Stränge aufzuschmelzen und gute Schweißungen zu erzeugen. Die maximal auszuwählende Düsentemperatur wird durch Anlagenrestriktionen oder durch Materialschädigungen aufgrund von zu hohen Temperaturen eingeschränkt. Bei der Wahl der Düsentemperaturen müssen die Ergebnisse der TGA-Messungen berücksichtigt werden. Für die Verarbeitung des Ultrafuse PPSU sind die Düsentemperaturen auf 380 °C, 400 °C und 420 °C festgelegt. Die VESTAKEEP-Materialien werden zwischen 430 °C und 450 °C verarbeitet. Hierbei entspricht 450 °C der maximalen Düsentemperatur der Hochtemperaturanlage GEWO HTP 260.

Die Temperaturen des Bauraums sind durch thermisch-oxidative Alterungsvorgänge und dem daraus resultierenden Materialabbau begrenzt. Die thermische Schädigung während des Fertigungsprozesses im FDM ist auf die Warmlagerung des Bauteils in einer beheizten Bauumgebung zurückzuführen. Außerdem wird die Höhe der Bauraumtemperatur durch die Wärmeformbeständigkeit des verwendeten Materials limitiert. Die Vorstellung der verwendeten Bauraumtemperaturen erfolgt gesondert in den Kapiteln 5-7, da während der Untersuchung der Verarbeitungseignung aufgrund der bestehenden Forschungslücke und des geringen Wissenstands zahlreiche Anpassungen durchgeführt worden sind. Die Temperatur des Heizbetts entspricht dem Niveau des Bauraums und wird daher nicht gesondert betrachtet.

Die Strangablagegeschwindigkeit mit 30 mm/s resultiert aus der maximal zugelassenen Verfahrgeschwindigkeit während des Extrusionsprozesses der verwendeten FDM-Maschine. Dies entspricht der voreingestellten Geschwindigkeit der Außenkontur verschiedener Slicer-Softwares wie Simplify3D oder Slic3r und ist somit als Prozessparameter geeignet.

Die in den experimentellen Untersuchungen verwendeten Probekörper (vgl. Kapitel 5.2.1) erlauben es, den Einfluss einer Vielzahl von Verarbeitungsparametern auszuschließen. Durch die einsträngigen Messbereiche entfallen die Infill-Parameter und somit ein Großteil an möglichen Einflussfaktoren.

4.4 Filamentherstellung

Die erfolgreiche Verarbeitung von Materialien mit dem FDM-Verfahren beginnt mit der Herstellung von Filamenten und der Sicherstellung der Filamentqualität. Die bezogenen

VESTAKEEP-Materialien wurden als Standardgranulat geliefert und müssen im Vorfeld der Untersuchungen mit einer Extrusionslinie zu Filamenten weiterverarbeitet werden. Der Aufbau der Extrusionslinie und notwendige Maßnahmen zur Qualitätssicherung der Filamente werden im Folgenden präsentiert.

4.4.1 Aufbau der Extrusionslinie und Herstellung der Filamente

Zur Herstellung der Filamente wird ein 11 mm Doppelschneckenextruder (Process 11) der Firma Thermo Fisher Scientific GmbH verwendet. Die beiden Schnecken sind parallel angeordnet und rotieren gleichlaufend mit einer maximalen Drehzahl von 1000 U/min. Es ist ein Gesamtdurchsatz zwischen 20 und 2500 g/h möglich. Der Extruder verfügt über sieben individuell beheizbare Zonen und es sind Temperaturen bis 450 °C realisierbar. Als Extrusionswerkzeug wird eine Düse mit einem Durchmesser von 1,8 mm und einer Länge von 30 mm eingesetzt. Die volumetrische Dosierung des Granulats erfolgt durch zwei Dosierschnecken mit geringen Steigungen. Durch die Verwendungen von zwei Dosierschnecken und gleichzeitig hohen Dosierschneckendrehzahlen soll eine möglichst gleichmäßige Materialmenge bereitgestellt werden. Dies reduziert die Durchmesserschwankungen des Filaments, welche auf inkonstante Extrusionsmengen zurückzuführen sind. Der Abzug des Filaments erfolgt über ein Abzugsband. Hierbei wird der Durchmesser des Filaments durch die Abzugsgeschwindigkeit, die stufenlos reguliert werden kann, eingestellt. Das Filament wird mit einer konstanten Geschwindigkeit abgezogen und kühlt an der Luft ab. Vor der Konfektionierung der Filamente wird der Durchmesser mit dem Lasermesssystem (AccuScan 5000 Series) der Firma NDC Technologies in zwei Ebenen bestimmt und durchgehend protokolliert. Abschließend werden die Filamente mit einem Wickler auf Spulen konfektioniert. Der beschriebene Aufbau der Extrusionslinie ist in Bild 4-3 dargestellt.

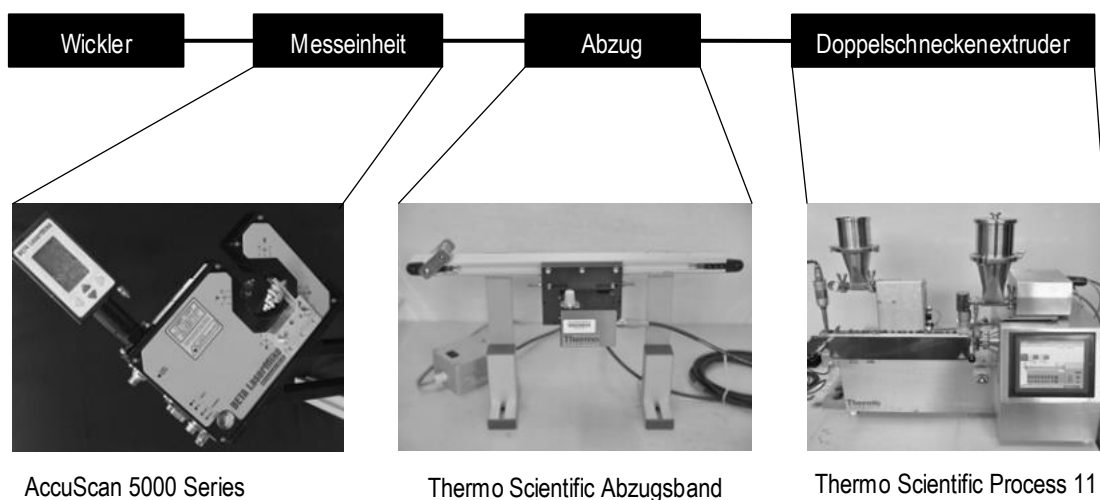


Bild 4-3: Extrusionslinie zur Filamentherstellung

Die Extrusion der VESTAKEEP-Materialien ist mit einem ansteigenden Temperaturprofil umgesetzt. Hierbei wird die Temperatur stufenweise über verschiedenen Zylinderzonen erhöht, bis eine maximale Extrusionstemperatur von 370 °C in der Düse erreicht ist. Eine Auflistung der verwendeten Extrusionsparameter kann der Tabelle A1-1 im Anhang entnommen werden.

Die maximale Abweichung des Durchmessers der Filamente während des Herstellungsprozesses liegt bei $\pm 0,06$ mm. Mit dem beschriebenen Vorgehen können alle Materialien im vorgegebenen Toleranzbereich verarbeitet werden. Die hergestellten Filamente haben einen Durchmesser zwischen 1,65 mm und 1,75 mm. Der ermittelte Filamentdurchmesser stellt ein Qualitätsmerkmal dar, da die zu extrudierende Materialmenge im FDM-Prozess mithilfe des mittleren Durchmessers in der Fertigungsvorbereitung berücksichtigt wird. Starke Durchmesserschwankungen beeinträchtigen das Fertigungsergebnis des FDM-Prozesses aufgrund von resultierenden Unter- oder Überextrusionen während der Verarbeitung. Darüber hinaus ist es notwendig, eine ausreichende Filamentqualität während des Herstellungsprozesses sicherzustellen. Deshalb werden verschiedene Maßnahmen zur Qualitätssicherung durchgeführt und nachfolgend vorgestellt.

4.4.2 Qualitätsüberwachung

Die Qualität der Halbzeuge ist entscheidend für die ordnungsgemäße Herstellung von FDM-Bauteilen [MS04, S. 591]. Bestandteil der Qualitätsüberwachung ist neben bestimmten Qualitätsprüfungen das Sicherstellen von grundlegenden Anforderungen. Der Extruder samt Peripherie muss vor jedem Extrusionsvorgang gründlich gereinigt werden, da Stippen oder andere Verunreinigungen zu einem Ausschuss des Filaments führen. Während des Extrusionsvorgangs erfolgt eine visuelle Sichtprüfung der Schmelze der unverstärkten VESTAKEEP-Typen, da die Materialien im schmelzflüssigen Zustand transparent sind und eine derartige Prüfung erlauben. Die Filamentherstellung setzt einen stationären Extrusionsprozess voraus. Zudem muss das Granulat vor der Verarbeitung getrocknet werden, um Lufteinschlüsse im Filament zu vermeiden. Im Folgenden werden die Durchmesserüberwachung und die Prüfung auf mögliche Materialschädigungen als Instrumente der Qualitätsüberwachung detaillierter betrachtet.

4.4.2.1 Durchmesserüberwachung der hergestellten Filamente

Die Filamente werden während des Herstellungsprozesses durchgängig mit einem Lasermesssystem überwacht (vgl. Kapitel 4.4.1). Aufgrund der Protokollierung und Erfassung der Messdaten ist es möglich, eine Aussage über den mittleren Filamentdurchmesser in Abhängigkeit von der gesamten Extrusionsdauer zu treffen. Die Auswertung erfolgt für jede einzelne Spule. Bild 4-4 veranschaulicht exemplarisch einen Ausschnitt der Protokollierung

des Filamentdurchmessers einer Spule des niedrigviskosen VESTAKEEP 2000G, da dieses Material größere Schwankungen des Durchmessers gezeigt hat.

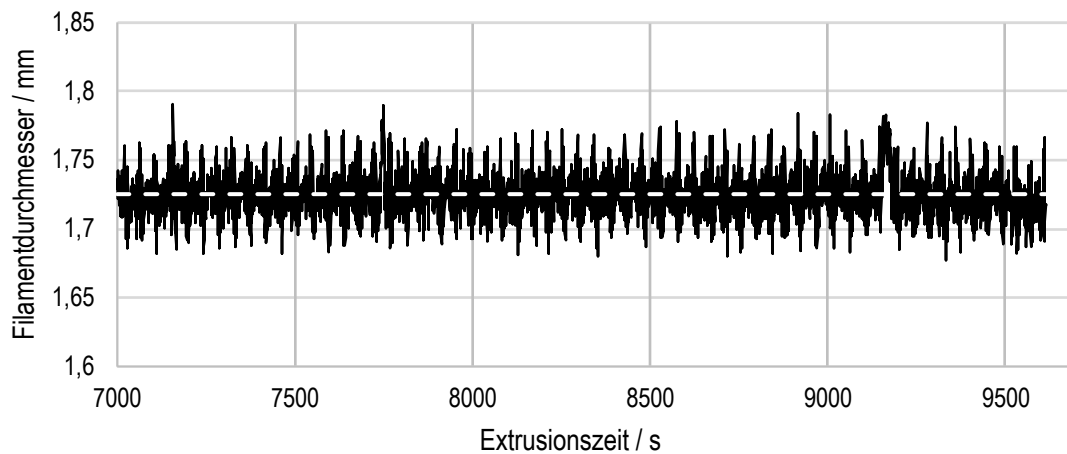


Bild 4-4: Aufzeichnung des Filamentdurchmessers über die Extrusionszeit während der Extrusion des Materials VESTAKEEP 2000G

Die dargestellten Messdaten ergeben einen mittleren Durchmesser des Filaments von 1,725 mm mit Schwankungen im Bereich von $\pm 0,06$ mm. Dieser Durchmesser muss während der Fertigungsverfahren in den FDM-Prozessparametern des Slicers berücksichtigt werden. Das hochviskosere VESTAKEEP 3300G und die faserverstärkten Materialien weisen hier deutlich geringere Schwankungen auf.

4.4.2.2 MVR-Messung zur Analyse der Materialschädigung

Das Ziel der Untersuchungen ist es, die Qualität der hergestellten Filamente sicherzustellen und diese auf mögliche Materialschädigungen zu prüfen. Die Materialien werden während der Filamentextrusion thermisch belastet und es kann zu einem Materialabbau kommen, der die mechanischen Materialeigenschaften beeinträchtigt. Mithilfe der Materialviskosität können Rückschlüsse auf eine mögliche Schädigung der Materialien gezogen werden, da die Materialviskosität eng mit der mittleren Molekülkettenlänge von Kunststoffen verknüpft und eine Viskositätsabnahme ein Hinweis für vorliegende Materialschädigungen ist. Eine Möglichkeit zur Überprüfung der Viskosität ist die Messung der Melt Volume-Flow Rate (MVR). Somit stehen Veränderungen des MVR-Wertes im Zusammenhang mit Veränderungen des molekularen Aufbaus [SCN83, S. 91f.]. Dies eröffnet eine Analysemöglichkeit des Materialabbaus, auf die in dieser Arbeit zurückgegriffen wird.

Die Durchführung der MVR-Messungen ist in [DIN EN ISO 1133-1] beschrieben. Es wird eine Volumenfließrate der Schmelze in $\text{cm}^3/10 \text{ min}$ bei einem konstanten Druck und einer definierten Temperatur ermittelt. In den Untersuchungen sind die MVR-Werte des Granulats und des Filaments für die VESTAKEEP-Materialien mithilfe der in Tabelle 4-1 dargestellten Temperaturen und Gewichte bestimmt worden. Zur Validierung der Ergebnisse

werden die ermittelten MVR-Werte der Granulate mit den Materialangaben des Herstellers verglichen. Die Materialien müssen unmittelbar vor der Versuchsdurchführung getrocknet werden, um einen Einfluss durch Feuchtigkeit auszuschließen. Die Ergebnisse der MVR-Messungen sind in Bild 4-5 dargestellt.

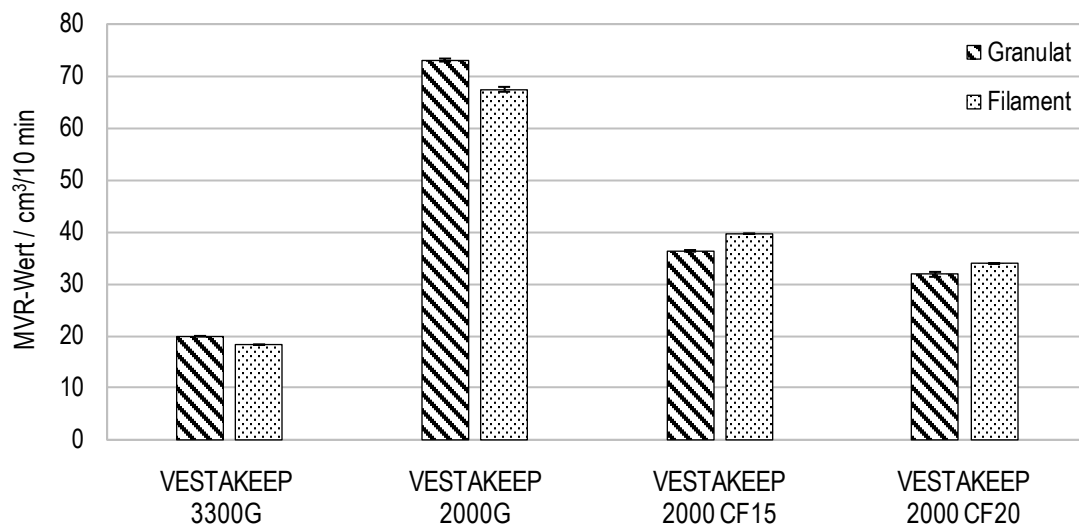


Bild 4-5: Gegenüberstellung der MVR-Messungen am Granulat und Filament (in Zusammenarbeit mit MÜLLER, vgl. [Mue19])

Die ermittelten MVR-Werte der Granulate stimmen mit den Herstellerangaben (vgl. Tabelle 4-1) nahezu überein. Somit eignet sich das verwendete Versuchsequipment, um Veränderungen der Viskosität auswerten zu können. Der Vergleich zwischen Granulat und Filament zeigt sowohl für das VESTAKEEP 3300G als auch für das VESTAKEEP 2000G eine leichte Abnahme des MVR-Wertes. Die faserverstärkten Filamente weisen hingegen einen leichten Anstieg auf. Während der Filamentherstellung richten sich die Fasern in Extrusionsrichtung aus und insbesondere bei faserverstärkten Materialien kann es durch eine Orientierung der Verstärkungsstoffe zu einer Beeinflussung des MVR-Werts kommen [DIN EN ISO 1133-1, S. 22]. Zusammenfassend zeigen die Materialien keine bedenklichen Materialveränderungen, sodass die hergestellten Filamente für die experimentellen Untersuchungen im weiteren Verlauf der Arbeit geeignet sind, da eine ausreichende Filamentqualität gegeben ist.

4.4.2.3 Zugversuche zur Analyse der Materialschädigung

Im Kontext der Qualitätsüberwachung werden in dieser Arbeit Zugversuche eingesetzt, um die Zugfestigkeiten der hergestellten Filamente zu ermitteln. Die Zugfestigkeiten der Filamente können dann mit den mechanischen Kennwerten aus den Materialdatenblättern der Hersteller verglichen werden. Dies ermöglicht es, Rückschlüsse auf Materialschädigungen durch die Filamentherstellung zu ziehen.

Die Prüfungen erfolgen bei Normklima, entsprechend einer Temperatur von 23 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 50 %, an für mindestens 88 h in Normklima konditionierten Proben gemäß [DIN EN ISO 291]. Zur Kraftermittlung wurde eine Universalprüfmaschine vom Typ Z010 der Firma ZwickRoell mit einem ± 1 kN Kraftaufnehmer verwendet. Aufgrund der abweichenden Probekörpergeometrie werden die Zugprüfungen in Anlehnung an die [DIN EN ISO 527-2] mit den in der Norm vorgegebenen Prüfparametern durchgeführt. Während den Prüfungen kommen Spannbacken mit Silikoneinlagen an den Innenseiten zum Einsatz, um ein Versagen der Filamente im Bereich der Einspannung zu verhindern. In der Auswertung werden nur Proben berücksichtigt, die nicht in diesem Bereich versagen. Mit dem beschriebenen Prüfaufbau können für alle Filamente Zugfestigkeitswerte ermittelt werden. Auffällig ist die signifikante Festigkeitssteigerung bedingt durch die Faserverstärkungen des VESTAKEEP 2000 CF15 und des VESTAKEEP 2000 CF20. Zur Beurteilung einer möglichen Materialschädigung der Filamente werden in Tabelle 4-5 die ermittelten Zugfestigkeiten mit den Festigkeitswerten der Ausgangswerkstoffe verglichen. In diesem Zusammenhang ist aufgrund der verschiedenen Verarbeitungsverfahren eine maximal zulässige Abweichung der Festigkeitswerte von zehn Prozent definiert worden.

Tabelle 4-5: Vergleich zwischen der Zugfestigkeit gemäß des Datenblatts und der Zugfestigkeit des extrudierten Filaments (in Zusammenarbeit mit Elsner, KISTER und MÜLLER, vgl. [Els19], [Kis20], [Mue19])

Material	Zugfestigkeit nach Herstellerangaben / MPa	Zugfestigkeit der hergestellten Filamente / MPa
VESTAKEEP 3300G	98	91,7
VESTAKEEP 2000G	100	92,79
VESTAKEEP 2000 CF15	203	198,73
VESTAKEEP 2000 CF20	227	206,88

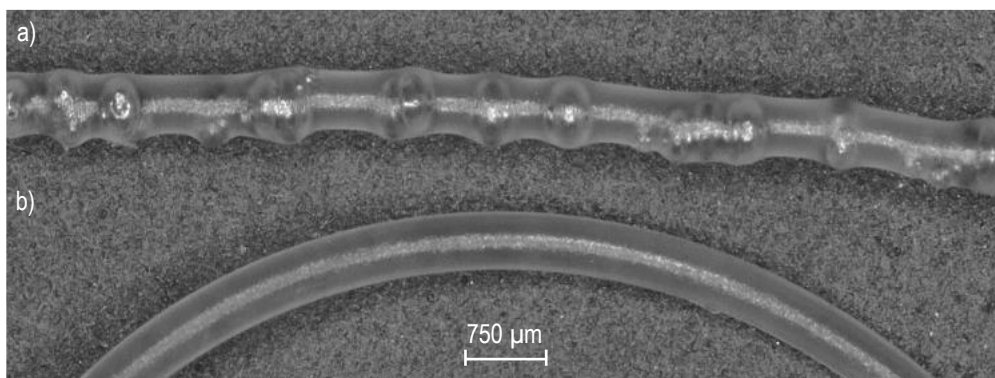
Die ermittelten Zugfestigkeiten der Filamente sind mit den Herstellerangaben aus den Materialdatenblättern vergleichbar und unterscheiden sich nur geringfügig voneinander. Somit können signifikante Materialschädigungen der Filamente durch die Filamentherstellung ausgeschlossen und die Materialien verwendet werden.

4.5 Trocknungsbedingungen

Für die Verarbeitung im FDM-Prozess ist es zwingend erforderlich, dass das Filament ausreichend trocken ist. Liegt im Ausgangsmaterial Feuchtigkeit vor, wirkt sich dies negativ auf die mechanischen, optischen und chemischen Eigenschaften der gefertigten Bauteile aus. Für das Ultrafuse PPSU liegen Herstellerangaben zu den Trocknungsbedingungen vor. Der Hersteller empfiehlt das Material acht Stunden bei 125 °C zu trocknen [BAS21-ol]. Da die Filamente der verschiedenen VESTAKEEP-Typen selbst hergestellt werden, sind für die Halbzeuge noch keine Trocknungsempfehlungen verfügbar. Voruntersuchungen zeigen,

dass das Filament Feuchtigkeit aufnimmt (vgl. Bild 4-6) und Verarbeitungsempfehlungen bzgl. der Trocknungsbedingungen erarbeitet werden müssen. Die Untersuchungen erfolgen anhand des VESTAKEEP 3300G. Obwohl PEEK nur schwach hygroskopisch ist, ist das Material in der Lage, bis zu einem Sättigungsgehalt von 0,25 % Wasser aufzunehmen [Evo19-ol].

In Bild 4-6 sind zwei extrudierte Stränge unmittelbar nach dem Düsenaustritt dargestellt. Das feuchte Material ist gekennzeichnet durch eingeschlossene Bläschen, die durch die Entgasung des enthaltenen Wassers entstehen. Durch eine Trocknung des Filaments vor der Verarbeitung, kann die Bildung der Bläschen vermieden werden.



*Bild 4-6: Auswirkung von Feuchtigkeit im Ausgangsmaterial – VESTAKEEP 3300G
a) Extrudierter Strang aus feuchtem Filament, b) Extrudierter Strang aus getrocknetem Filament (in Zusammenarbeit mit FUHRMANN, vgl. [Fuh19])*

Zur Evaluierung der Feuchtigkeit werden Feuchtigkeitsmessungen mithilfe der coulometrischen Karl-Fischer-Titration in Anlehnung an die [DIN EN ISO 15512] durchgeführt. Die Karl-Fischer-Titration ist eine Methode zur Bestimmung des Wassergehalts in Substanzen und ist aufgrund ihrer hohen Genauigkeit für geringe Wassermengen geeignet. Das Vorgehen der experimentellen Feuchtigkeitsuntersuchungen ist gekennzeichnet durch sechs Prüfungen für jede ausgewählte Trocknungstemperatur. Das Filament wird vor den Messungen zur Konditionierung nach [DIN EN ISO 291] mindestens 88 Stunden bei 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % unter Normklima gelagert. Es werden drei Trocknungstemperaturen (65 °C, 125 °C, 170 °C) mit jeweils verschiedenen Trocknungszeiten betrachtet. Die Temperaturen 65 °C und 125 °C sind auf die Wärmeformbeständigkeiten der Spulen zur Konfektionierung des Filaments zurückzuführen. Es liegen Spulen aus Polystyrol (65 °C) und Polycarbonat (125 °C) vor, die aufgrund der Materialeigenschaften die maximal möglichen Trocknungstemperaturen vorgeben. Ein Trocknung bei 170 °C für acht Stunden entspricht den Herstellerangaben zur Trocknung des Granulats [Evo21b-ol, S. 5] und dient als Referenzgröße für den zu erzielenden Wassergehalt. Der Einfluss der verschiedenen Trocknungsbedingungen wird in Bild 4-7 quantitativ erfasst.

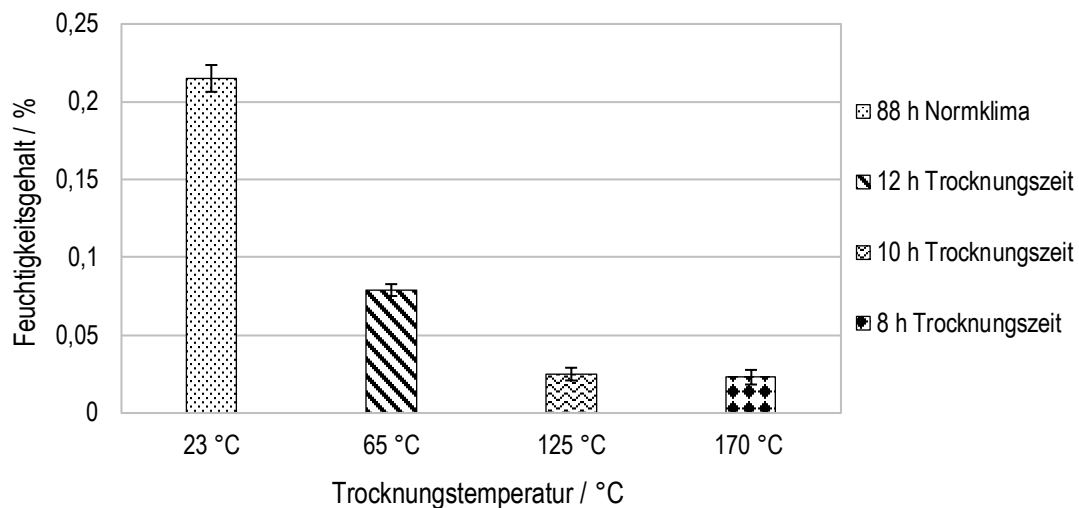


Bild 4-7: Gegenüberstellung des Feuchtigkeitsgehalts bei verschiedenen Trocknungstemperaturen und Trocknungszeiten – VESTAKEEP 3300G (in Zusammenarbeit mit FUHRMANN, vgl. [Fuh19])

Die Lagerung des Filaments unter Normklima führt zu einem Wassergehalt von 0,215 %. Durch eine Trocknung bei 65 °C für 12 Stunden kann die Feuchtigkeit signifikant auf 0,079 % reduziert werden. Allerdings liegt der Wert noch deutlich über der Referenzgröße von 0,023 %, die gemäß der Verarbeitungsempfehlungen des Materialherstellers bei 170 °C und 8 Stunden Trocknungszeit ermittelt wurden. Es zeigt sich, dass bei 125 °C und einer Trocknungszeit von 10 Stunden ein vergleichbarer Wassergehalt von 0,025 % erzielt werden kann. Das Setup ist folglich zur Trocknung der VESTAKEEP-Materialien geeignet.

Diese Trocknungseinstellungen (125 °C für 10 Stunden) sind in den nachfolgenden Untersuchungen verwendet worden, da eine ausreichende Trocknung gewährleistet und eine Konfektionierung der Filamente möglich ist. Vor der Verarbeitung werden die Materialien individuell getrocknet und während der Fertigung in einem Exsikkator gelagert, um eine Wasseraufnahme während des Verarbeitungsprozesses zu verhindern.

5 Untersuchung der Schweißnahtqualität zur Beurteilung der Verarbeitungseignung im FDM

Die mechanischen Eigenschaften von FDM-Bauteilen werden aufgrund der charakteristischen Schweißverbindungen des FDM-Prozesses signifikant durch die Qualität dieser Schweißungen beeinflusst. Insbesondere in z-Orientierung (vertikale Richtung) ist die Schweißnahtqualität von essentieller Bedeutung für eine ausreichende Bauteilfestigkeit. Die Kraftübertragung erfolgt in vertikaler Richtung ausschließlich über die Schweißnähte der Schichten hinweg und führt zur charakteristischen Anisotropie des FDM-Prozesses. Die Orientierung der Bauteile in z-Richtung spiegelt in diesem Zusammenhang die schwächste Aufbaurichtung wieder. Deshalb ist es wichtig, während der materialspezifischen Beurteilung der Verarbeitungseignung von Materialien für den FDM-Prozess die Schweißnahtqualität zu berücksichtigen.

In diesem Kapitel wird zu Beginn ein Einblick in den aktuellen Stand der Forschung gegeben. Dieser beinhaltet Untersuchungen mit Bezug auf die Schweißnahtqualität und Forschungen zur Verarbeitung von Hochleistungsthermoplasten im FDM. Anschließend wird eine Methode zur Bestimmung der Schweißnahtqualität vorgestellt, um die mechanischen Eigenschaften in z-Aufbaurichtung beurteilen zu können. Mithilfe der experimentellen Vorgehensweise wird die Verarbeitungseignung der in dieser Arbeit verwendeten Materialien bewertet. Für die angestrebte Weiterentwicklung des Prozessverständnisses ist es notwendig, den Aufschmelzprozess in der Plastifiziereinheit zu berücksichtigen. Es schließen sich Untersuchungen zur Verbesserung der Schweißnahtfestigkeiten durch eine nachträgliche Wärmebehandlung an. Zudem wird in diesem Kapitel der Einfluss von Kohlenstofffasern auf die Festigkeit der Schweißnaht von kurzfaserverstärkten PEEK Materialien untersucht. Zusammenfassend sollen prozessspezifische Einflussfaktoren des FDM-Verfahrens unter Berücksichtigung der Schweißnahtqualität während der Verarbeitung von Hochleistungsthermoplasten mit einer Hochtemperaturanlage analysiert werden.

5.1 Stand der Forschung

In Kapitel 2.3.2 ist herausgearbeitet worden, dass der FDM-Prozess einen iterativen Fügeprozess von Einzelsträngen darstellt und die Schweißnahtqualität zwischen den Schichten eine wichtige Rolle spielt. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, den Fokus auf einzelne Schweißnähte zu richten. DAVIS et al. und SCHUMACHER et al. haben Untersuchungen an einsträngigen Bereichen durchgeführt und Möglichkeiten zur Einordnung der mechanischen Eigenschaften von Standardthermoplasten und technischen Thermoplasten vorgestellt [DHH+17, S. 3f.], [SSG17, S. 479ff.]. Die von SCHUMACHER entwickelte Vorgehensweise wurde bisher nur für den technischen Kunststoff Polyamid 6 angewendet und eröffnet die Möglichkeit der Adaption der Methode sowie einer anschließenden Validierung für die Verarbeitung von Hochleistungsthermoplasten im FDM.

Der Stand der Forschung ist gekennzeichnet durch eine Vielzahl von Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften von Hochleistungsthermoplasten im FDM anhand von Probekörpern, die an konventionelle Kunststoffnormen angelehnt sind und aus Strangpaketen bestehen. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf den Prozesstemperaturen der Düse sowie des Bauraums während der Verarbeitung von PEEK und PPSU. Daher werden nachfolgend vergleichbare Forschungen aus diesem Bereich vorgestellt und eingeordnet. Die Auswertung des Einflusses der Düsentemperatur auf die Zugfestigkeit ergibt, dass mit erhöhten Düsentemperaturen verbesserte Zugfestigkeiten erzielt werden können [DZP+18, S. 4], [LL20, S. 5f.]. Die Arbeiten von EL MAGRI et al., VAES und VAN PUYVELDE sowie ZANJANJAM et al. liefern einen zusammenfassenden Überblick über den gegenwärtigen Forschungsstand in Bezug auf die Verarbeitung von PEEK [EVV21, S. 862ff.], [Vv21, S. 17f.], [ZML+20, S. 3ff.]. Der Großteil der Untersuchungen ist in einem Temperaturbereich der Düse von 370-440 °C erfolgt. Allerdings weichen die ermittelten, optimierten Düsentemperaturen voneinander ab, da aufgrund der verschiedenen Maschinenspezifikationen keine einheitliche Vergleichsbasis gegeben ist. Für das Material PPSU liegen keine vergleichbaren Forschungsergebnisse vor. Generell lässt sich für amorphe Thermoplaste festhalten, dass eine erhöhte Düsentemperatur die intermolekulare Diffusion und damit die Festigkeitswerte positiv beeinflusst [Vv21, S. 27]. Für den Prozessparameter Bauraumtemperatur lassen sich aus den Forschungen von YANG et al. Ansätze ableiten, die mit dem Vorhaben in dieser Arbeit vergleichbar sind. Die Untersuchungen zeigen einen Einfluss der Bauraumtemperatur im Bereich von 25-200 °C auf die mechanischen Eigenschaften von PEEK und eine deutliche Auswirkungen auf den Grad der Kristallinität [YTL+17, S. 3]. Auch WANG et al. konnten die Kristallinität durch die Verwendung eines beheizten Bauraums bis 145 °C eindeutig verbessern [WCA+19, S. 1051].

Zusammenfassend geht aus der Sichtung des Stands der Forschung hervor, dass einige Studien im Bereich der Hochleistungsthermoplaste vorliegen und es sich um eine aktuelle Thematik im Bereich der additiven Fertigung handelt. Es lässt sich festhalten, dass insbesondere Bauraumtemperaturen >150 °C und Festigkeitswerte der Bauteilorientierung in z-Richtung, die ein Maß für die Schweißnahtqualität zwischen den Schichten sind, bisher unzureichend untersucht wurden. Diese Forschungslücke wird durch die nachfolgenden Untersuchungen der Schweißnahtqualität geschlossen.

5.2 Methode zur Ermittlung der Schweißnahtqualität

In den Untersuchungen der Schweißnahtqualität wird eine am Direct Manufacturing Research Center (DMRC) erarbeitete Methode [SSG17, S. 480f.] verwendet und adaptiert. Mit dieser Methode ist es möglich, quantifizierbare Vergleichsgrößen zu ermitteln und die Verarbeitungseignung verschiedener Materialien unter Berücksichtigung der Schweißnahtqualität zu beurteilen. Zudem ermöglicht die Methode eine gezielte Prozessparameteroptimierung, indem Auswirkungen von Verarbeitungsparametervariationen auf die

Schweißnahtqualität ausgewertet werden können. Eine Validierung der Vorgehensweise für Hochleistungsthermoplaste im FDM wird durch die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit durchgeführt.

5.2.1 Experimentelle Vorgehensweise

Die Geometrie des Probekörpers ist von essenzieller Bedeutung, damit die verschiedenen Hochleistungsthermoplaste hinsichtlich ihrer Verarbeitungseignung untersucht und verglichen werden können. Das Bauteil zur Ermittlung der Schweißnahtqualität besteht aus Bereichen, die Wanddicken mit der Breite eines Strangs besitzen. Hierdurch werden Einflüsse der Bauteilfüllung auf die mechanischen Eigenschaften der FDM-Struktur ausgeschlossen. Zudem ist es durch die einsträngigen Prüfbereiche möglich, gezielt einzelne, reproduzierbar hergestellte Schweißnähte des FDM-Verfahrens zu testen. Die verwendete Geometrie des FDM-Bauteils ist in Bild 5-1 dargestellt.

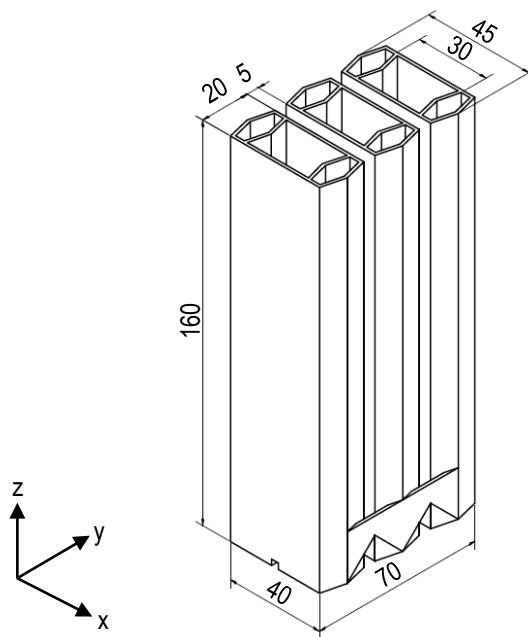


Bild 5-1: Geometrie und Maße (in mm) des Probekörpers zur Ermittlung der Schweißnahtqualität in Anlehnung an [Sch20, S.105]

Das Bauteil besteht aus drei säulenförmigen Elementen, die durch einen Steg miteinander verbunden sind. Dies dient zur gegenseitigen Stabilisierung der Elemente während des Fertigungsprozesses. Die Nut im unteren Bereich des Bauteils mit einer Höhe von 2,5 mm und 3 mm soll dem Verzug des Bauteils aufgrund von Materialschrindungen entgegenwirken. Die beiden konstruktiven Maßnahmen dienen zur Verbesserung der Prozessstabilität und sind insbesondere für die Verarbeitung der teilkristallinen PEEK Materialien vorgesehen. Die maximale Höhe des Probekörpers ist durch das verfügbare Bauraumvolumen der Hochtemperaturanlage auf 160 mm beschränkt. Veränderungen der Strangbreite bedingt

durch eine Variation des Düsendurchmessers müssen im CAD Modell des Bauteils durch Anpassungen der Wanddicken berücksichtigt werden. In den Untersuchungen wurden, in Abhängigkeit von dem zu verarbeitenden Material, Bauteile mit Wanddicken von 0,5 mm und 0,75 mm verwendet. In einem mehrstufigen Prozess werden Zugprobekörper aus den Seitenflächen des Bauteils hergestellt. Bild 5-2 stellt die Vorgehensweise und die notwendigen Prozessschritte dar.

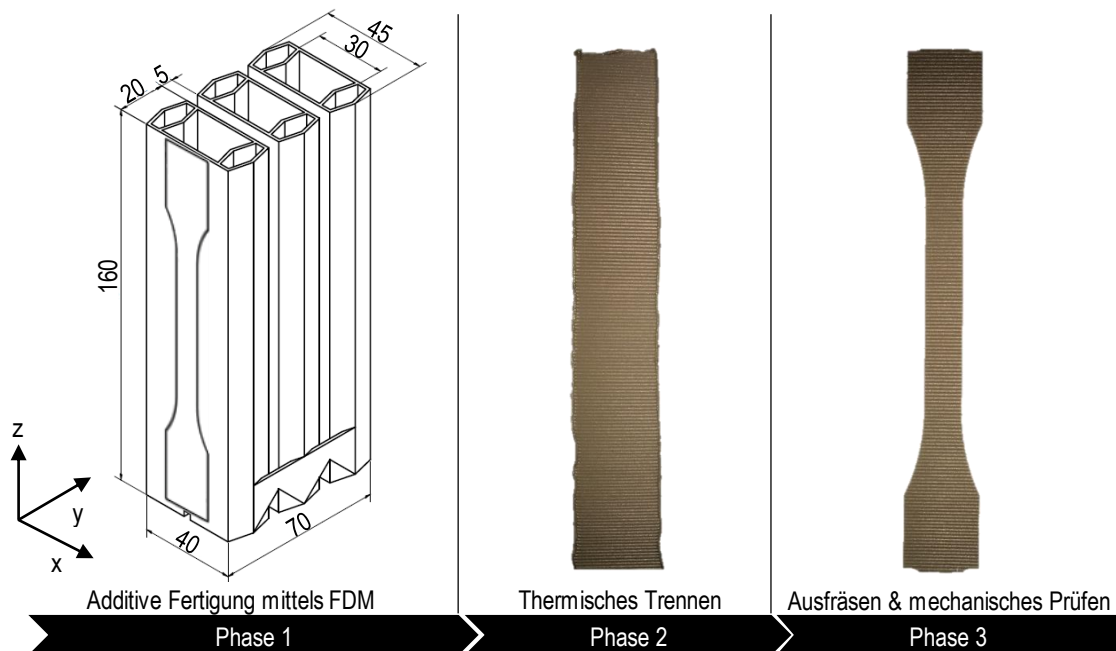


Bild 5-2: Prozessschritte der Probekörperpräparation zur Untersuchung der Schweißnahtqualität in Anlehnung an [Sch20, S. 111f.]

Nach der Fertigung werden die Seitenflächen thermisch aus dem Bauteil herausgetrennt. Durch die gezielte Entnahme der Seitenflächen ist es möglich, dass ausschließlich Bereiche der stationären Strangablage untersucht werden. Somit wird die Schweißnahtqualität der entnommenen Bereiche nur von definierten Prozessparametern sowie dem verwendeten Material beeinflusst. Anschließend werden aus den dünnen Platten mit einer CNC Probenfräse Zugstäbe des Typs 1B nach [DIN EN ISO 527-3, S. 8] ausgefräst.

Die [DIN EN ISO 527-3] ist eine Norm für Kunststofffolien und -tafeln zur Bestimmung der Zugeigenschaften. Die Voraussetzung einer zulässigen Probekörperdicke ≤ 1 mm werden durch die thermisch entnommenen Platten erfüllt. Es können sechs Zugstabgeometrien aus einem Bauteil entnommen werden. Im letzten Schritt werden die ausgefrästen Probekörper durch Zugversuche geprüft. Die mechanischen Prüfungen erfolgen bei Normklima nach [DIN EN ISO 291] an Probekörpern, die zuvor 88 Stunden bei 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % konditioniert wurden. Die Schweißnähte werden hierbei orthogonal belastet und die notwendige Kraft bis zum Versagen des Probekörpers ermittelt. Die

maximale Zugkraft wird benötigt, um anschließend die Schweißnahtfestigkeit bestimmen zu können.

5.2.2 Bestimmung der Schweißnahtqualität

Die Bestimmung der Schweißnahtqualität setzt sich zusammen aus einer Analyse der Schweißnahtausbildung, der sich anschließenden Berechnung der Schweißnahtfestigkeit sowie der Ermittlung eines Schweißfaktors. Im Folgenden werden die notwendigen Maßnahmen und Kennzahlen zur Beurteilung der Schweißnahtqualität vorgestellt.

Zur Analyse der Schweißnahtausbildung werden Schliffbilder mithilfe einer makroskopischen Untersuchung ausgewertet. Hierzu werden Probenquerschnitte aus den einsträngigen Probekörpern entnommen. Der vorgesehene Entnahmebereich befindet sich in der Verjüngung des Zugstabs. Es werden für jeden Baujob Querschnitte aus zwei verschiedenen Zugstäben untersucht. Das Ziel ist es, den Mittelwert mehrerer Schweißnahtbreiten und dazugehörige Strangbreiten zu ermitteln, um so die Ausbildung der Schweißnaht beurteilen zu können. Zur Beschreibung der Schweißnahtausbildung wird ein Schweißbreitenfaktor verwendet.

$$\text{Schweißbreitenfaktor} = \frac{\text{Schweißnahtbreite}}{\text{Strangbreite}} \quad (2)$$

Der Schweißbreitenfaktor gibt das Verhältnis von Schweißnahtbreite zu Strangbreite an und ermöglicht eine prozessparameterabhängige Aussage über die Schweißnahtausbildung. Die Kenngröße für das FDM kann auf die Arbeiten von COOGAN und SCHUMACHER zurückgeführt werden [CK17b, S. 416f.], [SSG17, S. 481f.]. Eine schematische Darstellung der Schweißnaht sowie eine makroskopische Aufnahme zur Ermittlung der Strang- und der Schweißnahtbreite ist in Bild 5-3 dargestellt.

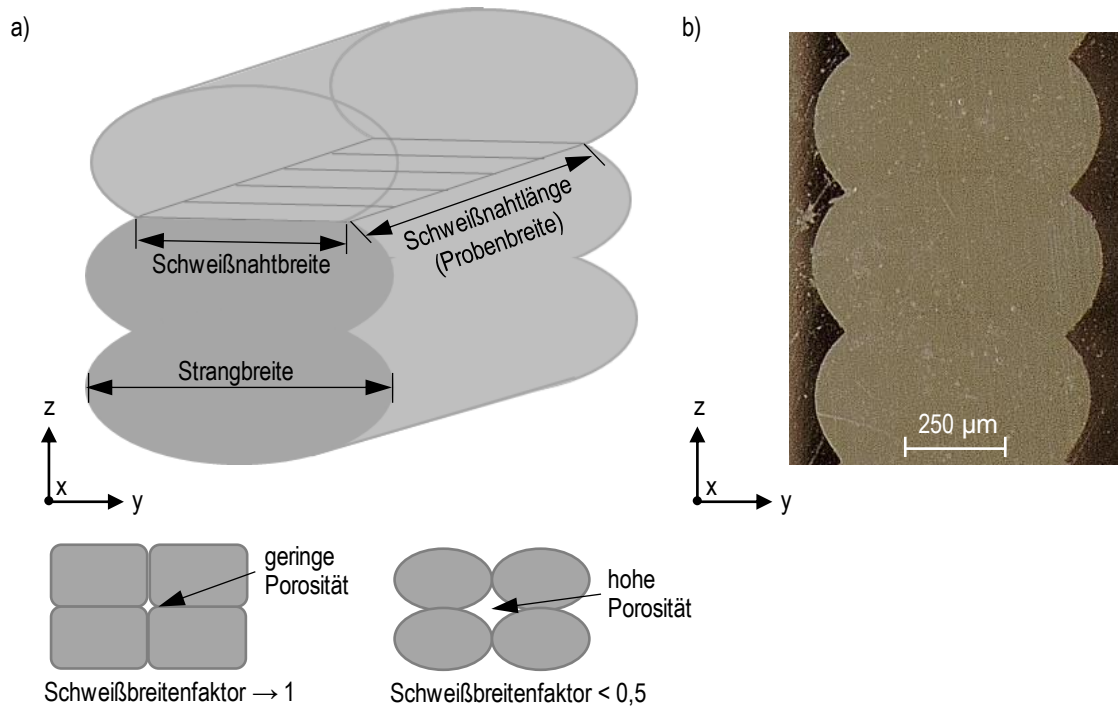


Bild 5-3: a) Schematische Darstellung der Schweißnaht sowie Zuweisung der Strang- und Schweißnahtbreite, b) Makroskopische Aufnahme einer Schweißnaht

Bei einem idealisierten Schweißbreitenfaktor nahe eins ist die Schweißnaht fast so breit wie der abgelegte Strang. Aus einem derartigen Schweißbreitenfaktor resultieren folglich große Schweißnahtflächen, die die mechanischen Eigenschaften eines FDM-Bauteils positiv beeinflussen können. Darüber hinaus liefert der Schweißbreitenfaktor einen Anhaltspunkt zur Abschätzung der möglichen Porosität im gefertigten Bauteil. Ein geringerer Schweißbreitenfaktor führt zu größeren Hohlräumen zwischen nebeneinander abgelegten Strängen.

Die Ermittlung und Auswertung der Schweißnahtfestigkeit ist ein zentraler Bestandteil der experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit. Die Schweißnahtfestigkeit lässt sich mit der folgenden Gleichung bestimmen.

$$\text{Schweißnahtfestigkeit} = \frac{\text{max. Zugkraft}}{\text{Schweißnahtfläche}} \quad (3)$$

Zur Bestimmung der Schweißnahtfestigkeit wird neben der ermittelten maximalen Zugkraft die tatsächliche Fläche der Schweißnaht benötigt. Die Schweißnahtfläche berechnet sich aus der zuvor bestimmten mittleren Schweißnahtbreite, die mit der Schweißnahtlänge multipliziert wird, welche der Breite des Zugprobekörpers in Höhe von 10 mm entspricht. Mit diesem Vorgehen wird jedem geprüften Probekörper nach dem Zugversuch eine Schweißnahtfestigkeit zugewiesen.

Ein weiterer Kennwert zur Beurteilung der Schweißnahtqualität ist der Schweißfaktor. Der Schweißfaktor lässt sich gemäß der Gleichung 4 aus dem Verhältnis der Schweißnahtfestigkeit zur Grundmaterialfestigkeit bestimmen [PUL93, S. 3]. Die verwendete Grundmaterialfestigkeit entspricht der Zugfestigkeit des Ausgangsmaterials (vgl. Tabelle 4-1).

$$\text{Schweißfaktor} = \frac{\text{Schweißnahtfestigkeit}}{\text{Grundmaterialfestigkeit}} \quad (4)$$

Grundsätzlich kann der Schweißfaktor als Kennwert zur Beurteilung der Güte einer Schweißnaht verstanden werden. Ein Wert von eins bedeutet, dass eine sehr gute Schweißnahtfestigkeit vorliegt, da diese der Grundmaterialfestigkeit entspricht. Je niedriger der Schweißfaktor wird, desto schwächer sind die Schweißnähte und eine Materialeignung für den FDM-Prozess muss kritisch hinterfragt werden. Ein großer Vorteil des Schweißfaktors ist, dass dieser einen unabhängigen Vergleich der Schweißnahtqualität zwischen verschiedenen Materialien ermöglicht. Der Schweißfaktor wird in dieser Arbeit zur Beurteilung der Verarbeitungseignung verwendet.

5.2.3 Prozesseinstellungen und Auswahl der Verarbeitungstemperaturen

Die Untersuchungen der Schweißnahtqualität erfolgen anfangs anhand von Ultrafuse PPSU und VESTAKEEP 3300G, um Erkenntnisse über das Verhalten von amorphen und teilkristallinen Hochleistungsthermoplasten in Abhängigkeit von verschiedenen Verarbeitungstemperaturen (Düsen-/Bauraumtemperatur) im FDM zu sammeln. Durch die Studie soll ein allgemeiner Überblick über die Verarbeitbarkeit der Materialien erlangt werden. Speziell die Ergebnisse des VESTAKEEP 3300G werden in den weiteren Untersuchungen der Materialien VESTAKEEP 2000G, VESTAKEEP 2000 CF15 und VESTAKEEP 2000 CF20 aufgegriffen und verwendet.

Im Vorfeld der experimentellen Untersuchungen ist es notwendig, eine prozesssichere Herstellung der Probekörper sicherzustellen. Hier ist neben generellen Prozesseinstellungen die verwendete Bauplattform zu beachten. Die Auswahl einer geeigneten Bauplattform zur Gewährleistung einer ausreichenden Haftung des FDM-Bauteils während des Fertigungsprozesses ist sehr wichtig. Da die am Markt erhältlichen Haftvermittler nur bis maximal 150 °C temperaturbeständig sind, scheiden diese für die geplanten Untersuchungen aus. Je nach eingesetztem Material muss daher häufig experimentell ermittelt werden, unter welchen Bedingungen eine bestmögliche Haftung vorliegt [SSL16, S. 289f.]. Als Alternative haben sich Organobleche mit einer Polyamid 66 Matrix für das PPSU und Organobleche bestehend aus einer PEEK Matrix für die VESTAKEEP-Materialien als geeignet erwiesen. Die Organobleche halten den erhöhten Bauraumtemperaturen stand und ermöglichen eine ausreichende Haftung des Bauteils. Um die Haftung auf den Bauplattformen weiter zu verbessern, sind gezielt definierte Prozesseinstellungen durch den Slicer getestet worden. Zur Vergrößerung der Haftoberfläche hat sich in Voruntersuchungen ein Brim rund um das

Bauteil bewiesen und auch eine Reduzierung der Strangablagegeschwindigkeit in der ersten Bauteilschicht bewirkt eine verbesserte Haftung. Auf die Voruntersuchungen wird in dieser Arbeit nicht gesondert eingegangen. Die verwendeten Parameter gewährleisten eine prozesssichere Verarbeitung der Materialien und ermöglichen die Durchführung der experimentellen Untersuchungen.

Zu Beginn der experimentellen Untersuchungen werden die Düsen- und die Bauraumtemperaturen so gewählt, dass ein möglichst großer Temperaturbereich abgedeckt ist. Auf diesem Weg soll eine generelle Verarbeitbarkeit und Eignung der Hochleistungsthermoplaste für den FDM-Prozess bewertet werden. Das Ziel ist es, möglichst viele Erkenntnisse durch wenige Versuchspunkte zu sammeln, um speziell die Temperaturen des Bauraums in den weiteren Untersuchungen eingrenzen zu können. Der Versuchsplan setzt sich aus vier Minimum und Maximum Kombinationen sowie einem mittleren Versuchspunkt zusammen. Jeder Versuchspunkt ist zweimal gefertigt worden, um Unterschiede zwischen den verschiedenen Baujobs ausschließen zu können. Die Probekörper werden direkt nach der Beendigung des Fertigungsprozesses dem Bauraum entnommen, um an der Luft abzukühlen. Dadurch wird der thermische Einfluss durch die Bauraumtemperierung auf die reine Fertigungszeit beschränkt und die Versuchspunkte sind vergleichbar. In Tabelle 5-1 sind die verwendeten Verarbeitungstemperaturen und die untersuchten Versuchspunkte dargestellt.

Tabelle 5-1: Übersicht der verwendeten Prozessparameter

Prozessparameter	Ultrafuse PPSU	VESTAKEEP 3300G
Düsendurchmesser / mm	0,4	0,4
Schichthöhe / mm	0,25	0,25
Strangbreite / mm	0,5	0,5
Düsentemperatur / °C	380, 400, 420	430, 440, 450
Bauraumtemperatur / °C	180, 200, 220	150, 200, 250
Strangablagegeschwindigkeit / mm/s	30	30

Das Ultrafuse PPSU wird bei 380 °C, 400 °C und 420 °C Düsentemperatur verarbeitet. Die Einstellungen orientieren sich an den Verarbeitungsempfehlungen des Herstellers, der einen Temperaturbereich von 390-410 °C empfiehlt [BAS21-ol]. Um einen Vergleich zwischen dem Einfluss der Düsentemperatur und der Bauraumtemperaturen zu ermöglichen, wird die Temperatur des Bauraums ebenfalls in 20 K Schritten variiert. Aufgrund der Glasübergangstemperatur von 221 °C liegt die maximal mögliche Bauraumtemperatur bei 220 °C und es folgen die Abstufungen auf 200 °C und 180 °C.

Zur Festlegung der Bauraumtemperaturen für das Material VESTAKEEP 3300G werden die Ergebnisse der DSC-Messungen berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.2.1), in denen $T_g = 153,7$ °C ermittelt wurde. Die minimale Temperatur des Bauraums ist mit 150 °C

knapp unter der Glasübergangstemperatur festgelegt worden, damit die amorphen Bereiche des teilkristallinen Materials im eingefrorenen Zustand vorliegen und dies in der Auswertung berücksichtigt werden kann. Es werden Bauraumtemperaturen von 150 °C, 200 °C und 250 °C betrachtet, um ein möglichst großes Temperaturfenster auswerten zu können. Die Düsentemperaturen sind auf 430 °C, 440 °C und 450 °C festgelegt worden, da sich Temperaturen zwischen 410 °C und 425 °C aufgrund von auftretenden Delaminationen zwischen den Schichten als nicht geeignet erwiesen haben.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Verarbeitungstemperaturen basierend auf den Erkenntnissen bzgl. der Schweißnahtqualität individuell berücksichtigt und angepasst, um die Verarbeitbarkeit von Hochleistungsthermoplasten im FDM weiter zu verbessern.

5.3 Auswertung der Schweißnahtqualität

Die vorgestellte Methode ermöglicht die Untersuchung und Auswertung der Schweißnahtqualität. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen getrennt zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplast offeriert und die Erkenntnisse der Analyse der Schweißnahtqualität zusammengefasst.

5.3.1 PPSU

Für das Ultrafuse PPSU werden der Schweißbreitenfaktor, die Schweißnahtfestigkeit und der Schweißfaktor nach der Methode (vgl. Kapitel 5.2) ermittelt und der Einfluss der Verarbeitungstemperaturen bestimmt. Ein Teil der Untersuchungen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, ist in Zusammenarbeit mit FUHRMANN im Rahmen einer Studienarbeit durchgeführt worden (vgl. [Fuh19]).

5.3.1.1 Schweißbreitenfaktor

In Bild 5-4 sind die Schweißbreitenfaktoren in Abhängigkeit von der Düsen- und der Bauraumtemperatur dargestellt. Neben den mittleren Schweißbreitenfaktoren sind die jeweiligen Standardabweichungen angegeben.

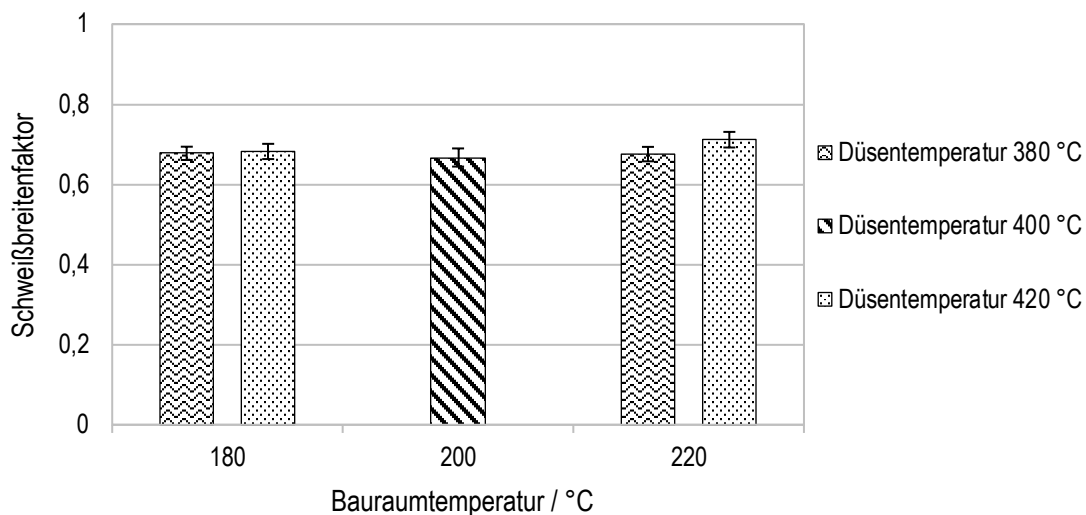


Bild 5-4: Schweißbreitenfaktor als Kenngröße der Schweißnahtqualität von Ultrafuse PPSU in Abhängigkeit von verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen (in Zusammenarbeit mit FUHRMANN, vgl. [Fuh19])

Die Schweißbreitenfaktoren liegen mit veränderten Düsen- und Bauraumtemperaturen unter Berücksichtigung der Standardabweichungen auf einem sehr ähnlichen Niveau. Sowohl eine Zunahme der Düsentemperatur als auch eine Erhöhung der Bauraumtemperatur führen zu keinem eindeutigen Effekt auf den Schweißbreitenfaktor des PPSU. Somit ist die Fläche der Schweißnaht im Verhältnis zur Strangbreite bei allen Versuchspunkten annähernd gleich. Zur Interpretation der Festigkeitswerte kann der Einfluss der Schweißnahtfläche daher vernachlässigt werden.

5.3.1.2 Schweißnahtfestigkeit

Für die verschiedenen Versuchspunkte kann ein Einfluss der Schichtzeit auf die Schweißnahtfestigkeit der Probekörpergeometrie ausgeschlossen werden, indem die Schichtzeit durch einen zusätzlichen Opferturm verlängert wird und die Schweißnahtfestigkeiten anschließend miteinander verglichen werden können. Besteht ein Einfluss der Schichtzeit, bedeutet das, dass zum Zeitpunkt der Strangablage die darunterliegende Schicht noch nicht auf die Temperatur des Bauraums abgekühlt ist. Dadurch steht mehr thermische Energie zur Verfügung, die Festigkeit der Schweißnaht wird beeinflusst, die Vergleichbarkeit zwischen den Versuchspunkten ist nicht gegeben und eine quantitative Auswertung der Schweißnahtfestigkeiten ist nicht möglich.

Mithilfe der Darstellung in Bild 5-5 werden die Schweißnahtfestigkeiten in Abhängigkeit der Düsen- und der Bauraumtemperatur ausgewertet. Neben den mittleren Schweißnahtfestigkeiten sind die jeweiligen Standardabweichungen angegeben.

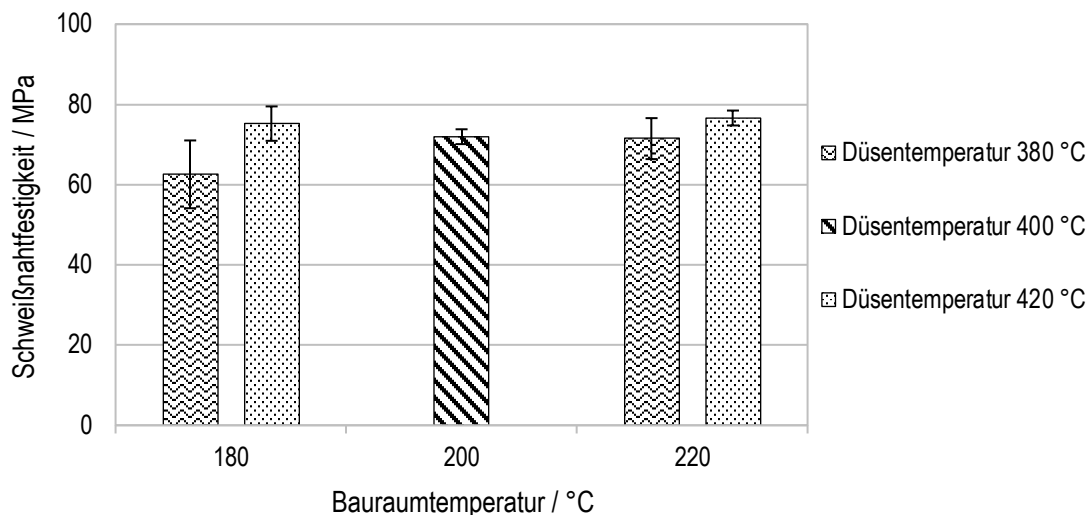


Bild 5-5: Schweißnahtfestigkeit als Kenngröße der Schweißnahtqualität von Ultrafuse PPSU in Abhängigkeit von verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen (in Zusammenarbeit mit FUHRMANN, vgl. [Fuh19])

Die Verarbeitung des PPSU ist mit den ausgewählten Verarbeitungsparametern unproblematisch. Es ist zu erkennen, dass sowohl mit einer Erhöhung der Düsentemperatur als auch mit zunehmender Bauraumtemperatur die Schweißnahtfestigkeit gesteigert wird. Die ermittelten Schweißnahtfestigkeiten der Temperaturkombination mit 380 °C Düsentemperatur und 180 °C Bauraumtemperatur zeigen deutlich größere Streuungen und die geringsten Festigkeitswerte. Ausgehend von diesem Versuchspunkt ist der Vergleich zwischen dem Einfluss der Düsen- und der Bauraumtemperatur, aufgrund der separaten und gleichmäßigen Erhöhung um jeweils 40 K, möglich. Verglichen mit der Bauraumtemperatur zeigt die Düsentemperatur einen signifikanteren Einfluss auf die mittlere Schweißnahtfestigkeit.

Im betrachteten Temperaturbereich beeinflussen hohe Düsen- und Bauraumtemperaturen die Prozessstabilität positiv. Es wird mehr Energie in die Schweißnaht eingebracht und die Diffusion wird zwischen den Schichten verbessert. Die auftretenden Standardabweichungen der einzelnen Schweißnahtfestigkeiten demonstrieren zudem eine generelle Eignung der Probekörpergeometrie zur Charakterisierung der Schweißverbindungen von amorphen Hochleistungsthermoplasten. Die Methode zur Charakterisierung der Schweißnahtqualität konnte erfolgreich für das Ultrafuse PPSU validiert werden. Unter Berücksichtigung der Schweißnahtfestigkeit und der Prozesssicherheit ist eine Düsentemperatur von 420 °C und eine Bauraumtemperatur von 220 °C zu empfehlen. Eine weitere Erhöhung der Düsentemperatur ist nicht möglich, da während der Extrusion bei Temperaturen über 425 °C Stippen aufgetreten sind.

5.3.1.3 Schweißfaktor

Mit den ermittelten Schweißnahtfestigkeiten und unter Verwendung der vorgestellten funktionalen Beziehung zur Berechnung des Schweißfaktors, werden die Schweißnahtfestigkeiten ins Verhältnis zur Grundmaterialfestigkeit gesetzt. Dadurch ist es möglich, eine Aussage zur Güte der Schweißnaht unter Berücksichtigung der verschiedenen Verarbeitungstemperaturen zu treffen. Da für das Ultrafuse PPSU keine Materialkennwerte des Ausgangsmaterials vorliegen (vgl. Kapitel 4.4.2.3), werden die Ergebnisse der Zugversuche am Filament für die Berechnung des Schweißfaktors verwendet. Bild 5-6 zeigt die bestimmten Schweißfaktoren in Abhängigkeit von der Düsen- und der Bauraumtemperatur.

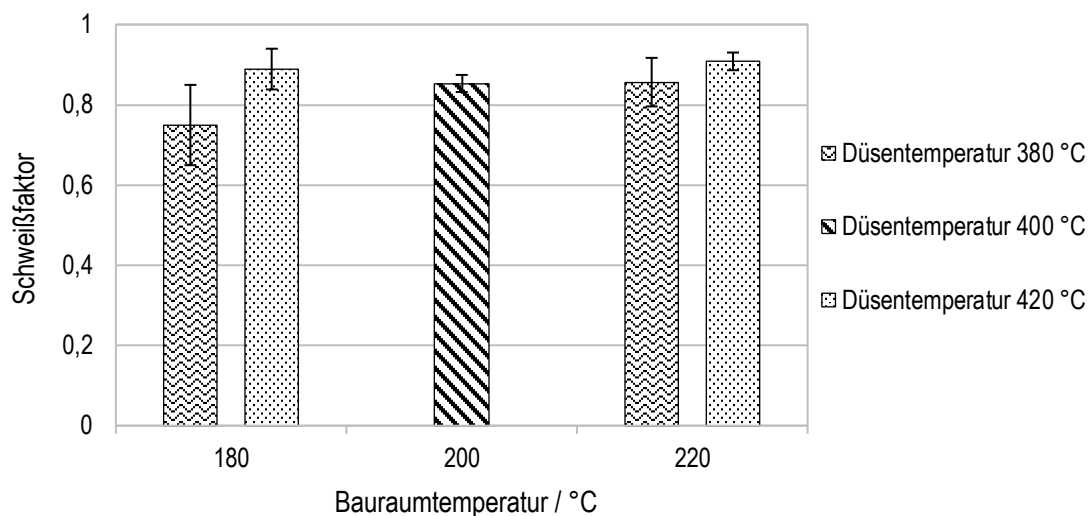


Bild 5-6: Schweißfaktor als Kenngröße der Schweißnahtqualität von Ultrafuse PPSU in Abhängigkeit von verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen (in Zusammenarbeit mit FUHRMANN, vgl. [Fuh19])

Mit allen Temperaturkombinationen werden Schweißfaktoren von mindestens 0,75 erreicht. Das Material zeigt insbesondere bei einer Düsentemperatur von 420 °C und einer Bauraumtemperatur von 220 °C eine sehr gute Schweißbarkeit im FDM. Der Schweißfaktor liegt bei 0,91 und es werden somit Schweißnahtfestigkeiten nahe der Grundmaterialfestigkeit erzielt.

5.3.2 PEEK

Kongruent zur Methode und der Vorgehensweise in Kapitel 5.2 werden für das VESTA-KEEP 3300G der Schweißbreitenfaktor, die Schweißnahtfestigkeit und der Schweißfaktor ermittelt. Durch den zu untersuchenden, großen Temperaturbereich des Bauraums mit Temperaturen zwischen 150 °C und 250 °C, werden die Auswirkungen der Bauraumtemperierung sowie der generelle Einfluss der Verarbeitungstemperaturen bestimmt. Ein Teil der Untersuchungen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, ist in Zusammenarbeit mit ELSNER im Rahmen einer Studienarbeit durchgeführt worden (vgl. [Els19]).

5.3.2.1 Schweißbreitenfaktor

Die Auswertung des Schweißbreitenfaktors ist in Bild 5-7 dargestellt, welches den Schweißbreitenfaktor in Abhängigkeit von der Düsen- und der Bauraumtemperatur zeigt. Neben den mittleren Schweißbreitenfaktoren sind die jeweiligen Standardabweichungen angegeben.

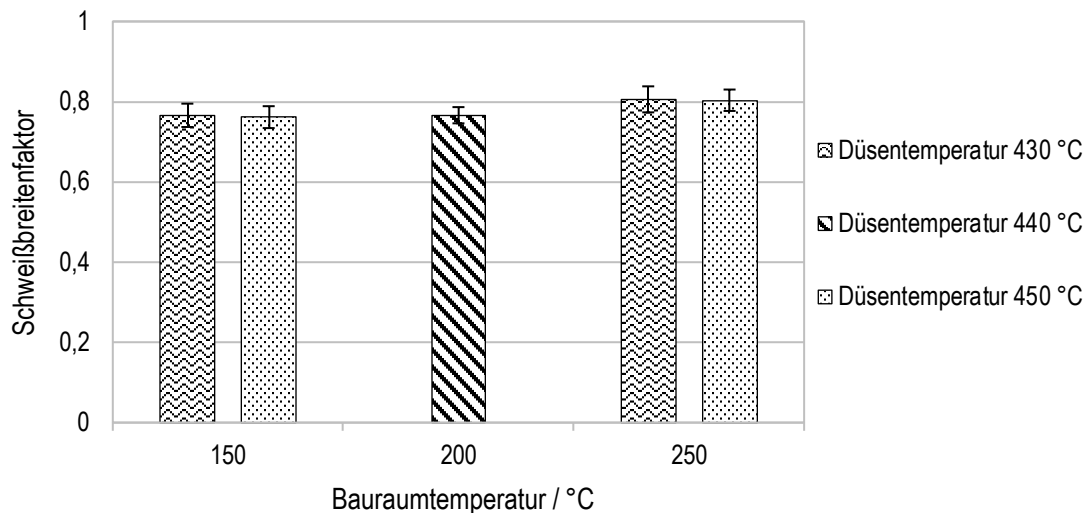


Bild 5-7: Schweißbreitenfaktor als Kenngröße der Schweißnahtqualität von VESTA-KEEP 3300G in Abhängigkeit von verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen (in Zusammenarbeit mit ELSNER, vgl. [Els19])

Die Schweißbreitenfaktoren liegen, unter Berücksichtigung der Standardabweichungen der untersuchten Versuchspunkte, auf einem vergleichbaren Niveau. Eine Veränderung der Düsentemperatur von 430 °C auf 450 °C hat keine Auswirkungen auf den Schweißbreitenfaktor. Mit steigender Bauraumtemperatur kann, bezogen auf die gemittelten Schweißbreitenfaktoren, eine geringfügige Zunahme des Verhältnisses der Schweißnahtbreite zur Strangbreite erkannt werden. Da der Effekt nicht eindeutig ist, eignet sich der Schweißbreitenfaktor zur Interpretation der Festigkeitswerte nicht. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wird deshalb der Schweißbreitenfaktor für das Material PEEK nicht mehr gesondert ausgewertet.

5.3.2.2 Schweißnahtfestigkeit

Für die verwendeten Verarbeitungsparameter kann ein Einfluss der Schichtzeit ausgeschlossen und die Eignung der Probekörpergeometrie zur Bewertung der Schweißnahtfestigkeiten gezeigt werden. An den gefertigten Bauteilen können vermehrt Auswirkungen von Schwindungsvorgängen beobachtet werden. Wie in Bild 5-8 zu sehen, äußert sich die Materialschrumpfung durch Wölbungen der einsträngigen Prüfflächen. Besonders markant ist diese Erscheinung bei einer Bauraumtemperatur von 200 °C, aber auch bei 250 °C sind Wölbungen zu erkennen.

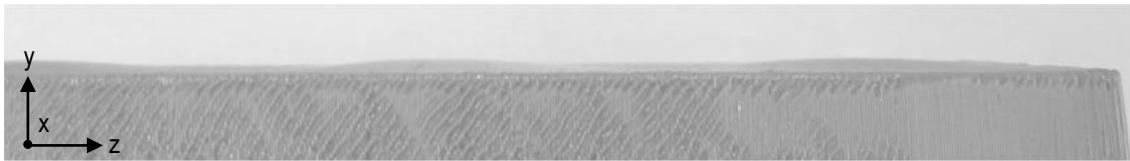


Bild 5-8: Schwindungsbedingte Wölbungen des einsträngigen Messbereichs bei einer Düsentemperatur von 430 °C und einer Bauraumtemperatur von 200 °C

Das Auftreten von Verzugserscheinungen, die durch materialspezifische Schwindungsvorgänge induziert werden, führt dazu, dass das Verzugsverhalten als Bestandteil der Materialqualifizierung in Kapitel 6 gesondert betrachtet wird. Denn Verzug resultiert aus Eigenspannungen im Bauteil und diese können die Schweißnähte schwächen. Zur Interpretation und zur Einordnung der Schweißnahtfestigkeiten sollen deshalb Kenntnisse des prozessspezifischen Verzugsverhaltens im FDM berücksichtigt werden.

Mithilfe der Darstellung in Bild 5-9 werden die Schweißnahtfestigkeiten in Abhängigkeit von der Düsen- und der Bauraumtemperatur ausgewertet. Neben den mittleren Schweißnahtfestigkeiten sind die jeweiligen Standardabweichungen angegeben.

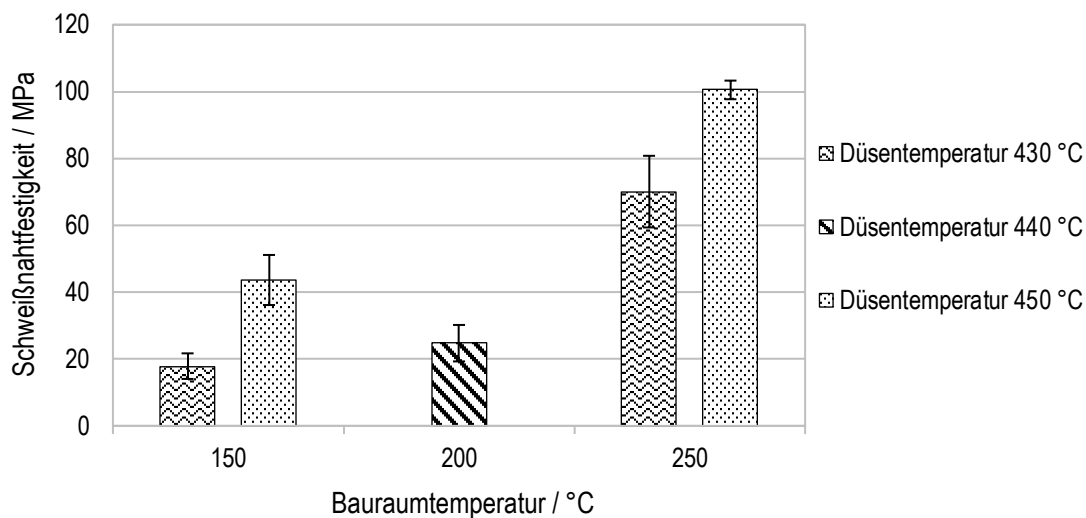


Bild 5-9: Schweißnahtfestigkeit als Kenngröße der Schweißnahtqualität von VESTAKEEP 3300G in Abhängigkeit von verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen (in Zusammenarbeit mit ELSNER, vgl. [Els19])

Aus den ermittelten Schweißnahtfestigkeiten lässt sich ableiten, dass bei den untersuchten Verarbeitungstemperaturen eine grundlegende Verarbeitbarkeit des VESTAKEEP 3300G im FDM gegeben ist. Es werden festigkeitssteigernde Einflüsse der Düsen- sowie der Bauraumtemperatur deutlich und es gibt signifikante Festigkeitsunterschiede. Der Vergleich zwischen den Versuchspunkten mit Düsentemperaturen von 430 °C und 450 °C zeigt, dass durch eine Erhöhung der Düsentemperatur um 20 K die Schweißnahtfestigkeit erheblich

gesteigert werden kann. Bauraumtemperaturen von 250 °C führen ebenfalls zu hohen Schweißnahtfestigkeiten. Es wird deutlich, dass ein derartiges Temperaturniveau der Bauumgebung bei der Verarbeitung von PEEK zu deutlichen Festigkeitsvorteilen führt. So kann in Kombination mit einer hohen Düsentemperatur mehr Energie in die Schweißnaht eingebracht werden und die Diffusion wird zwischen den Schichten verbessert. Zudem wirkt sich die maximale Temperaturkombination aus Düsen- und Bauraumtemperatur positiv auf die Prozessstabilität aus. Der Vergleich der makroskopischen Aufnahmen der Schweißnähte in Bild 5-10 bestätigt den positiven Einfluss der Bauraumtemperatur auf die Ausprägung der Schweißnaht.

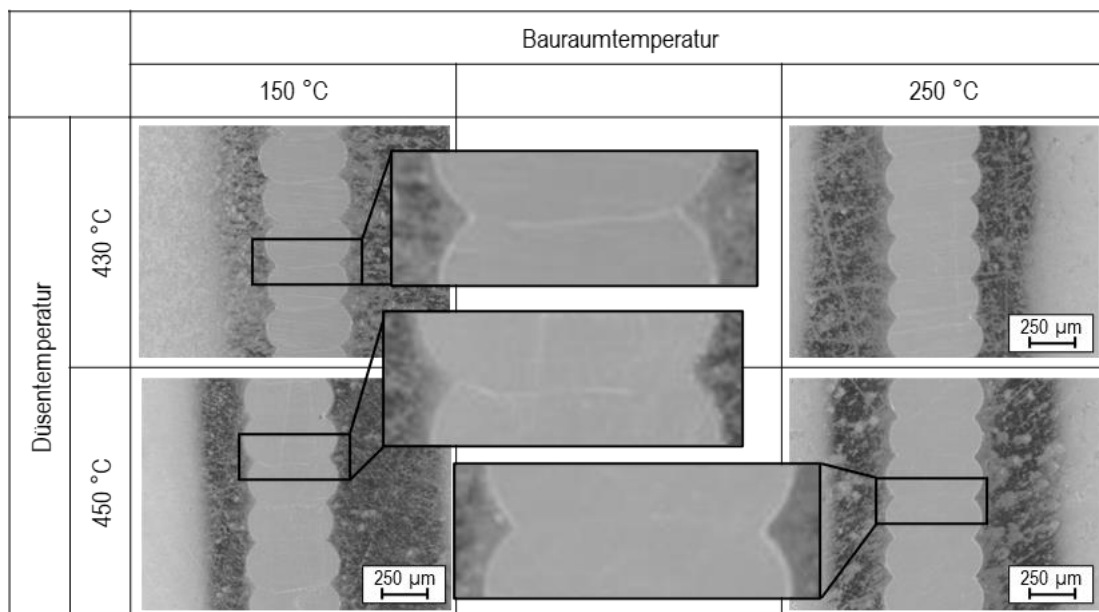


Bild 5-10: Makroskopische Aufnahmen zur Auswertung der Schweißnahtausbildung in Abhängigkeit von verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen (in Zusammenarbeit mit ELSNER, vgl. [Els19])

Die Auswertung der Schliffbilder zeigt, dass bei einer Bauraumtemperatur von 150 °C Phasengrenzen zwischen den Strängen vorhanden sind. Diese Grenzlinie ist ein Indiz dafür, dass die Wärmezufuhr bei der Verarbeitung zu gering ist und sich die Stränge nicht vollständig miteinander verbinden. Dies führt zu schwächeren Schweißnahtfestigkeiten. Die Schweißnähte bei einer Bauraumtemperatur von 250 °C weisen keine Phasengrenzen auf und bestätigen die Bedeutung eines beheizten Bauraums für die resultierende Schweißnahtqualität im FDM-Prozess.

Durch die Untersuchungen kann gezeigt werden, dass die Verarbeitungstemperaturen für die Verarbeitung von PEEK im FDM eine wichtige Rolle einnehmen, um belastbare Schweißnahtfestigkeit zu generieren. Es ist eine klare Tendenz zu erkennen, dass hohe Bauraum- und Düsentemperaturen die Festigkeit der Schweißnähte verbessern, indem mehr Energie eingebracht wird. Allerdings müssen in den folgenden Untersuchungen

weitere Einflussfaktoren betrachtet werden. Insbesondere der Grad der Kristallinität, der unter anderem durch den thermischen Einfluss des beheizten Bauraums ausgeprägt wird, muss während der Verarbeitung eines teilkristallinen Materials berücksichtigt werden. Denn der Kristallisationsgrad kann sich auf die resultierenden Schweißnahtfestigkeiten auswirken. Dieser Aspekt wird daher detailliert im Zusammenhang mit einer Wärmebehandlung von PEEK Bauteilen untersucht und vorgestellt (vgl. Kapitel 5.5).

Die Methode zur Charakterisierung der Schweißnahtqualität ist erfolgreich für das VESTAKEEP 3300G validiert und somit zur Charakterisierung der Schweißverbindungen von teilkristallinen Hochleistungsthermoplasten geeignet.

5.3.2.3 Schweißfaktor

Mit den ermittelten Schweißnahtfestigkeiten werden die Schweißfaktoren berechnet (vgl. Kapitel 5.2.2, Formel 4). Als Grundmaterialfestigkeit des VESTAKEEP 3300G wird die Zugfestigkeit in Höhe von 98 MPa aus dem Materialdatenblatt verwendet. Bild 5-11 veranschaulicht die bestimmten Schweißfaktoren in Abhängigkeit von der Düsen- und der Bauraumtemperatur.

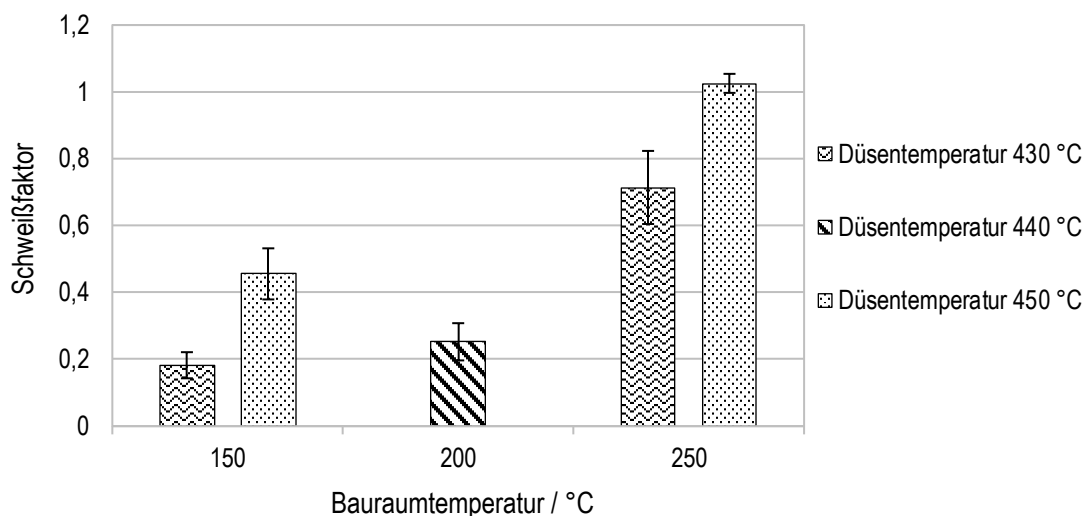


Bild 5-11: Schweißfaktor als Kenngröße der Schweißnahtqualität von VESTAKEEP 3300G in Abhängigkeit von verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen (in Zusammenarbeit mit ELSNER, vgl. [Els19])

Die Auswertung der Schweißfaktoren zeigt, dass Schweißnahtfestigkeiten erzielt werden, die größer als die Grundmaterialfestigkeit sind. Bei einer Düsentemperatur von 450 °C und einer Bauraumtemperatur von 250 °C liegt der Schweißfaktor bei 1,02. Das Material ist in Bezug auf die Schweißnahtqualität im FDM sehr gut verarbeitbar. Die Festigkeitswerte über der Grundmaterialfestigkeit lassen sich durch den thermischen Einfluss während des FDM-Prozesses erklären. Das Material ist im beheizten Bauraum deutlich länger hohen Temperaturen ausgesetzt und es bilden sich dadurch im Vergleich mit dem extrudierten

Filament andere kristalline Strukturen in den FDM-Bauteilen aus. Der Kristallisationsgrad des Filaments ist niedriger als die Kristallinität der Bauteile, die bei 250 °C Bauraumtemperatur verarbeitet werden (vgl. Bild A2-1 im Anhang). Dies wirkt sich festigkeitssteigernd aus.

5.4 Analyse und Simulation des Aufschmelzprozesses

In dem vorangegangenen Kapitel konnte gezeigt werden, dass die Düsentemperatur einen signifikanten Einfluss auf die Schweißnahtqualität bzw. die Schweißnahtfestigkeit hat. Darauf aufbauend rückt der Aufschmelzprozess in der Plastifiziereinheit des Filamentextruders in den Fokus, um das eingeschränkte Prozessverständnis zur Verarbeitung von Hochleistungskunststoffen im FDM weiter zu verbessern und eine Abschätzung über die vorliegenden Temperaturen während des Materialaustrags zu ermöglichen. Das Ziel ist es, den Aufschmelzprozess im FDM möglichst genau abzubilden und den Schwerpunkt der sich anschließenden Auswertung auf die Temperatur des Materials bei Düsenaustritt zu legen.

Für die angestrebte Weiterentwicklung des Prozessverständnisses ist es somit von entscheidender Bedeutung, den Aufschmelzprozess des Filaments in der Plastifiziereinheit zu berücksichtigen. Sowohl die analytische Beschreibung als auch experimentelle Untersuchungen des Aufschmelzprozesses innerhalb der Düse sind komplex und aufwendig umzusetzen. Daher etablieren sich computergestützte numerische Werkzeuge, wie die Prozesssimulation, zunehmend als Hilfsmittel in der Verfahrensanalyse. Dieser simulative Ansatz wird in der nachfolgenden Ausarbeitung umgesetzt und es wird ein Simulationsmodell zur Analyse des Aufschmelzverhaltens innerhalb der Düse erarbeitet. Die Simulation liefert den Vorteil, dass Aussagen über das Temperaturprofil des extrudierten Strangs möglich sind. Dadurch ergibt sich ein Maß für die Vergleichbarkeit mit anderen FDM-Maschinen, da sich das Design und die Leistungen der Plastifiziereinheiten maschinenspezifisch erheblich unterscheiden können und dies berücksichtigt werden muss. Um einen quantitativen Vergleich zwischen verschiedenen experimentellen Auswertungen auf unterschiedlichen FDM-Maschinen umzusetzen, wäre es daher notwendig, dass die Strangtemperatur bei Düsenaustritt genauer bestimmt und losgelöst von der eingestellten Düsentemperatur an der Anlage ausgewertet wird. Das in diesem Kapitel beschriebene Vorgehen zum Aufbau des Simulationsmodells könnte hierzu adaptiert werden. Das Simulationsmodell wurde in Zusammenarbeit mit KNAUP im Rahmen einer Masterarbeit entwickelt.

5.4.1 Analyse der Einflussfaktoren

Die Simulation des Aufschmelzverhaltens in der FDM-Düse erfordert die Berücksichtigung von bestimmten Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren. In diesem Kapitel werden die Einflussfaktoren Maschine und Material vorgestellt, analysiert und durch mathematische Zusammenhänge beschrieben. Die generierten mathematischen Beschreibungen eröffnen

die Möglichkeit, dass die spezifischen Eigenschaften von Maschine und Material in das digitale Modell eingebunden werden können.

5.4.1.1 Maschine

Ein entscheidender Einflussfaktor ist die verwendete Maschine und insbesondere der Filamentextruder. Der Fokus liegt hierbei auf der Plastifiziereinheit samt der Düse, da diese das Aufschmelzverhalten beeinflussen. Hierzu wird der Temperaturverlauf in der Düse experimentell bestimmt, um nach der Analyse des Düsentemperaturprofils den Verlauf mathematisch auszudrücken und eine Integration in ein Simulationsmodell vorzubereiten.

Die experimentellen Untersuchungen erfolgen mit dem Gewo HTP 260 (vgl. Kapitel 4.3.1). Grundlage für die Untersuchungen und die anschließende Simulation ist ein CAD Modell der Düse, das basierend auf CT Aufnahmen und optischen sowie manuellen Vermessungen rekonstruiert worden ist. Die Düse ist in einem Heizblock aus Messing befestigt, in dem eine Heizpatrone mit einer Leistung von 100 Watt verbaut ist. Die Temperaturregelung wird durch einen integrierten Sensor in der Heizpatrone realisiert, der die Temperatur im Heizblock misst. In Bild 5-12 a) ist der beschriebene Aufbau schematisch dargestellt und Bild 5-12 b) zeigt die Messzonen der experimentellen Untersuchungen zur Erstellung des Düsentemperaturprofils.

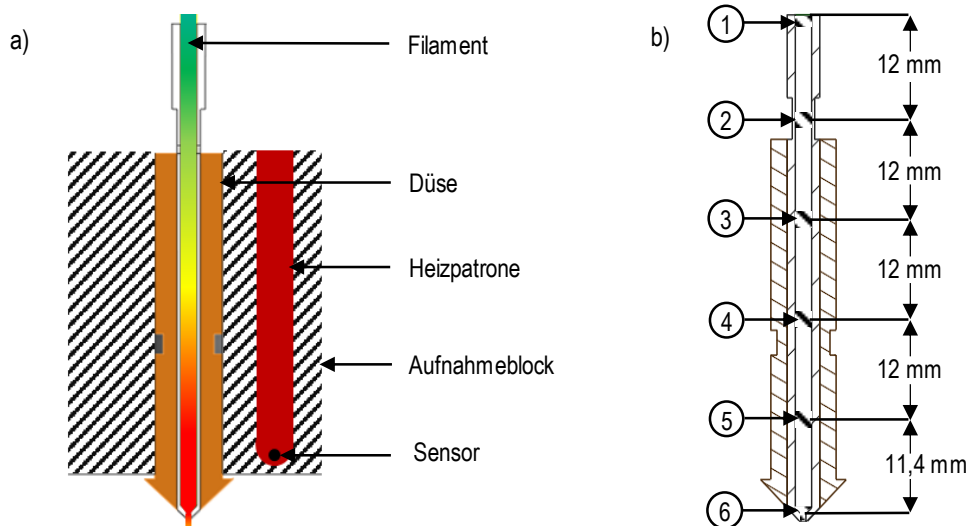


Bild 5-12: a) Schematische Darstellung der Düse im Heizblock und b) Schematische Anordnung der Positionen an der Innenseite der Düse zur Ermittlung des Temperaturprofils (in Zusammenarbeit mit KNAUP, vgl. [Kna21])

Bedingt durch die Position des Sensors im Heizblock, entsprechen die sensorisch erfassten Temperaturen nicht den Temperaturen an der Innenseite der Düse, die mit dem Filament in Kontakt steht. Zur Analyse des tatsächlichen Temperaturverlaufs an der inneren Düsenwand werden Kontaktmessungen an sechs Positionen mit einem Thermoelement (Typ J)

durchgeführt. Während der Messung befindet sich kein Filament in der Düse. Die verwendeten Messbereiche innerhalb der Düse bei einem Innendurchmesser von 2 mm sind in Bild 5-12 b) schraffiert dargestellt. Je Position werden Messungen in 50 °C Schritten im Temperaturintervall zwischen 150 °C - 450 °C durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die innere Düsenwand an keiner Position die vorgegebene Zieltemperatur erreicht (vgl. Anhang, Tabelle A2-1). Insbesondere die Düsenbereiche, die nicht vom Heizblock umschlossen werden, zeigen deutliche Abweichungen von der Zieltemperatur.

Für die Übertragung des Temperaturverlaufs in einen mathematischen Zusammenhang wird im ersten Schritt das Verhältnis zwischen Ist-Temperatur (T_{Ist}) und Soll-Temperatur (T_{Soll}) in Abhängigkeit von der Messposition entlang der z-Achse ermittelt. Dann wird ein positionsabhängiger Temperaturkorrekturfaktor $F_K(z)$ gebildet, indem das arithmetische Mittel im untersuchten Temperaturbereich bestimmt und jeder Position gemäß Bild 5-12 b) ein Längenmaß ausgehend vom Düseneingang zugewiesen wird. Durch lineare Interpolation zwischen den einzelnen Korrekturfaktoren und dem Positionsmaß wird eine Funktion ermittelt, die den Temperaturkorrekturfaktor in Abhängigkeit vom Düsenabschnitt berechnet. Sowohl die Funktion als auch der durch die Funktion erzeugte Verlauf des Temperaturkorrekturfaktors ist in Bild 5-13 abgebildet.

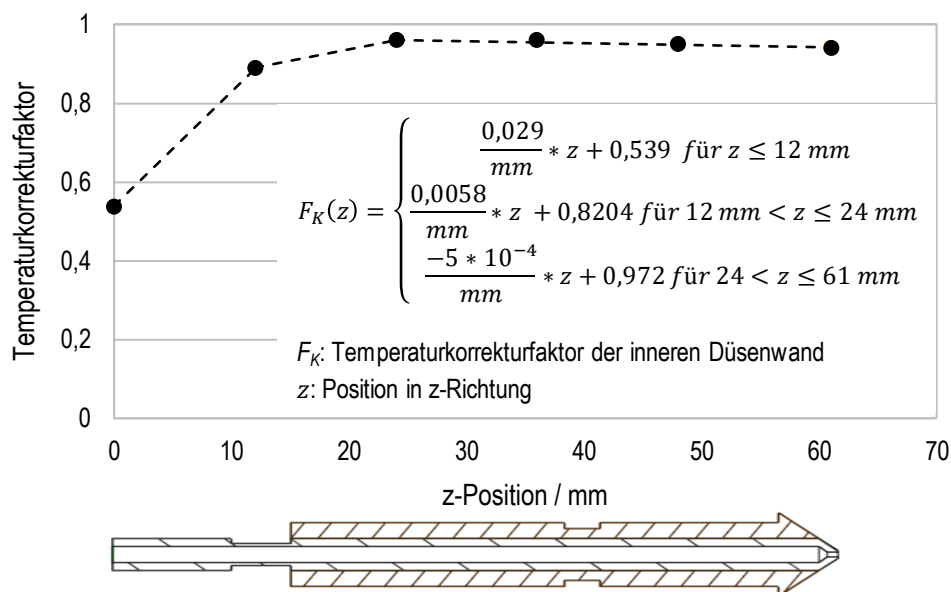


Bild 5-13: Mathematische Funktion zur Beschreibung des Temperaturkorrekturfaktors in Abhängigkeit von der Position in der Düse sowie die grafische Darstellung des Verlaufs (in Zusammenarbeit mit KNAUP, vgl. [Kna21])

Für die Berechnung der Temperatur an der Innenwand der Düse in Abhängigkeit von der Position in z-Richtung wird die Soll-Temperatur mit dem Korrekturfaktor multipliziert. Durch die Funktion ist es möglich, das maschinenspezifische Düsenwandtemperaturprofil in einem Simulationsmodell zu berücksichtigen.

5.4.1.2 Material

Neben der Maschine ist es auch wichtig, das Materialverhalten während des Aufschmelzprozesses im FDM zu berücksichtigen. Die Untersuchungen werden mit dem Ultrafuse PPSU und dem VESTAKEEP 2000G durchgeführt. Für die Simulation werden temperaturabhängige Materialparameter benötigt, die experimentell ermittelt worden sind oder Literaturwerten entsprechen.

Die spezifische Wärmekapazität c_p oder auch Wärmespeicherkapazität wird mithilfe von DSC-Messungen bestimmt. Auf Basis der Messdaten wird dann ein funktionaler Zusammenhang zwischen der spezifischen Wärmekapazität und der auftretenden Temperatur generiert, mit dem Ziel, den Verlauf der Daten zu approximieren. Durch die mathematische Beschreibung kann der Materialkennwert in das Simulationsmodell eingebunden werden. In Bild 5-14 sind die in der DSC-Messung ermittelten Wärmekapazitäten und die berechneten Wärmekapazitäten über der Temperatur dargestellt.

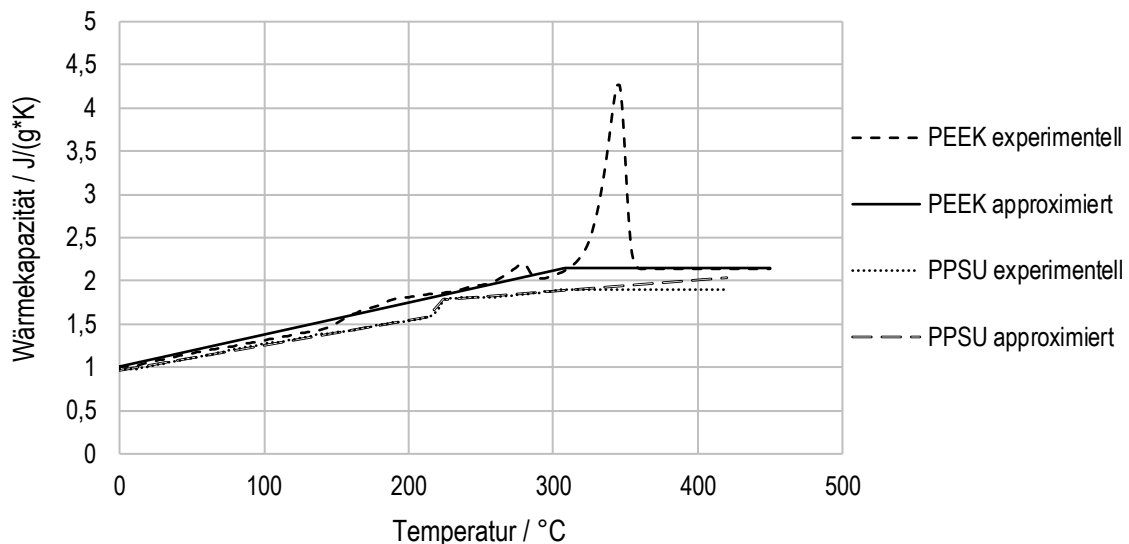


Bild 5-14: Vergleich zwischen den experimentell bestimmten und den approximierten Wärmekapazitäten für PPSU und PEEK (in Zusammenarbeit mit KNAUP, vgl. [Kna21])

Die spezifischen Wärmekapazitäten zeigen die jeweils typischen Verläufe für einen amorphen sowie einen teilkristallinen Thermoplast. Um die Verläufe mathematisch beschreiben zu können, werden die Kurven in einzelne Abschnitte unterteilt. Mit dem Ziel, für jeden Abschnitt eine Funktion des Verlaufs zu erarbeiten. Die funktionale Beschreibung der Bereiche erfolgt durch lineare Regressionen. Für das amorphe PPSU werden drei Teilbereiche berücksichtigt. Die Funktionen, auf denen die approximierten Wärmekapazitäten basieren, sind dem Anhang (vgl. Tabelle A2-2) zu entnehmen. Die mathematische Beschreibung für das PEEK erfolgt durch zwei lineare Funktionen, um den Verlauf ober- und unterhalb des Schmelzbereichs zu beschreiben. Die vorliegende Schmelzenthalpie des Peaks im

Schmelzbereich von 57,09 J/g wird als separater Parameter in das Modell eingepflegt. Die durchschnittliche absolute Abweichung zwischen den gemessenen und den approximierten Wärmekapazitäten beträgt für das PPSU 0,01 J/(g*K) und für das PEEK 0,04 J/(g*K). In der Ermittlung ist der Schmelzbereich für das PEEK (326 °C - 362 °C) nicht berücksichtigt.

In Tabelle 5-2 sind zusammenfassend die verwendeten Materialkennwerte des Modells angegeben. Eigenschaften, die aufgrund der anspruchsvollen Untersuchungen im Hochtemperaturbereich nicht direkt ermittelt werden konnten, sind aus der Literatur abgeleitet.

Tabelle 5-2: Materialkennwerte für das Simulationsmodell

Material	ρ / g/cm ³	λ / W/(m*K)	c_p / J/(g*K)	T_g / °C	T_m / °C	η / Pa*s
PEEK	1,3	0,25	Tabelle A2-2	151,4	345,14	600
PPSU	1,272	0,35	Tabelle A2-2	221	-	1080

Die Viskosität η für das PEEK wird auf Basis von Literaturwerten auf 600 Pa*s abgeschätzt [ZML+20, S. 15f.], [AWS03, S. 219]. Die Wärmeleitfähigkeit λ liegt bei ungefähr 0,25 W/(m*K) [Evo18]. Für PPSU liegt die Viskosität bei Temperaturen von 345 °C für Scherraten zwischen 0 – 100 1/s bei ca. 1080 Pa*s [SHF14, S. 711ff.]. Die Wärmeleitfähigkeit ist auf 0,35 W/(m*K) festgelegt [AZO04-ol].

5.4.2 Simulation und Analyse der Ergebnisse

Das vorherige Kapitel liefert die Basis für die weitere Analyse, da nun Grundlagen und mathematische Funktionen vorliegen, die eine Integration der betrachteten Einflussfaktoren in ein Simulationsmodell ermöglichen. In diesem Kapitel wird der Aufbau des digitalen Modells und die durchgeführten Simulationen beschrieben. Dazu werden Annahmen sowie Randbedingungen erläutert und anschließend die Ergebnisse der Simulation präsentiert und diskutiert.

5.4.2.1 Aufbau des Simulationsmodells

Für den Aufbau und die Simulation wird die Software ANSYS Fluent (2021 R1) verwendet. Das CAD Modell der Düse dient als Grundlage und wird in die Software importiert sowie anschließend für die Simulation reduziert. Denn es ist nur der fluide Bereich im Innern der Düse von Bedeutung. Die äußere Mantelfläche wird als Wand und die kreisförmigen Flächen an den Seiten als Düseneinlass und Düsenauslass definiert (vgl. Bild 5-15 a)). Anschließend erfolgt die Vernetzung des Modells. Dieser Vorgang ist exemplarisch in Bild 5-15 b) am Ausschnitt der Düsen Spitze gezeigt.

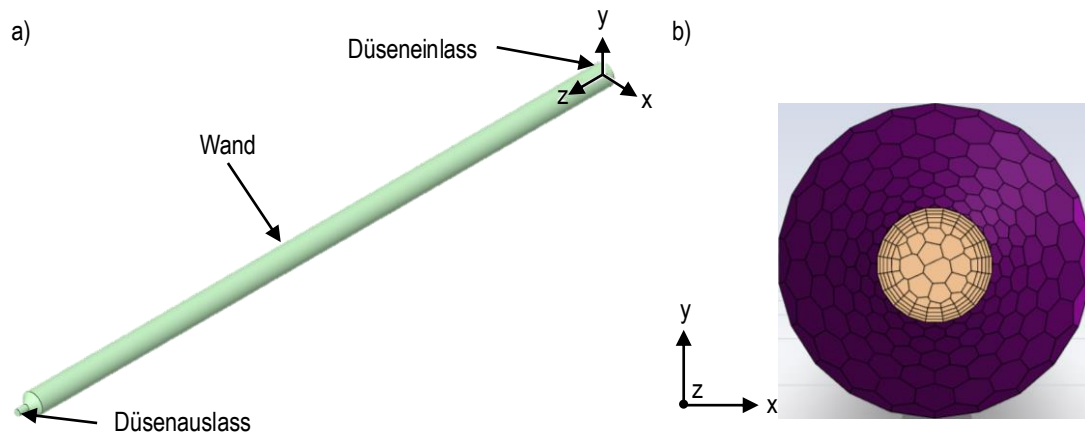


Bild 5-15: a) CAD Modell des fluiden Volumens, b) Darstellung der Netzoberfläche nach der Vernetzung (in Zusammenarbeit mit KNAUP, vgl. [Kna21])

Durch die Vernetzung wird das Modell in Elemente mit unterschiedlichen Größen unterteilt. Die Netzgenerierung erfolgt adaptiv und wird am Übergang zwischen Wand und Fluid durch vier Randschichten verstärkt verfeinert, um die Güte der numerischen Berechnungen zu verbessern.

Für die Simulation wird die Berücksichtigung einiger physikalischer Bedingungen festgelegt. Es werden Energiegleichungen, Phasenübergänge und die Gravitation berücksichtigt. Außerdem wird angenommen, dass am Düsen auslass kein Gegendruck vorliegt und eine laminare Strömung in der Schmelze auftritt. Abschließend werden die erarbeiteten Maschinenparameter (vgl. Kapitel 4.3.2) und die Materialdaten (vgl. Kapitel 4.1) in das Modell integriert.

5.4.2.2 Temperaturverläufe

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der Materialien Ultrafuse PPSU und VESTAKEEP 2000G präsentiert. Die Zielgröße der Simulationsauswertung ist der Temperaturverlauf des Materials in der Düse und insbesondere die Temperaturen bei Düsenaustritt.

5.4.2.3 PPSU

Zur simulativen Analyse des Materialverhaltens in der Plastifiziereinheit wird in 10 °C Schritten der Temperaturbereich von 380 °C – 420 °C ausgewertet. Der Aufschmelzvorgang des Materials kann aus den Temperaturen in der Symmetrieachse des fluiden Volumens abgeleitet werden (vgl. Anhang, Bild A2-2). Die numerisch ermittelten Werte für die Materialtemperatur an der Düsen spitze werden in Tabelle 5-3 zusammengefasst und stellen die Temperatur des Materialstrangs beim Düsenaustritt dar.

Tabelle 5-3: Materialtemperaturen beim Austritt aus der Düse für das Ultrafuse PPSU

$T_{\text{Soll}} / ^\circ\text{C}$	420	410	400	390	380
$T_{\text{max}} / ^\circ\text{C}$	396,76	387,34	377,92	368,5	359,08
$T_{\text{min}} / ^\circ\text{C}$	395,74	386,32	376,9	367,48	358,06
$T_{\text{Ø}} / ^\circ\text{C}$	396,31	386,89	377,47	368,04	358,62

Die Temperaturen des Materials werden durch ein Oberflächenintegral am Düsenaustritt bestimmt. Die ermittelte, durchschnittliche Austrittstemperatur beträgt für alle Temperaturniveaus ca. 94,26 % der vorgegebenen Soll-Temperatur (T_{Soll}). Die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen Materialtemperatur am Düsenaustritt liegt bei durchschnittlich 1,02 °C. In diesem Zusammenhang kann gezeigt werden, dass die Differenz unabhängig von der Soll-Temperatur ist. In Bild 5-16 ist die simulierte Temperatur des Materials beim Düsenaustritt farblich veranschaulicht.

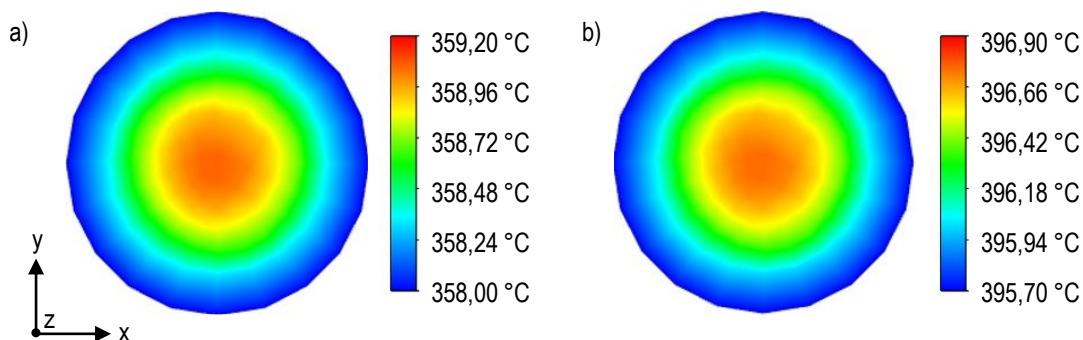


Bild 5-16: Temperaturprofil des Strangs am Düsenaustritt in Abhängigkeit von verschiedenen Düsentemperaturen (in Zusammenarbeit mit KNAUP, vgl. [Kna21]):
a) $T_{\text{Soll}} = 380\text{ }^\circ\text{C}$, b) $T_{\text{Soll}} = 420\text{ }^\circ\text{C}$ – Ultrafuse PPSU

Aus den Temperaturprofilen geht hervor, dass beim Düsenaustritt der Materialstrang zum Rand hin die niedrigsten Temperaturen aufweist und eine leichte Abkühlung auftritt. Dies ist auf die geringeren Temperaturen der Düsen Spitze zurückzuführen, da der Bereich nicht mehr vom Heizblock umschlossen ist und eine konvektive Abkühlung durch die Temperatur im Bauraum auftritt. Die Temperaturdifferenz ist jedoch mit knapp 1 °C gering und der Strang besitzt somit ein gleichmäßiges Temperaturniveau.

5.4.2.4 PEEK

In der Simulation werden Temperaturen zwischen 420 °C und 450 °C in 10 °C Abständen analysiert. Der Aufschmelzvorgang des Materials kann anhand der Temperaturen in der radialen Mitte ausgewertet werden (vgl. Anhang, Bild A2-3). Die maximale Temperatur entlang der radialen Mitte wird am Düsenaustritt erreicht. Durch ein Oberflächenintegral werden die Maximal-, Minimal- und Durchschnittstemperatur am Düsenausgang bestimmt (vgl. Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: Materialtemperaturen beim Austritt aus der Düse - VESTAKEEP 2000G

$T_{\text{Soll}} / ^\circ\text{C}$	450	440	430	420
$T_{\text{max}} / ^\circ\text{C}$	422,54	413,09	403,61	394,1
$T_{\text{min}} / ^\circ\text{C}$	413,58	403,91	394,07	383,95
$T_{\text{Ø}} / ^\circ\text{C}$	418,39	408,83	399,18	389,37

Die durchschnittliche Austrittstemperatur beträgt ca. 92,8 % der Soll-Temperatur. Die Auswertung der Differenz zwischen maximaler und minimaler Temperatur des Materials bei Düsenaustritt ergibt, dass die Differenz mit steigender Temperatur leicht sinkt von 10,15 °C für $T_{\text{Soll}} = 420$ °C auf 8,96 °C für $T_{\text{Soll}} = 450$ °C. Die Temperaturprofile sind in Bild 5-17 aufbereitet.

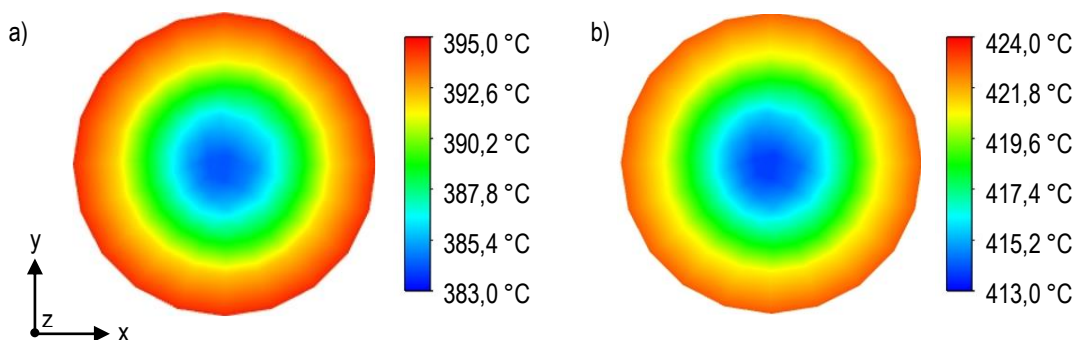


Bild 5-17: Temperaturprofil des Strangs am Düsenaustritt in Abhängigkeit von verschiedenen Düsentemperaturen (in Zusammenarbeit mit KNAUP, vgl. [Kna21]):
a) $T_{\text{Soll}} = 420$ °C, b) $T_{\text{Soll}} = 450$ °C – VESTAKEEP 2000G

Es ist zu erkennen, dass ein Temperaturgefälle vom Rand zum Kern des Strangs vorliegt. Die Temperatur ist in der Mitte geringer als an den Rändern. Daraus lässt sich schließen, dass trotz der leicht abfallenden Wandtemperatur an der Düsen Spitze keine Abkühlung bis unterhalb der Kerntemperatur stattfindet. Im Vergleich zum Ultrafuse PPSU ist dieses Materialverhalten vermutlich auf die geringere Wärmeleitfähigkeit und die höhere Wärmespeicherkapazität zurückzuführen. Die Temperaturverteilung im Strang ist zur Energieeinbringung für die charakteristischen Schichtverschweißungen im FDM geeignet.

5.4.3 Experimentelle Validierung des Simulationsmodells

Abschließend werden die simulierten Ergebnisse durch experimentelle Untersuchungen validiert. Hierzu wird die Temperatur des Materials unmittelbar nach Düsenaustritt mit einer Wärmebildkamera gemessen. Im Anschluss daran werden die thermografisch bestimmten Temperaturen mit den simulierten Austrittstemperaturen verglichen.

Die Untersuchung der Materialtemperatur beim Düsenaustritt wird berührungslos mit einer Infrarot-Wärmebildkamera (Infratec VarioCAM HD) durchgeführt. Der Emissionskoeffizient

wird an den zu messenden Werkstoff angepasst. Die Temperaturmessung erfolgt an der Strangoberfläche knapp unterhalb der Düsenspitze. Für die Validierung des Modells gilt es die gemessenen mit den simulierten Außentemperaturen des Strangs zu vergleichen (vgl. Bild 5-18).

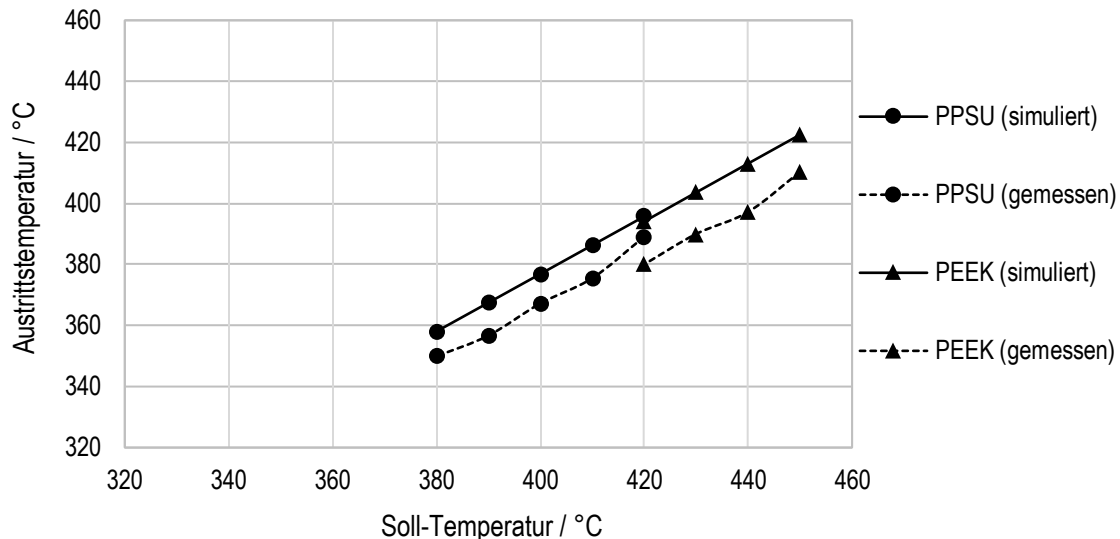


Bild 5-18: Vergleich der gemessenen mit den simulierten Austrittstemperaturen zur Modellvalidierung (in Zusammenarbeit mit KNAUP, vgl. [Kna21])

Aus dem Temperaturvergleich geht hervor, dass die gemessenen Temperaturen unterhalb der simulierten Ergebnisse liegen. Die beste Übereinstimmung liegt für das Ultrafuse PPSU vor. Hier beträgt die durchschnittliche Differenz zwischen simulierten und gemessenen Werten 9,21 °C. Für das VESTAKEEP 2000G ergibt sich über die verschiedenen Temperaturniveaus der Soll-Temperatur eine durchschnittliche Differenz von 13,92 °C. Prozentual liegen die Abweichungen für beide Materialien zwischen 1,67 % und 3,84 %. Insgesamt liegt die Abweichung der simulierten von der gemessenen Temperatur unter zehn Prozent und ist damit vergleichbar mit anderen Untersuchungen in der Literatur [Kno20, S.157]. Eine Aufstellung der verwendeten Messdaten ist dem Anhang (vgl. Tabelle A2-3, Tabelle A2-4) zu entnehmen. Das Modell ermöglicht auf Basis von Materialdaten eine Abschätzung der Strangtemperaturen beim Düsenaustritt.

In den Untersuchungen kann gezeigt werden, dass die Materialtemperatur beim Verlassen der Plastifiziereinheit nicht der eingestellten Soll-Temperatur entspricht und niedriger ist. Durch die modellbasierte Bestimmung der Strangtemperatur wird ein Ansatz geschaffen, um die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Anlagen und experimentellen Untersuchungen zu verbessern. Unabhängig von den eingestellten Temperaturen an der FDM-Maschine könnte die tatsächliche Strangtemperatur bei Düsenaustritt als Vergleichsmaß verwendet werden. Das beschriebene Vorgehen zum Aufbau des Simulationsmodells kann hierzu adaptiert werden und als Orientierungshilfe dienen. Das Modell ist erfolgreich

validiert und liefert die Möglichkeit, Aussagen über das Temperaturprofil des ausgetragenen Strangs zu machen.

5.5 Untersuchung der Schweißnahtfestigkeit nach Temperprozess

Das Tempern beschreibt ein Wärmebehandlungsverfahren, welches durch einen definiert gesteuerten Temperaturverlauf Material- und Bauteileigenschaften verändern kann und dem Fertigungsprozess nachgeschaltet ist. Das Material wird über einen längeren Zeitraum erwärmt, auf einer Zieltemperatur gehalten und langsam abgekühlt. Dadurch können mechanische Spannungen homogenisiert und die Kristallinität verändert werden.

Zahlreiche Anlagen- und Materialhersteller empfehlen einen nachgelagerten Temperprozess bei der Verarbeitung von PEEK mit dem FDM-Verfahren [3Dn19-ol], [Naj19-ol]. Dies resultiert daraus, dass viele FDM-Maschinen nicht in der Lage sind, den Bauraum auf Temperaturen über 150 °C zu beheizen und die Anlagen- sowie Materialhersteller somit nur mit einer generellen Verarbeitbarkeit des Materials werben. Ob das Potenzial des Materials ausgeschöpft wird und gegenüber dem Ausgangsmaterial vergleichbare mechanische Eigenschaften erzielt werden, wird mit dem Verweis auf ein nachträgliches Tempern der Bauteile nicht berücksichtigt. Dies soll durch die Untersuchungen in dieser Arbeit erfolgen. Das Ziel ist es, den Einfluss des Temperns, unter der Berücksichtigung des Fertigungsprozesses und verschiedenen Verarbeitungsparametern, anhand der Schweißnahtfestigkeit auszuwerten.

5.5.1 Aufbau der experimentellen Untersuchungen

Die Untersuchungen werden mit dem VESTAKEEP 3300G durchgeführt. Die Auswahl der Verarbeitungsparameter basiert auf den Erkenntnissen der Analyse der Schweißnahtqualität in Kapitel 5.3.2. In Tabelle 5-5 sind die verwendeten Prozesstemperaturen dargestellt.

Tabelle 5-5: Auswahl der Prozessparameter: Düsen- und Bauraumtemperatur

Prozessparameter	Einheit	VESTAKEEP 3300G
Düsentemperatur	°C	450
Bauraumtemperatur	°C	50, 100, 150, 200, 250

Es konnte gezeigt werden, dass die Düsentemperatur einen signifikanten Einfluss auf die Schweißnahtfestigkeit hat. Daher wird sich in dieser Messreihe auf eine Düsentemperatur von 450 °C beschränkt. Die Temperatur des Bauraums wird in 50 K Schritten von 50 °C auf 250 °C erhöht. Dadurch werden mit Bauraumtemperaturen von 50 °C und 100 °C im Vergleich zu den bisherigen Untersuchungen zwei Versuchspunkte mit niedrigen Bauraumtemperaturen zur Verarbeitung von PEEK berücksichtigt. Zur Verbesserung der Haftung des Probekörpers auf der Bauplattform und zur Sicherstellung der Prozessstabilität muss

bis 150 °C Bauraumtemperatur eine Adhäsionsschicht durch einen Hochtemperaturklebstift [Mag22-ol] aufgetragen werden.

Die Einflussanalyse des Temperprozesses erfolgt durch den Vergleich der Schweißnahtfestigkeiten von getemperten mit nicht getemperten Probekörpern. Die verwendeten Temperschnitte sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst. Die Ausgangstemperatur zu Beginn des Temperprozesses liegt nach Normklima bei 23 °C.

Tabelle 5-6: Darstellung des verwendeten Temperprofils

Temperschnitt	Zieltemperatur / °C	Aufheiz-, Abkühlrate / K/min	Dauer des Temperschnitts / min
Aufheizen	260	2	118,5
Halten	260	-	60
Abkühlen	23	1	237

Der Tempervorgang lässt sich in drei Phasen gliedern. Das gleichmäßige Aufheizen gefolgt von einer längeren Haltezeit bei einer konstanten Temperatur und am Ende eine Rampe zum langsamen und stetigen Abkühlen der Probekörper. Es wird bewusst ein Profil mit Temperaturen über der maximal verwendeten Bauraumtemperatur ausgewählt, um einen Einfluss des Temperprozesses auswerten zu können. Die Höchsttemperatur von 260 °C orientiert sich an den empfohlenen, maximalen Tempertemperaturen des Materialherstellers [Evo21b-ol] und die Aufheiz- sowie Abkühlraten an vergleichbaren Untersuchungen von PARK et al. und EL MAGRI et al. [EEV+20, S. 4f.], [PLP+21, S. 3].

Da der Temperprozess insbesondere den Kristallisationsgrad beeinflusst, wird die Kristallinität in den Untersuchungen ermittelt und in Relation zur Schweißnahtfestigkeit gesetzt. Dies erfolgt sowohl für getemperte als auch für die nicht getemperten Probekörper, um einen Vergleich ziehen zu können. Gleichzeitig ermöglicht die Untersuchung der nicht getemperten Proben in Abhängigkeit von den Verarbeitungstemperaturen im FDM eine Auswertung des Einflusses des Kristallisationsgrads auf die Schweißnahtfestigkeit.




5.5.2 Experimentelle Untersuchung der Schweißnahtfestigkeit

Die Auswertung der experimentellen Untersuchungen erfolgt in zwei Stufen. Zuerst werden die Schweißnahtfestigkeiten und die Kristallisationsgrade der nicht getemperten Probekörper in Abhängigkeit von der Bauraumtemperatur bewertet. Dann wird der Einfluss des Temperprozesses auf die Schweißnahtfestigkeit und die Kristallinität untersucht und durch einen Vergleich zwischen nicht getemperten und getemperten Probekörpern analysiert. Ein Teil der Untersuchungen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, ist in Zusammenarbeit mit TISSEN im Rahmen einer Studienarbeit durchgeführt worden (vgl. [Tis22]).

5.5.2.1 Einfluss der Bauraumtemperatur

In den Untersuchungen ist der Temperaturbereich des Bauraums zwischen 50 °C und 250 °C festgelegt. Schon direkt während und nach der Fertigung sind visuelle Unterschiede zwischen den Probekörpern in Abhängigkeit von der Bauraumtemperatur festzustellen (vgl. Tabelle 5-7).

Tabelle 5-7: Einfluss der Bauraumtemperatur auf die Bauteilfarbe

Düsentemperatur / °C	450		
Bauraumtemperatur / °C	50	150	250
Farbausprägung im Prüfbereich			

Bei 50 °C Bauraumtemperatur ist die Bauteiloberfläche leicht transparent und in der Farbausprägung Bernstein. Die Temperatur des Bauraums liegt deutlich unter der Glasübergangstemperatur und der vorliegende Temperaturgradient zwischen Düsen- und Bauraumtemperatur ist mit 400 °C sehr groß. Infolgedessen kühlt der ausgetragene Strang schnell ab und die Moleküle haben wenig Zeit sich zu kristallinen Bereichen anzuordnen. Die leichte Transparenz ist ein Indikator für amorphe Strukturen im Material. Ab 150 °C Bauraumtemperatur ist das Bauteil komplett opak. Jedoch lassen sich auch zwischen 150 °C und 250 °C Bauraumtemperatur farbliche Unterschiede erkennen. Die Bauteilfarbe bei Temperaturen im Bauraum von 250 °C ist deutlich heller. Das ist im Vergleich zu 150 °C Bauraumtemperatur vermutlich auf eine andere Kristallisationsstruktur zurückzuführen, denn diese hat einen Einfluss auf die Farbausprägung [VY15, S. 128f.]. Zur Auswertung des Kristallisationsgrads werden DSC-Messungen durchgeführt (vgl. Bild 5-19).

In Bild 5-19 ist die Schweißnahtfestigkeit und die Kristallinität über den verschiedenen Bauraumtemperaturen dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Kristallinität bei einer Bauraumtemperatur von 50 °C am geringsten ausfällt. Es liegt somit ein erhöhter Anteil von amorphen Bereichen vor, wodurch die Ergebnisse der optischen Auswertung der Farbunterschiede bestätigt werden können. Durch einen Anstieg der Bauraumtemperatur wird die Kristallinität gesteigert. Ab einer Temperatur von 200 °C befindet sich der Kristallisationsgrad auf einem nahezu konstanten Niveau. Auffallend ist, dass bei einer Temperatur des Bauraums von 150 °C eine leicht erhöhte Kristallinität erzielt wird. Dies kann auf eine andere Kristallstruktur im Material, aufgrund des vorliegenden Abkühlvorgangs auf knapp unter der Glasübergangstemperatur, hindeuten [YTL+17, S. 4f.].

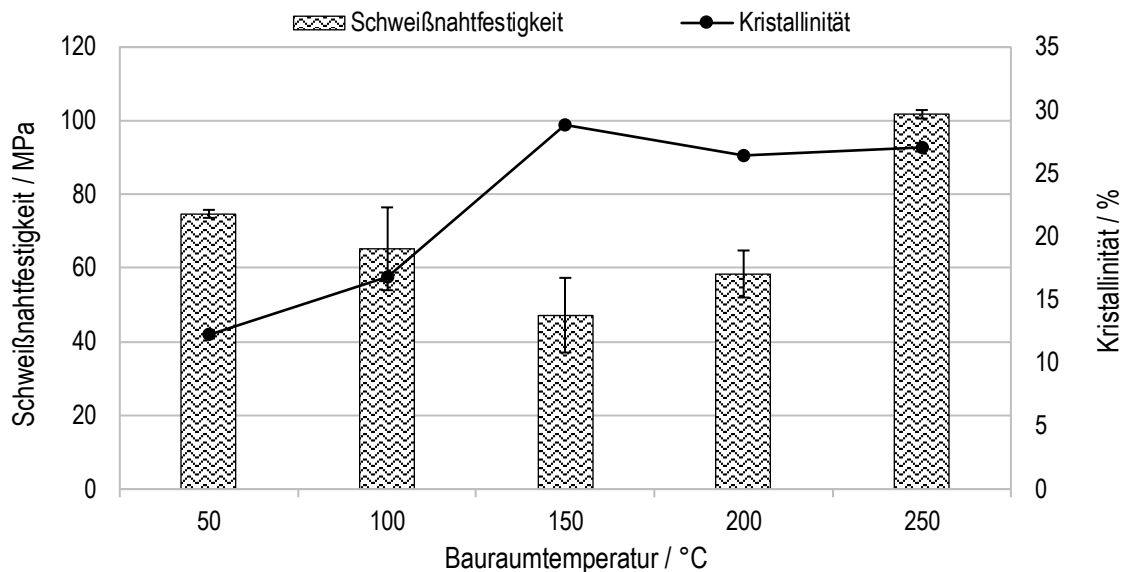


Bild 5-19: Schweißnahtfestigkeit und Kristallinität in Abhängigkeit von verschiedenen Bauraumtemperaturen und konstanter Düsentemperatur mit $T_D=450\text{ °C}$ (in Zusammenarbeit mit TISSEN, vgl. [Tis22])

Es ist zu erkennen, dass die Probekörper bei 150 °C Bauraumtemperatur die geringsten Schweißnahtfestigkeiten aufweisen. Sowohl eine Reduzierung als auch eine Erhöhung der Bauraumtemperatur führt zur Steigerung der Schweißnahtfestigkeiten. Hervorzuheben ist, dass die Prozessstabilität sowohl bei 50 °C Bauraumtemperatur als auch bei 250 °C Bauraumtemperatur sehr gut ist. Die höchsten Festigkeiten werden bei 250 °C Bauraumtemperatur erzielt.

Die Voraussetzung für Diffusionsvorgänge ist die molekulare Mobilität, das heißt die Temperatur sollte ausreichend lange über der Temperatur des Kristallisationsbeginns sein. Denn Untersuchungen zeigen, dass mit Beginn der Kristallisation die Beweglichkeit der Molekülketten behindert oder sogar unterbunden wird [BLG19, S. 1ff.], [Vv21, S. 28f.]. Aus den hohen Schweißnahtfestigkeiten für eine Bauraumtemperatur von 50 °C lässt sich ableiten, dass trotz der großen Abkühlrate ausreichend Zeit für Diffusionsvorgänge vorhanden ist, um gute Zwischenschichtbindungen zu ermöglichen. Somit ist die Ursache für schwächere Schweißnahtfestigkeiten nicht auf unzureichende Diffusionsvorgänge zurückzuführen.

Mit einem Anstieg der Kristallinität, ab einer Bauraumtemperatur von 100 °C, ist eine Abnahme der Schweißnahtfestigkeit zu erkennen. Dies ist besonders ausgeprägt bei 150 °C Bauraumtemperatur. Durch die Bildung von kristallinen Bereichen werden Eigenspannungen im Bauteil erzeugt. Zudem kommt es während des Abkühlvorgangs durch den großen Temperaturgradienten zwischen 450 °C Düsentemperatur und 150 °C Bauraumtemperatur zu einem Aufbau von thermischen Spannungen. Diese Kombination aus Eigenspannungen bedingt durch teilkristalline Strukturen und thermischer Spannung führt zu einer

Schwächung der Schweißnahtfestigkeiten. Durch eine Steigerung der Bauraumtemperaturen auf 250 °C können diese Spannungen reduziert und teilweise abgebaut werden. Zusätzlich ist das Zeitfenster für Diffusionsvorgänge aufgrund der langsameren Abkühlgeschwindigkeit größer. Bei 50 °C Bauraumtemperatur liegen wenige kristalline Bereiche, jedoch hohe Temperaturgradienten zwischen Düsen- und Bauraumtemperatur vor. Trotzdem können hohe Schweißnahtfestigkeiten erzielt werden. Dieses Ergebnis zeigt, dass die durch die Kristallinität induzierte Eigenspannung eine signifikantere Bedeutung für die Schweißnahtfestigkeit hat als die thermische Spannung.

5.5.2.2 Einfluss des Temperprozesses

Zu Beginn der Untersuchungen werden die erreichten Temperaturen im Temperofen zur Validierung des Temperprozesses überprüft. Dazu wird ein Temperaturfühler in der Nähe eines Testbauteils im Ofen platziert und anschließend eine Temperaturmessung zur Überprüfung des Temperprofils durchgeführt. Es werden maximale Temperaturen von 258 °C erreicht und die Vorrichtung zum Tempern ist somit für die experimentellen Untersuchungen geeignet. Zur Auswertung des Einflusses des Temperprozesses auf die Schweißnahtfestigkeit werden die Ergebnisse von getemperten und nicht getemperten Probekörpern verglichen. Der Vergleich ist in Bild 5-20 veranschaulicht und zeigt die ermittelten Schweißnahtfestigkeiten über den verschiedenen Bauraumtemperaturen.

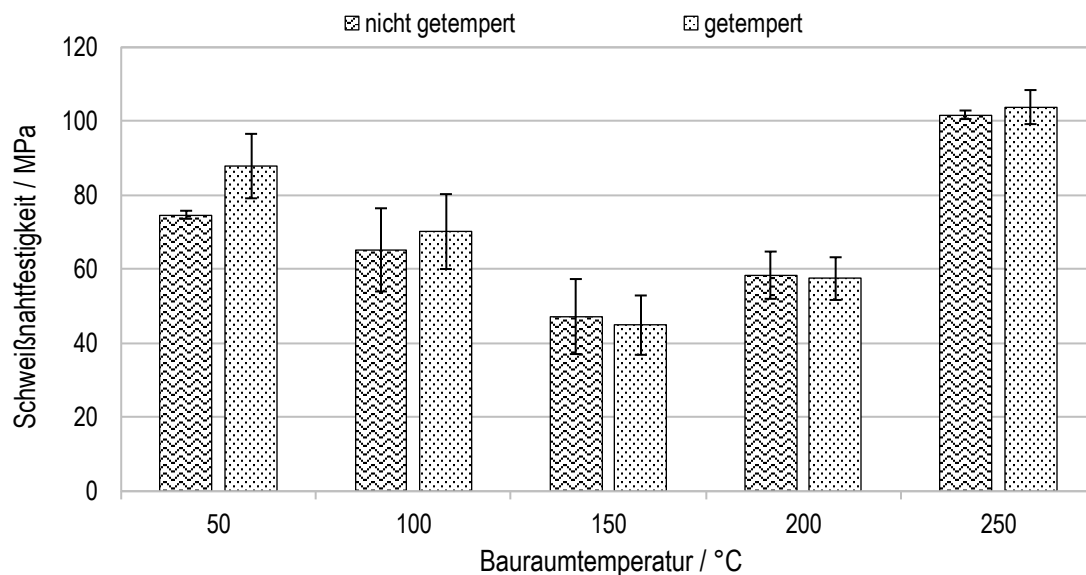


Bild 5-20: Vergleich der Schweißnahtfestigkeiten von getemperten und nicht getemperten Probekörpern in Abhängigkeit von verschiedenen Bauraumtemperaturen und konstanter Düsentemperatur mit $T_D=450$ °C (in Zusammenarbeit mit TISSEN, vgl. [Tis22])

Es ist zu erkennen, dass die Schweißnahtfestigkeiten der Probekörper, gefertigt bei 50 °C und 100 °C Bauraumtemperatur, durch eine nachträgliche Wärmebehandlung gesteigert

werden können. Ab 150 °C Bauraumtemperatur sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den getemperten und nicht getemperten Probekörpern festzustellen. Die Zunahme der Schweißnahtfestigkeiten ist auf die Veränderung der Kristallinität durch den Temperprozess zurückzuführen. Die Gegenüberstellung der Kristallisationsgrade in Abhängigkeit von den Verarbeitungsparametern ist in Bild 5-21 präsentiert.

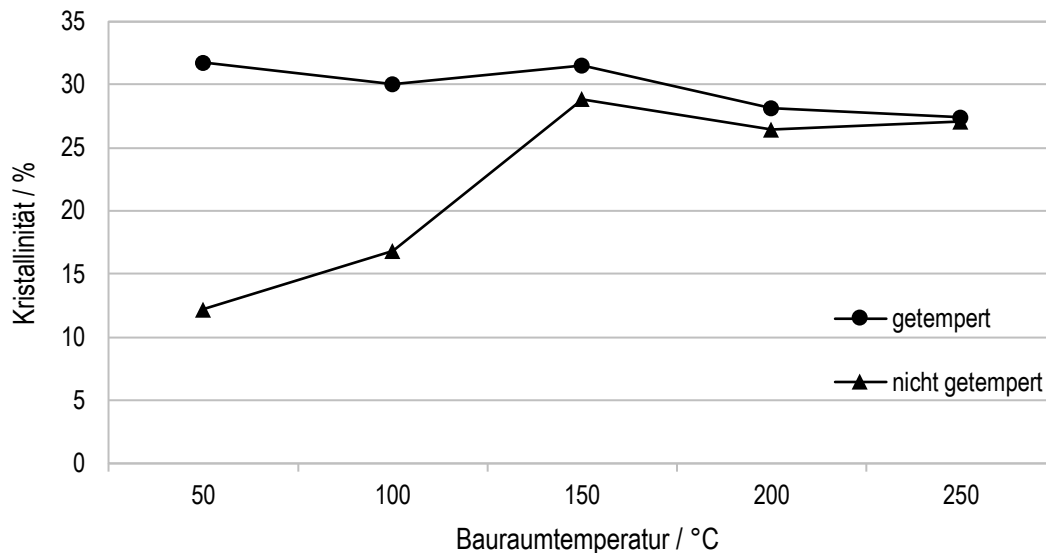


Bild 5-21: Vergleich der Kristallinität von getemperten und nicht getemperten Probekörpern in Abhängigkeit von verschiedenen Bauraumtemperaturen und konstanter Düsentemperatur mit $T_D=450$ °C (in Zusammenarbeit mit TISSEN, vgl. [Tis22])

Für die Probekörper der Bauraumtemperaturen 50 °C und 100 °C kann die Kristallinität durch den Temperprozess deutlich erhöht werden und dies spiegelt sich in der Steigerung der Schweißnahtfestigkeiten wider. Mit zunehmender Temperatur der Bauumgebung nähern sich die Kristallisationsgrade an und ab 200 °C Bauraumtemperatur befindet sich die Kristallinität auf einem nahezu konstanten Niveau. Es kann festgehalten werden, dass hier ein gesättigter Zustand vorliegt und der Temperprozess keinen Einfluss auf die Schweißnahtfestigkeiten hat (vgl. Bild 5-20). Somit hat die Verarbeitung in einem beheizten Bau- raum die gleiche Wirkung wie eine Wärmebehandlung und kann diese ersetzen. Die leicht erhöhte Kristallinität der Versuchspunkte bei Bauraumtemperaturen kleiner gleich 150 °C nach dem Temperprozess ist auf andere Kristallstrukturen zurückzuführen. Denn in den DSC-Messungen der Probekörper sind zwei endotherme Ausschläge während des Auf- heizvorgangs zu erkennen (vgl. Bild 5-22).

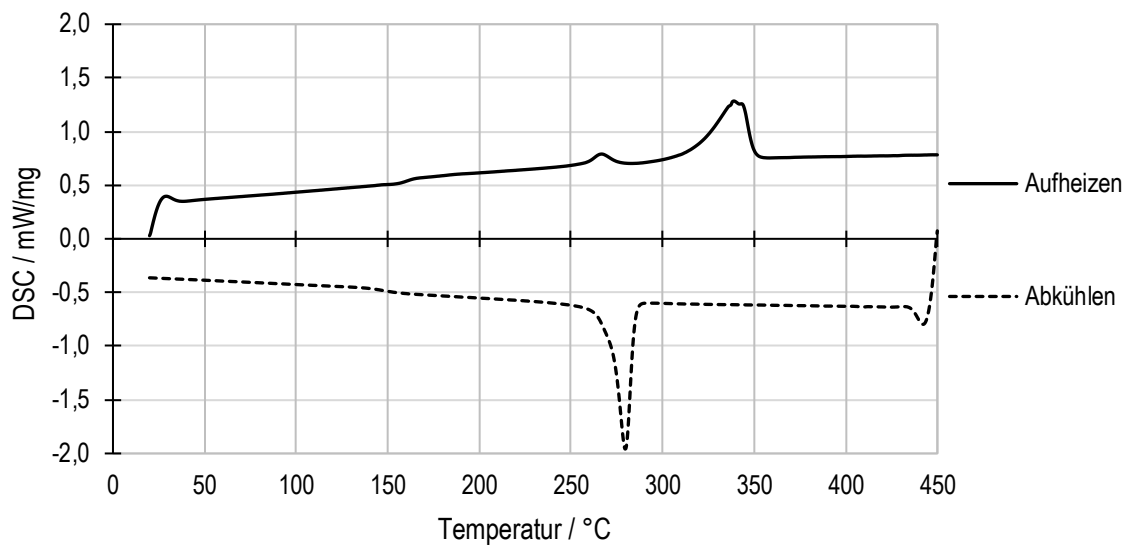


Bild 5-22: DSC-Messung eines getemperten Probekörpers gefertigt mit Düsentemperatur $T_D=450\text{ °C}$ und Bauraumtemperatur $T_B=50\text{ °C}$ (in Zusammenarbeit mit TISEN, vgl. [Tis22])

Der zweite endotherme Peak mit der wesentlich größeren Fläche beschreibt den Aufschmelzvorgang des Materials. Der erste endotherme Peak kann mit der Wärmebehandlung in Zusammenhang gesetzt werden und liegt etwa 9 °C über der ermittelten maximalen Temperatempertemperatur von 258 °C . Aufgrund der beiden Peaks lässt sich ableiten, dass zwei verschiedene Arten von kristallinen Strukturen vorliegen. Diese These wird durch die Untersuchungen von TARDIF et al. und EL MAGRI et al. gestützt. TARDIF et al. beschreiben zur Erklärung des ersten endothermen Ausschlags zwei Kristallpopulationen und EL MAGRI et al. verweisen auf eine Zunahme der lamellaren Form der Kristalle [EEV+20, S. 11], [TPB+14, S. 14]. Die Kristallisation ist nach dem Temperprozess vollständig abgeschlossen, da keine exothermen Ausschläge durch Nachkristallisationen zu erkennen sind.

5.5.3 Verarbeitungsempfehlung

Zur Festlegung einer Verarbeitungsempfehlung von PEEK für das FDM-Verfahren ist es notwendig, die Verarbeitungsparameterkombinationen mit den höchsten Schweißnahtfestigkeiten gesondert zu betrachten. In den Untersuchungen kann gezeigt werden, dass bei einer Bauraumtemperatur von 50 °C mit anschließendem Temperprozess gute und bei 250 °C Bauraumtemperatur ohne nachfolgende Wärmebehandlung sehr gute Schweißnahtfestigkeiten erzielt werden.

Durch die Verarbeitung von PEEK bei 50 °C Bauraumtemperatur wäre es möglich, das Material auf einer Vielzahl von FDM-Maschinen zu verarbeiten, denn es ist leichter, eine Düsentemperatur von 450 °C zu realisieren als eine hohe und homogene Bauraumtemperierung. Dadurch könnte der Einsatz und die Relevanz von PEEK im FDM enorm gesteigert

werden. Allerdings verziehen sich die Probekörper sehr stark während des Temperns, da das Material nachkristallisiert (siehe Bild 5-23). Durch den auftretenden Verzug und die daraus resultierenden Maßabweichungen, kann eine Verarbeitung bei 50 °C Bauraumtemperatur und nachträglichem Temperprozess nicht empfohlen werden.

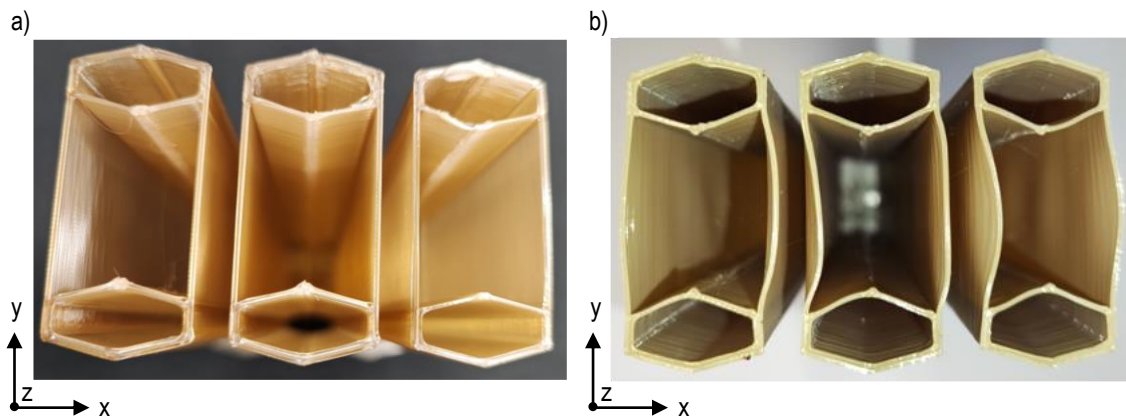


Bild 5-23: Optische Gegenüberstellung zur Darstellung der auftretenden Verzugserscheinungen nach dem Temperprozess zwischen a) $T_D=450\text{ °C}$ $T_B=50\text{ °C}$ nicht getempert und b) $T_D=450\text{ °C}$ $T_B=50\text{ °C}$ getempert (in Zusammenarbeit mit TISEN, vgl. [Tis22])

Bei einer Bauraumtemperatur von 250 °C treten derartig ausgeprägte Verzugserscheinungen nicht auf. Das Material ist nach dem Fertigungsprozess vollständig kristallisiert und ein Tempervorgang als zusätzlicher Arbeitsschritt ist nicht notwendig. Zudem werden die höchsten Schweißnahtfestigkeiten erzielt. Aufgrund dessen weisen Bauraumtemperaturen von 250 °C signifikante Vorteile für die Verarbeitung von PEEK im FDM auf.

5.6 Einfluss von Faserverstärkungen auf die Schweißnahtqualität

Die Verarbeitung von Faserverbundkunststoffen mit dem FDM-Verfahren erfährt eine zunehmende Nachfrage [BAÖ21, S. 542]. Durch eine Faserverstärkung können hohe Festigkeiten und Steifigkeiten erzielt werden, was das Material zu einem hervorragenden Leichtbauwerkstoff macht [Sch07, S. 4f.]. Zudem reduziert eine Faserverstärkung die Verzugerscheinungen und rückt vor allem für schwindende Materialien in den Fokus. Prozessbedingt kommt es im FDM während der Verarbeitung von faserverstärkten Materialien zu einer Faserausrichtung in Extrusionsrichtung [TKV+14, S. 13]. Das führt zu einer ausgeprägten Anisotropie in z-Richtung und die Optimierung der Verarbeitungsparameter gewinnt an Bedeutung.

In den nachfolgenden Untersuchungen wird zu Beginn die generelle Verarbeitbarkeit der verwendeten PEEK Materialien geprüft. Anschließend werden mithilfe der Methode zur Beurteilung der Schweißnahtqualität (vgl. Kapitel 5.2) sowohl die Auswirkungen der Verarbeitungstemperaturen als auch der Einfluss der Faserverstärkung auf die Schweißnaht

analysiert. Ein Teil der Untersuchungen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, ist in Zusammenarbeit mit KISTER im Rahmen einer Studienarbeit durchgeführt worden (vgl. [Kis20]).

5.6.1 Aufbau der experimentellen Untersuchungen

Die Untersuchungen erfolgen mit dem VESTAKEEP 2000G, dem VESTAKEEP 2000 CF15 und dem VESTAKEEP 2000 CF20. Das Matrixmaterial der kohlenstofffaserverstärkten Materialien entspricht hierbei dem VESTAKEEP 2000G, um den Einfluss der Kurzfasern auf die Schweißnahtqualität zu analysieren. Die Auswahl der Verarbeitungstemperaturen basiert auf den bisherigen Ergebnissen zur Verarbeitung von PEEK im FDM (vgl. Kapitel 5.3.2) und kann deshalb stark eingegrenzt werden. Um den Einfluss des Energieeintrags durch die Düse und den Bauraum auswerten zu können, werden beide Prozessparameter in 20 K Schritten verändert. In Tabelle 5-8 sind die verwendeten Verarbeitungstemperaturen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 5-8: Auswahl der Prozessparameter Düsen- und Bauraumtemperatur

Prozessparameter	Einheit	VESTAKEEP 2000G, VESTAKEEP 2000 CF15, VESTAKEEP 2000 CF20
Düsentemperatur	°C	430, 450
Bauraumtemperatur	°C	240, 260

Neben den aufgeführten Verarbeitungstemperaturen werden die grundlegenden Prozessparameter aus Tabelle 4-4 in Kapitel 4.3.2 verwendet. Aufgrund des Düsendurchmessers und der Strangbreite ist eine verstärkte Ausrichtung der Fasern in Strangablagerichtung zu erwarten [CBL+21, S. 20ff.].

In den experimentellen Untersuchungen werden die Schweißnahtfestigkeit sowie anschließend der Schweißfaktor ermittelt. Der Schweißfaktor wird genutzt, um die drei verschiedenen Materialien untereinander vergleichen und einordnen zu können.

5.6.2 Auswertung des Fasereinflusses auf die Schweißnahtqualität

Die Auswertung des Fasereinflusses auf die Schweißnahtqualität von PEEK teilt sich auf in die Analyse der Schweißnahtfestigkeit und die Aufbereitung des Schweißfaktors. Eine gesonderte Betrachtung des Schweißbreitenfaktors erfolgt nicht, denn sowohl für das VESTAKEEP 2000G als auch für die kohlenstofffaserverstärkten Materialien ist kein eindeutiger Einfluss der Verarbeitungsparameter auf den Schweißbreitenfaktor festzustellen.

5.6.2.1 Schweißnahtfestigkeit

Mithilfe der Darstellung in Bild 5-24 werden die Schweißnahtfestigkeiten in Abhängigkeit von der Düsen- und Bauraumtemperatur ausgewertet. Aufgrund der Variation um die gleichen Temperaturstufen von 20 K ist ein Vergleich zwischen dem Energieeintrag der Düse und des Bauraums möglich.

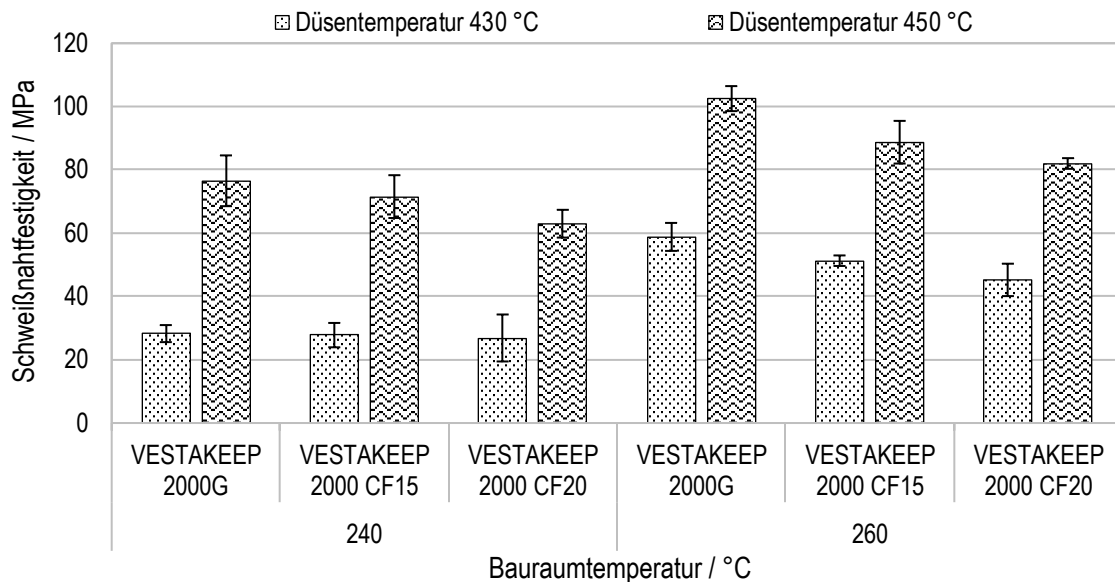


Bild 5-24: Vergleich der ermittelten Schweißnahtfestigkeiten in Abhängigkeit von verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen für die Materialien VESTAKEEP 2000G, VESTAKEEP 2000 CF15 und VESTAKEEP 2000 CF20 (in Zusammenarbeit mit KISTER, vgl. [Kis20])

Aus den ermittelten Schweißnahtfestigkeiten gehen festigkeitssteigernde Einflüsse der Düsen- und der Bauraumtemperatur für die drei Materialien hervor. Bei einer Düsentemperatur von 450 °C und einer Bauraumtemperatur von 260 °C werden die höchsten Schweißnahtfestigkeiten erzielt. Der Energieeintrag der Düse hat einen signifikanteren Einfluss auf die Schweißnahtfestigkeit, denn eine Erhöhung der Düsentemperatur um 20 K führt zu einer größeren Festigkeitssteigerung als eine Erhöhung der Bauraumtemperatur. Es fällt außerdem auf, dass insbesondere bei einer Düsentemperatur von 450 °C und einer Bauraumtemperatur von 260 °C die faserverstärkten Materialien deutlich geringere Schweißnahtfestigkeiten aufweisen als das ungefüllte Material. Dies ist auf die Faserausrichtung in der Schweißnaht zurückzuführen. Aussagen über die Orientierung der Kohlenstofffasern können mit der Hilfe von Aufnahmen eines Rasterelektronenmikroskops (REM) getroffen werden (vgl. Bild 5-25).

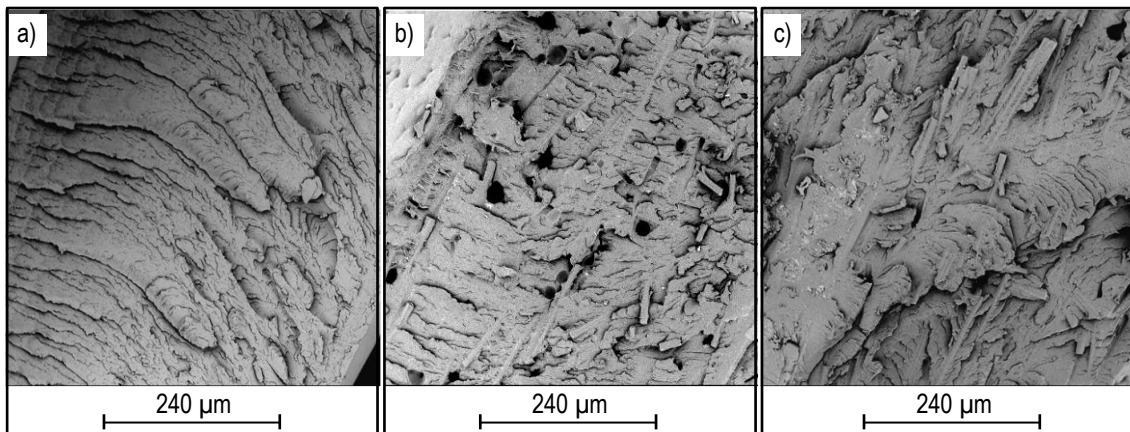


Bild 5-25: REM Aufnahmen der Bruchflächen der Materialien a) VESTAKEEP 2000G, b) VESTAKEEP 2000 CF15 und c) VESTAKEEP 2000 CF20, bei $T_D=450\text{ °C}$ und $T_B=260\text{ °C}$

In Bild 5-25 sind Bruchflächen in der Schweißnaht zwischen den Schichten dargestellt. Durch die Analyse der Oberflächen zeigt sich, dass die Fasern orthogonal zur Belastungsrichtung ausgerichtet sind. Die Fasern haben dadurch keine Verstärkungswirkung auf die Schweißnaht. Unterschiede in den Faserausrichtungen aufgrund der Verarbeitungstemperaturen können nicht detektiert werden. Neben der Faserorientierung lässt sich mit den REM Aufnahmen auch das Bruchbild auswerten. Bei allen drei Materialien ist die Bruchfläche sehr uneben, das Material wurde aus der Bruchfläche herausgerissen. Somit liegt in der Schweißnaht ein Materialversagen vor, welches die guten Schweißnahtfestigkeiten bestätigt. Zudem ist eine ausreichende Faser-Matrix-Haftung festzustellen, denn die Fasern in der Bruchfläche sind vollständig mit Matrixmaterial ummantelt. Dadurch kann ein Einfluss aufgrund einer mangelnden Faser-Matrix-Haftung ausgeschlossen werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch die Präsenz der ausgerichteten Fasern in der Schweißnaht die Schweißnahtfestigkeit beeinträchtigt wird. Dies kann mit einer Reduzierung des Matrixanteils in der Schweißnaht in Zusammenhang gesetzt werden. In Kapitel 7 wird deshalb ein Ansatz entwickelt, um unter Berücksichtigung des Matrixanteils in der Schweißnaht von faserverstärkten Materialien eine Vorhersage zur resultierenden Schweißnahtfestigkeit zu ermöglichen. Ein hoher Energieeintrag durch die Düse und den Bauraum sind für die Verarbeitung des VESTAKEEP 2000G, des VESTAKEEP 2000 CF15 und des VESTAKEEP 2000 CF20 im FDM zur Erzielung hoher Schweißnahtfestigkeiten zu empfehlen. Während der Verarbeitung muss die abrasive Wirkung der faserverstärkten Materialien berücksichtigt werden, denn es ist ein Düsenverschleiß in Form eines Aufreibens des Düsendurchmessers detektiert worden (vgl. Anhang, Bild A2-4). Die Materialien sind mit dem FDM-Verfahren verarbeitbar und die Methode zur Beurteilung der Schweißnahtqualität kann neben einem weiteren ungefüllten PEEK damit auch für faserverstärkte PEEK Typen validiert werden.

5.6.2.2 Schweißfaktor

Zur Berechnung der Schweißfaktoren werden die ermittelten Schweißnahtfestigkeiten und die Grundmaterialfestigkeiten (vgl. Kapitel 4.1.1, Tabelle 4-1) verwendet. In Bild 5-26 sind die Schweißfaktoren der untersuchten Materialien in Abhängigkeit von der Düsen- und Bauraumtemperatur abgebildet.

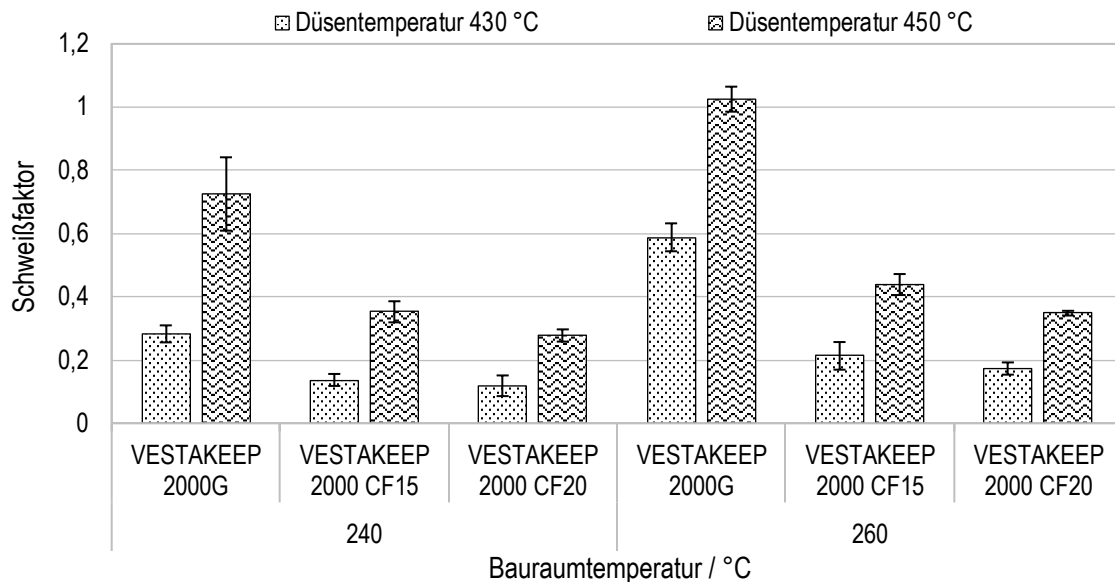


Bild 5-26: Vergleich der ermittelten Schweißfaktoren in Abhängigkeit von verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen für die Materialien VESTAKEEP 2000G, VESTAKEEP 2000 CF15 und VESTAKEEP 2000 CF20 (in Zusammenarbeit mit KISTER, vgl. [Kis20])

Die Auswertung der Schweißfaktoren zeigt, dass sich der Unterschied zwischen ungefüllten und faserverstärkten Materialien durch die Berücksichtigung der Grundmaterialfestigkeit vergrößert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Zugfestigkeiten der kohlenstofffaser-verstärkten Ausgangsmaterialien, die zur Ermittlung der Schweißfaktoren herangezogen werden, höher sind und den Schweißfaktor dadurch reduzieren. Die Fasern sind in Zugrichtung ausgerichtet und führen somit zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Das VESTAKEEP 2000G besitzt mit einem gemittelten Schweißfaktor über 1 eine sehr gute Schweißbarkeit im FDM. Derartige Schweißfaktoren sind wie beim VESTAKEEP 3300G auf die Prozessbedingungen während des FDM-Verfahrens zurückzuführen und sind in Kapitel 5.3.2.3 erläutert. Das VESTAKEEP 2000 CF15 mit 0,44 und das VESTAKEEP 2000 CF20 mit 0,35 weisen deutlich geringere Schweißfaktoren auf, obwohl gerade für faserverstärkten Materialien beachtliche Schweißnahtfestigkeiten erzielt werden. Somit bietet die Verarbeitung des unverstärkten PEEK Materials den Vorteil, dass bezogen auf die Schweißnahtfestigkeiten die zugrundeliegenden Materialeigenschaften besser ausgenutzt werden.

6 Untersuchung des Verzugsverhaltens zur Beurteilung der Verarbeitungseignung im FDM

Eine Vielzahl von Faktoren haben einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von im FDM hergestellten Bauteilen. Neben der in Kapitel 5 untersuchten Schweißnahtqualität sind insbesondere innere Spannungen, die infolge der schichtweisen Aufheiz- und Abkühlprozesse während des FDM-Prozesses auftreten, zur Beurteilung der Verarbeitungseignung von Materialien im FDM von Bedeutung. Die Spannungen resultieren aus Schwindungsvorgängen des Materials in der Bauteilstruktur und können in Abhängigkeit von der Bauteilsteiligkeit zu Verzugerscheinungen führen. Das Verzugverhalten beeinflusst infolgedessen maßgeblich die Prozessstabilität und wird deshalb in den Untersuchungen dieser Arbeit analysiert.

Die Materialschwindung im FDM wird vor allem durch Prozessparameter der Strangablage, Temperaturen der Schmelze und der Bauumgebung sowie durch die Abkühlgeschwindigkeit während des Prozesses beeinflusst [TG15, S. 251]. Während der Verarbeitung des Hochleistungsthermoplastes PEEK können an den Probekörpern Verzugerscheinungen detektiert werden (vgl. Bild 5-8), die die Notwendigkeit der Untersuchungen des Verzugsverhaltens von teilkristallinen Hochleistungsthermoplasten bekräftigen. Zur ganzheitlichen Einordnung des Materialverhaltens unter Hochtemperaturbedingungen wird zudem der amorphe Hochleistungskunststoff PPSU betrachtet.

Das Ziel ist es, die Auswirkungen von Verarbeitungsparameteranpassungen im Hochtemperaturbereich auf das Schwindungs- und Verzugverhalten zu analysieren, um einen Beitrag zur Materialqualifizierung von Hochleistungsthermoplasten zu leisten und gleichzeitig die Prozessstabilität während der Verarbeitung zu verbessern. Zudem ist es möglich, durch die quantitative Einordnung des auftretenden Verzugs in Abhängigkeit von den Verarbeitungstemperaturen, Rückschlüsse über die Auswirkungen des prozessspezifischen Verzugs auf die Schweißnahtfestigkeit zu ziehen. Weiterhin wird durch die Untersuchungen unter industriellen Rahmenbedingungen im Hochtemperaturbereich ein Forschungsbedarf bedient und gleichzeitig eine grundlegende Datenbasis für die Bewertung von Hochleistungskunststoffen geschaffen, um z. B. zukünftige Simulationsansätze zu unterstützen.

In diesem Kapitel wird zu Beginn eine Methode zur Bewertung des Verzugsverhaltens vorgestellt, um auftretende Verzugsausprägungen quantifizieren und auswerten zu können. Es schließen sich experimentelle Untersuchungen und die Auswertung sowie Einordnung des Verzugsverhaltens in Abhängigkeit von ausgewählten Verarbeitungsparametern an. Basierend auf den Ergebnissen werden die Prozessparameter in weiterführenden Untersuchungen gezielt erweitert. Abschließend erfolgen Untersuchungen zur Beeinflussung des Verzugsverhaltens durch eine nachträgliche Wärmebehandlung.

6.1 Methode zur Bewertung des Verzugverhaltens

Die Beurteilung des schwindungsbedingten Verzugverhaltens erfolgt durch die Verwendung eines von SCHUMACHER vorgestellten methodischen Ansatzes [SSF19, S. 2f.]. Mit dem verwendeten Probekörper ist es möglich, Verzugsausprägungen zu quantifizieren und in Abhängigkeit von den Verarbeitungsparametern zu bewerten. Eine Anwendung der Methode ist bisher nur für technische Kunststoffe erfolgt. In dieser Arbeit wird deren Eignung für die Hochleistungsthermoplaste PPSU und PEEK geprüft und durch die Auswertung der experimentellen Untersuchungen validiert.

6.1.1 Experimenteller Aufbau zur Bestimmung des Bauteilverzugs

In den Untersuchungen wird ein trichterförmiger Probekörper verwendet, der Wanddicken in Höhe einer Strangbreite besitzt. Das Design des Probekörpers ist so ausgelegt, dass schwindungsbedingte Verzugerscheinungen sichtbar und vor allem auswertbar werden. Denn die Seitenflächen des Probekörpers, die den Messbereich darstellen, werden Schicht für Schicht durch jeweils einen Strang aufgebaut und bieten dadurch weniger Widerstand gegen Eigenspannungen im Bauteil. Treten während der Verarbeitung Materialschwindungen zwischen den einzelnen Schichten auf, induzieren diese Schwindungsunterschiede Spannungen in die Bauteilstruktur. Dies kann bei nicht ausreichenden Materialfestigkeiten zu einer Verzugerscheinung in Form einer Wölbung der Seitenflächen des Probekörpers führen. Zudem ist eine vollständige Sichtprüfung des Bauteils möglich, um Fertigungsfehler erfassen zu können. Die verwendete Geometrie des Verzugprobekörpers ist in Bild 6-1 dargestellt.

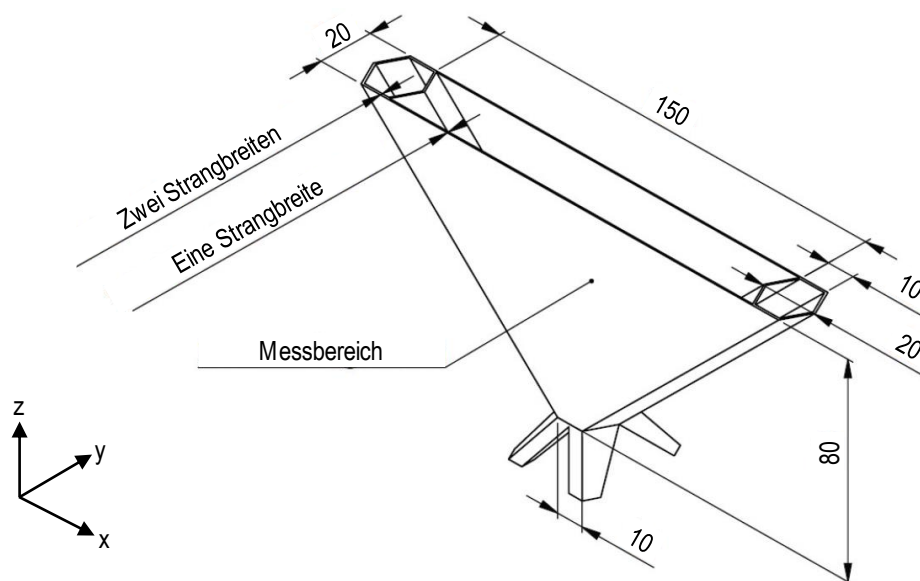


Bild 6-1: Probekörpergeometrie mit Bemaßung (in mm) zur Bestimmung des Bauteilverzugs

Jedem Verzugsprobekörper ist eine definierte Position im Bauraum zugewiesen, um den Einfluss der Bauraumposition auf das Schwindungsverhalten auswerten zu können, denn es ist bekannt, dass Bauteileigenschaften in Abhängigkeit von der Platzierung im Bauraum abweichen können [TG15, S. 254]. Die Anordnung der Probekörper im Bauraum wird mittels Bild 6-2 veranschaulicht.

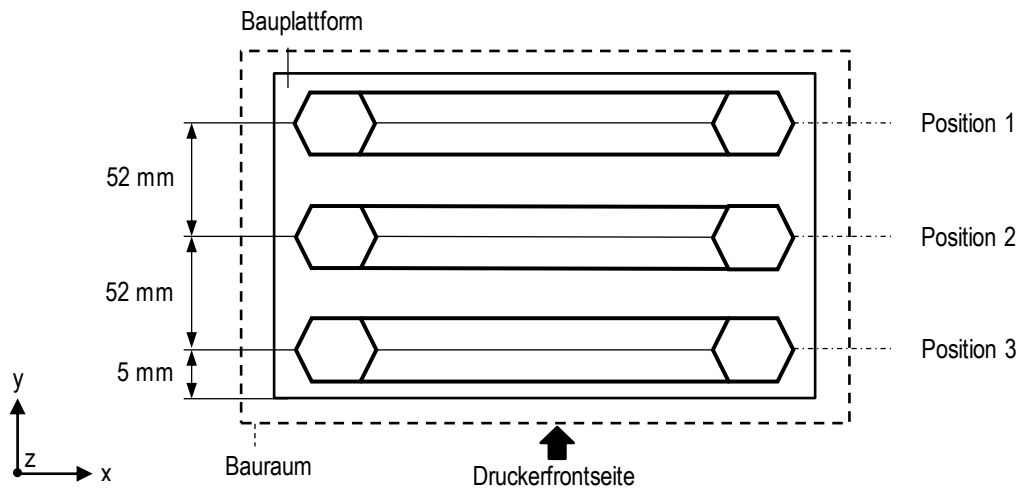


Bild 6-2: Schematische Anordnung der Probekörper im Bauraum (Draufsicht)

Pro Baujob werden drei Probekörper hergestellt. Die Bauteile kühlen nach dem Fertigstellungsprozess in der geschlossenen FDM-Anlage auf Raumtemperatur ab, um einen definierten und reproduzierbaren Abkühlvorgang zu gewährleisten. Nach der Entnahme der Probekörper aus dem Bauraum werden die Bauteile nach [DIN EN ISO 291] konditioniert und anschließend vermessen. Bild 6-3 zeigt exemplarisch die auftretende Wölbung der Messflächen anhand eines 3D-Scans sowie schematisch die physikalischen Ursachen der forcierten Wölbung der Seitenflächen nach außen.

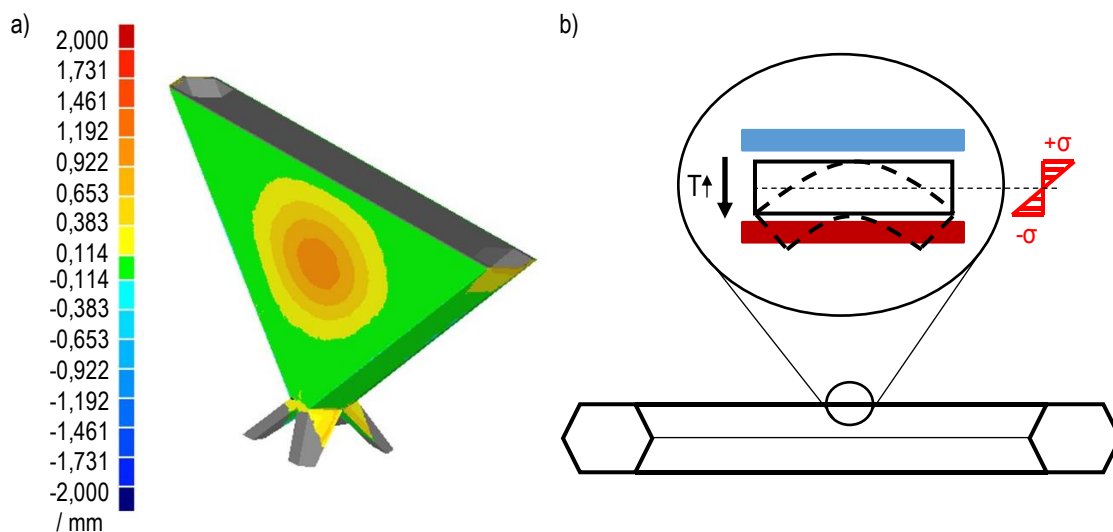


Bild 6-3: a) 3D-Scann zur Ermittlung der Bauteilverformung, b) Entstehungsmechanismus der Wölbung des Probekörpers nach außen

Die Wölbung wird durch die Probekörpergeometrie und die Abkühlung der Seitenwände von außen nach innen begünstigt. An der Außenseite sorgt die Konvektion der Bauraumtemperierung für eine vergleichsweise schnellere Abkühlung und im Inneren des Probekörpers staut sich die Wärme. Der resultierende Schwindungsunterschied führt zu Druckspannungen auf der Innenseite und Zugspannungen auf der Außenseite des Messbereichs. Die Seitenwand wölbt sich nach außen. Die Wölbung kann nun im weiteren Verlauf der experimentellen Untersuchungen messtechnisch erfasst und daraus ein Verzugsmaß abgeleitet werden.

6.1.2 Vorgehen zur Quantifizierung der Bauteilverzugs

Für die Vermessung der verformten Probekörper stehen verschiedene Messmittel und Methoden zur Verfügung. Mithilfe eines 3D-Scans kann ein Flächenmodell generiert werden, welches anschließend mit der CAD-Datei des Probekörpers verglichen wird, um die Formabweichung zu bestimmen. Alternativ ist eine zweidimensionale Vermessung der Wölbung durch eine Bildauswertungssoftware anhand von Fotos möglich. Neben den zwei optischen Messsystemen kann das Bauteil auch mithilfe einer Bügelmessschraube oder eines Messschiebers manuell vermessen werden. Die Messmethoden werden hinsichtlich Genauigkeit, Zeitaufwand und Reproduzierbarkeit bewertet und miteinander verglichen.

Die Erstellung und Auswertung eines 3D-Scans ist sehr genau, erfordert allerdings einen erheblichen Zeitaufwand, der eine ganzheitliche Verwendung der Messmethode in dieser Arbeit ausschließt. Der 3D-Scan wird aber stichprobenartig zur Verifizierung der Ergebnisse genutzt. Eine Vermessung der Wölbung durch mechanische Messmittel ist aufgrund der filigranen Seitenwände zu ungenau. In diesem Bereich kann das Material bei der Messung elastisch verformt werden und damit das Ergebnis verfälschen. Daher wird in den Untersuchungen eine optische Kameramessung verwendet und nachfolgend detaillierter vorgestellt. Bild 6-4 zeigt den Aufbau bzw. die Vorrichtung, die für die Aufnahmen der Fotos der Bauteilwölbung genutzt wird.

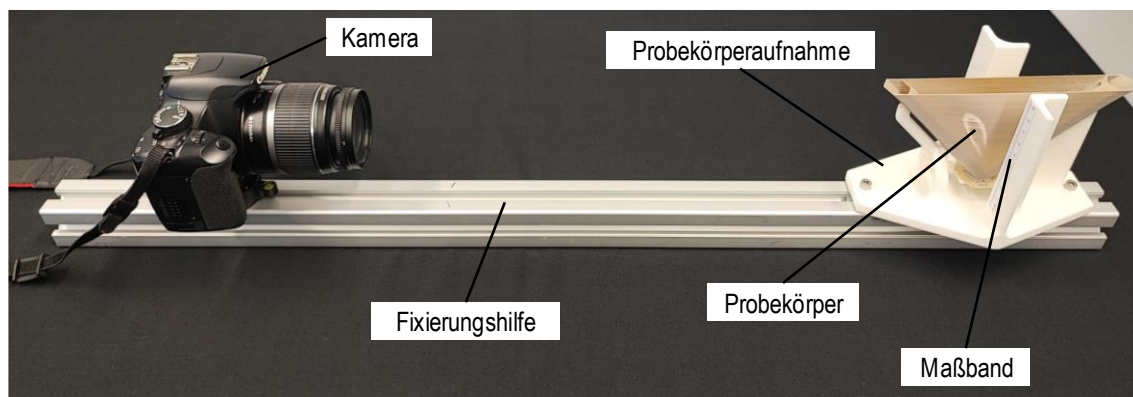


Bild 6-4: Vorrichtung zur optischen Erfassung der Bauteilwölbung

Der Probekörper wird in einer Aufnahme platziert und dadurch mit der Stirnseite zur Kamera ausgerichtet. Die Kamera ist fixiert und liegt auf einer Achse mit dem Verzugsprobekörper. In dieser Position ist es möglich die Wölbung der Seitenflächen quer zur Längsachse des Probekörpers zu erfassen. Um den Brennpunkt der Kamera auf die mittlere Querschnittsebene des Probekörpers einzustellen, wird bei der Aufnahme des Fotos auf eine Säule der Probekörperaufnahme und auf das dort angebrachte Maßband fokussiert. Mit der Vermessungssoftware Datinf Measure kann das Foto bearbeitet und die Wölbung ausgemessen werden. In Bild 6-5 a) ist ein Foto zur Bestimmung der Wölbungsausmaßes dargestellt.

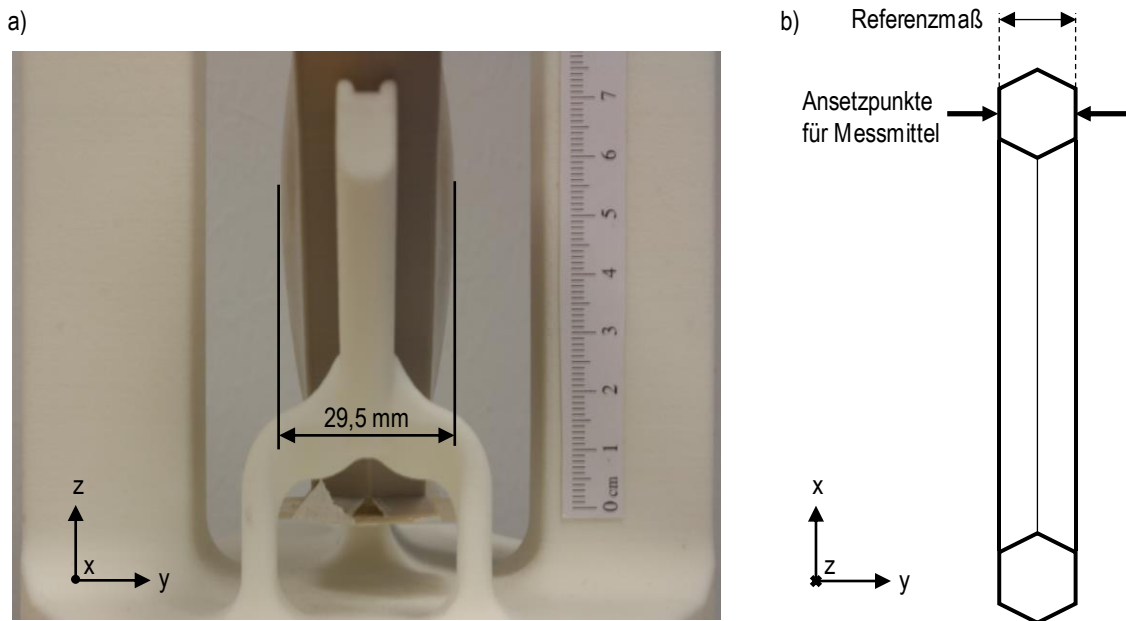


Bild 6-5: a) Fotografische Aufnahme zur Messung des Wölbungsausmaßes eines Probekörpers b) Schematische Darstellung der Bestimmung eines Referenzmaßes zur Berücksichtigung von Fertigungsabweichungen

Mit der Bildauswertungssoftware kann einer definierten Länge des Maßbands eine Pixelzahl zugewiesen werden. Dadurch wird festgelegt, wie viele Pixel einem bestimmten Längenmaß entsprechen. Dann wird der Bereich mit der größten Wölbung vermessen und über die Pixelanzahl das Maß der Wölbung in Millimeter bestimmt. Aus der Differenz der Probekörperwölbung und der Breite des Probekörpers als Referenzmaß wird anschließend nach der Gleichung 5 die Verformung ermittelt und damit das Schwindungsausmaß quantifiziert.

$$\text{Verformung} = \text{Max. Probekörperwölbung} - \text{Breite des Probekörpers} \quad (5)$$

Die Ermittlung des Referenzmaßes ist notwendig, um die tatsächliche Bauteilbreite und eventuelle Fertigungsabweichungen zu berücksichtigen. Die Position zur Bestimmung der Probekörperbreite ist in Bild 6-5 b) schematisch dargestellt. Das Referenzmaß wird mit einer Bügelmessschraube an den Säulen, die die Messfläche aufspannen, ermittelt. Dieser Bereich bietet sich an, da an dieser Stelle eine ausreichende Steifigkeit der Bauteilstruktur

vorliegt. Die Untersuchungen erfolgen bei Normklima entsprechend der [DIN EN ISO 291] bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und einer Temperatur von 23 °C.

6.1.3 Prozesseinstellungen und Auswahl der Verarbeitungstemperaturen

In den Untersuchungen des Verzugsverhaltens werden das Ultrafuse PPSU und das VESTAKEEP 3300G verwendet. Das Ziel ist es, das Prozessverständnis um das Verhalten von amorphen und teilkristallinen Hochleistungsthermoplasten in Abhängigkeit von verschiedenen Verarbeitungstemperaturen (Düse-/Bauraumtemperatur) zu erweitern. Neben der Schweißnahtqualität ist das Verzugsverhalten ein wichtiges Merkmal zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit von Materialien im FDM.

Um eine Vergleichbarkeit mit den Untersuchungen der Schweißnahtqualität sicherzustellen, werden die gleichen Prozessparameter (vgl. Tabelle 5-1) ausgewählt. Dies hat neben der Vergleichbarkeit den Vorteil, dass die gewählten Verarbeitungstemperaturen einen großen Temperaturbereich des Bauraums abdecken. Denn aus Untersuchungen von Hu et al. und Wu et al. geht hervor, dass die Bauraumtemperatur während der Verarbeitung von PEEK die auftretenden Verzugserscheinungen beeinflusst [HDX+19, S. 2ff.], [WGZ+14, S. 6ff.]. Darüber hinaus können bestehende Erkenntnisse der Haftungsuntersuchungen und der Schweißnahtfestigkeitsanalyse (vgl. Kapitel 5.2.3) für die Bewertung der experimentellen Messreihe zur Untersuchung des Verzugsverhaltens verwendet werden. Dies kann dadurch begründet werden, dass bei der Verarbeitung von PEEK häufig ein Adhäsionsproblem der ersten Schicht auf der Bauplattform vorliegt, was zu einer Verfälschung der experimentellen Auswertung führen kann [PLP+21, S. 6f.]. Zudem können auch unzureichende Festigkeiten der Schweißnaht Verzugserscheinungen begünstigen und die Interpretation der experimentellen Untersuchungen erschweren. Sowohl Haftungsprobleme als auch unzureichende Schweißnahtfestigkeiten können aufgrund der bisherigen Ergebnisse für die gewählten Prozessparameter ausgeschlossen werden. Die Verarbeitungsparameter sind somit geeignet, um den Bauteilverzug zu analysieren.

6.2 Auswertung und Einordnung des Verzugsverhaltens

Mithilfe der vorgestellten Vorgehensweise wird in diesem Kapitel der Bauteilverzug der Materialien Ultrafuse PPSU und VESTAKEEP 3300G untersucht. Der Fokus liegt auf diesen beiden Hochleistungskunststoffen, um die Ergebnisse der Verzugsuntersuchungen mit den Untersuchungen der Schweißnahtqualität als Bewertungsgrundlage für die Verarbeitbarkeit der Materialien im FDM kombinieren zu können. Ein Teil der Untersuchungen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, ist in Zusammenarbeit mit FUHRMANN im Rahmen einer Studienarbeit durchgeführt worden (vgl. [Fuh19]).

6.2.1 PPSU

Für das Ultrafuse PPSU wird sowohl der Einfluss der Verarbeitungsparameter als auch der Einfluss der Bauraumpositionierung auf den Bauteilverzug analysiert.

6.2.1.1 Einfluss der Verarbeitungsparameter

Die Verformung der Probekörper ist in Abhängigkeit von der Düsen- und Bauraumtemperatur in Bild 6-6 dargestellt.

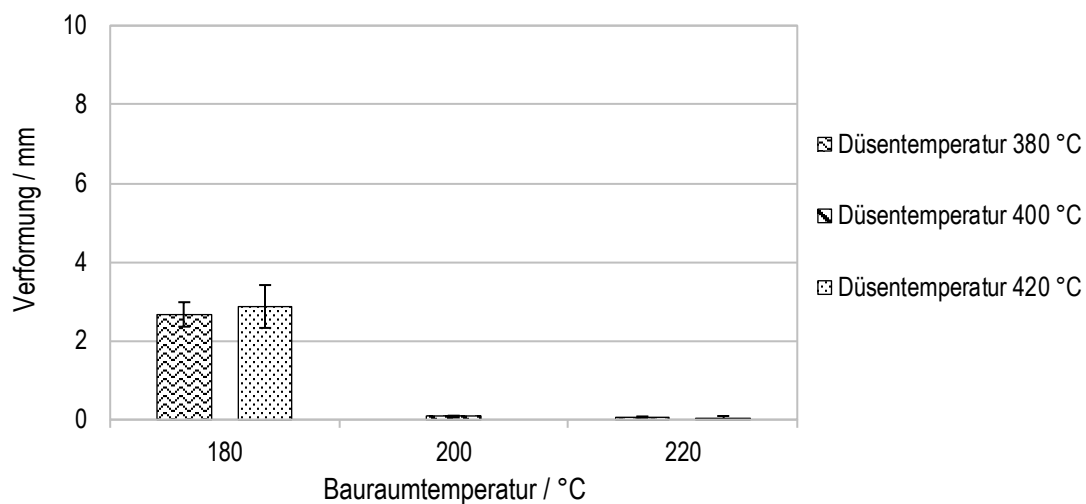


Bild 6-6: Verformung als Kenngröße des Bauteilverzugs von Ultrafuse PPSU in Abhängigkeit von verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen (in Zusammenarbeit mit FUHRMANN, vgl. [Fuh19])

Aus Bild 6-6 geht hervor, dass die Verformung durch die Bauraumtemperatur signifikant beeinflusst wird. Bei einer Bauraumtemperatur von 180 °C sind deutliche Verformungen erkennbar. Im Gegensatz dazu liegen bei 220 °C keine messbaren Verformungen vor. Dieses Verhalten ist vermutlich auf die Reduzierung des Temperaturgradienten zwischen Düse und Bauraum zurückzuführen. Dadurch schwindet das Material weniger und die thermische Spannung wird reduziert [BAÖ21, S. 548]. Gleichzeitig ist in Kapitel 5.3.1 gezeigt worden, dass bei einer Bauraumtemperatur von 220 °C hohe Schweißnahtfestigkeiten erzielt werden. Ausgeprägte Festigkeitswerte können dafür sorgen, dass Spannungen im Bauteil nicht durch entstehende Verformungen kompensiert werden. Eine Anpassung der Düsentemperaturen hat keinen signifikanten Einfluss auf die Verformung der Probekörper.

6.2.1.2 Einfluss der Position im Bauraum

Der Einfluss der Position im Bauraum auf die Verformung der Verzugsprobekörper ist in Bild 6-7 veranschaulicht.

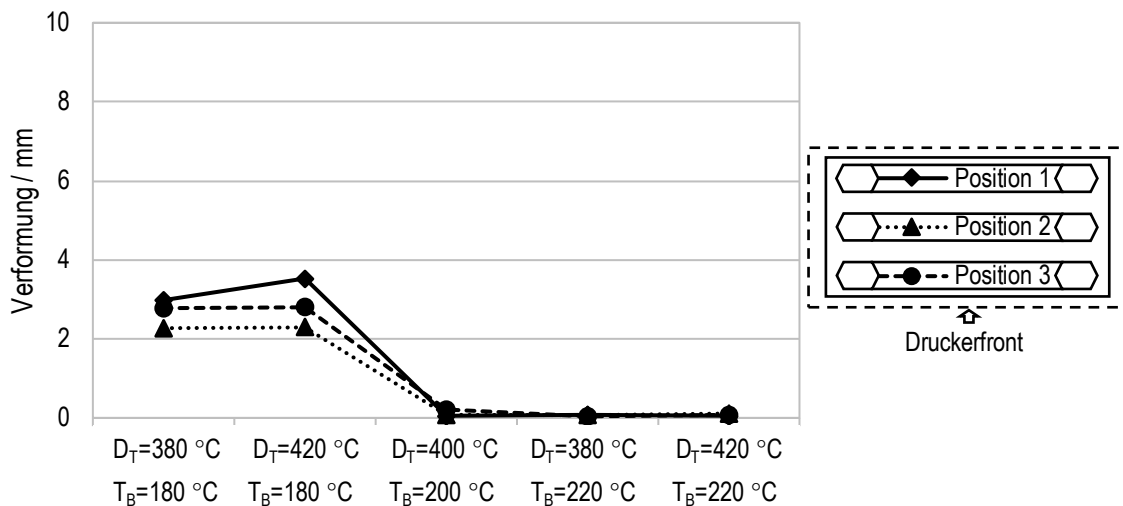


Bild 6-7: Verformung von Ultrafuse PPSU in Abhängigkeit von der Position im Bauraum bei verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen (in Zusammenarbeit mit FUHRMANN, vgl. [Fuh19])

Für die Bewertung werden nur Probekörper betrachtet, die bei einer Temperatur im Bauraum von 180 °C gefertigt sind. Die anderen Versuchspunkte sind nahezu verzugsfrei und daher ist es auf dieser Grundlage nicht sinnvoll einen Positionseinfluss herzuleiten. Es kann festgehalten werden, dass der Verzug der Probekörper an Position zwei (mittlere Position) tendenziell geringer ausfällt. Dies lässt auf stabilere Temperaturbedingungen, aufgrund eines möglicherweise abschirmenden Effekts durch die anderen Probekörper zu den Außenwänden, schließen.

6.2.2 PEEK

Neben dem Einfluss der Verarbeitungsparameter sowie dem Einfluss der Bauraumpositionierung auf den Bauteilverzug, wird für das VESTAKEEP 3300G aufgrund des teilkristallinen Materialverhaltens auch die Kristallinität im nachfolgenden Unterkapitel berücksichtigt.

6.2.2.1 Einfluss der Verarbeitungsparameter

Die Verformung der Probekörper wird in Abhängigkeit von der Düsen- und Bauraumtemperatur in Bild 6-8 durch eine grafische Auswertung präsentiert.

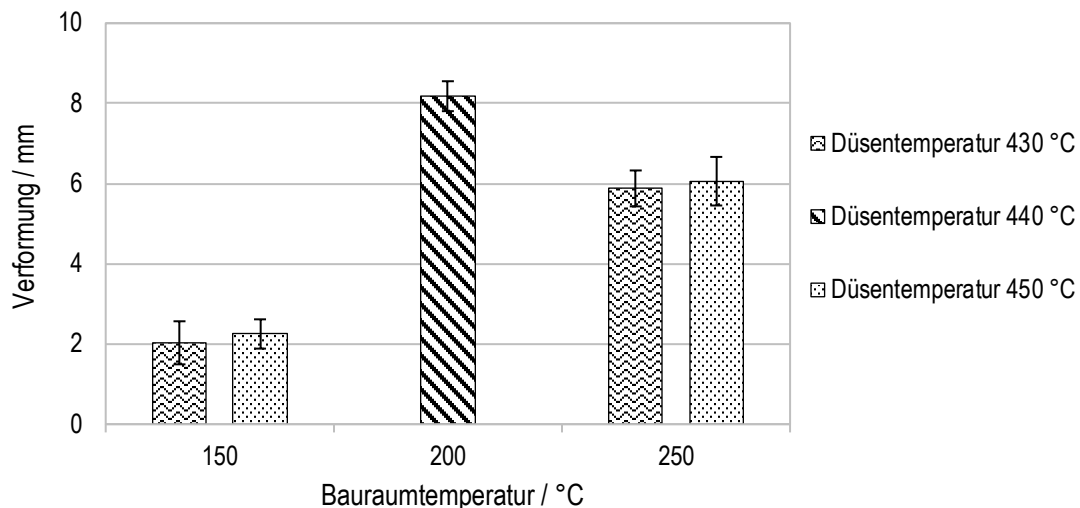


Bild 6-8: *Verformung als Kenngröße des Bauteilverzugs von VESTAKEEP 3300G in Abhängigkeit von verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen (in Zusammenarbeit mit FUHRMANN, vgl. [Fuh19])*

Bild 6-8 zeigt, dass der Bauteilverzug signifikant durch die Bauraumtemperatur beeinflusst wird. Es liegen deutliche Verformungsunterschiede zwischen der maximalen Verzugsausprägung bei 200 °C Bauraumtemperatur und der minimal auftretenden Verformung bei 150 °C Bauraumtemperatur vor. Der Temperaturbereich mit 150 °C liegt knapp unter der $T_g=153,7$ °C. Das bedeutet, dass die amorphen Anteile im eingefrorenen Zustand vorliegen und sich dadurch die Materialfestigkeit erhöht. Die auftretenden Spannungen können dadurch besser aufgenommen werden. Oberhalb der Glasübergangstemperatur ist die Bauteilstruktur allerdings anfälliger für Verformungen, da die amorphen Bereiche keinen Widerstand gegen die Spannungen liefern [TG15, S. 254]. Dies führt in den Untersuchungen dazu, dass die Spannungen durch eine resultierende Verformung abgebaut werden und bei Bauraumtemperaturen über 150 °C deutlich ausgeprägte Bauteilverformungen detektiert werden. Ausgehend von 200 °C nimmt die Verformung durch eine Erhöhung der Temperatur im Bauraum auf 250 °C wieder ab. Damit zeigt sich, dass durch eine Reduzierung des Temperaturgradienten zwischen Düse und Bauraum, welche durch eine Steigerung der Bauraumtemperatur umgesetzt wird, schwindungsinduzierte thermische Spannungen reduziert werden. Der Einfluss der Düsentemperatur auf den Bauteilverzug ist im betrachteten Temperaturbereich von 20 K gering. Die Unterschiede liegen innerhalb der Standardabweichung.

Eine separate Betrachtung der Kristallinität ist erforderlich, da die Fertigungszeit der Verzugprobekörper kürzer ist als die der Schweißnahtprobekörper. Dadurch ist das Material einem anderen Temperatureinfluss ausgesetzt. Zur Analyse der Kristallinität werden Fertigungspunkte bei 150 °C und 250 °C Bauraumtemperatur untersucht, um anschließend im Vergleich mit den bisherigen Erkenntnissen eine Tendenz abzuleiten. Die Auswertung der Kristallinität (vgl. Anhang, Bild A3-1) ergibt, dass die Kristallisationsgrade mit den

Ergebnissen der Untersuchung der Schweißnahtqualität (vgl. Kapitel 5.5) vergleichbar sind und auf einem ähnlichen Niveau liegen. Von 150 °C bis 250 °C liegt ein nahezu konstanter Kristallisationsgrad vor und anhand dessen ist festzustellen, dass der Kristallinität in diesem Temperaturbereich kein gesonderter Stellenwert bezüglich des Verzugsverhaltens zugewiesen werden kann.

Der ermittelte Bauteilverzug bei 150 °C Bauraumtemperatur liefert neben reduzierten Diffusionsvorgängen einen weiteren Erklärungsansatz für die schwächere Schweißnahtfestigkeiten (vgl. Kapitel 5.3.2.2). Denn die geringe Verformung ist ein Indiz dafür, dass die vorliegenden thermischen Spannungen durch die Bauteilstruktur aufgenommen werden. Durch die aufgebauten Eigenspannungen wird dann wiederum die Schweißnahtfestigkeit beeinträchtigt. Aus den Ergebnissen bei 200 °C Bauraumtemperatur lässt sich ableiten, dass durch die starke Verformung der Fertigungsprozess gestört wird und daraus unzureichende Schweißnahtfestigkeiten resultieren.

Zusammenfassend kann gezeigt werden, dass während der Verarbeitung von PEEK im FDM die Materialschrumpfung zu spannungsinduzierten Verzugerscheinungen führt. Durch Temperaturen im Bauraum von 250 °C kann aufgrund des kleineren Temperaturgradienten zwischen Düsen- und Bauraumtemperatur die spezifische Volumenänderung verringert und damit die auftretende Verformung reduziert werden. Die geringsten Verformungen werden bei 150 °C Bauraumtemperatur erzielt, allerdings ist diese Temperatur aufgrund der unzureichenden Schweißnahtqualität auszuschließen. Die Ergebnisse bekräftigen den Stellenwert der Verwendung einer geeigneten FDM-Maschine und der Kontrolle des Abkühlvorgangs durch die eingestellten Prozessparameter bei der Verarbeitung von Hochleistungspolymeren wie PEEK.

In Kapitel 6.3 werden die Untersuchungen zum Einfluss der Bauraumtemperatur basierend auf den Ergebnissen vertieft. Das Ziel ist es, das Maximum der Bauteilverformung einzugrenzen und die Entwicklung des Bauteilverzugs detaillierter zu beschreiben.

6.2.2.2 Einfluss der Position im Bauraum

Der Einfluss der Position im Bauraum auf die Verformung der Verzugsprobekörper ist in Bild 6-9 veranschaulicht. Das Diagramm präsentiert den Verlauf der Verformung für die einzelnen Positionen in Abhängigkeit von den verschiedenen Verarbeitungstemperaturen.

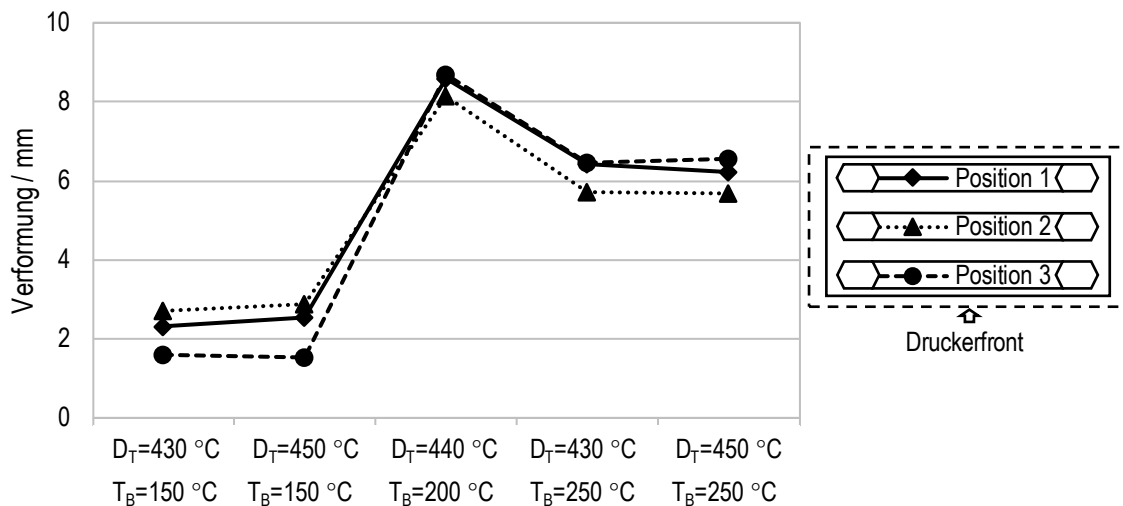


Bild 6-9: Verformung von VESTAPEEK 3300G in Abhängigkeit von der Position im Bauraum bei verschiedenen Düsen- und Bauraumtemperaturen (in Zusammenarbeit mit FUHRMANN, vgl. [Fuh19])

Die Auswertung der positionsbezogenen Verformung zeigt, dass es über den gesamten Temperaturbereich keinen eindeutigen Einfluss der Position im Bauraum auf die Verformung gibt. Es ist zu erkennen, dass ab 200 °C Bauraumtemperatur die mittlere Position (Position 2) die geringste Verformung aufweist. Dies spricht für stabilere Temperaturbedingungen, da die Positionen eins und drei dichter an den Wänden der Bauraumisolierung liegen und eine Abfuhr von Wärme nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann. Die resultierenden Verformungen unterscheiden sich aber nur geringfügig, sodass die experimentellen Untersuchungen unabhängig von der Bauteilposition ausgewertet werden können.

6.3 Einfluss eines nachgelagerten Temperprozesses auf den Bauteilverzug

Die Motivation für die Untersuchung und die Berücksichtigung der Auswirkung eines Temperprozesses ist in Kapitel 5.5 bereits thematisiert. Insbesondere auf den Bauteilverzug kann das Tempern als nachträgliches Wärmebehandlungsverfahren einen Einfluss haben, da während des Vorgangs mechanische Spannungen abgebaut werden. Der Temperprozess wird allerdings nicht unter Formzwang durchgeführt und die auftretende Verformung des Bauteils kann aufgrund der Wärmebehandlung auch zunehmen und dadurch die Maßhaltigkeit erheblich beeinträchtigen. Die Untersuchungen sind notwendig, da Bauteile aus PEEK aufgrund des Materialprofils erheblichen Belastungen und anspruchsvollen Umgebungsbedingungen mit teils hohen Wärmeentwicklungen ausgesetzt werden können. Eine Beeinträchtigung der Bauteilfunktionalität durch temperaturbedingte Änderungen der Materialeigenschaften muss ausgeschlossen werden. Deshalb ist es zur Erreichung der finalen Bauteileigenschaften notwendig, einen Temperprozess durchzuführen. Das Ziel der Untersuchungen ist es, den Einfluss des Temperns, unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Eigenschaften sowie der verschiedenen Verarbeitungstemperaturen, anhand des

Bauteilverzugs auszuwerten. Ein Teil der Untersuchungen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, ist in Zusammenarbeit mit TISSEN im Rahmen einer Studienarbeit durchgeführt worden (vgl. [Tis22]).

6.3.1 Aufbau der experimentellen Untersuchungen

Die Untersuchungen werden mit dem Material VESTAKEEP 3300G durchgeführt, da sich das Verzugsverhalten von Ultrafuse PPSU als unkritisch erwiesen hat. Die Auswahl der Verarbeitungsparameter basiert auf den bisherigen Ergebnissen der Untersuchungen des Verzugsverhaltens. In der nachfolgenden Tabelle 6-1 sind die verwendeten Verarbeitungstemperaturen dargestellt.

Tabelle 6-1: Prozessparameter zur Untersuchung der Auswirkung des Temperprozesses auf den Bauteilverzug

Prozessparameter	Einheit	VESTAKEEP 3300G
Düsentemperatur (T_D)	°C	450
Bauraumtemperatur (T_B)	°C	150, 175, 200, 225, 250

Aus den Kapiteln 6.2.2.1 und 5.3.2.2 geht hervor, dass die Düsentemperatur keinen signifikanten Einfluss auf den Bauteilverzug hat, jedoch unter der Berücksichtigung der Schweißnahtfestigkeit eine Düsentemperatur von 450 °C auszuwählen ist. Die Temperatur des Bauraums wird in 25 K Schritten von 150 °C auf 250 °C erhöht. Dadurch wird der untersuchte Temperaturbereich durch Zwischenstufen erweitert, mit dem Ziel, die Aussagegüte zur Entwicklung des Bauteilverzugs zu verbessern.

Die Untersuchung des Einflusses des Temperprozesses erfolgt durch den Vergleich der auftretenden Verformungen von getemperten mit nicht getemperten Probekörpern. Die verwendeten Temperschnitte sind in Kapitel 5.5.1 in Tabelle 5-6 dargestellt.

6.3.2 Experimentelle Untersuchungen des Bauteilverzugs

Die Auswertung der experimentellen Untersuchungen teilt sich in zwei aufeinander aufbauende Themen auf. Zu Beginn wird der Einfluss der Bauraumtemperatur auf die nicht getemperten Probekörper analysiert. Anschließend wird der Effekt des Temperprozesses auf den Bauteilverzug bewertet und durch einen Vergleich zwischen nicht getemperten und getemperten Probekörpern analysiert.

6.3.2.1 Einfluss der Bauraumtemperatur

In Bild 6-10 ist die Verformung bei 450 °C Düsentemperatur und den jeweils untersuchten Bauraumtemperaturen 150 °C, 175 °C, 200 °C, 225 °C und 250 °C zusammengefasst.

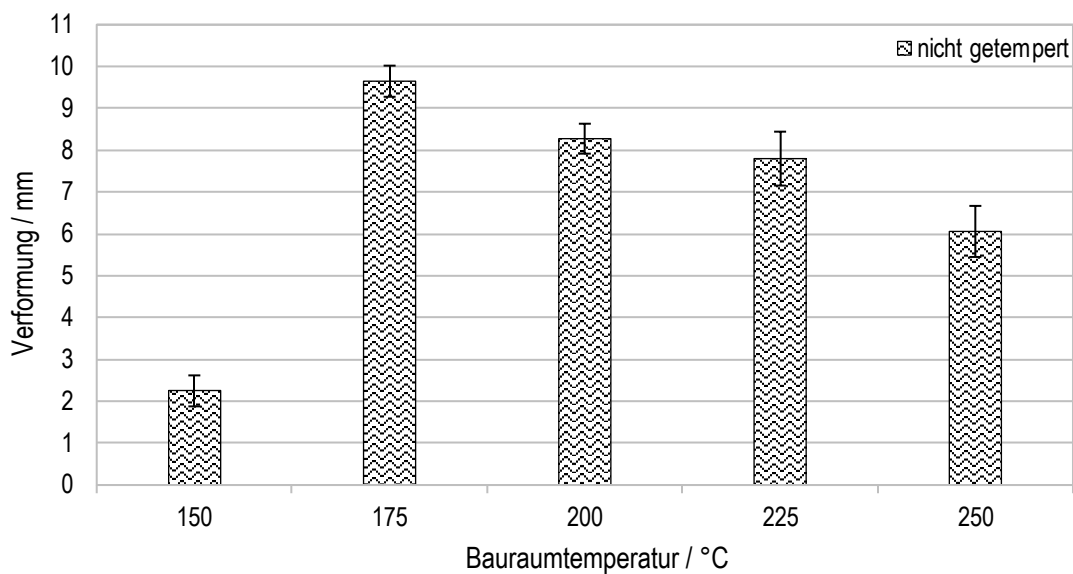


Bild 6-10: Verformung als Kenngröße des Bauteilverzugs in Abhängigkeit von verschiedenen Bauraumtemperaturen und konstanter Düsentemperatur mit $T_D=450\text{ °C}$ (in Zusammenarbeit mit TISSEN, vgl. [Tis22])

Die ermittelten Bauteilverformungen bestätigen die bisherigen Erkenntnisse über den Einfluss der Verarbeitungstemperaturen auf das Verzugsverhalten von PEEK. Durch die Darstellung in Bild 6-10 wird verifiziert, dass sowohl die Bauraumtemperatur als auch der Temperaturgradient zwischen Düse und Bauraum einen signifikanten Einfluss auf die Verformungen haben. Denn bei 175 °C Bauraumtemperatur werden die maximalen Verformungen der Messreihe detektiert. Aus dem großen Temperaturgradienten zwischen der Düse mit 450 °C und dem Bauraum mit 175 °C resultieren aufgrund der Materialschwindung während des Abkühlvorgangs Spannungen. Die Temperatur im Bauraum liegt oberhalb der Glasübergangstemperatur ($T_g=153,7\text{ °C}$), die Molekülbeweglichkeit ist erhöht und die amorphen Bereiche liefern nur einen reduzierten Widerstand gegen auftretende Spannungen in der Bauteilstruktur. Infolgedessen kommt es zu einem erheblichen Bauteilverzug, der durch eine Reduzierung des Temperaturgradienten mithilfe einer Temperaturerhöhung im Bauraum verringert werden kann. Der resultierende Abfall der gemessenen Verformung zeigt einen linearen Zusammenhang, denn die Auswertung der Korrelation zwischen Verformung und Bauraumtemperatur ergibt eine lineare Abhängigkeit mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,9595 (vgl. Anhang, Bild A3-2).

6.3.2.2 Einfluss des Temperprozesses

Zur Analyse des Einflusses des Temperprozesses auf den Bauteilverzug werden die Verformungen der getemperten mit den nicht getemperten Probekörpern verglichen. Der Vergleich ist nachfolgend in Bild 6-11 dargestellt und zeigt die ermittelten Verformungen bei 450 °C Düsentemperatur über den verschiedenen Bauraumtemperaturen.

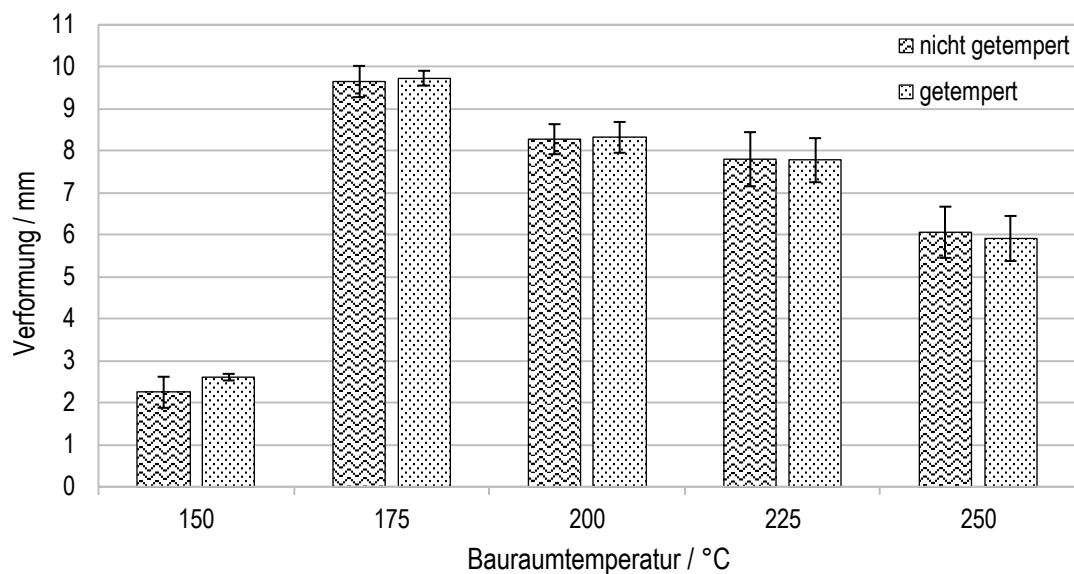


Bild 6-11: Verformung als Kenngröße des Bauteilverzugs in Abhängigkeit von verschiedenen Bauraumtemperaturen und konstanter Düsentemperatur mit $T_D=450$ °C im Vergleich zwischen getemperten und nicht getemperten Probekörpern (in Zusammenarbeit mit TISSEN, vgl. [Tis22])

Die Auswertung ergibt, dass bei einer Bauraumtemperatur von 150 °C durch einen nachträglichen Temperprozess der Bauteilverzug zunimmt. Die gemessene Verformung liegt mit 2,61 mm aber auf einem sehr niedrigen Niveau und gibt gleichzeitig die minimale Verformung nach dem Tempern an. Ab 175 °C Bauraumtemperatur sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den getemperten und nicht getemperten Probekörper zu erkennen. Dies zeigt, dass die Bauteilverformung durch einen nachträglichen Temperprozesses kaum beeinflusst wird. Zudem bestätigen die Ergebnisse die Erkenntnisse der Kristallinitätsuntersuchungen, in denen ein gesättigter Kristallisationsgrad ermittelt worden ist. Denn Veränderungen der Kristallinität durch eine Reorganisation oder Verdichtung der inneren Kristallstruktur würden zu einer erhöhten Materialschrumpfung führen.

6.4 Zusammenfassung und abgeleitete Verarbeitungsempfehlung

In diesem Kapitel ist der prozessbedingte Bauteilverzug während des FDM-Prozesses für die Hochleistungskunststoffe PPSU und PEEK analysiert worden. Die verwendete Methode ermöglicht eine quantitative Einordnung des materialspezifischen Verzugsverhaltens und ist erfolgreich für die verwendeten Hochleistungskunststoffe im Hochtemperaturbereich validiert. Mithilfe der Untersuchungen kann das materialspezifische Prozessverständnis erheblich ausgebaut werden.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass PPSU knapp unter der Glasübergangstemperatur bei 220 °C keine Verzugserscheinungen aufweist und sehr gut zu verarbeiten ist.

Bauraumtemperaturen von 180 °C sollten für das PPSU ausgeschlossen werden. Die Verarbeitung von PEEK im FDM ist deutlich anspruchsvoller und die Probekörper zeigen in Abhängigkeit von den Prozessparametern signifikante Verformungen. In den Untersuchungen hat die Düsentemperatur nur einen geringen Einfluss auf den Bauteilverzug und unter Berücksichtigung der Schweißnahtfestigkeit ist die Empfehlung zu einer Düsentemperatur von 450 °C erarbeitet worden. Die Temperaturen im Bauraum sind von entscheidender Bedeutung für den Bauteilverzug. Es lässt sich festhalten, dass Temperaturen zwischen der Glasübergangstemperatur ($T_g=153,7$ °C) und 200 °C für die Verarbeitung von PEEK nicht geeignet sind. Während einer schrittweisen Erhöhung der Bauraumtemperatur von 175 °C auf 250 °C ist eine kontinuierliche Reduzierung des Bauteilverzugs festgestellt worden. Auch unter Berücksichtigung der empfohlenen Prozesskette zur Verarbeitung von PEEK, die zum Einstellen der finalen Materialeigenschaften eine Wärmebehandlung von PEEK vorsieht [Evo21a-ol, S. 30f.], kann die Bedeutung eines beheizten Bauraums mit Temperaturen von 250 °C herausgestellt werden. Eine nachträgliche Wärmebehandlung durch einen Temperprozess zeigt nahezu keinen Einfluss auf den Bauteilverzug von Probekörpern, die bei Bauraumtemperaturen zwischen 175 °C und 250 °C gefertigt worden sind. Somit kann dieser Fertigungsschritt sowie die nötige Peripherie durch eine Temperierung des Bauraums ersetzt und Ressourcen eingespart werden. Aus den Untersuchungen des Verzugsverhaltens sowie der Schweißnahtqualität lassen sich zusammenfassend eine Düsentemperatur von 450 °C und eine Bauraumtemperatur von 250 °C als optimierte Prozessparameter für die Verarbeitung von PEEK ableiten.

7 Modellbildung zur Prädiktion der Schweißnahtfestigkeit faserverstärkter Materialien

Nachdem ein Einfluss der Düsen- und der Bauraumtemperatur auf die Schweißnahtfestigkeit von PEEK Bauteilen identifiziert werden konnte, werden die Untersuchungen ausgeweitet, um neben den Einflüssen der Prozessparameter ihre Wechselwirkungen zu analysieren. Durch empirisch ermittelte Prozessdaten und deren statistische Auswertung wird ein Vorhersagemodell für die Schweißnahtfestigkeit von unverstärktem PEEK erarbeitet. Basierend auf dem Modell wird anschließend ein allgemeingültiges Konzept zur Vorhersage der Schweißnahtfestigkeit faserverstärkter Materialien im FDM entwickelt. Der Ansatz soll physikalische Zusammenhänge berücksichtigen und eine Generalisierung sowie folglich die Übertragbarkeit auf andere Modelle oder Simulationen ermöglichen. Hierzu schließt sich eine experimentelle Validierung an.

7.1 Vorgehensweise zur Entwicklung des Vorhersagemodells

Mit der statistischen Versuchsplanung wird im Rahmen dieser Arbeit gezielt auf eine etablierte Methode der Datengenerierung und vor allem der Datenanalyse zurückgegriffen. Durch die statistische Versuchsplanung ist es möglich, ein Vorhersagemodell zu entwickeln, das die Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen für einen festgelegten Prozessbereich gut abbilden kann. Dies ist notwendig, weil das erzeugte Modell als Basis für die Entwicklung eines Ansatzes zur Berücksichtigung des Einflusses von Faserverstärkungen auf die Schweißnahtfestigkeit dienen soll. In diesem Kapitel werden die statistische Versuchsplanung und die Auswahl der Prozessparameter sowie die experimentelle Vorgehensweise vorgestellt.

7.1.1 Statistische Versuchsplanung

Zur Beschreibung der Einflüsse einzelner Prozessparameter sowie der Bestimmung von Interaktionen bzw. Wechselwirkungen wird die statistische Versuchsplanung verwendet. Diese dient der effizienten Planung sowie Auswertung von Versuchsreihen und beruht auf experimentellen Daten [SvH17, S. 3ff.]. Der Vorteil dieser Methode ist, dass der Ansatz in der Regel direkt zu anwendungsorientierten und verwertbaren Ergebnissen führt [Bäh20, S. 26]. Auf diesem Weg können Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen verstanden und modelliert werden. Bei einer ausreichend großen experimentellen Datenbasis kann diese Methode im Vergleich zur physikalischen Modellbildung das Systemverhalten innerhalb eines definierten Parameterraums besser abbilden und exaktere Ergebnisse liefern [Fuh18, S. 49]. Dies gilt allerdings nur unter der Berücksichtigung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses während der Modellierung und eines daraus resultierenden geringeren Detaillierungsgrads des physikalischen Modells.

Aufbauend auf den vorangegangenen Untersuchungen wird neben der Düsen- und Bau-
raumtemperatur auch der Volumenstrom analysiert. Die Prozessparameter werden in der
statistischen Versuchsplanung als Faktoren bezeichnet. Aufgrund der bisherigen Ergeb-
nisse kann ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen den untersuchten Prozessparame-
tern und der Schweißnahtfestigkeit nicht ausgeschlossen werden. Deshalb wird mit dem
Central Composite Design (CCD) ein Versuchsplan ausgewählt, mit dem sich auch nicht
lineare Zusammenhänge untersuchen lassen [SvH17, S. 39f.]. Das CCD basiert auf einem
zweistufigen Versuchsplan, der sich für drei Faktoren grafisch als Würfel darstellen lässt.
Die einzelnen Versuchspunkte entsprechen den Ecken des Würfels (vgl. Bild 7-1 a)).

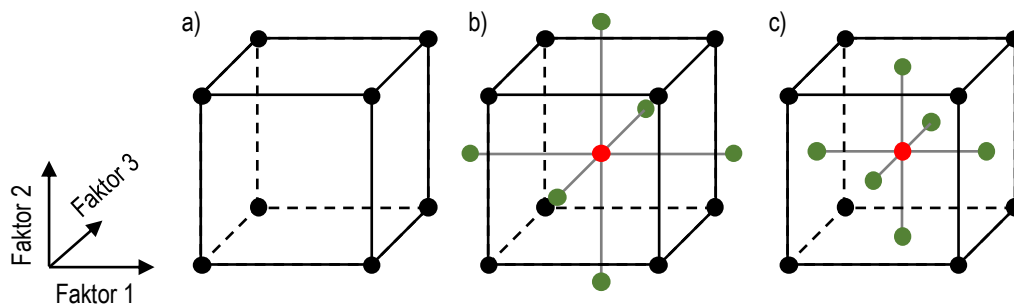


Bild 7-1: Grafische Darstellung eines a) zweistufigen Versuchsplans, b) Central Composite Designs und c) Face Centered Designs mit jeweils drei Faktoren

Wie in Bild 7-1 b) dargestellt ist, wird bei einem CCD der zweistufige Versuchsplan um einen Zentralpunkt (rot) und Axialpunkte (grün) erweitert. Die Umsetzung ist im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht praktikabel, da aufgrund von maschinenspezifischen Limitationen der maximalen Düsen- und Bauraumtemperatur eine Realisierung höhere Stufenabstände nicht möglich ist. Als Alternative wird eine Variation des CCD ausgewählt, bei der die vom Zentralpunkt ausgehenden mittleren Axialpunkte im gleichen Stufenabstand wie die Eckpunkte liegen (vgl. Bild 7-1 c)). Dieses Vorgehen bei technischen Einschränkungen der Prozessparameter und die resultierende Verwendung eines sogenannten Face Centered Designs wird durch Literaturangaben gestützt [SvH17, S. 42]. Der Aufbau und die experimentelle Umsetzung des Versuchsplans werden nachfolgend erläutert.

7.1.2 Auswahl der Prozessparameter und experimentelle Vorgehensweise

Nach der Festlegung auf einen Versuchsplan mit einem Face Centered Design werden die zu untersuchenden Intervalle der Prozessparameter bestimmt. Der Fokus liegt auf den thermischen Einflussfaktoren und ist durch die Düsen- und Bauraumtemperatur vertreten. Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen für die Verarbeitung von PEEK im FDM liegen die Temperaturintervalle der Düsentemperatur (T_D) bei 430 – 450 °C und für die Bauraumtemperatur (T_B) bei 220 – 260 °C. Die jeweiligen maximalen Verarbeitungsspezifikationen entsprechen den technischen Prozessgrenzen der verwendeten FDM-Maschine (vgl.

Kapitel 4.3.1). Zudem wird der Materialvolumenstrom aus einer Düse mit einem Durchmesser von 0,6 mm zwischen 2,945 mm³/s und 6,627 mm³/s variiert. Der Materialvolumenstrom ist als Vergleichsgröße ausgewählt, da viele Prozessparameteranpassungen im FDM in der Konsequenz den Materialvolumenstrom beeinflussen bzw. verändern. Veränderungen der Schichthöhe oder der Strangbreite bei konstanter Ablagegeschwindigkeit führen beispielsweise dazu, dass mehr oder weniger Material ausgetragen werden muss. Die untere Intervallgrenze von 2,945 mm³/s entspricht dem Materialvolumenstrom pro Sekunde aus einer Düse mit einem Durchmesser von 0,4 mm und den in dieser Arbeit verwendeten Prozessparametern. Ein Volumenstrom von 6,627 mm³/s resultiert aus den Prozessparametern für eine 0,6 mm Düse (vgl. Kapitel 4.3.2, Tabelle 4-4) und wird unter der Annahme einer idealisierten elliptischen Strangform berechnet. Der Volumenstrom wird durch eine Anpassung der Ablagegeschwindigkeit ($v_{\text{Strangablage}}$) variiert. Daher wird in den Auswertungen durch die Ablagegeschwindigkeit auf den Volumenstrom referenziert. Die verwendeten Prozessparameter sind nachfolgend in der Tabelle 7-1 zusammengefasst.

Tabelle 7-1: Übersicht der Prozessparameter des Face Centered Designs

Prozessparameter	Stufenabstände des VESTAKEEP 2000G		
Düsentemperatur / °C	430	440	450
Bauraumtemperatur / °C	220	240	260
Strangablagegeschwindigkeit / mm/s	13,4	21,7	30
Volumenstrom / mm ³ /s	2,960	4,793	6,627

Die Versuchsplanung und die Zusammenstellung der Versuchspunkte werden mit der Software Design-Expert 13 umgesetzt. Um die Genauigkeit des Modells zu steigern, werden die Versuchspunkte repliziert. Die Eckpunkte werden jeweils zwei Mal, die Axialpunkte drei Mal und der Zentralpunkt fünf Mal gefertigt. Auf diese Weise ergeben sich 39 Versuchspunkte, die dem Anhang (vgl. Tabelle A4-1) durch eine tabellarische Darstellung des Versuchsplans entnommen werden können.

Die Untersuchungen erfolgen mit dem Material VESTAKEEP 2000G und die Schweißnahtfestigkeiten werden unter der Verwendung der Methode zur Beurteilung der Schweißnahtqualität (vgl. Kapitel 5.2) ermittelt und analysiert. Weiterführend wird während der experimentellen Validierung des Ansatzes zur Vorhersage der Schweißnahtfestigkeiten faserverstärkter Materialien das VESTAKEEP 2000 CF15 und das VESTAKEEP 2000 CF20 verarbeitet.

7.2 Auswertung der experimentellen Ergebnisse

Im Folgenden werden die ermittelten Schweißnahtfestigkeiten aufbereitet, mit dem Ziel, durch die grafischen Darstellungen die Auswirkungen der Prozessparametervariationen zu veranschaulichen und anschließend analysieren zu können. Ein Teil der Untersuchungen,

die in diesem Kapitel vorgestellt werden, ist in Zusammenarbeit mit SCHNEIDER im Rahmen einer Masterarbeit durchgeführt worden (vgl. [Sch21]). Weiterführend erfolgt in Kapitel 7.3 die statistische Auswertung der Schweißnahtfestigkeiten. Die Schweißnahtfestigkeit zwischen den Schichten stellt im prozessspezifischen FDM-Kontext den wichtigsten Faktor zur Beurteilung der mechanischen Belastbarkeit dar. In Bild 7-2 ist eine grafische Darstellung des Versuchsplans samt den experimentell bestimmten durchschnittlichen Schweißnahtfestigkeiten präsentiert. Die Ergebnisse können auf diesem Weg zusammenfassend dargestellt werden.

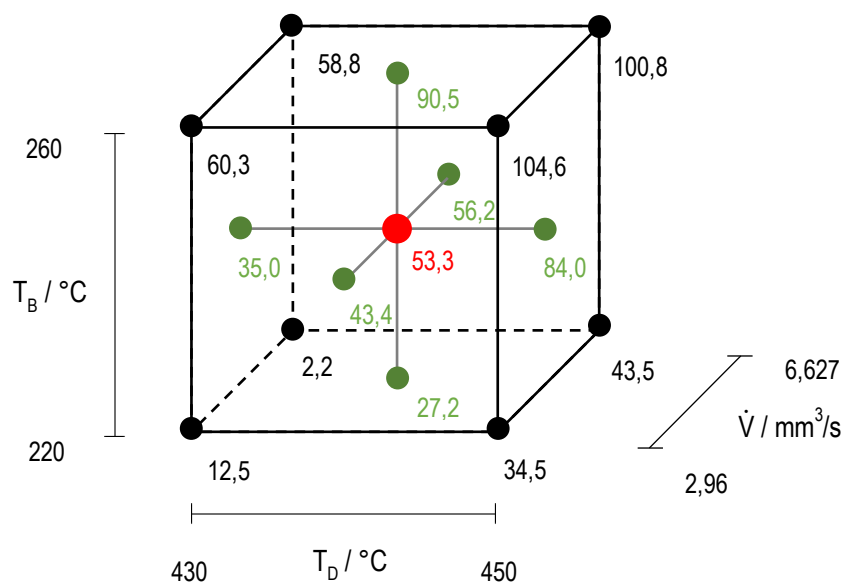


Bild 7-2: Grafische Darstellung der durchschnittlichen Schweißnahtfestigkeiten / MPa der Versuchspunkte im Face Centered Design (in Zusammenarbeit mit SCHNEIDER, vgl. [Sch21])

Es ist zu erkennen, dass insbesondere die Schweißnahtfestigkeiten bei einer Düsentemperatur von 430 °C und einer Bauraumtemperatur von 220 °C sehr gering sind und für die Verarbeitung des Materials nicht empfohlen können werden. Um den Einfluss sowohl der Düsentemperatur als auch der Bauraumtemperatur auf die Schweißnahtfestigkeit einordnen zu können, werden in Bild 7-3 Schweißnahtfestigkeiten bei verschiedenen Prozessparameterkombinationen dargestellt.

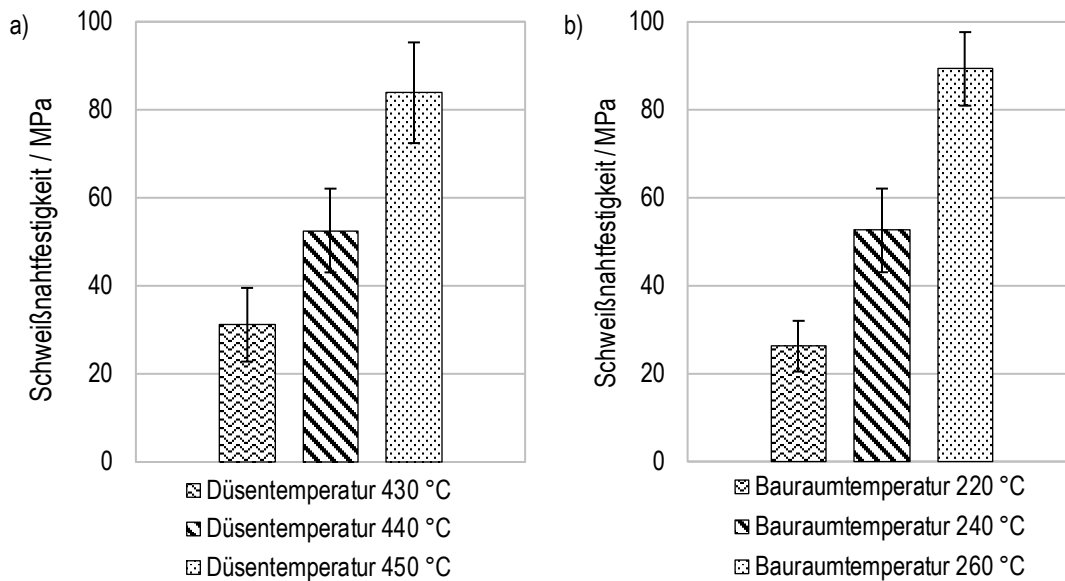


Bild 7-3: a) Schweißnahtfestigkeit in Abhängigkeit von der Düsentemperatur bei $T_B=240\text{ °C}$ und $v_{\text{Strangablage}}=21,7\text{ mm/s}$, b) Schweißnahtfestigkeit in Abhängigkeit von der Bauraumtemperatur bei $T_D=440\text{ °C}$ und $v_{\text{Strangablage}}=21,7\text{ mm/s}$ (in Zusammenarbeit mit SCHNEIDER, vgl. [Sch21])

Bild 7-3 a) zeigt die durchschnittliche Schweißnahtfestigkeit bei variierender Düsentemperatur und konstanter Bauraumtemperatur sowie konstanter Strangablagegeschwindigkeit, die sich auf den mittleren Prozessparameterstufen befinden. Aus dem Diagramm geht hervor, dass ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Düsentemperatur und Schweißnahtfestigkeit besteht. Auffallend ist, dass Probekörper, die mit den maximalen Verarbeitungstemperaturen gefertigt werden, teilweise in einem Winkel von 45° brechen. Dies ist ein charakteristisches Bruchbild eines Scherbruchs und deutet auf ein sprödes Materialverhalten hin. Aufgrund des Probedesigns und des Prüfaufbaus können Scher- und Torsionskräfte ausgeschlossen werden. Somit ist das Bruchbild ein Indiz für eine fortgeschrittene Diffusion in der Schweißnaht und deutet auf über mehrere Schichten ausgeprägte kristalline Phasen hin. Die hohe Festigkeit innerhalb der teilkristallinen Strukturen führt infolgedessen dazu, dass die Probe in den schwächeren amorphen Bereichen entlang der Kristallgrenzen versagt und nicht entlang der Schweißnaht zwischen den einzelnen Schichten.

In Bild 7-3 b) sind die Schweißnahtfestigkeiten in Abhängigkeit von der Bauraumtemperatur für die mittleren Faktorstufen der Düsentemperaturen und der Ablagegeschwindigkeit dargestellt. Die Auswertung des Diagramms ergibt, dass ein signifikanter Einfluss und ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Bauraumtemperatur und Schweißnahtfestigkeit besteht. Ein direkter Vergleich zwischen den Einflüssen der Düsentemperatur (siehe Bild 7-3 a)) und der Bauraumtemperatur ist allerdings aufgrund der verschiedenen Temperaturstufen nicht möglich. Für eine sowohl qualitative als auch quantitative Aussage wird deshalb in Kapitel 7.3 die statistische Auswertung herangezogen.

Die Strangablagegeschwindigkeit respektive der Volumenstrom weist im Gegensatz zu den betrachteten thermischen Prozessparametern in Bezug auf die Schweißnahtfestigkeiten keinen erkennbaren linearen Zusammenhang auf (vgl. Anhang, Bild A4-1). Die Schweißnahtfestigkeiten liegen auf einem vergleichbaren Niveau und damit ist kein eindeutiger Trend zwischen der Schweißnahtfestigkeit und der Ablagegeschwindigkeit des Strangs zu detektieren. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Untersuchungen von VAES et al., welche einen vernachlässigbaren Einfluss der Ablagegeschwindigkeit festgestellt haben [Vv21, S. 36]. Es ist zu beachten, dass der Einfluss der Ablagegeschwindigkeit und des damit zusammenhängenden Volumenstroms auf die mechanischen Eigenschaften aus der Literatur als ambivalent herausgearbeitet werden kann. Dies ist vor allem auf die mangelnde Berücksichtigung der jeweiligen Leistungen der Plastifiziereinheiten zum Aufschmelzen der Materialien zurückzuführen. In diesen Untersuchungen ist eine ausreichende Anlagenfähigkeit sichergestellt, indem das Aufschmelzverhalten für die verwendeten Temperaturbereiche simulativ betrachtet und ausgewertet wird (siehe Kapitel 5.4). Dadurch kann sowohl die Eignung zur Verarbeitung der Materialien gezeigt als auch die Beeinträchtigung der Ergebnislage durch Einflüsse der Plastifiziereinheit ausgeschlossen werden. Nachfolgend gilt es diese Erkenntnisse mit der Hilfe von statistischen Auswertungen zu verifizieren.

7.3 Modellierung der Schweißnahtfestigkeit

In den Kapiteln 5 und 6 wird ein Prozessfenster zur Verarbeitung von PEEK im FDM-Verfahren ermittelt und definiert. Basierend auf den Ergebnissen werden in dem vorangegangenen Kapitel umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Dieses Vorgehen ist dadurch motiviert eine Datenbasis zu schaffen, um die Schweißnahtfestigkeit in Abhängigkeit von den verwendeten Prozessparametern mit einer hohen Anpassungsgüte abbilden zu können. Hierfür werden die ermittelten Schweißnahtfestigkeiten nun weiterführend unter der Verwendung von Design-Expert 13 ausgewertet. Das Ziel ist es, durch die statistische Auswertung eine quantitative Aussage über den Einfluss der Düsentemperatur, der Bauraumtemperatur und des Volumenstroms auf die Schweißnahtfestigkeit von PEEK im FDM zu ermöglichen. Auf Grundlage dieser Analyse wird ein beschreibendes Regressionsmodell zur Vorhersage der Schweißnahtfestigkeit in Abhängigkeit von den drei Prozessparametern generiert.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass der Volumenstrom während der Strangablage einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Schweißnahtfestigkeit hat und deshalb ausgeschlossen werden kann. Die Ergebnisse der Varianzanalyse können dem Anhang (vgl. Tabelle A4-2) entnommen werden. Es zeigt sich, dass nur die linearen Einflüsse der Düsentemperatur und der Bauraumtemperatur signifikant sind. Die restlichen linearen und quadratischen Anteile sowie Wechselwirkungen haben keinen signifikanten Einfluss. Folglich

lässt sich das Modell aufgrund der Signifikanzwerte auf ein lineares Modell zur Vorhersage der Schweißnahtfestigkeit (Gleichung 6) reduzieren.

$$\sigma_{SN} = -1201,0767 + 2,06714 \cdot T_D + 1,43959 \cdot T_B \quad (6)$$

σ_{SN} = Schweißnahtfestigkeit / MPa

T_D = Düsentemperatur / °C

T_B = Bauraumtemperatur / °C

Die Gegenüberstellung der dimensionslosen Koeffizienten von T_D und T_B aus der Gleichung 6 liefert die Erkenntnis, dass die Düsentemperatur einen größeren Einfluss auf die Schweißnahtfestigkeit als die Bauraumtemperatur hat. Beide Prozessparameter haben einen linearen, festigkeitssteigernden Effekt auf die Schweißnahtfestigkeit und sind durch die maschinenspezifischen maximalen Prozesstemperaturen beschränkt. Zur Bewertung der Modellierungsgüte wird das Bestimmtheitsmaß R^2 (vgl. Anhang, Tabelle A4-3) herangezogen. Das Modell zur Ermittlung der Schweißnahtfestigkeit weist ein Bestimmtheitsmaß von 94,78 % auf. Dies zeigt, dass das Modell eine hohe Genauigkeit besitzt und zur Beschreibung der Schweißnahtfestigkeit in Abhängigkeit von der Düsen- und der Bauraumtemperatur eingesetzt werden kann. In Bild 7-4 sind die ermittelten Schweißnahtfestigkeiten den berechneten Schweißnahtfestigkeiten gegenübergestellt.

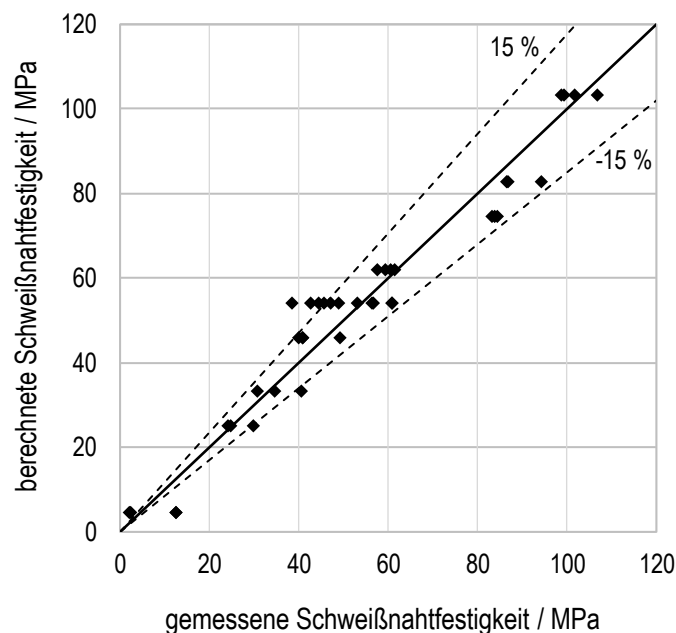


Bild 7-4: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Schweißnahtfestigkeiten für das unverstärkte VESTAKEEP 2000G

Die Schweißnahtfestigkeiten liegen nahezu alle innerhalb einer 15-prozentigen Abweichung. Auffallend ist, dass im Bereich hoher Schweißnahtfestigkeiten (> 60 MPa) die Daten

durch das Modell sehr genau abgebildet werden. Dies ist von Bedeutung, da unter Berücksichtigung der ermittelten Verarbeitungsempfehlung die Verarbeitung von PEEK im FDM unter erhöhten Prozesstemperaturen erfolgen sollte. Innerhalb dieses Arbeitsbereichs können Schweißnahtfestigkeiten von über 60 MPa erzielt werden. Damit wird der praxisrelevante Bereich durch das Modell hinreichend abgebildet.

Zusammenfassend ist durch die empirisch ermittelten Prozessdaten und deren statistische Auswertung ein Vorhersagemodell für die Schweißnahtfestigkeit von unverstärktem PEEK erarbeitet worden. Auf diesem Weg kann der Einfluss der Düsen- und der Baurautemperatur auf die Schweißnahtfestigkeit quantitativ eingeordnet und als signifikant bestätigt werden.

7.4 Ansatz zur Modellierung der Schweißnahtfestigkeit faserverstärkter Materialien

In diesem Kapitel wird zu Beginn eine Hypothese zum Einfluss von Faserverstärkungen auf die Schweißnahtfestigkeit vorgestellt. Es schließen sich Untersuchungen zur Verifizierung der Hypothese an, um auf diesem Weg einen generellen Ansatz zur Vorhersage der Schweißnahtfestigkeit faserverstärkter Materialien im FDM zu ermöglichen.

7.4.1 Hypothese zur Auswirkung der Faserverstärkung auf die Schweißnaht

Die nachfolgend vorgestellte Hypothese ist motiviert durch die Ergebnisse aus Kapitel 5.6, in dem der Einfluss von Faserverstärkungen auf die Schweißnahtqualität analysiert wird. Aus der Auswertung geht hervor, dass Faserverstärkungen zu einer Schwächung der Schweißnaht führen, da sich die Fasern während der Strangablage in Extrusionsrichtung orientieren und somit orthogonal zur späteren Belastung ausgerichtet sind. Überdies nimmt die Schweißnahtfestigkeit mit zunehmenden Faseranteil ab und die untersuchten Materialien weisen in Abhängigkeit von den Prozessparametern ein ähnliches Verhältnis der Schweißnahtfestigkeitsreduzierung auf. Basierend auf diesen Erkenntnissen lässt sich die Hypothese ableiten, dass durch eine Faserverstärkung die Schweißnaht im FDM um den Volumenanteil der Fasern geschwächt wird. In Bild 7-5 wird der hypothetische Ansatz schematisch veranschaulicht.

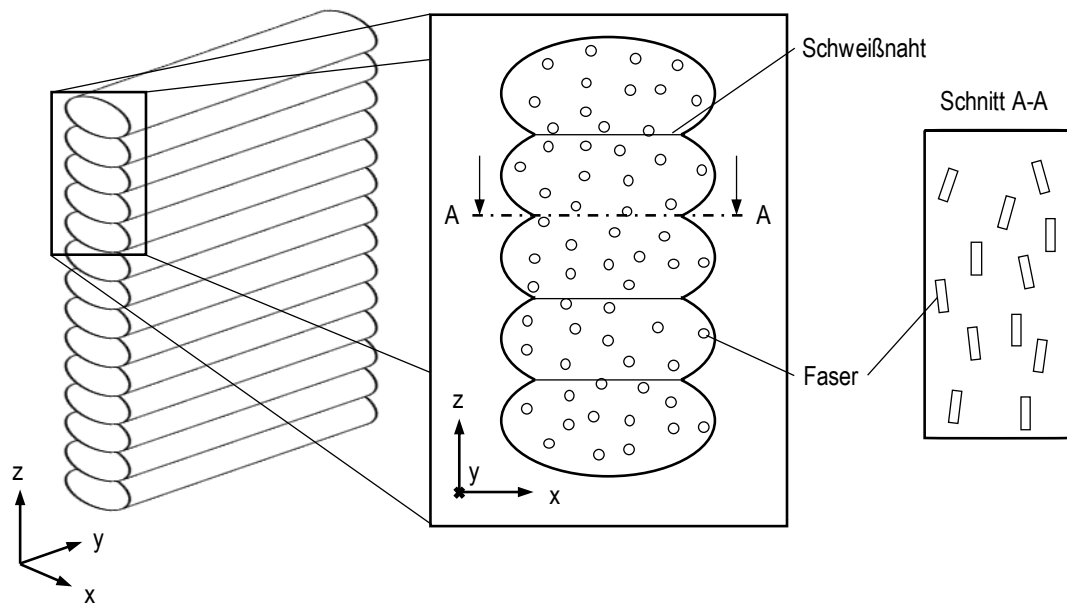


Bild 7-5: Schematische Darstellung der Reduzierung des Matrixanteils in der Schweißnaht durch Faserverstärkungen im FDM

Die Hypothese resultiert aus den folgenden Annahmen. Durch die beschriebene FDM-spezifische Faserorientierung orthogonal zur Belastungsrichtung haben die Fasern keine Verstärkungswirkung auf die Schweißnähte. Darüber hinaus reduziert der Faservolumenanteil den Matrixanteil in der Schweißnaht, der maßgeblich für die Schweißnahtfestigkeit verantwortlich ist. Denn intermolekulare Diffusionsvorgänge, die die Schweißnahtfestigkeit zwischen zwei Schichten beeinflussen, werden durch Faser-Matrix Interaktionen beeinträchtigt. Somit ist die Schweißnahtfestigkeit im FDM abhängig von dem Volumenanteil des Matrixmaterials in der Schweißnaht. Die Verifizierung dieser Hypothese ist in den nächsten Kapiteln beschrieben.

7.4.2 Erweiterung des Modells und Vorgehensweise zur Modellvalidierung

Das Ziel ist es, das bestehende Modell zur Vorhersage der Schweißnahtfestigkeit von unverstärktem PEEK (vgl. Kapitel 7.3, Gleichung 6) um den Ansatz zur Berücksichtigung des Faservolumenanteils in der Schweißnaht zu erweitern und anschließend zu validieren. Durch eine erfolgreiche Validierung des Modells kann die in Kapitel 7.4.1 aufgestellte Hypothese verifiziert werden.

Die Fasergewichtsanteile (ψ) sind vom Materialhersteller vorgegeben. Zur Bestimmung des Faservolumenanteils (φ_{Faser}) kann nach EHRENSTEIN die folgende Gleichung verwendet werden [Ehr06, S. 105].

$$\varphi_{\text{Faser}} = \frac{1}{1 + \frac{1-\psi}{\psi} \cdot \frac{\rho_{\text{Faser}}}{\rho_{\text{Matrix}}}} \quad (7)$$

Diese Gleichung lässt sich zur Vereinfachung umstellen und unter Verwendung des Volumenanteils der Matrix mit $\varphi_{Matrix} = 1 - \varphi_{Faser}$ folgendermaßen formulieren.

$$\varphi_{Matrix} = 1 - \frac{\rho_{Matrix} * \psi}{\rho_{Matrix} * \psi + \rho_{Faser} * (1 - \psi)} \quad (8)$$

Der Term gibt an wieviel Matrixmaterial in Abhängigkeit des Faservolumenanteils in der Schweißnaht vorhanden ist. Auf Basis der in Kapitel 7.4.1 aufgestellten Hypothese, dass die Schweißnaht im FDM um den Volumenanteil der Fasern geschwächt wird, lässt sich die Gleichung 6 (vgl. Kapitel 7.3) zur Modellierung der Schweißnahtfestigkeit von unverstärktem PEEK um den Matrixvolumenanteil (φ_{Matrix}) erweitern.

$$\sigma_{SN} = (-1201,0767 + 2,06714 * T_D + 1,43959 * T_B) * \left(1 - \frac{\rho_{Matrix} * \psi}{\rho_{Matrix} * \psi + \rho_{Faser} * (1 - \psi)}\right) \quad (9)$$

- σ_{SN} = Schweißnahtfestigkeit / MPa
- T_D = Düsentemperatur / °C
- T_B = Bauraumtemperatur / °C
- ψ = Fasergewichtsanteil
- ρ_{Matrix} = Dichte Matrix
- ρ_{Faser} = Dichte Faser

Das aufgestellte Modell berücksichtigt den Faservolumenanteil des zu verarbeitenden Materials und es lässt sich eine Schweißnahtfestigkeit in Abhängigkeit von der Düsen- und Bauraumtemperatur bestimmen. Für die Modellvalidierung kann auf bestehende Versuchsreihen dieser Arbeit zurückgegriffen werden. Die Untersuchungen erfolgen mit den bereits in Kapitel 5.6 verwendeten kohlenstofffaserverstärkten Materialien VESTKEEP 2000 CF15 und VESTAKEEP 2000 CF20 sowie dem unverstärktem VESTAKEEP 2000G. Unter der Verwendung des identischen Matrixmaterials ist es möglich den Einfluss von definiert veränderten Fasergehalten auszuwerten. Die verwendete Probekörpergeometrie ermöglicht eine gesonderte Analyse der Schweißnahtfestigkeit, indem aufgrund der Geometrie zahlreiche Einflussfaktoren ausgeschlossen werden können. Die Dichte der Kohlenstofffasern wird mit 1,8 g/cm³ angenommen [Kre08, S. 19]. Zur Validierung des Modells werden die experimentellen Untersuchungen mit den Standardprozessparametern aus Tabelle 4-4 in Kapitel 4.3.2 und den thermischen Verarbeitungsparametern der nachfolgenden Tabelle 7-2 durchgeführt.

Tabelle 7-2: Auswahl der thermischen Prozessparameter zur Modellvalidierung

Prozessparameter	Einheit	VESTAKEEP 2000G, VESTAKEEP 2000 CF15, VESTAKEEP 2000 CF20
Düsentemperatur (T_D)	°C	430, 450
Bauraumtemperatur (T_B)	°C	240, 260

Die aus den verschiedenen Prozessparameterkombinationen resultierenden Versuchspunkte werden um einen Versuchspunkt ($T_D=450\text{ °C}$, $T_B=220\text{ °C}$) erweitert, damit das Modell je Materialtyp mit fünf Messpunkten validiert werden kann.

7.4.3 Modellvalidierung

Die Validierung des Modells erfolgt durch die Gegenüberstellung der gemessenen Schweißnahtfestigkeiten mit den Schweißnahtfestigkeiten, die durch das aufgestellte Modell berechnet werden. Der Vergleich ist in Bild 7-6 dargestellt und eine Auflistung der verwendeten experimentellen Daten ist im Anhang (vgl. Tabelle A4-4) abgebildet.

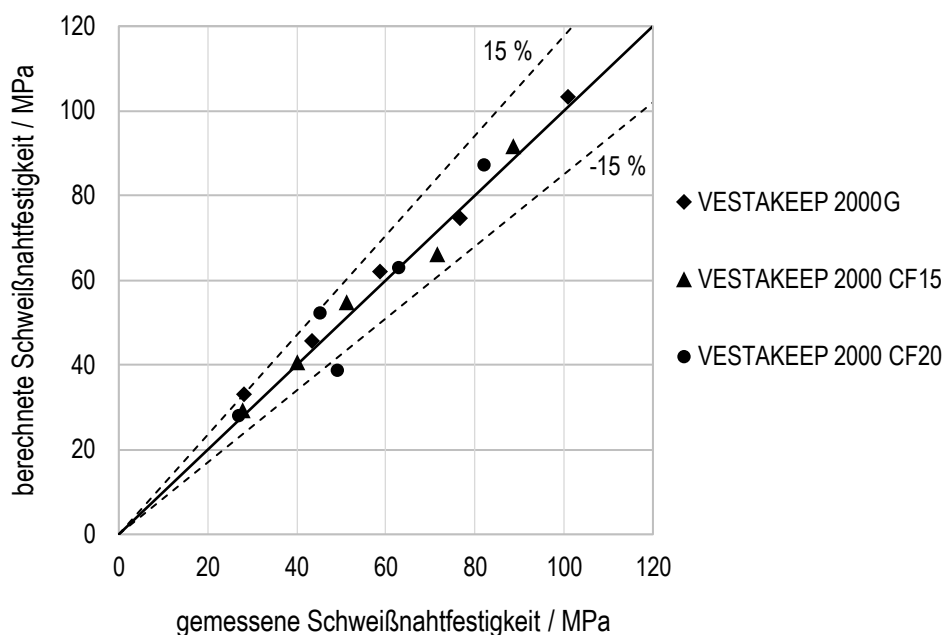


Bild 7-6: Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Schweißnahtfestigkeiten für das VESTAKEEP 2000G, VESTAKEEP 2000 CF15 und VESTAKEEP 2000 CF20

Die grafische Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Daten verdeutlicht, dass das Modell den funktionalen Zusammenhang der thermischen Verarbeitungsparameter, unter Berücksichtigung verschiedener Fasergehalte, auf die Schweißnahtfestigkeit treffend beschreibt. Nahezu alle Werte liegen innerhalb einer 15-prozentigen Abweichung zu der Idealgraden. Insbesondere die Ergebnisse der erarbeiteten, empfohlenen Prozessparameter für PEEK mit $T_D=450\text{ °C}$ und $T_B=260\text{ °C}$ zur Erzielung hoher mechanischer Eigenschaften zeigen eine hohe Übereinstimmung der Festigkeitswerte. Somit kann mit der Hilfe der experimentellen Datenbasis das Modell erfolgreich validiert und damit einhergehend die Hypothese zur Schwächung der Schweißnaht um den Faservolumenanteil verifiziert werden.

Im Allgemeinen kann in den Untersuchungen ein Ansatz zur Vorhersage der Schweißnahtfestigkeit faserverstärkter Materialien im FDM entwickelt und vor allem experimentell validiert werden. Die Untersuchungen schaffen eine Basis mit der es zukünftig möglich ist, die Auswirkungen von verschiedenen Fasergehalten auf die Schweißnahtfestigkeit im FDM zu berücksichtigen. Denn aufgrund der allgemeingültigen physikalischen Einflüsse zwischen Matrixmaterial und Faser in der FDM-Schweißnaht ist, unter der Voraussetzung einer ausreichenden Faser-Matrix-Haftung, eine theoretische Übertragbarkeit auf sämtliche kurzfaserverstärkte FDM-Materialien gegeben.

8 Entwicklung einer Methode zur Beurteilung der Verarbeitungseignung von Multimaterialkombinationen

Die Motivation dieses Kapitels ist es, die Qualifizierung von Materialien für das FDM um einen systematischen Ansatz zur Beurteilung und Bewertung der Verarbeitungseignung von Multimaterialkombinationen zu erweitern. Denn ein Vorteil des FDM-Verfahrens besteht in der Möglichkeit, verschiedene Materialien während eines Fertigungsprozesses zu verarbeiten [PRD21, S. 186f.]. Die hierzu notwendige Erweiterung des Fertigungsprinzips sieht das Hinzufügen eines weiteren Filamentextruders vor, wodurch die parallele Extrusion von verschiedenen Materialien realisiert werden kann. Zwei Filamentextruder entsprechen dem Stand der Technik und werden insbesondere für die Verwendung von Bau- und Stützmaterial verwendet. Zusammen mit dem stetig wachsenden Materialmarkt bietet der Multimaterialdruck ein hohes Potenzial zur Steigerung der Produktvielfalt. Mit der zunehmenden Anzahl an möglichen Materialkonstellationen steigt der Bedarf nach einer Möglichkeit, um die Verarbeitungseignung von verschiedenen Materialkombinationen im FDM quantitativ, reproduzierbar und unter Berücksichtigung von prozessspezifischen Einflüssen bewerten zu können.

Zu Beginn des Kapitels werden grundlegende Rahmenbedingungen vorgestellt, die ein Verständnis zum Thema der Verarbeitung von Multimaterialkombinationen mit dem FDM-Verfahren aufbauen und Informationen zur experimentellen Vorgehensweise bereitstellen. Es schließen sich spezifische Untersuchungen zur Erarbeitung einer methodischen Vorgehensweise an. Abschließend wird die Methode für die Multimaterialqualifizierung anhand von Standard- und Hochleistungsthermoplasten validiert und die Verbesserung der Festigkeit in z-Aufbauichtung durch eine Kombination von kohlenstofffaserverstärktem PEEK mit unverstärktem PEEK analysiert.

8.1 Rahmenbedingungen für die Beurteilung von Multimaterialkombinationen

Nachfolgend wird die Verarbeitung von verschiedenen Materialien im Kontext des Stands der Forschung diskutiert und Herausforderungen des Multimaterialdrucks dargestellt. Hieraus ergibt sich ein Forschungsbedarf, der die Grundlage für die sich anschließenden Untersuchungen bildet. Es schließt sich die Vorstellung der experimentellen Vorgehensweise zur Quantifizierung der Verarbeitungseignung von Multimaterialkombinationen an.

8.1.1 Einordnung der Multimaterialkombinationen für das FDM-Verfahren

In dieser Arbeit wird das FDM-Verfahren, basierend auf den Grundlagen in Kapitel 2.3.2, als Schweißprozess aufgefasst. Einschränkungen für das Schweißen von Kunststoffen bestehen darin, dass in der Regel nur gleichartige bzw. chemisch kompatible Kunststoffe

miteinander verschweißt werden können [FS09, S. 129], [Pot04, S. 46ff.]. Die Zahl an Untersuchungen zu möglichen Anwendungen additiv gefertigter Multimaterialkombinationen nehmen zu, was Forschungsarbeiten zu lokal integrierten Funktionen oder elastischen bzw. dämpfenden Elementen zeigen. Auch für den Multimaterialdruck kristallisiert sich heraus, dass insbesondere für die Herstellung von Multimaterialbauteilen der Schichtverbund zwischen den verschiedenen Materialien von signifikanter Bedeutung ist [FGK18, S. 81] und die Schweißnahtfestigkeit zur Beurteilung der Verarbeitungseignung berücksichtigt werden muss. Hieraus ergibt sich ein Forschungsbedarf mit dem Ziel, eine Methode zu entwickeln, die eine Beurteilung der Verarbeitungseignung von Multimaterialkombinationen anhand der Schweißnahtfestigkeit ermöglicht.

Obwohl die Materialvielfalt für das konventionelle FDM-Verfahren stetig zunimmt, ist die Datenbasis hinsichtlich der Verarbeitung von Multimaterialkombinationen im FDM-Prozess nicht stark ausgeprägt [YLF+18, S. 105]. Diese große Anzahl an Materialien, die mit dem FDM-Verfahren verarbeitet werden können, stellt einen bedeutenden Vorteil des FDM-Prozesses für die Anwendung von Multimaterialkombinationen dar. Weiterhin sind sowohl in der Ebene einer Schicht als auch in Aufbaurichtung zwischen den Schichten Materialkombinationen möglich. Zudem ist die Einstiegshürde für den Einsatz des FDM-Verfahrens gering. Limitierungen durch das FDM-Verfahren stellen die geringe Auflösung und begrenzte Haftungen zwischen unterschiedlichen Kunststoffen dar. Die möglichen Materialkombinationen sind durch die Materialkompatibilität, das jeweilige materialspezifische Verarbeitungsfenster sowie das Schwindungsverhalten der Materialien eingeschränkt. Restriktionen für den Prozess bestehen darin, dass die möglichen Materialkombinationen durch die Anzahl der Filamentextruder der FDM-Maschinen vorgegeben werden [Geb16, S. 74], [GBG+22, S. 8ff.], [Wat19, S. 17ff.]

Zur Beurteilung der mechanischen Kennwerte und insbesondere für die Ermittlung von mechanischen Festigkeitswerten von Multimaterialbauteilen bestehend aus zwei Kunststoffen werden häufig Zugversuche nach DIN 53504 verwendet [GBG+22, S. 9]. Alternativ findet auch die Norm ASTM D638 in den Forschungsarbeiten Anwendung [SKF+19, S. 4], [YLF+18, S. 107]. Das Ziel der Forschergruppen ist es, mithilfe der Probekörper den Einfluss der Verarbeitungsparameter auf die Verbundfestigkeit auswerten zu können. FREUND et al. haben in diesem Zusammenhang material- und prozessspezifische Einflussfaktoren sowie konstruktive Möglichkeiten zur Verbesserung des Schichtverbunds herausgearbeitet [FWH+19, S. 14ff.]. Die prozessspezifischen Einflussfaktoren sind aus der Theorie abgeleitet und nicht detailliert untersucht. GARCIA-COLLADO et al. stellen heraus, dass es notwendig ist, bei der Kombination von unterschiedlichen Materialien die Prozessparameter anzupassen und zu optimieren [GBG+22, S. 10f.]. Zudem kommt die Forschergruppe zu dem Resümee, dass keine verallgemeinerten Aussagen zu den Schweißnahtfestigkeiten von Multimaterialkombinationen getroffen werden können und jeweiligen Materialpaarungen individuell untersucht werden müssen.

8.1.2 Experimentelle Vorgehensweise

Das Ziel ist es, einen systematischen Ansatz zur Quantifizierung der Verarbeitungseignung von Multimaterialkombinationen zu entwickeln und die Methode abschließend experimentell zu validieren. Als Bestandteil der experimentellen Untersuchungen werden nachfolgend grundlegende Annahmen sowie die verwendeten Probekörper, Materialien und Prozessparameter vorgestellt. Die Quantifizierung der Verarbeitungseignung erfolgt anhand der Schweißnahtfestigkeit, da diese Größe für den Multimaterialdruck eine wichtige Rolle spielt und sich in der Analyse des konventionellen FDM-Verfahrens in dieser Arbeit bewährt hat.

Für die Untersuchungen wird ein Konzept gewählt, mit dem die Interaktion zwischen den Materialien über mehrere Schichten analysiert werden kann und die Materialien im Anwendungsfall in einer beliebigen Reihenfolge verwendet werden können. Denn im Großteil der bisherigen Forschungen werden die Materialien lokal begrenzt und in einer definierten Verarbeitungsreihenfolge kombiniert, um ein Multimaterialbauteil herzustellen. Das bedeutet, dass es nur in einer bestimmten Schicht oder in einem begrenzten Bereich Interaktionen zwischen den verschiedenen Materialien gibt. Konstruktiv und aus Prozesssicht muss hier darauf geachtet werden, dass die Materialien mit den höheren Verarbeitungstemperaturen nachgelagert verarbeitet werden, um ein ausreichendes Anschmelzen der bereits abgelegten Schichten sicherzustellen. Eine umgekehrte Verarbeitungsreihenfolge führt dann bei Materialien mit verschiedenen Verarbeitungsfenstern zu nicht ausreichenden Schweißnahtfestigkeiten. Dadurch ist es nicht möglich eine quantitative Aussage über die Bauteilfestigkeit bei beliebigen Materialwechseln zu treffen. Dies muss bei der Wahl des Probekörpers für die experimentellen Untersuchungen berücksichtigt und ausgeschlossen werden. In Bild 8-1 ist die notwendige konstruktive Umsetzung für den Multimaterialdruck schematisch dargestellt. Die Probekörpergeometrie wird hierzu unter Berücksichtigung der verwendeten Schichthöhe in zwei CAD-Dateien geteilt und anschließend in der Slicing Software wieder zu einem Bauteil gruppiert. Auf diese Weise ist es möglich den ungeraden und den geraden Schichtzahlen jeweils einen Filamentextruder zuzuweisen und nach jeder Schicht einen Düsenwechsel zu vollziehen.

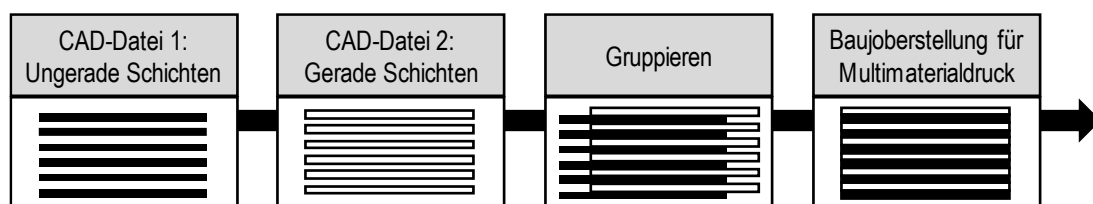


Bild 8-1: Schematische Darstellung der konstruktiven Bauteilzusammensetzung für den Multimaterialdruck

Es müssen keine grundlegend neuen Probekörper entwickelt werden, denn die experimentelle Vorgehensweise zur Bestimmung der Schweißnahtfestigkeit des konventionellen

FDM-Prozesses kann adaptiert werden. Der verwendete einsträngige Probekörper erlaubt eine quantitative Beurteilung der Verarbeitungseignung von Multimaterialkombinationen, indem Schicht für Schicht ein Materialwechsel erfolgt. Allerdings ergeben sich aus prozessspezifischer Sicht neue Herausforderungen, weil für die Auswertung von einsträngigen Bereichen in der Schichtbauweise eine genaue Positionierung der Stränge übereinander notwendig ist. Dies erfordert eine exakte Kalibrierung der beiden verwendeten Filamentextruder zueinander. Die Vorgehensweise zur Kalibrierung ist ein essentieller Bestandteil der Methode und wird in Kapitel 8.2 durch die Entwicklung eines Kalibrierungstools vorgestellt. Darüber hinaus müssen Besonderheiten bei der Verarbeitung von zwei Materialien und der Herstellung der Probekörper berücksichtigt werden. Es ist zu beachten, dass während des Fertigungsprozesses je Schicht nur ein Filamentextruder aktiv ist. Die pausierte Plastifiziereinheit wird in der Zeit auf Temperatur gehalten. Um einen unkontrollierten Materialaustrag und resultierende Verunreinigungen am Bauteil zu verhindern, wird das Filament aktiv zurückgezogen. Vor einem erneuten Einsatz des Filamentextruders muss das bei erhöhter Temperatur im Extruder gehaltene Material mit der Hilfe eines sogenannten Opferturms entfernt werden. Ein Opferturm wird parallel zum eigentlichen Bauteil gefertigt. Die Strangablage beginnt in jeder Schicht mit der Ablage der Kontur des Opferturms, um die Plastifiziereinheit auf diese Weise zu spülen. So kann die Verwendung von möglicherweise thermisch geschädigtem Material vermieden werden. Gleichzeitig wird durch diesen Vorgang sichergestellt, dass der Filamentextruder mit Material gefüllt ist und eine Unterextrusion zu Beginn der Strangablage ausgeschlossen werden kann. Die Auswertung der hergestellten Multimaterialprobekörper erfolgt identisch zur Vorgehensweise in Kapitel 5.2.2 mit dem ausschließlichen Fokus auf der Schweißnahtfestigkeit. Eine Eignung der Materialien für den Multimaterialdruck besteht, wenn die Schweißnahtfestigkeit der Multimaterialkombination mindestens auf dem Niveau des Materials mit der geringeren Festigkeit ist. Zudem muss als generelle Voraussetzung für die Durchführung der experimentellen Vorgehensweise eine Materialkompatibilität zwischen den verwendeten Materialien gegeben sein.

Die Materialauswahl für die Validierung des systematischen Ansatzes anhand von Hochleistungsthermoplasten beschränkt sich auf das Ultrafuse PPSU, das VESTAKEEP 2000G und das VESTAKEEP 2000 CF15. Zusätzlich wird während der Erarbeitung der Methode und zur Validierung des Kalibrierungstools der Kunststoff Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) verwendet. Die Verarbeitung von ABS erfordert im Vergleich zu den Hochleistungsthermoplasten ein deutlich niedrigeres Temperaturfenster und die experimentellen Untersuchungen können mit einer erheblichen Zeitersparnis sowie gesteigerter Prozesssicherheit durchgeführt werden. Dennoch wird ein aktiv beheizter Bauraum benötigt und es können Effekte aufgrund der Verarbeitungsparameter sowie Störgrößen für den Multimaterialdruck ermittelt und abgeleitet werden. Es werden zwei ABS-Typen der Hersteller Zortrax S.A. und ARMOR S.A. verwendet. Das Material des Unternehmens Zortrax wird unter dem

Handelsnamen Z-ABS Pure White vertrieben und das Material von ARMOR ist unter dem Namen Kimya ABS Carbon erhältlich. Beide Materialien liegen als Filament mit einem Durchmesser von 1,75 mm vor. Im weiteren Verlauf werden die Materialien als ABS 1 (Z-ABS Pure White) und ABS 2 (Kimya ABS Carbon) geführt. In der folgenden Tabelle 8-1 sind die Prozessparameter zur Validierung der Methode aufgelistet.

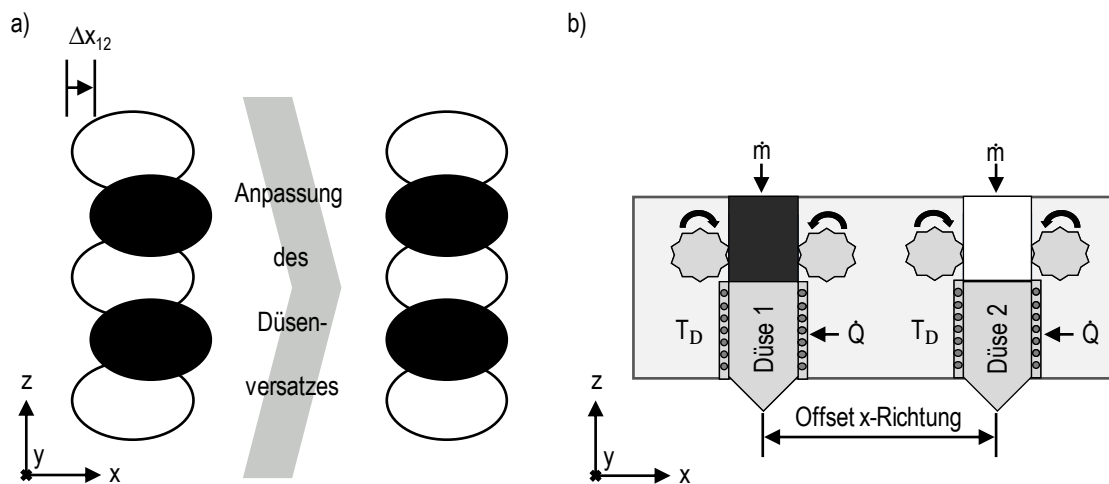
Tabelle 8-1: Prozessparameterübersicht zur Validierung der Multimaterialqualifizierung

Prozessparameter	Z-ABS Pure White Kimya ABS Carbon	Ultrafuse PPSU	VESTAKEEP 2000G VESTAKEEP 2000 CF15
Düsendurchmesser / mm	0,4	0,4	0,6
Schichthöhe / mm	0,25	0,25	0,375
Strangbreite / mm	0,5	0,5	0,75
Düsentemperatur / °C	240, 260	380	450
Bauraumtemperatur / °C	90	220	260
Strangablagegeschwindigkeit / mm/s	30	30	30

Für die Hochleistungsthermoplaste beschränkt sich die Auswahl der Verarbeitungsparameter auf Versuchspunkte, bei denen die Materialien prozesssicher verarbeitet werden können. Die Prozessparameter basieren auf den Erkenntnissen dieser Arbeit und somit ist die Verarbeitbarkeit mit dem FDM-Verfahren gewährleistet. Die Voraussetzung für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen ist die exakte Positionierung der Stränge übereinander. Hierfür muss die Position der Filamentextruder zueinander kalibriert werden. Das notwendige Kalibrierungstool ist Bestandteil der Methode zur Beurteilung der Verarbeitungseignung und wird aufgrund der Komplexität im folgenden Kapitel erarbeitet.

8.2 Entwicklung eines Systems zur Düsenkalibrierung

Die Bedeutung der Filamentextruderkalibrierung für den Multimaterialdruck wird mit dem Schema in Bild 8-2 a) verdeutlicht. Wenn die Stränge nicht exakt aufeinander abgelegt werden verändert sich die Position sowie die Form der Schweißnähte und die Reproduzierbarkeit der Schweißnahtausbildung zur Bestimmung der Schweißnahtfestigkeiten verschlechtert sich. Zudem besteht die Gefahr, dass die Stränge in z-Aufbaurichtung aneinander abgleiten. Mithilfe der Kalibrierung werden sogenannte Offset Werte ermittelt und im Slicer berücksichtigt. Hierbei handelt es sich beim Offset um den Versatz bzw. um den Abstand der Filamentextruder in x-, y- und z-Richtung zueinander. Als Koordinatenursprung wird ein Filamentextruder definiert und die Offset Werte beziehen sich auf den Mittelpunkt der jeweiligen Düsen spitzen der Filamentextruder. In Bild 8-2 b) ist dieses Vorgehen exemplarisch für den Offset in x-Richtung veranschaulicht. Ausgehend von Extruder 1 wird der Versatz entlang der x-Koordinate bis zum Extruder 2 bestimmt und anschließend während der Datenaufbereitung berücksichtigt.



Die Umsetzung einer korrekten Kalibrierung der Düsenabstände stellt sich als problematisch dar und kann bei unzureichenden Einstellungen des Offsets zu Jobabbrüchen führen [BA20, S. 4517f.]. Deshalb werden in dieser Arbeit zwei verschiedene Kalibrierungsmöglichkeiten entwickelt, die sich in ihrer Komplexität der Umsetzung unterscheiden und mit denen es möglich ist die Düsenabstände in x- und y-Richtung zu ermitteln. Es handelt sich um einen iterativen sowie einen kamerabasierten Prozess. Die Einstellung des Düsenabstands in z-Richtung erfolgt für beide Kalibrierungsmethoden durch einen Nulleinsteller der Firma Tschorn.

8.2.1 Iterative Kalibrierungsmethode

Dem iterativen Kalibrierungsansatz liegt die Zielvorgabe zugrunde, den Offset der Düsen mit möglichst einfachen Mitteln bestimmen zu können, um dadurch die Umsetzung der Vorgehensweise zu erleichtern. Hierzu wird eine Probekörpergeometrie entwickelt, mit der es möglich ist den Versatz der Stränge über mehrere Schichten auszuwerten und auf diese Weise den Offset der Düsen zu bestimmen. Die ausgewählte Form des sogenannten Calibration Cubes mit den zugehörigen Maßen kann der nachfolgenden Abbildung in Bild 8-3 a) entnommen werden. Eine grundlegende Voraussetzung für die Ermittlung und Einstellung der Offset Werte ist, dass die Untersuchungen unter Prozessbedingungen stattfinden. Die Vorgehensweise und die Probekörpergeometrie wurden in Zusammenarbeit mit KITTEL (vgl. [Kit20]) im Rahmen einer Studienarbeit entwickelt.

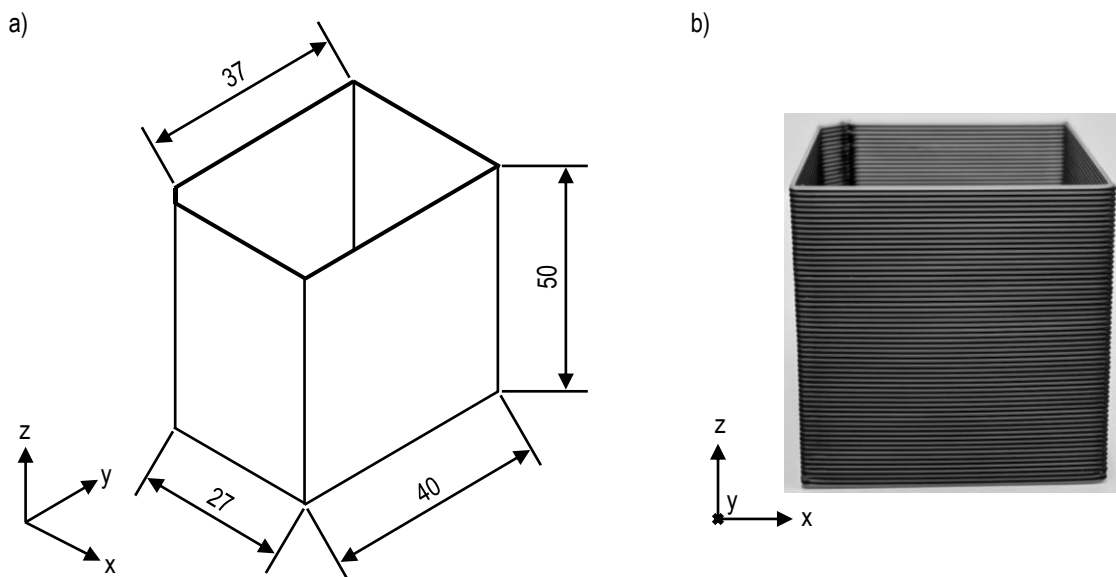


Bild 8-3: a) Probekörpergeometrie des Calibration Cubes mit Bemaßung (in mm) zur Bestimmung des Strangversatzes, b) Calibration Cube gefertigt im Multimaterialdruck

Neben der bemaßten Zeichnung ist in Bild 8-3 b) ein gefertigter Probekörper in der Multimaterialbauweise zur Verbesserung der Visualisierung dargestellt. Die Kontur des Calibration Cubes ist gleichbedeutend mit der finalen Form des Probekörpers und wird durch lediglich einen Strang ausgebildet. Dadurch können die Fertigungszeiten signifikant verkürzt werden. Zudem ermöglicht die geschlossene, kompakte Bauweise eine robuste Fertigung, da Schwingungen des Bauteils während des FDM-Prozesses durch die verbesserte Steifigkeit reduziert werden können.

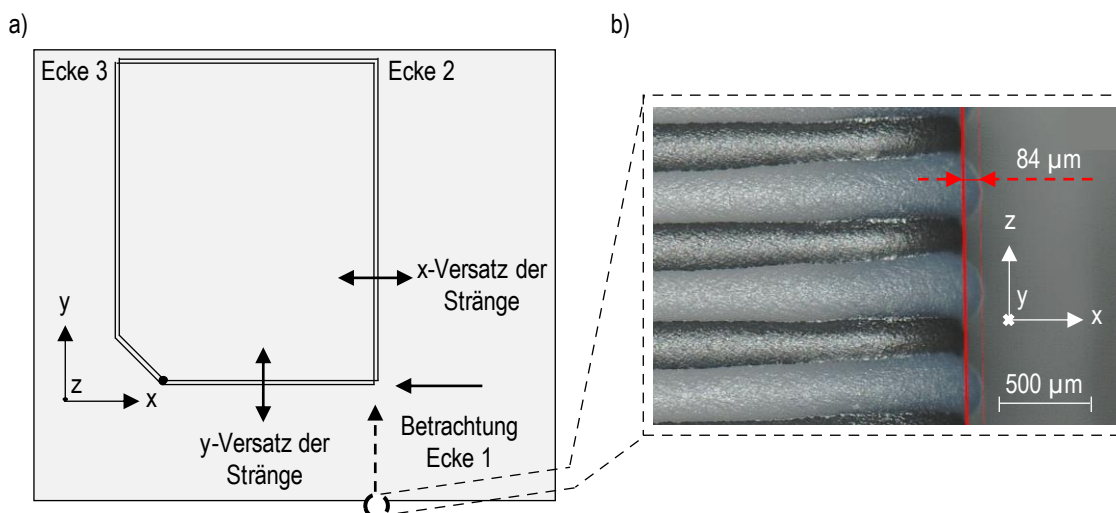


Bild 8-4: a) Draufsicht Calibration Cube und Darstellung der Auswertungsmöglichkeiten am Beispiel der Ecke 1, b) Makroskopische Aufnahme des Strangversatzes in x-Richtung (in Zusammenarbeit mit KITTEL, vgl. [Kit20])

Wie in Bild 8-4 a) veranschaulicht ist, besitzt der Calibration Cube im vorderen linken Bereich eine Fase. Diese dient zur Zuordnung der Position des Probekörpers im Bauraum. Die weiteren Ecken des Probekörpers bieten die Möglichkeit, den Versatz der Stränge messtechnisch zu beurteilen. Hierzu wird der Strangversatz an den Ecken anhand von makroskopischen Aufnahmen ausgewertet (vgl. Bild 8-4 b)). An den Ecken 1-3 kann der Versatz sowohl in x-Richtung als auch in y-Richtung vermessen werden. Zu diesem Zweck werden zwei parallele Messgeraden entlang der äußeren Strangkonturen der verschiedenen Materialien gelegt und der Abstand zwischen den Geraden gemessen. Auf diese Weise kann der Überstand der Stränge zueinander ermittelt und somit der Düsenversatz quantifiziert werden. Die Kalibrierung des Düsenversatzes erfolgt iterativ anhand der Vorgehensweise, welche in Bild 8-5 dargestellt ist.

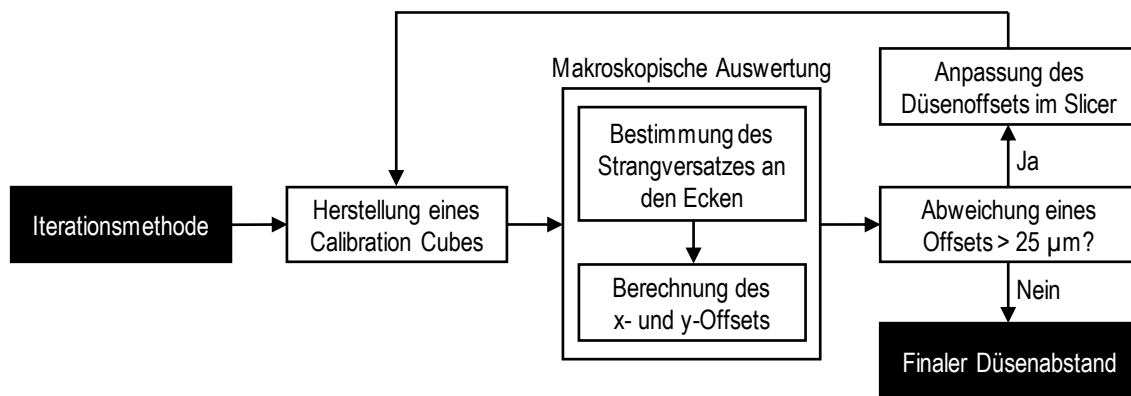


Bild 8-5: Schematische Vorgehensweise der iterativen Kalibrierungsmethode

Für jede Ecke werden über die gesamte Probekörperhöhe fünf Messwerte in x- und y-Richtung bestimmt und anschließend auf Grundlage der Messwerte ein Mittelwert für den Versatz in x-Richtung und ein Mittelwert für den Versatz in y-Richtung berechnet. Sofern die berechneten Offset Werte der jeweiligen Richtung kleiner oder gleich $25\text{ }\mu\text{m}$ sind, werden die ermittelten Kalibrierungseinstellungen als final angesehen. Die eingebrachte Toleranz beruht auf der messtechnischen Herausforderung der exakten Platzierung der Messgeraden mit der Software des Makroskops. Die Validierung der iterativen Vorgehensweise zur Kalibrierung des Düsenversatzes ist erfolgreich umgesetzt worden [MW22] und die Abstände der Düsen können präzise ermittelt werden.

Die Vorteile der iterativen Kalibrierungsmethode sind aufgrund des einfachen Probekörperdesigns die kurzen Fertigungszeiten sowie aufgrund des Vorgehens eine niedrige technische Hürde zur Anwendung der Methode. Darüber hinaus bietet der Calibration Cube die Möglichkeit, eine Verifizierung der ermittelten Offset Werte durch Schliffbilder umzusetzen. Durch den erforderlichen Aufbau der Probekörper in der Multimaterialbauweise wird gleichzeitig die Materialkompatibilität geprüft und es können zusätzlich frühzeitig Rückschlüsse zur Eignung der verwendeten Prozessparameter gezogen werden.

Nachteilig ist der notwendige Materialverbrauch für die Durchführung der Kalibrierung. Zudem ist die Vorgehensweise anfällig für Störgrößen, die die Strangablage in den Ecken beeinflussen können. In diesem Zusammenhang lassen sich unter anderem die Materialviskosität und die generelle Austragsmenge während der Strangablage aufführen. Zudem entsteht bei einer oder mehreren iterativen Kalibrierungsschleifen ein hoher Zeitaufwand, insbesondere für Materialien deren Verarbeitung hohe Verarbeitungstemperaturen erfordert, da stationäre Umgebungstemperaturen vorausgesetzt werden. Auch die makroskopische Auswertung für alle Ecken ist sehr zeitintensiv. Deshalb wird ein weiterer Ansatz entwickelt, um die aufgeführten Nachteile zu minimieren und die Kalibrierung robuster zu gestalten.

8.2.2 Kamerabasierte Kalibrierungsmethode

Die Entwicklung einer kamerabasierten Kalibrierungsmethode resultiert aus den Erfahrungen, die durch die Verwendung der iterativen Vorgehensweise gemacht worden sind. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Abhängigkeit von materialspezifischen Einflüssen und der hohe Zeitaufwand für die Kalibrierung aufzuführen. Das Ziel ist es, einen Einsatz im Hochtemperaturbereich zu gewährleisten, gleichzeitig eine schnellere Applikation sowie Messdurchführung zu ermöglichen und die Anzahl von möglichen Störgrößen zu reduzieren. Hierzu wird ein Konzept erarbeitet und anschließend eine Software entwickelt sowie geeignete Hardwarekomponenten ausgewählt, welche um ein additiv gefertigtes Bauteil erweitert werden. Ein Teil der Untersuchungen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, ist in Zusammenarbeit mit NEUGEBAUER im Rahmen einer Studienarbeit durchgeführt worden (vgl. [Neu21]).

In der Konzeptphase besteht die Grundidee darin, die Position der Düsen durch eine Kamera auszuwerten, indem die Düsen in einem definierten Bereich über eine im Bauraum platzierte Kamera verfahren werden. Dieser Ansatz ist allerdings zu verwerfen, da eine ausreichende Kühlung der Elektronik nicht sichergestellt werden kann und die Anforderung an das Kalibrierungssystem eine Funktionsfähigkeit bei Prozesstemperaturen bis 260 °C voraussetzt. Deshalb werden bei dem in dieser Arbeit umgesetztem Konzept sämtliche elektronischen Elemente aus dem Innenraum entfernt. Aufgrund der transparenten Scheibe der Bauraumtür bietet sich eine alternative Kameraposition außerhalb der geschlossenen Prozesskammer an. Dabei wird ein Spiegel im 45° Winkel im Bauraum platziert und die Kamera an der Scheibe der Bauraumtür befestigt. In Bild 8-6 a) ist dieses Konzept schematisch dargestellt und wird in den experimentellen Untersuchungen als Kalibrierungsmethode umgesetzt.

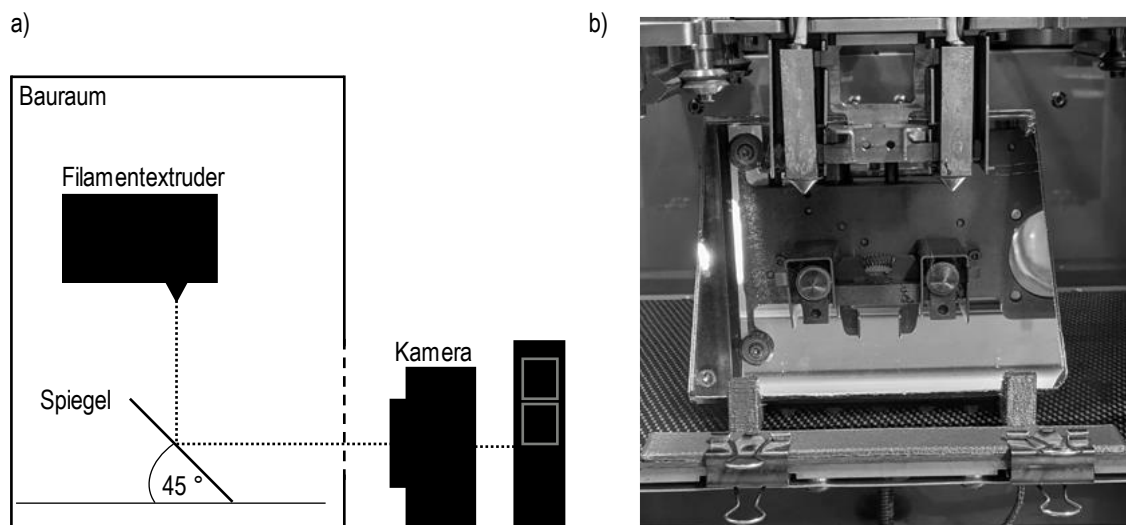


Bild 8-6: a) Prinzipskizze der kamerabasierten Kalibrierungsmethode, b) Fotografische Aufnahme zur Veranschaulichung der Düsenreflexion von außerhalb des Bau- raums

Die kamerabasierte Kalibrierungsmethode setzt sich aus den folgenden elementaren Bestandteilen zusammen: Ein USB-Digitalmikroskop, ein Spiegel samt Halterung sowie eine Software zur Verarbeitung der aufgenommenen Bilder. Das USB-Digitalmikroskop wird mithilfe eines Stativs direkt vor die Scheibe der Bauraumtür auf eine definierte Höhe platziert und fixiert. Bei Bedarf kann über eine Tageslichtlampe hinter dem Stativ der gesamte Bau- raum ausgeleuchtet werden. Die Kamera ist infolge des im 45° Winkel aufgestellten Spie- gels auf der Bauplattform des Hochtemperaturdruckers in der Lage, Bilder der Düsen auf- zunehmen (vgl. Bild 8-6 b)). Die benötigte Spiegelhalterung ist aus einem kohlenstofffaser- verstärktem PEEK additiv hergestellt, um eine Wärmeformbeständigkeit bei der maximalen Temperatur von 260 °C sicherzustellen. Zudem kann durch die konstruierte Halterung eine konstante Ausrichtung des Spiegels gewährleistet werden, sodass die über dem Spiegel stehenden Düse in einem idealen Reflexionswinkel symmetrisch gespiegelt wird und die Reliabilität der experimentellen Untersuchungen sichergestellt ist. Die aufgenommenen Bil- der werden durch einen Programmcode verarbeitet. Das entwickelte Python-Skript ist mit einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) verknüpft, um die Handhabbarkeit für den An- wender zu vereinfachen. Der grundlegende Programmablauf der Software mit verschiede- nen verfügbaren Bildverarbeitungsoptionen ist im Anhang (vgl. Bild A5-1) dargestellt. Nach dem Einlesen des Kamerabilds können mithilfe der Software Kreise mit variablem Durch- messer ins Zentrum des Bildes eingezeichnet werden. Dies ermöglicht eine grafische Zent- rierung der Düsen, da diese anschließend über die Maschinensteuerung in die statischen Kreise verfahren werden und somit gezielt positioniert werden können. Die Überprüfung der Präzision der Zentrierung erfolgt in Echtzeit durch die Ausgabe des Bildes nach weni- gen Millisekunden auf der grafischen Benutzeroberfläche des Programms (vgl. Bild 8-7).



Bild 8-7: Benutzeroberfläche der programmierten Softwarelösung für die kamerabasierte Kalibrierungsmethode. Ausgerichtet anhand eingezeichneter Kreise. (in Zusammenarbeit mit NEUGEBAUER, vgl. [Neu21])

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Düsenabstände beginnt mit dem Aufheizen des Bauraums und der anschließenden Sicherstellung von stationären Umgebungsbedingungen. Dies ermöglicht bei der Bestimmung der Offset Werte eine Berücksichtigung der temperaturbedingten Ausdehnung der Anlagenkomponenten innerhalb des Bauraums. Erst kurz bevor die Messung beginnt, werden die Düsen auf die Zieltemperatur aufgeheizt, um eine Degradation des in den Düsen befindlichen Materials zu vermeiden. Anschließend können die Positionen der Düsen im Bauraum bestimmt werden. Das Grundprinzip der entwickelten Kalibrierungsmethode ist die Positionierung der Düsen mithilfe der FDM-Maschinensteuerung auf einen einheitlichen Punkt und das anschließende Auslesen der Koordinaten des Filamentextruders. Hierbei werden nacheinander beide Düsen in die durch die Software eingezeichneten Kreise verfahren. Nach der Ausrichtung der zweiten Düse und der erneuten Ausgabe der Filamentextruderkoordinaten kann der Offset in der Software durch eine Subtraktion der x- und y-Koordinaten berechnet und ausgegeben werden.

Verglichen mit der iterativen Kalibrierungsmethode ist der Zeitaufwand der kamerabasierten Vorgehensweise um ein Vielfaches geringer und beträgt bei einer aufgeheizten FDM-Anlage nur wenige Minuten. Zudem wird während der Kalibrierungsphase kein Material verbraucht. Ein weiterer Vorteil des Kalibrierungstools ist, dass durch die Positionierung der Kamera außerhalb des Bauraums das System sowohl unabhängig von den Prozess-temperaturen als auch unabhängig von der FDM-Maschine ist und daher flexibel eingesetzt werden kann. Die einzige Voraussetzung ist eine transparente Scheibe zum Inneren des Bauraums und dies wird von einem Großteil der am Markt erhältlichen FDM-Anlagen erfüllt. Darüber hinaus eignet sich der Aufbau für eine experimentelle Analyse zur Auswirkung der

Temperierung einzelner Komponenten einer FDM-Anlage unter Ausschluss von prozessspezifischen Einflüssen. Aufgrund der aufgeführten Vorteile und der geringeren Fehleranfälligkeit wird das kamerabasierte Kalibrierungsverfahren in den nachfolgenden Untersuchungen verwendet und intensiver analysiert.

8.3 Untersuchung und Identifizierung von Einflussfaktoren

Für den Einsatz der kamerabasierten aber auch der iterativen Kalibrierungsmethode ist es notwendig, mögliche Einflussfaktoren auf den Kalibrierungsprozess aufzudecken bzw. aufzuzeigen. Mit den erarbeiteten Erfahrungen können Leitlinien für die Durchführung der Methode festgehalten werden und die Qualität der Düsenkalibrierung wird signifikant verbessert. Die Identifizierung von Einflussfaktoren ist somit eine Voraussetzung für den Einsatz der Kalibrierungsmethode und erfolgt in diesem Kapitel. Zudem werden Einflussfaktoren auf die Fertigungsqualität von Multimaterialbauteilen im FDM präsentiert. Um eine statistisch abgesicherte Messung sicherzustellen, werden zur Bestimmung der Positionsdivergenz der Extrudereinheiten mindestens sechs Messungen durchgeführt und Mittelwerte sowie Standardabweichungen bestimmt. Ein Teil der Untersuchungen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, ist in Zusammenarbeit mit NEUGEBAUER im Rahmen einer Studienarbeit durchgeführt worden (vgl. [Neu21]).

8.3.1 Einflussfaktoren auf den Kalibrierungsprozess

Bei der Bestimmung des Düsenversatzes ist es erforderlich, dass das Spiel der Linearachsen zum Verfahren der Extrudereinheiten in x- und y-Richtung berücksichtigt wird. Es gibt zahlreiche frei verfügbare 3D-Modelle sogenannter Backlash-Probekörper, die Rückschlüsse auf das vorliegende Achsspiel der verwendeten FDM-Anlage ermöglichen. Durch definierte Änderungen und Umlenkungen des Fahrwegs während der Extrusion kann bei vorliegendem Achsspiel ein Strangversatz durch die optische Auswertung der Probekörper detektiert werden. In Abhängigkeit von der Ausprägung des Achsspiels sollten auch Anpassungen der Maschinentechnik in Erwägung gezogen werden. Bei der in diesen Untersuchungen verwendeten FDM-Anlage kann ein Spiel der y-Achse von zirka 50 µm nachgewiesen werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Gewindespindel im Bauraum gelagert ist und die Funktionsfähigkeit bei verschiedenen Wärmeausdehnungen aufgrund unterschiedlicher Bauraumtemperaturen sichergestellt werden muss. Aufgrund des signifikanten Einflusses des Achsspiels auf die Kalibrierung der Düsen zueinander, wird eine Maßnahme zur Reduzierung der Messwertstreuung bei der Positionsermittlung erarbeitet. Um die Auswirkung des detektierten Achsspiels zu verringern, erfolgt eine Anpassung der Fahrbewegungen während der Positionsbestimmung der Filamentextruder. Die translatorischen Bewegungen entlang der x- und y-Achse werden in eine Richtung beschränkt, so dass ausgehend von der ersten Düse der Filamentextruder lediglich in positive x- und y-

Richtung bewegt wird (siehe Bild 8-8 a)). Die Auswirkungen dieser definierten Vorgehensweise auf die Reliabilität der Koordinatenbestimmung während des Kalibrierungsprozesses werden mithilfe des Diagramms in Bild 8-8 b) veranschaulicht. Zudem ermöglicht die Abbildung, dass der auf diese Weise ermittelte Strangversatz mit dem Düsen-Offset, der durch ein willkürliches Verfahren des Filamentextruders bestimmt wird, verglichen werden kann.

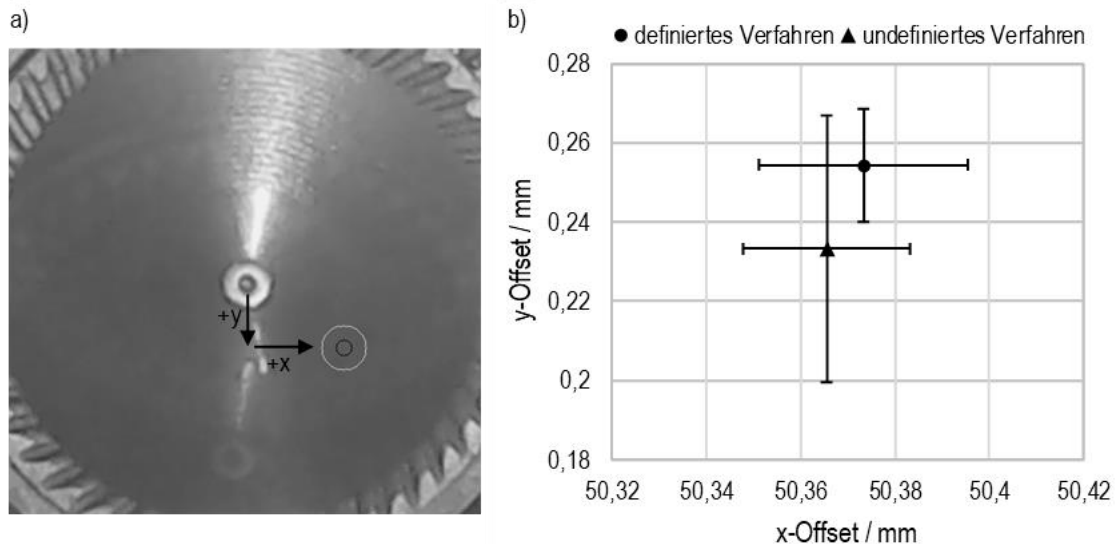


Bild 8-8: a) Prinzip der definierten translatorischen Verfahrensweise während des Kalibrierungsprozesses, b) Gegenüberstellung der ermittelten Offsets bei definierten und undefinierten translatorischen Verfahrensbewegungen (in Zusammenarbeit mit NEUGEBAUER, vgl. [Neu21])

Das Diagramm (vgl. Bild 8-8 b)) zeigt die ermittelten Düsenabstände samt Standardabweichungen und stellt auf der Abszisse den Versatz in x-Richtung und auf der Ordinate in y-Richtung dar. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die absoluten Düsenabstände beider Vorgehensweisen nicht signifikant voneinander abweichen. Die Unterschiede der ermittelten Düsenabstände in x-Richtung sind $< 10 \mu\text{m}$ und in y-Richtung $< 20 \mu\text{m}$. Die Standardabweichungen in x-Richtung sind annähernd gleich groß. Auffallend ist, dass die Standardabweichung in y-Richtung durch die definierte Vorgehensweise während des Kalibrierungsprozesses signifikant verringert werden kann. Dies ist ein quantifizierter Hinweis, dass der Einfluss des Spiels der y-Achse durch die verwendete Maßnahme reduziert wird. Der geringe Unterschied der gemittelten Düsenabstände in y-Richtung lässt sich auf die Anzahl der durchgeführten Messungen zurückführen, die die Ermittlungsgenauigkeit für den undefinierten Messvorgang verbessern. Denn durch die umfangreiche Anzahl der Messwerte verringert sich die Auswirkung des Achsspiels auf das Messergebnis, da die auftretenden Abweichungen gemittelt werden. Die erhöhte Streuung der Messwerte ist ein Indiz für die Fehleranfälligkeit und es lässt sich ableiten, dass durch den modifizierten, definierten Ablauf zur Bestimmung des Offsets die Reliabilität des Kalibrierungsprozesses signifikant verbessert werden kann.

Ein weiterer Einflussfaktor stellt der Winkel des Spiegels im Bauraum dar. In Untersuchungen zur Qualifizierung der Kalibrierungsmethode werden Auswirkungen eines Spiegelwinkels von 25° und 45° auf die Genauigkeit der Offset-Ermittlung untersucht. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die Messgenauigkeit durch einen Winkel von 45° deutlich verbessert werden kann und sich die Standardabweichungen signifikant reduzieren. Dies ist auf eine verzerrte Darstellung des Düsengeometrie zurückzuführen, die die softwareseitige Zentrierung der eingezeichneten Kreise vor allem in y-Richtung erschwert. Somit ist in den Untersuchungen ein Reflexionswinkel von 45° sicherzustellen. In dieser Arbeit wird der Spiegelwinkel von 45° durch eine additiv gefertigte Spiegelhalterung aus einem kohlenstofffaserverstärktem PEEK realisiert. Die Konstruktion ist unter Berücksichtigung von additiven Fertigungsrichtlinien erfolgt und die Fertigung der Spiegelhalterung ist mit den in dieser Arbeit ermittelten, optimierten Prozessparametern für PEEK umgesetzt.

Darüber hinaus hat die Analyse weiterer Einflussfaktoren ergeben, dass diese keine signifikante Auswirkung auf den Kalibrierungsprozess haben. Zusammenfassend kann durch die Anwendung eines Canny-Algorithmus, des softwareseitig maximal einstellbaren Zooms sowie durch das zwischenzeitliche Homen nach jeder Offset-Messung keine Verbesserungen des Kalibrierungsprozesses festgestellt werden. Bei dem Canny-Algorithmus handelt es sich um eine Anpassung, die durch die entwickelte Software umgesetzt werden kann und eine Kantenerkennung innerhalb eines Bildes ermöglicht.

8.3.2 Einflussfaktoren auf die Fertigungsqualität der Multimaterialbauweise

Die in diesem Kapitel vorgestellten maschinenspezifischen Einflussfaktoren haben einen direkten Einfluss auf die Fertigungsqualität des Multimaterialdrucks im FDM-Verfahren. Aufgrund der resultierenden Auswirkungen auf die Position der Strangablage wird die Notwendigkeit des vorgestellten Kalibrierungsprozesses impliziert.

Durch die in Tabelle 8-2 dargestellten vier Temperaturprofile wird der Einfluss von temperaturbedingten Wärmeausdehnungen auf die Anlagenkomponenten innerhalb des Bau- raums untersucht, indem für jedes Temperaturprofil (TP) der Düsen-Offset ermittelt und anschließend durch eine grafische Gegenüberstellung ausgewertet wird.

Tabelle 8-2: Temperaturprofile zur Analyse des Einflusses der Wärmeausdehnung

Temperaturprofil (TP)	Düsentemperatur / °C	Bauraumtemperatur / °C
TP 1	23	23
TP 2	245	23
TP 3	23	65
TP 4	245	65

Die Temperaturprofile setzen sich aus verschiedenen Prozessparameterkombinationen der Düsen- und der Bauraumtemperatur zusammen. Die Düsentemperatur wird zwischen 23 °C und 245 °C variiert und die Temperatur des Bauraums zwischen 23 °C und 65 °C. Hierbei entsprechen 23 °C dem Normklima der Laborumgebung. In Bild 8-9 sind die ermittelten Düsenabstände für die verschiedenen Temperaturprofile dargestellt.

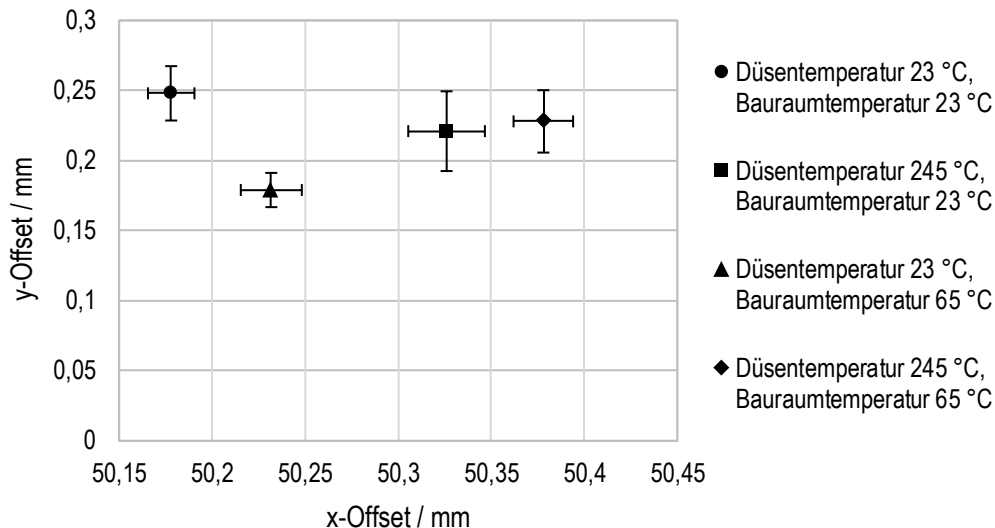


Bild 8-9: Analyse der Düsenabstände in x- und y-Richtung zum Vergleich der wärmebedingten Ausdehnungen (in Zusammenarbeit mit NEUGEBAUER, vgl. [Neu21])

Anhand der Ergebnisse ist ersichtlich, dass die Prozessparameter eine signifikante Auswirkung auf die Düsenabstände haben und sich diese deutlich voneinander unterscheiden. Es lässt sich ableiten, dass es bei der Verwendung von mehr als einem Filamentextruder zwingend erforderlich ist vor jedem Fertigungsprozess eine ausreichende Kalibrierung sicherzustellen. Die quantitativen Veränderungen der Düsenabstände sind maschinenabhängig und es können keine verallgemeinerten Aussagen getätigt werden, ob z. B. die Bauraumtemperatur einen Einfluss auf den Offset in y-Richtung hat.

Darüber hinaus sind weitere Untersuchungen von Einflussfaktoren erfolgt. Es zeigt sich, dass ein korrekt kalibrierter Düsenabstand in z-Richtung zur Bauplattform für den Multimaterialdruck von erheblicher Bedeutung ist und einen signifikanten Einfluss auf die Strangablage und die Strangausprägung hat. Die Besonderheit der Multimaterialbauweise im Vergleich zum konventionellen FDM-Verfahren mit einer Düse ist, dass es bei einem nicht exakt eingestellten Abstand in z-Richtung über mehrere Schichten nicht zur Korrektur auf die vorgegebenen Schichthöhen kommt. Dies unterscheidet den Multimaterialdruck von dem konventionellen Verfahren, denn während der Fertigung mit nur einer Düse gleicht sich die Schichthöhe mit einer zunehmenden Anzahl abgelegter Schichten der eingestellten Schichthöhe an und ist damit in der Lage fehlerhafte Abstände in z-Richtung zu korrigieren. Deshalb ist es für den Multimaterialdruck wichtig, grundlegende Anlagenfunktionalitäten sicherzustellen. Dies umfasst die Ebenheit der Bauplattform und die Berücksichtigung einer

möglichen Neigung des Druckbetts. Weiterhin ist ein gleichmäßiger Materialaustrag aus der Düse umzusetzen. Durch Verschmutzungen, Verschleiß oder Beschädigungen der Düse kann es während der Extrusion zu Umlenkungen des Strangs in horizontaler Richtung kommen. Dies führt zu einer unkontrollierten Strangablage und eine prozesssichere Fertigung kann nicht umgesetzt werden.

Durch die Berücksichtigung sowohl der vorgestellten Einflussfaktoren als auch der erarbeiteten Kalibrierungsmaßnahmen kann die Erarbeitung einer methodischen Vorgehensweise zur Kalibrierung der Düsenabstände abgeschlossen werden. Als zentraler Bestandteil des Ansatzes zur Quantifizierung der Verarbeitungseignung von Multimaterialkombinationen schließen die nachfolgenden experimentellen Untersuchungen die Validierung der Düsenkalibrierung mit ein.

8.4 Validierung der Multimaterialqualifizierung

In diesem Kapitel wird die experimentelle Validierung der Methode zur Qualifizierung von Materialien für Multimaterialanwendungen im FDM-Verfahren umgesetzt. Das Ziel der vorgestellten Vorgehensweise ist es, die Verarbeitungseignung von Multimaterialkombinationen anhand der Schweißnahtfestigkeit zu quantifizieren und auszuwerten. Im Zuge der experimentellen Untersuchungen wird zudem die Funktionsfähigkeit der kamerabasierten Düsenkalibrierung gezeigt. Die Validierung erfolgt für Standard- und Hochleistungskunststoffe und ist entsprechend dieser Klassifizierungen gegliedert. Ein Teil der Untersuchungen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, ist in Zusammenarbeit mit NEUGEBAUER und PETERS im Rahmen von Studienarbeiten durchgeführt worden (vgl. [Neu21], [Pet21]).

8.4.1 Validierung für den Standardtemperaturbereich

Die Validierung im Bereich der Standardkunststoffe wird mit den vorgestellten Materialien Z-ABS Pure White (ABS 1) und Kimya ABS Carbon (ABS 2) durchgeführt. Zu Beginn wird die Fähigkeit der entwickelten Vorgehensweise zur Düsenkalibrierung anhand von Schliffbildern verifiziert und anschließend erfolgt die Bewertung der Verarbeitungseignung der beiden Materialien für den Multimaterialdruck im FDM-Verfahren. In Bild 8-10 ist sowohl ein Probekörper zur Quantifizierung der Schweißnahtfestigkeit als auch ein Schliffbild zur Veranschaulichung der Strangpositionierung in der Multimaterialbauweise dargestellt.

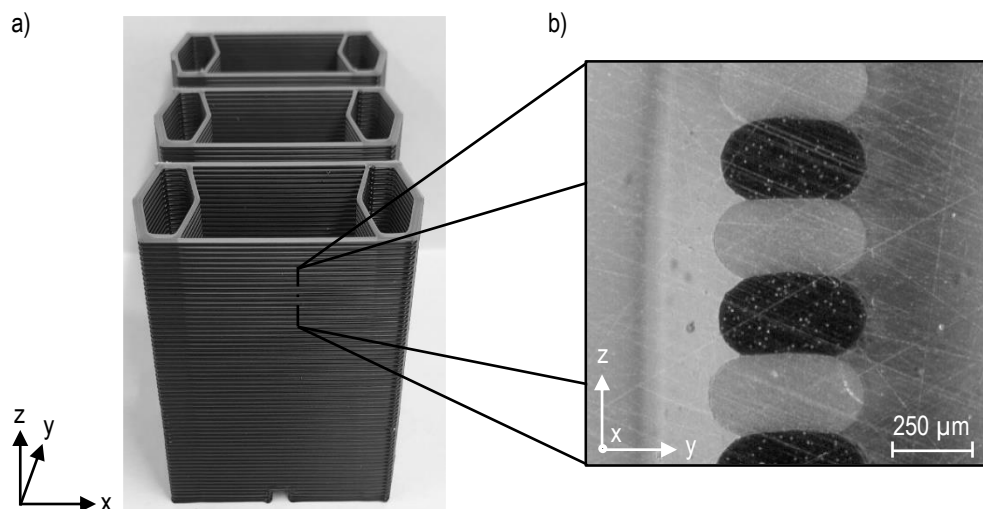


Bild 8-10: a) Probekörper gefertigt in Multimaterialbauweise zur Ermittlung der Schweißnahtfestigkeit, b) Makroskopische Aufnahme zur Verifizierung der Düsenkalibrierung

Durch die makroskopische Strangauswertung (vgl. Bild 8-10 b)) kann die Eignung der Vorgehensweise zur Kalibrierung der Düsenabstände nachgewiesen werden. Die Kunststoffstränge werden definiert übereinander abgelegt und der Aufbau in z-Richtung ist homogen sowie ohne signifikanten Versatz erfolgt. Damit ist die grundlegende Voraussetzung einer definierten Strangablage erfüllt und es ist möglich, die Verarbeitungseignung der verwendeten Materialien für den Multimaterialdruck anhand der Schweißnahtfestigkeit zu analysieren (vgl. Bild 8-11).

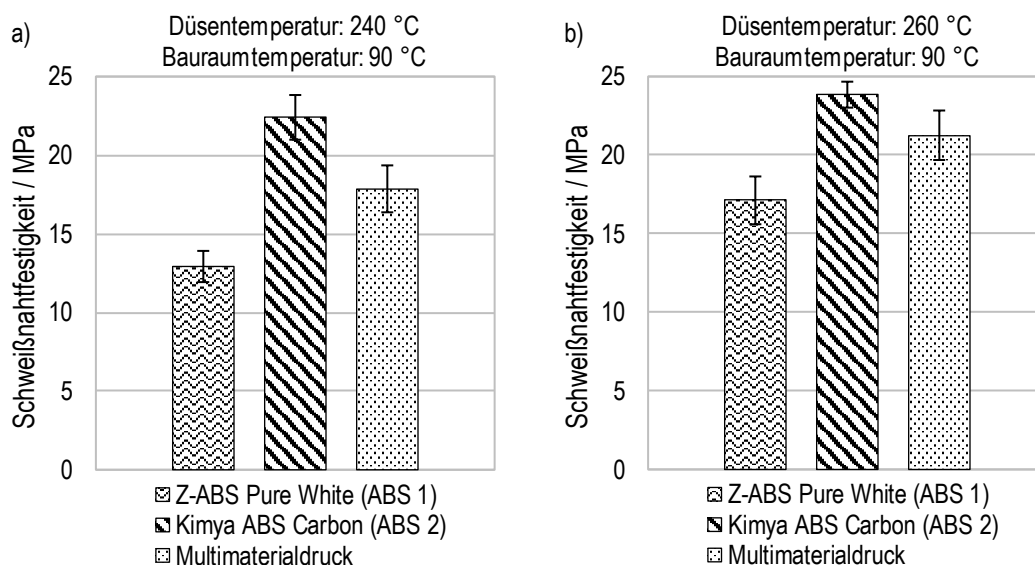


Bild 8-11: Analyse der Verarbeitungseignung und vergleichende Darstellung zur Prozessparameteroptimierung a) $T_D=240\text{ °C}$; $T_B=90\text{ °C}$, b) $T_D=260\text{ °C}$; $T_B=90\text{ °C}$ (in Zusammenarbeit mit PETERS, vgl. [Pet21])

In Bild 8-11 werden die Schweißnahtfestigkeiten der Materialien ohne sequentiellen Materialwechsel mit der Schweißnahtfestigkeit der Multimaterialbauweise verglichen. Aus beiden Abbildungen geht hervor, dass die Schweißnahtfestigkeit des ABS 1 deutlich niedriger ist als die Schweißnahtfestigkeit des ABS 2. Durch eine Kombination beider Materialien kann die Schweißnahtfestigkeit des ABS 1 im Vergleich zum Ausgangszustand deutlich gesteigert werden. Für eine Düsentemperatur von 240 °C und einer Bauraumtemperatur von 90 °C nimmt die Schweißnahtfestigkeit von 12,92 MPa auf 17,86 MPa zu (vgl. Bild 8-11 a)). Dies entspricht einer signifikanten prozentualen Steigerung von ungefähr 38 %. Auffallend ist, dass die Schweißnahtfestigkeit des Multimaterialdrucks für beide Prozessparameterkombinationen nahezu mittig zwischen den Schweißnahtfestigkeiten des ABS 1 und des ABS 2 liegen. Eine gezielte Erhöhung der Düsentemperatur wirkt sich festigkeitssteigernd aus und repräsentiert das Optimierungspotenzial der Methode für die Verarbeitungsparameter des Multimaterialdrucks.

Insgesamt kann eine Eignung der beiden Materialien für den Multimaterialdruck nachgewiesen und die Methode zur Materialqualifizierung von Multimaterialkombinationen für das FDM-Verfahren im Standardtemperaturbereich validiert werden. Zudem ermöglicht die Methode neben der Beurteilung der Verarbeitungseignung die gezielte Prozessparameteroptimierung für den Multimaterialdruck, indem Rückschlüsse aus den Veränderungen der Schweißnahtfestigkeiten gezogen werden können.

8.4.2 Validierung für den Hochtemperaturbereich

Zur Validierung der Methode im Hochtemperaturbereich werden die Hochleistungsthermoplaste Ultrafuse PPSU, VESTAKEEP 2000G und VESTAKEEP 2000 CF15 verwendet. Hierbei wird zwischen der Verifikation der entwickelten Vorgehensweise zur Kalibrierung der Düsenabstände und der Materialqualifizierung für den Multimaterialdruck im FDM-Verfahren differenziert. Die Validierung der Düsenkalibrierung erfolgt, um sowohl einen amorphen als auch einen teilkristallinen Kunststoff zu betrachten und gleichzeitig zwei verschiedene Verarbeitungstemperaturszenarien abzudecken. Abschließend wird die Beurteilung der Verarbeitungseignung am Beispiel von VESTAKEEP 2000G und von VESTAKEEP 2000 CF15 durchgeführt, um die Auswirkung einer Kombination von kohlenfaserverstärktem PEEK mit unverstärktem PEEK auf die Schweißnahtfestigkeit analysieren zu können. Mit der Hilfe von Schliffbildern wird die Strangablage während der Multimaterialbauweise ausgewertet (vgl. Bild 8-12), um Rückschlüsse auf die Güte der Düsenkalibrierung zu ziehen.

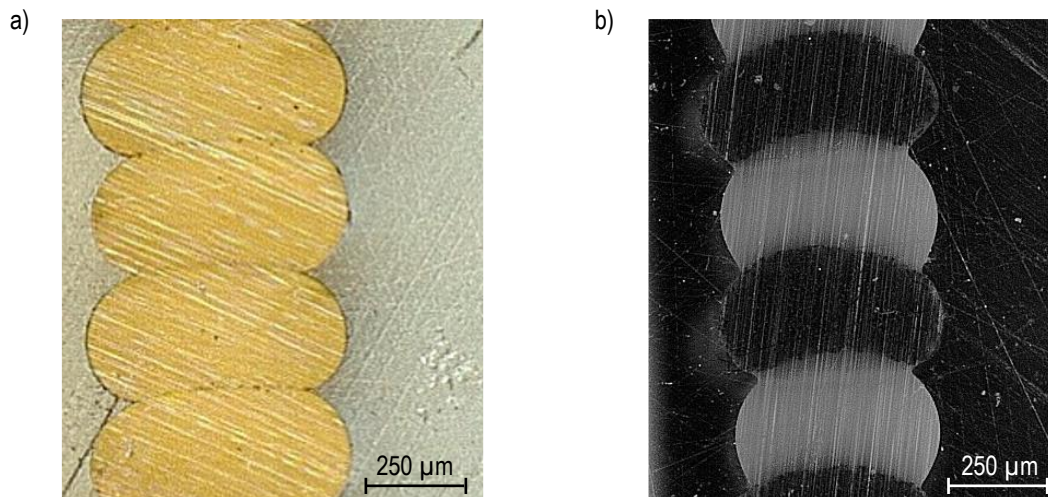


Bild 8-12: Makroskopische Aufnahme zur Auswertung der Strangablage der Multimaterialbauweise a) Ultrafuse PPSU, b) VESTAKEEP 2000G und VESTAKEEP 2000 CF15

Für die Auswertung der Düsenkalibrierung von amorphem PPSU verarbeiten beide Filamentextruder das Ultrafuse PPSU. Der Vorteil dieses Aufbaus ist, dass der Einfluss von verschiedenen materialspezifischen Prozesseigenschaften ausgeschlossen werden kann. Durch die makroskopische Strangauswertung (vgl. Bild 8-12 a)) kann eine zentrierte und über die Bauhöhe in z-Richtung eine homogene Ablage der Stränge ohne signifikanten Versatz nachgewiesen werden. Damit liegt eine hohe Übereinstimmung zwischen den ermittelten und den tatsächlichen Düsenabständen vor und die Düsenkalibrierung kann mit den Ergebnissen verifiziert werden. Die optische Auswertung der Strangablage für die Multimaterialkombination von VESTAKEEP 2000G mit dem VESTAKEEP 2000 CF15 zeigt ebenfalls eine definierte Ablage der Kunststoffstränge übereinander sowie keinen signifikanten Versatz entlang der z-Richtung (vgl. Bild 8-12 b)). Bei der Betrachtung der Stranghöhen ist ersichtlich, dass das unverstärkte PEEK eine größere Stranghöhe aufweist. Ursächlich könnte ein geringfügiger Bedarf zur Anpassung der auszutragenden Materialmenge für das VESTAKEEP 2000 CF15 sein. Dennoch ist die grundlegende Voraussetzung einer definierten Strangablage erfüllt und es ist möglich, die Verarbeitungseignung der verwendeten PEEK Materialien für den Multimaterialdruck anhand der Schweißnahtfestigkeit zu untersuchen. Die Gegenüberstellung der experimentell bestimmten Schweißnahtfestigkeiten ist in Bild 8-13 veranschaulicht.

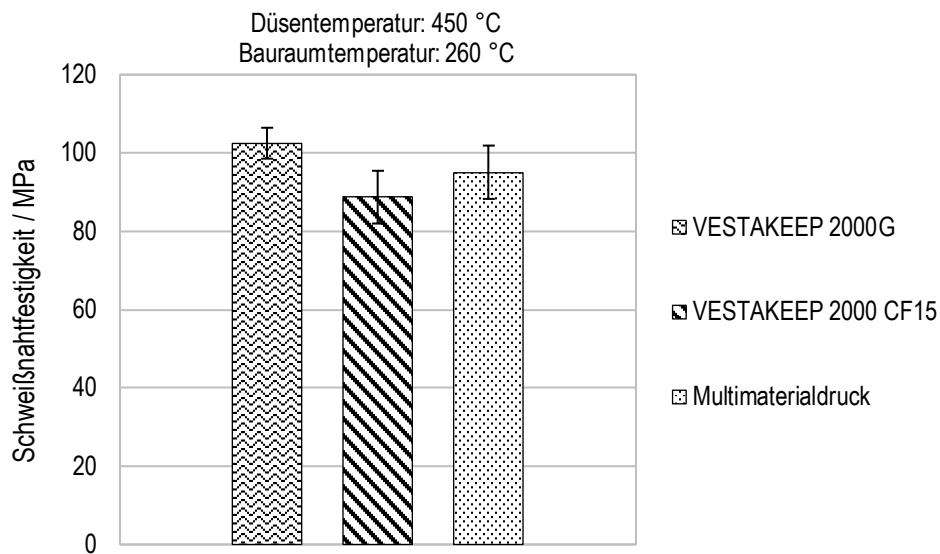


Bild 8-13: Analyse der Verarbeitungseignung anhand der Schweißnahtfestigkeit für das VESTAKEEP 2000G und das VESTAKEEP 2000 CF15 (in Zusammenarbeit mit NEUGEBAUER, vgl. [Neu21])

Die Auswirkung von Faserverstärkungen auf die Schweißnahtfestigkeit im FDM wird in Kapitel 5.6 analysiert. Mit zunehmenden Faseranteil nimmt die Schweißnahtfestigkeit ab. In diesen Untersuchungen kann gezeigt werden, dass durch eine schichtweise Kombination mit dem VESTAKEEP 2000G die gemittelte Schweißnahtfestigkeit des VESTAKEEP 2000 CF15 im Vergleich zur Ausgangsfestigkeit gesteigert werden kann. Damit ist es möglich die Festigkeit in z-Aufbauichtung zu verbessern und zu beeinflussen. Die Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass durch die Kombination eines unverstärkten und eines faserverstärkten Materials der Matrixanteil in der Schweißnaht erhöht wird und sich dies festigkeitssteigernd auswirkt. Zudem kann gezeigt werden, dass sich die Materialien für Multimaterialanwendungen im FDM eignen.

Zusammenfassend ist die Methode zur Qualifizierung von Materialien für den Multimaterialdruck im FDM mithilfe der Untersuchungen auch für den Hochtemperaturbereich validiert, indem unter anderem mit einer Düsentemperatur von 450 °C und einer Bauraumtemperatur von 260 °C äußerst anspruchsvolle Verarbeitungstemperaturen ausgewertet sind. Es kann gezeigt werden, dass sich die Festigkeit in z-Richtung durch einen sequentiellen Materialwechsel Schicht für Schicht verbessern lässt. Dadurch ist es denkbar, Bauteilfunktionalitäten gezielt zu beeinflussen. Mit der vorgestellten Methode ist es möglich, das hierzu notwendige Materialwissen zu ermitteln und bereitzustellen. Die Untersuchungen werden mit einem unverstärkten und einem kohlenstofffaserverstärkten PEEK durchgeführt und es kann eine Eignung der Materialien für den Multimaterialdruck gezeigt werden.

9 Zusammenfassung

Die Entwicklung vom Rapid Prototyping zum Direct Manufacturing führt zu einem wachsenden Bedarf an und einer gesteigerten Nachfrage nach Hochleistungsthermoplasten für den FDM-Prozess. Für die wirtschaftliche Umsetzung spielt hierbei das Zusammenwirken von Material, Prozess und Bauteilgestaltung eine wichtige Rolle. Untersuchungen der Einflüsse und Abhängigkeiten von Material und Prozess bilden in diesem Zusammenhang einen essentiellen Bestandteil der Materialqualifizierung für den FDM-Prozess ab. In der vorliegenden Dissertation stehen die Charakterisierung der materialbedingten Verarbeitungseignung sowie die Prozessparameteroptimierung von Hochleistungsthermoplasten für das FDM-Verfahren im Fokus. Auf diesem Weg werden Wechselwirkungen zwischen Material und Prozess herausgestellt, ein ganzheitliches Prozessverständnis aufgebaut und die Beherrschbarkeit des FDM-Prozesses verbessert.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Materialien aus dem Bereich der Hochleistungsthermoplaste untersucht. Die Materialauswahl besteht aus einem amorphen PPSU (Ultrafuse PPSU) und aus teilkristallinem PEEK in verschiedenen Materialmodifikationen (VESTAKEEP 3300G, VESTAKEEP 2000G, VESTAKEEP 2000 CF15, VESTAKEEP 2000 CF20). Im Vorfeld der Untersuchungen wird eine Materialcharakterisierung der Ausgangsmaterialien durchgeführt und Materialeigenschaften z. B. zum Aufschmelzverhalten oder bzgl. des Materialabbaus ermittelt. Da einige Materialien nur in Form von Standardgranulaten am Markt erhältlich sind, müssen außerdem die zur Verarbeitung im FDM notwendigen Filamente hergestellt werden. In diesem Zusammenhang wird durch geeignete Maßnahmen eine ausreichende Qualität des Filaments sichergestellt, um Einflüsse auf den Fertigungsprozess im FDM auszuschließen. Anschließend wird eine Bewertung der Verarbeitungseignung der Materialien im FDM anhand der Schweißnahtqualität und des Verzugsverhaltens durchgeführt. Diese Merkmale sind Bestandteil einer methodischen Vorgehensweise, die in den Untersuchungen dieser Arbeit erfolgreich für Hochleistungsthermoplaste validiert werden konnte und zukünftig für weitere Materialqualifizierungen zur Bewertung der Verarbeitungseignung eingesetzt werden kann.

Insbesondere in z-Richtung (vertikale Richtung) ist die Schweißnahtqualität von essentieller Bedeutung für eine ausreichende Bauteilfestigkeit. Zur Beurteilung der Schweißnahtqualität wird ein Schweißbreitenfaktor, die Schweißnahtfestigkeit und der Schweißfaktor ermittelt. Allerdings zeigt sich, dass sowohl für das PPSU als auch für das PEEK in den betrachteten Temperaturbereichen kein signifikanter Einfluss auf den Schweißbreitenfaktor besteht. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird der Fokus in den folgenden Untersuchungen auf die Schweißnahtfestigkeit sowie auf den Schweißfaktor gelegt. Die Verarbeitung des PPSU wird durch hohe Düsen- und Bauraumtemperaturen positiv beeinflusst. Das Material ist für die Verarbeitung im FDM geeignet. Auch für PEEK können die Verarbeitungsparameter mithilfe der experimentellen Vorgehensweise untersucht und unter Berücksichtigung der

Schweißnahtqualität optimiert werden. Hohe Prozesstemperaturen der Düse und des Bauraums während des FDM-Prozesses wirken sich festigkeitssteigernd und positiv auf die Prozessstabilität aus.

Aufgrund des signifikanten Einflusses der Düsentemperatur auf die Schweißnahtfestigkeit wird ein simulativer Ansatz zur Bestimmung der Strangtemperatur bei Düsenaustritt entwickelt und nachfolgend validiert. Dies eröffnet die Möglichkeit, verschiedene FDM-Anlagen besser miteinander vergleichen zu können, indem die Temperatur des ausgetragenen Strangs simulativ bestimmt und anschließend zur Auswertung herangezogen wird. Das vorgestellte Vorgehen zum Aufbau des Simulationsmodells kann hierzu adaptiert werden und aufgrund der verbesserten Vergleichbarkeit der Materialtemperatur während der Strangablage die Forschungsqualität erheblich steigern.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass neben der Düsentemperatur die Bauraumtemperatur für die Verarbeitung von PEEK und die resultierenden Schweißnahtfestigkeiten von entscheidender Bedeutung ist. Bedingt durch das teilkristalline Materialverhalten muss der Kristallisationsgrad, der unter anderem durch den thermischen Einfluss des beheizten Bauraums ausgeprägt wird, während der Verarbeitung berücksichtigt werden. Zwischen einer Bauraumtemperatur von 200 °C bis 250 °C befindet sich die Kristallinität auf einem nahezu konstanten Niveau. Außerdem konnte gezeigt werden, dass durch die Verarbeitung von PEEK mit einem aktiv beheizten Bauraum der Prozessschritt einer nachträglichen Wärmebehandlung (Tempern) substituiert werden kann.

Das Auftreten von Verzugerscheinungen, die auf materialspezifische Schwindungsvorgänge während des FDM-Prozesses zurückzuführen sind, führt dazu, dass das Verzugverhalten als Bestandteil der Materialqualifizierung ausgewertet wird. Mit dem Ziel, das Prozessverständnis um das Verhalten von amorphen und teilkristallinen Hochleistungsthermoplasten in Abhängigkeit von verschiedenen Verarbeitungstemperaturen (Düsen-/Bauraumtemperatur) zu erweitern, werden das Ultrafuse PPSU und das VESTAKEEP 3300G untersucht. Die verwendete Methode ermöglicht eine quantitative Einordnung des materialspezifischen Verzugsverhaltens und ist erfolgreich für die Hochleistungskunststoffe im Hochtemperaturbereich validiert worden. Denn mithilfe eines Probekörpers ist es möglich, Verzugsausprägungen anhand eines Verformungsmaßes zu quantifizieren und in Abhängigkeit von den Verarbeitungsparametern zu bewerten. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass PPSU knapp unter der Glasübergangstemperatur bei 220 °C keine Verzugerscheinungen aufweist und sehr gut zu verarbeiten ist. Bauraumtemperaturen von 180 °C sind hingegen für das PPSU auszuschließen. Unter Berücksichtigung der Schweißnahtfestigkeit und der Prozessstabilität kann eine Düsentemperatur von 420 °C und eine Bauraumtemperatur von 220 °C empfohlen werden. Während der Verarbeitung von PEEK treten in Abhängigkeit von den Prozessparametern signifikante Verformungen auf. In den Untersuchungen hat die Düsentemperatur nur einen geringen Einfluss auf den Bauteilverzug und

unter Berücksichtigung der Schweißnahtfestigkeit kann die Empfehlung zu einer Düsentemperatur von 450 °C abgeleitet werden. Es zeigt sich, dass die Temperaturen im Bauraum von entscheidender Bedeutung für den Bauteilverzug sind. Temperaturen zwischen 150 °C und 200 °C sind für die Verarbeitung von PEEK aufgrund der ermittelten signifikanten Verformungen nicht geeignet. In den Untersuchungen liegt das maximale Verformungsmaß bei 175 °C. Die Verformung lässt sich durch eine zunehmende Bauraumtemperatur und einer schrittweisen Erhöhung der Temperatur um jeweils 25 K von 175 °C auf 250 °C kontinuierlich reduzieren. Eine nachträgliche Wärmebehandlung durch einen Temperprozess zeigt nahezu keinen Einfluss auf den Bauteilverzug von Probekörpern, die bei Bauraumtemperaturen zwischen 175 °C und 250 °C gefertigt worden sind. Somit ist eine Bauraumtemperierung gegenüber einer nachträglichen Wärmebehandlung während der Verarbeitung von PEEK im FDM vorzuziehen. Aus den Untersuchungen des Verzugsverhaltens sowie der Schweißnahtqualität lassen sich zusammenfassend eine Düsentemperatur von 450 °C und eine Bauraumtemperatur von 250 °C als optimierte Prozessparameter für die Verarbeitung von PEEK ableiten.

Aufbauend auf den Ergebnissen, dass die Verarbeitbarkeit von PEEK im FDM unter der Berücksichtigung der Schweißnahtqualität und des Verzugsverhaltens am Beispiel des VESTAKEEP 3300G gegeben ist, werden weitere umfangreiche experimentelle Untersuchungen mit dem VESTAKEEP 2000G durchgeführt. Neben der Untersuchung des Einflusses des Volumenstroms sowie der Düsen- und Bauraumtemperatur auf die Schweißnahtfestigkeit steht die Analyse der Wechselwirkungen der Prozessparameter untereinander im Fokus. Hierzu werden empirisch ermittelte Prozessdaten statistisch ausgewertet, um dadurch eine quantitative Aussage zum Einfluss der verwendeten Prozessparameter auf die Schweißnahtfestigkeit von PEEK im FDM zu ermöglichen. Weiterführend wird auf der Grundlage der statistischen Analyse ein Vorhersagemodell für die Schweißnahtfestigkeit von unverstärktem PEEK erarbeitet, welches die Schweißnahtfestigkeit in Abhängigkeit von den ausgewählten Prozessparametern mit einer hohen Genauigkeit abbildet. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass der Volumenstrom während der Strangablage eine vernachlässigbare Auswirkung auf die Schweißnahtfestigkeit hat. Anpassungen sowohl der Düsentemperatur als auch der Bauraumtemperatur haben einen signifikanten Einfluss auf die Schweißnahtfestigkeit. Beide Prozessparameter können durch einen linearen Zusammenhang beschrieben werden und zeigen einen festigkeitssteigernden Effekt. Darüber hinaus kann durch die statistische Auswertung verifiziert werden, dass die Düsentemperatur verglichen mit der Bauraumtemperatur einen größeren Einfluss auf die Schweißnahtfestigkeit besitzt.

Basierend auf dem Modell wird ein Konzept zur Vorhersage der Schweißnahtfestigkeit faserverstärkter Materialien im FDM entwickelt und validiert. In den Untersuchungen werden die kohlenstofffaserverstärkten Materialien VESTAKEEP 2000 CF15 und VESTAKEEP 2000 CF20 verwendet und die Schweißnahtfestigkeit in Abhängigkeit von verschiedenen

Prozessparametern analysiert. Aus der Auswertung geht hervor, dass Faserverstärkungen zu einer Schwächung der Schweißnaht in z-Richtung führen, da sich die Fasern während der Strangablage in Extrusionsrichtung orientieren und somit orthogonal zur späteren Belastung ausgerichtet sind. Die Schweißnahtfestigkeit nimmt mit zunehmendem Faseranteil ab. Dies kann mit einer Reduzierung des Matrixanteils in der Schweißnaht in Zusammenhang gesetzt werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird ein Ansatz entwickelt, um unter Berücksichtigung des Matrixanteils in der Schweißnaht von faserverstärkten Materialien die resultierenden Schweißnahtfestigkeiten zu modellieren. Die Gegenüberstellung von den gemessenen und den berechneten Daten verdeutlicht, dass das entwickelte Modell den funktionalen Zusammenhang der thermischen Verarbeitungsparameter, unter Berücksichtigung verschiedener Fasergehalte, auf die Schweißnahtfestigkeit treffend abbilden kann. Die Untersuchungen schaffen eine Basis mit der es zukünftig möglich ist, die Auswirkungen von verschiedenen Fasergehalten auf die Schweißnahtfestigkeit im FDM zu berücksichtigen. Denn aufgrund der allgemeingültigen physikalischen Einflüsse zwischen Matrixmaterial und Faser in der FDM-Schweißnaht bei ausreichender Faser-Matrix-Haftung ist eine theoretische Übertragbarkeit auf sämtliche kurzfaserverstärkte FDM-Materialien gegeben.

Darüber hinaus wird ein systematischer Ansatz zur Beurteilung der Verarbeitungseignung von Multimaterialkombinationen für das FDM entwickelt. Denn das FDM-Verfahren bietet die Möglichkeit, verschiedene Materialien innerhalb eines Fertigungsprozesses zu verarbeiten und bietet daher ein hohes Potenzial zur Steigerung der Produktvielfalt, das durch den stetig wachsenden Materialmarkt und der damit zunehmenden Anzahl an möglichen Materialkonstellationen an Signifikanz gewinnt. Die erarbeitete Methode deckt den Bedarf nach einer Möglichkeit, die Verarbeitungseignung von verschiedenen Materialkombinationen im FDM quantitativ, reproduzierbar und unter Berücksichtigung von prozessspezifischen Einflüssen bewerten zu können, ab. Als essentieller Bestandteil der Methode werden zwei verschiedene Vorgehensweisen zur Kalibrierung der Filamentextruder vorgestellt, die in der Schichtbauweise eine exakte Positionierung der Stränge übereinander ermöglichen. Darüber hinaus werden Einflussfaktoren sowohl auf den Kalibrierungsprozess als auch auf die Fertigungsqualität des Multimaterialdrucks aufgezeigt. Abschließend konnte die Methode für den Standard- und den Hochtemperaturbereich anhand von ABS, PPSU und PEEK validiert und eine Eignung der verwendeten Materialkombinationen für den Multimaterialdruck im FDM nachgewiesen werden. Es zeigt sich, dass durch die Multimaterialbauweise die Schweißnahtfestigkeit verbessert werden kann und ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung der z-Festigkeit besteht. Dies ist für ein kohlenstofffaserverstärktes PEEK nachgewiesen worden, indem das Material Schicht für Schicht alternierend mit einem unverstärkten PEEK kombiniert wird. Zudem kann in weiteren Untersuchungen gezeigt werden, dass die Methode neben der Verarbeitungseignung auch die Möglichkeit bietet, eine Optimierung der Verarbeitungsparameter für den Multimaterialdruck durchzuführen.

10 Literaturverzeichnis

Studentische Arbeiten

Die nachstehend aufgeführten studentischen Arbeiten wurden im Kontext der vorliegenden Arbeit in der Arbeitsgruppe Kunststofftechnik der Fakultät für Maschinenbau an der Universität Paderborn angefertigt. Die Definition der Zielsetzung, die Bearbeitung sowie die Auswertung, Interpretation und Visualisierung von Ergebnissen erfolgten unter wissenschaftlicher Anleitung der Betreuenden (Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer, Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner, Dr.-Ing. Matthias Hopp und Julian Wächter). Die erzielten Ergebnisse sind zum Teil in diese Arbeit eingeflossen.

- [Els19] ELSNER, M. (Betreuer: MORITZER, E.; Wächter, J.): Untersuchungen zur Verarbeitungseignung alternativer Kunststoffe im Fused Deposition Modeling. Studienarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn, 2019
- [Fuh19] FUHRMANN, C. (Betreuer: MORITZER, E.; Wächter, J.): Untersuchungen zum Schwindungsverhalten verschiedener Kunststoffe im Fused Deposition Modeling. Studienarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn, 2019
- [Kis20] KISTER, N. (Betreuer: MORITZER, E.; Wächter, J.): Untersuchungen zur Verarbeitungseignung verschiedener kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe im Fused Deposition Modeling. Studienarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn, 2020
- [Kit20] KITTEL, M. (Betreuer: MORITZER, E.; Wächter, J.): Entwicklung geeigneter Rahmenbedingungen für den Dualdruck unter Berücksichtigung der Schweißnahtfestigkeit am Beispiel des FDM-Verfahrens. Studienarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn, 2020
- [Kna21] KNAUP, F. (Betreuer: MORITZER, E.; SCHÖPPNER, V.; Wächter, J.; HECKER, F.): Analyse und Modellierung des Aufschmelzverhaltens im Fused Deposition Modeling Verfahren am Beispiel des GEWO HTP 260. Masterarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn, 2021
- [Mue19] MÜLLER, T. (Betreuer: MORITZER, E.; Wächter, J.): Extrusion und Untersuchungen von Kunststofffilamenten zur Additiven Fertigung aus Hochtemperatur-Materialien. Studienarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn, 2019
- [Neu21] NEUGEBAUER, M. (Betreuer: MORITZER, E.; Wächter, J.): Entwicklung und Validierung einer Vorgehensweise zur Kalibrierung zweier Düsen in einem Hochtemperatur FDM Drucker. Studienarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn, 2021
- [Pet21] PETERS, H. (Betreuer: MORITZER, E.; Wächter, J.): Untersuchung der Potenziale verschiedener FDM Materialien im Dualdruck unter Berücksichtigung der Schweißnahtfestigkeit. Studienarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn, 2021
- [Sch21] SCHNEIDER, T. (Betreuer: MORITZER, E.; HOPP, M.; Wächter, J.): Modellierung und Untersuchung ausgewählter Prozessparameter eines Hochleistungskunststoffs in Abhängigkeit von der Schweißnahtqualität im FDM. Masterarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn, 2021

- [Tis22] TISSEN, A. (Betreuer: MORITZER, E.; Wächter, J.): Untersuchungen des Schwindungsverhaltens und der Beeinflussung von Bauteileigenschaften durch Wärmebehandlung für PEEK im FDM. Studienarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, Direct Manufacturing Research Center, Universität Paderborn, Paderborn, 2022

Literatur

- [3Dn19-ol] 3DNATIVES: Experteninterview: Hochleistungskunststoffe (PEEK, PEI,...) - Was muss man beim Druck beachten? Unter: <https://www.3dnatives.com/de/experteninterview-hochleistungskunststoffe-23052019/>, 2019, zuletzt geprüft am: 21. Mai 2022
- [Ada15] ADAM, G. A. O.: Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling. Dissertation, 2015
- [AJL+96] AGARWALA, M. K.; JAMALABAD, V. R.; LANGRANA, N. A.; SAFARI, A.; WHALEN, P. J.; DANFORTH, S. C.: Structural quality of parts processed by fused deposition. Rapid Prototyping Journal, Band 2, Heft 4, 1996, S. 4–19, DOI: 10.1108/13552549610732034
- [AMO+02] AHN, S.-H.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K.: Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. Rapid Prototyping Journal, Band 8, Heft 4, 2002, S. 248–257, DOI: 10.1108/13552540210441166
- [AWS03] ALTSTAEDT, V.; WERNER, P.; SANDLER, J.: Rheological, mechanical and tribological properties of carbon-nanofibre reinforced poly (ether ether ketone) composites. Polimeros, Band 13, Heft 4, 2003, S. 218–222, DOI: 10.1590/S0104-14282003000400005
- [AZO04-ol] AZO MATERIALS: Polyphenylsulphone - Supplier Data by Goodfellow. Unter: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2260>, 2004, zuletzt geprüft am: 08. Juni 2022
- [BA20] BACA, D.; AHMAD, R.: The impact on the mechanical properties of multi-material polymers fabricated with a single mixing nozzle and multi-nozzle systems via fused deposition modeling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Heft 106, 2020, S. 4509–4520, DOI: 10.1007/s00170-020-04937-3
- [Bäh20] BÄHR, F.: Methode zur modellierungsbasierten, präventiven Qualitätssicherung im Material Extrusion Verfahren. Dissertation, Universität Stuttgart, 2020
- [BAÖ21] BAKIR, A. A.; ATIK, R.; ÖZERİNC, S.: Mechanical properties of thermoplastic parts produced by fused deposition modeling: a review. Rapid Prototyping Journal, Band 27, Heft 3, 2021, S. 537–561, DOI: 10.1108/RPJ-03-2020-0061
- [BAS21-ol] BASF 3D PRINTING MATERIALS AND SERVICES: Materialdatenblatt Ultrafuse® PPSU. Unter: <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/high-temperature-filaments/ultrafuse-ppsu/>, 2021, zuletzt geprüft am: 27. April 2022
- [BBO+07] BAUER, E.; BRINKMANN, S.; OSSWALD, T. A.; SCHMACHTENBERG, E.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. Hanser, München, 30. Ausgabe, überarbeitet & aktualisiert, 2007, ISBN: 978-3-446-40352-9
- [BBW+12] BREUNINGER, J.; BECKER, R.; WOLF, A.; ROMMEL, S.; VERL, A.: Generative Fertigung mit Kunststoffen - Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012, ISBN: 978-3-642-24325-7
- [BHS17] BERGER, U.; HARTMANN, A.; SCHMID, D.: 3D-Druck - Additive Fertigungsverfahren - Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. Verlag Europa-Lehrmittel - Nourney Vollmer GmbH & Co. KG, Haan-Gruiten, 2. Auflage, 2017, ISBN: 3808550341

- [BLG19] BHANDARI, S.; LOPEZ-ANIDO, R. A.; GARDNER, D. J.: Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing. *Additive Manufacturing*, Band 30, 2019, DOI: 10.1016/j.addma.2019.100922
- [BLS+04] BELLEHUMEUR, C.; LI, L.; SUN, Q.; GU, P.: Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. *Journal of Manufacturing Processes*, Band 6, Heft 2, 2004, S. 170–178, DOI: 10.1016/S1526-6125(04)70071-7
- [Bon09] BONNET, M.: *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung - Verstehen und zuverlässig auswählen*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 1. Aufl., 2009, ISBN: 978-3-8348-0349-8
- [BYP+98] BERTOLDI, M.; YARDIMCI, M.; PISTOR, C. M.; GUCERI, S. I.; SALA, G.: Mechanical Characterization of Parts Processed via Fused Deposition. *9th Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 1998, S. 557–566, DOI: 10.26153/tsw/646
- [CBL+21] CONSUL, P.; BEUERLEIN, K.-U.; LUZHA, G.; DRECHSLER, K.: Effect of Extrusion Parameters on Short Fiber Alignment in Fused Filament Fabrication. *Polymers*, Band 13, Heft 15, 2021, DOI: 10.3390/polym13152443
- [CK17a] COOGAN, T. J.; KAZMER, D. O.: Healing simulation for bond strength prediction of FDM. *Rapid Prototyping Journal*, Band 23, Heft 3, 2017, S. 551–561, DOI: 10.1108/RPJ-03-2016-0051
- [CK17b] COOGAN, T. J.; KAZMER, D. O.: Bond and part strength in fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, Band 23, Heft 2, 2017, S. 414–422, DOI: 10.1108/RPJ-03-2016-0050
- [CLH07] CHUNG WANG, C.; LIN, T.-W.; HU, S.-S.: Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the Gray relational analysis. *Rapid Prototyping Journal*, Band 13, Heft 5, 2007, S. 304–315, DOI: 10.1108/13552540710824814
- [CLL03] CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S.: *Rapid Prototyping - Principles and Applications*. World Scientific Publishing, Singapur, 2. Auflage, 2003, ISBN: 978-981-238-117-0
- [CPT94] COMB, J. W.; PRIEDEMAN, W. R.; TURLEY, P. W.: FDM Technology Process Improvements. *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 1994, S. 42–49, DOI: 10.15781/T25X25Z09
- [Cru92] CRUMP, S.: *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*, US5121329A, 1992
- [DEE+12] DOMINGHAUS, H.; ELSNER, P.; EYERER, P.; HIRTH, T.: *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012, ISBN: 978-3-642-16172-8
- [DHH+17] DAVIS, C. S.; HILLGARTNER, K. E.; HAN, S. H.; SEPPALA, J. E.: Mechanical strength of welding zones produced by material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, Band 16, 2017, S. 162–166, DOI: 10.1016/j.addma.2017.06.006
- [DIN 8580] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [DIN EN ISO 1133-1] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten - Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren*. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [DIN EN ISO 15512] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *Kunststoffe - Bestimmung des Wassergehaltes*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019
- [DIN EN ISO 17296-2] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *Additive Fertigung - Grundlagen - Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe*. Beuth Verlag GmbH, Berlin

- [DIN EN ISO 291] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Kunststoffe - Normalklimate für Konditionierung und Prüfung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008
- [DIN EN ISO 527-2] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [DIN EN ISO 527-3] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018
- [DIN EN ISO/ASTM 52900] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017
- [Dud13] DUDEK, P.: FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements. Archives of Metallurgy and Materials, Band 58, Heft 4, 2013, S. 1415–1418, DOI: 10.2478/amm-2013-0186
- [DZP+18] DENG, X.; ZENG, Z.; PENG, B.; YAN, S.; KE, W.: Mechanical Properties Optimization of Poly-Ether-Ether-Ketone via Fused Deposition Modeling. Materials (Basel, Switzerland), Band 11, Heft 2, 2018, DOI: 10.3390/ma11020216
- [EEV+20] EL MAGRI, A.; ELMABROUK, K.; VAUDREUIL, S.; CHIBANE, H.; TOUHAMI, M. E.: Optimization of printing parameters for improvement of mechanical and thermal performances of 3D printed poly(ether ether ketone) parts. Journal of Applied Polymer Science, Band 137, Heft 37, 2020, DOI: 10.1002/app.49087
- [EHE08] EYERER, P.; HIRTH, T.; ELSNER, P.: Polymer Engineering - Technologien und Praxis. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, ISBN: 3-540-72402-8
- [Ehr06] EHRENSTEIN, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe - Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften. Hanser, München, Wien, 2., völlig überarbeitete Auflage, 2006, ISBN: 3-446-22716-4
- [Ehr11] EHRENSTEIN, G. W.: Polymer-Werkstoffe - Struktur - Eigenschaften - Anwendung. Hanser, München, 3. Auflage, 2011, ISBN: 978-3-446-42967-3
- [Evo18] Evonik Industries AG: Informationsaustausch im Rahmen gemeinsamer Forschung, 2018-2021
- [Evo19-ol] EVONIK INDUSTRIES AG: Materialdatenblatt VESTAKEEP - PEEK Formmassen. Unter: <https://industrial.vesta-keep.com/product/peek-industrial/de/produkte/peek-formmassen/pa-ges/default.aspx>, 2019, zuletzt geprüft am: 25. August 2019
- [Evo21a-ol] EVONIK INDUSTRIES AG: Produktinformationen - VESTAKEEP PEEK Typen. Unter: <https://industrial.vestakeep.com/de/produktinformationen-146584.html>, 2021, zuletzt geprüft am: 27. April 2022
- [Evo21b-ol] EVONIK RESOURCE EFFICIENCY GMBH: VESTAKEEP PEEK - Verarbeitungsempfehlungen. Unter: <https://industrial.vestakeep.com/product/peek-industrial/downloads/vesta-keep%20peek%20verarbeitung%2007-2016.pdf>, 2021, zuletzt geprüft am: 27. April 2022
- [EVV21] EL MAGRI, A.; VANAEI, S.; VAUDREUIL, S.: An overview on the influence of process parameters through the characteristic of 3D-printed PEEK and PEI parts. High Performance Polymers, Band 33, Heft 8, 2021, S. 862–880, DOI: 10.1177/09540083211009961
- [Fas12] FASTERMANN, P.: 3D-Druck/Rapid Prototyping - Eine Zukunftstechnologie - kompakt erklärt. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, ISBN: 978-3-642-29224-8
- [FG17] FELDMANN, C.; GORJ, A.: 3D-Druck und Lean Production - Schlanke Produktionssysteme mit additiver Fertigung. Springer Gabler, Wiesbaden, 2017, ISBN: 978-3-658-18408-7

- [FGK18] FISCHER, A.; GEBAUER, S.; KHAVKIN, E.: 3D-Druck im Unternehmen - Entscheidungsmodelle, Best Practices und Anwendungsbeispiele. Am Beispiel Fused Layer Modeling (FLM). Hanser, München, 2018, ISBN: 978-3-4464-4124-8
- [Fri18] FRITZ, A. H.: Fertigungstechnik. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 12., neu bearbeitete und ergänzte Auflage, 2018, ISBN: 978-3-662-56534-6
- [FS09] FAHRENWALDT, H. J.; SCHULER, V.: Praxiswissen Schweißtechnik - Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 3. Auflage, 2009, ISBN: 978-3-8348-9234-8
- [FS13] FRICK, A.; STERN, C.: DSC-Prüfung in der Anwendung. Hanser Verlag, München, 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, 2013, ISBN: 978-3-446-43692-3
- [FS17] FISCHER, M.; SCHÖPPNER, V.: Fatigue Behavior of FDM Parts Manufactured with Ultem 9085. The Journal of The Minerals, Band 69, Heft 3, 2017, S. 563–568, DOI: 10.1007/s11837-016-2197-2
- [FSS14] FELDMANN, K.; SCHÖPPNER, V.; SPUR, G.: Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. Hanser, München, 1. Auflage, 2014, ISBN: 978-3-446-42827-0
- [Fuh18] FUHRMANN, M.: Qualitätsorientierte modellbasierte Prozessparameteroptimierung für das Fused Deposition Modeling. Dissertation, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT; IIF - Institut für Industriekommunikation und Fachmedien GmbH, 2018
- [FWH+19] FREUND, R.; WATSCHKE, H.; HEUBACH, J.; VIETOR, T.: Determination of Influencing Factors on Interface Strength of Additively Manufactured Multi-Material Parts by Material Extrusion. Applied Sciences, Band 9, Heft 9, 2019, S. 1–20, DOI: 10.3390/app9091782
- [GBG+22] GARCÍA-COLLADO, A.; BLANCO, J. M.; GUPTA, M. K.; DORADO-VICENTE, R.: Advances in polymers based Multi-Material Additive-Manufacturing Techniques: State-of-art review on properties and applications. Additive Manufacturing, Band 50, 2022, S. 1–14, DOI: 10.1016/j.addma.2021.102577
- [Geb14] GEBHARDT, A.: 3D-Drucken - Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM). Hanser, München, 2014, ISBN: 978-3-446-44237-5
- [Geb16] GEBHARDT, A.: Additive Fertigungsverfahren - Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. Hanser; Ciando, München, 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2016, ISBN: 978-3-446-44539-0
- [GEW19-ol] GEWO FEINMECHANIK: Überblick Datenblatt GEWO HTP260. Unter: <https://gewo3d.com/de/htp-260/ueberblick.html>, 2019, zuletzt geprüft am: 02. Mai 2022
- [GKS19] GEBHARDT, A.; KESSLER, J.; SCHWARZ, A.: Produktgestaltung für die Additive Fertigung. Hanser; Ciando, München, 2019, ISBN: 978-3-4464-6133-8
- [GRS+21] GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B.; KHORASANI, M.: Additive Manufacturing Technologies. Springer International Publishing AG, Cham, 3. Auflage, 2021, ISBN: 978-3-0305-6127-7
- [GRS15] GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B.: Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer, New York, NY, 2. Auflage, 2015, ISBN: 978-1-4939-2113-3
- [HDX+19] HU, B.; DUAN, X.; XING, Z.; XU, Z.; DU, C.; ZHOU, H.; CHEN, R.; SHAN, B.: Improved design of fused deposition modeling equipment for 3D printing of high-performance PEEK parts. Mechanics of Materials, Band 137, 2019, DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103139
- [HHH04] HELLERICH, W.; HARSCH, G.; HAENLE, S.: Werkstoff-Führer Kunststoffe - Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte. Hanser, München, Wien, 9. Auflage, 2004, ISBN: 3-446-22559-5

- [HM20] HENNING, F.; MOELLER, E.: Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoffe, Fertigung. Hanser, München, Wien, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2020, ISBN: 978-3-446-45638-9
- [HRE+13] HOSSAIN, M. S.; RAMOS, J.; ESPALIN, D.; PEREZ, M.; WICKER, R.: Improving Tensile Mechanical Properties of FDM-Manufactured Specimens via Modifying Build Parameters. 24th Solid Freeform Fabrication Proceedings, 2013, S. 380–392
- [Kai11] KAISER, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure - Von der Synthese bis zur Anwendung. Hanser, München, 3. Auflage, 2011, ISBN: 978-3-446-43049-5
- [KK13] KANTAROS, A.; KARALEKAS, D.: Fiber Bragg grating based investigation of residual strains in ABS parts fabricated by fused deposition modeling process. Materials & Design, Band 50, 2013, S. 44–50, DOI: 10.1016/j.matdes.2013.02.067
- [Klo16] KLOKE, A.: Untersuchung der Werkstoff-, Prozess- und Bauteileigenschaften beim Fused Deposition Modeling Verfahren. Dissertation, Universität Paderborn, 2016
- [Kno20] KNOOP, F.: Untersuchung der mechanischen und geometrischen Eigenschaften von Bauteilen hergestellt im Fused Deposition Modeling Verfahren. Dissertation, Universität Paderborn, 2020
- [Kre08] KRENKEL, W.: Ceramic matrix composites - Fiber reinforced ceramics and their applications. Wiley-VCH, Weinheim, 2008, ISBN: 978-3-527-31361-7
- [KSA16] KIM, E.; SHIN, Y.-J.; AHN, S.-H.: The effects of moisture and temperature on the mechanical properties of additive manufacturing components: fused deposition modeling. Rapid Prototyping Journal, Band 22, Heft 6, 2016, S. 887–894, DOI: 10.1108/RPJ-08-2015-0095
- [Kum19] KUMAR, J.: 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies. Springer Singapore Pte. Limited, Singapore, 2019, ISBN: 978-981-13-0305-0
- [LL20] LI, Y.; LOU, Y.: Tensile and Bending Strength Improvements in PEEK Parts Using Fused Deposition Modelling 3D Printing Considering Multi-Factor Coupling. Polymers, Band 12, Heft 11, 2020, DOI: 10.3390/polym12112497
- [Mag22-ol] MAGIGOO: Magigoo Pro High Temperature. Unter: <https://magigoo.com/products/magigoo-pro-ht/>, 2022, zuletzt geprüft am: 22. Mai 2022
- [MRO+01] MONTERO, M.; ROUNDY, S.; ODELL, D.; AHN, S.-H.; WRIGHT, P. K.: Material Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) ABS by Designed Experiments. Proceedings Rapid Prototyping and Manufacturing Conference, 2001, S. 1–21
- [MS04] MASOOD, S.; SONG, W.: Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling. Materials & Design, Band 25, Heft 7, 2004, S. 587–594, DOI: 10.1016/j.matdes.2004.02.009
- [MW22] MORITZER, E.; WÄCHTER, J.: Development of a Procedure for the Assessment of Material Potentials Under Consideration of the Weld Seam Quality for Multi-material Applications in the FDM Process. Macromolecular Symposia, Band 404, Heft 1, 2022, S. 2100389-1–2100389-4, DOI: 10.1002/masy.202100389
- [MWE21] MORITZER, E.; WÄCHTER, J.; ELSNER, C. L.: Investigation of Specific FDM Process Parameters to Optimize the Polymer Discharge of Carbon Fiber Reinforced PEEK. Macromolecular Symposia, Band 395, Heft 1, 2021, S. 1–4, DOI: 10.1002/masy.202000269
- [Naj19-ol] NAJEEB, F.: PEEK 3D Printing – Everything you need to know. Unter: <https://3dprinting.com/3dprinters/peek-3d-printers-and-peek-filament-guide/>, 2019, zuletzt geprüft am: 21. Mai 2022
- [PLP+21] PARK, S. J.; LEE, J. E.; PARK, J.; LEE, N.-K.; SON, Y.; PARK, S.-H.: High-temperature 3D printing of polyetheretherketone products: Perspective on industrial manufacturing

- applications of super engineering plastics. *Materials & Design*, Band 211, 2021, DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110163
- [Pot04] POTENTE, H.: Fügen von Kunststoffen - Grundlagen, Verfahren, Anwendung. Hanser, München, Wien, 2004, ISBN: 978-3-446-22755-2
- [PRD21] POU, J.; RIVEIRO, A.; DAVIM, J. P.: *Handbook in Advanced Manufacturing - Additive Manufacturing*. Elsevier, 2021, ISBN: 978-0-1281-8412-7
- [PUL93] POTENTE, H.; UEBBING, M.; LEWANDOWSKI, E.: The Vibration Welding of Polyamide 66. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Band 6, Heft 1, 1993, S. 2–17, DOI: 10.1177/089270579300600101
- [Reg21-ol] REGINA, P.: Wohlers Report 2021: Additive Fertigung verzeichnet schwächeres Wachstum. Unter: <https://www.3dnatives.com/de/wohlers-report-2021-180320211/>, 2021, zuletzt geprüft am: 29. Dezember 2021
- [RSZ17] RICHARD, H. A.; SCHRAMM, B.; ZIPSNER, T.: *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017, ISBN: 978-3-658-17779-9
- [SAA+21] SHAQOUR, B.; ABUABIAH, M.; ABDEL-FATTAH, S.; JUAIDI, A.; ABDALLAH, R.; ABUZAINA, W.; QAROUT, M.; VERLEIJE, B.; COS, P.: Gaining a better understanding of the extrusion process in fused filament fabrication 3D printing: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Band 114, Heft 5-6, 2021, S. 1279–1291, DOI: 10.1007/s00170-021-06918-6
- [Sch03] SCHNECKO, H. W.: *Makromoleküle. Band 4: Anwendungen von Polymeren. Angewandte Chemie International Edition*, Band 42, Heft 36, 2003, DOI: 10.1002/anie.200385989
- [Sch07] SCHÜRMANN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2., bearbeitete und erweiterte Auflage, 2007, ISBN: 3-540-72189-4
- [Sch09] SCHUCK, M.: *Kompatibilitätsprinzipien beim Montagespritzgießen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2009
- [Sch20] SCHUMACHER, C.: *Erarbeitung eines methodischen Vorgehens zur merkmalspezifischen Charakterisierung der Verarbeitungseignung von nicht verstärkten und faserverstärkten Kunststoffen im Fused Deposition Modeling am Beispiel von Polyamid 6*. Dissertation, Universität Paderborn, 2020
- [SCN83] SHENOY, A. V.; CHATTOPADHYAY, S.; NADKARNI, V. M.: From melt flow index to rheogram. *Rheologica Acta*, Band 22, Heft 1, 1983, S. 90–101, DOI: 10.1007/BF01679833
- [Scu21-ol] SCULPTEO: *The State of 3D Printing Report: 2021*. Unter: <https://www.sculpteo.com/de/ebooks/state-of-3d-printing-report-2021/>, 2021, zuletzt geprüft am: 16. Oktober 2021
- [SG16] SINGH, R.; GARG, H. K.: Fused Deposition Modeling – A State of Art Review and Future Applications. *Encyclopedia of Smart Materials*, Heft 1, 2016, S. 270–288, DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.04037-6
- [SHF14] SEDLACEK, T.; HAUSNEROVA, B.; FILIP, P.: An evaluation of the pressure-dependent melt viscosity of polyphenylsulfone. *Polymer Engineering & Science*, Band 54, Heft 3, 2014, S. 711–715, DOI: 10.1002/pen.23604
- [SKF+19] SINGH, R.; KUMAR, R.; FARINA, I.; COLANGELO, F.; FEO, L.; FRATERNALI, F.: Multi-Material Additive Manufacturing of Sustainable Innovative Materials and Structures. *Polymers*, Band 11, Heft 1, 2019, DOI: 10.3390/polym11010062
- [SOM09] SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S.: Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*, Band 31, Heft 1, 2009, S. 287–295, DOI: 10.1016/j.matdes.2009.06.016

- [SRB+08] SUN, Q.; RIZVI, G. M.; BELLEHUMEUR, C. T.; GU, P.: Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, Band 14, Heft 2, 2008, S. 72–80, DOI: 10.1108/13552540810862028
- [SRS17] SINGH, S.; RAMAKRISHNA, S.; SINGH, R.: Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, Band 25, 2017, S. 185–200, DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.11.006
- [SSF19] SCHUMACHER, C.; SCHÖPPNER, V.; FELS, C.: A method to evaluate the process-specific warpage for different polymers in the FDM process. *AIP Conference Proceedings*, Band 2065, 2019, S. 1–5, DOI: 10.1063/1.5088315
- [SSG17] SCHUMACHER, C.; SCHÖPPNER, V.; GUNTERMANN, J.: Considering Machine- and Process-Specific Influences to Create Custom-Built Specimens for the Fused Deposition Modeling Process. *28th Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 2017, S. 470–484
- [SSL16] SOMMER, W.; SCHLENKER, A.; LANGE-SCHÖNBECK, C.-D.: *Faszination 3D-Druck - Alles zum Drucken, Scannen, Modellieren*. Markt+Technik, Burgthann, 2016, ISBN: 978-3-95982-027-1
- [Sta20-ol] STATISTA - DAS STATISTIK PORTAL: Dossier zur Additiven Fertigung/3D-Druck. Unter: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/29177/dokument/additive-fertigung-statista-dossier/>, 2020, zuletzt geprüft am: 29. Dezember 2021
- [STL+00] SWANSON, W. J.; TURLEY, P. W.; LEAVITT, P. J.; KARWOSKI, P. J.; LABOSSIERE, J. E.; SKUBIC, R. L.: High temperature modeling apparatus, US6722872B1, 2000
- [SvH17] SIEBERTZ, K.; VAN BEBBER, D.; HOCHKIRCHEN, T.: *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2. Auflage, 2017, ISBN: 3662557428
- [TG15] TURNER, B. N.; GOLD, S. A.: A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*, Band 21, Heft 3, 2015, S. 250–261, DOI: 10.1108/RPJ-02-2013-0017
- [TKB+18] TOFAIL, S. A.; KOUMOULOS, E. P.; BANDYOPADHYAY, A.; BOSE, S.; O'DONOGHUE, L.; CHARITIDIS, C.: Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, Band 21, Heft 1, 2018, S. 22–37, DOI: 10.1016/j.mattod.2017.07.001
- [TKV+14] TEKINALP, H. L.; KUNC, V.; VELEZ-GARCIA, G. M.; DUTY, C. E.; LOVE, L. J.; NASKAR, A. K.; BLUE, C. A.; OZCAN, S.: Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, Band 105, 2014, S. 144–150, DOI: 10.1016/j.compscitech.2014.10.009
- [TPB+14] TARDIF, X.; PIGNON, B.; BOYARD, N.; SCHMELZER, J. W.; SOBOTKA, V.; DELAUNAY, D.; SCHICK, C.: Experimental study of crystallization of PolyEtherEtherKetone (PEEK) over a large temperature range using a nano-calorimeter. *Polymer Testing*, Band 36, 2014, DOI: 10.1016/j.polymertesting.2014.03.013
- [TSG14] TURNER, N. B.; STRONG, R.; GOLD, S. A.: A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, Band 20, Heft 3, 2014, S. 192–204, DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012
- [VDI 3405] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V.: *Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014
- [Vv21] VAES, D.; VAN PUYVELDE, P.: Semi-crystalline feedstock for filament-based 3D printing of polymers. *Progress in Polymer Science*, Band 118, 2021, S. 1–42, DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2021.101411
- [VY15] VAEZI, M.; YANG, S.: Extrusion-based additive manufacturing of PEEK for biomedical applications. *Virtual and Physical Prototyping*, Band 10, Heft 3, 2015, S. 123–135, DOI: 10.1080/17452759.2015.1097053

- [Wat19] WATSCHKE, H.: Methodisches Konstruieren für Multi-Material-Bauweisen hergestellt mittels Materialextrusion. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2019
- [WCA+19] WANG, R.; CHENG, K.; ADVINCULA, R. C.; CHEN, Q.: On the thermal processing and mechanical properties of 3D-printed polyether ether ketone. *MRS Communications*, Band 9, Heft 3, 2019, S. 1046–1052, DOI: 10.1557/mrc.2019.86
- [Wen09] WENDEL, B.: Prozessuntersuchung des Fused Deposition Modeling. Dissertation, Erlangen, 2009
- [WG16-o] WOHLERS, T.; GORNET, T.: History of additive manufacturing. Unter: <http://www.wohlersassociates.com/history2016.pdf>, 2016, zuletzt geprüft am: 29. März 2022
- [WGZ+14] WU, W. Z.; GENG, P.; ZHAO, J.; ZHANG, Y.; ROSEN, D. W.; ZHANG, H. B.: Manufacture and thermal deformation analysis of semicrystalline polymer polyether ether ketone by 3D printing. *Materials Research Innovations*, Band 18, Heft 5, 2014, S. 12-16, DOI: 10.1179/1432891714Z.000000000898
- [WH09] WINTERMANTEL, E.; HA, S.-W.: *Medizintechnik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009, ISBN: 978-3-540-93935-1
- [WW11] WESTKÄMPER, E.; WARNECKE, H.-J.: *Einführung in die Fertigungstechnik*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 8., aktualisierte und erw. Aufl., 2011, ISBN: 978-3-8348-0835-6
- [WXJ07] WANG, T.-M.; XI, J.-T.; JIN, Y.: A model research for prototype warp deformation in the FDM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Band 33, Heft 11-12, 2007, S. 1087–1096, DOI: 10.1007/s00170-006-0556-9
- [YLF+18] YIN, J.; LU, C.; FU, J.; HUANG, Y.; ZHENG, Y.: Interfacial bonding during multi-material fused deposition modeling (FDM) process due to inter-molecular diffusion. *Materials & Design*, Band 150, 2018, S. 104–112, DOI: 10.1016/j.matdes.2018.04.029
- [YTL+17] YANG, C.; TIAN, X.; LI, D.; CAO, Y.; ZHAO, F.; SHI, C.: Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material. *Journal of Materials Processing Technology*, Band 248, 2017, S. 1–7, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.04.027
- [ZML+20] ZANJANJAM, A. R.; MAJOR, I.; LYONS, J. G.; LAFONT, U.; DEVINE, D. M.: Fused Filament Fabrication of PEEK: A Review of Process-Structure-Property Relationships. *Polymers*, Band 12, Heft 8, 2020, DOI: 10.3390/polym12081665

Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten

In Ergänzung zu meinem Antrag auf Zulassung zur Promotion in der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn erkläre ich gemäß §11 der Promotionsordnung und unter Beachtung der Regelung zur Zitation studentischer Arbeiten:

Die von mir vorgelegte Dissertation habe ich selbstständig verfasst, und ich habe keine anderen als die dort angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Es sind Inhalte studentischen Ursprungs (studentische Arbeiten) in dieser Dissertation enthalten.

Ich habe die verwendeten Arbeiten entsprechend der Regelung „Zitation aus studentischen Arbeiten in Dissertationen“ zitiert.

Paderborn, 04.10.2023

Unterschrift

Anhang

A1 Prozesseinstellungen der Filamentextrusion

Tabelle A1-1: Verarbeitungstemperaturen der Thermo Scientific Process 11 zur Filamentherstellung von VESTAKEEP 2000G, VESTAKEEP 2000 CF15, VESTAKEEP 2000 CF20

Düse	Zone 7	Zone 6	Zone 5	Zone 4	Zone 3	Zone 2	Einzug
370 °C	365 °C	360 °C	360 °C	360 °C	340 °C	260 °C	23 °C

A2 Untersuchung der Schweißnahtqualität

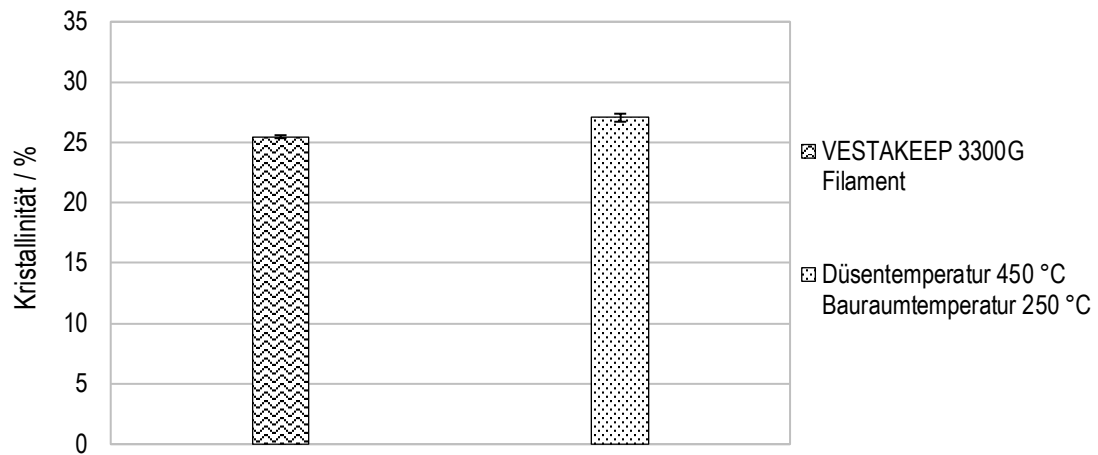


Bild A2-1: Vergleich der Kristallinität zwischen dem Filament und einem Probekörper gefertigt bei $T_D=450\text{ °C}$ und $T_B=250\text{ °C}$ für das Material VESTAKEEP 3300G

Tabelle A2-1: Bestimmte Temperaturmittelwerte an den verschiedenen Messpositionen in Abhängigkeit von der eingestellten Zieltemperatur (T_{Soll})

Position	$T_{Soll}=150\text{ °C}$	$T_{Soll}=200\text{ °C}$	$T_{Soll}=250\text{ °C}$	$T_{Soll}=300\text{ °C}$	$T_{Soll}=350\text{ °C}$	$T_{Soll}=400\text{ °C}$	$T_{Soll}=450\text{ °C}$
1 / °C	92,33	116,74	139,33	160,45	183,38	195,66	210,88
2 / °C	133,06	179,82	224,79	272,54	310,03	352,21	393,25
3 / °C	144,55	192,50	238,73	284,91	337,66	385,02	433,13
4 / °C	144,54	192,16	239,71	289,44	335,86	382,71	430,13
5 / °C	144,04	191,08	239,04	287,82	331,99	377,62	423,25
6 / °C	144,42	189,42	236,64	284,48	326,39	371,55	416,53

Tabelle A2-2: Funktionen zur Approximation der Wärmekapazität von PPSU und PEEK

PPSU	
$c_p(T) = \begin{cases} 0,0029 \frac{J}{g \cdot ^\circ C^2} * T + 0,9653 \frac{J}{g \cdot ^\circ C} & \text{für } T \leq 214 \text{ } ^\circ C \\ 0,0189 \frac{J}{g \cdot ^\circ C^2} * T - 2,445 \frac{J}{g \cdot ^\circ C} & \text{für } 214 \text{ } ^\circ C < T < 226 \text{ } ^\circ C \\ 0,0013 \frac{J}{g \cdot ^\circ C^2} * T + 1,4918 \frac{J}{g \cdot ^\circ C} & \text{für } 226 \text{ } ^\circ C \leq T \end{cases}$	
c_p :	Spezifische Wärmespeicherkapazität / J/(g*°C)
T :	Temperatur / °C
PEEK	
$c_p(T) = \begin{cases} 0,00307 * \frac{J}{g \cdot ^\circ C^2} * T + 1,01 \frac{J}{g \cdot ^\circ C} & \text{für } T \leq 306 \text{ } ^\circ C \\ 2,15 \frac{J}{g \cdot ^\circ C} & \text{für } T > 304 \text{ } ^\circ C \end{cases}$	
c_p :	Spezifische Wärmekapazität / J/(g*°C)
T :	Temperatur / °C

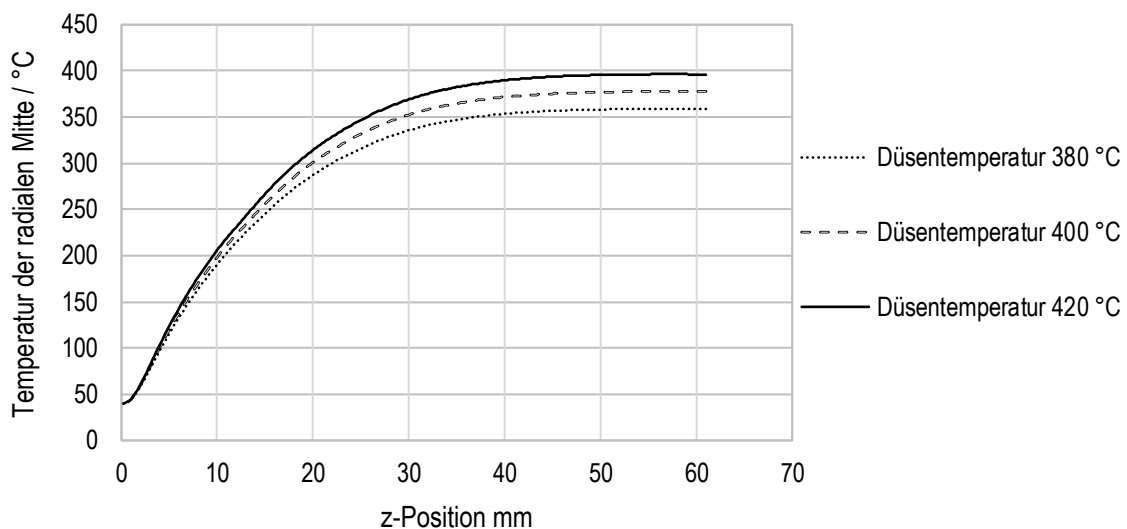


Bild A2-2: Berechnete Temperaturverläufe der radialen Mitte (Symmetrieachse) entlang der z-Achse der Düse in Abhängigkeit von verschiedenen Düsentemperaturen für Ultrafuse PPSU

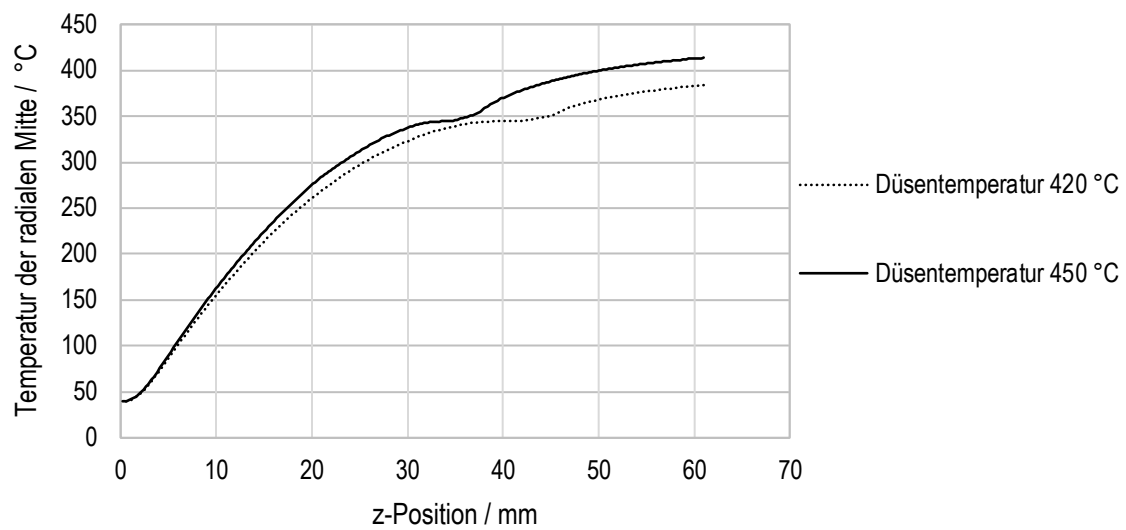


Bild A2-3: Berechnete Temperaturverläufe der radialen Mitte (Symmetrieachse) entlang der z-Achse der Düse in Abhängigkeit von verschiedenen Düsentemperaturen für VESTAKEEP 2000G

Tabelle A2-3: Aufstellung der Messdaten zur Modellvalidierung - Ultrafuse PPSU

Soll-Temperatur / °C	420	410	400	390	380
Austrittstemperatur (simuliert) / °C	395,74	386,32	376,9	367,48	358,06
Austrittstemperatur (gemessen) / °C	389,105	375,528	367,245	356,705	349,886
Differenz / °C	6,635	10,792	9,655	10,775	8,174
Abweichung / %	1,68	2,79	2,56	2,93	2,28

Tabelle A2-4: Aufstellung der Messdaten zur Modellvalidierung - VESTAKEEP 2000G

Soll-Temperatur / °C	450	440	430	420
Austrittstemperatur (simuliert) / °C	422,54	413,09	403,61	394,1
Austrittstemperatur (gemessen) / °C	410,373	397,218	390,012	380,052
Differenz / °C	12,167	15,872	13,598	14,048
Abweichung / %	2,88	3,84	3,37	3,56

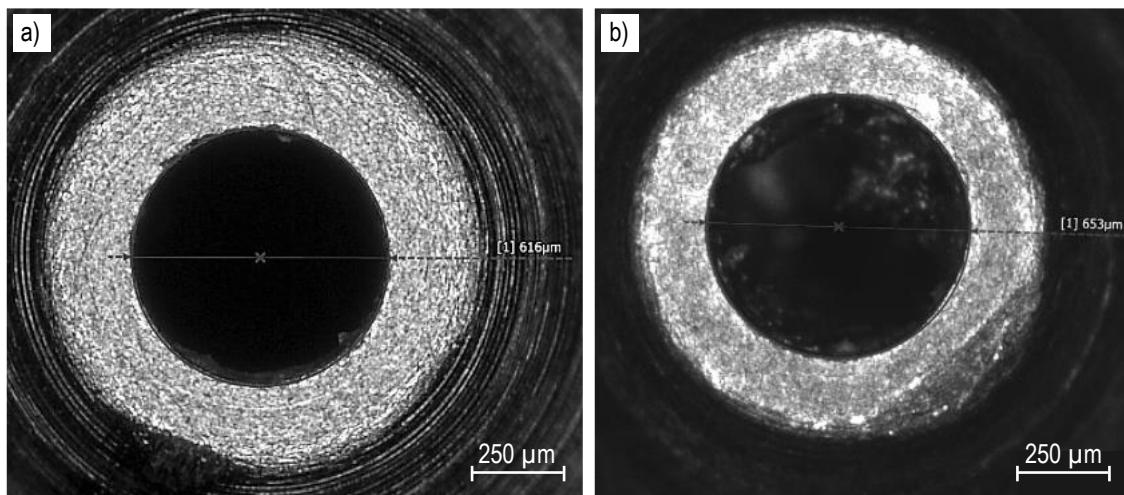


Bild A2-4: Veranschaulichung des Düsenverschleißes durch eine Ausweitung des Düsendurchmessers: a) Durchmesser einer neuen Düse, b) Durchmesser nach der Verarbeitung von 368 m Filament des Typs VESTAKEEP 2000 CF15

A3 Untersuchung des Verzugsverhaltens

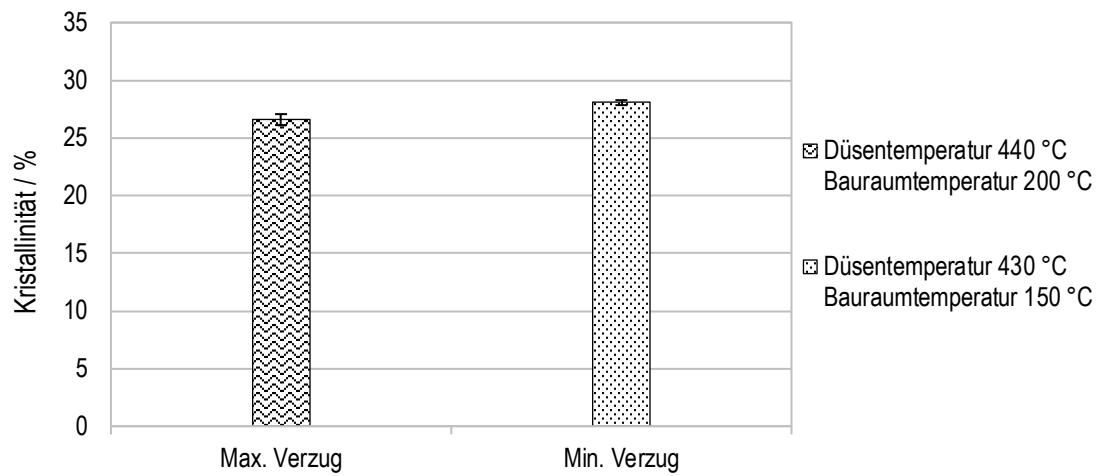


Bild A3-1: Vergleich der Kristallinität zwischen der maximalen und der minimalen Verzugsausprägung von VESTAKEEP 3300G

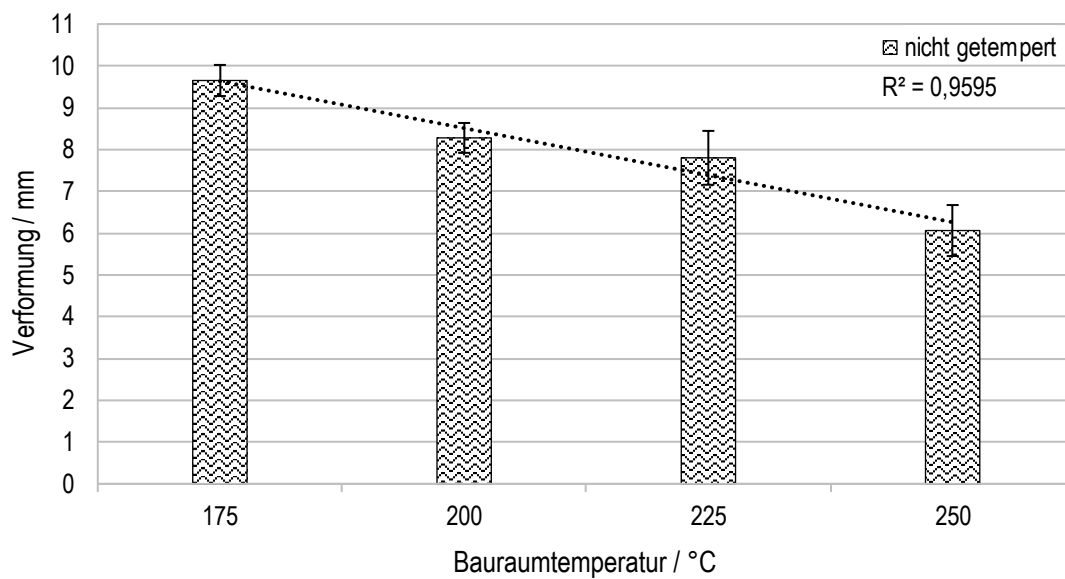


Bild A3-2: Auswertung der Korrelation zwischen der Verformung und der Bauraumtemperatur von VESTAKEEP 3300G

A4 Modellierung der Schweißnahtfestigkeit

Tabelle A4-1: Versuchsplan mit Ergebnissen der Schweißnahtfestigkeit zur Modellierung der Schweißnahtfestigkeit für das Material VESTAKEEP 2000G

Run	Düsentemperatur / °C	Bauraumtemperatur / °C	Strangablagege- schwindigkeit / mm/s	Schweißnahtfestigkeit / MPa
1	430	220	30	2,40
2	440	220	21,7	24,77
3	450	220	13,4	40,96
4	440	260	21,7	86,84
5	430	240	21,7	34,49
6	440	240	21,7	47,15
7	440	240	21,7	53,06
8	450	220	30	40,10
9	430	260	13,4	61,52
10	430	220	13,4	12,44
11	440	240	13,4	45,63
12	430	260	30	60,43
13	450	260	13,4	106,64
14	440	240	13,4	44,37
15	440	240	21,7	56,63
16	450	240	21,7	83,34
17	440	260	21,7	94,29
18	450	260	30	101,68
19	430	240	21,7	30,84
20	440	240	30	42,58
21	440	220	21,7	29,87
22	450	240	21,7	84,49
23	440	240	30	60,72
24	440	220	21,7	24,25
25	450	220	13,4	40,96
26	440	260	21,7	86,43
27	430	260	13,4	59,41
28	440	240	21,7	56,40
29	430	220	13,4	12,60
30	440	240	21,7	48,90
31	450	220	30	49,11
32	430	220	30	2,02
33	440	240	13,4	38,57
34	430	260	30	57,58
35	450	260	13,4	98,68
36	450	240	21,7	83,77
37	450	260	30	99,40
38	440	240	30	60,69
39	430	240	21,7	40,63

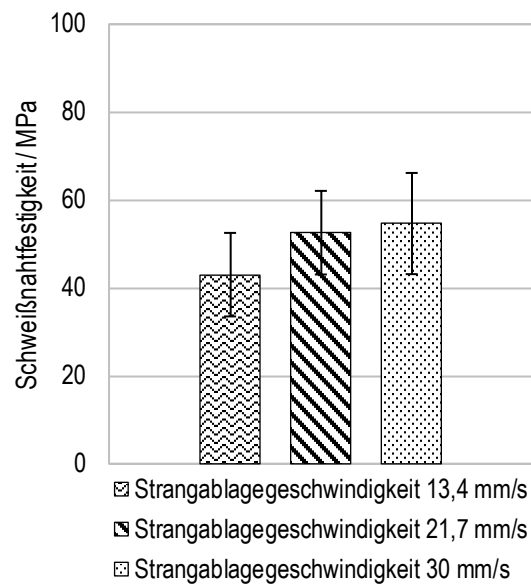


Bild A4-1: Schweißnahtfestigkeit in Abhängigkeit von der Strangablagegeschwindigkeit bei $T_D=440\text{ °C}$ und $T_B=240\text{ °C}$ (in Zusammenarbeit mit SCHNEIDER, vgl. [Sch21])

Tabelle A4-2: Varianzanalyse der Schweißnahtfestigkeit - VESTAKEEP 2000G

Source	F-value	p-value
A-Düsentemperatur	207,25	< 0,0001
B-Bauraumtemperatur	402,05	< 0,0001
AB	0,9164	0,3458
AC	0,9742	0,3313
BC	0,0525	0,8204
A ²	0,5490	0,4643
B ²	0,0024	0,9616

Tabelle A4-3: Bestimmtheitsmaße der Schweißnahtfestigkeit - VESTAKEEP 2000G

Bestimmtheitsmaß	F-value
R ²	0,9478
R _{adjusted} ²	0,9449
R _{predicted} ²	0,9407
Adeq Precision	54,8569

Tabelle A4-4: Datenbasis der gemessenen und berechneten Schweißnahtfestigkeiten VESTAKEEP 2000G, VESTAKEEP 2000 CF15 und VESTAKEEP 2000 CF20

VESTAKEEP 2000G				
Düsen- temperatur / °C	Bauraum- temperatur / °C	Schweißnahtfes- tigkeit Modell / MPa	Schweißnahtfestig- keit exp. bestimmt / MPa	Abweichung von Idealgeraden / %
450	220	43,48	45,85	-5,44
430	240	33,29	28,24	17,90
450	240	74,63	76,53	-2,47
430	260	62,09	58,8	5,59
450	260	103,43	100,83	2,58
VESTAKEEP 2000 CF15				
Düsen- temperatur / °C	Bauraum- temperatur / °C	Schweißnahtfes- tigkeit Modell / MPa	Schweißnahtfestig- keit exp. bestimmt / MPa	Abweichung von Idealgeraden / %
450	220	40,59	40	1,48
430	240	29,48	27,76	6,2
450	240	66,09	71,53	-7,19
430	260	54,97	51,28	3,22
450	260	91,58	88,72	1,48
VESTAKEEP 2000 CF20				
Düsen- temperatur / °C	Bauraum- temperatur / °C	Schweißnahtfes- tigkeit Modell / MPa	Schweißnahtfestig- keit exp. bestimmt / MPa	Abweichung von Idealgeraden / %
450	220	38,74	49	-20,93
430	240	28,14	26,86	4,75
450	240	63,07	62,97	0,17
430	260	52,47	45,22	16,04
450	260	87,41	82	6,59

A5 Methode zur Beurteilung von Multimaterialkombinationen

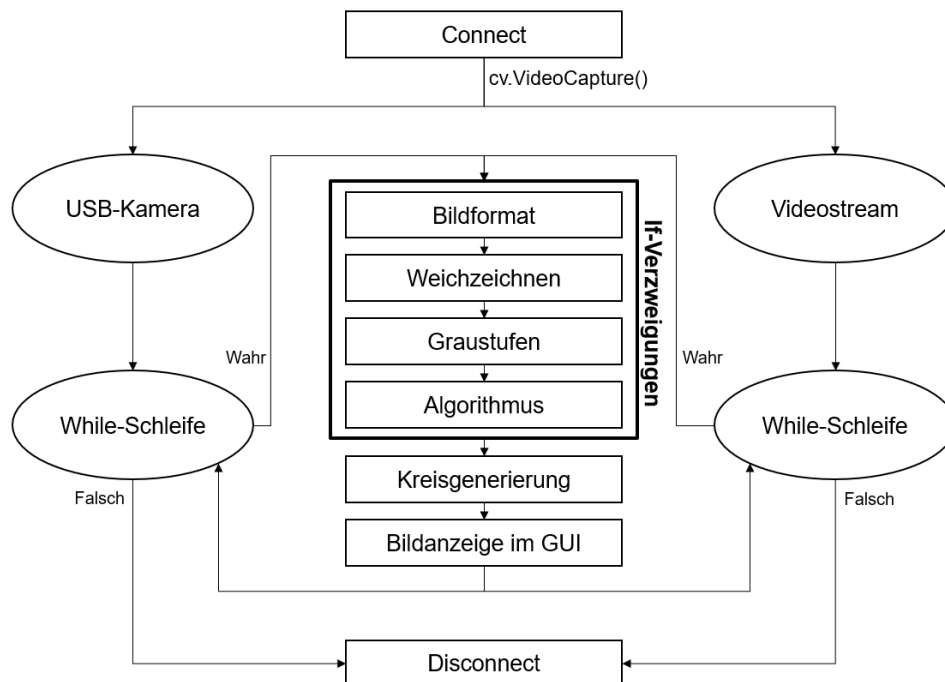


Bild A5-1: Programmablauf der Software zur Veranschaulichung der Bildbearbeitungsoptionen der kamerabasierten Kalibrierungsmethode (in Zusammenarbeit mit NEUGEBAUER, vgl. [Neu21])

