

Diplomarbeit

Entwicklung einer extrusionsbasierten 3D-Druckanlage für duroplastische Werkstoffsysteme und Untersuchung der Prozess- und Bauteileigenschaften

eingereicht an der Fakultät Kraftfahrzeugtechnik
der Westsächsischen Hochschule Zwickau
am 03.08.2026

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: **cand. ing. B ö h m , N i c k** geb. am: 05.01.1999

Studiengang Kraftfahrzeugtechnik
Schwerpunkt Karosserieentwicklung und -konstruktion

Auftraggeber: Westsächsische Hochschule Zwickau
Prof. Dr.-Ing. Michael Heinrich



Aufgabenstellung Diplomarbeit

Thema: Entwicklung einer extrusionsbasierten 3D-Druckanlage für duroplastische Werkstoffsysteme und Untersuchung der Prozess- und Bauteileigenschaften

Hintergrund

Die additive Fertigung mittels Fused Filament Fabrication (FFF) gewinnt zunehmend an Bedeutung, da sie eine flexible und wirtschaftliche Herstellung von Funktionsbauteilen ermöglicht. Konventionell eingesetzte thermoplastische Filamente stoßen jedoch bei Anwendungen mit erhöhten Temperatur- und Belastungsanforderungen an ihre Grenzen. Die ausgeschriebene Diplomarbeit untersucht daher neuartige, latent reaktive Epoxidharzsysteme, die im Druckprozess zu duromeren Strukturen vernetzt werden können. Damit soll die einfache Verarbeitung thermoplastischer Systeme mit den vorteilhaften Eigenschaften duromerer Werkstoffe kombiniert werden.

Zielstellung

Ziel der Arbeit ist der Aufbau eines 3D-Drucksystems auf Basis eines Pelletextruders und die systematische Untersuchung der Verarbeitungsparameter und Bauteileigenschaften duroplastischer Werkstoffe im FFF-Verfahren. Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zur Bewertung der Eignung reaktiver Materialien für den industriellen Einsatz.

Aufgabenstellung

1. Literaturrecherche zum Stand der Technik von FFF mit Thermoplast- und Reaktiv-Halbzeugen.
2. Analyse der Reaktionskinetik des duromeren Halbzeugs (DSC, Rheometrie)
3. Entwicklung eines duroplastverarbeitenden FFF-basierten Drucksystems: konstruktiver Aufbau der Druckzelle, Elektronikanpassung und Programmierung der Hardware
4. Durchführung von Druckversuchen mit Epoxidharz-basierten Halbzeugen
5. Analyse der Vernetzungsreaktion und Ableitung eines geeigneten Thermomanagements für extrusionsbasierte Verarbeitung duromerer Werkstoffe
6. Vergleich der Ergebnisse mit konventionellen Thermoplast-Filamenten und Bewertung der Potenziale reaktiver Halbzeuge für industrielle Anwendungen.

Die Ergebnisse sollen eine fundierte Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten duromerer Werkstoffsysteme im FFF ermöglichen und Handlungsempfehlungen für die Prozessführung ableiten.

Für die Anfertigung der Abschlussarbeit sind die Richtlinien der Fakultät Automobil und Maschinenbau zu beachten. Wenn sich die Notwendigkeit ergibt, kann der Umfang der Aufgabenstellung vom ausgebenden Professor erweitert oder eingeschränkt werden. Veröffentlichungen über den Inhalt der Abschlussarbeit dürfen, sofern die Arbeit mit einem Sperrvermerk versehen wird, nur mit Zustimmung des Auftraggebers vorgenommen werden.



Abstract

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer extrusionsbasierten 3D-Druckanlage für duroplastische Werkstoffsysteme. Im Fokus steht die Verarbeitung latent reaktiver Epoxidharzsysteme mittels Granulatrextrusion, mit dem Ziel, die einfache Verarbeitung thermoplastischer Systeme mit den vorteilhaften Eigenschaften duromerer Werkstoffe zu kombinieren.

Hierzu wurde ein 3D-Drucksystem auf Basis eines Granulatrextruders konstruktiv aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Reaktionskinetik des verwendeten Halbzeugs wurde mittels DSC-Analyse charakterisiert und geeignete Prozessparameter abgeleitet. Anschließend wurden Druckversuche mit verschiedenen Materialien durchgeführt und das Extrusionsverhalten systematisch untersucht.

Die Ergebnisse werden hinsichtlich der Prozessstabilität und der Eignung reaktiver Halbzeuge für den extrusionsbasierten 3D-Druck bewertet und mit konventionellen thermoplastischen Filamenten verglichen.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit in allen Teilen selbstständig angefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form in noch keiner anderen Prüfung vorgelegen hat. Mir ist bewusst, dass ich Autor/in der vorliegenden Arbeit bin und volle Verantwortung für den Text trage.

Ich erkläre, dass ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken – dazu gehören auch Internetquellen – übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht und die entsprechenden Quellen angegeben habe.

Mir ist bewusst, dass meine Arbeit auf Plagiate überprüft werden kann. Mir ist bekannt, dass es sich bei der Abgabe eines Plagiats um ein schweres akademisches Fehlverhalten handelt und dass Täuschungen nach der für mich gültigen Prüfungsordnung geahndet werden.

Zusätzlich versichere ich, dass ich auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Werkzeuge nur in Absprache mit den Prüfern verwendet habe. Dabei stand meine eigene geistige Leistung im Vordergrund, und ich habe jederzeit den Prozess steuernd bearbeitet.

Diese Werkzeuge habe ich im Quellenverzeichnis in der Rubrik „Übersicht verwendeter Hilfsmittel“ mit ihrem Produktnamen und einer Übersicht des im Rahmen dieser Prüfungs-/Studienarbeit genutzten Funktionsumfangs unter Angabe der Textstelle in der Arbeit vollständig aufgeführt.

Ich versichere, dass ich keine KI-basierten Tools verwendet habe, deren Nutzung die Prüfer explizit schriftlich ausgeschlossen haben. Ich bin mir bewusst, dass die Verwendung von Texten oder anderen Inhalten und Produkten, die durch KI-basierte Tools generiert wurden, keine Garantie für deren Qualität darstellt.

Ich verantworte die Übernahme jeglicher von mir verwendeter maschinell generierter Passagen vollumfänglich selbst und trage die Verantwortung für eventuell durch die KI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte, fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate.

Zwickau, den 03.08.2026

.....

Nick Böhm

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meines Studiums der Kraftfahrzeugtechnik an der Westsächsischen Hochschule Zwickau und befasst sich mit der Entwicklung einer extrusionsbasierten 3D-Druckanlage für duroplastische Werkstoffsysteme sowie der Untersuchung der Prozess- und Bauteileigenschaften reaktiver Epoxidharzsysteme in der Materialeextrusion.

Die Motivation für diese Arbeit erwuchs aus dem zunehmenden Kontakt mit der additiven Fertigung im Alltag und im Studium. Im Rahmen einer umfangreichen Belegarbeit über ein Semester hatte ich die Möglichkeit, ein selbst konstruiertes Modell mithilfe additiver Fertigungsverfahren zu realisieren. Diese praktische Erfahrung weckte mein Interesse an den Möglichkeiten und Grenzen additiver Fertigungstechnologien. Die Frage, wie die einfache Verarbeitung thermoplastischer Systeme mit den vorteilhaften Eigenschaften duromerer Werkstoffe kombiniert werden kann, stellt einen innovativen Ansatz dar, dessen Machbarkeit und Potenziale in dieser Arbeit untersucht werden.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Michael Heinrich, der diese Arbeit als Erstbetreuer begleitet hat. Seine fachliche Unterstützung, die konstruktiven Hinweise und die stets offene Diskussionsbereitschaft haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Thomas Horst für die Übernahme der Zweitbetreuung und die kritische Auseinandersetzung mit den Inhalten dieser Arbeit.

Darüber hinaus danke ich Monique Greiner und Collin Mann für ihre Hilfe im Labor und den fachlichen Austausch, der maßgeblich zum Fortschritt dieser Arbeit beigetragen hat.

Ganz besonders danke ich auch meiner Freundin Sarah Kindler, die mich während der gesamten Zeit dieser Arbeit mit viel Geduld und Verständnis begleitet hat. Ihre Unterstützung und Fürsorge, besonders in den anspruchsvolleren Phasen der Arbeit, haben mir stets Kraft gegeben.

Meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, danke ich von Herzen für die bedingungslose Unterstützung und das Vertrauen, das sie mir während meines gesamten Studiums entgegengebracht haben. Ohne ihren Rückhalt wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Zwickau, 03.08.2026

Nick Böhm

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen extrusionsbasierter Verarbeitung reaktiver Werkstoffsysteme	3
2.1	Überblick Additive Fertigung	3
2.2	Extrusionsbasierter 3D-Druck	6
2.2.1	Verfahrensprinzip und Grundaufbau	6
2.2.2	Anlagenkonzepte und Systemtechnik	9
2.2.3	Wichtige Prozessparameter	13
2.3	Reaktive Epoxidharzsysteme	15
2.3.1	Chemische Grundlagen	15
2.3.2	Vernetzungsmechanismus	16
2.3.3	Härtung	17
2.3.4	Reaktive Systeme	19
2.3.5	Eigenschaften duromerer Werkstoffe	20
2.4	Stand der Forschung mit reaktiven Materialien	22
2.4.1	Direct Ink Writing reaktiver Systeme	22
2.4.2	Materialextrusion mit reaktiven Filamenten und Granulaten	23
2.4.3	Industrielle Forschungsaktivitäten	25
2.5	Abgrenzung des Forschungsbedarfs	26
3	Analyse der Reaktionskinetik des duromeren Halbzeugs	28
3.1	DSC-Messung	28
3.1.1	Messprinzip	28
3.1.2	Ergebnisse und Auswertung	31
3.2	Rheologie	33
3.2.1	Messprinzip	33
3.2.2	Ergebnisse und Auswertung	34
3.3	Ableitung von Prozessparametern	36

3.3.1	Extrusionstemperatur	37
3.3.2	Verarbeitungsfenster	38
4	Entwicklung des extrusionsbasierten Drucksystems	39
4.1	Anforderungsanalyse und Systemkonzept	39
4.1.1	Zielsetzung und Anforderungen	39
4.1.2	Grundaufbau	40
4.2	Firmware Klipper	43
4.2.1	Installation der Firmware und zugehöriger Dienste	43
4.2.2	Netzwerkeinbindung	45
4.2.3	Grundkonfiguration	46
4.3	Mechanischer Aufbau	48
4.4	Elektronik	51
4.5	Inbetriebnahme	53
5	Druckversuche und Prozessparameteranalyse	57
5.1	Parametervariation	57
5.2	Prozessstabilität und Extrusionsverhalten	59
5.3	Nachhärtung und Härtungsgradbestimmung	60
6	Auswertung	62
6.1	Validierung des Verarbeitungsfensters	62
6.2	Vergleich der Ergebnisse mit konventionellen Thermoplast-Filamenten	64
6.3	Potenziäle reaktiver Halbzeuge für industrielle Anwendungen	66
7	Zusammenfassung und Ausblick	68
	Literaturverzeichnis	71
	Übersicht verwendeter Hilfsmittel	78

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

BJT	Binder Jetting (dt. Freistrah-Bindemittelauftrag)
BTT	BIGTREETECH
CAD	Computer Aided-Design
DED	Directed Energy Deposition (dt. Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung)
DGEBA	Diglycidylether von Bisphenol A
DICY	Dicyandiamid
DIW	Direct Ink Writing
DSC	Differential Scanning Calorimetry (dt. Differenzkalorimetrie)
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FGF	Fused Granular Fabrication
ICMP	Internet Control Message Protocol (dt. Internet-Steuerungsnachrichtenprotokoll)
LAN	Local Area Network
MEX	Material Extrusion (dt. Materialextrusion)
MJT	Material Jetting (dt. Freistrah-Materialauftrag)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
PBF	Powder Bed Fusion (dt. Pulverbettbasiertes Schmelzen)
SHL	Sheet Lamination (dt. Schichtlaminierung)
STL	Standard Tessellation Language
SVHC	Substances of Very High Concern
TM-DSC	Temperature-Modulated Differential Scanning Calorimetry (dt. Temperaturmodulierte Differenzkalorimetrie)

UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VPP	Vat Photopolymerization (dt. Badbasierte Photopolymerisation)
1K	Ein-Komponenten
2K	Zwei-Komponenten
3D	dreidimensional

Formelzeichen

G'	Speichermodul	Pa
G''	Verlustmodul	Pa
n	Wiederholungseinheit	mol
T_{end}	Endtemperatur	$^{\circ}C$
$T_{ext,max}$	maximale Extrusionstemperatur	$^{\circ}C$
T_g	Glasübergangstemperatur	$^{\circ}C$
T_{on}	Onset-Temperatur	$^{\circ}C$
T_p	Peaktemperatur	$^{\circ}C$
α	Härtungsgrad	—
$\frac{d\alpha}{dt}$	Härtungsrate	$\frac{1}{s}$
δ	Verlustfaktor	—
$\Delta H(t)$	partielle Reaktionswärme bis Zeitpunkt t	$\frac{J}{g}$
ΔH_{ges}	gesamte Reaktionsenthalpie	$\frac{J}{g}$
η	Scherviskosität	$Pa \cdot s$
η^*	Komplexe Viskosität	Pa

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozesskategorien nach DIN EN ISO/ASTM 52900 (eigene Darstellung nach [DIN22])	4
Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines FFF-Druckers (eigene Darstellung nach [Cle26])	7
Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Granulatruders mit sich verjüngendem Schneckenkanal (eigene Darstellung nach [Alt22])	10
Abbildung 4: Strukturformel von DGEBA [Jin15]	15
Abbildung 5: Schematische dynamische DSC-Kurve eines duromeren Werkstoffsystems	18
Abbildung 6: Schematischer Verlauf von Speicher- und Verlustmodul eines duromeren Werkstoffsystems während der Härtung	21
Abbildung 7: Einordnung des Stands der Technik nach Materialform und Verfahren	26
Abbildung 8: DSC-Messkurve EPOXIDUR EP Purge (eigene Darstellung nach [Ras25a]; vollständige Messkurve siehe Anlage 1)	31
Abbildung 9: Rheologische Messkurve (G' , G'' über T) des EPOXIDUR EP Purge-Granulats, oszillatorische Messung	34
Abbildung 10: Schematisches Verarbeitungsfenster für die Extrusion des EPOXIDUR EP Purge-Granulats (eigene Darstellung, vgl. Kapitel 3.1.2 und Kapitel 3.2.2)	38
Abbildung 11: Granulatruder (eigene Darstellung nach [Pri26])	40
Abbildung 12: Granulatruder, Schnittbild (eigene Darstellung nach [Pri26])	41
Abbildung 13: Finaler Versuchsaufbau des Demonstrators	48
Abbildung 14: Halterung, erste Ausführung	49
Abbildung 15: Halterung, zweite Ausführung	50
Abbildung 16: Pinbelegung BTT SKR v1.4 Turbo Board [Big26]	51
Abbildung 17: Anschlussschema externes MOSFET (eigene Darstellung nach [Pri26])	52
Abbildung 18: Thermografische Aufnahme des Motors mit Aluminium-Flansch nach 20 Minuten	55
Abbildung 19: Thermografische Aufnahme des Motors mit PEEK-Flansch nach 20 Minuten	55

<i>Abbildung 20: Vergleich der DSC-Kurven von unvernetztem Granulat, teilvernetztem Strang (100 °C) sowie nachgehärteten Proben (145 °C, 170 °C) (eigene Darstellung nach Anlage 5)</i>	<i>60</i>
---	-----------

1 Einleitung

Die Additive Fertigung hat sich in den vergangenen Jahren zu einer Schlüsseltechnologie der modernen Produktionstechnik entwickelt. Ausgehend von ersten Anwendungen im Rapid Prototyping findet sie heute zunehmend Einzug in die industrielle Serienfertigung, insbesondere in Branchen wie der Luft- und Raumfahrt und der Automobilindustrie [Waw24]. Der weltweite Markt für industrielle additive Fertigung im Polymer- und Metallbereich erreichte 2025 ein Volumen von 11 Milliarden Euro. Bei einer prognostizierten durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 14 % wird bis 2030 ein Marktvolumen von nahezu 20 Milliarden Euro erwartet [Mun26].

Unter den additiven Fertigungsverfahren hat sich das Fused-Filament-Fabrication-(FFF)-Verfahren als eines der am weitesten verbreiteten Verfahren etabliert [Sin17]. Beim FFF-Verfahren wird ein thermoplastisches Kunststofffilament durch eine beheizte Düse aufgeschmolzen und schichtweise in x- und y-Richtung abgelegt. Die Vorteile des Verfahrens liegen in seiner einfachen Handhabung, den niedrigen Anlagenkosten sowie der breiten Materialverfügbarkeit [Sin17]. Konventionell eingesetzte thermoplastische Filamente stoßen bei anspruchsvolleren Anwendungen jedoch schnell an ihre Grenzen. Die Wärmeformbeständigkeit gängiger FFF-Thermoplaste wie PLA oder ABS liegt typischerweise bei 50 bis 90 °C, was ihren Einsatz in thermisch oder mechanisch hoch beanspruchten Funktionsbauteilen stark einschränkt [For26]. Zudem weisen thermoplastische Bauteile im Vergleich zu duromeren Werkstoffen häufig geringere Steifigkeit, eine niedrigere Kriechbeständigkeit sowie eine eingeschränkte chemische Resistenz auf [Cap20, Lia24]. Ein weiterer limitierender Faktor ist die ausschließliche Verarbeitung von vorkonfektioniertem Filament. Darunter wird auf Spulen gewickelter Kunststoffdraht mit definiertem Durchmesser verstanden. Dies schränkt die verfügbare Materialauswahl erheblich ein, da nicht alle Werkstoffe in Filamentform verfügbar oder wirtschaftlich herstellbar sind [Bre18].

Eine vielversprechende Alternative zu thermoplastischen Werkstoffen stellen duroplastische Epoxidharzsysteme dar. Latent reaktive Epoxidharzsysteme zeichnen sich nach ihrer Vernetzung durch hervorragende mechanische Eigenschaften, hohe Temperaturbeständigkeit und chemische Resistenz aus

[Cap20, Jin15]. Da sie ausschließlich in Granulatform vorliegen, sind sie mit konventionellen, filamentbasierten FFF-Systemen jedoch nicht verarbeitbar. Einen Lösungsansatz bietet der Einsatz von Granulatextrudern, die eine direkte Verarbeitung von Kunststoffgranulat ermöglichen und damit eine deutlich breitere Materialpalette erschließen, darunter auch reaktive Halbzeuge, die nicht in Filamentform verfügbar sind [Bre18]. Die Herausforderung besteht in der kontrollierten Verarbeitung solcher reaktiver Halbzeuge.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Inbetriebnahme eines extrusionsbasierten 3D-Drucksystems auf Basis eines Granulatextruders zur Verarbeitung duroplastischer Werkstoffsysteme. Neben dem konstruktiven Aufbau der Druckanlage umfasst die Arbeit die Charakterisierung der Reaktionskinetik des verwendeten Epoxidharzsystems mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) und Rheologie sowie die systematische Untersuchung relevanter Prozessparameter. Die Ergebnisse ermöglichen eine fundierte Bewertung der Eignung reaktiver Halbzeuge für den industriellen Einsatz in der additiven Fertigung.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 gibt einen Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik extrusionsbasierter Verfahren sowie reaktiver Werkstoffsysteme. In Kapitel 3 wird die Reaktionskinetik des duromeren Halbzeugs mittels DSC und Rheologie charakterisiert und es werden Prozessparameter abgeleitet. Kapitel 4 beschreibt den konstruktiven Aufbau des entwickelten Drucksystems einschließlich Elektronik und Firmware. Kapitel 5 umfasst die durchgeführten Druckversuche und die Prozessparameteranalyse. Die Ergebnisse werden in Kapitel 6 diskutiert und bewertet sowie abschließend in Kapitel 7 zusammengefasst.

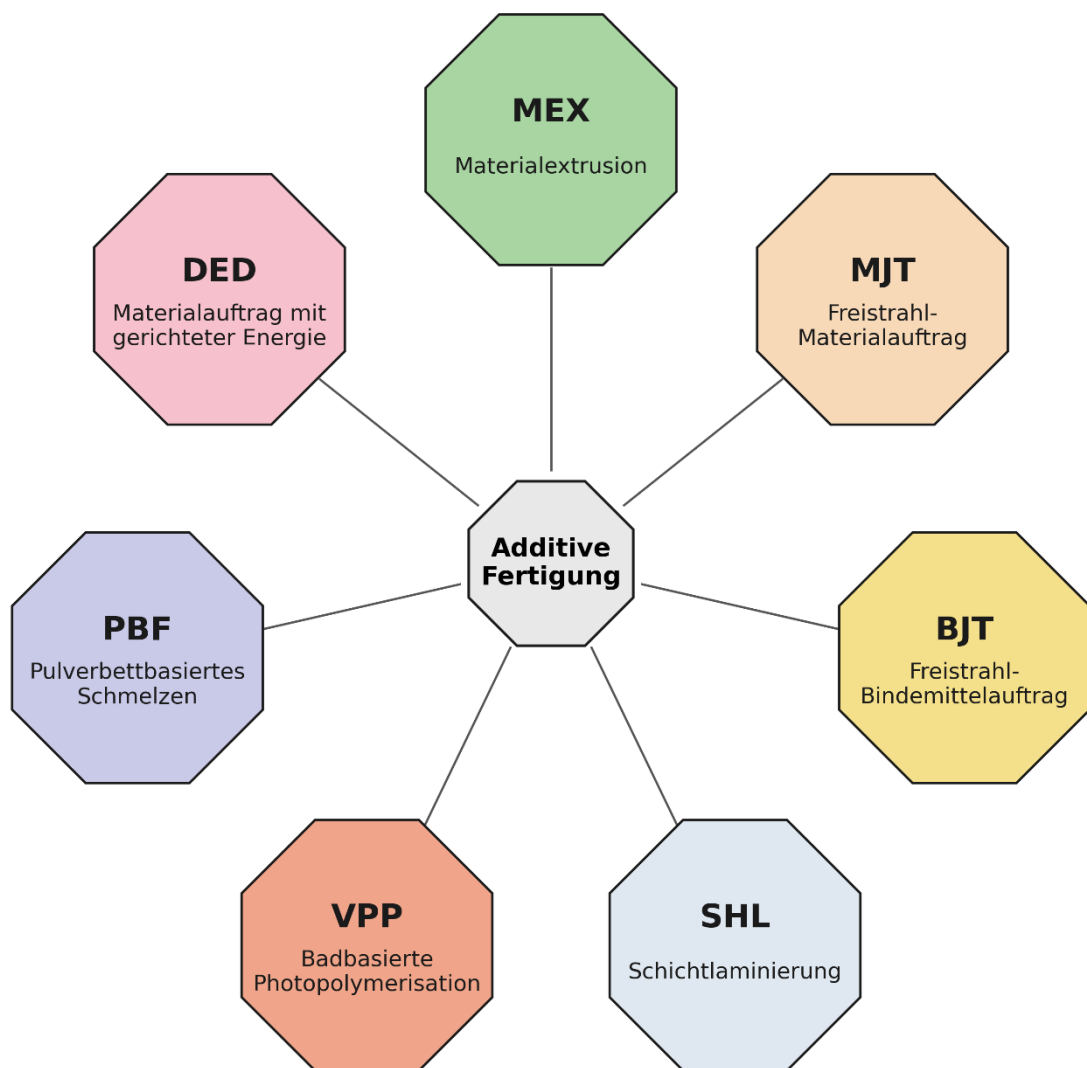
2 Grundlagen extrusionsbasierter Verarbeitung reaktiver Werkstoffsysteme

2.1 Überblick Additive Fertigung

Die Additive Fertigung bezeichnet eine Gruppe von Fertigungsverfahren, bei denen dreidimensionale Bauteile durch schichtweisen Materialauftrag direkt aus Computer-Aided-Design-(CAD)-Daten hergestellt werden. Im Gegensatz zu subtraktiven Verfahren wie dem Fräsen oder Drehen, bei denen Material aus einem Rohling abgetragen wird, erfolgt bei der additiven Fertigung ein gezielter, geometriekonformer Materialaufbau. Dies ermöglicht die Herstellung hochkomplexer Geometrien, die mit subtraktiven Fertigungsverfahren nicht oder nur mit erheblichem Aufwand realisierbar sind [Ngo18, Zho24].

Die Ursprünge der additiven Fertigung reichen bis in die 1980er Jahre zurück, als erste kommerzielle Stereolithografie-Systeme zur Erstellung von Prototypen eingesetzt wurden. Seither hat sich die Technologie von reinen Rapid-Prototyping-Anwendungen hin zu einer etablierten Fertigungstechnologie für funktionale Endprodukte weiterentwickelt [Jim19, Zho24]. Der allgemeine Prozessablauf umfasst die Erstellung eines digitalen 3D-Modells mittels CAD-Software, dessen Konvertierung in ein druckbares Dateiformat, beispielsweise STL, die Aufbereitung durch eine Slicing-Software sowie den eigentlichen Druckvorgang und eine anschließende Nachbearbeitung [Zho24].

Die internationale Normierung erfolgt nach DIN EN ISO/ASTM 52900, welche die additiven Fertigungsverfahren in sieben Prozesskategorien einteilt: Materialextrusion (MEX), Freistrah-Materialauftrag (MJT), Freistrah-Bindemittelauftrag (BJT), Schichtlaminierung (SHL), badbasierte Photopolymerisation (VPP), pulverbettbasiertes Schmelzen (PBF) sowie Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (DED) [DIN22]. Abbildung 1 gibt einen Überblick über diese Kategorien und ordnet ihnen die jeweiligen Verfahren zu.



*Abbildung 1: Prozesskategorien nach DIN EN ISO/ASTM 52900
(eigene Darstellung nach [DIN22])*

Hinsichtlich der einsetzbaren Werkstoffe ist die additive Fertigung äußerst vielseitig. Verarbeitet werden Polymere, Metalle, Keramiken sowie Verbundwerkstoffe. Thermoplastische Kunststoffe zählen dabei zu den am häufigsten eingesetzten Werkstoffen [Bou17, Ift23]. Die MEX stellt eine der am weitesten verbreiteten Prozesskategorien der additiven Fertigung dar [Bou17]. Die in der vorliegenden Arbeit betrachtete Fertigungstechnologie ist dieser Prozesskategorie zuzuordnen.

Die zunehmende industrielle Etablierung der additiven Fertigung ist insbesondere auf ihre verfahrensbedingten Vorteile zurückzuführen. Gegenüber subtraktiven

Fertigungsverfahren bietet sie Vorteile hinsichtlich geometrischer Freiheit, der Individualisierung von Bauteilen, der Reduktion von Werkzeugkosten sowie der Verkürzung von Entwicklungszeiten [Ngo18, Zho24]. Herausforderungen bestehen weiterhin bezüglich Fertigungsgenauigkeit, Oberflächenqualität, Reproduzierbarkeit sowie der begrenzten Materialauswahl für Hochleistungsanwendungen [Ngo18].

2.2 Extrusionsbasierter 3D-Druck

2.2.1 Verfahrensprinzip und Grundaufbau

Das FFF-Verfahren, das im industriellen Umfeld auch als Fused Deposition Modeling (FDM) bezeichnet wird, zählt zur in Kapitel 2.1 beschriebenen Prozesskategorie der MEX nach DIN EN ISO/ASTM 52900. Es stellt das am weitesten verbreitete additive Fertigungsverfahren für polymere Werkstoffe dar [Sin17]. Der Begriff FDM ist als eingetragenes Warenzeichen der Firma Stratasys geschützt, weshalb in der wissenschaftlichen Literatur überwiegend die herstellerneutrale Bezeichnung FFF verwendet wird [Jim19].

Das Grundprinzip des FFF-Verfahrens basiert auf dem schichtweisen Aufbau eines Bauteils durch gezielte Ablage von aufgeschmolzenem Polymermaterial. Ein thermoplastisches Filament wird dabei von einer Vorschubeinheit (Feeder) durch eine beheizte Schmelzzone (Hotend) geführt, aufgeschmolzen und über eine Düse mit definiertem Durchmesser auf einer Bauplattform oder einer bereits abgelegten Schicht abgeschieden. Der Druckkopf bewegt sich dabei in der x-y-Ebene, während nach Fertigstellung jeder Schicht entweder der Druckkopf in z-Richtung angehoben oder die Bauplattform abgesenkt wird. Durch den wiederholten schichtweisen Aufbau entsteht das gewünschte dreidimensionale Bauteil [Raj22].

Ergänzend zu den bereits beschriebenen Komponenten des Extrusionssystems, dem Achssystem zur Positionierung des Druckkopfes und dem in der Regel beheizten Druckbett (Bauplattform) zählt auch die Steuerungselektronik einschließlich der zugehörigen Firmware zu den wesentlichen Systemkomponenten eines FFF-Druckers. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

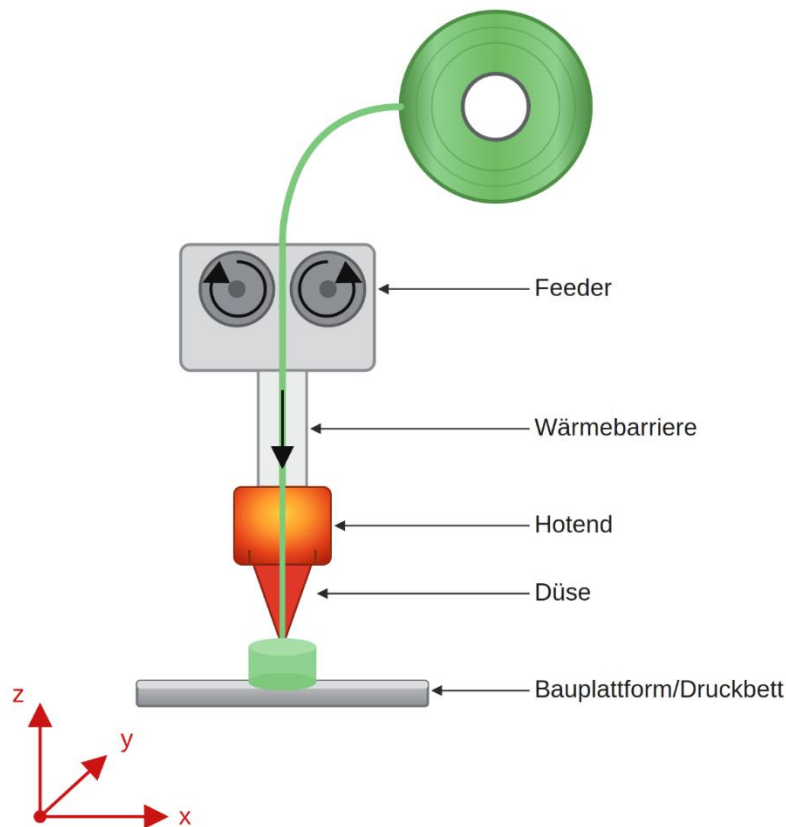


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines FFF-Druckers
(eigene Darstellung nach [Cle26])

Das Extrusionssystem wird in zwei Bauarten unterteilt: den Direktextruder und das Bowden-System. Beim Direktextruder ist der Feeder direkt am Druckkopf montiert, während beim Bowden-System der Feeder am Rahmen befestigt ist und das Filament über ein Führungsrohr zum Hotend transportiert wird. Aufgrund der unterschiedlichen Anordnung der Komponenten ergeben sich Unterschiede hinsichtlich Druckgeschwindigkeit, Rückzugsverhalten und der Verarbeitung flexibler Materialien [Can21].

Die Schichthaftung zwischen den einzelnen abgelegten Strängen sowie zwischen aufeinanderfolgenden Schichten stellt einen zentralen Qualitätsparameter im FFF-Prozess dar. Sie wird maßgeblich durch die thermische Energie beim Auftreffen des Materialstrangs auf die bereits erstarrte Unterlage sowie durch die Diffusion der Polymerketten an der Grenzfläche bestimmt. Unzureichende Schichthaftung führt zu mechanischer Anisotropie der gedruckten Bauteile, das heißt die Festigkeit senkrecht zur Druckrichtung ist gegenüber der Festigkeit in Druckrichtung deutlich reduziert. [Gao21]

Das FFF-Verfahren ermöglicht die Verarbeitung einer Vielzahl thermoplastischer Werkstoffe und zeichnet sich durch eine vergleichsweise einfache Umsetzung des Fertigungsprozesses aus. Dadurch eignet es sich sowohl für die Herstellung von Prototypen als auch für Funktionsbauteile, Vorrichtungen und zunehmend für Endprodukte in kleinen Stückzahlen. Als Grenzen des Verfahrens gelten die im Vergleich zu spritzgegossenen Bauteilen geringere Oberflächenqualität, eingeschränkte Maßhaltigkeit, verfahrensbedingte Porosität sowie die auf thermoplastische Werkstoffe begrenzte Materialauswahl. [Sin20]

2.2.2 Anlagenkonzepte und Systemtechnik

Extrusionsbasierte 3D-Drucksysteme lassen sich hinsichtlich ihres Materialförderprinzips in drei Konzepte unterteilen: Filamentextrusion, Granulatrextrusion und Kolbenextrusion [Alt22].

Bei der Filamentextrusion wird ein vorkonfektioniertes thermoplastisches Filament mit einem typischen Durchmesser von 1,75 mm oder 2,85 mm über eine Vorschubeinheit (Feeder) in die Heizzone gefördert und aufgeschmolzen. Dieses Konzept stellt das am weitesten verbreitete FFF-Anlagenkonzept dar und zeichnet sich durch einfache Handhabung sowie präzise Materialförderung aus. Es ist jedoch auf Werkstoffe beschränkt, die in Filamentform verfügbar sind. [Alt22]

Bei der Granulatrextrusion erfolgt die Materialförderung durch eine Schnecke, die das Granulat aus einem Vorratsbehälter aufnimmt, plastifiziert und durch eine Düse austrägt. Dieses Prinzip orientiert sich an etablierten Verfahren der Kunststoffverarbeitung wie dem Spritzgießen und der Extrusion. Dadurch können zahlreiche thermoplastische Kunststoffe sowie reaktive Polymersysteme verarbeitet werden, die üblicherweise in Granulatform vorliegen [Alt22]. Gegenüber der Filamentextrusion bietet die Granulatrextrusion zudem wirtschaftliche Vorteile, da Granulat deutlich kostengünstiger als konfektioniertes Filament ist. Herausforderungen bestehen hingegen hinsichtlich der präzisen Dosierung kleiner Materialmengen sowie der Regelung des Massestroms [Alt22]. Der Schneckenkanal ist dabei nicht über die gesamte Schneckenlänge konstant, sondern verjüngt sich in charakteristischer Weise von der Einzugszone zur Austragszone hin (vgl. Abbildung 3).

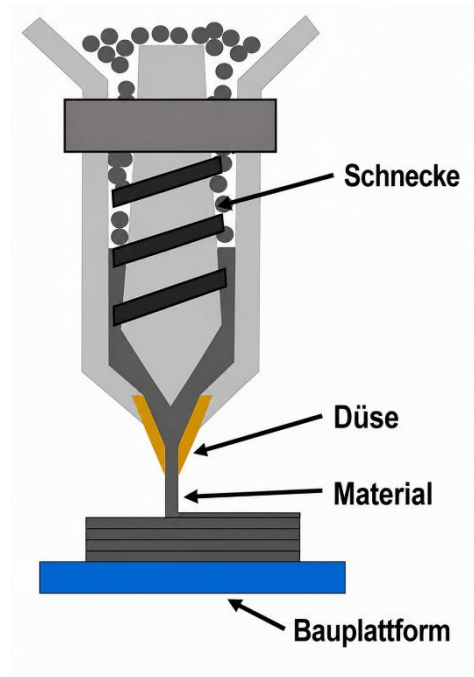


Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Granulatruders mit sich verjüngendem Schneckenkanal (eigene Darstellung nach [Alt22])

Diese sich verjüngende Geometrie führt zu einer kontinuierlichen Zunahme der Scherrate entlang der Schnecke, da die mittlere Scherrate näherungsweise umgekehrt proportional zur Kanaltiefe ist. Die höchsten Scherraten treten dementsprechend im Bereich der Austragszone kurz vor der Düse auf, wo der Kanalquerschnitt am geringsten ist. Mit steigender Scherrate nimmt zugleich die durch viskose Dissipation freigesetzte Scherwärme zu, wodurch die lokale Materialtemperatur zusätzlich zur extern eingebrachten Heizleistung ansteigen kann [Wag25]. Für die Verarbeitung latent reaktiver Werkstoffe ist dieser Effekt von besonderer Bedeutung, da die tatsächliche Materialtemperatur im Schneckenkanal von der am Heizblock eingestellten beziehungsweise gemessenen Temperatur abweichen kann.

Bei der Kolbenextrusion wird das Material durch einen hydraulisch oder pneumatisch betriebenen Kolben aus einem Vorratsbehälter ausgetragen. Dieses Konzept findet vorwiegend bei pastösen oder hochviskosen Materialien Anwendung, beispielsweise bei Silikonen, Keramikpasten oder niedrigviskosen reaktiven Harzsystemen. [Jia20]

Tabelle 1 fasst die wesentlichen Unterschiede der drei Materialförderprinzipien zusammen.

Tabelle 1: Vergleich der Materialförderprinzipien extrusionsbasierter 3D-Drucksysteme (eigene Darstellung nach [Alt22, Jia20])

Kriterium	Filamentextrusion	Granulatrextrusion	Kolbenextrusion
Fördermechanismus	Vorschubeinheit (Feeder)	Schnecke	Kolben (hydraulisch/ pneumatisch)
Materialform	Vorkonfektioniertes Filament	Granulat	pastös/hochviskos
Verarbeitbare Werkstoffe	thermoplastische Kunststoffe (in Filamentform verfügbar)	thermoplastische Kunststoffe, reaktive Polymersysteme	Silikone, Keramikpasten, niedrigviskose reaktive Harzsysteme
Vorteile	Einfache Handhabung, präzise Materialförderung	geringere Materialkosten gegenüber Filament	–
Herausforderungen	Beschränkung auf in Filamentform verfügbare Werkstoffe	Dosierung kleiner Materialmengen, Regelung des Massestroms	–

Neben den unterschiedlichen Materialförderprinzipien lassen sich Materialextrusionssysteme auch hinsichtlich ihrer Bewegungsführung unterscheiden. Bei den meisten FFF-Systemen bewegt sich der Extruder in der x-y-Ebene, während die Bauplattform in z-Richtung verfahren wird. Alternativ erfolgt die Positionierung des Druckkopfes über alle drei Raumachsen. [Can21]

Ein weiterer Schwerpunkt der Systementwicklung liegt in der konstruktiven Auslegung des Druckkopfes. Moderne Druckkopfentwicklungen ermöglichen durch Multimaterialfähigkeit, Koextrusion und schnellen Materialwechsel eine Erweiterung der Verfahrensmöglichkeiten [Goh24]. Für die Verarbeitung reaktiver Werkstoffe wie Epoxidharzsystemen kommt dem thermischen Management des Druckkopfes

besondere Bedeutung zu, da eine vorzeitige Aktivierung der Härtungsreaktion im Hotend zuverlässig verhindert werden muss [Fag22].

2.2.3 Wichtige Prozessparameter

Die Qualität und Eigenschaften von FFF-gefertigten Bauteilen werden maßgeblich durch eine Vielzahl von Prozessparametern beeinflusst, die in enger Wechselwirkung zueinander stehen. Die wichtigsten Prozessparameter lassen sich hinsichtlich ihrer primären Einflussgröße in materialabhängige, geometrische und maschinenbezogene Parameter einteilen. [Syr21]

Zu den materialabhängigen Prozessparametern zählen insbesondere die Extrusions- und Betttemperatur. Die Extrusionstemperatur (auch Drucktemperatur) bezeichnet die Temperatur im Hotend, bei der das Filament aufgeschmolzen und extrudiert wird. Sie beeinflusst maßgeblich die Viskosität der Polymerschmelze, die Schichthaftung sowie den Grad der Interdiffusion der Polymerketten an den Schichtgrenzen. Zu niedrige Extrusionstemperaturen führen zu unvollständiger Aufschmelzung und schlechter Schichthaftung, während zu hohe Temperaturen thermischen Abbau des Werkstoffs begünstigen [Gao21, Syr21]. Die Betttemperatur beeinflusst die Haftung der ersten Schicht auf der Bauplattform sowie den Verzug des Bauteils durch thermisch induzierte Eigenspannungen [Bae22].

Zu den geometrischen Prozessparametern gehören unter anderem Schichthöhe, Füllgrad und Druckorientierung. Die Schichthöhe definiert die Dicke jeder einzelnen abgelegten Schicht und hat direkten Einfluss auf die Oberflächenqualität, die Druckzeit sowie die mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Geringere Schichthöhen resultieren in feineren Oberflächenstrukturen und besserer Maßhaltigkeit, erfordern jedoch längere Druckzeiten. Zudem beeinflusst die Schichthöhe die Porosität des Bauteils, da mit zunehmender Schichthöhe die Haftung zwischen benachbarten Extrusionssträngen abnimmt [Tao21, Syr21]. Der Füllgrad beschreibt den prozentualen Anteil des mit Material gefüllten Volumens im Bauteilinneren. Er beeinflusst direkt die mechanische Festigkeit, das Bauteilgewicht und die Druckzeit. In Kombination mit dem Füllmuster (zum Beispiel Gitter, Waben oder konzentrisch) lassen sich die mechanischen Eigenschaften gezielt an die jeweilige Belastungssituation angepasst werden [Syr21]. Die Druckorientierung beschreibt die Ausrichtung des Bauteils auf der Bauplattform relativ zu den Druckschichten. Da FFF-Bauteile aufgrund des schichtweisen Aufbaus ausgeprägte anisotrope Eigenschaften aufweisen, hat die Druckorientierung einen

entscheidenden Einfluss auf die mechanische Belastbarkeit. Die Festigkeit senkrecht zur Schichtebene (z-Richtung) ist in der Regel deutlich geringer als in der Schichtebene (x-y-Richtung) [Gao21].

Maschinenbezogene Parameter wie Druckgeschwindigkeit, Düsendurchmesser oder Rückzugseinstellungen beeinflussen ebenfalls die Bauteilqualität. Die Druckgeschwindigkeit bestimmt die Verfahrgeschwindigkeit des Druckkopfes während der Materialablage. Sie steht in direktem Zusammenhang mit der Extrusionstemperatur, da bei höheren Druckgeschwindigkeiten mehr Material pro Zeiteinheit aufgeschmolzen werden muss. Zu hohe Druckgeschwindigkeiten führen zu Unterextrusion, Schichtablösungen und verminderter Schichthaftung [Ome25]. Neben den genannten Hauptparametern beeinflussen weitere Größen wie Düsendurchmesser, Rückzugslänge und -geschwindigkeit, Kühlung sowie die Wandstärke die Bauteilqualität. Die komplexen Wechselwirkungen zwischen diesen Parametern erfordern für jeden Werkstoff eine individuelle Parameteroptimierung [Syr21, Tao21]. Für reaktive Werkstoffe wie Epoxidharzsysteme gewinnen zusätzliche thermische Parameter an Bedeutung, da neben der Prozessstabilität der Extrusion auch die Kontrolle der Vernetzungsreaktion sichergestellt werden muss. Die hierfür relevanten Aspekte werden in Kapitel 3.3 näher betrachtet.

2.3 Reaktive Epoxidharzsysteme

2.3.1 Chemische Grundlagen

Epoxidharze zählen zu den bedeutendsten Vertretern der duroplastischen Polymere und finden aufgrund ihrer Kombination aus mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, der Elektrotechnik, im Korrosionsschutz sowie als Matrix in Faserverbundwerkstoffen [Jin15, Cap20]. Grundlegendes Strukturmerkmal aller Epoxidharze ist das Vorhandensein mindestens einer Epoxidgruppe (Oxiranring) im Molekül, welche die hohe Reaktivität gegenüber einer Vielzahl von Härtern bedingt [Jin15].

Der mit Abstand am häufigsten eingesetzte Vertreter kommerzieller Epoxidharze ist das Diglycidylether von Bisphenol A (DGEBA), welches durch die Reaktion von Bisphenol A mit Epichlorhydrin hergestellt wird. Abbildung 4 zeigt die allgemeine Strukturformel des daraus entstehenden Epoxidharzsystems mit der Wiederholungseinheit n . Für das reine DGEBA-Monomer gilt dabei $n \approx 0$. DGEBA zeichnet sich durch eine bifunktionelle Struktur mit zwei endständigen Epoxidgruppen aus, die bei der Vernetzungsreaktion mit einem geeigneten Härter ein dreidimensionales, engmaschiges Polymernetzwerk ausbilden [Jin15, Cap20].

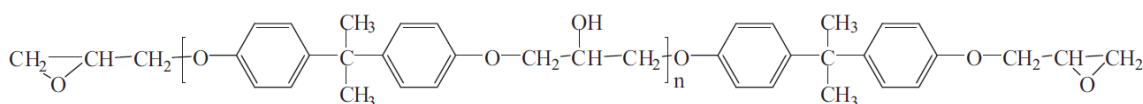


Abbildung 4: Strukturformel von DGEBA [Jin15]

Bisphenol A ist aufgrund seiner reproduktionstoxischen Eigenschaften als besonders besorgniserregender Stoff (Substance of Very High Concern, SVHC) gemäß der europäischen REACH-Verordnung eingestuft. Die Verarbeitung entsprechender Materialien erfordert daher eine geeignete Gefährdungsbeurteilung sowie die Einhaltung der im Sicherheitsdatenblatt angegebenen Schutzmaßnahmen. Das in der vorliegenden Arbeit eingesetzte EPOXIDUR-EP-Purge-Granulat der Firma Raschig basiert auf einem glasfaser- und mineralstoffgefüllten Epoxidharzsystem, das als Feststoffgranulat bei unter 15 °C lagerstabil ist und erst bei erhöhter Temperatur aktiviert wird [Ras21].

2.3.2 Vernetzungsmechanismus

Die Vernetzung von Epoxidharzen erfolgt durch die Reaktion der Epoxidgruppen mit einem Härter unter Ausbildung kovalenter Bindungen. Je nach eingesetztem Härtertyp lassen sich grundsätzlich zwei Reaktionsmechanismen unterscheiden: die Additions- und die katalytische Härtung [Jin15, Cap20].

Bei der Additionshärtung reagieren bifunktionelle oder polyfunktionelle Härter wie Amine, Anhydride oder Dicyandiamid (DICY) direkt mit den Epoxidgruppen. Dabei ist ein definiertes Mischungsverhältnis zwischen Harz und Härter einzuhalten, das sich am Epoxid-Äquivalentgewicht des Harzes orientiert [Ger19]. Die Reaktion verläuft exotherm und führt zur Ausbildung eines dreidimensionalen, vernetzten Polymernetzwerks [Ger19, Jin15].

Bei der katalytischen Härtung wirkt der Härter als Initiator einer kationischen oder anionischen Ringöffnungspolymerisation der Epoxidgruppen. Imidazole und tertiäre Amine zählen zu den wichtigsten Vertretern dieser Härterkategorie. Sie ermöglichen niedrige Härtungstemperaturen und tragen zu einer verbesserten Lagerstabilität des Harz-Härter-Gemisches bei [Che20, Cap20].

2.3.3 Härtung

Der Härtungsprozess von Epoxidharzsystemen verläuft in mehreren charakteristischen Phasen, die durch spezifische rheologische und thermische Zustandsänderungen gekennzeichnet sind. Ausgehend vom flüssigen oder aufgeschmolzenen Zustand des Harzsystems nimmt die Viskosität mit fortschreitender Vernetzungsreaktion kontinuierlich zu, bis am Gelpunkt ein dreidimensionales, unlösliches Netzwerk entsteht und das System seinen Fließcharakter verliert [Lia24]. Mit zunehmender Vernetzungsdichte steigt die Glasübergangstemperatur (T_g) des Systems an. Erreicht die während der Vernetzung ansteigende Glasübergangstemperatur die aktuelle Prozesstemperatur, tritt Verglasung ein. Dadurch nimmt die Molekülbeweglichkeit stark ab und die Reaktion wird diffusionskontrolliert, wodurch sich die Reaktionsgeschwindigkeit deutlich verringert [Maf05, Shn22].

Der Härtingsgrad α beschreibt den Fortschritt der Vernetzungsreaktion und wird als Verhältnis der bis zum betrachteten Zeitpunkt freigesetzten Reaktionswärme zur gesamten Reaktionsenthalpie definiert. Ein vollständiger Härtingsgrad ($\alpha = 1$) wird in der Praxis häufig erst durch eine Nachhärtung bei erhöhter Temperatur erreicht [Lia24]. Die Härtungskinetik wird durch Parameter wie Härtungstemperatur, Heizrate und Harz-Härter-Verhältnis beeinflusst und lässt sich mittels DSC-Messung quantitativ erfassen. Hierauf wird in Kapitel 3.1 detailliert eingegangen.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch eine dynamische DSC-Kurve eines duromeren Werkstoffsystems. Der charakteristische exotherme Peak markiert die Vernetzungsreaktion, die Onset-Temperatur (T_{on}) kennzeichnet den Reaktionsbeginn, die Peak-Temperatur (T_p) den Zeitpunkt der maximalen Reaktionsgeschwindigkeit und die Endtemperatur (T_{end}) den Abschluss der messbaren Reaktionswärmeabfuhr. Die Fläche unter dem exothermen Peak entspricht der Reaktionsenthalpie (ΔH) und dient als Bezugsgröße zur Berechnung des Härtingsgrades α [Maf05, Shn22].

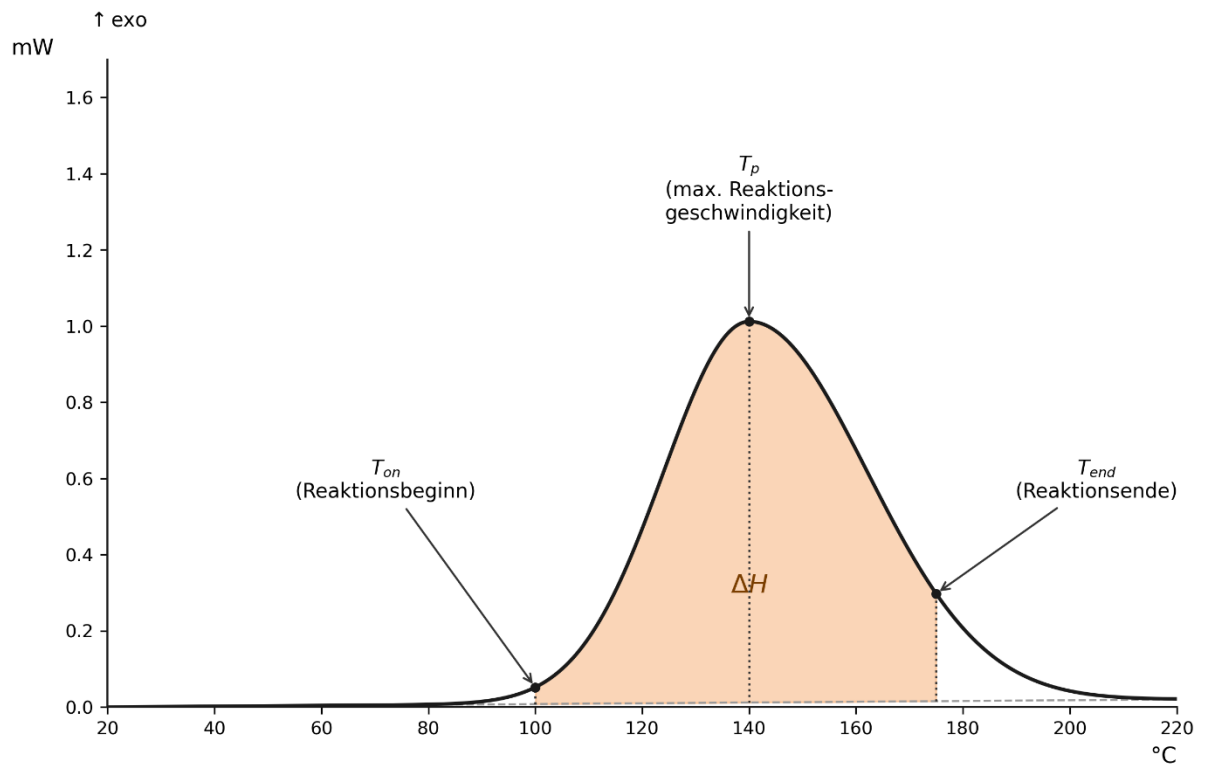


Abbildung 5: Schematische dynamische DSC-Kurve eines duromeren Werkstoffsystems

2.3.4 Reaktive Systeme

Epoxidharzsysteme werden hinsichtlich ihrer Verarbeitungsform grundsätzlich in Einkomponenten- (1K) und Zweikomponenten-(2K)-systeme unterteilt.

2.3.4.1 Einkomponentensysteme

Bei 1K-Systemen sind Harz und Härter bereits im Lieferzustand homogen vermischt. Die Lagerstabilität wird durch den Einsatz latenter Härter gewährleistet, die bei Raumtemperatur inaktiv sind und erst bei Überschreiten einer definierten Aktivierungstemperatur die Vernetzungsreaktion initiieren [Che20, Tom12]. Typische latente Härter für 1K-Epoxidsysteme sind Dicyandiamid (DICY), Dihydrazide sowie bestimmte Imidazol-Addukte. DICY ist ein bei Raumtemperatur fester, im Harz unlöslicher Feststoff, der erst ab Temperaturen von mindestens 150 °C in Lösung geht und die Härtungsreaktion startet [Tom12]. Die thermische Latenz beschreibt die Eigenschaft eines Reaktionssystems, bei niedrigen Temperaturen stabil zu sein und erst bei erhöhter Temperatur zu reagieren. Für MEX-Prozesse stellt sie eine zentrale Voraussetzung dar, da das Material im Extruder unterhalb der Aktivierungstemperatur verarbeitbar bleiben muss, ohne vorzeitig zu vernetzen [Fag22].

2.3.4.2 Zweikomponentensysteme

Bei 2K-Systemen werden Harz und Härter erst unmittelbar vor der Verarbeitung miteinander vermischt. Nach dem Mischen setzt die Vernetzungsreaktion ein, wodurch die Verarbeitungszeit begrenzt wird. Diese Zeitspanne, in der das Harz-Härter-Gemisch noch ausreichend niedrige Viskosität und Verarbeitbarkeit aufweist, wird als Topfzeit bezeichnet. 2K-Systeme ermöglichen durch die freie Wahl von Harz und Härter eine sehr flexible Einstellung der Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften [Cap20, Jin15]. Für den Einsatz in materialextrusionsbasierten Fertigungsverfahren sind 2K-Systeme aufgrund der zeitlich begrenzten Verarbeitbarkeit nach dem Mischen tendenziell anspruchsvoller in der Prozessführung als 1K-Systeme.

2.3.5 Eigenschaften duomerer Werkstoffe

Vollständig ausgehärtete Epoxidharzsysteme zeichnen sich durch eine Reihe Werkstoffeigenschaften aus, die sie gegenüber thermoplastischen Kunststoffen für anspruchsvolle Anwendungen prädestinieren. Die mechanischen Eigenschaften umfassen hohe Steifigkeit, gute Druckfestigkeit und geringe Kriechneigung [Cap20, Lia24]. Die thermische Beständigkeit ausgehärteter Epoxidharze wird maßgeblich durch die Glasübergangstemperatur charakterisiert, die je nach Härtungssystem und -grad stark variieren kann und bei stark vernetzten Systemen Werte von über 200 °C erreicht [Lia24]. Vollständig ausgehärtete Epoxidharzsysteme bieten gegenüber thermoplastischen FFF-Werkstoffen wie PLA mit typischen Wärmeformbeständigkeiten von etwa 50 °C oder ABS mit etwa 90 °C deutlich erweiterte Einsatzmöglichkeiten bei erhöhten Temperaturen [For26].

Neben der thermischen Analyse mittels DSC liefert die oszillatorische Rheologie wichtige Informationen zum Fließ- und Vernetzungsverhalten duomerer Werkstoffe während der Härtung. Dabei werden der Speichermodul G' (elastischer Anteil) und der Verlustmodul G'' (viskoser Anteil) in Abhängigkeit der Temperatur erfasst. Der schematische Verlauf beider Module während der Härtung ist in Abbildung 6 dargestellt. Im flüssigen, unvernetzten Ausgangszustand dominiert der viskose Charakter des Systems, sodass $G'' > G'$ gilt. Mit fortschreitender Vernetzungsreaktion steigt G' stärker an als G'' , wobei der Gelpunkt bei vielen rheologischen Untersuchungen durch den Schnittpunkt von Speicher- und Verlustmodul charakterisiert wird ($G' = G''$). Oberhalb des Gelpunkts überwiegt der elastische Netzwerkcharakter ($G' > G''$), und beide Module nähern sich mit fortschreitender Aushärtung einem Plateauwert an, der die Ausbildung des vollständig vernetzten, glasartigen Polymernetzwerks widerspiegelt. [Cañ10]

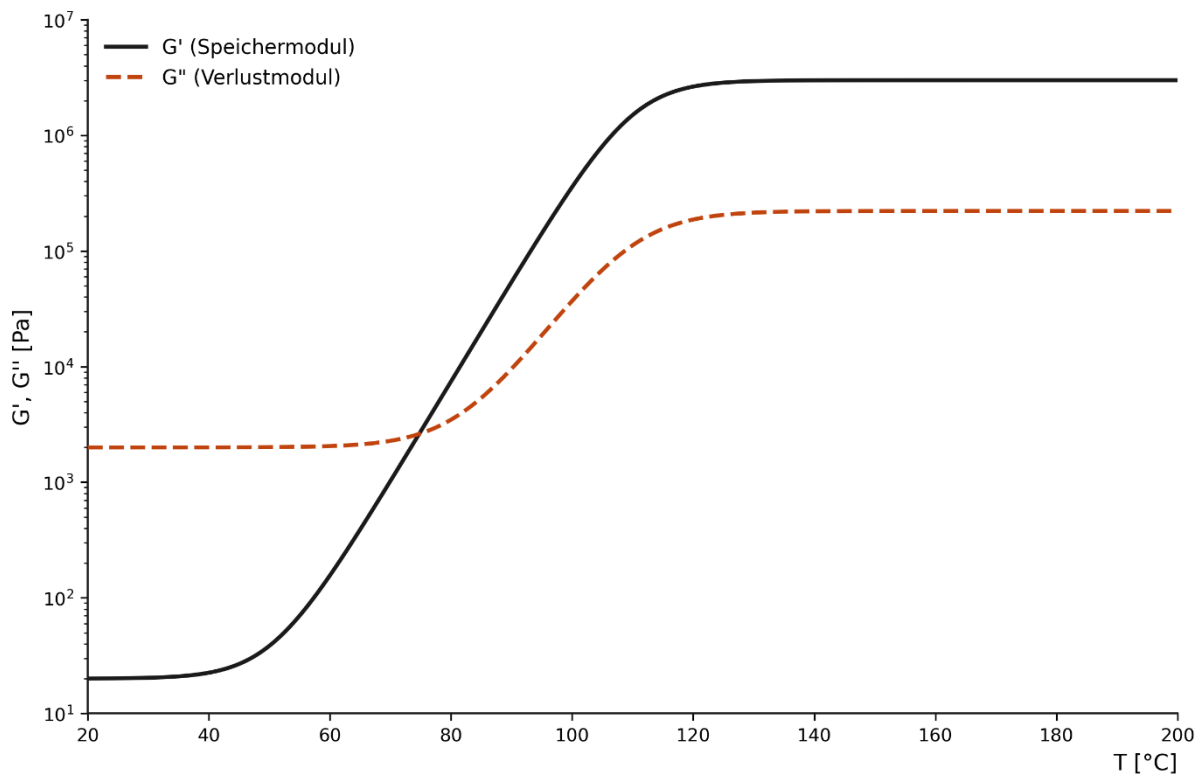


Abbildung 6: Schematischer Verlauf von Speicher- und Verlustmodul eines duromeren Werkstoffsystems während der Härtung

Weitere charakteristische Eigenschaften duromerer Epoxidharze sind die hohe Beständigkeit gegenüber Lösungsmitteln, Säuren und Basen, die geringe Feuchtigkeitsaufnahme sowie die elektrischen Isoliereigenschaften [Jin15, Cap20]. Eine wesentliche Einschränkung duromerer Werkstoffe ist die im Vergleich zu vielen Thermoplasten geringere Bruchzähigkeit. Dadurch ist ihr Einsatz in schlagbeanspruchten Bauteilen ohne geeignete Modifikation nur eingeschränkt möglich [Cap20]. Ein weiteres charakteristisches Merkmal duromerer Werkstoffe ist die fehlende Möglichkeit einer thermischen Wiederverarbeitung. Da die Vernetzungsreaktion irreversibel ist, können ausgehärtete Duroplaste nicht aufgeschmolzen und erneut verarbeitet werden [Jin15].

2.4 Stand der Forschung mit reaktiven Materialien

Die extrusionsbasierte additive Fertigung reaktiver Werkstoffe stellt ein aktives Forschungsfeld dar, das in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat. Während konventionelle FFF-Systeme ausschließlich thermoplastische Werkstoffe verarbeiten, zielt die Forschung auf die Erschließung reaktiver, duroplastischer Materialsysteme für die MEX ab, um die vorteilhaften mechanischen und thermischen Eigenschaften von Duroplasten mit der Flexibilität des Verfahrens zu kombinieren [Wan20].

Die bisherigen Forschungsansätze zur extrusionsbasierten Verarbeitung reaktiver Werkstoffe lassen sich in drei Kategorien einteilen: Direct Ink Writing (DIW), FFF mit reaktiven Filamenten sowie Granulatextrusion reaktiver Materialien [Fag22].

2.4.1 Direct Ink Writing reaktiver Systeme

Das DIW-Verfahren stellt den am weitesten erforschten Ansatz zur additiven Verarbeitung reaktiver Harzsysteme dar. Dabei werden niedrigviskose bis pastöse Materialien, die in diesem Zusammenhang häufig als Drucktinten bezeichnet werden, wie unverstärkte oder gefüllte Epoxidharze, Silikone oder Polyurethane durch eine Düse auf eine Bauplattform extrudiert und anschließend thermisch oder mittels UV-Strahlung ausgehärtet [Tan25]. Die rheologischen Anforderungen an DIW-fähige Tinten ergeben sich aus den unterschiedlichen Anforderungen bei Extrusion und Ablage. Das Material muss bei der Extrusion strukturviskos fließfähig sein, nach der Ablage jedoch eine ausreichend hohe Fließgrenze sowie ein Verhältnis von $G' > G''$ aufweisen, um die abgelegte Geometrie formstabil zu halten [Tan25].

Shi et al. demonstrierten 2017 erstmals den 3D-Druck eines recycelbaren Epoxidharzes auf Vitrimerbasis mittels DIW, wobei das Material nach der Ablage thermisch ausgehärtet wurde [Cap20]. Stang et al. untersuchten 2023 einen innovativen Ansatz des Embedded 3D Printing, bei dem thermisch härtende Duroplast-Elastomere in einem Stützbad gedruckt werden, was die formstabile Ablage auch ohne erhöhte Strukturviskosität ermöglicht [Sta23]. Im Vergleich zu FFF-basierten Ansätzen bestehen bei DIW-Verfahren aufgrund der spezifischen Materialanforderungen und Prozessführung weiterhin Herausforderungen hinsichtlich erreichbarer Auflösung, Druckgeschwindigkeit und Materialauswahl [Fag22].

2.4.2 Materialextrusion mit reaktiven Filamenten und Granulaten

Innerhalb der Prozesskategorie MEX wurden Ansätze entwickelt, reaktive Harzsysteme mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien, insbesondere in Form von Filamenten und Granulaten, zu verarbeiten. Während filamentbasierte Ansätze auf dem etablierten FFF-Verfahren aufbauen, ermöglichen granulatbasierte Ansätze die Verarbeitung von Werkstoffen, die aufgrund ihrer Materialeigenschaften oder Herstellbarkeit nicht als Filament verfügbar sind. Die zentrale Herausforderung besteht dabei in der gezielten Steuerung der Härtungsreaktion während des Druckprozesses. Das Material muss während der Verarbeitung im Extruder unterhalb der Aktivierungstemperatur verarbeitbar bleiben, während nach der Ablage eine vollständige und kontrollierte Vernetzung sichergestellt werden muss [Wan20].

Fagnani gibt einen systematischen Überblick über den Forschungsstand zur extrusionsbasierten additiven Fertigung mit duroplastischen, faserverstärkten Verbundwerkstoffen und zeigt, dass ein Großteil der bisherigen Arbeiten auf niedrigviskose Flüssigsysteme der MEX, insbesondere DIW, fokussiert ist [Fag22]. Czasny behandelt die additive Fertigung endlosfaserverstärkter Verbundwerkstoffe, bei denen kontinuierliche Fasern gezielt in eine Polymermatrix eingebettet werden, und verdeutlicht, dass die Kombination aus Faserverstärkung und duroplastischer Matrix besondere Anforderungen an Druckkopfentwicklung und Prozessführung stellt [Cza22]. Islam et al. demonstrieren 2024 die mechanische Charakterisierung kontinuierlich kohlenstofffaserverstärkter duroplastischer Bauteile aus dem 3D-Druck und zeigen damit das Potenzial reaktiver Verbundwerkstoffsysteme für strukturelle Anwendungen [Isl24].

Im Bereich der Granulatorextrusion reaktiver Materialien sind bisher vergleichsweise wenige Forschungsarbeiten publiziert. Altıparmak et al. identifizieren die Schneckenextrusion als vielversprechenden Ansatz zur Erweiterung der Materialpalette in der Additiven Fertigung, insbesondere für reaktive und hochviskose Systeme, die nicht in Filamentform verfügbar sind, und sehen darin ein erhebliches Forschungspotenzial für die Zukunft [Alt22].

Eine aktuelle Übersichtsarbeit zur additiven Fertigung duromerer Elastomere kategorisiert die verfügbaren Technologien der additiven Fertigung ebenfalls in Anlehnung an das Materialförderprinzip und bestätigt, dass

materialextrusionsbasierte Verfahren gegenüber photopolymerisationsbasierten Ansätzen kostengünstiger, jedoch weniger präzise sind [Tót25].

2.4.3 Industrielle Forschungsaktivitäten

Neben den akademischen Forschungsarbeiten werden auch Forschungsprojekte aus dem industriellen Umfeld verfolgt. Das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum (SKZ) bearbeitet gemeinsam mit dem Fraunhofer IFAM das Forschungsprojekt „Reactive Printing“, das die Entwicklung latent reaktiver Epoxidharz-Filamente für das FFF-Verfahren zum Ziel hat [SKZ25]. Das Ziel des Projekts, die thermoplastische Verarbeitbarkeit mit den Grundeigenschaften duromerer Werkstoffe zu kombinieren, entspricht der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit und unterstreicht die industrielle Relevanz dieses Forschungsfeldes.

2.5 Abgrenzung des Forschungsbedarfs

Die Analyse des Stands der Wissenschaft und Technik zeigt, dass die extrusionsbasierte additive Fertigung reaktiver Werkstoffe trotz wachsenden Forschungsinteresses noch erhebliche Lücken aufweist. Während sich die Mehrzahl der bisherigen Arbeiten auf niedrigviskose Flüssigsysteme im DIW-Verfahren konzentriert, wurde die Verarbeitung fester reaktiver Halbzeuge, insbesondere latent reaktiver Einkomponenten-Epoxidharzsysteme, innerhalb der Prozesskategorie MEX bisher kaum systematisch untersucht [Fag22]. Abbildung 7 zeigt die Einordnung bestehender Verfahren nach Materialform und Prozess. Daraus wird ersichtlich, dass die Verarbeitung reaktiver, duroplastischer Materialsysteme mittels Granulatextrusion bislang nur unzureichend untersucht ist und somit eine Forschungslücke darstellt, an der die vorliegende Arbeit ansetzt.

Materialform	reaktiv / duroplastisch	vielfach untersucht (DIW, reaktive Harze)	kaum relevant (nicht etabliert)	Forschungslücke
	thermoplastisch	kaum untersucht (untypische Kombination)	etabliert (Stand der Technik FFF)	etabliert (Kunststoffverarbeitung)
		DIW	FFF	Granulatextrusion
		Verfahren		

Abbildung 7: Einordnung des Stands der Technik nach Materialform und Verfahren

Die spezifische Herausforderung der Kombination von Granulatextrusion und latent reaktiven Epoxidharzsystemen ist dabei besonders hervorzuheben. Einerseits ermöglicht die Granulatextrusion die Verarbeitung von Werkstoffen, die nicht in

Filamentform verfügbar sind, andererseits stellt die thermische Latenz der 1K-Epoxidharzsysteme eine grundlegende Voraussetzung für die prozessstabile Verarbeitung dar [Alt22]. Die Kontrolle der Vernetzungsreaktion stellt eine zentrale Fragestellung dar, für die in der Literatur bislang nur für andere Materialformen, insbesondere flüssige und pastöse Systeme, Lösungsansätze existieren. Dabei muss sichergestellt werden, dass das Material im Extruder unterhalb der Aktivierungstemperatur verarbeitbar bleibt und erst nach der Ablage kontrolliert vernetzt [Wan20].

Über die reine Prozesssteuerung hinaus fehlen zudem systematische Untersuchungen zu den resultierenden Prozessparametern und Bauteileigenschaften duromerer Bauteile, die mittels Granulatextrusion gefertigt wurden. Dieses Verfahren wird als Fused Granular Fabrication (FGF) bezeichnet. Industrienähe Forschungsprojekte wie das SKZ-Projekt „Reactive Printing“ bestätigen die Aktualität und industrielle Relevanz dieser Fragestellung [SKZ25].

Die vorliegende Arbeit setzt unmittelbar an den beschriebenen Forschungslücken an. Damit leistet die Arbeit einen Beitrag zur Bewertung der Eignung reaktiver Halbzeuge für den industriellen Einsatz in der additiven Fertigung und zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Prozessführung.

3 Analyse der Reaktionskinetik des duromeren Halbzeugs

3.1 DSC-Messung

3.1.1 Messprinzip

Die Differenzkalorimetrie ist eine thermoanalytische Messmethode, die den Wärmestrom zwischen einer Probe und einer Referenz als Funktion der Temperatur oder der Zeit erfasst. Das Messprinzip basiert auf dem Vergleich der für die Probe und die inerte Referenz benötigten Wärmemengen, um beide bei identischer Temperatur zu halten beziehungsweise identischen Temperaturprogrammen zu unterziehen. Exotherme Reaktionen wie die Vernetzungsreaktion von Epoxidharzsystemen führen zu einer messbaren Wärmefreisetzung der Probe gegenüber der Referenz, während endotherme Vorgänge wie das Aufschmelzen oder der Glasübergang eine erhöhte Wärmeaufnahme verursachen. [Jav16, Ger19]

Für die Charakterisierung von Epoxidharzsystemen ist die DSC das am häufigsten eingesetzte Analyseverfahren, da sie sowohl die Reaktionsenthalpie der Vernetzungsreaktion als auch die Glasübergangstemperatur des ausgehärteten Systems quantitativ erfasst [Jav16]. Die Messung kann unter isothermen Bedingungen (konstante Temperatur) oder nicht-isotherm (mit definierter Heizrate) durchgeführt werden. Bei isothermen Messungen wird die Probe schnell auf eine definierte Härtungstemperatur gebracht und der zeitliche Verlauf des Wärmestroms verfolgt, während bei nicht-isothermen Messungen die Probe mit konstanter Heizrate aufgeheizt wird [Jav16, Ger19].

Der Härtungsgrad α wird aus den DSC-Messdaten als Verhältnis der bis zum Zeitpunkt t freigesetzten partiellen Reaktionswärme $\Delta H(t)$ zur gesamten Reaktionsenthalpie ΔH_{ges} berechnet:

$$\alpha = \frac{\Delta H(t)}{\Delta H_{ges}} \quad (1)$$

Dabei gilt $\alpha = 0$ für das vollständig ungehärtete und $\alpha = 1$ für das vollständig ausgehärtete System. In der Praxis wird $\alpha = 1$ häufig erst durch Nachhärtung bei erhöhter Temperatur erreicht [Shn22].

Da die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten DSC-Messungen nicht-isotherm erfolgen, wird α nicht als zeitaufgelöster Verlauf, sondern als Restwärme-basierter

Einzelwert je Probe bestimmt. Dabei wird die nach der Extrusion verbleibende Restreaktionsenthalpie ΔH_{Rest} ins Verhältnis zur Gesamtreaktionsenthalpie ΔH_{ges} des unvernetzten Ausgangsmaterials gesetzt, analog zur Restwärme-basierten Bestimmung des Härungsgrads bei Teilhärungsversuchen [Jav16]:

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta H_{Rest}}{\Delta H_{ges}} \quad (2)$$

Zur Beschreibung der Härungskinetik von Epoxidharzsystemen sowie zur Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a werden in der Literatur weiterführende Modelle und isokonversionale Methoden eingesetzt. Das Kamal-Sourour-Modell beschreibt die Härungsrate $\frac{d\alpha}{dt}$ als Funktion des Härungsgrads α [Jav16]. Die Kissinger-Methode bestimmt E_a aus der Verschiebung der Peaktemperatur bei unterschiedlichen Heizraten [Zhu26]. Die Ozawa-Flynn-Wall-Methode ermittelt E_a zusätzlich als Funktion des Härungsgrads α und ermöglicht damit eine differenziertere Betrachtung der Reaktionskinetik über den gesamten Härungsverlauf [Las19, Zhu26].

Bei gefüllten Epoxidharzsystemen ist zu beachten, dass die Füllstoffe die Härungskinetik beeinflussen können. Dies gilt auch für die in der vorliegenden Arbeit eingesetzten EPOXIDUR-Granulate mit Glasfaser- und Mineralstoffanteilen. Shnawa zeigt, dass mineralische Füllstoffe die Anfangshärtungstemperatur und die Härungsrate gegenüber dem ungefüllten Harzsystem verändern können. Die Gesamtreaktionsenthalpie ΔH_{ges} ist bei gefüllten Systemen entsprechend dem Füllstoffanteil reduziert und muss bei der Auswertung berücksichtigt werden. [Shn22]

Die temperaturmodulierte DSC (TM-DSC) stellt eine Weiterentwicklung der konventionellen DSC dar, bei der dem linearen Temperaturprogramm eine sinusförmige Temperaturschwingung überlagert wird. Dadurch lässt sich der gemessene Gesamtwärmestrom in einen reversiblen Anteil (z. B. Wärmekapazität, Glasübergang) und einen nicht-reversiblen Anteil (z. B. Vernetzungsreaktion, Nachhärtung) trennen. Dies ist besonders vorteilhaft bei der Charakterisierung von Epoxidharzsystemen, bei denen Glasübergang und Nachhärtungsreaktion im gleichen Temperaturbereich auftreten und sich bei konventioneller DSC überlagern können. [Net24]

Auf den Einsatz der TM-DSC wird in dieser Arbeit verzichtet, da die damit gewonnene zusätzliche Trennschärfe für die angestrebte Bestimmung der Prozessparameter nicht erforderlich sind.

3.1.2 Ergebnisse und Auswertung

Die DSC-Messung des EPOXIDUR EP Purge-Granulats wurde von der Raschig GmbH als dynamischer Scan im Temperaturbereich von 30 °C bis 230 °C bei einer Heizrate von $5 \frac{K}{min}$ durchgeführt (Probenmasse 45,48 mg, Aluminiumtiegel) [Ras25a]. Abbildung 8 zeigt die resultierende DSC-Messurve.

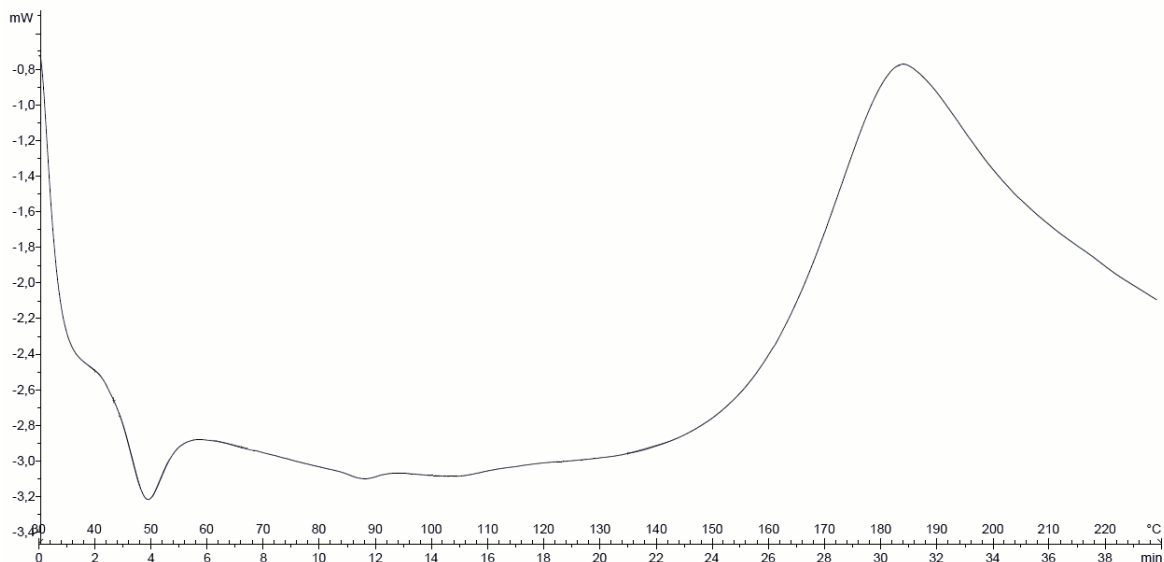


Abbildung 8: DSC-Messkurve EPOXIDUR EP Purge (eigene Darstellung nach [Ras25a]; vollständige Messkurve siehe Anlage 1)

Im unteren Temperaturbereich zeigt sich zunächst der Glasübergang des noch unvernetzten Granulats mit einer Onset-Temperatur von 43,20 °C, einem Mittelpunkt bei 43,22 °C und einem extrapolierten Peak bei 49,05 °C. Dieser Glasübergang markiert den Übergang des Feststoffgranulats vom glasartig-starren in einen erweichten Zustand und ist damit die untere Grenze für eine Verarbeitung des Materials im plastifizierten Zustand.

Mit weiter steigender Temperatur zeigt die Kurve einen breiten, ausgeprägten exothermen Peak mit einer Peaktemperatur von 183,38 °C. Die aus der Peakfläche ermittelte Reaktionsenthalpie beträgt 775,61 mJ beziehungsweise $17,05 \frac{J}{g}$ bezogen auf die Probenmasse. Dieser Wert entspricht der gesamten Reaktionsenthalpie ΔH_{ges} des unvernetzten Ausgangsmaterials (Formel 1) und dient nach Formel 2 als Referenzgröße für die Bestimmung des Härungsgrads α an extrudierten Proben,

indem die dort jeweils verbleibende Restreaktionsenthalpie ΔH_{Rest} ins Verhältnis zu ΔH_{ges} gesetzt wird.

Der große Temperaturabstand zwischen dem Glasübergang und dem Beginn der merklichen exothermen Aktivität (deutlich oberhalb von 100 °C) bestätigt die für latent reaktive 1K-Epoxidharzsysteme charakteristische thermische Latenz [Tom12]: Das Material ist oberhalb seiner Glasübergangstemperatur fließfähig und damit grundsätzlich extrudierbar, ohne dass in diesem Bereich bereits eine signifikante Vernetzungsreaktion einsetzt. Dieses Verhalten deckt sich mit der in 2.3.4.1 beschriebenen grundlegenden Anforderung an latent reaktive Systeme für den FGF-Prozess.

Die auf die Probenmasse bezogene Reaktionsenthalpie von $17,05 \frac{J}{g}$ liegt unterhalb der für andere EPOXIDUR-Granulate unter identischen Messbedingungen (30 bis 230 °C, $5 \frac{K}{min}$) ermittelten Werte: EP 3585 H und EP 3585 T ZN weisen $54,38 \frac{J}{g}$ beziehungsweise $52,67 \frac{J}{g}$ auf [Ras14], EP 3781 E ZD $43,65 \frac{J}{g}$ [Ras25b] (Messkurven siehe Anlage 1). Da für keines der Vergleichsmaterialien eine quantitative Füllstoffangabe vorliegt, lässt sich die niedrigere Enthalpie des EP-Purge-Granulats nicht auf einen konkreten Füllstoffanteil zurückführen. Als plausibler Erklärungsansatz kommt jedoch der im Datenblatt beschriebene, im Vergleich höhere Anteil inerter Bestandteile in Betracht.

3.2 Rheologie

3.2.1 Messprinzip

Für die Charakterisierung reaktiver Polymersysteme ist die Kenntnis des rheologischen Verhaltens von zentraler Bedeutung. Dies gilt insbesondere im Kontext der Verarbeitbarkeit im Extrusionsprozess, da die Viskosität des Materials maßgeblich die Fließfähigkeit in der Heizzone, das Extrusionsverhalten an der Düse sowie die Formstabilität nach der Ablage bestimmt. [Mac18]

Das viskoelastische Verhalten polymerer Werkstoffe wird, wie in Kapitel 2.3.5 beschrieben, über den Speichermodul G' und den Verlustmodul G'' erfasst. Ergänzend dazu wird das Verhältnis von G'' zu G' als Verlustfaktor $\tan \delta$ bezeichnet und gibt Auskunft über den dominierenden Charakter des Materials: Bei $\tan \delta > 1$ überwiegt das viskose, bei $\tan \delta < 1$ das elastische Verhalten. Eine weitere zentrale Kenngröße ist die komplexe Viskosität η^* , die das Fließverhalten unter oszillatorischer Deformation beschreibt. [Cañ10]

Für die Messung rheologischer Eigenschaften von Polymerschmelzen und reaktiven Harzsystemen wird überwiegend die Rotationsrheometrie eingesetzt. Dabei wird die Probe zwischen zwei parallelen Platten oder in einer Kegel-Platte-Geometrie eingeschlossen und einer definierten Scherdeformation ausgesetzt. Bei stationären Schermessungen wird eine konstante Scherrate aufgeprägt und die resultierende Scherspannung gemessen, woraus die Scherviskosität η berechnet wird [Zha18]. Bei oszillatorischen Messungen wird eine sinusförmige Deformation mit definierter Amplitude und Frequenz aufgeprägt, was die Bestimmung von G' , G'' und η^* als Funktion von Temperatur, Frequenz oder Zeit ermöglicht [Cañ10].

Der in Kapitel 2.3.5 beschriebene Gelpunkt stellt für die Verarbeitung im FGF-Prozess eine kritische Grenze dar, da das Material bis zur Ablage fließfähig bleiben muss. Mackay zeigt, dass der Druckabfall im Hotend eines FFF-Extruders mit etwa 30 MPa vergleichbar mit konventionellen Polymerverarbeitungsverfahren ist und nicht-Newtonsche sowie viskoelastische Effekte eine wesentliche Rolle spielen [Mac18].

3.2.2 Ergebnisse und Auswertung

Die rheologische Messung des EPOXIDUR EP Purge-Granulats erfolgte im Temperaturbereich von etwa 102 °C bis 210 °C bei einer Heizrate von $2 \frac{K}{min}$ mittels oszillatorischer Scherrheometrie. Abbildung 9 zeigt den Verlauf von Speichermodul G' und Verlustmodul G'' über der Temperatur; die zugehörigen Messwerte sind in Anlage 2 aufgeführt.

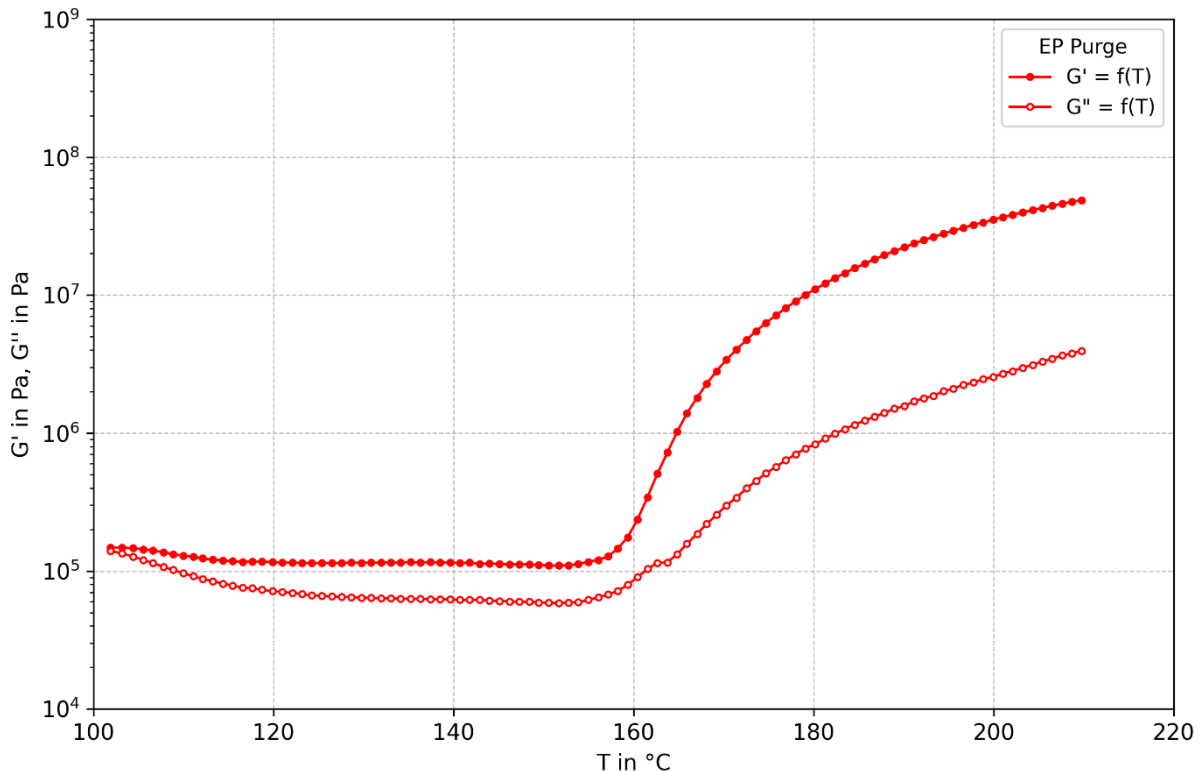


Abbildung 9: Rheologische Messkurve (G' , G'' über T) des EPOXIDUR EP Purge-Granulats, oszillatorische Messung

Zu Messbeginn bei etwa 102 °C liegen der Speichermodul G' mit 147.687 Pa und der Verlustmodul G'' mit 139.933 Pa nahe beieinander, wobei G' bereits geringfügig überwiegt. Der Verlustwinkel δ beträgt zu diesem Zeitpunkt 43,5° und liegt damit knapp unterhalb von 45°, dem Wert, der einem ausgeglichenen viskos-elastischen Verhalten entspricht ($\tan \delta = 1$). Dieses nahezu ausgeglichene Verhalten zu Messbeginn ist für ein Ausgangsgranulat ungewöhnlich und unterscheidet sich vom klassischen Fall eines flüssigen Harzsystems, bei dem zu Beginn ein deutlich viskoses Verhalten ($G'' > G'$) vorherrscht: Da es sich beim EPOXIDUR-Granulat um ein festes Ausgangsmaterial handelt, liegt auch im erweichten Zustand oberhalb

des Glasübergangs (vgl. Kapitel 3.1.2, Glasübergang etwa 43 bis 49 °C) kein rein flüssigkeitsartiges Fließverhalten vor.

Mit steigender Temperatur nehmen beide Module zunächst leicht ab und durchlaufen bei etwa 152 °C ein Minimum: G' sinkt auf 109.356 Pa, G'' auf 58.477 Pa. Dieser Bereich entspricht der thermisch bedingten Erweichung des Materials bei gleichzeitig noch nicht signifikant fortgeschrittener Vernetzungsreaktion. Das ist vergleichbar mit dem Abstand zwischen Glasübergang und einsetzender exothermer Aktivität (vgl. Kapitel 3.1.2).

Ab etwa 155 bis 160 °C (T_{on}) steigen G' und G'' steil an, was den Beginn der Vernetzungsreaktion und den damit verbundenen Aufbau des in 2.3.1 beschriebenen Polymernetzwerks widerspiegelt. Dieser Anstieg beginnt bereits deutlich unterhalb der in der DSC-Messung (vgl. Kapitel 3.1.2) bestimmten Peaktemperatur von 183,38 °C, was plausibel ist: Die Versteifung des Materials setzt bereits mit den ersten Vernetzungsreaktionen ein, während die DSC-Peaktemperatur die maximale Reaktionsgeschwindigkeit markiert, zu der bereits ein relevanter Teil der Vernetzung stattgefunden hat.

Am Ende der Messung bei etwa 210 °C erreicht G' einen Wert von $48,78 \cdot 10^6$ Pa gegenüber $3,94 \cdot 10^6$ Pa für G'' . Der Verlustwinkel δ beträgt zu diesem Zeitpunkt 4,6°. Das Verhältnis von G' zu G'' von etwa 12:1 zeigt ein deutlich elastisch dominiertes, weitgehend vernetztes Materialverhalten an. Über den gesamten Messbereich bleibt dabei $G' > G''$. Ein klassischer Kreuzungspunkt (Gelpunkt im Sinne von $G' = G''$) tritt nicht auf (vgl. Kapitel 3.2.1), da das Material bereits zu Beginn der Messung fest und nicht mehr fließfähig im klassischen Sinne vorliegt.

Der Vergleich mit den rheologischen Messkurven der übrigen EPOXIDUR-Varianten (Anlage 2) zeigt deutliche Unterschiede im Aufheizverhalten. Bei EP 3585 H, EP 3581 E sowie EP 3781 E ZD setzt der steile Anstieg von G' und G'' bereits im Bereich von etwa 100 bis 125 °C ein; alle drei Materialien erreichen bei etwa 125 bis 135 °C ein weitgehend vernetztes Zustandsniveau von G' im Bereich 10^7 bis 10^8 Pa. Im Gegensatz dazu verbleibt G' bei EP Purge bis etwa 155 °C auf einem deutlich niedrigeren Niveau von rund 10^5 Pa und erreicht selbst am Ende der Messung bei etwa 210 °C erst einen Wert von $48,78 \cdot 10^6$ Pa. Das EP-Purge-Granulat weist damit sowohl ein deutlich breiteres Verarbeitungsfenster als auch eine geringere Reaktivität als die übrigen untersuchten EPOXIDUR-Varianten auf.

3.3 Ableitung von Prozessparametern

Aufgrund des in Kapitel 3.2.2 gezeigten breiteren Verarbeitungsfensters und der geringeren Reaktivität wird EP Purge als Basismaterial für die im Folgenden abgeleiteten Prozessparameter sowie für die in Kapitel 5 beschriebenen Extrusionsversuche herangezogen.

Die Ergebnisse der DSC-Analyse (Kapitel 3.1.2) und der rheologischen Messung (Kapitel 3.2.2) bilden gemeinsam die experimentelle Grundlage für die Ableitung geeigneter Prozessparameter für die FGF-Verarbeitung des EPOXIDUR EP Purge-Granulats. Zentrale Zielgröße ist die Definition eines Verarbeitungsfensters, das die thermischen Bedingungen beschreibt, unter denen das Material einerseits prozessstabil extrudiert werden kann und andererseits eine vollständige, kontrollierte Vernetzung nach der Ablage sichergestellt ist [Wan20].

Da die DSC-Messung keinen expliziten Onset-Wert für den exothermen Härtungspeak auswies, sondern nur die Peaktemperatur (183,38 °C), wird für die Ableitung der Extrusionstemperatur ersatzweise der Onset des rheologisch gemessenen Modulanstiegs herangezogen. Dieser Wert ist für die Prozessauslegung ohnehin relevanter als ein rein kalorimetrischer Onset, da er direkt die einsetzende mechanische Versteifung des Materials und damit die Grenze der Extrudierbarkeit abbildet.

3.3.1 Extrusionstemperatur

Die Extrusionstemperatur im Hotend des Granulatextruders muss oberhalb der Glasübergangstemperatur des Granulats liegen, damit das Material ausreichend erweicht und förderfähig ist, jedoch unterhalb der Temperatur, bei der eine signifikante Vernetzungsreaktion einsetzt. Aus der DSC-Messung ergibt sich eine Glasübergangstemperatur von etwa 43 bis 49 °C (Onset bis extrapolierter Peak). Die rheologische Messung zeigt, dass Speicher- und Verlustmodul bis etwa 150 bis 152 °C nahezu konstant bleiben und dort ein Minimum durchlaufen (vgl. Kapitel 3.2.2), bevor ab etwa 155 bis 160 °C ein steiler, reaktionsbedingter Anstieg einsetzt.

Unter Berücksichtigung einer ausreichenden Prozesssicherheit wird die maximale Extrusionstemperatur auf etwa 130 °C festgelegt, was einem Sicherheitsabstand von etwa 25 bis 30 K zum rheologisch bestimmten Anstiegsbeginn entspricht. Dieser Sicherheitsabstand berücksichtigt, dass die Verweilzeit des Materials im Extruder unter realen Prozessbedingungen (mehrfaches Aufheizen, lokale Temperaturspitzen im Schneckenkanal) von der idealisierten, gleichmäßigen Heizrate der Laborcharakterisierung abweichen kann [Mac18].

3.3.2 Verarbeitungsfenster

Das aus den Ergebnissen der DSC- und der rheologischen Messung abgeleitete Verarbeitungsfenster ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Es wird nach unten durch die Glasübergangstemperatur und nach oben durch den rheologisch bestimmten Anstiegsbeginn der Vernetzungsreaktion begrenzt (vgl. Kapitel 3.1.2 sowie Kapitel 3.3.1). Innerhalb dieses Fensters wird eine prozessstabile Extrusion ohne signifikante vorzeitige Vernetzung als möglich erachtet [Mac18].

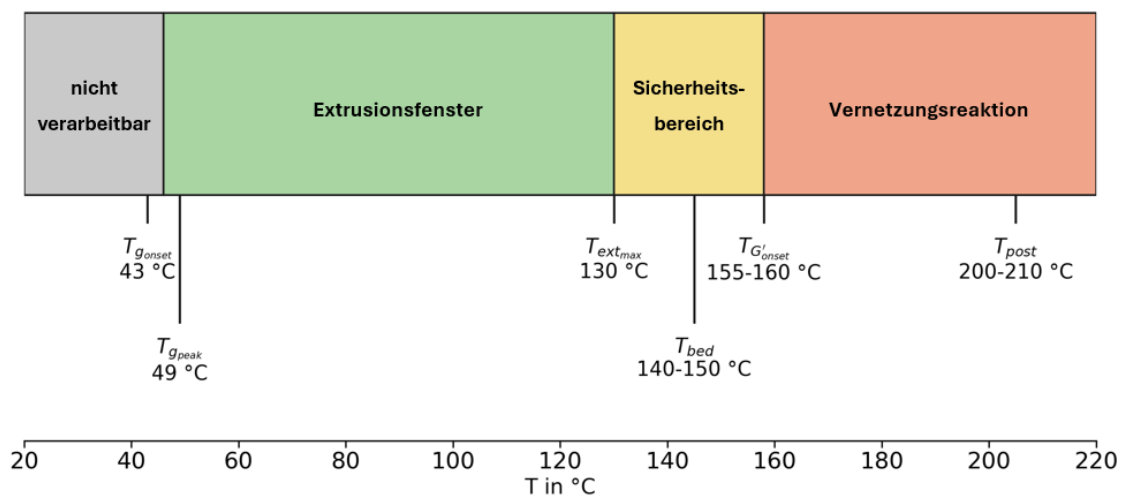


Abbildung 10: Schematisches Verarbeitungsfenster für die Extrusion des EPOXIDUR EP Purge-Granulats (eigene Darstellung, vgl. Kapitel 3.1.2 und Kapitel 3.2.2)

Die abgeleiteten Prozessparameter bilden die Grundlage für die in Kapitel 5 beschriebenen Druckversuche und die systematische Parametervariation. Da die im Rahmen dieses Kapitels abgeleiteten Werte auf Basis von Labor-DSC- und Rheologiemessungen mit geringen Probenmengen und definierten Heizraten ermittelt wurden, ist eine Validierung unter realen Extrusionsbedingungen im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erforderlich. Da am verwendeten Granulatextruder ausschließlich die Hotend-Temperatur als Prozessparameter gezielt eingestellt werden kann, beschränkt sich die experimentelle Validierung auf diesen Parameter. Schneckendrehzahl und Materialzufuhr wurden dabei konstant gehalten und eine ausreichende Granulatmenge im Zylinder sichergestellt. Um ein thermisch eingeschwungenes System zu gewährleisten, wurde der Extruder vor jedem Versuch 20 Minuten vorgewärmt.

4 Entwicklung des extrusionsbasierten Drucksystems

4.1 Anforderungsanalyse und Systemkonzept

4.1.1 Zielsetzung und Anforderungen

Ziel der Systementwicklung war der Aufbau eines Demonstrators zur Untersuchung der grundsätzlichen Durchführbarkeit der extrusionsbasierten Verarbeitung latent reaktiver Epoxidharzsysteme. Im Mittelpunkt stand dabei die Fragestellung, ob sich das reaktive Halbzeug im unvernetzten, viskosen Zustand extrudieren lässt, bevor eine für die Verarbeitung kritische Vernetzung einsetzt.

Als zentrale Anforderung ergab sich daraus die Notwendigkeit eines Granulatorextruders, da das eingesetzte Epoxidharzsystem ausschließlich in Granulatform vorliegt. Für die vorliegende Arbeit wurde ein Granulatorextruder der Firma Princore eingesetzt [Pri26].

Das System wurde als eigenständiger, reduzierter Demonstrator realisiert, der die prinzipielle Extrudierbarkeit des reaktiven Materials unter kontrollierten Bedingungen nachweisen sollte.

4.1.2 Grundaufbau

Für den Aufbau des Demonstrators wurde ein Granulatextruder der Firma Princore eingesetzt. Eine Ansicht des verwendeten Granulatextruders ist in Abbildung 11 dargestellt. Das zugeführte Granulat gelangt über einen Trichter in den Aluminium-Zylinder des Extruders. Ein darunterliegender Zuführtrichter aus Messing wärmt das Material für den weiteren Transport vor, bevor es durch eine rotierende Förderschnecke in Richtung der beheizten Aufschmelzzone befördert und dort in einen verarbeitbaren Zustand überführt wird. Der sich im Zylinder aufbauende Druck sorgt für den Austrag des Materials durch die Düse. [Pri26]

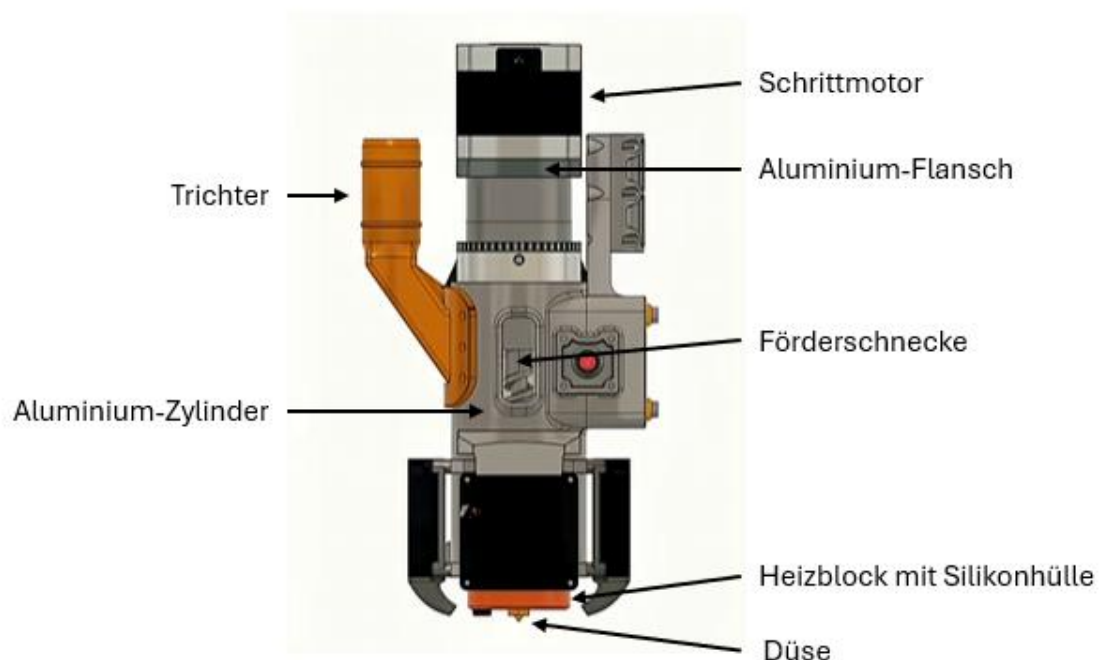


Abbildung 11: Granulatextruder (eigene Darstellung nach [Pri26])

Der Antrieb der Förderschnecke erfolgt über einen Schrittmotor (Typ Nema 17) mit nachgeschaltetem Getriebe (Übersetzung 5,18:1). Die Übersetzung erhöht das am Schneckeneingang wirkende Drehmoment und ermöglicht eine zuverlässige Materialförderung. Für die Beheizung sind zwei 70-W-Heizpatronen in einem massiven Heizblock verbaut, der zusätzlich mit einer Silikonhülle thermisch isoliert ist; die Temperaturerfassung erfolgt über einen Thermistor. [Pri26]

Der interne Aufbau des Granulatextruders mit den wesentlichen Komponenten ist in Abbildung 12 dargestellt.

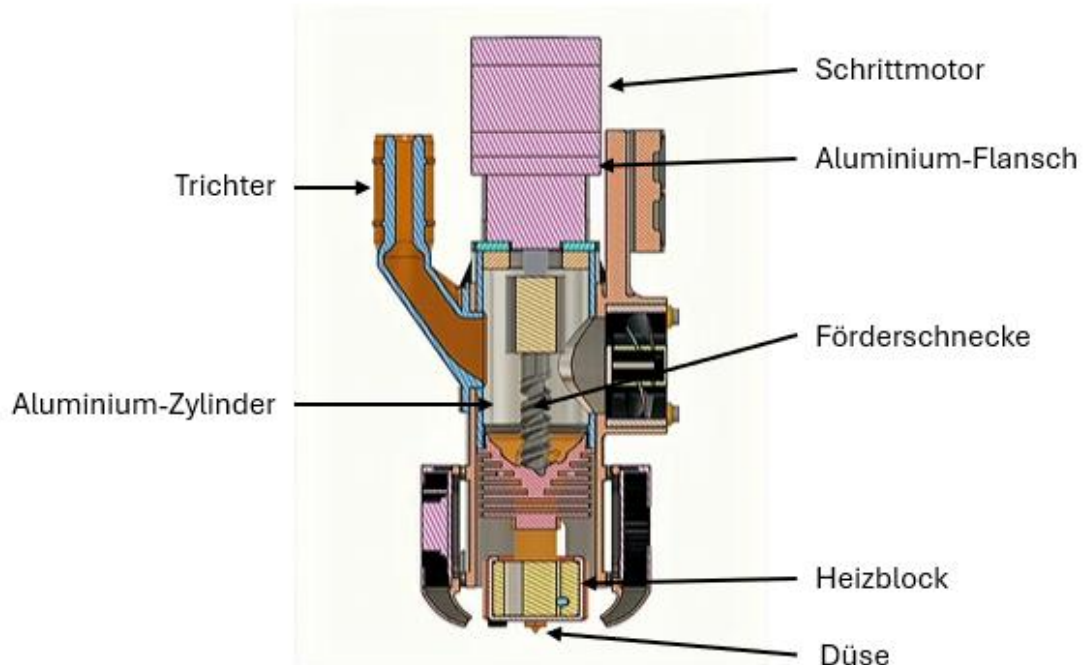


Abbildung 12: Granulatextruder, Schnittbild (eigene Darstellung nach [Pri26])

Aufgrund der erhöhten Heizleistung gegenüber Standard-FFF-Hotends wird die Ansteuerung der Heizpatronen über einen externen Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET) realisiert, um die Hauptplatine des Steuerungssystems nicht zu überlasten. [Pri26]

Für den Betrieb dieser Komponenten wurde die vom Hersteller empfohlene Hardware-Kombination übernommen, um Kompatibilitätsrisiken zu minimieren und auf eine bereits funktionsfähige Basis aufzubauen.

Als Steuerungseinheit kommt ein Raspberry Pi 4 in Kombination mit einem BIGTREETECH (BTT) SKR v1.4 Turbo-Mainboard zum Einsatz. Die Ansteuerung des Schrittmotors erfolgt über einen TMC2209-Motortreiber. Der Raspberry Pi 4 übernimmt dabei die Ausführung der Klipper-Hostsoftware sowie der zugehörigen Dienste Moonraker und Mainsail, während das SKR-Board die direkte Ansteuerung von Motor, Heizelementen und Sensorik übernimmt. Diese Aufteilung ist

charakteristisch für Klipper-basierte Systeme: Rechenintensive Aufgaben laufen auf dem Raspberry Pi, zeitkritische Steuerungsaufgaben auf dem Mikrocontroller-Board.

Das Gesamtsystem wurde bewusst als eigenständiger, reduzierter Demonstrator konzipiert. Es besteht aus einer Grundplatte zur Aufnahme des Granulatextruders sowie der zugehörigen Elektronikkomponenten, anstatt in ein bestehendes FFF-System integriert zu werden (vgl. Kapitel 4.1.1). Auf diese Weise konnten einzelne Systemkomponenten wie die mechanische Anbindung, die Elektronik und die Firmware flexibel und iterativ weiterentwickelt werden, ohne Wechselwirkung mit einem vollständigen Drucksystem.

4.2 Firmware Klipper

4.2.1 Installation der Firmware und zugehöriger Dienste

Als Firmware zur Steuerung des Demonstrators wurde Klipper eingesetzt, eine Open-Source-Firmware für 3D-Drucksysteme. Klipper unterscheidet sich von klassischen, monolithisch aufgebauten 3D-Drucker-Firmwares dadurch, dass die rechenintensive Pfadplanung und Bewegungsberechnung auf einem leistungsfähigeren Host-System, in diesem Fall dem Raspberry Pi 4, ausgeführt wird. Der Mikrocontroller des Mainboards übernimmt hingegen die zeitkritische Umsetzung der berechneten Bewegungsbefehle. Diese Architektur ermöglicht die Berechnung präziser Schrittzeiten auf Basis physikalischer Bewegungsgleichungen anstelle vereinfachter kinematischer Schätzverfahren, wie sie in klassischen, vollständig auf dem Mikrocontroller ausgeführten Firmwares eingesetzt werden [Kli26b]. Für die Firmware-Auswahl wurde zudem die vom Hersteller des Granulatextruders empfohlene Software-Basis übernommen, um Kompatibilitätsrisiken zu minimieren.

Für die Grundinstallation wurde eine 64-GB-microSD-Karte mittels Raspberry Pi Imager beschrieben. Dabei wurden das Zielmodell Raspberry Pi 4 sowie als Betriebssystem-Image MainsailOS (Version 2.2.2, 64-Bit) ausgewählt. Im Rahmen der Imager-Konfiguration wurden zudem der Hostname, ein Benutzerkonto sowie der SSH-Fernzugriff zur späteren Fernsteuerung des Systems eingerichtet [Mai26b].

MainsailOS beinhaltet Klipper, den Application-Programming-Interface-(API)-Dienst Moonraker sowie die webbasierte Benutzeroberfläche Mainsail vorinstalliert. Moonraker ist ein Python-basierter Webserver, der eine API bereitstellt, über die externe Anwendungen mit der Klipper-Firmware kommunizieren können [Ark26]. Mainsail nutzt diese Schnittstelle, um die Überwachung und Steuerung des Systems über einen Webbrowser zu ermöglichen. Dazu gehören unter anderem die Anzeige von Temperaturverläufen, das Senden maschinenlesbarer Steuerbefehle in Form von G-Codes sowie die Anpassung von Konfigurationsparametern [Mai26a].

Da MainsailOS lediglich die Host-Software bereitstellt, musste die eigentliche Klipper-Firmware für das eingesetzte BTT SKR v1.4 Turbo-Mainboard separat kompiliert und auf den Mikrocontroller übertragen werden. Die Kompilierung erfolgte über eine SSH-Verbindung zum Raspberry Pi mithilfe des Befehls

make menuconfig, der ein interaktives Konfigurationsmenü öffnet. Dabei wurden die Mikrocontroller-Architektur LPC176x (Smoothieboard), das Prozessormodell LPC1769, ein 16-KiB-Bootloader-Offset sowie die USB-Kommunikationsschnittstelle ausgewählt. Die erzeugte Firmwaredatei wurde anschließend auf eine FAT32-formatierte microSD-Karte übertragen. Da die kompilierte Firmwaredatei standardmäßig unter dem Namen *klipper.bin* erzeugt wird, der Bootloader des SKR-Boards für den automatischen Flash-Vorgang jedoch eine Datei mit dem Namen *firmware.bin* erwartet, wurde die Datei entsprechend umbenannt und durch Einsetzen der Karte in das Mainboard installiert. Der erfolgreiche Abschluss des Flash-Vorgangs zeigte sich durch die für Aftermarket-Boards charakteristische automatische Umbenennung der Datei zu *FIRMWARE.cur* auf der microSD-Karte, welche einen wiederholten Flash-Vorgang beim nächsten Systemstart verhindert [Kli26a]. Nach dem Verbinden des Boards mit dem Raspberry Pi über USB wurde die vom Betriebssystem automatisch vergebene serielle Geräte-ID über den Befehl *ls /dev/serial/by-id/* ausgelesen und in der Klipper-Konfigurationsdatei (*printer.cfg*) registriert, wodurch die Kommunikation zwischen Raspberry Pi und Mainboard hergestellt wurde [Kli26a].

4.2.2 Netzwerkeinbindung

Anstelle einer WLAN-Anbindung über einen Router wurde der Demonstrator über eine direkte LAN-Verbindung mit statischer IP-Adresse betrieben. Diese Entscheidung war darauf zurückzuführen, dass für den Versuchsaufbau kein dediziertes WLAN-Netzwerk zur Verfügung stand. Die direkte LAN-Verbindung zwischen Steuerrechner und Raspberry Pi stellte hingegen eine stabile Lösung dar, die unabhängig von einer vorhandenen Netzwerkinfrastruktur betrieben werden konnte.

Dem Raspberry Pi wurde die statische IPv4-Adresse 192.168.10.2/24 zugewiesen. Am verbindenden Steuerrechner wurde die entsprechende Netzwerkschnittstelle ebenfalls manuell auf eine feste IP-Adresse im selben Adressbereich umgestellt; eine automatische Adressvergabe über DHCP kam an keiner Stelle zum Einsatz. Nach Herstellung der physischen LAN-Verbindung konnte die Erreichbarkeit des Raspberry Pi mittels ICMP-Ping sowie der Aufbau einer SSH-Verbindung erfolgreich überprüft werden. Die Mainsail-Weboberfläche war anschließend über die feste IP-Adresse im Browser erreichbar, wodurch eine zuverlässige und reproduzierbare Kommunikation mit dem System unabhängig von einer externen Netzwerkinfrastruktur ermöglicht wurde.

4.2.3 Grundkonfiguration

Als Ausgangspunkt für die Klipper-Konfiguration diente eine vorgefertigte *printer.cfg*, die auf Basis der Herstellerempfehlung für die eingesetzte Board- und Motortreiberkombination angepasst wurde (vgl. Kapitel 4.1.2). Sämtliche Anpassungen der Hardwarezuordnung, Treiberparameter und Steuerfunktionen erfolgten innerhalb dieser Konfigurationsdatei. Da für den ersten Versuchsaufbau ausschließlich der Extrudermotor sowie die Beheizung des Granulatrextruders benötigt wurden, wurde die Konfiguration zunächst auf den erforderlichen Funktionsumfang beschränkt.

Im Konfigurationsabschnitt *[extruder]* wurden die Pin-Belegungen für Schrittmotor, Freigabe- und Richtungssignal sowie Heizpatrone hinterlegt. Die Übersetzung des Getriebes wurde über die Rotationsdistanz (*rotation_distance*) berücksichtigt, welche die pro Motorumdrehung geförderte Materialmenge definiert. Als Temperatursensor wurde ein Thermistor vom Typ ATC Semitec 104GT-2 konfiguriert, für den Heizungsregler wurde als Regelverfahren der Parameter *control: watermark* definiert. Der Parameter *min_temp* legt dabei die untere Plausibilitätsgrenze des Sensormesswertes fest, unterhalb derer Klipper einen Sensorfehler meldet; er wurde entsprechend niedrig gewählt, um Fehlermeldungen durch einen zwischenzeitlich nicht angeschlossenen Thermistor zu vermeiden. Über den Parameter *min_extrude_temp* wird zusätzlich die minimale Hotend-Temperatur festgelegt, unterhalb derer sich der Extrudermotor aus Sicherheitsgründen nicht drehen lässt; ein niedriger Wert ermöglicht dabei auch Motortests ohne vorheriges Aufheizen des Hotends. Da Klipper ursprünglich für filamentbasierte Systeme konzipiert ist, mussten weitere, für den Granulatrextruder physikalisch nicht relevante Parameter wie *nozzle_diameter* und *filament_diameter* formal gesetzt werden, um eine gültige Konfiguration zu erhalten.

Da für den reduzierten Versuchsaufbau zunächst keine Positionierbewegungen erforderlich waren, wurden die Konfigurationsabschnitte der Bewegungsachsen (*[stepper_x]*, *[stepper_y]*, *[stepper_z]*) durch Auskommentieren deaktiviert. Zudem wurde der Abschnitt für das Heizbett (*[heater_bed]*) vollständig auskommentiert und die Kinematik im Abschnitt *[printer]* auf *none* gesetzt.

Für die Ansteuerung des Extrudermotors wurde ein eigener Konfigurationsabschnitt für den TMC2209-Motortreiber angelegt, in dem die UART-

Kommunikationsschnittstelle sowie der aktive und passive Motorstrom (*run_current* und *hold_current*) definiert wurden. Die Werte wurden so gewählt, dass eine Überlastung von Motor und Treiber vermieden wird; die endgültige Festlegung dieser Parameter wird in Kapitel 4.3 im Zusammenhang mit dem mechanischen Aufbau behandelt.

Zusätzlich wurden die drei am Granulatextruder verbauten Lüfter im Abschnitt *[fan_generic]* grundlegend konfiguriert. Ihre tatsächliche Nutzung im Rahmen der Versuchsdurchführung wird in Kapitel 4.5 beschrieben.

Die vollständige *printer.cfg* ist in Anlage 3 dokumentiert.

4.3 Mechanischer Aufbau

Der Demonstrator wurde auf zwei senkrecht zueinander stehenden Holzplatten aufgebaut. Auf der waagerechten Platte sind das Netzteil (24 V / 15 A), der Raspberry Pi 4 sowie das BTT SKR v1.4 Turbo-Mainboard mit dem darüber angebrachten, separat versorgten Lüfter zur Motortreiberkühlung montiert. An der senkrechten Platte ist der Granulatextruder über eine zweiteilige Halterung befestigt. Diese Bauweise ermöglichte einen kompakten, transportfähigen Versuchsaufbau, der unabhängig von einer vollständigen Druckerkinematik betrieben werden konnte. Der finale Versuchsaufbau des Demonstrators ist in Abbildung 13 dargestellt.

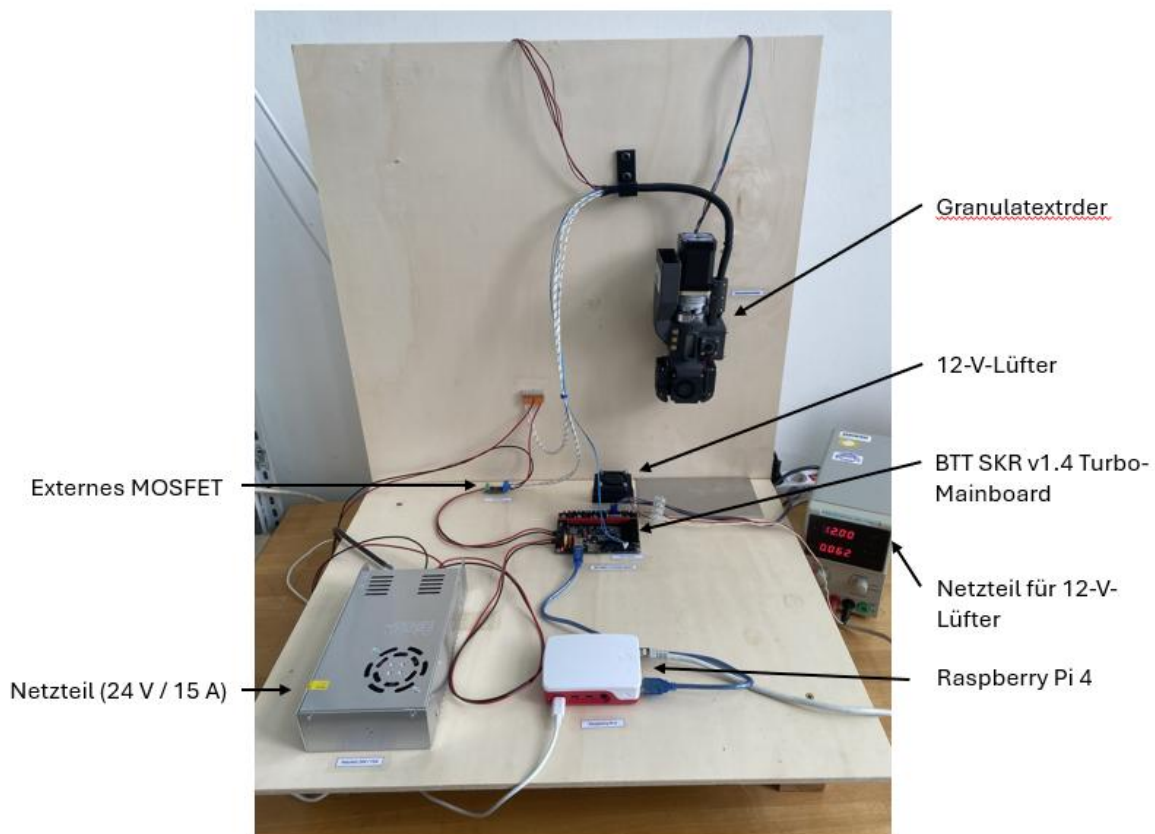


Abbildung 13: Finaler Versuchsaufbau des Demonstrators

Für die Anbindung des Granulatextruders an die senkrechte Holzplatte wurde eine Halterung konstruiert. Die Konstruktion erfolgte mittels der CAD-Software Autodesk Fusion auf Basis der importierten Datei im Format Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP) des Granulatextruders. Als Werkstoff wurde Acrylnitril-Styrol-Acrylester (ASA) gewählt, das gegenüber PLA eine höhere Wärmebeständigkeit aufweist. In einer ersten Ausführung wurde die Halterung einteilig und vollständig verschraubt konstruiert Abbildung 14.

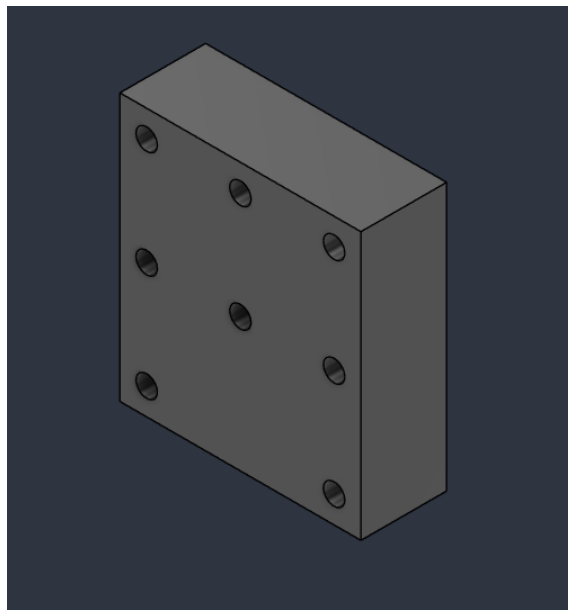


Abbildung 14: Halterung, erste Ausführung

Da zwischen den Versuchen eine Reinigung des Extruders von Materialrückständen erforderlich war, um vergleichbare Ausgangsbedingungen für jeden Versuch sicherzustellen, wurde eine überarbeitete, zweiteilige Ausführung konstruiert, die Steck- und Schraubverbindungen kombiniert und dadurch Montage und Demontage deutlich vereinfacht Abbildung 15.

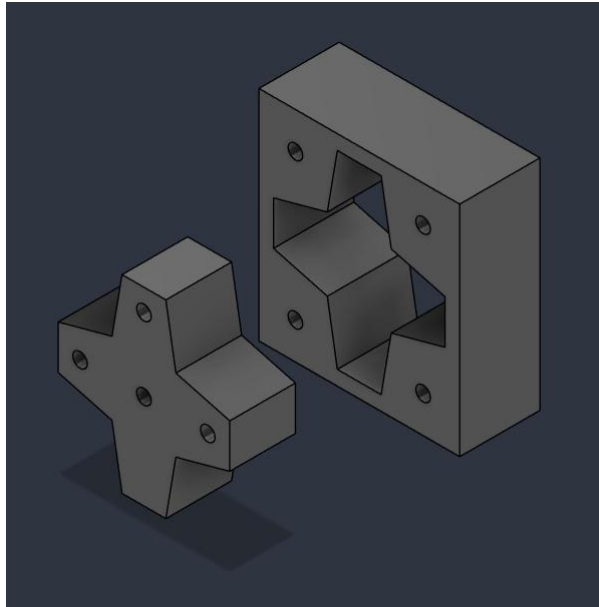


Abbildung 15: Halterung, zweite Ausführung

Zur Kühlung des TMC2209-Motortreibers auf dem Mainboard wurde ein 12-V-Lüfter mit konstruierter Halterung angebracht, der einen Luftstrom gezielt auf den Treiber lenkt und während des Betriebs dauerhaft läuft. Da das Mainboard die 24-V-Versorgungsspannung nicht auf die für den Lüfter erforderlichen 12 V reduzieren kann, wurde der Lüfter über ein separates, regelbares Netzteil versorgt, das auf den Nennbetriebspunkt des Lüfters (12 V, 0,06 A) eingestellt wurde. Dieser Lüfter ist von den in Kapitel 4.2.3 beschriebenen, dem Granulatextruder zugeordneten Lüftern unabhängig. Der Motorstrom des Schrittmotors wurde auf 1,4 A im aktiven und 0,6 A im passiven Zustand eingestellt, um ausreichend Abstand zur laut Hersteller maximal zulässigen Stromaufnahme von 2,1 A zu gewährleisten [Pri26].

Der Flansch zwischen Schrittmotor und Getriebe wurde aus dem Kunststoff PEEK mit geringer Wärmeleitfähigkeit gefertigt, um den Wärmeeintrag vom beheizten Extruder über die metallischen Bauteile des Antriebsstrangs in den Motorbereich zu reduzieren.

4.4 Elektronik

Abbildung 16 zeigt die Anschlussbelegung des verwendeten BTT SKR v1.4 Turbo-Mainboards.

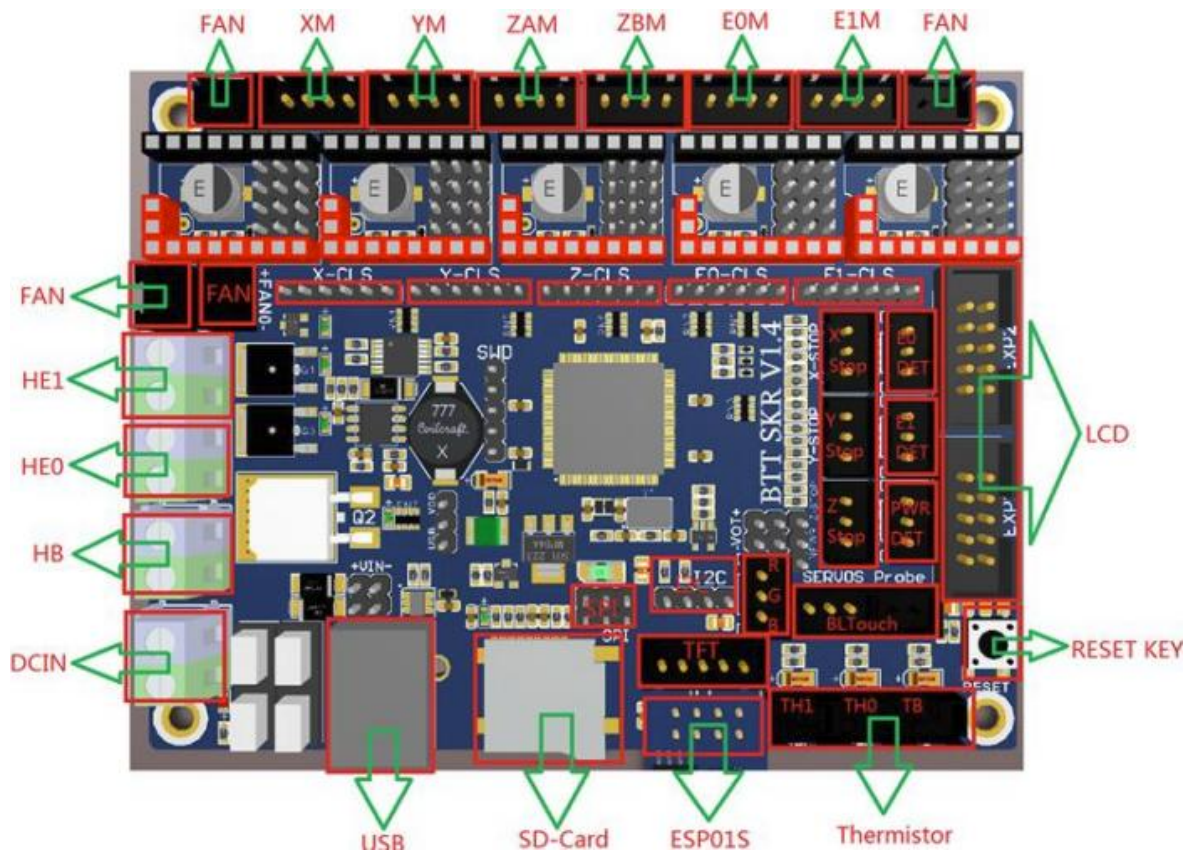


Abbildung 16: Pinbelegung BTT SKR v1.4 Turbo Board [Big26]

Der TMC2209-Motortreiber wurde auf dem für den Extruder vorgesehenen Steckplatz E0M des Mainboards montiert. Die werkseitig gesetzten Jumper (steckbare Kurzschlussbrücken zur Betriebsmoduswahl) wurden mit Ausnahme des für den UART-Betriebsmodus erforderlichen Jumpers entfernt. Die Anschlussbelegung des Schrittmotorsteckers musste angepasst werden, um eine korrekte Förderrichtung sicherzustellen: Dabei wurden die Adern Rot und Blau im Steckverbinder vertauscht, um sicherzustellen, dass sich die Förderschnecke bei Ausführung des Befehls Extrude tatsächlich in Förderrichtung dreht, anstatt in die entgegengesetzte, dem Befehl Retract entsprechende Richtung.

Die Ansteuerung der Heizpatronen erfolgt über das externe MOSFET-Modul. Das PWM-Signal sowie die Masseleitung des Heizungsausgangs HE0 am Mainboard

steuern dabei das MOSFET-Modul an, welches den Laststromkreis zwischen Netzteil und den beiden parallel verschalteten Heizpatronen schaltet. Die Anschlussklemmen des MOSFET-Moduls wurden entsprechend dem in Abbildung 17 dargestellten Herstellerschema manuell angelötet und anschließend verkabelt.



Abbildung 17: Anschlussschema externes MOSFET (eigene Darstellung nach [Pri26])

Da an der lastseitigen Anschlussklemme des MOSFET-Moduls mehr Leitungen zusammengeführt werden mussten als Klemmstellen vorhanden waren, wurden die Verbindungen über eine Verbindungsklemme gebündelt.

Am Mainboard wurden entsprechend die Steckplätze E0M für den Schrittmotor, HE0 für die Heizpatronen sowie TH0 für den Temperatursensor belegt. Die Spannungsversorgung des Mainboards erfolgt über den Anschluss DCIN direkt aus dem 24-V-Netzteil. Die Datenverbindung zum Raspberry Pi erfolgt über eine separate USB-Schnittstelle; der Raspberry Pi selbst wird über ein eigenständiges Netzteil mit Spannung versorgt. Der in Kapitel 4.3 beschriebene Lüfter zur Motortreiberkühlung ist an einem separaten Steckplatz angeschlossen, der in Abbildung 16: *Pinbelegung BTT SKR v1.4 Turbo Board* [Big26] mit FAN bezeichnet ist. Dieser befindet sich unmittelbar rechts neben E1M.

4.5 Inbetriebnahme

Nach Abschluss des mechanischen und elektrischen Aufbaus erfolgte die schrittweise Inbetriebnahme des Demonstrators. Beim erstmaligen Einschalten des Systems konnten zunächst die Grundfunktionen verifiziert werden: Das Mainboard sowie der Raspberry Pi zeigten reguläres Betriebsverhalten, die Mainsail-Benutzeroberfläche war erreichbar, und der Thermistor lieferte einen plausiblen Temperaturwert im Bereich der Raumtemperatur. Der Gehäuselüfter ließ sich über den Schieberegler in Mainsail stufenlos zwischen minimaler und maximaler Drehzahl regeln und funktionierte damit erwartungsgemäß.

Im nächsten Schritt wurde die Funktion der Heizpatronen überprüft, indem für den Extruder eine Zieltemperatur von 80 °C vorgegeben wurde. Die Temperatur stieg gleichmäßig an, wobei aufgrund der zunächst verwendeten einfachen Zweipunktregelung (Watermark-Modus) ein Überschwingen von rund 10 K über die Zieltemperatur beobachtet wurde, bevor sich ein zyklisches Auf- und Abheizen zwischen Ziel- und Überschwingtemperatur einstellte. Das sichtbare Takten des MOSFET-Moduls während der Temperaturregelung bestätigte dabei die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der PWM-Ansteuerung. Um das Regelverhalten zu verbessern, wurde über die Konsole der Benutzeroberfläche eine PID-Kalibrierung durchgeführt (*PID_CALIBRATE HEATER=extruder TARGET=80*). Die automatisch ermittelten Regelparameter ($K_p = 25,546$, $K_i = 0,968$, $K_d = 168,607$) wurden anschließend ebenfalls über die Konsole mittels *SAVE_CONFIG* in die Konfigurationsdatei übernommen. Nach Anwendung der PID-Regelung reduzierte sich das Überschwingen deutlich auf etwa 2,8 K über der Kalibriertemperatur, und die Temperatur konnte im eingeregelten Zustand mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 0,1$ °C gehalten werden.

Anschließend wurde die Funktionsfähigkeit des Extrudermotors überprüft. Nach Ergänzung der TMC2209-Konfiguration in der Konfigurationsdatei ließ sich der Schrittmotor erstmals kontrolliert in Rotation versetzen. Die Ansteuerungskette aus Mainboard, Motortreiber und Schrittmotor war damit funktionsfähig.

Zur Bestimmung der Motordrehzahl wurde zunächst die Bedeutung des Konfigurationsparameters *rotation_distance* überprüft, der die vom Extruder pro voller Motorumdrehung zurückgelegte Förderstrecke definiert. Zur Verifikation wurde die tatsächliche Motordrehzahl unabhängig durch manuelles Auszählen der

Umdrehungen der Förderschnecke über eine gestoppte Zeit bestimmt. Bei 5 vollen Umdrehungen innerhalb von 88 s ergibt sich eine Antriebsdrehzahl von $3,41 \frac{U}{min}$. Dieser Wert stimmt mit dem anhand der Konfiguration rechnerisch erwarteten Wert überein. Die Abtriebsdrehzahl nach dem Getriebe ergibt sich zu:

$$n_{Abtrieb} = \frac{n_{Antrieb}}{i} \quad (3)$$

Mit $n_{Antrieb} = 3,41 \frac{U}{min}$ und einer Getriebeübersetzung $i = 5,18$ ergibt sich für die verwendete Konfiguration (*rotation_distance* 17,60 mm) bei einer Extrusions-Feedrate von 1 mm/s eine Abtriebsdrehzahl von $n_{Abtrieb} = 0,6583 \frac{U}{min}$.

Während des Betriebs des Extrudermotors löste Klipper eine Warnmeldung aufgrund einer zu hohen Schrittmotortemperatur aus, woraufhin sich das System aus Sicherheitsgründen automatisch abschaltete. Ursache war die Wärmeleitung über den ursprünglich aus Aluminium gefertigten Flansch zwischen Motor und Getriebe. Als Abhilfe wurde der Flansch durch eine aus PEEK gefertigte Ausführung ersetzt (vgl. Kapitel 4.3). Die Wirksamkeit dieser Maßnahme wurde thermografisch überprüft, indem die Motortemperatur bei identischen Prozessbedingungen (Raumtemperatur 23,6 °C, Vorheizen und Halten der Zieltemperatur von 120 °C über 20 Minuten) für beide Flanschvarianten erfasst wurde. Die Kalibrierung des automatischen Messbereichs der Thermalkamera unterschied sich zwischen beiden Messungen trotz gleicher Rahmenbedingungen, wodurch die Absolutwerte nur eingeschränkt vergleichbar sind. Zur zusätzlichen Einordnung wurde die Bauteiltemperatur bei beiden Flanschvarianten jeweils zu Beginn und nach Ende der Messung manuell ertastet. Dabei bestätigte sich ein deutlich stärkerer Temperaturanstieg bei der Aluminium-Ausführung. Auch die Falschfarbendarstellung der Thermografieaufnahmen zeigt diesen Unterschied: Während sich bei der Aluminium-Ausführung (Abbildung 18) der gesamte Motorkörper sichtbar durchwärmt, bildet der PEEK-Flansch (Abbildung 19) eine klar erkennbare thermische Trennung zwischen Extruder und Motor, sodass nur ein geringer Wärmeeintrag in den Motor erkennbar ist. Die vollständigen Messwerte sind in Anlage 4 dokumentiert.

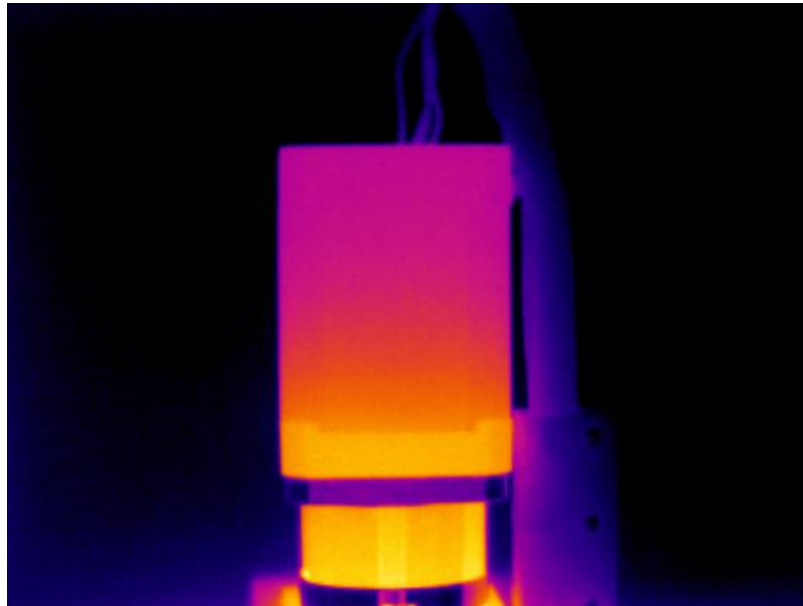


Abbildung 18: Thermografische Aufnahme des Motors mit Aluminium-Flansch nach 20 Minuten

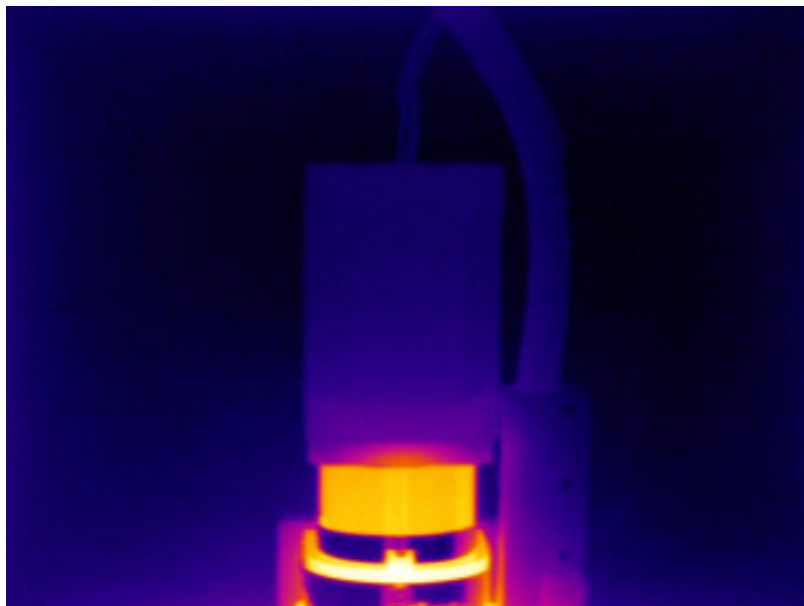


Abbildung 19: Thermografische Aufnahme des Motors mit PEEK-Flansch nach 20 Minuten

Die minimale Extrusionstemperatur (*min_extrude_temp*) wurde auf 15 °C abgesenkt, um Testbewegungen des Extrudermotors auch bei niedrigeren Temperaturen ohne aufgeschmolzenes Material zu ermöglichen.

Zur Durchführung erster Extrusionsversuche wurde das System anschließend probeweise mit Ultimaker-PVA-Filament betrieben, das zunächst mechanisch zu Granulat zerkleinert und zur Reduktion der Materialfeuchte mehrere Stunden bei 55 °C im Ofen getrocknet wurde. Nach Anpassung von Hotend-Temperatur und Fördergeschwindigkeit konnte am Demonstrator eine erste erfolgreiche Extrusion mit PVA-Granulat erzielt werden. Damit wurde die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems nachgewiesen, bestehend aus mechanischem Aufbau, Elektronik und Firmware-Konfiguration.

Im weiteren Verlauf der Inbetriebnahme wurde die Konfiguration des Systems dahingehend angepasst, dass die Standby-Zeit (*idle_timeout*) auf 3600 Sekunden erhöht wurde, um ein vorzeitiges Abschalten bei länger andauerndem Halten einer konstanten Prozesstemperatur zu vermeiden.

5 Druckversuche und Prozessparameteranalyse

5.1 Parametervariation

Das Extrusionsverhalten des Materials wird durch die Wechselwirkung mehrerer Prozessparameter bestimmt, darunter die Extrusionstemperatur, die Schneckendrehzahl sowie die zugeführte Materialmenge. Um den isolierten Einfluss der Extrusionstemperatur auf die Verarbeitbarkeit des Materials zu untersuchen, wurde für die vorliegenden Versuche ausschließlich dieser Parameter variiert. Die Schneckendrehzahl wurde dabei über alle Versuche konstant gehalten, und es wurde durchgehend für eine kontinuierliche Materialzufuhr gesorgt. Auf diese Weise lassen sich beobachtete Effekte eindeutig der untersuchten Prozessgröße zuordnen, ohne dass eine gleichzeitige Änderung mehrerer Parameter die Ergebnisse überlagert.

Im Vergleich zu gängigen Materialien der Materialeextrusion wie PLA- oder PVA-Granulat weist EPOXIDUR EP Purge im verarbeitbaren Temperaturbereich eine deutlich höhere Zähflüssigkeit auf. Aus diesem Grund wurde die standardmäßige Düse mit einem Durchmesser von 0,6 mm auf 2 mm erweitert, um eine Extrusion des Materials mit der verfügbaren Anlage überhaupt zu ermöglichen.

Für die Untersuchung des Einflusses der Extrusionstemperatur auf die Verarbeitbarkeit des EPOXIDUR EP Purge-Granulats wurden Extrusionsversuche bei den Temperaturstufen 80 °C, 90 °C, 100 °C und 120 °C durchgeführt.

Bei einer Hotend-Temperatur von 80 °C konnte keine erfolgreiche Extrusion erreicht werden. Während des Versuchs kam es zu einem hörbaren Blockieren des Schrittmotors, woraufhin der Versuch abgebrochen wurde. Als Ursache wird vermutet, dass das Material bei dieser Temperatur noch nicht ausreichend erweicht war und das verfügbare Motordrehmoment nicht genügte, um das Material durch die Förderschnecke zu transportieren. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass die praktische untere Grenze der Extrudierbarkeit oberhalb der in Kapitel 3.1.2 bestimmten Glasübergangstemperatur liegt. Neben der thermischen Erweichung stellt demnach auch das verfügbare Motordrehmoment eine limitierende Größe dar, die im theoretisch abgeleiteten Verarbeitungsfenster aus Kapitel 3.3 bislang nicht berücksichtigt wurde.

Bei 90 °C, 100 °C und 120 °C gelang jeweils eine erfolgreiche Extrusion. Mit steigender Temperatur zeigte sich eine zunehmende Dunkelfärbung des extrudierten Materials, was auf einen fortschreitenden Vernetzungsgrad hindeutet. Bei 120 °C fiel diese Verfärbung am stärksten aus und ging mit einer deutlichen Teilvernetzung des Materials einher. Dieser Befund bestätigt die in Kapitel 2.2.2 beschriebene Bedeutung der Scherwärme im Schneckenkanal. Obwohl 120 °C innerhalb des in Kapitel 3.3 abgeleiteten theoretischen Verarbeitungsfensters liegt, führt die zusätzliche, durch Scherung im Schneckenkanal eingebrachte Wärme offenbar zu einer lokal höheren Materialtemperatur als der eingestellten Hotend-Temperatur. Dadurch setzt die Vernetzungsreaktion bereits im Extruder ein. Bei 100 °C war eine leichte, bei 90 °C keine sichtbare Teilvernetzung erkennbar. Auf Basis dieser Ergebnisse wird 90 °C als geeignetste Verarbeitungstemperatur für die weitere Prozessführung identifiziert, da hier eine stabile Extrusion ohne erkennbare vorzeitige Vernetzung erzielt wurde.

5.2 Prozessstabilität und Extrusionsverhalten

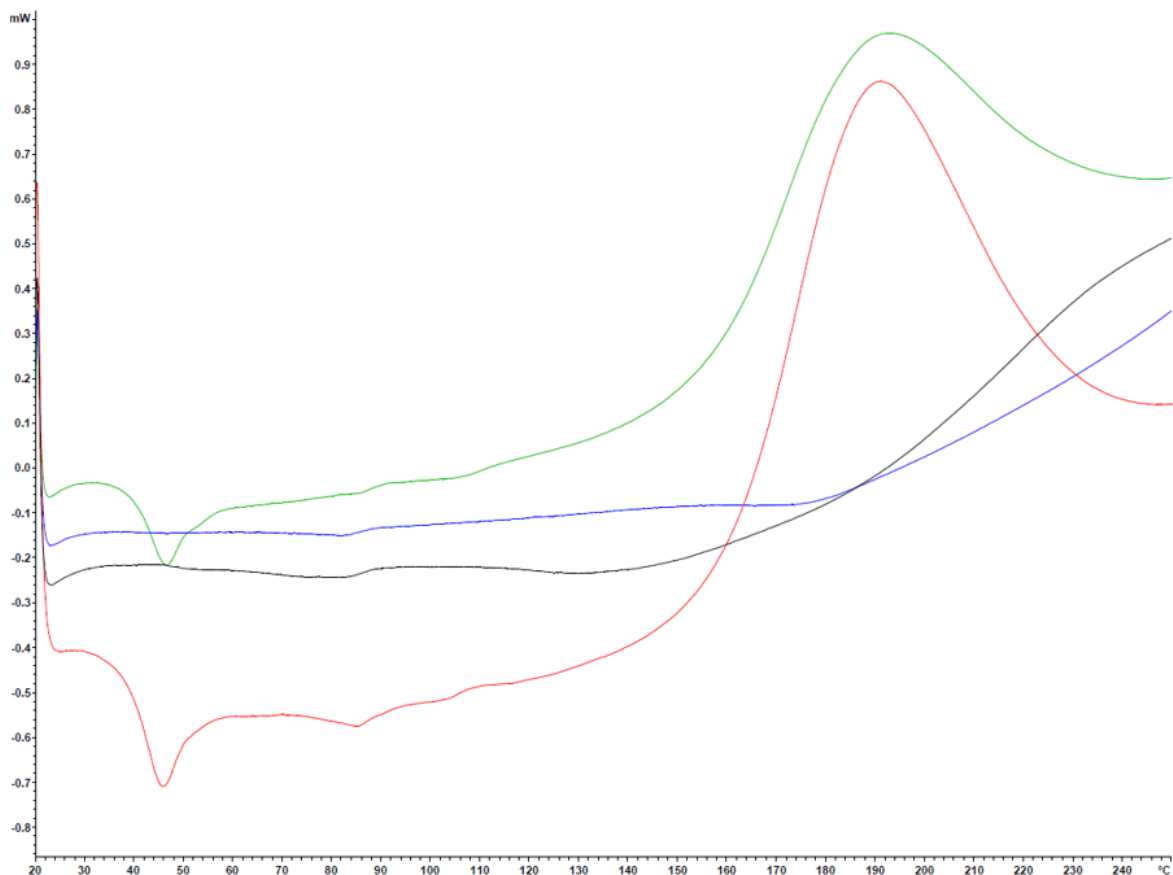
Der extrudierte Materialstrang war bei allen erfolgreichen Versuchen (90 °C, 100 °C, 120 °C) optisch gleichmäßig, ohne erkennbare Durchmesser-schwankungen oder Abrisse.

Bei den Versuchen bei 90 °C, 100 °C und 120 °C wurde beobachtet, dass Granulat an der Zylinderinnenwand im Bereich konstanten Zylinderdurchmessers (Einzugszone) anhaftete. Der Granulatruder besteht mit Ausnahme der äußeren Kunststoffhülle durchgängig aus metallischen Bauteilen, wodurch sich Wärme über die Betriebsdauer entlang des gesamten Zylinders ausbreiten kann (vgl. Kapitel 4.5). Eine deutliche Erwärmung der Zylinderaußenwand in diesem Bereich wurde manuell festgestellt. Dies erklärt vermutlich das beobachtete Erweichen und Anhaften des dort anliegenden Materials, während das im Zentrum von der Schnecke geförderte Material nicht in demselben Maß betroffen ist.

Eine quantitative Bestimmung des Massendurchsatzes wurde versuchsweise durchgeführt, lässt sich aufgrund der manuellen Materialzufuhr jedoch nicht eindeutig auf einzelne Einflussgrößen zurückführen. Für belastbare Durchsatzmessungen ist daher eine automatisierte, kontinuierliche Materialzufuhr erforderlich.

5.3 Nachhärtung und Härungsgradbestimmung

Zur weiteren Absicherung der in Kapitel 5.1 beobachteten temperaturabhängigen Vernetzung wurden vier Proben mittels DSC verglichen: unvernetztes Ausgangsgranulat bei Raumtemperatur, teilvernetztes Material nach Extrusion bei 100 °C sowie zwei auf Basis des 100-°C-Strangs bei 145 °C beziehungsweise 170 °C nachgehärtete Proben. Abbildung 20 zeigt die resultierenden DSC-Kurven im Vergleich. Dabei stellt die grüne Kurve die teilvernetzte Probe (100 °C), die blaue Kurve die vernetzte Probe (170 °C), die schwarze Kurve die vernetzte Probe (145 °C) und die rote Kurve die unvernetzte Probe (Raumtemperatur) dar.



*Abbildung 20: Vergleich der DSC-Kurven von unvernetztem Granulat, teilvernetztem Strang (100 °C) sowie nachgehärteten Proben (145 °C, 170 °C)
(eigene Darstellung nach Anlage 5)*

Alle vier Proben weisen im Temperaturbereich von etwa 40 bis 60 °C einen endothermen Effekt auf, der bei der unvernetzten und der bei 100 °C teilvernetzten Probe deutlich stärker ausgeprägt ist als bei den beiden nachgehärteten Proben.

Dieser Effekt lässt sich als Glasübergang beziehungsweise als physikalische Umlagerung des noch nicht vollständig vernetzten Materials interpretieren. Da die bei 145 °C und 170 °C nachgehärteten Proben diesen Übergang bereits während der Vorbehandlung durchlaufen haben, tritt er beim erneuten Aufheizen nicht mehr in vergleichbarer Ausprägung auf.

Die einsetzende exotherme Vernetzungsreaktion ist bei den vier Proben ab etwa 160 °C erkennbar, ihre weitere Ausprägung fällt jedoch deutlich unterschiedlich aus. Dieser Onset-Bereich liegt konsistent zu der in Kapitel 3.1.2 beschriebenen, deutlich oberhalb von 100 °C einsetzenden exothermen Aktivität des unvernetzten Ausgangsmaterials. Die unvernetzte Probe weist den größten und ausgeprägtesten Peak auf, gefolgt von der bei 100 °C teilvernetzten Probe. Dies deutet auf einen bei dieser Temperatur bereits fortgeschrittenen, jedoch noch nicht abgeschlossenen Vernetzungsgrad hin. Bei den bereits bei 145 °C beziehungsweise 170 °C nachgehärteten Proben fällt der exotherme Peak dagegen deutlich schwächer aus. Er setzt später ein und ist bis zum Ende des Messbereichs nicht vollständig abgeschlossen. Dies spricht dafür, dass durch die Nachhärtung bereits ein Großteil der Vernetzungsreaktion abgeschlossen wurde und nur noch ein geringer Anteil schwerer zugänglicher funktioneller Gruppen reagiert. Der langsam ansteigende Kurvenverlauf setzt bei der bei 145 °C nachgehärteten Probe früher ein als bei der bei 170 °C nachgehärteten Probe, was konsistent mit der jeweiligen Vorbehandlungstemperatur ist. Ein Masseverlust der Proben während der Messung wurde nicht festgestellt, sodass eine thermische Zersetzung als Ursache des langsam ansteigenden Kurvenverlaufs ausgeschlossen werden kann.

Da für die vier Proben keine quantitativen Integrationswerte vorliegen, kann der Härtegrad α an dieser Stelle nicht nach Formel (2) berechnet werden. Die qualitative Auswertung der Kurvenverläufe bestätigt jedoch den mit steigender Extrusions- beziehungsweise Nachhärtungstemperatur zunehmenden Vernetzungsgrad, der auch durch die in Kapitel 5.1 beschriebene visuelle Dunkelfärbung der extrudierten Stränge gestützt wird.

6 Auswertung

6.1 Validierung des Verarbeitungsfensters

Das in Kapitel 3.3 auf Basis der DSC- und Rheologiemessungen abgeleitete Verarbeitungsfenster sah eine maximale Extrusionstemperatur $T_{ext,max}$ von rund 130 °C vor, bei einem Sicherheitsabstand von etwa 25 bis 30 K zum rheologisch bestimmten Anstiegsbeginn der Vernetzungsreaktion ($TG'_{onset} \approx 155$ bis 160 °C). Die untere Grenze wurde durch die Glasübergangstemperatur ($T_g \approx 43$ bis 49 °C) definiert.

Die Extrusionsversuche aus Kapitel 5.1 zeigen, dass sich dieses theoretisch abgeleitete Fenster in zwei Punkten nicht vollständig bestätigt hat.

Zum einen liegt die praktische untere Grenze der Extrudierbarkeit deutlich oberhalb der Glasübergangstemperatur. Bei 80 °C, einer Temperatur innerhalb des theoretisch abgeleiteten Fensters, konnte keine Extrusion erzielt werden, da das verfügbare Motordrehmoment nicht ausreichte, um das noch nicht ausreichend erweichte Material zu fördern. Das rein thermisch begründete Modell aus Kapitel 3.3 berücksichtigt diesen mechanischen Grenzfaktor nicht. Die in Kapitel 3.2.2 gemessenen G' -Werte von rund 10^5 Pa im Bereich zwischen 100 °C und 150 °C deuten darauf hin, dass das Material auch deutlich oberhalb von T_g noch eine erhebliche Steifigkeit aufweist, die bei 80 °C offenbar zu hoch für die verfügbare Antriebsleistung war.

Zum anderen liegt die praktische obere Grenze spürbar unterhalb der theoretisch abgeleiteten 130 °C. Bereits bei 120 °C, also 10 K unterhalb von $T_{ext,max}$, trat eine deutliche Teilvernetzung des Materials auf, die durch die DSC-Vergleichsmessungen aus Kapitel 5.3 bestätigt wurde. Als plausible Ursache kommt der in Kapitel 2.2.2 beschriebene Einfluss der Scherwärme im Schneckenkanal infrage: Die lokale Materialtemperatur im Bereich der Austragszone kann demnach höher liegen als die am Heizblock eingestellte Temperatur, wodurch die Vernetzungsreaktion früher einsetzt, als es die rein thermische Charakterisierung erwarten lässt. Der in Kapitel 3.3 gewählte Sicherheitsabstand von 25 bis 30 K erweist sich damit als nicht ausreichend groß.

In der Summe konnte mit 90 °C eine Verarbeitungstemperatur identifiziert werden, bei der eine stabile Extrusion ohne erkennbare vorzeitige Vernetzung möglich war.

Diese liegt damit etwa 40 K unterhalb der theoretisch abgeleiteten maximalen Extrusionstemperatur. Die grundsätzliche Existenz eines Verarbeitungsfensters wird durch die Versuchsergebnisse bestätigt, seine konkrete Lage und Breite lässt sich jedoch allein auf Basis von DSC- und Rheologiedaten ohne Berücksichtigung von Scherwärme- und Antriebsgrenzen nicht hinreichend genau vorhersagen.

6.2 Vergleich der Ergebnisse mit konventionellen Thermoplast-Filamenten

Der in Kapitel 2.3.5 dargestellte werkstoffliche Vergleich zwischen ausgehärteten Epoxidharzsystemen und konventionellen FFF-Thermoplasten lässt sich anhand der eigenen Ergebnisse teilweise einordnen.

Hinsichtlich der thermischen Beständigkeit bestätigt sich der erwartete Vorteil des reaktiven Systems: Während PLA und ABS eine Wärmeformbeständigkeit von lediglich 50 °C beziehungsweise 90 °C aufweisen [For26], belegen die DSC-Messungen aus Kapitel 5.3, dass das EPOXIDUR EP Purge-Granulat auch bei Nachhärtungstemperaturen von 145 °C beziehungsweise 170 °C stabil bleibt und dabei zunehmend vernetzt, ohne Anzeichen thermischer Zersetzung. Für ein vollständig ausgehärtetes Bauteil aus diesem System ist damit der in Kapitel 2.3.5 beschriebene Temperaturvorteil gegenüber PLA und ABS zu erwarten, auch wenn eine direkte Messung der Wärmeformbeständigkeit gedruckter Bauteile im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgte.

Diesem Vorteil steht ein deutlich engeres und empfindlicheres Verarbeitungsfenster gegenüber. Konventionelle FFF-Filamente lassen sich über einen vergleichsweise breiten Temperaturbereich prozessstabil verarbeiten. Für das reaktive Halbzeug erwies sich dagegen nur ein schmales Temperaturfenster von etwa 90 °C als geeignet. Eine Abweichung von 30 K nach oben (120 °C) führte bereits zu einer erkennbaren Teilvernetzung. Eine Abweichung von 10 K nach unten (80 °C) führte zu einem vollständigen Prozessversagen.

Diese enge Grenze gilt zunächst nur für den in dieser Arbeit verwendeten Versuchsaufbau und das eingesetzte Material. Sie ist unter anderem durch das verfügbare Motordrehmoment und die einzonige, nicht separat regelbare Beheizung des Granulatretruders bedingt. Bei einem anderen reaktiven Halbzeug, einem Antrieb mit höherem Drehmoment oder einer Schnecke mit mehreren, unabhängig voneinander temperierbaren Zonen könnte sich ein breiteres Verarbeitungsfenster ergeben. Eine Verallgemeinerung der gefundenen 90 °C auf andere reaktive Halbzeuge ist auf Basis der vorliegenden Ergebnisse daher nicht zulässig. Konventionelle Thermoplaste weisen demgegenüber keine vergleichbare Empfindlichkeit gegenüber der Extrusionstemperatur auf, da bei ihnen keine irreversible chemische Reaktion während der Verarbeitung stattfindet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in Kapitel 2.3.5 literaturbasiert dargestellten Werkstoffvorteile reaktiver Epoxidharzsysteme mit einem erheblich höheren Aufwand hinsichtlich der Prozessführung und -kontrolle einhergehen als bei konventionellen FFF-Thermoplasten.

6.3 Potenziale reaktiver Halbzeuge für industrielle Anwendungen

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass sich latent reaktive Epoxidharzsysteme grundsätzlich mittels Granulatrextrusion verarbeiten lassen. Damit wird die in Kapitel 2.5 identifizierte Forschungslücke, die Kombination aus Granulatrextrusion und latent reaktiven Epoxidharzsystemen, exemplarisch geschlossen. Der prinzipielle Machbarkeitsnachweis eröffnet Perspektiven für den industriellen Einsatz reaktiver Halbzeuge in der additiven Fertigung, die im Folgenden eingeordnet werden.

Die in Kapitel 6.2 herausgearbeiteten Vorteile hinsichtlich thermischer Beständigkeit sind insbesondere für Anwendungen relevant, in denen thermoplastische FFF-Bauteile bislang an ihre Grenzen stoßen. Dazu zählen etwa thermisch beanspruchte Funktionsbauteile im Automobil- und Luftfahrtbereich sowie individualisierte Werkzeuge und Vorrichtungen, für die üblicherweise auf konventionelle, weniger flexible Fertigungsverfahren wie den Spritzguss zurückgegriffen wird. Die additive Fertigung böte hier den in Kapitel 2.1 beschriebenen Vorteil der geometrischen Freiheit und der werkzeuglosen Fertigung kleiner Stückzahlen, kombiniert mit den mechanischen und thermischen Eigenschaften duromerer Werkstoffe.

Der industriellen Relevanz dieses Ansatzes steht jedoch das in Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2 herausgearbeitete enge und empfindliche Verarbeitungsfenster gegenüber. Für einen reproduzierbaren industriellen Einsatz ist eine Weiterentwicklung des Anlagenkonzepts erforderlich. Denkbare Ansätze sind eine mehrzonige, unabhängig regelbare Beheizung des Granulatrextruders zur gezielten Steuerung der Scherwärmeentwicklung, ein Antrieb mit höherem Drehmoment zur Erweiterung des nutzbaren Temperaturbereichs nach unten sowie eine inline-fähige Prozessüberwachung, die eine beginnende Vernetzung während der Extrusion frühzeitig erkennen kann.

Dass ein industrielles Interesse an dieser Technologiekombination besteht, zeigt auch das in Kapitel 2.4 vorgestellte Forschungsprojekt „Reactive Printing“ des Kunststoff-Zentrums SKZ, das mit vergleichbarer Zielstellung an latent reaktiven Epoxidharz-Filamenten für den FFF-Prozess arbeitet [SKZ25]. Vor dem Hintergrund des in der Einleitung dargestellten Marktwachstums der additiven Fertigung von durchschnittlich 14 % pro Jahr [Mun26] erscheint die Erschließung reaktiver Halbzeuge als ein Ansatz mit erheblichem industriellem Potenzial, dessen breite

Anwendbarkeit jedoch von der erfolgreichen Weiterentwicklung geeigneter Anlagentechnik abhängt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung und Inbetriebnahme eines extrusionsbasierten 3D-Drucksystems auf Basis eines Granulatruders zur Verarbeitung latent reaktiver Epoxidharzsysteme im MEX-Verfahren. Dazu wurde ein eigenständiger Demonstrator aus Granulatruder, Steuerungselektronik und Klipper-basierter Firmware aufgebaut und in Betrieb genommen. Ergänzend wurde die Reaktionskinetik des eingesetzten EPOXIDUR EP Purge-Granulats mittels DSC und Rheologie charakterisiert und daraus ein theoretisches Verarbeitungsfenster abgeleitet, das durch den Glasübergang (T_g etwa 43 bis 49 °C) nach unten und den rheologisch bestimmten Anstiegsbeginn der Vernetzungsreaktion ($TG'_{onset} \approx 155$ bis 160 °C) nach oben begrenzt wurde. Auf dieser Grundlage wurde zunächst eine maximale Extrusionstemperatur von rund 130 °C als geeignet erachtet.

Die anschließenden Extrusionsversuche bei 80 °C, 90 °C, 100 °C und 120 °C dienten der schrittweisen Eingrenzung dieses theoretischen Fensters unter realen Prozessbedingungen. Die Temperaturstufen wurden dabei sowohl im Bereich nahe der unteren, durch den Glasübergang definierten Grenze als auch im Bereich unterhalb der theoretisch abgeleiteten oberen Grenze von 130 °C gewählt, um beide Ränder des Fensters praktisch zu prüfen. Bei 120 °C zeigte sich bereits eine deutliche Teilvernetzung des Materials, vermutlich verursacht durch zusätzliche Scherwärme im Schneckenkanal. Bei 80 °C konnte aufgrund unzureichender Materialerweichung keine Extrusion erzielt werden. Als praktisch geeignete Verarbeitungstemperatur wurde 90 °C identifiziert, bei der eine stabile Extrusion ohne erkennbare vorzeitige Vernetzung möglich war. Damit wird deutlich, dass das theoretisch abgeleitete Verarbeitungsfenster die tatsächlichen Prozessgrenzen nur eingeschränkt abbildet, da es weder den Einfluss der Scherwärme noch die Grenzen des verfügbaren Motordrehmoments berücksichtigt. Die grundsätzliche Machbarkeit der extrusionsbasierten Verarbeitung eines latent reaktiven Epoxidharzsystems im MEX-Verfahren konnte im Rahmen dieser Arbeit dennoch nachgewiesen werden.

Da für die Kombination aus Granulatrusion und latent reaktiven Epoxidharzsystemen keine etablierten Prozessparameter vorlagen, mussten diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstmals systematisch erarbeitet werden,

einschließlich mehrerer konstruktiver Anpassungen des Demonstrators. Diese Anpassung von Anlage und Prozessparametern an das eingesetzte Materialsystem nahm einen größeren zeitlichen Umfang in Anspruch als ursprünglich vorgesehen. Die Schwerpunktsetzung der Arbeit lag damit auf dem Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit und der Eingrenzung eines geeigneten Verarbeitungsfensters, als notwendiger Voraussetzung für jede nachfolgende Bauteilfertigung. Die in der Aufgabenstellung vorgesehene Untersuchung der Bauteileigenschaften baut auf diesen Ergebnissen unmittelbar auf und stellt den folgerichtigen nächsten Schritt dar. Aufgrund des höheren als ursprünglich veranschlagten zeitlichen Aufwands für die Prozessanpassung konnte dieser Schritt im Rahmen des vorgegebenen Bearbeitungszeitraums dieser Arbeit nicht mehr abgedeckt werden.

Der Vergleich mit konventionellen thermoplastischen FFF-Filamenten zeigt ein differenziertes Bild. Die DSC-Messungen bestätigen die erwartete thermische Beständigkeit des ausgehärteten Epoxidharzsystems deutlich oberhalb der Wärmeformbeständigkeit von PLA und ABS. Diesem Vorteil steht jedoch ein erheblich engeres und empfindlicheres Verarbeitungsfenster gegenüber: Bereits eine Temperaturabweichung von 30 K führt zu Teilvernetzung, eine Abweichung von 10 K nach unten zu vollständigem Prozessversagen. Reaktive Epoxidharzsysteme erfordern damit einen deutlich höheren Aufwand in der Prozessführung als konventionelle Thermoplaste. Für die industrielle Anwendung ergibt sich daraus dennoch ein erhebliches Potenzial, insbesondere für thermisch beanspruchte Funktionsbauteile, die mit konventionellen FFF-Thermoplasten bislang nicht realisierbar sind.

Für nachfolgende Arbeiten ergeben sich daraus mehrere Ansatzpunkte. Vorrangig sollte die mechanische und thermische Charakterisierung gedruckter Bauteile aus dem identifizierten Prozessfenster erfolgen, um die in Kapitel 6.2 literaturbasiert dargestellten Werkstoffvorteile empirisch zu bestätigen. Zur Erweiterung des nutzbaren Verarbeitungsfensters bietet sich eine mehrzonige, unabhängig regelbare Beheizung des Granulatrextruders an, mit der sich der Einfluss der Scherwärme gezielter steuern ließe. Zusätzlich könnte ein Antrieb mit höherem Drehmoment die praktische untere Grenze der Extrudierbarkeit weiter absenken. Perspektivisch könnte eine inline-fähige Prozessüberwachung, die eine beginnende

Vernetzung während der Extrusion frühzeitig erkennt, zur Prozesssicherheit einer späteren industriellen Anwendung beitragen.

Literaturverzeichnis

- [Alt22] Altıparmak, Sadettin Cem/Yardley, Victoria A./Shi, Zhusheng/Lin, Jianguo. Extrusion-based additive manufacturing technologies: State of the art and future perspectives. *Journal of Manufacturing Processes*. Bd. 83, 2022, S. 607–636. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.09.032
- [Ark26] Arksine. Moonraker - API Web Server for klipper, 2026. Online verfügbar unter <https://github.com/Arksine/moonraker> (abgerufen am 14.07.2026)
- [Bae22] Baechle-Clayton, Maggie/Loos, Elizabeth/Taheri, Mohammad/Taheri, Hossein. Failures and Flaws in Fused Deposition Modeling (FDM) Additively Manufactured Polymers and Composites. *Journal of Composites Science*. Bd. 6, 2022, Nr. 7, S. 202. DOI: 10.3390/jcs6070202
- [Bou17] Bourell, David/Kruth, Jean Pierre/Leu, Ming/Levy, Gideon/Rosen, David/Beese, Allison M./Clare, Adam. Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*. Bd. 66, 2017, Nr. 2, S. 659–681. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.009
- [Bre18] Brenken, Bastian/Barocio, Eduardo/Favaloro, Anthony/Kunc, Vlastimil/Pipes, R. Byron. Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review. *Additive Manufacturing*. Bd. 21, 2018, S. 1–16. DOI: 10.1016/j.addma.2018.01.002
- [Cañ10] Cañamero-Martínez, Pedro/Fernández-García, Marta/La Fuente, José Luis de. Rheological cure characterization of a polyfunctional epoxy acrylic resin. *Reactive and Functional Polymers*. Bd. 70, 2010, Nr. 10, S. 761–766. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2010.07.010
- [Can21] Cano-Vicent, Alba/Tambuwala, Murtaza M./Hassan, Sk. Sarif/Barh, Debmalya/Aljabali, Alaa A.A./Birkett, Martin/Arjunan, Arun/Serrano-Aroca, Ángel. Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects. *Additive Manufacturing*. Bd. 47, 2021, S. 102378. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102378
- [Cap20] Capricho, Jaworski C./Fox, Bronwyn/Hameed, Nishar. Multifunctionality in Epoxy Resins. *Polymer Reviews*. Bd. 60, 2020, Nr. 1, S. 1–41. DOI: 10.1080/15583724.2019.1650063

-
- [Che20] Chen, Jie/Chu, Na/Zhao, Miao/Jin, Fan-Long/Park, Soo-Jin. Synthesis and application of thermal latent initiators of epoxy resins: A review. *Journal of Applied Polymer Science*. Bd. 137, 2020, Nr. 48. DOI: 10.1002/app.49592
- [Cza22] Czasny, Mathias. Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Verbundwerkstoffen. Von der Faser-Matrix-Auswahl über die Druckkopfentwicklung bis zum Faserverbund. Berlin. Bd. 8, 2022. Online verfügbar unter <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/60116> (abgerufen am 16.06.2026). DOI: 10.14279/depositonce-15771
- [DIN22] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie. (ISO/ASTM 52900:2021); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52900:2021. Berlin. Bd. 01.040.25; 25.030, 2022, Nr. DIN EN ISO/ASTM 52900. (abgerufen am 16.07.2026)
- [Fag22] Fagnani, Elena. Extrusion-based Additive Manufacturing of thermoset fiber-reinforced polymer composites: materials, technologies and applications. Mailand, 2022. Online verfügbar unter <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/198555> (abgerufen am 27.05.2026)
- [For26] Formlabs. Leitfaden zu hitzebeständigen Materialien für den 3D-Druck: Prozesse, Materialien und Anwendungen im Vergleich, 2026. Online verfügbar unter <https://formlabs.com/de/blog/heat-resistant-3d-printing/> (abgerufen am 14.07.2026)
- [Gao21] Gao, Xia/Qi, Shunxin/Kuang, Xiao/Su, Yunlan/Li, Jing/Wang, Dujin. Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond. *Additive Manufacturing*. Bd. 37, 2021, S. 101658. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101658
- [Ger19] Gerami, Gholamreza/Bagheri, Rouhollah/Darvishi, Reza. Investigation of isothermal and dynamic cure kinetics of epoxy resin/nadic methyl anhydride/dicyandiamide by differential scanning calorimetry (DSC). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Bd. 137, 2019, Nr. 2, S. 575–582. DOI: 10.1007/s10973-018-7961-9
- [Goh24] Goh, Guo Dong/Wong, Kin Keong/Tan, Nigel/Seet, Hang Li/Nai, Mui Ling Sharon. Large-format additive manufacturing of polymers: a review of

-
- fabrication processes, materials, and design. Virtual and Physical Prototyping, 2024, Nr. Volume 19. DOI: 10.1080/17452759.2024.2336160
- [Ift23] Iftekar, Syed Fouzan/Aabid, Abdul/Amir, Adibah/Baig, Muneer. Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review. Polymers. Bd. 15, 2023, Nr. 11. DOI: 10.3390/polym15112519
- [Isl24] Islam, Md Zahirul/Rahman, Md Atikur/Gibbon, Luke/Hall, Eric/Ulven, Chad A./La Scala, John J. Mechanical Characterization and Production of Various Shapes Using Continuous Carbon Fiber-Reinforced Thermoset Resin-Based 3D Printing. Polymers. Bd. 16, 2024, Nr. 13, S. 1828. Online verfügbar unter <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/13/1828>. DOI: 10.3390/polym16131828
- [Jav16] Javdanitehran, Mehdi/Berg, David Christian/Duemichen, Erik/Ziegmann, Gerhard. An iterative approach for isothermal curing kinetics modelling of an epoxy resin system. Thermochimica Acta. Bd. 623, 2016, S. 72–79. DOI: 10.1016/j.tca.2015.11.014
- [Jia20] Jiang, Zhen/Diggle, Broden/Tan, Ming Li/Viktorova, Jekaterina/Bennett, Christopher W./Connal, Luke A. Extrusion 3D Printing of Polymeric Materials with Advanced Properties. Advanced science (Weinheim, Baden-Württemberg, Germany). Bd. 7, 2020, Nr. 17, S. 2001379. DOI: 10.1002/advs.202001379
- [Jim19] Jiménez, Mariano/Romero, Luis/Domínguez, Iris A./Del Espinosa, María Mar/Domínguez, Manuel. Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. Complexity. Bd. 2019, 2019, Nr. 1. DOI: 10.1155/2019/9656938
- [Jin15] Jin, Fan-Long/Li, Xiang/Park, Soo-Jin. Synthesis and application of epoxy resins: A review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. Bd. 29, 2015, S. 1–11. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.03.026
- [Kli26a] Klipper3d. Klipper documentation. Installation, 2026. Online verfügbar unter <https://www.klipper3d.org/Installation.html> (abgerufen am 14.07.2026)
- [Kli26b] Klipper3d. Klipper documentation. Features, 2026. Online verfügbar unter <https://www.klipper3d.org/Features.html> (abgerufen am 29.07.2026)
- [Las19] Lascano, Diego/Quiles-Carrillo, Luis/Balart, Rafael/Boronat, Teodomiro/Montanes, Nestor. Kinetic Analysis of the Curing of a Partially
-

Biobased Epoxy Resin Using Dynamic Differential Scanning Calorimetry. Polymers. Bd. 11, 2019, Nr. 3. DOI: 10.3390/polym11030391

- [Lia24] Liang, Mengyu/Liu, Xing/Di Liu/Li, Xiaopeng/Hu, Xianjin/Feng, Chenyang/Li, Ting-Ting/Lin, Jia-Horng/Chang, Boyan/Chen, Jie. A review of the curing rate and mechanical properties of epoxy resin on polymer matrix composites. Journal of Polymer Research. Bd. 31, 2024, Nr. 11. DOI: 10.1007/s10965-024-04186-y
- [Mac18] Mackay, Michael E. The importance of rheological behavior in the additive manufacturing technique material extrusion. Journal of Rheology. Bd. 62, 2018, Nr. 6, S. 1549–1561. DOI: 10.1122/1.5037687
- [Maf05] Mafi, R./Mirabedini, S. M./Attar, M. M./Moradian, S. Cure characterization of epoxy and polyester clear powder coatings using Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA). Progress in Organic Coatings. Bd. 54, 2005, Nr. 3, S. 164–169. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2005.06.006
- [Mai26a] Mainsail-Crew. MainsailOS, 2026. Online verfügbar unter <https://docs.mainsail.xyz/> (abgerufen am 14.07.2026)
- [Mai26b] Mainsail-Crew. Getting started - Raspberry Pi, 2026. Online verfügbar unter <https://docs.mainsail.xyz/mainsailos/getting-started/raspberry-pi/> (abgerufen am 29.07.2026)
- [Mun26] Munsch, Maximilian/Wycisk, Eric/Führer, Timo/Schmidt-Lehr, Matthias. AMPOWER Report 2026 – Management Summary. Hamburg, 2026. Online verfügbar unter <https://ampower.eu/reports/> (abgerufen am 18.06.2026)
- [Net24] Netzsch Gruppe. TM-DSC – Die Methode der Wahl zur Bestimmung des Glasübergangs und der Nachhärtung von Epoxidharzen, 2024. Online verfügbar unter <https://analyzing-testing.netzsch.com/de/application-literature/tm-dsc-die-methode-der-wahl-zur-bestimmung-des-glasuebergangs-und-der-nachhaertung-von-epoxidharzen> (abgerufen am 27.05.2026)
- [Ngo18] Ngo, Tuan D./Kashani, Alireza/Imbalzano, Gabriele/Nguyen, Kate T.Q./Hui, David. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering, 2018, Nr. Volume 143, S. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012

-
- [Ome25] Omer, Mohamed A. E./Shaban, Ibrahim Abdelfadeel/Mourad, Abdel-Hamid/Hegab, Hussien. Advances in interlayer bonding in fused deposition modelling: a comprehensive review. Virtual and Physical Prototyping. Bd. 20, 2025, Nr. 1. DOI: 10.1080/17452759.2025.2522951
- [Pri26] Princore. PRINCORE Granulatextruder, 2026. Online verfügbar unter <https://princore.de/products/princore-granulatextruder>
- [Raj22] Rajan, Kumaresan/Samykano, Mahendran/Kadrigama, Kumaran/Harun, Wan Sharuzi Wan/Rahman, Md. Mustafizur. Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Bd. 120, 2022, Nr. 3-4, S. 1531–1570. DOI: 10.1007/s00170-022-08860-7
- [Ras14] Raschig GmbH. DSC-Messung Vergleich EPOXIDUR EP 3585 T ZN und EP 3585 H, 2014
- [Ras21] Raschig GmbH. Vorläufiges technisches Datenblatt. EPOXIDUR® EP 3781 E, 2021. Online verfügbar unter <https://www.raschig.de/downloads/buk/tdb/TDB%20-%20Epoxidur%20EP%203781%20E.pdf> (abgerufen am 29.07.2026)
- [Ras25a] Raschig GmbH. DSC-Messung EPOXIDUR EP Purge, 2025
- [Ras25b] Raschig GmbH. DSC-Messung EPOXIDUR EP 3781 E ZD, 2025
- [Shn22] Shnawa, Hussein Ali. Studies on thermal properties and curing kinetics of talc-filled epoxy resin composite using differential scanning calorimetry. Polymer Bulletin. Bd. 79, 2022, Nr. 12, S. 11461–11478. DOI: 10.1007/s00289-021-04012-1
- [Sin17] Singh, Sunpreet/Ramakrishna, Seeram/Singh, Rupinder. Material issues in additive manufacturing: A review. Journal of Manufacturing Processes. Bd. 25, 2017, S. 185–200. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.11.006
- [Sin20] Singh, Sunpreet/Singh, Gurminder/Prakash, Chander/Ramakrishna, Seeram. Current status and future directions of fused filament fabrication. Journal of Manufacturing Processes. Bd. 55, 2020, S. 288–306. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.04.049
- [SKZ25] SKZ. Vernetzende Epoxidharz-Filamente für den FFF-Drucker sollen Bauteileigenschaften verbessern. SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, 2025.

Online verfügbar unter <https://www.skz.de/presse/vernetzende-epoxidharz-filamente-fuer-den-fff-drucker> (abgerufen am 16.06.2026)

- [Sta23] Stang, Maria/Tashman, Joshua/Shiwarski, Daniel/Yang, Humphrey/Yao, Lining/Feinberg, Adam. Embedded 3D Printing of Thermally-Cured Thermoset Elastomers and the Interdependence of Rheology and Machine Pathing. *Advanced Materials Technologies*. Bd. 8, 2023, Nr. 3, S. 2200984. Online verfügbar unter <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/admt.202200984>. DOI: 10.1002/admt.202200984
- [Syr21] Syrlybayev, Daniyar/Zharylkassyn, Beibit/Seisekulova, Aidana/Akhmetov, Mustakhim/Perveen, Asma/Talamona, Didier. Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts-A Critical Review. *Polymers*. Bd. 13, 2021, Nr. 10. DOI: 10.3390/polym13101587
- [Tan25] Tang, Zhangzhang/Zhang, Yaoming/Tao, Liming/Yang, Zenghui/Liu, Peng/Wang, Qihua/Wang, Tingmei. Developments and Challenges in Direct Ink Writing for High-Performance Polymers. *Additive Manufacturing Frontiers*. Bd. 4, 2025, Nr. 2, S. 200218. DOI: 10.1016/j.amf.2025.200218
- [Tao21] Tao, Yubo/Kong, Fangong/Li, Zelong/Zhang, Jingfa/Zhao, Xin/Yin, Qing/Xing, Dan/Li, Peng. A review on voids of 3D printed parts by fused filament fabrication. *Journal of Materials Research and Technology*. Bd. 15, 2021, S. 4860–4879. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.10.108
- [Tom12] Tomuta, Adrian M./Ramis, Xavier/Ferrando, Francesc/Serra, Angels. The use of dihydrazides as latent curing agents in diglycidyl ether of bisphenol A coatings. *Progress in Organic Coatings*. Bd. 74, 2012, Nr. 1, S. 59–66. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2011.10.004
- [Tót25] Tóth, Csenge/Virág, Ábris Dávid/Halász-Kutasi, István/Kovács, Norbert Krisztián/Bárány, Tamás. Additive manufacturing of thermoset elastomers: A review of emerging technologies. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. Bd. 69, 2025, S. 102143. DOI: 10.1016/j.jestch.2025.102143
- [Wag25] Wagner, Emil/Kneidinger, Christian/Burgstaller, Christoph/Zitzenbacher, Gernot. Simulation of the Melt Conveying Zone of a Single-Screw Extruder for Mixed Polymer Materials Using an Isothermal

Analytical Flat Plate Model. *Polymers*. Bd. 17, 2025, Nr. 23. DOI:
10.3390/polym17233145

- [Wan20] Wang, Biran/Zhang, Zimeng/Pei, Zhijian/Qiu, Jingjing/Wang, Shiren. Current progress on the 3D printing of thermosets. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. Bd. 3, 2020, Nr. 4, S. 462–472. DOI: 10.1007/s42114-020-00183-z
- [Waw24] Wawryniuk, Zuzanna/Brancewicz-Steinmetz, Emila/Sawicki, Jacek. Revolutionizing transportation: an overview of 3D printing in aviation, automotive, and space industries. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024. DOI: 10.1007/s00170-024-14226-y
- [Zha18] Zhang, Yinglan/Huang, Mengmeng/Kan, Ying/Liu, Lianying/Dai, Xiaoping/Zheng, Guiling/Zhang, Zhengdong. Influencing factors of viscosity measurement by rotational method. *Polymer Testing*. Bd. 70, 2018, S. 144–150. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.06.034
- [Zho24] Zhou, Longfei/Miller, Jenna/Vezza, Jeremiah/Mayster, Maksim/Raffay, Muhammad/Justice, Quentin/Al Tamimi, Zainab/Hansotte, Gavyn/Sunkara, Lavanya Devi/Bernat, Jessica. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors*. Bd. 24, 2024, Nr. 9, S. 2668. Online verfügbar unter <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/9/2668>. DOI: 10.3390/s24092668
- [Zhu26] Zhu, Xiaobao/Yang, Li/Chen, Jing/Chen, Kaihua/Guo, Shenghui. Curing kinetics of T300 carbon fiber/epoxy resin prepregs investigated by differential scanning calorimetry. *Chemical Papers*, 2026. DOI: 10.1007/s11696-026-04783-9

Übersicht verwendeter Hilfsmittel

Gemäß der Selbstständigkeitserklärung werden nachfolgend alle auf künstlicher Intelligenz (KI) basierenden Werkzeuge aufgeführt, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden. Sämtliche Ausgaben wurden stets kritisch geprüft, manuell angepasst und empirisch validiert. Die inhaltliche Verantwortung für sämtliche Aussagen, Ergebnisse und Schlussfolgerungen liegt vollständig beim Autor.

Claude (Anthropic), Modell: Claude Sonnet 5

Einsatzbereiche:

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Modell in mehreren Bereichen eingesetzt. Bei der Literaturrecherche diente es bei Bedarf der sinngemäßen Übersetzung sowie der korrekten inhaltlichen Wiedergabe englischsprachiger Quellentexte ins Deutsche. Darüber hinaus wurde es unterstützend zur sprachlichen Überarbeitung eigener Textentwürfe hinsichtlich Rechtschreibung, Grammatik und wissenschaftlichem Sprachstil gemäß AMB-Leitfaden genutzt. Bei der Formulierung und Umformulierung von Fließtextpassagen kam es gelegentlich auf Basis eigener Stichpunkte und fachlicher Vorgaben des Autors zum Einsatz. Zudem wurden schematische Abbildungen auf Basis eigener Daten beziehungsweise in Anlehnung an angegebene Quellen erstellt. Ergänzend erfolgte eine Unterstützung bei der Fehlersuche und Dokumentation im Rahmen der Firmware-Konfiguration (Klipper) des Demonstrators.

Anlagen

Sämtliche Anlagen befinden sich auf der beigefügten CD.

- Anlage 1** DSC-Messkurven verschiedener EPOXIDUR-Granulate (EP Purge, EP 3781 E ZD, EP3585 T ZN, EP 3585 H)
- Anlage 2** Tabelle mit Messwerten aus der rheologischen Untersuchung zu EPOXIDUR-Granulaten EP Purge, EP 3781 E ZD, EP 3585 H und EP 3581 E
- Anlage 3** Klipper Konfigurationsdatei *printer.cfg*
- Anlage 4** Tabelle mit Messwerten aus den Thermografieaufnahmen
- Anlage 5** Vergleich der DSC-Kurven von unvernetztem Granulat (Raumtemperatur), teilvernetztem Strang (100 °C) sowie nachgehärteten Proben (145 °C, 170 °C)