Masterarbeit

ENTWICKLUNG EINES VORTROCKNUNGSGERÄTS FÜR HYGROSKOPISCH TECHNISCHE KUNSTSTOFFE WIE POLYAMID IN FILAMENTFORM

ausgeführt am



Fachhochschul-Masterstudiengang Automatisierungstechnik / Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

Max Soukup, BSc 1910322002

betreut und begutachtet von DI Dr. techn. Christian Gasser

Unterschrift

Graz, im Februar 2021

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Unterschrift

DANKSAGUNG

In einer turbulenten Zeit voller neuem Leben möchte ich vor allen meiner Frau meinen tiefsten Dank aussprechen. Außerdem möchte ich mich für die moralische Unterstützung meiner Eltern wie auch meiner Brüder sowie die emotionale Unterstützung meiner beiden Kinder bedanken. Weiteres zählen meine Kollegen bei Hage3D und hier vor allen mein Betreuer Matthias Katschnig zu den hier zu erwähnenden Personen. Danke für die großartige Möglichkeit meine Masterarbeit bei euch schaffen zu können. Neben vielen anderen Personen, die hier unerwähnt bleiben, obwohl sie sicherlich ebenso zur Unterstützung beigetragen haben, bleibt schließlich noch mein Betreuer und Begutachter am CAMPUS 02 der diese Arbeit überhaupt erst möglich machte. Vielen Dank dafür.

KURZFASSUNG

Der Begriff 3D-Druck hat in den letzten Dekaden Eingang in das Wortrepertoire der Gesellschaft gefunden. Eine Vielzahl verschiedener additiver Fertigungsmethoden sind in dieser Zeit entstanden. Um den auf Spulen gewickelten, speziell für das Fused Filament Fabrication Verfahren (FFF) in Form gebrachten Kunststoff vor der Verarbeitung zu trocknen, werden z.B. bereits aus dem Spritzguss bekannte technische Lösungen herangezogen und entsprechend angepasst.

Die Problematik von zu feucht verarbeitetem Kunststoff ist schon aus anderen Fertigungsmethoden wie dem Spritzguss und der industriellen Extrusion bekannt, weshalb auch die Vortrocknung der Materialien hier bereits untersucht wurde. Die Vortrocknung von auf Spulen aufgewickeltem Filament für den 3D-Druck hingegen wurde erst wenig untersucht. Das ist der Ausgangspunkt für das Forschungsziel dieser Arbeit:

Es gilt eine Vortrocknungslösung für hygroskopische, technische Kunststoffe in Filamentform wie Polyamid zu entwickeln, deren Preis- / Leistungsverhältnis mit marktüblichen Verfahren konkurrieren kann.

Um die Anlage auslegen zu können, wird in dieser Arbeit das Trocknungs- und Absorptionsverhalten der Filamentspulen untersucht. Zusätzlich wird auf die Frage der minimal nötigen Trocknungszeit in der entworfenen Anlage eingegangen.

Die Auswertungen der Versuchsreihe zeigen eine beträchtliche Zunahme der Trocknungszeit von der äußersten zur innersten Spulenschicht, und dass für eine ausreichende Trocknung je nach Ausgangsfeuchte mehrere zig Stunden erforderlich sind. Aufgrund der Menge an Wasser, die im Zuge der Trocknung nach außen transportiert wird, ist bei größeren Mengen von zu trocknendem Kunststoff ein Austausch der Luft in der Trockenkammer ratsam. Aus diesem Grund wurde als Trocknertyp ein Umlufttrockner mit Zu- und Abluftklappensteuerung entwickelt.

Weiterführende Forschungen könnten sich mit der Thematik der maximal zulässigen Feuchte unterschiedlicher Kunststoffe vor der Verarbeitung wie auch mit den Auswirkungen der Zufuhr von in vielen Betrieben vorhandener Trockenluft beschäftigen.

ABSTRACT

The term 3D printing has entered society's vocabulary in recent decades. A variety of different additive manufacturing methods have emerged during this time. In order to pre-dry the plastic wound on spools and specially shaped for the Fused Filament Fabrication process (FFF) before processing, technical solutions already known from injection molding are being used and adapted accordingly.

The problem of plastic being processed while too moist is known in other manufacturing methods such as injection molding and industrial extrusion, which is why the pre-drying of materials has also already been investigated in those areas. Pre-drying of filament wound on spools for 3D printing, on the other hand, has not been studied as often. This is the starting point for the research objective of this work:

The aim is to develop a pre-drying solution for hygroscopic engineering plastics in filament form, such as polyamide, with a price/performance ratio that can compete with commercially available processes.

In this work, the drying and absorption behavior of the filament coils, necessary for being able to design the system, are investigated.

In addition, the question of the minimum drying time required in the designed system is addressed.

The evaluations of the series of experiments show a considerable increase in drying time from the outermost to the innermost coil layer, and that many hours may be required for sufficient drying, depending on the initial moisture content. Due to the amount of water transported outside during the drying process, it is advisable to exchange the air in the drying chamber when larger quantities of plastic are to be dried. For this reason, the type of dryer developed was a recirculating air dryer with supply and exhaust air flap control.

Further research could address the issue of the maximum permissible moisture content of different plastics before processing as well as the effects of a supply of dry air available in many plants.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einle	inleitung		
	1.1	Zie	ldefinition	2
1.2 Aufbau			fbau	2
2	The	oreti	ische Grundlagen	4
	2.1	3D	Druck und seine technischen Herausforderungen	4
	2.2	Be	schreibung des in den Experimenten verwendeten Kunststoffs Polyamid 6	6
	2.3	Wa	asseraufnahme und Abnahmeverhalten von Polyamid 6	8
	2.3.	1	Sorption	10
	2.3.	2	Stofftransport	12
	2.	.3.2.	1 Diffusion	13
	2.	3.2.	2 Konvektion	13
	2.4	Fe	uchte Luft – Ein ideales Gas-Dampf-Gemisch	14
	2.5	Au	swirkungen von Feuchtigkeit in Polyamid auf die Verarbeitung und das gefertigte Bauteil	16
	2.5.	1	Änderung der Glasübergangstemperatur	17
	2.5.	2	Veränderung der Festigkeit	18
	2.5.	3	Dimensionsänderungen	19
	2.5.4	4	Änderung der Kerbschlagzähigkeit	19
	2.5.	5	Veränderung der Viskoelastizität	20
	2.5.	6	Lückenbildung	21
	2.5.	7	Veränderung der Durchflussmenge	21
	2.6	Tro	ocknung von Feststoffen	22
	2.6.	1	Einführung in die Feststofftrocknung	22
	2.6.2	2	Trocknungsverlauf am Beispiel der Konvektionstrocknung	25
	2.6.	3	Einflussparameter	27
	2.7	Be	schreibung und Gegenüberstellung geeigneter Trocknungs-verfahren für PA6	29
	2.7.	1	Frischlufttrocknung	30
	2.7.	2	Umlufttrocknung	31
	2.7.3	3	Trockenlufttrocknung	32
	2.7.4	4	Infrarottrocknung	34
	2.7.	5	Vakuumtrocknung	35
	2.8	Pa	rameter für die Auslegung eines Trockners	35
	2.9	Ve	rfahren zur Bestimmung der Feuchtigkeit in festen Stoffen	37
	2.9.	1	Mechanisch (thermogravimetrisch) am Beispiel des METTLER TOLEDO HX204	37
	2.9.2	2	Taupunktmessung am Beispiel der AQUATRAC® Station	38
	2.9.3	3	Chemisch am Beispiel des AQUATRAC®-V	39
	2.9.4	4	Optisch am Beispiel des Nahinfrarot Handscanners der Firma Solid Scanner	40
3	Eing	gren	zung des Untersuchungsgegenstandes	41
	3.1	Ra	hmenbedingungen	41
	3.2	Au	swahl des zu untersuchenden Kunststoffes	42

3.3	Auswahl der zu untersuchenden Trocknungstechnologie	44				
4 Be	eschreibung der Vorgangsweisen und Versuchsaufbauten zur Feuchtigkeitsmessung	45				
4.1	Verwendetes Mess-, Konditionier- und Trocknungsequipment	47				
5 V	ersuchsreihe: Filamenttrocknung, Konditionierung und Wasserabsorption	49				
5.1	Wasserabsorption	50				
5.2	Messung der Feuchtigkeit an unterschiedlichen Stellen in der Filamentspule sowie	in				
Abh	ängigkeit der Trocknungszeit	52				
6 In	terpretation und Diskussion der Messergebnisse	54				
6.1	Interpretation des Trocknungsverhalten der Filamentspulen	58				
6.	1.1 Ermittlung der Trocknungskurve für die Quick Dry Funktion am Trocknungsgerät	60				
7 A	uslegung des Vortrocknungsgeräts basierend auf der Bewertung der Messergebnisse	64				
7.1	Schritt 1: Beurteilung der Gutseigenschaften	64				
7.2	Schritt 2: Aufnahme der Sorptionsisotherme	65				
7.3	Schritt 3: Aufnahme des Trocknungsverlaufs	65				
7.4	Schritt 4: Festlegen der Betriebsweise und der Auswahl des Trocknertyps	65				
7.5	Schritt 5: Festlegen der Strömungsführung	68				
7.6	Schritt 7: Überprüfung der Annahmen in einer Pilotanlage	70				
7.7	Schritt 8: Dimensionierung des Trockners	71				
7.8	Schritt 9: Auslegung der benutzten Komponenten	72				
7.	8.1 Sensor, Aktor, Schalter	72				
7.	7.8.2 Rechnereinheit und Peripherie					
7.	8.3 Zusätzlich nötige Komponenten	75				
7.9	Aufbau der Trocknungssteuerung	76				
7.10) Designvorschlag	77				
8 Zu	usammenfassung und Erkenntnisse	80				
9 Ai	usblick	82				
9.1	Maximal verarbeitbare Feuchte im Filament	82				
9.2	Mechanische Qualität der Druckergebnisse	82				
9.3	Sorptionsisotherme	84				
9.4	Weitere Messreihen	84				
9.5	Räumlicher und zeitlicher Feuchteverlauf	84				
9.6	Feuchtemessung per NIR	84				
9.7	Luftzufuhr des Trockners	85				
9.8	Beobachtung des Feuchteverlaufs während der Trocknung	86				
9.9	Lagerkammer unter dem Trockner	86				
Literat	Literaturverzeichnis					
Abbild	Abbildungsverzeichnis					
Tabell	Tabellenverzeichnis					
Abkürz	Abkürzungsverzeichnis					
Anhan	ng 1: Datenblatt Filament	97				
Anhan	Anhang 2: T/ $ ho$ Diagramm					

Anhang 3: Schaltplan Raspberry Pi Shiel	I
---	---

1 EINLEITUNG

Dem Begriff 3D-Druck geht ursprünglich der Begriff Rapid Prototyping voraus. Dieser wurde zum ersten Mal in den 1980er Jahren als Technologie erwähnt und bezeichnete damals ein Stereo-Lithografie Verfahren. Erst in den 1990er Jahren wurde Rapid Prototyping als Unterart der Additiven Fertigung bekannt. Ein Vorteil der additiven Fertigungsverfahren ist es, Produkte direkt auf der Basis von 3D-Produktdaten zu fertigen. Hier kommt auch das erste Mal der Begriff 3D-Druck ins Spiel, und zwar als Name für das Verfahren einer Prototyping Maschine, heute einfach 3D-Drucker genannt. Bei sogenannten 3D-Druckern wird das Bau-Material Schicht für Schicht aufgetragen, um das Werkstück zu generieren. Die treibende Motivation für die Entwicklung dieses komplett computergesteuerten Prozesses war, die Durchlaufzeit für die Produktentwicklung maßgeblich zu verringern. So ist es teilweise möglich, bereits vor der Fertigung bestimmte Produktparameter zu analysieren und zu verändern.¹

Die Technologie wurde anfangs hauptsächlich in der Flugzeug-, der Automobil- und der Konsumgüterindustrie eingesetzt. Mit ihr wurde es möglich, Baumuster auf ihre Funktion zu überprüfen und sie direkt dem Kunden vorzuführen, ohne sich einer kosten- und zeitaufwändigen Fertigungskette zu widmen. Da Kundenwünsche so schneller bedient und abgestimmt werden konnten, wurde diese Technologie zunehmend auch im Maschinenbau angewandt.²

Heute gibt es bereits eine große Anzahl an verfügbaren 3D-Druck-Technologien wie auch der zu verarbeitbaren Materialien. Die Zeiten in denen 3D-Druck nur für Rapid Prototyping eingesetzt wurde sind längst vorbei und der Trend geht immer mehr in Richtung Serienfertigung. Da die Technologie inzwischen auch im Konsumentenbereich eingetroffen ist und sich durch die weltweite Maker-Gemeinschaft rasant weiterentwickelt, sind 3D-Drucker mittlerweile auch als günstige Desktop-Geräte erhältlich.³

Trotz der geschilderten Vorteile ersetzt die Anschaffung eines renommierten 3D-Druckers im Industriestandard nicht die Auseinandersetzung mit der Technologie und Prozessentwicklung. Eine Ausnahme bilden vielleicht Drucker-Systeme mit geschlossenem Materialportfolio, in deren Entwicklung bereits die Prozesse der möglichen Bau-Materialien berücksichtigt wurden. Der Hersteller lässt für sein Verfahren nur Bau-Materialien zu, die vollständig getestet und freigegeben wurden. Somit sind diese Materialien speziell auf die Geräte abgestimmt und Fremdwissen für die Prozessentwicklung ist nicht mehr notwendig. Dies schlägt sich sowohl auf die Anschaffungskosten als auch die Flexibilität der Anwendung nieder. Hier kann Technik einiges an Unwissenheit ausgleichen, muss aber richtig angewendet werden. So sind zum Beispiel die Lagerung wie auch die Vorbehandlung der Bau-Materialien wesentlich für die Qualität des Endproduktes. Auch die Nachbehandlung, sei dies thermisch oder mechanisch sollte erlernt und richtig angewandt werden, um das erwünschte Ergebnis zu erzielen.

Eine wichtige Rolle für die Qualität der Drucke spielt die Feuchtigkeit des Baumaterials. Bei der Verarbeitung von feuchten Bau-Materialien kann es speziell bei Kunststoffen, die stark hygroskopisch sind,

¹ Vgl. Gebhardt (2016), S. 347 f.

² Vgl. Fastermann (2012), S. 6.

³ Vgl. Fastermann (2016), S. 1 f.

zu hydrolytischem Abbau kommen. Das gefährdet Formbeständigkeit, Oberflächenqualität und Stabilität des Bauteils.⁴ Dieser Effekt ist Grundstein der Aufgabenstellung dieser Arbeit.

Anders, als für die Kunststofftrocknung im Spritzguss, wo es bereits, wie in Kröll/Krischer (1959) zu lesen, seit Jahrzehnten einige durchdachte Systeme gibt, gestaltet sich die Suche nach einem passenden Trocknungsgerät für den 3D Druck und im speziellen für das Fused Filament Fabrication Verfahren (FFF), welches in Kapitel 2.1 beschrieben wird, eher schwierig. Auch hier gibt es zwar eine Hand voll Geräte, jedoch sind diese, setzt man den Listenpreis in den Vergleich mit dem des 3D-Druckers, teuer. Außerdem gibt es kaum Untersuchungen, auf welche Art und Weise die Trocknung des für das FFF-Verfahren vorbereiteten Kunststoffs durchgeführt werden muss, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

1.1 Zieldefinition

Diese Masterarbeit geht der Frage nach, wie sich Kunststoff Bau-Materialien für das FFF-Verfahren in Filamentform, aufgewickelt auf Spulen, bei der Aussetzung einer definierten relativen Luftfeuchtigkeit wie auch bei thermischer Vorbehandlung verhalten. Aus den Erkenntnissen der Versuchsreihen wird ein Vortrocknungsgerät entwickelt, um diesen Prozess zu automatisieren. Da die Anforderungen für die Vortrocknung für jede Kunststoffzusammensetzung variiert, findet die Auslegung auf Basis eines definierten Kunststoff-Filaments statt. Infolgedessen soll auf andere Kunststoff-Filamente geschlossen bzw. eine Möglichkeit aufgezeigt werden, wie für ein gewähltes Kunststoff-Filament Trocknungsparameter bestimmt werden können. Von diesen Parametern kann vorwiegend die Trocknungsdauer variiert werden. Die gewählte Temperatur sollte den Herstellerangaben angepasst werden, um thermischen Abbau zu vermeiden. Um Befeuchtung am 3D-Drucker-Arbeitsplatz oder in der Filament-Aufnahme des 3D-Druckers zu vermeiden, wäre es ideal, Filament direkt aus dem Trocknungsgerät zu fördern. Eine weitere Anforderung stellt der Produktionspreis des ausgelegten Gerätes dar. Da es am Markt bereits Trocknungsgeräte gibt, soll das in dieser Arbeit ausgelegte Gerät die Konkurrenz in Sachen Preis und Performance schlagen. Mit dazu zählt die Benutzerfreundlichkeit mittels übersichtlichen Interfaces und ein selbsterklärender Prozessablauf, der möglichst wenig Fehler zulässt. Um das Gerät in Zukunft in das Produktportfolie der Firma Hage3D aufnehmen zu können, ist es außerdem erforderlich, dass Design an die bestehende Produktpalette anzupassen. Die Entwicklung des Gerätes beginnt mit der theoretischen Auslegung und den notwendigen Filamenttests und endet mit einem Designvorschlag, der Auflistung zu verwendender Hardware wie auch der ausprogrammierten Benutzersteuerung.

1.2 Aufbau

Zu Beginn dieser Masterarbeit wird ein kompakter theoretischer Input über die Grundlagen, die zur Kunststofftrocknung notwendig sind, gegeben. Außerdem werden verschiedene Trocknungsverfahren, wie auch relevante Parameter für die Auslegung von Trocknern aufgelistet. Nach der Beschreibung unterschiedlicher Methoden, die Feuchtigkeit in Kunststoffen zu messen, welches für die folgende Versuchsreihe erforderlich ist, werden die Rahmenbedingungen der Versuchsreihe geklärt. Ausgehend von

⁴ Vgl. Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 205.

theoretischem Input und bestimmten Annahmen wird an dieser Stelle der Versuchsaufbau beschrieben. Die Ergebnisse der Versuchsreihe stehen sowohl als Rohdaten, als auch in interpretierter Form zur Verfügung. Dies soll Anreiz schaffen, dieses Thema in nachfolgenden Arbeiten erneut aufzugreifen und die Daten neu zu interpretieren. Die aus den Daten gewonnenen Erkenntnisse münden schließlich in die Beschreibung der Auslegung des entwickelten Vortrocknungsgerätes inklusive aller notwendigen technischen Voraussetzungen. Nach einer Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse aus dieser Arbeit wird noch kurz auf Themen eingegangen, für die in dieser Masterarbeit kein Platz mehr war, und ein paar Verbesserungsideen sowie weitere Forschungsmöglichkeiten angeschnitten.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Da sich diese Arbeit mit der Auslegung eines Vortrocknungsgeräts für PA Kunststoffe in Filamentform beschäftigt, müssen vorerst einige theoretische Grundlagen behandelt werden um die verwendeten Verfahren wie auch die Komponentenauswahl zu rechtfertigen. Auch wenn 3D-Druck mittlerweile durchaus als Standardtechnologie angesehen werden darf, beginnen die Grundlagen mit einer kurzen Übersicht hierüber. Der Fokus liegt aber auf dem Problem der Feuchtigkeit im Filament.

Danach folgt eine Beschreibung des in dieser Arbeit verwendeten Kunststoffes PA6 sowie dessen Eigenschaften, Wasser aufzunehmen und abzugeben. Nachdem auch die Probleme von erhöhter Wasserkonzentration in diesem Feststoff erläutert wurden, werden einige relevante Trocknungsverfahren aufgezählt und verglichen. Abschließend wird noch auf verschiedene Möglichkeiten, den Feuchtegehalt in festen Stoffen zu bestimmen, eingegangen.

2.1 3D Druck und seine technischen Herausforderungen

Die additive Fertigungsart 3D-Druck wurde in den 1980er Jahren das erste Mal als Technologie erwähnt und lässt sich ursprünglich auf die Stereo-Lithografie zurückführen. Die Technologie wurde und wird heute hauptsächlich im Rapid Prototyping Bereich eingesetzt, wobei jetzt auch ein Trend in Richtung Serienfertigung und Produktion erkennbar ist. Der 3D-Druck selbst lässt sich in einige Untergruppen unterteilen, wie etwa Selektives Lasersintern (SLS), Fused Deposition Modeling (FDM) auch Fused Filament Fabrication (FFF) genannt oder Digital Light Processing (DLP).⁵ Es gibt noch eine ganze Reihe weiterer Technologien, welche unter dem Kollektivum 3D-Druck bekannt sind, die hier jedoch nicht aufgeführt werden. Da sich diese Arbeit ausschließlich mit der Trocknung von Kunststoffen in Filamentform beschäftigt, wird hier nur die dafür verwendete Technologie genauer erläutert.

Die Technologie FFF bzw. FDM beschreiben beide dasselbe additive Fertigungsverfahren. Seit die Firma Stratasys Inc. "FDM" 1991 als Trademark registriert hat, wird von nicht Eigentümern statt des geschützten Begriffs "FDM" die Abkürzung "FFF" verwendet.⁶

Beim FFF-Verfahren werden vorwiegend schmelzfähige thermoplastische Kunststoffe Schicht für Schicht auf einer Platte aufgetragen. Dies Platte kann sowohl aus Glas als auch aus pulverbeschichtetem Edelstahl sein. Auch andere steife Materialien sind möglich, werden jedoch mit speziellen Folien bezogen, um die Haftung der gedruckten Bauteile darauf gewährleisten zu können. Die Kunststoffe werden, anders als bei Verfahren mit Pulver oder flüssiger Ausgangsbasis, durch eine beheizte Düse gedrückt. Der extrudierte Kunststoff erstarrt nach Abkühlung auf der Platte bzw. auf dem zuvor extrudierten Material. Nach jeder Schicht wird der Abstand zwischen Düse und Platte um die Dicke einer Schicht vergrößert, um Platz für die nächste Schicht zu bieten. Diese Prozedur wird wiederholt, bis das Bauteil fertig ist. Hilfsstrukturen wie

⁵ Vgl. Fastermann (2012), S. 5.

⁶ Vgl. LegalForce (2020), Online-Quelle [10.08.2020]

etwa Unterstützungsdrucke bei Überhängen oder Hilfen zur besseren Bauteilhaftung auf der Platte, können je nach Material am Ende mechanisch oder chemisch entfernt werden.⁷

Üblicherweise sind die Kunststoffe vor ihrer Verarbeitung auf Spulen unterschiedlicher Größe aufgewickelt und werden als Filament bezeichnet. Weit verbreitete und einfach zu verarbeitende Kunststoffe im FFF-Bereich sind Polylactide (PLA) und Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS). PLA, also Biopolymere auf Milchsäurebasis, gehören zu den Polyestern und sind biologisch abbaubar.⁸ Neben PLA und ABS, den im nicht industriellen Bereich hauptsächlich genutzten Kunststoffen, können mittlerweile auch hoch technische Kunststoffe wie etwa PET-G, ein mit Glykol modifiziertes Polyethylenterephthalat (PET), Polymethylmethacrylat (PMMA), ein transparenter thermoplastische Kunststoff, Polyamide (PA) und hoch temperaturbeständiges Polyetheretherketon (PEEK) mittels FFF-Verfahren gedruckt werden. Bei den letzten drei genannten Kunststoffen muss allerdings tief in die Prozesstechnik eingetaucht werden, um qualitativ hochwertige Druckergebnisse zu erzielen. Trotz der großen Auswahl der derzeit am Markt verfügbaren Materialien, muss für den 3D-Druck oftmals zusätzlich in die Materialproduktion eingegriffen werden, um Probleme beim Drucken zu vermeiden. PA zum Beispiel hat hervorragende technische Eigenschaften, kann aber in seiner puren Form kaum verdruckt werden, da es aufgrund von Schrumpfungsspannungen, ausgelöst durch das Kristallisationsverhalten des Polymers, zu massiven Verzug und verminderter Formbeständigkeit kommt. Diese limitieren die Nutzbarkeit dieser Materialien für FFF-Verfahren. Bei der Herstellung von speziell für ein FFF-Verfahren geeignetes PA wird versucht im Produktionsprozess die natürliche Anordnung der Molekularketten zu verhindern, um die Kristallisation möglichst zu unterbinden und damit die oben geschilderten Probleme zu vermeiden.9

Sind Maschinen und die hierfür geeigneten thermoplastischen Kunststoffe vorhanden, ist dadurch noch nicht ein gutes Druckergebnis garantiert. Wegen der vielen variablen Parameter in der Prozesstechnik, wie etwa Schmelztemperatur, Fördergeschwindigkeit, Vorschub oder Extrusionsbreite, um hier nur die offensichtlichsten zu nennen, erfordert ein sauberer Druck viel Erfahrung und Hintergrundwissen. Erschwerend kommt hinzu, dass jeder Kunststoffhersteller andere Zusammensetzungen produziert, weswegen für ein optimales Ergebnis die Druckparameter je Hersteller unterschiedlich gewählt werden müssen.

Angenommen Maschine, Filament und Prozess sind aufeinander abgestimmt und liefern durchaus schöne Druckergebnisse, kann ein zusätzlicher Faktor all dies zunichtemachen: Zu hohe Feuchtigkeit der Kunststofffilamente.

Bei der Verarbeitung feuchter Kunststoffe kann es speziell bei stark hygroskopischen Kunststoffen zu hydrolytischem Abbau kommen. Dies kann massive Auswirkungen auf die Formbeständigkeit sowie die Stabilität des Bauteils haben.¹⁰

⁷ Vgl. Lieneke/Denzer/Adam/Zimmer (2016), S. 286 f.

⁸ Vgl. Fastermann (2016). S. 33 – 35.

⁹ Vgl. Fana/Liuab/Zhang (2020), S. 1. ff.

¹⁰ Vgl. Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 205.



Abbildung 1: Zugproben gedruckt aus ULTEM[®] 9085 Filament mit verschiedenen Feuchtegraden, Quelle: Zaldivar/Mclouth/Ferrelli/Patel/Hopkins/Witkin (2018), S. 461 (leicht modifiziert).

Abbildung 1 verdeutlicht rein visuell mögliche drastische Auswirkungen von 3D-gedruckten nicht vorgetrockneten Kunststoff-Filamenten. Über dem Bauteil ist jeweils der Feuchtegrad des Filaments vor der Extrusion angegeben. Da sich jeder Kunststoff individuell verhält, dient diese Abbildung rein der Veranschaulichung und kann nicht pauschal auf alle Kunststoffe übertragen werden. Der hier gezeigte Kunststoff nennt sich ULTEM[®] 9085 und besteht hauptsächlich aus Polyetherimid (PEI) und Polycarbonat (PC). Die Auswirkungen von Feuchtigkeit in Polyamid 6, dem in dieser Arbeit hauptsächlich behandelten Polymer, werden in Kapitel 2.5 genauer beleuchtet.

Wichtig ist daher, dass das Kunststoff-Filament vor dem Druck ausreichend vorgetrocknet wird. Wie trocken der Kunststoff genau sein muss kann pauschal nicht gesagt werden da sich dieser Wert stark von Kunststoff zu Kunststoff unterscheidet. Untersuchungen zu diesem Thema sind rar und stehen, wenn überhaupt, nur für ganz spezielle Hersteller und Kunststoffmischungen zur Verfügung.¹¹

Garces u. a. beschreiben zum Beispiel im Artikel *"Effect of Moisture on Shape Memory Polyurethane Polymers for Extrusion-Based Additive Manufacturing*" die Auswirkungen von Feuchtigkeit in Formgedächtnis Polyurethan (SMPU) beim 3D Druck.¹²

Eine Beschreibung der verschiedenen Messmethoden für die Feuchtigkeit inkl. Beispielen findet sich in Kapitel 2.9.

2.2 Beschreibung des in den Experimenten verwendeten Kunststoffs Polyamid 6

Polyamide besitzen abgesehen von ihrem strukturellen Aufbau eine Reihe von für die Industrie relevanten Eigenschaften. Neben hoher Festigkeit, Steifheit und Härte zählen Formbeständigkeit in Wärme sowie die

¹¹ Vgl. Domininghaus (2012), S 70.

¹² Vgl. Garces/Aslanzadeh/Boluk/Ayranci (2019), S. 1 – 19.

gesundheitliche Unbedenklichkeit zu den positiven Eigenschaften eines Polyamids.¹³ Neben Polyamid 6 (PA6), dem in dieser Arbeit beschriebenen und untersuchten thermoplastischen Polykondensat, gibt es noch eine ganze Reihe anderer Polyamide, welche in Domininghaus (2012) beschrieben werden, die hier jedoch nicht genauer erläutert werden.

1938 gelang es in Deutschland zum ersten Mal Paul Schlack in PA6 die Eigenschaften des damals beliebten Nylons ohne Patentsverletzung zu reproduzieren, welches dafür bekannt war, dass es sich aufgrund seiner guten Eigenschaften zur ersten synthetischen Faser verarbeiten ließ. In weiterer Folge wurden dann auch höhermolekulare PA6 Typen entwickelt, welche sich hervorragend als Formmasse zum Extrudieren oder Spritzgießen technischer Formteile eigneten. Ordnet man die Polyamide nach Homopolyamiden und Copolyamiden, findet sich PA6 als aliphatisches Polyamid bei ersteren wieder. Polyamide dieser Art lassen sich durch eine einzige Wiederholeinheit beschreiben. Copolyamide werden dagegen aus mehreren Polyamid bildenden Monomeren synthetisiert. Die in Abbildung 2 dargestellte Amid-Gruppe ist Grundstein sämtlicher Polyamide und findet sich in jeder Strukturformel wieder. Sie verbindet den Anfang und das Ende eines aufgesprengten Ringes.¹⁴



Abbildung 2: Amid-Gruppe der Polyamide, Quelle: Domininghaus (2012), S. 609.

Verantwortlich für die Temperaturformbeständigkeit, den hohen E-Modul sowie die Zähigkeit ist die Wasserstoff-Brückenbildung zwischen benachbarten Molekularketten, welche durch den starken polaren Charakter der *CONH*-Gruppe verursacht wird. Je größer das Verhältnis von *CH*₂-Gruppen zu *CONH*-Gruppen, desto mehr nimmt auch die charakteristische Wasseraufnahmefähigkeit der Polyamide ab. Vergrößert sich der Abstand der Amid-Gruppen schwinden die zwischenmolekularen Kräfte, was die Schmelztemperatur erniedrigt. Bei den meisten Thermoplasten ist die Beeinflussung der Kristallinität nur bedingt durch eine Variabilität der Verarbeitungsbedingungen möglich. Bei PA6 hingegen lässt sich diese je nach Abkühlgeschwindigkeit zwischen 10 % und 60 % variieren. Schnellere Abkühlgeschwindigkeiten

Kurz- zeichen	Strukturformel	Dichte in g/cm³	<u>CH2</u> CONH Verhältnis	max. Wasser- aufnahme in Luft bei 23°C 50 % r.F. in %	Schmelz- temperatur in °C	Ausgangsprodukt
PA6	$[NH - (CH_2)_5 - CO]$	1,12 – 1,15	5	3,0	230	ε-Caprolactam
PA12	$[NH - (CH_2)_{11} - CO]$	1,01 – 1,04	11	0,7	175	Laurinlactam

Tabelle 1: Basiseigenschaften Vergleich PA6 und PA12, Quelle: in Anlehnung an Baur/Brinkmann/Osswald/Schmachtenberg (2007), S. 528 f.

¹³ Vgl. Domininghaus (2012), S. 604.

¹⁴ Vgl. Domininghaus (2012), S. 605 ff.

¹⁵ Vgl. Baur/Brinkmann/Osswald/Schmachtenberg (2007), S. 526 f.

In Tabelle 1 wird PA6 mit PA12 verglichen, das aufgrund einer höheren Anzahl von Kohlenstoffatomen im Molekül-Grundbaustein unter anderem eine andere Wasseraufnahmefähigkeit und Schmelztemperatur besitzt.

Verarbeiten lässt sich PA6 mit allen für Thermoplaste üblichen Verarbeitungsverfahren. Molekularer Abbau oder die Entwicklung von Gasen oder Dämpfen ist erst ab einer Temperatur von ca. 310°C zu erwarten. Vor der Verarbeitung muss PA6 allerdings, aufgrund seiner stark ausgeprägten hygroskopischen Eigenschaft, vorgetrocknet werden. Detaillierte Informationen über die Wasseraufnahme und Trocknung von PA6 sind in Kapitel 2.3 zu finden.

Werden die Verarbeitungsempfehlungen eingehalten, sind sämtliche PA-Typen geruchslos. Auch aus physiologischer Sicht sind alle Polyamide gut zu verwenden. Aufgrund ihrer Gewebeverträglichkeit eignen sie sich zum Beispiel zum Herstellen von Prothesen.¹⁶

PA6 eignet sich hervorragend zur Herstellung von Lagern, Zahnrädern, Rollen, Verkleidungen, Gehäuseteilen, Ventilatoren, um hier nur einige zu nennen. Da sich, je nach Verarbeitungsgeschwindigkeit, zwischen 4 % und 7 % Volumenkontraktion beim Erstarren zeigt, ist bei dickeren Formteilen allerdings mit Lunkern zu rechnen. Außerdem kommen bei sehr massehaltigen Bauteilen, wie etwa Schiffsschrauben oder großen Laufrollen bis ca. 1000 kg, spezielle Gusspolyamide zum Einsatz, die für diesen Zweck optimiert wurden.

Polyamide eignen sich darüber hinaus hervorragend zur Füllung oder Verstärkung durch Kurzfasern wie etwa Glasfasern, oder Kohlenstoff-Fasern. Aufgrund der Erweichung bei höheren Temperaturen werden, um die Wärmebeständigkeit, die Festigkeit und den E-Modul zu erhöhen, bis zu 50 % Faseranteil hinzugefügt. Auch kommen Zusätze wie Siliciumdioxid oder Talkum zum Einsatz, welche die Steifigkeit erhöhen und gleichzeitig den Verzug und die Schwindungsneigung reduzieren. Polyamide können sogar mit Metallpulver angereichert werden, um zum Beispiel die Wärmebeständigkeit sowie die elektrische Leitfähigkeit zu erhöhen.¹⁷

Brennbarkeit: Bei Polyamiden reicht bereits eine Zündquelle geringer Intensität, um ein Entflammen zu verursachen. Bei PA6 beträgt die Entflammungstemperatur 420°C sowie die Selbstentzündungstemperatur 450°C (getestet nach ASTM D1929).¹⁸

2.3 Wasseraufnahme und Abnahmeverhalten von Polyamid 6

Vor der Beschreibung der Auswirkungen von Feuchtigkeit in Kunststoffen, wird zuerst ein Überblick über die Mechanismen gegeben, denen Wasser in festen Stoffen unterworfen ist, und über die Art und Weise, wie Kunststoffe, im spezielleren PA6, Wasser aufnehmen und wieder abgeben. Begriffe wie Sorption, Hygroskopizität sowie die für das Auf- und Abnahmeverhalten von Wasser relevante Diffusion wie auch

¹⁶ Vgl. Domininghaus (2012), S. 648 ff.

¹⁷ Vgl. Baur/Brinkmann/Osswald/Schmachtenberg (2007), S. 530 – 534.

¹⁸ Vgl. Ortner/Hensler (1995), S. 9.

Konvektion werden näher beleuchtet, und die Grundlagen für das Verständnis des Verhaltens von feuchtem Polyamid geschaffen.

Eine gemeinsame Eigenschaft aller Polyamide ist deren starke Hygroskopizität, doch was bedeutet das? Generell gelten alle Stoffe, die bei nicht voll gesättigter, feuchten Luft Wasser aufnehmen als hygroskopisch. Strenggenommen sind also auch sämtliche Stoffe, die Wasser rein adsorptiv binden, das heißt rein an der Oberfläche, hygroskopisch. Meist lässt man das Adsorptionswasser allerdings außer Acht. Glas zum Beispiel gilt, da sich das Wasser an der Oberfläche in den betrachteten Bereichen von Temperatur und Feuchtigkeit nicht merklich auswirkt, in den meisten Fällen als nicht hygroskopisch. Ausnahmen hierzu sind unter anderem chemische Experimente, bei denen die verwendeten Glasapparaturen für bestimmte Reaktionen ausgeheizt werden müssen, um vollkommen von Wasser befreit zu sein. In diesem Fall wird Glas als hygroskopisch bezeichnet. Der Begriff Hygroskopizität ist also wesentlich klarer eingegrenzt als der umgangssprachlich öfter verwendete Begriff "hygroskopisch", bei dem im Grunde nur die Gewichtszunahme aufgrund von aus meist mittelfeuchter Umgebungsluft aufgenommenem Wasser beschrieben wird. Hygroskopische Stoffe verhalten sich manchmal nicht hygroskopisch, haben also einen nicht-hygroskopischen Zustandsbereich, dem in Wasserdampfdrucksättigung herrscht.¹⁹

Die Hygroskopizität sollte bereits bei der Materialauswahl, beim Design wie auch bei den mechanischen Anforderungen an das Bauteil in Betracht gezogen werden, da der Feuchtegehalt beim Beispiel PA6 eine Schlüsselgröße in Bezug auf Endanwendung und Prozessperformance darstellt. Sowohl Polymerisation, Klebeeigenschaften oder das Verschweißen, wie auch die mechanischen Eigenschaften und die Oberflächengüte hängen von dieser Variable ab.²⁰

Die Wasseraufnahme von Polyamid, im Besonderen von PA6, hängt von den Umwelteinflüssen ab. Steigt die relative Umgebungsluftfeuchtigkeit, steigt auch der Feuchtegehalt im Kunststoff.²¹

Dieser einfache Zusammenhang lässt sich grafisch gut anhand der Sorptionsisotherme von PA6 darstellen. Wie in Abbildung 3 zu erkennen, kann der Feuchtegehalt von PA6, bei entsprechender Lagerung, über 7 % annehmen. Eine genaue Erläuterung des Begriffs Sorptionsisotherme findet sich im Kapitel 2.3.1 wieder.

¹⁹ Vgl. Stahl (1980), S. 23 f.

²⁰ Vgl. Abacha/Kubouchi/Sakai (2009), S. 245 f.

²¹ Vgl. Ferreño/Carrascal/Ruiz/Casado De Prado (2001), S. 420.



Abbildung 3: Sorptionsisotherme von BASF Ultramid® B3S (PA6), Quelle: Kast/Bonten (2015).

Der maximale Feuchtegehalt, also der gesättigte Zustand, den ungefülltes PA6 bei Normklima im nicht tropischen Raum also bei 23°C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit annehmen kann, schwankt zwischen 2,5 % und 3,5 % je nach Kunststoffzusammensetzung. Erhöht man den Faseranteil, füllt den Kunststoff zum Beispiel mit 30 % Glasfasern, verringert sich die mögliche Wasseraufnahme auf 1,6 % - 2,2 %.²²

Wie gelangt nun das Wasser in den Kunststoff? Da die Amid-Gruppen von PA6 eine große Ähnlichkeit zu Wasser haben, können die Wassermoleküle die PA Ketten unterbrechen, wie in Abbildung 4 dargestellt ist. Dadurch kommt es zu einer Plastifizierung des Materials. Die entstehende Schwellung kann innere Spannungen hervorrufen und führt somit unweigerlich zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Polyamids.²³



Abbildung 4: Absorption von Wassermolekülen von PA6, Quelle: Shinzawa/Mizukado (2020), S. 2 (leicht modifiziert).

2.3.1 Sorption

Feststoffe können andere Substanzen aus einer dispersen Phase aufnehmen und binden. Gase wie Luft können somit also zum Beispiel von Kunststoffen aufgenommen werden. Diesen Vorgang nennt man

²² Vgl. Domininghaus (2012), S. 634.

²³ Vgl. Silva/Tognana/Salgueiro (2013), S. 158.

Sorption. Einen Überblick über mögliche Beziehungen zwischen dem Sorptiv (gebundener Stoff) sowie dem Sorbens (aufnehmender Stoff) liefert Abbildung 5. Sorption kann entweder nach dem Bindungsmechanismus und der Bindungsfestigkeit, nach dem Sorptionsort oder nach der Sorptionsrichtung eingeteilt werden. Aufgrund einiger ungewöhnlicher Eigenschaften des Wassers entstehen zwischen dem Wasserdampf der Luft und den Feststoffen intensive Wechselwirkungen. An die polaren Zentren der Feststoffoberflächen können sich Wassermoleküle anlagern, da diese permanente Dipole sind. Außerdem existiert Wasser in den meisten Fällen bei standardatmosphärischen Bedingungen in mehr als nur einem Aggregatzustand. Somit sind die Oberflächen nahezu aller festen Materialien mit einer gewissen Anzahl von Wassermolekülen belegt. Je poröser das Material, desto größer die Menge an adsorbiertem Wasser. Durch den notwendigerweise vom Wasser beanspruchten Raum kommt es bei Sorptionsvorgängen unweigerlich zu Volumenänderungen.²⁴

Die Wasserdampfsorptionsisotherme kurz Sorptionsisotherme beschreibt den Zusammenhang zwischen einem bestimmten Wassergehalt einer Probe und einer gegebenen Temperatur sowie der relativen Luftfeuchtigkeit. Genauer gesagt ist sie gleichbedeutend mit dem Feuchtegleichgewichtszustand, der sich bei konstanter Temperatur zwischen Umgebungsluft und Material einstellt.²⁵

Ein Beispiel hierfür ist die Sorptionsisotherme aus Abbildung 3 von PA6 in Kapitel 2.3. Hier kann man dass bei konstanter relativer Luftfeuchtigkeit von 50 % der Kunststoff seinen erkennen, Gleichgewichtszustand bei etwa 2,8 % Feuchte erreicht. Je nach Zusammensetzung kann dieser Wert wie zuvor erwähnt bis etwa 3,5 % ansteigen. Wie schnell PA6 Feuchtigkeit aus der Luft aufnimmt beziehungsweise wie lange es dauert, bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist, hängt primär von der relativen Umgebungsluftfeuchtigkeit und nur zu einem kleinen Teil von der Temperatur ab. Steigende die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme, Temperaturen erhöhen zwar nicht aber die Gleichgewichtsfeuchte. Außerdem spielen die Bauteildicke und Geometrie eine Rolle. Generell ist die Wasseraufnahmerate höher bei höherer Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie dünnwandigen Bauteilen. Die Wasseraufnahme beginnt an der Oberfläche der Bauteile. Sobald die Oberfläche mit Feuchtigkeit gesättigt ist, wird die Absorptionsrate vom Diffusionsprozess bestimmt. Nach einiger Zeit erreicht der Kunststoff sein Feuchtegleichgewicht und der Feuchtegehalt bleibt nahezu konstant. Je nach Bauteilgröße und Beschaffenheit kann es bei Standardatmosphäre im nicht tropischen Raum, also 23°C und 50 % relative Luftfeuchtigkeit mehr als 250 Tage dauern, bis es zum Gleichgewichtszustand kommt.²⁶

²⁴ Vgl. Stahl (1980), S. 22 f.

²⁵ Vgl. Stahl (1980), S. 24 f.

²⁶ Vgl. Lanxess Corporation (2005), Online-Quelle [09.09.2020], S. 1.



Abbildung 5: Einteilungsarten und mögliche Beziehungen zwischen Sorptiv und Sorbens (w... Materialfeuchtegrad, φ... relative Umgebungsluftfeuchtigkeit), Quelle: Stahl (1980), S. 22.

2.3.2 Stofftransport

Der Stofftransport, in diesem speziellen Fall der Stofftransport von Wasser, spielt in der Trocknung von Feststoffen eine große Rolle. Der Stofftransport ist ein klassischer Ausgleichsvorgang. Die Verschiebung von chemischen Inhaltsstoffen in einem Stoffgemisch findet statistisch gesehen öfter von einem Gebiet hoher-zu einem Gebiet niedriger Konzentration statt. Somit kommt es nach einer gewissen Zeit zum Ausgleich. Der Hauptmotor für die Geschwindigkeit, in der der Stofftransport von statten geht, ist das Konzentrationsgefälle im Stoffgemisch. In den nächsten zwei Unterkapiteln werden die zwei generell verschiedenen physikalischen Arten des Stofftransportes Diffusion sowie Konvektion beleuchtet. In realen Systemen laufen die beiden Stofftransportmechanismen meist in Kombination ab. Die Konvektion überwiegt im fluiden Medium (Umgebungsluft), die Diffusion dagegen an den Phasengrenzflächen und im festen Material. Interessant ist, dass die Geschwindigkeit des gesamten Transportvorgangs bei den

meisten realen Vorgängen eher von der Diffusion bestimmt wird, obwohl diese deutlich langsamer ist als die schnellere Konvektion, welche den größten Teil des fluiden Mediums erfasst.²⁷

2.3.2.1 Diffusion

Allgemein beschreibt die Diffusion, wenn die kleinsten Teilchen eines Stoffes, durch einen anderen ruhenden Stoff, hindurch oder in diesen hinein wandern und einen Ausgleich des Konzentrationsunterschiedes der vorhandenen Teilchen bewirken.²⁸

Die Prozessgeschwindigkeit, in der dieser Masseausgleichsprozess abläuft, kann unter anderem mit dem Diffusionskoeffizienten ausgedrückt werden. Auch wenn einige Ansätze zur Berechnung des Diffusionskoeffizienten auf Basis des ersten sowie zweiten Fick'schen Gesetzes existieren, wird für Simulationen häufig auf experimentell bestimmte Werte zurückgegriffen. Zur experimentellen Bestimmung der Diffusionskoeffizienten können die relativen Gewichtsänderungen einer Kunststoffprobe in Abhängigkeit von der Einlagerungszeit herangezogen werden. Der Diffusionskoeffizient kann schließlich aus der Steigung der Gewichtsänderung über die Quadratwurzel der Zeit ermittelt werden.²⁹

Da die experimentelle Ermittlung ein ruhendes System ohne störende konvektive Vorgänge voraussetzt, können die ermittelten Werte für den Koeffizienten in der Realität eine große Streuung aufweisen. Abweichungen bis 20 % bei anscheinend gleichen Messbedingungen sind keine Seltenheit laut Christen (2010). Wenn der Diffusionskoeffizient für eine bestimmte Temperatur und die Aktivierungsenergie bekannt sind, kann mit Hilfe der Arrhenius-Beziehung in Formel (1) der Diffusionskoeffizient für jede andere Temperatur berechnet werden. Die dafür notwendige Aktivierungsenergie kann aus einem zweiten Diffusionskoeffizient Temperatur Paar abgeschätzt werden.³⁰

		$D_1/{\rm m}^2{\rm s}^{-1}$	Bekannter Diffusionskoeff. bei Temperatur T_1
	(1)	$D_2/m^2 s^{-1}$	Unbekannter Diffusionskoeff. bei Temperatur T_2
$D_2 = D_1 e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}$		$E_a/\mathrm{kg}\mathrm{m}^2\mathrm{s}^{-2}\mathrm{mol}^{-1}$	Aktivierungsenergie der Diffusion
		$R/m^2 s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$	Allgemeine Gaskonstante
		<i>T</i> ₁ /K	Temperatur des bekannten Diffusionskoeff. D_1
		T_2/K	Temperatur des unbekannten Diffusionskoeff. D2

2.3.2.2 Konvektion

Wie bereits bei der experimentellen Ermittlung des Diffusionskoeffizienten beschrieben, wäre ein Stofftransport durch reine Diffusion nur mit einem absolut ruhenden und wirbelfreien Stoffsystem möglich. In der Verfahrenstechnik kommen jedoch hauptsächlich strömende Medien zum Einsatz. Diese Strömungen sind außerdem meistens turbulent, was dazu führt, dass sich die Stoffbereiche des Mediums in alle Richtungen verschieben und ständig ihre Lage wechseln. Diese Stoffbereiche werden Turbulenzballen genannt. Haben sie unterschiedliche stoffliche Zusammensetzungen, werden diese im

²⁷ Vgl. Christen (2010), S. 265 ff.

²⁸ Vgl. Christen (2010), S. 265.

²⁹ Vgl. Lutterbeck (2016), S. 20.

³⁰ Vgl. Christen (2010), S. 268 – 271.

Gesamtsystem schnell ausgeglichen. Diesen Transportmechanismus nennt man Konvektion. Konvektion kann durch die Einwirkung äußerer Kräfte wie etwa Ventilation oder durch die natürlichen inneren Kräfte eines Mediums wie einem Dichteunterschied entstehen. Wird die Konvektion künstlich hervorgerufen spricht man von einer so genannten erzwungenen Konvektion.³¹

2.4 Feuchte Luft – Ein ideales Gas-Dampf-Gemisch

In diesem Kapitel geht es primär um ein Grundverständnis verwendeter Begrifflichkeiten wie dem Sättigungspartialdruck, der absoluten wie auch relativen Feuchte und der Wasserbeladung. Wenn nicht anders vermerkt basiert die in diesem Kapitel niedergeschriebene Theorie auf Baehr (2005).³²

Ein Gemisch aus Wasser und trockener Luft wird feuchte Luft genannt. In diesem Fall bildet die Zusammensetzung der Luft (CO₂, Ar, O₂ und N₂) das Gas und das Wasser den Dampf. Abhängig von der Temperatur kann ein Gas eine bestimmte Menge Wasser aufnehmen. Bei Überschreitung des Maximalwertes kondensiert Wasser in fester oder flüssiger Form aus und man spricht von gesättigter feuchter Luft. Wichtige Größen sind der Partialdruck des Wassers, auch Dampfdruck, und der Sättigungsdruck des Wassers, Sättigungsdampfdruck. Der Sättigungsdampfdruck p_{W_S} ist der Partialdruck des Wasserdampfs, bei dem der Maximalwert der gasförmig aufnehmbaren Wassermasse erreicht wurde. Von einem gesättigten Gemisch wird also bei $p_W = p_{W_S}$ gesprochen. Ohne vorhandenes Kondensat wird von ungesättigter feuchter Luft gesprochen, ungesättigt bedeutet immer $p_W < p_{W_S}$. Für technische Anwendungen bei Umgebungstemperatur und Umgebungsdruck kann das Gas in guter Näherung als ideales Gas angenommen und mit dem Gesetz von Dalton beschrieben werden.

	m_W/kg	Masse des Wasserdampfs
	p_W/Pa	Partialdruck des Wasserdampfs
(2)	V/m ²	Volumen
	$R_W/kgm^2s^{-2}mol^{-1}K^{-1}$	Gaskonstante von Wasserdampf
	<i>Т/</i> К	Temperatur
	(2)	m_W/kg p_W/Pa (2) V/m^2 $R_W/kgm^2s^{-2}mol^{-1}K^{-1}$ T/K

Erhöht man den Wasserdampfgehalt isotherm, vergrößern sich die Masse m_W wie auch der Partialdruck p_W bis zu einem Maximalwert.

Der absolute Wassergehalt im Luftgemisch, also die tatsächlich enthaltene Menge an Wasser, wird laut Baehr (2005) als absolute Feuchte bezeichnet und als Verhältnis der Masse m_W des Wasserdampfs zum Volumen *V* der feuchten Luft ausgedrückt:

$$\rho_W = \frac{m_W}{V}$$
(3) $\rho_W / \text{kg m}^{-3}$
Absolute Feuchte

Setzt man Gleichung (2) hier ein, ist ein einfacher Zusammenhang zwischen Partialdruck des Wasserdampfs und der absoluten Feuchte erkennbar.

³¹ Vgl. Christen (2010), S. 275 f.

³² Vgl. Baehr (2005), S. 283 – 291.

$$\rho_W = \frac{p_W}{R_W T} \tag{4}$$

Da die absolute Feuchte temperaturabhängig ist, kann nun der Maximalwert der absoluten Feuchte, bei gesättigter Luft mit $p_W = p_{W_S}(T)$ als folgenden Zusammenhang ausgedrückt werden.

$$\rho_{W_s} = \rho_{W_s}(T) = \frac{p_{W_s}(T)}{R_w T}$$
(5)
$$\begin{array}{c} \rho_{W_s}/\text{kg m}^{-3} \\ p_{W_s}/\text{Pa} \end{array}$$
Absolute Feuchte bei Sättigungsdampfdruck Sättigungsdampfdruck

Die relative Feuchte, das in dieser Arbeit hauptsächlich verwendete Maß, beschreibt das Verhältnis der absoluten Feuchte ρ_W zu ihrem temperaturabhängigen, maximal möglichen Wert ρ_W .

$$\varphi = \frac{\rho_W(T, p_W)}{\rho_{W_s}(T)}$$
 (6) φ Relative Luftfeuchtigkeit

Alternativ kann diese Größe aus dem Verhältnis der zwei Partialdrücke des Wasserdampfs bestimmt werden:

$$\varphi = \frac{p_W}{p_{W_S}(T)} \tag{7}$$

Ein weiterer wichtiger Begriff ist die Wasserbeladung. Diese dient dazu, den Wassergehalt der Luft auch im gesättigten Zustand zu beschreiben. Bezogen wird die Masse des Wassers in fester, flüssiger oder gasförmiger Form auf die Masse der trockenen Luft.

$$X = \frac{m_W}{m_L}$$
(8) X Wasserbeladung
 m_L Masse der trockenen Luft

Im ungesättigten Zustand kann aus dem Gesetz von Dalton die Masse der trockenen Luft folgendermaßen geschlussfolgert werden:

$$m_{L} = \frac{p_{L}V}{R_{L}T} = \frac{(p - p_{W})V}{R_{L}T}$$
(9)
$$m_{L}/\text{kg}$$
Masse der trockenen Luft
Partialdruck des Wasserdampfs
$$m_{L}/\text{kg} \text{ m}^{2}\text{s}^{-2}\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$$
Gaskonstante von trockener Luft
$$p/\text{Pa}$$
Luftdruck

Umgeformt und eingesetzt in Gleichung (8) erhalten wir für die Wasserbeladung den folgenden Zusammenhang.

$$X = \frac{m_W}{m_L} = \frac{R_L}{R_W} \frac{p_W}{p - p_W}$$
(10)

Um nun von der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Wasserbeladung oder umgekehrt schließen zu können und mit dem Einsatz der Gaskonstanten R_L für Luft (287,05 kg m²s⁻²mol⁻¹K⁻¹) und R_W für Wasser (461,52 kg m²s⁻²mol⁻¹K⁻¹) nutzen wir Gleichung (7):

$$X = 0,622 \frac{p_{W_s}(T)}{\frac{p}{\varphi} - p_{W_s}(T)}$$
(11)
$$\varphi = \frac{X}{0,622 + X} \frac{p}{p_{W_s}(T)}$$
(12)

Ist es erforderlich bei gegebener Temperatur *T* und relativer Luftfeuchtigkeit φ die absolute Feuchte und oder Wasserbeladung auszurechnen, muss zuerst der Sättigungsdampfdruck ermittelt werden. Eine Möglichkeit diesen Wert zu ermitteln ist die Dampfdruckgleichung von Antoine, die bereits 1888 definiert wurde:³³

$$p_{W_S} = 10^{A - \frac{B}{C + T}}$$
 (13)
 A, B, C Antoine Konstanten
 $T/^{\circ}$ C Temperatur

Die Parameter A, B und C sind stoffabhängige Konstanten und für Wasser folgendermaßen definiert, um den Sättigungsdampfdruck in Millimeter Quecksilbersäule (mmHg) herauszubekommen.

Α	В	С
8,07131	1730,63	233,426

Tabelle 2: Sättigungsdampfdruck Gleichungskonstanten für Wasser zwischen 0 und 100°C, Quelle: Smallwood (2012), S. 301.

Anschließend muss das Ergebnis aus Gleichung (13) noch mit 133,32 multipliziert werden, um den Sättigungsdampfdruck in Pascal herauszubekommen. Dabei ist darauf zu achten, dass diese Werte nur unter dem Normalsiedepunkt Gültigkeit haben. Darüber und für andere Stoffe sind anderer Parametersätze zu verwenden.

2.5 Auswirkungen von Feuchtigkeit in Polyamid auf die Verarbeitung und das gefertigte Bauteil

Die Auswirkungen der Feuchtigkeit des Filaments auf das 3D-gedruckte Bauteil sind noch nicht vollständig erforscht. Aus diesem Grund wird hier auch auf Auswirkungen von Feuchtigkeit in Polyamid bei anderen Verarbeitungsarten wie etwa Spritzguss zurückgegriffen.

Stoffe, die Wasser aufnehmen, vergrößern dadurch nicht nur ihre Masse und ihr Volumen, sondern auch ihre mechanischen Eigenschaften. Speziell bei PA6 wurde festgestellt, dass sich die Absorption von Wasser stark auf dessen mechanische Eigenschaften auswirkt. Gleichzeitig werden Bauteile aus Kunststoff häufig Bedingungen ausgesetzt, welche zu einer Wasseraufnahme führen können. Untersuchungen an einem spanischen Hochgeschwindigkeitszug haben ergeben, dass verbaute Kunststoffteile einen Feuchtegehalt von bis zu 2,85 % aufweisen. Dies zeigt, wie wichtig es ist, die Auswirkungen von Feuchtigkeit in Kunststoffen zu kennen.³⁴

Um zu veranschaulichen, wie sich einerseits vorgetrocknetes und andererseits konditioniertes PA6 Filament beim 3D-Druck verhält und warum die Trocknung von PA6 vor der Verarbeitung angestrebt werden sollte, wurde drei Mal das gleiche Bauteil mit den exakt gleichen Prozessparametern, aber unterschiedlichen Wassergehalten im Kunststoff gedruckt. Links in Abbildung 6 ist die auf 0,35 % konditionierte Filamentprobe zu sehen. Das Bauteil mittig im Bild wurde mit Filament mit einem Wassergehalt von 0,84 % gedruckt und das Bauteil rechts mit 1,56 %.

³³ Vgl. Stephan/Schaber/Stephan/Mayinger (2009), S. 265.

³⁴ Vgl. Ferreño/Carrascal/Ruiz/Casado De Prado (2001), S. 420.



Abbildung 6: PA6 3D-Druck mit unterschiedlich feuchtem Filament (links: 0,35 %, mittig 0,84 %, rechts: 1,56 %), Quelle: Eigene Darstellung.

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Feuchte auf die Glasübergangstemperatur, die Dimension und die Festigkeit von Polyamid-Werkstoffen beschrieben. Anschließend wir noch auf besonders für den 3D-Druck relevante Effekte wie Lückenbildung und Veränderung der Durchflussmenge eingegangen.

2.5.1 Änderung der Glasübergangstemperatur

Die Glasübergangstemperatur oder auch der Glasübergang ist jene Temperatur, bei der amorphe Polymere teilweise oder ganz vom gummielastischen Zustand in den glasigen oder hartelastischen, spröden Zustand übergehen oder umgekehrt.³⁵

Grundsätzlich kann ein direkter Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt des Polyamids und der Glasübergangstemperatur beobachtet werden. Mit steigender Feuchtigkeit sinkt die Glasübergangstemperatur. In Zahlen beschrieben sinkt die Glasübergangstemperatur bei einer Materialfeuchte von 3,5 % von 60°C bei Erhöhung der Feuchte auf 10 % auf unter 5°C.³⁶ Die Eigenschaftsänderungen, welche durch die Reduktion der Glasübergangstemperatur ausgelöst werden, sind als weichmachende Wirkung von Wasser bekannt. Da diese in der Praxis nicht vollkommen vermieden werden kann, sollte sie bei der Konstruktion der Bauteile berücksichtigt werden.

Nimmt Polyamid zu viel Wasser auf kann es bis zur Hydrolyse kommen, dass also die Molekülketten durch die Wasser-Einlagerungen abgebaut werden.³⁷

Polykondensate sind aufgrund ihrer Kondensatreaktionen sehr anfällig für hydrolytische Effekte. Gerade bei nicht Vorhandensein von sauren oder alkalischen Katalysatoren erhöht sich die Wahrscheinlichkeit eines hydrolytischen Abbaus. Hier wird wieder deutlich, wie wichtig eine Trocknung des Materials vor der Verarbeitung ist. Gelangt das Polyamid getrocknet in die Plastifiziereinheit, kann ein hydrolytischer Abbau meist verhindert werden.³⁸

³⁵ Vgl. Ehrenstein (2011), S. 192.

³⁶ Vgl. Domininghaus (2012), S. 616 f.

³⁷ Vgl. Heyn/Bonten (2014), S. 177.

³⁸ Vgl. Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 205.

2.5.2 Veränderung der Festigkeit

In Abbildung 7 sieht man ein klassisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PA6, bei dem man den Weichmachereffekt vom eingedrungenen Wasser sehr gut erkennen. Während durchgetrocknete Prüfkörper bei 0,2 % Feuchtegehalt Spannungen bis etwa 70 MPa aushalten bis sie nachgeben, erkennt man bei luftfeuchten sowie nassen Proben einen viel runderen Verlauf. Luftfeucht bedeutet in diesem Fall 3 % Wassergehalt und nass 8 %. Während der trockenen Probe vor der Untersuchung die Feuchtigkeit entzogen wurde, wurde die luftfeuchte Probe bei Normalklima für Konditionierung und Prüfung nach DIN EN ISO 291 konditioniert. Um einen Wassergehalt über 3 % zu erreichen wurde die dritte Probe beschleunigt in Wasser konditioniert.³⁹



Abbildung 7: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von trockenem, luftfeuchtem und nassem PA6, Quelle: Ehrenstein (2011), S. 229 (leicht modifiziert).

Trägt man im Diagramm nicht Spannung und Dehnung, sondern Elastizitätsmodul und Streckgrenze auf, siehe Abbildung 8, kann man erkennen, dass sich beide Werte im Bereich der Wassersättigung von PA6 einem konstanten Wert annähern. Die Werte aus Abbildung 7 und Abbildung 8 unterscheiden sich ein wenig, da diese aus unterschiedlichen Experimenten stammen. Dies kann unter anderem an einer etwas anderen Materialzusammensetzung liegen. Die Hauptaussage ist aber in beiden Fällen die gleiche. Je höher der Wassergehalt, desto weicher der Kunststoff.

³⁹ Vgl. Ehrenstein (2011), S. 228 f; DIN EN ISO 291 (2008), S. 5.



Abbildung 8: Elastizitätsmodul und Streckgrenze in Abhängigkeit vom Wassergehalt von PA6, Quelle: Lechner/Noack/Thöne/Amed/Schmidt/Will (2016), S. 1275 (leicht modifiziert).

2.5.3 Dimensionsänderungen

Ein weiterer nicht zu unterschätzender Effekt aufgrund der hohen Hygroskopizität von PA6 ist die durch die Wasseraufnahme verursachte Dimensionsänderung. Dies ändert nicht nur die Masse und somit zum Beispiel die Durchflussmenge durch die Düse bei extrudiertem Material wie etwa 3D Druck aufgrund der unterschiedlichen Filamentdurchmesser, sondern auch die Maßgenauigkeit vom fertigen Bauteil. Für jedes Prozent an Feuchtigkeitszuwachs im Material nimmt das Volumen zwischen 0,2 % und 0,3 % zu und kann somit massive Auswirkungen auf die Prozessparameter in der Verarbeitung haben.⁴⁰ Genauere Informationen hierzu folgen am Ende dieses Kapitels.

2.5.4 Änderung der Kerbschlagzähigkeit

Betrachtet man die Kerbschlagzähigkeit abhängig von Temperatur und Wassergehalt, geht aus Abbildung 9 hervor, dass diese gerade bei steigendem Wassergehalt und mit der Raumtemperatur stark zunimmt. Es sind 6 Diagramme dargestellt, links von unten nach oben die Schlagzähigkeit bei -20°C, bei 0°C und bei Raumtemperatur, rechts von unten nach oben trocken, feucht (2 %) und nass (7 %). Im Minusgradbereich, in diesem Fall bei -20°C, sind die Veränderungen der Schlagzähigkeit minimal, unabhängig von der Feuchtigkeit der Proben. Schaut man sich die Steigungen der temperaturabhängigen Kurven an sieht man, dass der Anstieg im nassen Zustand am stärksten ist. Bei trocknen Proben hingegen hat die Temperatur fast keinen Einfluss auf die Schlagzähigkeit.⁴¹

⁴⁰ Vgl. Jia/Kagan (2001), S. 2.

⁴¹ Vgl. Domininghaus (2012), S. 628 f.



Abbildung 9: Mit Doppel-V-Kerbe ermittelte Kerbschlagzähigkeit von PA6 in Abhängigkeit von Temperatur (rechts) und Wassergehalt (links), Quelle: Domininghaus (2012), S. 629.

2.5.5 Veränderung der Viskoelastizität

Auch beim Relaxationsprozess, welcher in Abbildung 10 dargestellt ist, ist der Unterschied zwischen nassen und trockenen Prüfkörpern klar erkennbar. Dargestellt ist die Zugspannung σ über der Zeit, die trockenen Proben in schwarz, die feuchten in rot und die gesättigten in blau. Getestet wurden neun Proben, je drei mit demselben Wassergehalt. Vorgetrocknet, gesättigt unter 50 % relativer Luftfeuchtigkeit, also ein Wassergehalt von etwa 2-3 % sowie nassgesättigt bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit. Die Proben wurden um 1,25 % gestreckt und 300 Sekunden lang vermessen. Zu erkennen ist, dass die nassen Proben ein deutlich höheres viskoelastisches Verhalten zeigen als die trockenen. Die Spannung, welche bei den trockenen Proben auftritt, ist wesentlich höher als bei den höher gesättigten.⁴²

⁴² Vgl. Sharma/Sambale/Stommel/Maisl/Herrmann/Diebels (2019), S. 309 f.



Abbildung 10: Relaxionsprozess von trockenen, feuchten und nassen PA6 Proben, Quelle: Sharma/Sambale/Stommel/Maisl/Herrmann/Diebels (2019), S. 310 (leicht modifiziert).

2.5.6 Lückenbildung

Untersuchungen betreffend die Effekte von preprozess-gebundener Feuchtigkeit in Polyurethane von Garces u. a. (2019) zeigen dramatische Auswirkungen auf die Druckergebnisse bei Aussetzung des Kunststoffes an die Feuchtigkeit der Umgebung bereits nach zehn Minuten. Durch die in der Phasentrennung im Kunststoff eingeschlossenen Wassermoleküle entstehen Lücken im Material, wenn das Wasser im Extrusionsprozess verdampft. Diese Lücken führen unweigerlich zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften und somit zur Schwächung des Bauteils.⁴³

2.5.7 Veränderung der Durchflussmenge

Wie bereits erwähnt kommt es bei Wasseraufnahme natürlicherweise zu einer Ausdehnung des Materials.

Um einen sauberen Druck und somit auch ein qualitativ hochwertiges Bauteil zu bekommen, ist ein konstanter Mengendurchfluss am Extruder des FFF-Druckers wichtig. Die Folgen von Filamenten variabler Dicke können immens sein, da die meisten Drucker nur die Vorschublänge regeln und nicht die Vorschubmasse. Ist das Filament dicker oder dünner als in den Prozessparametern vorgesehen, kommt es zur sogenannten Über- bzw. Unterextrusion. Dies führt unweigerlich zu Fehlern im Bauteil.

Bei einer Filament-Studie vom Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI) in Zusammenarbeit mit der iGo3D GmbH wurden 2016 Mengendurchflusstests (MFR) mit unterschiedlich konditionierten 3D-Druck-Filamenten unterschiedlicher Farbe durchgeführt. Beim Kunststoff handelte es sich um PLA. Die Auswirkungen verschiedener Farbenzusätze sind für diese Arbeit zwar nicht relevant, dennoch kann aus den Ergebnissen eine allgemeine Erkenntnis für hygroskopische Kunststoff-Filamente, zu denen auch das in dieser Arbeit beschriebene PA6 gehört, getroffen werden.

⁴³ Vgl. Garces/Aslanzadeh/Boluk/Ayranci (2019), S. 16.

Bei der Prüfung von drei Filamentproben, welche alle verschieden konditioniert wurden, konnten Durchflussmengenschwankungen von bis zu 200 % beobachtet werden. Abbildung 11 zeigt die Art der Konditionierung sowie die Durchflussmenge der drei Proben. Die Tests wurden gemäß DIN EN ISO 1133 durchgeführt.⁴⁴

Durchflussschwankungen können außerdem Einfluss auf die Druckbetthaftung der Bauteile haben. So könnte die erste Schicht, welche für die Haftung ausschlaggebend ist, Lücken aufweisen.



Abbildung 11: Extrusions Durchflussmengen bei unterschiedlicher Konditionierung von PLA, Quelle: in Anlehnung an iGo3D GmbH (2016), Online-Quelle [02.11.2016].

2.6 Trocknung von Feststoffen

Beim Trocknungsprozess allgemein muss die Entropievermehrung durch eine mechanische oder thermische in das System eingebrachte Energie, rückgängig gemacht werden. Da das Wasser im Feststoff nicht ungebunden vorliegt, müssen die Bindungskräfte überwunden werden, welche mit zunehmender Trocknung, also abnehmendem Wassergehalt des Feststoffes, zunehmen. Grundsätzlich wird der Aufwand einer Feststofftrocknung zwar vor allem durch die Verdampfungswärme und die Wärmeverluste bestimmt. Für das Verständnis des gesamten Trocknungsablaufs ist jedoch auch die Bindungsenergie wesentlich. Trockenvorgänge sind langsame Prozesse, im Feststoff stellt sich jedoch sehr schnell an jedem Ort ein Gleichgewicht ein. Aus diesem Grund kann man von einem örtlichen thermodynamischen Gleichgewicht ausgehen. Eine Kopplung mit der Geschwindigkeit des Transportvorgangs und dem sich einstellendem Gleichgewicht kann also außer Betracht gelassen werden.⁴⁵

2.6.1 Einführung in die Feststofftrocknung

Kunststofftrocknung spielt vor allem seit der Entwicklung des Spritzgusses eine wichtige Rolle. Trotz der mittlerweile sehr ausgereiften und intelligenten Trocknungsanlagen kommt es immer wieder zu Problemen durch zu hohe Feuchtigkeit oder gar Übertrocknung. Hygroskopische Kunststoffe werden im Normalfall bereits vom Hersteller vorgetrocknet geliefert. Bei den Kennwerten, die jeder Kunststoffhersteller für seine

⁴⁴ Vgl. iGo3D GmbH (2016), Online-Quelle [02.11.2016].

⁴⁵ Vgl. Krischer/Kast (1978), S. 3 f.

Materialien bekannt gibt, wie etwa eine empfohlene Verarbeitungstemperatur, wird meist auch die maximale Verarbeitungsfeuchte sowie eine empfohlene Trocknungstemperatur angegeben. Typischerweise werden die Kunststoffe genau auf diesen vom Hersteller angegebenen Wert vorgetrocknet. Trotz der herstellerseitigen Bemühungen kann es zu höheren Feuchten, zum Beispiel aufgrund Verpackungsschäden und somit der Aussetzung an die Atmosphäre, kommen. Da sich zwischen der Feuchte im Kunststoff und der relativen Luftfeuchtigkeit ein Gleichgewicht bildet, kann der dadurch entstandene Feuchtegehalt im Kunststoff die Produktion gefährden. Aus diesem Grund werden selbst frisch angelieferte Kunststoffe in der Regel selbst vom Verarbeiter noch einmal vorgetrocknet. Man kann den Feuchtegehalt eines Kunststoffes X als Differenz der Gesamtmasse des beladenen Kunststoffs und der Trockenmasse im Verhältnis zur Gesamtmasse darstellen, wie in Formel (14) zu sehen ist:⁴⁶

 $X = \frac{m_{total} - m_{trocken}}{m_{total}} 100 \%$ (14) $\frac{m_{total}}{m_{tocken}} kg$ Feuchtegehalt eines Kunststoffes Gesamtmasse des beladenen Kunststoffs Masse des getrockneten Kunststoffs

Auch ohne Beschädigungen der Verpackungseinheiten kann durch längere Lagerzeiten Wasser durch die Verpackungen diffundieren und somit den Kunststoff mit Wasser anreichern. Je nach Hygroskopizität und Trockenheitsgrad des Kunststoffes wie auch der Umgebungsfeuchte, kann es bei angebrochenen Gebinden bereits nach wenigen Minuten zu massiver Wasseraufnahme kommen. Als Offenzeit wird die Zeit genannt, die welche stark hygroskopische Kunststoffe offen an der Raumluft verbringen dürfen, bevor sie verarbeitet werden. Sie beträgt ca. 10 - 60 Minuten.⁴⁷



Abbildung 12: Trocknungsprozess vom feuchten bis zum trockenen Gut, Quelle: Christen (2010), S. 460.

⁴⁶ Vgl. Kast/Bonten (2015), S. 1 f.

⁴⁷ Vgl. Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 234.

Die zuvor erwähnte Energie, welche in das System eingebracht werden kann, um den Feststoff zu trocknen kann mechanisch oder thermischer Natur sein. In dieser Arbeit werden jedoch nur rein thermische Methoden beschrieben, um eine Trocknung umsetzen zu können. Als mechanische Energie wird lediglich eine Art Vorentwässerung wie etwa Schleudern angestrebt, um den Energieverbrauch zu senken. Damit werden Wasseranhaftungen an der Oberfläche durch Fliehkräfte entfernt. Vorteilhaft ist hier ein geringerer Energieverbrauch als bei den thermischen Verfahren. Abbildung 12 zeigt eine typische Unterteilung und den Ablauf eines Trocknungsprozesses in mechanische und thermische Trocknung.⁴⁸

Bevor der genaue Trocknungsverlauf beschrieben wird muss noch der Frage nach dem Trocknungsgrad nachgegangen werden.

Da es praktisch unmöglich und auch unnötig ist, Kunststoffe absolut trocken in die Verarbeitungsmaschine einzuführen, braucht es eine andere Art der Messlatte für maximale Restfeuchten in Kunststoffen. Generell darf es nach der Verarbeitung weder zu sichtbaren Störungen noch zu unsichtbaren Schädigungen des Bauteils kommen. Die maximalen Verarbeitungsfeuchteempfehlungen sind in den meisten Fällen unabhängig von den Umgebungsbedingungen und der Verarbeitungsart angegeben. Dies ist insofern problematisch, da die Löslichkeit von Wasser im Kunststoff zeit-, druck- und temperaturabhängig ist. Beim Spritzguss wird bei hohem Druck und Geschwindigkeit eine geschlossene Kavität gefüllt, wohingegen bei Extrusionsvorgängen, wie auch bei FFF-Druckverfahren, das Extrudat unter Umgebungsdruck aus der Düse austritt. Beim Spritzguss kommt es umso weniger zu Beeinträchtigungen von Oberflächen je schneller eingespritzt wird. Außerdem kommt noch hinzu, dass die durch das menschliche Auge erfasste sichtbare Beeinträchtigung auf subjektiver Wahrnehmung und Beurteilung beruht und keinerlei Auskunft über etwaige nicht sichtbare Defekte liefert. Somit sind die empfohlenen Werte eher als Ausgangswert für die interne Prozessentwicklung anzusehen. Wie trocken der Kunststoff für die Verarbeitung sein muss, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen, hängt demnach von mehr als nur einem Parameter ab und müsste für genauere Aussagen näher untersucht werden. Als Richtwert für PA6 wird in der Literatur eine zulässige Verarbeitungsfeuchte für den Spritzguss von 0,1 % – 0,2 % verwendet.⁴⁹ Diese Richtwerte sind mit folgender Anmerkung versehen: "Angaben siehe Hinweise der Hersteller. Diese Angaben sind nicht absolut zu werten, da die in Broschüren und in der Literatur zu findenden Angaben nicht auf physikalischen Messungen beruhen, sondern Erfahrungswerte sind."50

Da das FFF-Verfahren der industriellen Extrusion jedoch ähnlicher ist als dem Spritzguss wurde auch in diesem Fertigungsbereich nach einer Feuchteempfehlung gesucht. Goff/Whelan (2000) beschreiben das Feuchtelimit für die Extrusionsverarbeitung mit 0,25 %.⁵¹

Anzunehmen ist, dass der Bereich der zu verarbeitbaren Feuchte beim FFF-Verfahren aufgrund der niedrigeren Drücke und Durchflussraten noch etwas nach oben gestreckt werden könnte.

⁴⁸ Vgl. Christen (2010), S. 459 ff.

⁴⁹ Vgl. Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 234 ff.

⁵⁰ Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 238.

⁵¹ Vgl. Goff/Whelan (2000), S. 42.

2.6.2 Trocknungsverlauf am Beispiel der Konvektionstrocknung

Aufgrund der fehlenden Literatur zum Thema Trocknung von Kunststoffen in Filamentform, wird hier stattdessen zum Vergleich der typische Trocknungsverlauf einer Warmlufttrocknung von Granulat skizziert. Der Effekt sollte bei beiden Ausgangssituationen ähnlich sein. Wie sich die Trocknung von PA6 auf einer Filamentspule tatsächlich verhält, zeigen die Untersuchungen dieser Arbeit in den Ergebnissen.

Eine Konvektionstrocknung lässt sich im Grunde in drei Phasen unterteilen, wie in Abbildung 13 dargestellt ist. Gezeigt sind die Temperatur der Eintritts- und der Austrittsluft und die relative Feuchtigkeit der Austrittsluft über der Zeit. Die Aufheizphase A dient primär zur Erwärmung des Trocknungsguts. Geht man von einer konstanten Wärmezufuhr aus, steigt die Eintrittstemperatur T_1 zunächst stark bis zum eingestellten Wert an und bleibt dann konstant. Nach der kurzen Aufheizphase wird die weitere Trocknung in drei Abschnitte unterteilt.⁵²



Abbildung 13: Temperaturen- und Feuchtigkeitsverlauf bei konvektiver Granulattrocknung: A = Aufheizphase; I, II, III = Trocknungsphasen; T_1 = Temperatur der Eintrittsluft; T_2 = Temperatur der Austrittsluft; φ_2 = Feuchtigkeit der Austrittsluft, Quelle: Stahl (1980), S. 134 (leicht modifiziert).

Abschnitt I ist eine konstante Trocknungsphase, in Abschnitt II beginnt die Oberfläche auszutrocknen und Abschnitt III bezeichnet die maximale hygroskopische Beladung. Im ersten Trocknungsabschnitt ist die Trocknungsgeschwindigkeit konstant, was in Abschnitt I aus Abbildung 13 wie auch in Abbildung 14, b und c zu sehen ist. Das an der Oberfläche des Materials gebundene Wasser wird von der darüber hinwegströmenden Luft aufgenommen. Dabei wird die notwendige Wärmemenge, welche zur Verdampfung des Wassers aufgewendet werden muss, dem Trocknungsluftstrom entnommen. Dieser

⁵² Vgl. Stahl (1980), S. 133.

kühlt dadurch ab. Zu sehen ist dies in Abbildung 13. Die ausströmende Luft T_1 , ist durch die entstehende Verdunstungskühlung an der Materialoberfläche wesentlich kühler als die Eintrittstemperatur T_2 .⁵³

Im zweiten Trocknungsabschnitt beginnt die Austrittstemperatur aufgrund der fast ausgetrockneten Oberfläche zu steigen. Die Grenze zwischen getrockneten und feuchten Teilen des Gutes verschiebt sich langsam in das Innere des Gutes. Somit nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit ab. Die Grenze zwischen den ersten beiden Trocknungsabschnitten markiert der erste Knickpunkt. Der Wert der Feuchtebeladung an dieser Stelle ist für die Auslegung von Trocknungsprozessen von großer Bedeutung und wird kritische Gutsfeuchte genannt. Bestimmt wird er von Temperatur, Luftfeuchte und Anströmgeschwindigkeit des ersten Trocknungsabschnittes. Bei nicht hygroskopischen Materialien endet der Trocknungsprozess nach dem zweiten Abschnitt. Bei hygroskopischen Materialien hingegen beginnt ab dem zweiten Knickpunkt der dritte Trocknungsabschnitt, wenn sich die maximale hygroskopische Beladung $X_{G,E max}$ im Gut einstellt. Graphisch dargestellt ist dies in Abbildung 14 a. Zeitlich gesehen endet dieser Schnitt nie, da sich der Feuchtegehalt im Gut der Gleichgewichtsfeuchte $X_{G,E}$ nur asymptotisch annähert.⁵⁴ Die Berechnung des Trocknungsvorgangs im ersten Trocknungsabschnitt ist, da die Vorgänge im Inneren des Trocknungsgutes außer Acht gelassen werden können, relativ einfach und wird von Mersmann/Kind/Stichlmair (2005) genau beschrieben. Auch Berechnungen zum zweiten Trocknungsabschnitt finden sich hier wieder.⁵⁵

⁵³ Vgl. Stahl (1980), S. 136.

⁵⁴ Vgl. Christen (2010), S. 465 ff.

⁵⁵ Vgl. Mersmann/Kind/Stichlmair (2005), S. 554 – 563.



Abbildung 14: Beispieltrocknungsverlauf: $X_{G,\alpha}$ = Feuchtegehalt am Anfang; $X_{G,\omega}$ = Feuchtegehalt am Ende der Trocknung; $X_{G,E}$ = Gleichgewichtsfeuchte; $X_{G,E max}$ = maximale hygroskopische Beladung, Quelle: Christen (2010), S. 466 (leicht modifiziert).

Die benötigte Trocknungszeit lässt sich durch experimentell aufgenommene Trocknungsverläufe bestimmen. Christen (2010) nennt drei Arten, wie sich der Verlauf darstellen lässt:

- a. Feuchtebeladung als Funktion der Zeit
- b. Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion der Zeit
- c. Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion der Feuchtebeladung

Diese drei Arten sowie die ermittelte Trocknungszeit (d) sind in Abbildung 14 dargestellt. Chemisch gebundene Flüssigkeiten verbleiben im Regelfall im Feststoff enthalten.⁵⁶

2.6.3 Einflussparameter

Aus den drei Trocknungsabschnitten geht hervor, dass die Haupteinflussfaktoren, neben den grundsätzlichen Eigenschaften des zu trocknenden Materials, die Temperatur, die Feuchtigkeit des

⁵⁶ Vgl. Christen (2010), S. 465.

umgebenden Luftstromes und die Trocknungszeit sind. Zusätzlich fließt noch die Geometrie bzw. die so genannte Schichtstärke des Materials mit ein.

Die folgenden drei Absätze beschreiben die drei Einflussfaktoren Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit sowie Schichtstärke:⁵⁷

Die Temperatur, die zum Trocknen angewendet wird, sollte so hoch wie möglich und gleichzeitig so niedrig wie nötig gewählt werden. Dadurch kann die Trocknungszeit kurzgehalten werden. Die Obergrenze der Temperatur sollte so gewählt werden, dass Materialabbau des Trocknungsgutes vermieden wird. Je höher andererseits die Temperatur des Wärmespenders eingestellt wird, desto mehr Wärme wandert zu den Verdunstungsstellen des Trocknungsgutes. Somit entsteht eine Dampfdruckdifferenz und Wasser diffundiert aus dem Gut nach außen. Zusätzlich sinken die Bindungskräfte bei höheren Temperaturen und die Wasseraffinität der Luft steigt. Die Kombination dieser Effekte beschreibt warum höhere Temperaturen eine kürzere Trocknungszeit ermöglichen.

Steigt die relative Luftfeuchtigkeit der gutsumgebenden Luft, sinkt die Dampfdruckdifferenz zwischen Luft und Verdunstungsstellen, was zu einer Senkung der Trocknungsgeschwindigkeit führt. Hier wird schnell klar, dass die Umgebungsluft möglichst trocken gehalten werden sollte, um kurze Trocknungszeiten zu erreichen. Je weiter die Trocknung voranschreitet, desto stärker hängt die zu erreichende Gutsfeuchte von der umgebenden relativen Luftfeuchte ab.

Im ersten Trocknungsabschnitt verdunstet die Feuchtigkeit nur an der Gutsoberfläche. Die Trocknungsgeschwindigkeit hängt also nicht von der Schichtstärke ab. Bei annähernd homogener Feuchteverteilung im Gut verhält sich der Feuchtevorrat proportional zur Schichtstärke. Somit nimmt die Trocknungszeit im ersten Trocknungsabschnitt auch proportional zur Schichtstärke zu. Die Trocknungszeit im zweiten Abschnitt wächst, je nachdem welcher Endfeuchtegehalt erzielt werden soll, mehr als proportional zur Schichtstärke. Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt stark ab. Im dritten Abschnitt nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit weiter ab und die Trocknungszeit in etwa mit dem Quadrat der Schichtstärke zu.

Auch die Zeit der Trocknung spielt eine wesentliche Rolle. Allgemein kann man davon ausgehen, dass der Wassergehalt mit zunehmender Zeit sinkt. Die benötigten Trocknungszeiten sind entweder, wie in Kapitel 2.6.2 beschrieben, aufgrund von Experimenten abzuschätzen oder den Datenblättern der Hersteller zu entnehmen.

In der Literatur wird für PA6 eine Trocknungsdauer von vier Stunden bei 80°C genannt.58

⁵⁷ Vgl. Kröll/Krischer (1959), S. 18 – 25.

⁵⁸ Vgl. Fein (2016), S. 11.

2.7 Beschreibung und Gegenüberstellung geeigneter Trocknungsverfahren für PA6

Trocknungsverfahren können zum Beispiel nach der Art der Wärmezufuhr, dem Betriebsdruck, dem Aggregatszustand, der Betriebsweise, oder der Strömungsführung klassifiziert werden. Außerdem gibt es noch andere Einteilungen, die hier nicht angeführt werden.⁵⁹ Abbildung 15 stellt einige der Kategorien mit den jeweiligen zugehörigen Trocknungsverfahren dar.

Einteil	ung von Trocknu	ngsverfahren und Trocknern		
<u>– nach der Ene</u> Konvektion Kontakt (Wärmeleitung) Strahlung	rgiezufuhr Energieträger ist erhitztes strömendes Gas: Konvektionstrocknung Wärmeübertragung durch Berührung mit beheizten Auflageflächen oder Wänden: Kontakttrocknung Energieträger ist Infrarot- oder Mikro- wellenstrahlung: Strahlungstrocknung (Infrarottrocknung bzw. Mikrowellen- oder Hochfrequenztrocknung)	 nach dem Bewegung Ruhendes Bett Bewegtes Bett mit mechanischer Produktbewegung pneumatischer Produktbewegung 	<pre>gszustand des Produkts Trockenschrank Hordentrockner Schaufeltrockner Bandtrockner Walzentrockner Flieβbett (= Wirbel- bett, Wirbelschicht), Sprudelbett: Wirbelschichttrockner Verdünntes Bett: Pneumatische Trockner (Trocknung bei gleich- zeitiger pneumatischer Produktförderung); Sprühtrockner</pre>	
- nach dem Pha Verdampfung	senübergang des Wassers p _w = P (Siedebedingung): Verdampfungstrocknung	<u>- nach dem Betriebs</u>	sdruck Normaldruck Vakuum	
Verdunstung	p _w < P: Verdunstung von Wasser: Verdunstungstrocknung	- nach der Arbeits	<u>veise</u> absatzweise (chargenweise) kontinuierlich	
Sublimation	P _w < P: Verdunstung von Eis: Sublimationstrocknung (Gefriertrocknung)	<u>– nach konstruktive</u>	en Merkmalen Schrank-, Turm-, Trommel-, Band-, Walzentrockner usw.	

Abbildung 15: Einteilung unterschiedlicher Trocknungsverfahren und Trocknertypen - Überblick, Quelle: Stahl (1980), S. 155.

In dieser Arbeit werden fünf Trocknungsverfahren beschrieben und zuerst nach Betriebsdruck, dann nach Wärmezufuhr und schließlich nach der zur Trocknung verwendeten Luft unterteilt. Bei den ersten vier Trocknungsverfahren herrscht annähernd atmosphärischer Druck, wobei bei den ersten drei davon die Wärme durch Konvektion zugeführt wird, beim vierten durch Wärmestrahlung. Das fünfte Trocknungsverfahren macht sich die großen Dampfdruckdifferenzen durch Erzeugen eines Vakuums zunutze. Abbildung 16 gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit beschriebenen Trocknungsverfahren und die jeweiligen Typen:

⁵⁹ Vgl. Christen (2010), S. 478.


Abbildung 16: Einteilung der in dieser Arbeit erläuterten Trocknungsverfahren und Typen, Quelle: Eigene Darstellung.

Die folgenden drei Trocknertypen bauen also alle auf demselben Prinzip der Wärmezufuhr durch Konvektion auf, welche in Kapitel 2.6.2 beschrieben ist. Die einfachste Bauweise dieser Konvektionstrockner ist der sogenannte Schrank-, Kammer- oder Horden Trockner. Er eignet sich hervorragend für stückige Güter, weshalb er auch für die Filamentspulentrocknung interessant ist.⁶⁰

2.7.1 Frischlufttrocknung

Konstruktiv lässt sich am einfachsten ein Frischlufttrockner umsetzten. Große Mengen erhitzter Luft werden durch den Bauraum geblasen, um die darin gelagerten Materialien zuerst auf Temperatur zu bringen und anschießend das herausdiffundierte Wasser in der warmen Luft wieder aus dem Bauraum zu leiten. Da die erhitzte Luft, unmittelbar nach durchströmen der Kammer, wieder an die Umgebung abgegeben wird und so ein großer Teil der aufgewandten Energie verloren geht, ist der Wirkungsgrad solcher Apparaturen äußerst gering. Der Luftein- sowie Luftaustritt muss mit einem Filter versehen werden, um feinen Staub und gelöste Partikel aufzufangen, und dadurch die Heizelemente wie auch die Umwelt zu entlasten. Das Verfahren ist also zwar einfach umsetzbar, jedoch aufgrund des geringen Wirkungsgrades umweltpolitisch und ökologisch bedenklich. Aufgrund des geringen Wirkungsgrades lohnt sich dieses Verfahren nur bei sehr kleinen Trocknungsmengen, Standardaußentemperatur und niedriger Umgebungsluftfeuchtigkeit.⁶¹

Eine einfache grafische Darstellung einer Frischlufttrocknung ist in Abbildung 17 zu sehen.

⁶⁰ Vgl. Christen (2010), S. 479 f.

⁶¹ Vgl. Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 248 f.



Abbildung 17: Aufbau eines Frischlufttrockners: T_i = Lufttemperatur; φ_i = relative Luftfeuchtigkeit; ρ_i = absolute Luftfeuchtigkeit; Q_v = Verlustwärme, Quelle: Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 249 (leicht modifiziert).

2.7.2 Umlufttrocknung

Ähnlich wie bei einem gewöhnlichen Haushaltsbackofen wird bei Umlufttrocknern, die von außen angesaugte Luft erwärmt und nicht direkt wieder ausgeblasen. 70 % - 90 % der erwärmten Luft verbleiben im Gerät, während die restlichen 30 % - 10 % Frischluft dazu dienen, den Taupunkt der Luft im System zu senken. Auch hier sollten Luftein- und Auslässe mit einem Filter versehen werden, um feinen Staub und gelöste Partikel aufzufangen, und dadurch die Heizelemente wie auch die Umwelt zu entlasten. Geräte dieser Bauart sind energieeffizienter als Frischlufttrockner, jedoch stark von den in der Umgebung herrschenden klimatischen Bedingungen abhängig. Je höher die Außentemperatur und Umgebungsluftfeuchtigkeit, desto schlechter die Trocknungsleistung. Im nicht tropischen Raum bei standardatmosphärischen Bedingungen können aber durchaus solide Trocknungsergebnisse erzielt werden.62

Eine schematische Darstellung sowie ein Mollier-Diagramm einer klassischen Umlufttrocknung finden sich in Abbildung 18.

⁶² Vgl. Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 248 f.



Abbildung 18: Mollier-Diagramm einer klassischen Umlufttrocknung, Quelle: Christen (2010), S. 477.



Abbildung 19: Aufbau eines Umlufttrockners: T_i = Lufttemperatur; φ_i = relative Luftfeuchtigkeit; ρ_i = absolute Luftfeuchtigkeit; Q_v = Verlustwärme, Quelle: Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 249 (leicht modifiziert).

2.7.3 Trockenlufttrocknung

Das in diesem Unterkapitel beschriebene System ist in Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004) zu finden.63

Noch niedrigere Werte für die Restfeuchte in dem zu trocknenden Material als beim Umlufttrocknen können mit einem Trockenlufttrockner erreicht werden. Die eingesaugte Umgebungsluft wird schon vor ihrer Freisetzung im Trocknungsraum entfeuchtet. Dies geschieht in den meisten Fällen durch ein spezielles Absorptionsmittel, durch welches die Luft geleitet wird. Nachdem die Luft getrocknet wurde, wird sie erhitzt und über das zu trocknende Material geblasen. Am Ende kann die feuchtebeladene Luft entweder an die Umgebung freigelassen, oder aber zurück ins System geführt werden.

⁶³ Vgl. Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 250 – 255.

Als Maß für die Leistungsfähigkeit eines Trockenlufttrockners kann die Taupunkttemperatur der Abluft dienen. Das ist jene Temperatur, bei der die Luft gesättigt ist, also kein Wasser mehr aufnehmen kann. Da die Wassermenge in Luft bei Sättigung bekannt ist, kann dieser Wert als absolutes Feuchtemaß herangezogen werden. Je niedriger die Taupunkttemperatur, desto trockener die Luft bei konstanter Temperatur.

Da sich das Absorptionsmittel immer stärker mit Wasser sättigt und schließlich irgendwann keine Feuchtigkeit mehr aus der Luft aufnehmen kann, muss es quasi kontinuierlich wiederaufbereitet werden. Dies geschieht bei Geräten mit mehreren Trockenmittelbatterien abwechselnd und bei solchen mit Trockenmittelscheiben durchgehend. Steigt die Taupunkttemperatur im Gerät an, sollten die Absorptionsmittel regeneriert werden, weshalb eine taupunktgeregelte Regenerierung empfohlen wird.

Bei hohen Trocknungstemperaturen und Luftrückführung in das System, muss die Luft vor dem Durchströmen des Absorptionsmittels gekühlt werden, da sich die Wasseraufnahmefähigkeit des Mittels mit zunehmender Temperatur deutlich verschlechtert. Dabei empfiehlt es sich, einen wesentlichen Teil der zugeführten Energie mittels Wärmetauscher rückzugewinnen.

Um gleichmäßig gute Trocknungsergebnisse erzielen zu können wird kontinuierlich bereitgestellte Trockenluft benötigt. Dies ist beispielsweise mit mehreren Regenerierkammern oder einem rotierenden sich ständig regenerierenden Molekularsieb möglich.

Modernere Apparate nutzen oft vorhandene Druckluftnetze in Produktionsstätten als Trockenmedium. Durch die Entspannung der sauberen Druckluft von 7,5 bar bis 15 bar können hier Taupunkttemperaturen von -20°C bis -28°C erreicht werden. Damit muss die Trocknungsarbeit nicht mehr im Gerät verrichtet werden.

Abbildung 20 zeigt ein Beispiel einer Trockenlufttrocknung. In der Abbildung ist links ein Behälter für das zu trocknende Gut dargestellt. Von oben strömt durch einen Filter Frischluft ein, das mit einem Gebläse auf zwei Pfade aufgeteilt werden, die jeweils einen Heitzer und Trockenmittelbatterien enthalten. Mittels eines Steuerschiebers kann jeweils ein Pfad aktiviert und der andere deaktiviert werden, wodurch man die Trockenmittelbatterien austauschen kann. Anschließend folgt noch ein Lufterhitzer. Neben der in dieser Grafik dargestellten Trocknung gibt es noch weitere Bauarten, wie etwa die zuvor erwähnte, mit einem kontinuierlich sich drehenden Molekularsieb als Absorptionsmittel ausgestatte Variante.



Abbildung 20: Trockenlufttrockner mit kontinuierlicher Luftvortrocknung und zwei Absorptionskammern: T_i = Lufttemperatur; φ_i = relative Luftfeuchtigkeit; ρ_i = absolute Luftfeuchtigkeit; Q_v = Verlustwärme, Quelle: Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 253 (leicht modifiziert).

2.7.4 Infrarottrocknung

Beim Infrarottrockner wird die Wärme durch Strahlung zugeführt. Trockenluftaufbereitung, also das Erwärmen und Trocknen des Trocknungsmediums, ist in diesem Fall nicht notwendig, da die Erwärmung des Trocknungsgutes von innen heraus erfolgt, was außerdem wesentlich energieeffizienter ist. Die umgebende Lufttemperatur kann bei diesem Verfahren niedriger gewählt werden als bei Konvektionstrocknern. Bei der Infrarottrocknung wird meist eine Trommel als Trocknungskammer verwendet, in der das Gut langsam und kontinuierlich von einer Seiter zur anderen Seite wandert. Die Kammer muss dabei trotzdem belüftet werden, um die in der Luft aufgenommene Feuchtigkeit abzutransportieren. Die Größe der Einstrahloberfläche im Verhältnis zum Volumen des zu trocknenden Materials ist dabei ein wesentlicher Parameter, für die im Kunststoff erzeugte Wärme. Eine Mischung aus Infrarotstrahlung zur schnellen Erwärmung des Gutes und Konvektionstrocknung mit Trockenluft, um schnell möglichst hohe Dampfdruckdifferenzen zwischen Material und Materialoberfläche erreichen zu können, ist aus verfahrenstechnischer Sicht durchaus sinnvoll und findet sich in vielen Großanlagen wieder. Dadurch kann die Aufheizgeschwindigkeit, gerade bei dickeren platten- oder scheibenförmigen Kunststoffen, verbessert und der Gesamttrocknungsprozess beschleunigt werden. Infrarottrockner finden in der Kunststoffindustrie hauptsächlich bei der Lacktrocknung Anwendung, da die hier zu verdampfenden Lösungsmittelmengen gering sind. Hier kann bei kleinen Geräten ein hoher Durchsatz erzielt werden. Größere Wassermengen rein mit Infrarotstrahlung aus festen Gütern zu entfernen wäre ein sehr langwieriger und dann doch wieder energieaufwändiger Prozess.64

⁶⁴ Vgl. Kröll/Krischer (1959), S. 377 ff.

2.7.5 Vakuumtrocknung

Das Arbeitsprinzip eines Vakuumtrockenschranks besteht darin, den Umgebungsdruck wesentlich zu senken, um den Siedepunkt des Wassers im Feststoff zu verringern. Das Herabsetzen des Siedepunkts erhöht die Verdampfungsgeschwindigkeit und beschleunigt somit die Trocknung. Die dabei entstehenden Dämpfe werden durch die Vakuumpumpe abgesaugt. Somit können sehr niedrige Trocknungsgrade erreicht werden.⁶⁵

Durch gezielte Wärmezufuhr und Druckregelung wird der Trocknungsprozess zusätzlich optimiert. Die Betriebstemperatur kann im Vergleich zu einem Konvektionstrockner viel niedriger gewählt werden, was sich positiv auf die Energiekosten auswirkt. Ein weiterer Vorteil ist die sauerstoffarme Umgebung. Das kann insbesondere bei Stoffen, die zu Oxidation neigen, von Vorteil sein. Wärmeempfindliche Substanzen können also mit minimalen Auswirkungen auf ihre physikalischen oder chemischen Eigenschaften getrocknet werden.

Die Verarbeitung großer Mengen ist unwirtschaftlich, da ein kontinuierlicher Betrieb einen hohen technischen Aufwand bedeutet. Für kleinere Batches stellt dieses Verfahren hingegen eine effiziente Methode dar, um Kunststoffe bis zu sehr niedrigem Feuchtegehalt zu trocknen.⁶⁶

2.8 Parameter für die Auslegung eines Trockners

Die Auswahl eines Trockners für eine bestimmte Anwendung sollte wohl überlegt sein. Jedes Trocknungsverfahren und jeder Trocknertyp sind für verschiedene Zwecke besser und für andere schlechter geeignet.

Zu Beginn der Auslegung sollte genau aufgeschlüsselt werden, welche Form das zu trocknende Gut hat und wie es sich verhält (klumpt es zusammen, zerfällt oder zerbröselt es, wie stark darf es thermisch oder mechanisch belastet werden). Diese Gutseigenschaften sollten bei der Auswahl in Betracht gezogen werden.

Ein wesentlicher Teil der Auslegung sind auch die Anfangs- und Zielbedingungen: Wie feucht ist das Gut bei Einführung in den Trockner und welcher maximalen Feuchtegrad soll erreicht werden. Weitere wichtige Parameter sind die Trocknungsdauer und die benötigte Trocknungsmenge bzw. der Durchsatz.⁶⁷

Nach Auflistung sämtlicher Eigenschaften und Durchsicht der möglichen Trocknungsverfahren können schon recht früh in der Auslegung einige Verfahren ausgeschlossen werden. Vereinfachen kann man sich die Entscheidung mit Hilfe von Trocknungsversuchen in kleineren Pilottrocknern. Die wichtigsten Daten für die Auslegung eines Trockners findet man in der Sorptionsisotherme und den Kurven des Trocknungsverlaufs. Aufgrund dieser Daten kann unter anderem die nötige Trocknungs- und

⁶⁵ Vgl. Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 256.

⁶⁶ Vgl. Kröll/Krischer (1959), S. 496 ff.

⁶⁷ Vgl. Kröll/Krischer (1959), S. 4 ff.

Taupunkttemperatur des Trocknungsmediums sowie die Verweilzeit im Trockner errechnet werden. Tabelle 3 zählt die einzelnen Schritte bei der Auslegung eines Trockners auf.⁶⁸

Schritt	Vorgehen
1	Beurteilung der Gutseigenschaften (Form, Größe, physikalische Eigenschaften, …)
2	Aufnahme der Sorptionsisotherme
3	Aufnahme des Trocknungsverlaufs
4	Festlegen der Betriebsweise und der Strömungsführung
5	Auswahl des Trocknertyps
6	Berechnung des Luft- und Wärmebedarfs
7	Überprüfung der Annahmen in einer Pilotanlage
8	Dimensionierung des Trockners
9	Auslegung der peripheren Anlagenteile (Heizelement, Ventilatoren,)

Tabelle 3: Schrittweise Auslegung eines Trockners, Quelle: Christen (2010), S. 489 (leicht modifiziert).

Eine Zusammenfassung der in diesem Kapitel genannten Trocknertypen, deren Haupteigenschaften sowie Fähigkeiten sind in Tabelle 4 aufgelistet:

	Frischluft- trockner	Umlufttrockner	Trockenluft- trockner	Infrarot- trockner	Vakuumtrockner
Energieeffizienz	Schlecht	Mittel	Gut	Gut	Sehr gut
Erreichbare Trocknungs- leistung	Umweltbeding- ungsabhängig	Umweltbeding- ungsabshängig	Sehr trocken	Umweltbeding- ungsabhängig	Sehr trocken
Anschaffungs- kosten	Gering	Gering	Mittel	Mittel	Hoch
Gutgeometrie	Größere Gegenstände	Größere Gegenstände	Größere Gegenstände	Biegsame Bahnen	Krümelig, staubförmig, flockig
Typische Güter	Kunststoffe, Holz, Leder	Kunststoffe, Holz, Leder	Kunststoffe, Holz, Leder	Lackierte Gegenstände	Pharmazeutika, Backmehle

Tabelle 4: Zusammenfassung einiger Eigenschaften von den in diesem Kapitel genannten Trocknertypen, Quelle: Kröll/Krischer (1959), S. 89 ff, S. 377 ff, 496 ff; Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 247 ff.

2.9 Verfahren zur Bestimmung der Feuchtigkeit in festen Stoffen

Für die Messung des Wassergehalts in festen Stoffen gibt es unterschiedliche Methoden. Unterteilt werden diese einerseits in direkte und indirekte Methoden wie auch nach dem Messprinzip. Direkt bedeutet, dass als Ergebnis der Messung der tatsächliche Wassergehalt ermittelt wird und indirekt, dass aus der Änderung bestimmter Stoffeigenschaften, die ebenfalls vom Wassergehalt abhängig sind, auf den tatsächlichen Wassergehalt geschlossen wird.⁶⁹ Im Folgenden werden vier Messgeräte beschrieben, die je eine mechanische, eine thermometrische, eine chemische und eine optische Methode implementieren, um den vorliegenden Wassergehalt einer festen Probe präzise zu bestimmen. Zur Übersicht sind in Tabelle 5 alle vier Methoden inkl. Vor- und Nachteilen aufgelistet.

Verfahren	Thermogravimetrisch	Thermometrisch	Chemisch	Optisch
Messmethode	Erhitzen der Messgüter und anschließende kontinuierliche Gewichtsänderungs- messung	Kapazitive Messung des Taupunktes in der Testkammer, um auf den absoluten Feuchtegehalt zu schließen.	Reaktion von Wasser und Reagenz (Chemikalie) erzeugt Druckanstieg mit welchem auf den Feuchtegehalt geschlossen wird.	Messung der Absorption und Reflektion von Nahinfrarot (NIR) um mit einem Referenzmodell zu vergleichen.
Vorteile	 Gute Temperaturregelung Gleichmäßige Temperaturverteilung Schnelle Messungen Kompaktes Gerät 	 Einfache Handhabung Kein Reagenz notwendig Sehr genau Schnelle Messungen 	 Sehr genau Schnelle Messungen 	 Sehr kurze Messdauer Zerstörungsfreie Messungen denkbar Sehr kompaktes Gerät
Nachteile	 Andere flüchtige Stoffe als Wasser können das Messergebnis verfälschen 	• Teuer	 Reagenz notwendig Fehleranfällig Komplex in der Anwendung 	 Referenzmodelle notwendig Nur helle oder durchsichtige Stoffe messbar

Tabelle 5: Vergleich der vier folgenden Methoden die Feuchtigkeit in Feststoffen zu messen, Quellen: Stahl (1980), S. 73 ff; Mettler Toledo GmbH (2016), Online-Quelle [14.09.2020], S. 32 – 33.

Nachfolgend werden die vier dargestellten Messmethoden jeweils anhand eines Beispiels beschrieben.

2.9.1 Mechanisch (thermogravimetrisch) am Beispiel des METTLER TOLEDO HX204

Eine der technisch einfacheren Möglichkeiten der Wassergehaltbestimmung von Feststoffen ist die direkte Thermogravimetrie. Das Prinzip besteht darin, Wasser aus der feuchten Probe abzutrennen und anhand der Gewichtsdifferenz zwischen trockener und feuchter Probe auf den Wassergehalt zu schließen. Getrocknet wird bis zur fast vollständigen Gewichtskonstanz. Problematisch ist diese Methode bei

⁶⁹ Vgl. Stahl (1980), S. 72 ff.

Feststoffen, die neben Wasser auch andere flüchtige Stoffe beinhalten. Wird mehr als nur Wasser entzogen, spricht man vom Trocknungsverlust. Um die Bindungen des Wassers an das Material aufzuheben wird den Proben Energie in Form von Wärme zugeführt. Dies kann durch Konvektion, Kontakt oder Strahlung geschehen. Auch eine Mischform ist möglich.⁷⁰

Der Moisture Analyzer HX204 der Firma Mettler Toledo GmbH baut auf dieser Technologie auf. Die eingelegte Probe wird feucht gewogen, dann mittels Halogenradiator gleichmäßig erhitzt. Diese Methode ist sowohl energieeffizienter als auch schneller als herkömmliche Heizkammern, welche die Proben mittels warmer Luft erwärmen. Während des gesamten Prozesses wird die Gewichtsänderung aufgezeichnet. Verzeichnet das Gerät über einen bestimmten voreingestellten Zeitraum eine Gewichtsreduktion kleiner als 1 mg, wird die Probe als trocken deklariert und die Ergebnisse am Display präsentiert.⁷¹

Messauflösung	0,001 % Feuchte
Empfohlener Feuchtigkeitsbereich	0,01 – 100 %
Maximales / Minimales Probengewicht	200 g / 0,1 g
Trocknungstechnologie	Halogen
Temperaturbereich	40°C – 230°C
Werkstoffeignung	Organisches Material, Kunststoffe

Tabelle 6: Technische Daten Moisture Analyzer HX204, Quelle: Mettler Toledo GmbH (2018), Online-Quelle [11.09.2020].

2.9.2 Taupunktmessung am Beispiel der AQUATRAC® Station

Ein ebenso direktes und zurzeit noch recht selten eingesetztes Verfahren zur Messung des Wassergehaltes ist die kapazitive Messung des Taupunktes. Hierbei wird das Wasser der Probe durch Unterdruck und erhöhte Temperatur entzogen. Gegenüber gravimetrischen Methoden besteht hierbei nicht die Gefahr der fälschlichen Messung anderer flüchtiger Stoffe neben Wasser. Da der Taupunkt physikalisch exakt mit dem Wassergehalt des Gases verknüpft ist, lässt sich mit Hilfe der Gastemperatur und einiger systemspezifischer Parameter die absolute Restfeuchte innerhalb des Gerätes und somit der Wassergehalt der Probe errechnen. In der AQUATRAC® Station der Firma Brabender Messtechnik GmbH & Co. KG wird den Proben das Wasser mit Hilfe erhöhter Temperaturen und Vakuum entzogen. Chemische Substanzen wie etwa Reagenzien, die bei anderen Feuchtemessgeräten benötigt werden, kommen hier nicht zum Einsatz.⁷²

⁷⁰ Vgl. Stahl (1980), S. 73 f.

⁷¹ Vgl. Mettler Toledo GmbH (2016), Online-Quelle [14.09.2020], S. 5 – 7.

⁷² Vgl. Brabender Messtechnik GmbH & Co. KG (2020), Online-Quelle [11.09.2020].

Messauflösung	0,0001 % Feuchte
Empfohlener Feuchtigkeitsbereich	0,0001 – 15 %
Maximales / Minimales Probengewicht	20 g / 0,01 g
Trocknungstechnologie	Vakuum
Temperaturbereich	30°C – 160°C
Werkstoffeignung	Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere

Tabelle 7: Technische Daten AQUATRAC®, Quelle: Brabender Messtechnik GmbH & Co. KG (2020), Online-Quelle [11.09.2020].

2.9.3 Chemisch am Beispiel des AQUATRAC®-V

Ein beliebtes chemisches Verfahren, um auf den Wassergehalt in Feststoffen zu schließen, ist die sogenannte Calciumhydrid-Methode. Diese Methode fällt wie auch die zwei bereits erwähnten in die Kategorie der direkten Bestimmungsarten. Gemessen wird ein Druckanstieg mittels eines Präzisionsmanometers, welches durch die Reaktion von Wasser und Calciumhydrid nach dieser Reaktionsgleichung (15) entsteht:

$$CaH_2 + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 2H_2 \tag{15}$$

Beim AQUATRAC®-V, dem Nachfolger des AQUATRAC® - 3E, der Firma Brabender Messtechnik GmbH & Co. KG, wird genau dieses Verfahren angewandt. Die Reaktion läuft in einem geschlossenen Gefäß ab. Um das Wasser aus dem Feststoff zu extrahieren, wird das Reaktionsgefäß mit einer eingebauten Vakuumpumpe evakuiert und zusätzlich beheizt. In der Folge reagiert der freiwerdende Wasserdampf mit dem Calciumhydrid. Der durch die Reaktion bewirkte Druckanstieg verhält sich streng proportional zu dem aus der Probe freigesetzten Wasser. Mit dieser Methode lassen sich sehr geringe Absolutwassergehaltwerte messen. Das wasserspezifische Reagenz Calciumhydrid wird in Granulatform verwendet und ist weder giftig noch umweltschädlich. Ein weiterer Vorteil des Geräts ist, dass andere flüchtige Substanzen in einer Kühlfalle bei Raumtemperatur kondensieren und somit nicht an der Messung teilnehmen.⁷³

Messauflösung	0,0001 % Feuchte	
Empfohlener Feuchtigkeitsbereich	0,0001 – 60 %	
Maximales / Minimales Probengewicht	100 g / 0,1 g	
Trocknungstechnologie	Vakuum	
Temperaturbereich	60°C – 200°C	
Werkstoffeignung	Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere	

Tabelle 8: Technische Daten AQUATRAC®, Quelle: Brabender Messtechnik GmbH & Co. KG (2020), Online-Quelle [11.09.2020].

⁷³ Vgl. Brabender Messtechnik GmbH & Co. KG (2020), Online-Quelle [11.09.2020].

2.9.4 Optisch am Beispiel des Nahinfrarot Handscanners der Firma Solid Scanner

Die Wassergehaltsbestimmung mittels infraroter Strahlung stellt ein indirektes Verfahren dar, da sich der Wassergehalt nicht direkt aus der Spektrumanalyse sondern erst bei anschließendem Vergleich mit Referenzdaten ergibt. Für die Wassergehaltsbestimmung eignet sich speziell der Nahinfrarot (NIR) Bereich bei den Wellenlängen 1930 nm und 1450 nm. Bei genügend dicken Feststoffschichten verringert sich die Intensität der reflektierten Strahlung mit steigendem Wassergehalt.⁷⁴

Der Mobiler Nahinfrarot Handscanner der Firma Solid Scanner ist nicht größer als eine Computermaus und bietet günstige, schnelle und präzise Spektrumanalysen des zu erfassenden Materials. Eine Messung dauert nur wenige Sekunden. Probleme macht der Scanner jedoch bei dunklen Kunststoffen mit hohen Absorptionskoeffizienten. Diese absorbieren den größten Teil des Lichtimpulses, weshalb eine Messung schwer, bis gar nicht möglich ist. Angeboten wird von der Firma zusätzlich ein Referenzdatenkatalog, mittels dessen aus den Ergebnissen der Spektrumanalyse der Feuchtegehalt geschlossen werden kann.⁷⁵

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen des 3D-Druckes behandelt und auf wichtige Parameter für die Trocknung des Gutes eingegangen. Es wurde das Thema Feuchte Luft beschrieben und die Auswirkungen von Feuchtigkeit in Polyamid auf die Verarbeitung und das gefertigte Bauteil dargestellt. Mit steigender Feuchtigkeit sinkt die Glasübergangstemperatur, die Festigkeit sinkt, wodurch der Kunststoff weicher wird und es kommt zu Volumenzunahmen, die Auswirkungen auf die Druckprozessparameter, u.a. die Durchflussmenge haben. Weiters nimmt die Kerbschlagzähigkeit bei Raumtemperatur bei steigender Feuchtigkeit stark zu, es zeigt sich ein deutlich höheres viskoelastisches Verhalten und es kann zu Lückenbildung beim Druck kommen. Um diese Probleme zu vermeiden wurden entsprechende Trocknungsverfahren sowie Verfahren zur Bestimmung der Feuchtigkeit in festen Stoffen dargestellt. Nachdem die Grundlagen damit behandelt wurden wird nun Eingrenzung die des Untersuchungsgegenstandes vorgenommen.

⁷⁴ Vgl. Stahl (1980), S. 83.

⁷⁵ Vgl. Solid Scanner (2020), Online-Quelle [11.09.2020].

3 EINGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSGEGENSTANDES

Die folgenden Unterpunkte grenzen den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit näher ein. Ziel ist es, eine möglichst realitätsnahe Ausgangssituation zu schaffen und diese anschließend zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung und die Anwendung der theoretischen Grundlagen bilden die Basis für die Auslegung des Vortrocknungsgeräts.

Nach der Aufschlüsslung und Beschreibung der Ausgangssituation, im Folgenden, Rahmenbedingungen genannt, folgt eine Darlegung der technischen Spezifikationen des ausgewählten Kunststoffes inklusive Begründung über dessen Auswahl. Am Ende des Kapitels wird die Auswahl der zu untersuchenden Trocknungstechnologie erläutert.

3.1 Rahmenbedingungen

Um aussagekräftige Daten erheben und anschließend auf brauchbare Ergebnisse schließen zu können, sind mehrerer Schritte notwendig. Als erstes muss eine Ausgangssituation geschaffen werden, welche der Realität möglichst nahekommt und die außerdem mess- und wiederholbar ist. Es soll also sichergestellt werden, dass die Untersuchungen zu jeder möglichen Zeit wiederholt werden können, ohne relevante Abweichungen vom Ergebnis erwarten zu müssen.

Bevor jedoch mit der Beschreibung dieser Situation begonnen werden kann, wird noch einmal in Erinnerung gerufen, warum es überhaupt notwendig ist ein Vortrocknungsgerät, für die in FFF-Verfahren verarbeiten Kunststoffe in Filamentform, zu entwickeln. In den Grundlagen wurde bereits ausführlich über die negativen Auswirkungen von feuchtem Kunststoff vor der Verarbeitung geschrieben. Hierzu zählt nicht nur die Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften, sondern auch deutlich sichtbare Mängel der Form des Druckergebnisses. Firmen oder Privatanwender, die sich intensiver mit der FFF-Technologie auseinandersetzen und technische Kunststoffe wie Polyamide verarbeiten wollen, werden also nach reiflicher Durchsicht der beschriebenen Effekte nicht umhin kommen die Filamente vorzutrocknen.

Als realitätsnahes Szenario wurde folgender Ablauf definiert.

- Die von den Herstellern bereits vorgetrockneten PA6 Filamentspulen werden nach ihrer Anschaffung zwei Monate ungeöffnet im Schrank aufbewahrt.
- Danach wird die erste Spule geöffnet, um am FFF-Drucker ein Prozessfenster für die zukünftigen Drucke zu entwickeln. Dies schließt die Findung verschiedener Prozessparameter wie optimale Drucktemperatur, Durchflussraten am Extruder und auch Schichtstärken und Druckgeschwindigkeiten mit ein. Diese Entwicklung nimmt eine volle Woche in Anspruch. Während dieser Zeit wird die Spule offen in einem Standard-Büroraum zu annähernd konstanten Bedingungen mit 23°C bei 50 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Anschließend wird die Spule wieder im mitgelieferten Kunststoffbeutel verpackt und verstaut.
- Nach weiteren zwei Wochen wird die Filamentspule erneut aus dem Beutel genommen und in einem Vortrocknungsgerät getrocknet. Die Frage, welche es hier mittels der nachfolgenden Untersuchungen zu beantworten gilt, ist, wie lange die Filamentspulen bei einer ausgewählten Trocknungstemperatur und Technologie getrocknet werden muss, um vernünftige Druckergebnisse zu erzielen.

Um dies beurteilen zu können, muss im Folgenden noch der Zieltrocknungsgrad des PA6 Filaments definiert werden.

Da für diesen Wert für den hier verwendeten Kunststoff und auch allgemein für PA6 keinerlei veröffentlichte Daten vorliegen, wird aufgrund der in den Grundlagen beschriebenen zulässigen Restfeuchte von PA6 im Extrusion sowie mit eigener praktischer Erfahrungen ein passend erscheinender Wert angenommen. Eine genauere Untersuchung welcher Feuchtewert zu den bestmöglichen mechanischen und optischen Eigenschaften führt, wäre hier hilfreich, ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit.

Für die Auslegung des Vortrocknungsgerätes und der Trocknungszeiten wird ein mittlerer Zielfeuchtewert der Filamentspule von 0,4 % definiert.

3.2 Auswahl des zu untersuchenden Kunststoffes

Bei dem in den Untersuchungen verwendeten Kunststoff handelt es sich um ein modifiziertes, für den 3D-Druck optimiertes PA6. Genauer gesagt handelt es sich um das von der Firma Fiberthree GmbH angebotene F3 PA Pure Pro. Das zugehörige Datenblatt findet sich unter Anhang 1.

Die Auswahl dieses Polyamides wird durch die bestehenden Erfahrungen und Anforderungen im untersuchenden Betrieb in Bezug auf Verarbeitung und Trocknung wie auch dem ausgezeichneten Support des Herstellers beeinflusst.

Die wesentlichen Daten des Filaments für die Untersuchungen wie auch die Spulengeometrie sind hier zusammengefasst:

Filament			
Netto Gewicht	1000 g		
Dichte ρ	1,2 g/cm³		
Strangdurchmesser <i>F</i> _D	1,75 mm		
Spule			
Innendurchmesser S _I	105 mm		
Außendurchmesser	200 mm		
Spulenbreite innen S_B	59 mm		

 Tabelle 9: Herstellerangaben der Filamentspule, Quellen: Fiberthree GmbH (2020), Online-Quelle [4.12.2020]; Alpaplastic S.r.l.

 (2020), Online-Quelle [12.28.2020].

Um einen Überblick über die Anzahl der neben- und übereinanderliegenden Wicklungsschichten, wie auch die errechnete Filamentlänge zu bekommen, werden mit Hilfe von Abbildung 21 die folgenden Gleichungen aufgestellt:

Aus diesen Daten und wie aus Gleichung (16) ersichtlich haben auf der Spule bei Rundung auf die nächstniedrige Ganzzahl maximal 33 Strangreihen nebeneinander Platz.

$$F_{RG} = G(\frac{S_B}{F_D}) = G(33,714) = 33$$
(16)
$$F_{RG}$$
(16)
$$F_{RG}$$
(16)
$$F_{RG}$$
(17)
$$F_{RR} = (S_B - F_{RG}) F_D = 1,25 \text{ mm}$$
(17)
$$F_{RR}$$
(17)
$$F_{RG}$$
(17)
$$F_{RG}$$
(17)
$$F_{RG}$$
(17)
$$F_{RG}$$
(17)
$$F_{RG}$$
(18)
$$F_{AZ}/m$$
(18)
$$F_{AZ}/m$$
(18)
$$F_{RG}$$
(16)
$$F_{RG}$$
(17)
$$F_{RG}$$
(18)
$$F_{RG}$$
(18

Die übrigen 1,25 mm errechnet in Gleichung (17), erlauben eine Strangschichtung der nächsten Reihe jeweils in der Mitte zweier zuvor darunter abgelegten Strangreihen, wie in Abbildung 21 zu erkennen ist, mit einem vertikalen Abstand von 1,516 mm, errechnet mittels Gleichung (18). Bei einer perfekt gewickelten Spule mit einem konstantem Strangdurchmesser würde laut Gleichung (19) zwischen Spulenaußenwand und zweiter Strangreihe 0,375 mm liegen.

$$F_{Ax} = F_{RR} - \frac{F_D}{2} = 0,375 \text{ mm}$$
(19)
$$F_{Ax}/m \quad \text{Abstand zwischen Reihe und Wand} \\F_D/m \quad \text{Strangdurchmesser} \\F_{RR}/m \quad \text{Restabstand zur Spulenbreite innen}$$

Dieser Wert wird in den folgenden Berechnungen als Ausgleich für die inhomogene Strangbreite gesehen und ignoriert.



Abbildung 21: Strangablage mit Bezeichnungen, schematisch, Quelle: Eigene Darstellung.

Geht man von der im Datenblatt angegebenen Filamentdichte von 1,2 g/cm³ und einem Nettogewicht von 1000 g aus ergibt sich unter Berücksichtigung der Spulengeometrie und Vernachlässigen der Strangübergänge zwischen den Strangreihen eine Gesamtfilamentlänge von 346,46 m. Die Berechnung hierfür findet sich in Gleichung (20) und Gleichung (21).

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\left(\frac{F_D}{2}\right)^2 \pi F_L}$$
(20)
$$m/kg \quad Filamentmasse$$

$$V/m^3 \quad Filamentvolumen$$

$$F_L/m \quad Filamentlänge$$

$$\rho/kg m^{-3} \quad Filamentdichte$$

$$F_L = \frac{m}{\left(\frac{F_D}{2}\right)^2 \pi \rho} = 346,46 \text{ m}$$
(21)

Für die Berechnung der Anzahl der übereinanderliegenden Wicklungsschichten muss zuerst die innerste Wicklungsschichtlänge berechnet werden:

$$L_{W_{I}} = (S_{D_{I}} + F_{D}) \pi F_{RG}$$
(22)
$$L_{W_{I}}/m$$
Wicklungsschichtlänge innen
S_{D_{I}}/m Spulendurchmesser innen

Bei einem inneren Spulendurchmesser von 105 mm ergibt sich somit eine innere Wicklungsschichtlänge von 11,07 m.

Da sich der Umfang jeder folgenden Wicklungsschicht konstant um 2 π F_{AZ} vergrößert, können die weiteren Wicklungsschichten so lange addiert werden, bis schließlich die Gesamtfilamentlänge überschritten wird. Hierfür wird die in Formel (23) ersichtliche Summenformel aufgestellt:

$$\sum_{i=0}^{F_{LG}-1} \left(L_{W_I} + i \ 2 \ \pi \ F_{Az} \ F_{RG} \right) = \sum_{i=0}^{F_{LG}-1} \left(L_{W_I} + i \ \Delta L \right) = F_{LG} \ L_{W_I} + \ \Delta L \frac{F_{LG}^2 - F_{LG}}{2} \ge F_L \tag{23}$$

F_{LG}/m Anzahl der übereinanderliegenden Wicklungsschichten

L_{Wi} Spulendurchmesser innen

F_{AZ}/m Abstand zwischen den Strangreihen

F_{RG} Anzahl Strangreihen, abgerundet

F_L/m Filamentlänge

 $\Delta L/m$ $2 \pi F_{Az} F_{RG}$

Da nun alle notwendigen Parameter berechnet wurden, kann die Summenformel als Ungleichung nach der Anzahl der übereinanderliegenden Wicklungsschichten aufgelöst und auf die nächste Ganzzahl gerundet werden wie in Formel (24) zu erkennen:

$$F_{LG} = R\left(\left(\frac{1}{2} - \frac{L_W}{\Delta L}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{L_W}{\Delta L}\right)^2 + \frac{2F_L}{\Delta L}}\right)$$
(24)

3.3 Auswahl der zu untersuchenden Trocknungstechnologie

Die Trocknungstechnologie wird auf Basis von Tabelle 4 auf Seite 36, die Auflistung der in dieser Arbeit beschriebenen Trocknertypen und deren relevante Eigenschaften, festgelegt.

Betrachtet man zuerst die Spalte der typischen Güter bleiben noch Frisch- Umluft wie auch Trockenlufttrockner zur Auswahl. Da die Anschaffungskosten, bzw. in diesem Fall die Entwicklung und Produktionskosten niedrig gehalten werden sollen fällt die Trockenlufttrocknung fürs Erste weg. Da die Umlufttrocknung von den beiden verbleibenden Typen eine bessere Energieeffizienz bietet, endet hier der Auswahlprozess.

Als Trocknungstechnologie für die Versuchsreihe wird also wie beschrieben die Umlufttrocknung ausgewählt.

4 BESCHREIBUNG DER VORGANGSWEISEN UND VERSUCHSAUFBAUTEN ZUR FEUCHTIGKEITSMESSUNG

Vorbereitend auf die Versuchsreihe wird eine detaillierte Liste mit allen Proben und notwendigen Datenfeldern erstellt, um sicherzustellen, dass keine Probe, Messung oder Wiegung vergessen werden kann.

Vermessen werden insgesamt acht Filamentspulen mit einem Nettogewicht von je rund 1000 g. Sechs Spulen durchlaufen die komplette Versuchsreihe, eine wird direkt aus ihrer originalen Verpackung vermessen und als Referenz herangezogen, und eine weitere wird lediglich konditioniert und gelagert, nicht aber getrocknet.



Der Ablauf der Versuchsreihe ist in Abbildung 22: als Flussdiagramm dargestellt:

Abbildung 22: Flussdiagramm des Versuchablaufes, Quelle: Eigene Darstellung.

Wiegungen und Beschriftungen finden zwischen jedem Teilschritt statt. Dies dient nicht nur dem Fehlerausschluss, sondern auch der Normierung bei der Auswertung der Messdaten, da Erfahrungen zu Folge nicht jede Filamentspule exakt 1000 g Nettogewicht hat.

Die Konditionierung der Filamentspulen wird laut DIN EN ISO 291 mit Normalklima für nicht tropische Länder bei 23°C Lufttemperatur und 50 % relativer Feuchte durchgeführt. Die Norm gibt eine Mindestkonditionierdauer von 88 Stunden vor. Da hier allerdings die notwendigen Daten fehlen, die Dicke kann zum Beispiel nicht aussagekräftig bestimmt werden und der Diffusionskoeffizient ist nicht bekannt, wird eine Verweildauer von 168 Stunden gewählt, wie sie bei Anwendern typischerweise vorkommt.⁷⁶

⁷⁶ Vgl. DIN EN ISO 291 (2008), S. 5.

Die Norm sieht grundsätzlich eine unmittelbare Vermessung nach Konditionierung vor, jedoch werden hier, um dem Realitätsszenario so nahe wie möglich zu kommen, die Spulen zusätzlich weitere zwei Wochen lang in luftdicht verpackten, doppelten Kunststoffbeuteln gelagert. Der Prozess des Verpackens findet ebenso unter Normalklimabedingungen statt um die Ergebnisse so vergleichbar wie möglich zu gestalten.

Alle sieben zu konditionierenden Spulen werden danach innerhalb von drei Minuten aus der Klimakammer heraus verpackt und beschriftet. Dass diese Zeit eingehalten werden kann, wird durch einen zuvor durchgeführten Testlauf verifiziert.

Die Trocknung der Filamentspulen findet bei der vom Hersteller empfohlenen Trocknungstemperatur von 80°C statt. Das Trocknungsgerät wird vor jeder Trocknung 60 Minuten vorgeheizt, um möglichst gleiche Trocknungsbedingungen zu gewährleisten. Getrocknet werden ausschließlich einzelne Spulen. Zwischen den einzelnen Filamentspulen wird das Trocknungsgerät 30 Minuten geöffnet abgekühlt und wieder 60 Minuten geschlossen vorgeheizt. Um festzustellen, in welchem Temperaturbereich das verwendete Trocknungsgerät die Temperatur mittels Zweipunktregelung regelt, werden vor Messbeginn die Temperatur 24 Stunden lang jede Sekunde gemessen und ausgewertet. Die durchschnittlich erreichte Temperatur in dieser Zeit ist 80,6°C mit einer maximalen Abweichung von +4,2°C und -3,8°C. Somit bewegt sich das hier verwendete Temperaturfenster zwischen 76,8°C und 84,8°C.

Nach Entnahme der getrockneten Filamentspule wird dieser sofort eine erste Probe entnommen, indem von der obersten Lage des Filaments ein ausreichend langes Stück abgeschnitten wird, und ihr Feuchtegehalt gemessen.

Zwei weitere Proben werden vakuumverpackt und vermessen, sobald die Messung davor abgeschlossen ist. Um zu diesen Proben zu gelangen, muss die Filamentspule umgespult werden, da die zweite Probe aus der Mitte und die dritte Probe aus dem Innersten der Spule stammen soll. Eine genaue Definition der Probenentnahmestellen sowie der Probennummern folgt in Kapitel 5. Ausschlaggebend für präzise Messungen ist hier die Zeit zwischen Entnahme und Vermessung, da sich bei zu langer Offenzeit Feuchte im Kunststoff ansammeln und so das Messergebnis verfälschen würde. Diese wird nach unten hin durch die Messdauer des Feuchtemessgerätes (etwa 30 Minuten pro Messung) begrenzt. Somit wird die zweite Probe nach etwa mindestens 30 Minuten und die dritte Probe nach etwa mindestens 60 Minuten wieder geöffnet und vermessen.

Um Fehlmessungen erkennen zu können, werden für jede Probe zusätzlich von der gleichen Entnahmestelle jeweils zwei weitere Proben entnommen, vakuumverpackt und beschriftet aufbewahrt. So können im Zweifelsfall neuerliche Messdurchgänge gestartet und die Messungen verifiziert werden.

Für die Feuchtemessungen werden die Proben mit einer Feinwaage eingewogen. Um genaue Ergebnisse erzielen zu können, muss aus den drei zur Verfügung stehenden Messbereichen schon vor Beginn der Messung der passende ausgewählt werden. Ist der Kunststoff zu feucht und passt nicht in den ausgewählten Messbereich, kann das Vakuum des Gerätes nicht mehr aufrechterhalten werden und die Messung liefert nur noch Überschlagswerte. Ist andererseits die Feuchtigkeit im Verhältnis zum Messbereich zu gering, liefert das Messgerät nur ungenaue Werte. Ist außerdem die Probengröße zu gering, um eine ausreichende Masse von Wasser für die Messung abzugeben, kann überhaupt kein aussagekräftiges Messergebnis erzielt werden.

Um diese Probleme zu vermeiden, wurden im Vorfeld einige zusätzliche Proben des gleichen Kunststofffilaments vermessen, und damit ein Überblick über die passenden Messbereiche für die einzelnen zu vermessenen Proben gewonnen.

4.1 Verwendetes Mess-, Konditionier- und Trocknungsequipment

In Tabelle 10, Tabelle 11, Tabelle 12 und Tabelle 13, sind die für die Versuchsreihe vorgesehenen Geräte inklusive einiger relevanter Kennwerte aufgelistet.

Klimatestkammer: Weiss VC ³ 7100			
Testkammer (H x B x L)	950 mm x 1100 mm x 950 mm		
Mögliche Temperaturen (min. / max.)	-72°C / 180°C		
Temperaturschwankung über Zeit	± 0,1 bis ± 0,5°C		
Feuchtemessbereich	10 % - 98 % r.F		
Feuchteschwankung über Zeit	± 1 bis ± 3 % r.F		

Tabelle 10: Klimatestkammer für die Konditionierung der Filamentproben, Quelle: Weiss Umwelttechnik GmbH (2020), Online-Quelle [01.12.2020].

Feuchtemessgerät: Brabender Messtechnik® AQUATRAC® - E3			
Messauflösung	0,0001 %		
Empfohlener Feuchtigkeitsbereich	0,0001 – 60 %		
Maximales / Minimales Probengewicht	100 g / 0,1 g		
Trocknungstechnologie	Vakuum		
Temperaturbereich	60°C – 200°C		
Messgenauigkeit	Messabweichung: • +2 % vom Messwert • +1 % vom Messbereich Wiederholabweichung: • ca. +1 % vom Messbereich		
Messbereiche	 kleiner 0,1 % 0,1 % - 0,5 % größer 0,5 % 		
Werkstoffeignung	Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere		

Tabelle 11: Feuchtemessgerät zur Bestimmung der Restfeuchter der Proben, Quelle: Brabender Messtechnik GmbH & Co. KG (2020), Online-Quelle [11.09.2020].

Beschreibung der Vorgangsweisen und Versuchsaufbauten zur Feuchtigkeitsmessung

Präzisionswaage Sartorius ME235P		
Ablesbarkeit	0,01 / 0,02 / 0,05 mg	
Wägebereich	60 / 110 / 230 g	
Reproduzierbarkeit	≤ 0,015 / 0,04 / 0,04 ± mg	
Linearitätsabweichung	≤ 0,15 ± mg	
Messzeit	≤ 8 s	

Tabelle 12: Präzisionswaage zur Wiegung der Filamentproben und Feuchteabsorptionsmessung, Quelle: Sartorius AG (2007), Online-Quelle [04.12.20].

Frischlufttrockner: Purpose AMS FD5		
Maximale Spulengröße (D x B)	350 mm x 220 mm	
Mögliche Temperaturen (min. / max.)	40°C / 150°C	
Unterstützte Filamentdurchmesser	1,75 / 2,85 / 3,00 mm	
Maximale Leistungsaufnahme	1200 W	

Tabelle 13: Vortrocknungsgerät für Kunststoffe in Filamentform, Quelle: PURPOSE AM SYSTEMS (2019), Online-Quelle [17.12.2020].

5 VERSUCHSREIHE: FILAMENTTROCKNUNG, KONDITIONIERUNG UND WASSERABSORPTION

In diese Kapitel wird die durchgeführte Versuchsreihe vorgestellt. Zu Beginn wird ein Überblick über die Versuchsreihe gezeigt und dann wird auf die Messergebnisse eingegangen. Vorgestellt werden die Wasserabsorption, die Messung der Feuchtigkeit an verschiedenen Positionen in der Spule sowie in Abhängigkeit der Trocknungsdauer. Abschließend werden die Ergebnisse interpretiert.

Es werden acht Spulen für die Versuchsreihe verwendet. Die erste Spule (Spulennummer 0) wird als Referenzspule vermessen, da der Hersteller keine genauen Angaben zu Feuchtigkeit der ausgelieferten Spulen liefert, aber bestätigt, dass sämtliche Spulen der gleichen Produktionscharge den gleichen Feuchtegehalt aufweisen. Dies wird entsprechend als Rahmenbedingung akzeptiert. In Tabelle 14 sind die Probennamen wie auch die unterschiedlichen Konditionier- und Trocknungszeiten beschrieben.

Probennummer	Spule	Probe	Konditionierzeit	Trocknungszeit in
	opulo	11000	in Stunden	Stunden
R00P01		1	0	0 0,00
R00P02	0	2	0	0 0,00
R00P03		3	0	0 0,00
R01P01		1	504	0 0,00
R01P02	1	2	504	0 0,00
R01P03		3	504	0 0,00
R02P01		1	504	1 1,00
R02P02	2	2	504	1 0.00
R02P03		3	504	1 1,00
R03P01		1	504	2
R03P02	3	2	504	2 2
R03P03		3	504	2
R04P01		1	504	4
R04P02	4	2	504	4
R04P03		3	504	4
R05P01		1	504	8
R05P02	5	2	504	8
R05P03		3	504	8
R06P01		1	504	16
R06P02	6	2	504	16
R06P03		3	504	16
R07P01		1	504	24
R07P02	7	2	504	24
R07P03		3	504	24

Tabelle 14: Probenbenamsung, Konditionier- und Trocknungszeiten, Quelle: Eigene Darstellung.

Da angenommen wird, dass sich die Zu- und Abnahme der Feuchte auf den einzelnen Wicklungsschichten der Spulen zeitlich anders verhält, wird der Feuchtegrad auf insgesamt drei Schichten der Spule gemessen. Die Probennummern 1 - 3 spiegeln die Schicht in der Filamentspule wieder. Abbildung 23 erklärt visuell die Definition der Probennummern 1 - 3.



Abbildung 23: Visuelle Beschreibung der ausgewählten Wicklungsschichten und Zuordnung zu den Probennummern dargestellt auf einer geschnittenen Filamentspule, Quelle: Eigene Darstellung.

Da die Spulen eine gerade Anzahl an Wicklungsschichten enthalten und damit streng genommen keine Schicht genau in der Mitte liegt, wird für Probe 2, Wicklungsschicht 12 definiert.

Nachfolgend wird nun auf die Messungen der Wasserabsorption und der Feuchtigkeit der Spulen eingegangen.

5.1 Wasserabsorption

Für die Ermittlung der Wasserabsorption werden die Nettomassen der Filamentspulen vor den jeweiligen Konditionier- bzw. Trocknungsvorgängen gemessen und in Tabelle 15 abgebildet. In derselben Tabelle ist das Nettogewicht der einzelnen Spulen unmittelbar nach dem Trocknungsvorgang ersichtlich. Es lässt sich erkennen, dass die Abweichungen der Nettomasse der einzelnen Spulen deutlich größer ausfallen als die Massenänderung. Es wird daher eine Normierung der Massenzunahme vorgeschlagen, die in Abbildung 26 in Kapitel 6 beschrieben ist.

Als Referenzmessung wird die Wasserabsorption bei Bürobedingungen bei Spule 1 (Probennummer R00P01) aufgenommen. Dazu wird die Spule, nach der Öffnung der Originalverpackung, in variablen Zeitabständen innerhalb von 168 Stunden gewogen. Der Verlauf der Feuchtigkeit und der Massenzunahme sind in Abbildung 24 zu sehen. Auf der linken Ordinate ist die Feuchtigkeit und auf der rechten Ordinate ist die Massenzunahme dargestellt.

Nettomasse in Gramm (Reproduzierbarkeit ± 0,1 g)					
Spule	Vor ISO Konditionierung	Nach ISO Konditionierung	Vor Trocknung	Nach Trocknung	
1	1008,5	1015,2	1016,1		
2	953,9	958,0	958,7	957,4	
3	994,4	998,7	999,4	997,5	
4	1007,0	1013,8	1014,3	1012,6	
5	989,9	993,5	993,9	989,0	
6	1008,6	1015,0	1015,2	1010,2	
7	1007,2	1013,8	1013,8	1008,4	

Tabelle 15: Nettomassen der Filamentspulen vor den jeweiligen Konditionier- bzw. Trocknungsvorgängen, Quelle: Eigene Darstellung.



Abbildung 24: Massenzunahme der Probe R00P01 bis einschließlich 168 Stunden nach Öffnen der Originalverpackung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ausgangsfeuchte von Probe R00P01 beträgt 0,3649 %. Abgeschlossen wird diese Messreihe nach 168 Stunden mit einem gemessenen Feuchtewert von 1,3636 %.

5.2 Messung der Feuchtigkeit an unterschiedlichen Stellen in der Filamentspule sowie in Abhängigkeit der Trocknungszeit

Um die Messergebnisse besser einordnen zu können, werden die Spulen 0 und 1 im Unterschied zu den anderen sechs Spulen nicht im Zuge der Versuchsreihe getrocknet. Bei dem Entwurf der Versuchsreihe wurden zwei Referenzspulen definiert.

Spule 0 dient als Referenz, um den Ausgangszustand sämtlicher Spulen zu ermitteln. Spule 1 wird zwar konditioniert, jedoch nicht getrocknet. Sie liefert damit den Referenzwert für den Ausgangszustand nach der Konditionierung der Spulen.

Die Spulen werden, wie bereits in Kapitel 5 beschrieben, an insgesamt drei Wicklungsschichten vermessen. Die Ergebnisse der Feuchtemessungen sind in Tabelle 16 zu sehen. In dieser Tabelle lässt sich sowohl der Verlauf der Feuchte in den Spulen über die räumlich verteilten Proben als auch die Unterschiede der Feuchtigkeit nach verschiedenen Trocknungszeiten erkennen:

Probennummer	Spule	Probe	Konditionierzeit	Trocknungszeit in	Gemessene Feuchtigkeit
	opule	11000	in Stunden	Stunden	in Prozent
R00P01		1	0	0 0,00	0,36%
R00P02	0	2	0	0 0,00	0,35%
R00P03		3	0	0 0,00	0,38%
R01P01		1	504	0 0,00	1,28%
R01P02	1	2	504	0 0,00	0,99%
R01P03		3	504	0 0,00	0,83%
R02P01		1	504	1 1,00	0,92%
R02P02	2	2	504	1 1,00	1,14%
R02P03		3	504	1 1,00	
R03P01		1	504	⊐ 2 2,00	0,88%
R03P02	3	2	504	2 2,00	1,12%
R03P03		3	504	2 2,00	1,29%
R04P01		1	504	4	0,76%
R04P02	4	2	504	4	0,83%
R04P03		3	504	4	0,83%
R05P01		1	504	8 8,00	0,63%
R05P02	5	2	504	8 0.00	0,91%
R05P03		3	504	8 0,00	1,02%
R06P01		1	504	16	0,43%
R06P02	6	2	504	16	0,59%
R06P03		3	504	16	0,59%
R07P01		1	504	24	0,32%
R07P02	7	2	504	24	0,53%
R07P03		3	504	24	0,72%

Tabelle 16: Ergebnisse der Feuchtemessungen von Spule 0 - 7, Quelle: Eigene Darstellung.

Um die angegebenen Messgenauigkeitsdaten des verwendeten Feuchtemessgerätes zu verifizieren und auch Inhomogenität im Kunststoff in Betracht zu ziehen, werden zehn Messungen einer freigewickelten Probe desselben Kunststoffes, welches über drei Monate im Labor konditioniert wurde, durchgeführt. Wegen der langen Konditionierungsdauer kann davon ausgegangen werden, dass der Kunststoff an jeder Position in etwa den gleichen Feuchtegehalt besaß. Als Ergebnis dieser Messreihe wird eine relative

Abweichung vom Messmittelwert von 3,96 % ermittelt. Vergleicht man diese Abweichung mit den Daten aus dem Datenblatt, so gelangt man bei einem Messwert von 0,3 % auf eine relative Abweichung von 4 %. Die angegebene Genauigkeit des Messgerätes kann somit in dieser Messreihe gezeigt werden. Entsprechend ist bei der Interpretation der Rohdaten eine relative Abweichung von 4 % in Betracht zu ziehen.

Hebt man die Ergebnisse der Feuchtemessung der Referenzspule 0 in Abbildung 25 hervor, so lässt sich schließen, dass diese Spule in allen Wicklungsschichten bei Auslieferung in etwa gleich feucht war. Man sieht, dass sich die Abweichungen innerhalb der erwarteten Messunsicherheit befinden.



Gemessene Feuchtigkeit der einzelnen Proben von Spule 0 ohne Konditionierung

Abbildung 25: Gemessen Feuchtigkeit der einzelnen Proben R00P01, R00P02 und R00P03 original vom Hersteller mit eingetragener potenzieller Messungenauigkeit, Quelle: Eigene Darstellung.

6 INTERPRETATION UND DISKUSSION DER MESSERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 5 gezeigten Ergebnisse interpretiert und diskutiert. Wie schon angekündigt wird dazu eine Normierung der Wasserzunahme durchgeführt. Es wird das Trocknungsverhalten der Filamentspule besprochen und eine Trocknungskurve für die Quick Dry Funktion erstellt

Die Feuchtezunahme der äußersten Wicklungsschicht der Referenzspule 0 ist in Abbildung 24 dargestellt. Die Spule wurde 168 Stunden lang einem Normalklima für den nicht tropischen Raum laut DIN EN ISO 291 ausgesetzt und schließlich in variablen Zeitabständen mit einer Feinwaage gewogen. Das Startgewicht der Probe bei Stunde 0 betrug genau 27,0343 g. Die gemessene Feuchtigkeit dieser Probe betrug 0,3649 %. Nach 168 Stunden Konditionierung konnte eine Gewichtszunahme von 0,27 g festgestellt und ein Wassergehalt von 1,3636 % gemessen werden. Zu erkennen ist auch der degressiv steigende Verlauf der Feuchtezunahme. Betrachtet man die Konditionierung ähnlich wie die Trocknung, passt dieser Verlauf zu dem in den theoretischen Grundlagen beschriebenen Verhalten der Feuchteabnahme in Kapitel 2.6.2. Die Wasseraufnahme ist in den ersten Stunden wesentlich höher als in den darauffolgenden. Sieht man sich Abbildung 26 an und vergleicht die Massezunahme in den ersten 168 Stunden mit der in den darauffolgenden 336 Stunden ist auch hier zu erkennen, dass in den ersten Stunden wesentlich mehr Wasser aufgenommen wird als danach. Die primäre Aussage dieser Untersuchung ist demnach, je näher der Wassergehalt der Probe dem Gleichgewichtszustand, desto langsamer nimmt diese Wasser auf und umgekehrt. Je größer die Differenz zwischen Gleichgewichtszustand und aktuellem Wassergehalt der Probe, desto schneller diffundiert Wasser aus der Luft in die Probe. Um die Wasserzu- und abnahmedaten vergleichbar zu machen und da nicht alle Spulen bei Öffnen der Originalverpackung 1000 g Nettogewicht aufwiesen, wurden die Messwerte auf 1000 g normiert. Die Ergebnisse der normierten Wassermassenänderung sind in Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt.



Normierte Wasserabsorption der einzelnen Spulen nach Konditionierung

Abbildung 26: Normierte Wasserabsorption der einzelnen Spulen nach Konditionierung, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 27 zeigt die Wasserzunahme im ersten Konditionierungszeitraum 0 - 168 Stunden, im zweiten Zeitraum 168 - 504 Stunden und die gesamte Wasserzunahme in den 504 Stunden. Erkennbar ist, dass

die meiste Wassermenge im ersten Konditionierungszeitraum aufgenommen wird und im zweiten Konditionierungszeitraum nur mehr eine sehr geringe Menge.



Normierte Gesamtwasserabsorption der einzelnen Spulen nach Konditionierung

Abbildung 27: Normierte Gesamtwasserabsorption der einzelnen Spulen nach Konditionierung als Vergleich, Quelle: Eigene Darstellung.

Auffallend ist, dass die Spulen 1, 4, 6 und 7 jeweils je zwischen 6,54 und 7,54 g und die Spulen 2, 3 und 5 je nur zwischen 4,04 und 5,03 g Masse dazugewonnen haben. Geht man von gleichen Konditionierungsbedingungen einer annähernd gleichen Feuchteverteilung und eine idente und homogene Kunststoffmischung aller sieben Spulen vor Konditionierung aus, wäre dieses Ergebnis nur durch einen Messfehler erklärbar. Da im Zuge der Versuchsreihe diese Abweichung bereits beobachtet wurde, und somit alle Wiegungen dreifach unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt werden konnten, muss auf einen anderen abweichenden Parameter geschlossen werden. Konditioniert wurde mit einem zertifizierten Klimaprüfschrank für industrielle Anwendungen. Aufgrund dieser Tatsache wird davon ausgegangen, dass auch dieser Parameter nicht zu der hohen Abweichung der Massezunahme der Spulen beiträgt. Da auch von vergleichbaren Kunststoffmischungen ausgegangen wird liegt die Vermutung nahe, dass deren ursprüngliche Feuchte, entgegen der in Kapitel 5 zu Beginn beschriebenen Annahme, doch recht unterschiedlich war.

Durchaus interessant ist auch die Frage, warum die normierte Massezunahme der Probe R00P01 und die gemittelte der sieben Spulen so stark voneinander abweichen. Normiert man die gemessene Gewichtszunahme der Referenzspule 0 auf 1000 g, ergibt sich eine Massezunahme von 9,9873 g in 168 Stunden. Die gemittelte Massezunahme der sieben konditionierten Spulen normiert auf 1000 g beträgt im Vergleich nur 5,5076 g.

Die Antwort liegt wohl in der Art der Aussetzung an die Luftfeuchtigkeit. Während die Filamentprobe R00P01 wie in Abbildung 28 zu sehen ist als lose Spirale konditioniert wurde und somit gleichmäßig von der klimatisierten Luft durchströmt werden konnte, konnte bei den, auf Spulen aufgewickelten Filamenten, nur die äußerste Schicht umströmt werden. Daraus lässt sich schließen, dass die Filamentprobe R00P01 überall annähernd homogen konditioniert wurde und somit in Summe mehr Wasser aufnehmen konnte. Diese Aussage wird auch von der Feuchtemessung der Spule 1 in den unterschiedlichen Schichten gestützt, welche in Abbildung 29 zu finden ist.



Abbildung 28: Filamentprobe R00P01 spiralförmig aufgewickelt, Quelle: Eigene Darstellung.

Um rückwirkend auf die mittleren Feuchtewerte der Spulen vor Trocknung bzw. vor Konditionierung schließen zu können, wurde eine mittlere Spulenfeuchte definiert, wie in Formel (25) zu sehen ist. Da Proben nur den Schichten 1, 12 und 24 entnommen wurden, die Spule insgesamt jedoch aus 24 unterschiedlich langen Wicklungsschichten bestehen, müssen für die Ermittlung der mittleren Feuchte die Feuchtewerte der drei Proben im richtigen Verhältnis gewichtet werden. Dazu wurden die jeweiligen Massesummen der Wicklungsschichten 1 – 8, 9 – 16 und 17 – 24 durch die Gesamtmasse der Spule dividiert. Diese Werte sind in Tabelle 17 ersichtlich:

Wicklungsschicht	Teilmasse in %
1	38,01
12	33,90
24	28,09

Tabelle 17: Prozentuelle Masse bezogen auf die Gesamtmasse, zugehörig zur Probenwicklungsschicht, Quelle: Eigene Darstellung.

$$F_M = F_{P1}m_{w1} + F_{P2}m_{w2} + F_{P3}m_{w3}$$

(25)

F_{Mi} Mittlere Spulenfeuchte

 F_{Pi} Gemessene Feuchtigkeit der besagten Probennummer in %

 m_w/kg Teilmasse der besagte Wicklungsschicht in %

Da Feuchtigkeit der Spulen 2 - 7 wurde nur nach dem Trocknen gemessen. So kann ihr von der Referenzspule 0 abweichender Ausgangsfeuchtewert nur näherungsweise berechnet werden. Formel (26) zeigt, wie das über die mittlere Spulenfeuchte durchgeführt werden kann.

$$F_{A_{i}} = \frac{F_{M_{i}} 1000 + m_{Ti} - m_{Ki}}{10} = F_{M_{i}} 100 + \frac{m_{ti} - m_{Ki}}{10}$$
(26)

$$F_{A_{i}} \qquad \text{Näherungsweise mittlere Ausgangsspulenfeuchte in \%}$$

$$F_{M_{i}} \qquad \text{Mittlere Spulenfeuchte in \%}$$

$$m_{Ti}/\text{kg} \qquad \text{Normierte Masseabnahme bei Trocknung}$$

$$m_{Ki}/\text{kg} \qquad \text{Normierte Massezunahme bei Konditionierung}$$

	Mittlere Spulenfeuchte in Prozent					
Spulennummer	Vor Konditionierung	Vor Trocknung	Mittlere Spulenfeuchte			
0	0,3626	0,3626	0,3626			
1	0,3074	1,0610	1,0610			
2	0,7462	1,2494	1,1138			
3	0,7604	1,2632	1,0731			
4	0,2446	0,9695	0,8019			
5	0,9206	1,3247	0,8317			
6	0,3671	1,0215	0,5290			
7	0,3813	1,0366	0,5040			

Diese näherungsweise mittlere Spulenfeuchte vor der Konditionierung der einzelnen Spulen ist in Tabelle 18 zu finden.

Tabelle 18: Näherungsweise errechnete mittlere Spulenfeuchte vor Konditionierung wie auch vor Trocknung unter Zuhilfenahme der mittlerer Spulenfeuchte, Quelle: Eigene Darstellung.

Aus dieser Tabelle lässt sich schließlich die in weiterer Folge benutzte näherungsweise durchschnittliche Ausgangsspulenfeuchte aller Spulen nach Öffnen der Originalverpackung berechnen. Diese beträgt 0,5113 %. Auch die durchschnittliche Spulenfeuchte aller Spulen nach einer Konditionierung von 168 Stunden lässt sich mit 1,1322 % näherungsweise definieren.

Betrachtet man Spule 1, abgebildet in Abbildung 29, lässt sich ein abfallende Materialfeuchte von außen nach innen feststellen. Hier ist schön zu erkennen, dass die Konditionierung bis zur Gleichgewichtsfeuchte noch um einiges länger gedauert hätte. Der abfallende Verlauf schließt sich der Theorie an lässt daraus schließen, dass die Konditionierung je tiefer im Material desto langsamer von Statten geht. Einzig der Vergleich mit Spule 2, zu sehen in Abbildung 30, lässt ein paar Fragen offen. Vergleicht man die Feuchtewerte der Probennummer 3 von Spule 1 und Spule 2 stellt man fest, dass der Feuchtewert von Probe R02P03 im Vergleich zu Probe R01P03 um 0,52 % höher ist und das, obwohl R02P03 eine ganze Stunde lang getrocknet wurde. Dies scheint auf den ersten Augenblick unmöglich, lässt sich schließlich jedoch auch durch die anscheinend unterschiedlichen Ausgangsfeuchten der Spulen erklären.



Gemessene Feuchtigkeit der einzelnen Proben von Spule 1 nach Konditionierung

Abbildung 29: Gemessene Feuchtigkeit der einzelnen Proben R01P01, R01P02 und R01P03, Quelle: Eigene Darstellung.

6.1 Interpretation des Trocknungsverhalten der Filamentspulen

Wirft man einen Blick auf Abbildung 30 und Abbildung 31, fällt sofort der vermutete Zusammenhang auf, dass Wicklungsschichten der Außenseite signifikant schneller trocknen als die im inneren der Spule. Die runden Datenpunkte zeigen die tatsächlich gemessenen Feuchtewerte, verbunden durch eine Gerade, die einen potenziellen Verlauf der Feuchtigkeit in den einzelnen Wicklungsschichten zeigt.



Feuchtigkeitsverlauf auf den Spulen

Abbildung 30: Tatsächlich gemessene Feuchtewerte der Spulen 2 – 7 und dazu mögliche Feuchteverläufe, Quelle: Eigene Darstellung.



Feuchtigkeitsverlauf auf den Spulen

Abbildung 31: Tatsächlich gemessene Feuchtewerte der Spulen 2 – 7 der Wicklungsschichten 1, 12 und 24, Quelle: Eigene Darstellung.

Werden Messfehler ausgeschlossen, fallen hier sofort die Spulen mit den Trocknungszeiten 4 und 16 Stunden (Spule 4 und 6) auf, bei welchen sich zwischen Probennummer 2 und 3 der Feuchtewert nur marginal ändert. Im Gegensatz dazu stehen die anderen vier Spulen die annähernd die gleiche mittlere Steigung besitzen. Das beschriebene Phänomen, wie auch das, bei welchem Spule 5 und 7 im Inneren trotz längerer Trocknungszeit einen höheren Feuchtegrad aufweisen als die um eine Stufe kürzer getrocknete Spule, lässt sich mit den gewonnenen Daten nicht erklären und Bedarf weiterer Untersuchungen. Diese sind nicht Teil dieser Arbeit, um jedoch die Ursachenfindung einfacher zu gestalten werden kurz einige Ideen hierzu diskutiert.

Ungenaue Spulenwicklungen, welche zu Luftlöchern im Inneren und somit zu Wärme/Feuchtebrücken führen können, könnten die Trocknung beeinflussen und somit an bestimmten Stellen die Messungen nicht nachvollziehbar machen. Mittels Bohrungen in die unterschiedlichen Wicklungsschichten der Spule könnte während eines Trocknungsvorganges der Temperaturverlauf im Inneren aufgezeichnet werden.

Auf der Außenseite der Spule befindet sich eine kleine Öffnungen wie in Abbildung 32 zu sehen ist. Durch diese Öffnungen könnte das dahinterliegende Filament viel stärker getrocknet werden als einige Schichten außerhalb. Würde eine Probe genau an dieser Stelle vermessen werden, könnte dies wiederum zu nicht vergleichbaren Ergebnissen führen.



Abbildung 32: Öffnungen auf der Seite der Filamentspule, Quelle: Eigene Darstellung.

Eine weitere ungeklärte Ursache könnte die nicht in Betracht gezogene Diffusion von Wasser durch den Kunststoff der Filamentspule sein. Dies würde bedeuten, dass die Feuchtigkeit nicht nur von Wicklungsschicht 24 über Wicklungsschicht 1 durch alle anderen Schichten nach außen wandert, sondern auch innen durch die Spule selbst und durch die Spulenseitenwände. Um dies zu untersuchen könnte nicht nur der Kunststoff der Spule selbst auf den Wassergehalt untersucht werden, es könnten auch von einer Wicklungsschicht mehrere Proben entnommen werden. Proben direkt an den Außenflächen der Spule und welche im Inneren. Würden die äußeren einen geringeren Wassergehalt nach Trocknung aufweisen, könnte dies die Vermutung der Diffusion von Wasser durch die Kunststoffspule bestätigen.

6.1.1 Ermittlung der Trocknungskurve für die Quick Dry Funktion am Trocknungsgerät

Für die Ermittlung der minimalen Trocknungszeit bei gegebener Filamentausgangsfeuchte, Zieltrocknungsgrad, bekannter Spulengeometrie wie auch benötigter Filamentlänge und Filamentdurchmesser, wird in diesem Unterkapitel eine Formel, basierend auf den gemessenen und interpretierten Daten, beschrieben. Die Spulen 4 und 6 werden aufgrund der nicht erklärbaren Messergebnisse für die Entwicklung dieser Formel außer Acht gelassen. Filamentlänge, Spulengeometrie und Filamentdurchmesser bleiben als Variable in der Formel erhalten und können je nach Bedarf angepasst werden. Da sich die Ausgangsfeuchten der gemessenen Spulen wie in Kapitel 6 beschrieben stark voneinander unterschieden, kann die minimale Trocknungszeit nur grob näherungsweise ermittelt werden. Als weitere Anfangsbedingung wird definiert, dass die Spulen bei Trocknungsstart in allen Wicklungsschichten gleich feucht sind.

Für die Erstellung von Abbildung 33 wurden die Messdaten der Spulen 2, 3, 5 und 7 ausgewertet. Erstellt man aus den errechneten Daten der mittleren Feuchte exponentielle Trendlinien für die gemessenen Spulen und die abfallende Feuchte kann man ähnliche Verläufe erkennen.



Abbildung 33: Exponentiell angenäherter Trocknungsverlauf der mittleren Feuchte von Spule 2, 3, 5 und 7 mit einer Untergrenze (unter den Trockenraumbedingungen minimal erreichbare Feuchtigkeit) in Prozent von 0,35 %, Quelle: Eigene Darstellung.

Es wird folglich angenommen, dass sich die mittlere Filamentfeuchte im hier sichtbaren Bereich annähernd im Bereich zwischen der oberen Näherung in Formel (29) und der unteren Näherung wie in Formel (31) abgebildet verhält.

$$F_{0}(t) = (F_{Start} - F_{Ziel}) e^{-0.063 t_{expo}} + U_{G}$$

$$F_{0}(t) = (F_{Start} - F_{Ziel}) e^{-0.063 t_{expo}} + U_{G}$$

$$F_{2}(27)$$

$$F_{2}(27$$

* unter den vorhandenen Trockenraumbedingungen (hier 0,35 %)

Möchte man nun die Trocknungszeit ausrechnen, müssen die Formeln nach t_{expo} aufgelöst werden. Als $F_i(t)$ wird F_{Ziel} eingesetzt, da die Anzahl der Trocknungsstunden bei Erreichen des Zielwertes gesucht sind.

$$t_{expo_0} = \frac{1}{0,063} \ln \left(\frac{F_{Start} - U_G}{F_{Ziel} - U_G} \right)$$
(29)
$$t_{expo_0}/s$$
Trocknungszeit aus oberer expo. Näherung
 F_{Start} Mittlere Ausgangsfilamentfeuchte in Prozent

		F _{Ziel}	Zielfilamentfeuchte in Prozent
		U_G	minimal erreichbare Feuchtigkeit *
		t _{expou} /s	Trocknungszeit aus unterer expo. Näherung
$t_{arms} = \frac{1}{\ln \left(\frac{F_{start} - U_G}{1 + 1}\right)}$	(30)	F _{Start}	Mittlere Ausgangsfilamentfeuchte in Prozent
$V_{Expo_U} = 0,078 \text{ m} (F_{Ziel} - U_G)$		F_{Ziel}	Zielfilamentfeuchte in Prozent
		U_{G}	minimal erreichbare Feuchtigkeit *

* unter den vorhandenen Trockenraumbedingungen (hier 0,35 %)

Da die Ausgangsfeuchte der einzelnen Schichten nicht gemessen wurde, sondern nur wie in Kapitel 6 gezeigt, mittlere Startwerte berechnet wurden, wird noch eine Abschätzung benötigt, wie stark die Feuchtigkeit der einzelnen Schichten von der mittleren Feuchtigkeit abweicht.

Es bedarf also zusätzlich zu Formel (29) oder Formel (30) noch eine weitere Komponente, welche die Verzögerung der Trocknung von außen nach innen abbildet.

Linearisiert man, wie in Abbildung 34 gezeigt, die Feuchteverläufe der gemessenen drei Schichten der Spulen 2, 3, 5 und 7, lässt sich erkennen, dass sich deren Steigungen stark ähneln und der Unterschied zwischen äußerster und innerster Wicklungsschicht etwa 0,48 % beträgt.



Abbildung 34:Linearisierung des Feuchteverlaufs auf den einzelnen Wicklungsschichten der Spulen 2, 3, 5 und 8, Quelle: Eigene Darstellung.

Ausgehend von dieser Darstellung kann nun das Feuchtegefälle zwischen den Wicklungsschichten mit einer mittleren Steigung von 0,0002 berechnet werden, was einem Feuchtegefälle von 0,02 % pro Wicklungsschicht entspricht. Da es sich bei der hier entstehenden Formel nur um Richtwerte handelt, wird auf die Rundung auf Ganzzahlen, die sich aufgrund der Filament- und Spulengeometrie ergeben, verzichtet. Um überschlagsmäßig auf die minimale Trocknungszeit schließen zu können wird zunächst eine mittlere Wicklungsschichtlänge L_W errechnet:

$$L_{W} = \pi \frac{(S_{D_{A}} + S_{D_{I}})}{2} \frac{S_{B}}{F_{D}}$$

$$L_{W} = \pi \frac{(S_{D_{A}} + S_{D_{I}})}{2} \frac{S_{B}}{F_{D}}$$

$$Mittlere Wicklungsschichtlänge
S_{D_{A}}/m Spulendurchmesser außen
S_{D_{I}}/m Spulendurchmesser innen
S_{B}/m Spulenbreite Innen
F_{D}/m Strangbreite (Filamentdurchmesser)$$

Anschließend wird die benötigte Filamentlänge F_L durch die errechnete Wicklungsschichtlänge dividiert, um die Anzahl der zu trocknenden Schichten F_S zu ermitteln:

$$F_{S} = \frac{F_{L}}{L_{W}}$$
(32) F_{S}
Anzahl der zu trocknenden Schichten
$$F_{L}/m$$
Benötigte Filamentlänge

Um die Trocknungszeit zu berechnen, addiert man in Formel (29) oder Formel (30) je nach Wunsch, zur mittleren Ausgangsfeuchte, das Produkt aus der Anzahl der zu trocknenden Schichten F_S und dem in Abbildung 34 ersichtlichen Feuchtegefälle (0,02 %):

$$t_{max} = \frac{1}{0,063} \ln \left(\frac{F_{Start} - U_G}{F_{Ziel} + 0,02 F_S - U_G} \right)$$
(33) t_{max}/s Maximal nötige Trocknungszeit
$$t_{min} = \frac{1}{0,078} \ln \left(\frac{F_{Start} - U_G}{F_{Ziel} + 0,02 F_S - U_G} \right)$$
(34) t_{min}/s Minimal nötige Trocknungszeit

Als Ergebnis erhält man eine grobe Näherung der minimal bzw. maximal nötigen Trocknungszeit in Abhängigkeit von der Anzahl der benötigten Wicklungsschichten.

7 AUSLEGUNG DES VORTROCKNUNGSGERÄTS BASIEREND AUF DER BEWERTUNG DER MESSERGEBNISSE

Für die Auslegung des Vortrocknungsgerätes wird das von Christen (2010) empfohlene Verfahren in leicht abgeänderter Form angewendet. In Kapitel 2.8 wurde dieses bereits in Form von Tabelle 3 zu Papier gebracht. Die folgenden Unterkapitel richten sich nach den einzelnen Schritten dieser Tabelle.

7.1 Schritt 1: Beurteilung der Gutseigenschaften

Um in Zukunft neben dem in dieser Arbeit verwendeten Kunststofffilament auch andere Typen und Hersteller zu unterstützen, wurde recherchiert, welche verschiedenen Spulengrößen typischerweise zur Anwendung kommen. Derzeit haben sich Filamentdurchmesser von 1,75 mm und 2,85 mm durchgesetzt. Die Nettomasse des aufgewickelten Filaments beträgt zwischen 500 g und 5000 g. In Tabelle 19 ist eine Auflistung bekannter Spulendimensionen und deren Filament-Nettogewicht zu finden.

ID	Spulenbreite außen	Spulenbrite innen	Außendurchmesser	Innendurchmesser	Filament Nettogewicht
01	54 mm	46 mm	200 mm	105 mm	500 g
02	54 mm	58 mm	200 mm	105 mm	750 g
03	68 mm	59 mm	200 mm	105 mm	1000 g
04	103 mm	90 mm	300 mm	215 mm	2300 g
05	115 mm	106 mm	250 mm	100 mm	3000 g
06	103 mm	90 mm	350 mm	215 mm	5000 g

Tabelle 19: Auflistung bekannter Spulendimensionen, inklusive Filament Nettogewicht, Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Auslegung wurden die Spulen mit der ID 03, 04, 05 und 06 ausgewählt. Folglich wird in Schritt 8, der Dimensionierung des Trockners, der Trocknungsraum so gewählt, dass sich eine Kombination mehrerer dieser Spulen im Gerät gleichzeitig trocknen lässt.

Da nur das Trocknungsverhalten des in dieser Arbeit verwendeten Kunststoffs untersucht wurde, wird auch nur auf die Gutseigenschaften eben dieses Kunststoffes eingegangen. Eine kompakte Zusammenfassung der wichtigsten technischen Daten des Herstellerdatenblattes ist in Tabelle 20 niedergeschrieben.

Name	F3 PA Pure Pro
Dichte	1,2 g/cm³
Glasübergangstemperatur laut DIN ISO 11357	72°C
Wärmeformbeständigkeit laut (HDT) DIN ISO 75	90°C
Kontinuierliche Betriebstemperatur laut DIN EN 60216-1	120°C
Wasserabsorption (nach 24h) laut DIN ISO 62	< 0,3 %

Tabelle 20: Ausgewählte technische Daten des getesteten Kunststofffilaments, Quelle: Fiberthree GmbH (2020), Online-Quelle [4.12.2020].

7.2 Schritt 2: Aufnahme der Sorptionsisotherme

Die Sorptionsisotherme wird benötigt, um die maximale relativ herrschende Luftfeuchtigkeit in der Trockenkammer zu bestimmen und somit den maximal möglichen Trocknungsgrad zu definieren. Auf die Aufnahme der Sorptionsisotherme für das verwendete Kunststofffilament wurde in dieser Arbeit verzichtet, da für die Zielfeuchte der getrockneten Filamente ohnehin nur Annahmen und keine exakten Werte vorhanden sind. Stattdessen wird der angenommene Trocknungsgradzielwert in die Sorptionsisotherme in Abbildung 3 in Kapitel 2.3, ebenfalls ein PA6 von der Firma BASF, eingesetzt, um den relativen Luftfeuchtigkeit Grenzwert zu definieren.

Um den in Kapitel 3.1 angenommenen Zielfeuchtewert von 0,4 % zu erreichen, darf in der Trocknungskammer eine maximal relative Luftfeuchtigkeit von etwa 10 % herrschen.

Die Aufnahme der Sorptionsisotherme könnte nach Fertigstellung des Prototyps und Untersuchungen zur Zielfeuchte des Kunststofffilaments für den 3D-Druck nachgeholt werden. Mehr dazu findet sich in Kapitel 9.

7.3 Schritt 3: Aufnahme des Trocknungsverlaufs

Um die Trocknungszeiten so gut als möglich vorhersehen zu können, wurde in Kapitel 6.1.1 eine Formel zu deren Abschätzung ermittelt. Beim Entwickeln dieser Formel entstand ein exponentiell angenäherter Trocknungsverlauffür die mittlere Spulenfeuchte.

Da sich die Ausgangsfeuchtewerte der Spulen stark voneinander unterscheiden und für die genaue Bestimmung der Trocknungsverläufe letztendlich zu wenig Daten verfügbar waren, muss mit dieser Näherung gearbeitet werden. Kapitel 9 enthält Hinweise auf mögliche Vorgehensweisen, um genauere Daten zu erhalten und anschließend einen präzisen Feuchteverlauf darstellen zu können.

7.4 Schritt 4: Festlegen der Betriebsweise und der Auswahl des Trocknertyps

Die Betriebsweise eines Trockners für Kunststofffilament unterscheidet sich erheblich von der bei Granulat Trocknern. Da sich das Kunststofffilament langsam abrollt und auch während des Druckprozesses noch im Trockner befinden soll, wird hier von einer Mischform verschiedener gebräuchlicher Trocknertypen
ausgegangen. Das Trocknungsgerät wird sowohl kontinuierlich bei Direktförderung als auch diskontinuierlich, z.B. beim Auswechseln der Filamentspule, arbeiten müssen. Im Folgenden wird als Trocknertyp ein Konvektionstrockner und aus den drei zugehörigen Trocknungsverfahren Frisch-, Um-, und Trockenluft das passende ausgewählt.

Die Technologieauswahl wurde bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, wird hier jedoch der Vollständigkeit halber als Schritt 4 nochmals ausgeführt. Nach dem Ausschlussverfahren scheidet vorerst ein Frischlufttrockner aus, da hierbei die Trockenleistung ungenügend und der Energieverbrauch zu hoch wären. Die Entscheidung zwischen Um- und Trockenlufttrockner fällt durchaus schwerer, da mittels Trockenlufttrockner nachweislich die besten Ergebnisse erzielt werden können, die Entwicklung und Produktionskosten jedoch um ein Vielfaches höher sind. Um eine kostengünstige Trocknungsoption bieten zu können, fällt die Auswahl schließlich auf einen Umlufttrockner, allerdings mit einer anhand der Trockenkammerluftfeuchtigkeit automatisch gesteuerten Klappe, durch welche das aus dem Kunststoff diffundierte Wasser samt der damit beladenen Luft an die Umgebung abgegeben wird. Die Grundidee wurde bereits von Kröll/Krischer (1959) so definiert, wie Abbildung 35 zeigt.



Abbildung 35: Skizze eines Umlufttrockners mit unbehandelter Frischluft und Feuchteregelung zur Wasserabfuhr, a Trocknungsgut; b Temperaturfühler; c Feuchtefühler; d & e Regler; h Abluftklappe; i Heizelement; l Ventialtor, Quelle: Kröll/Krischer (1959), S. 552 (leicht modifiziert).

Der Gedanke hinter der klappengesteuerten Feuchtluftabfuhr ist, dass ein klassischer Umlufttrockner bei höheren Trocknungstemperaturen mit wenig zusätzlichen Komponenten als eine Art abgespeckter Trockenlufttrockner fungieren kann. Damit kann sichergestellt werden, dass die vorhandene relative Luftfeuchte immer unter dem angestrebten Wert bleibt, der laut Sorptionsisotherme für das Erreichen des Zieltrocknungsgrads des Kunststofffilaments maximal zulässig ist.

Durch Erhitzen der Luft in der Trockenkammer kann die Wasserbeladungsfähigkeit um ein vielfaches gesteigert werden. Dadurch können trotz höherer Umgebungsfeuchte relative Luftfeuchtegrade unter 10 % generiert werden. Wie Tabelle 21 zeigt, ist diese Vorgangsweise nur bis zu einem gewissen Grenzwert umsetzbar. Man sieht darin, wie sich die relative Luftfeuchtigkeit bei verschiedenen Szenarios in der Trockenkammer verhält. Feuchte Umgebungsluft wird in die Trockenkammer eingeblasen und auf die eingestellte Temperatur erhitzt. Da die Menge an Wasser in der Luft konstant bleibt, verringert sich die relative Luftfeuchtigkeit in der Trockenkammer. Für die Berechnung der abgebildeten Werte wird auf die in Kapitel 2.4 hergeleiteten Formeln verwiesen.

Ergänzend findet sich im Anhang 2 ein T/ρ Diagramm zur schnellen Analyse welche Temperaturen im Zusammenhang mit welcher relativen Luftfeuchtigkeit erreicht werden müssen, um in der Trockenkammer unter 10 % zu bleiben.

Umge	ebung	Bleibt konstant	Trockenkammer	
Temperatur in	Relative Luftfeuchtigkeit	Absolute Feuchte	Temperatur	Relative Luftfeuchtigkeit
23°C	50 %	10,24 g/m³	80°C	3,9 %
23°C	100 %	20,49 g/m³	80°C	7,9 %
30°C	50 %	15,12 g/m³	80°C	5,9 %
30°C	100 %	30,25 g/m³	80°C	11,9 %

Tabelle 21: Szenarien verschiedene Umgebungsbedingungen und deren Auswirkung auf die relative Luftfeuchtigkeit in der Trockenkammer, Quelle: Eigene Darstellung.

Um sicherzustellen, dass keine Luft mehr eingeblasen wird, die einen zu hohe Sättigungswert besitzt, kann ein zusätzlicher Temperatur- und Feuchtefühler an der Außenseite des Trocknungsgeräts installiert werden. Mit Hilfe des damit ermittelten Feuchtewertes kann festgestellt werden, ob die Umgebungsbedingungen günstig oder ungünstig für einen Luftaustausch der feuchtebeladenen Luft in der Trockenkammer mit der Umgebung sind:

Für jedes zu trocknende Filament ist der maximal zulässige relative Luftfeuchtigkeitswert in Abhängigkeit vom Zielfeuchtigkeitsgrad des Filaments der Sorptionsisotherme zu entnehmen. Der so gefundene Wert fungiert in der Folge als Schwellwert. Das Trocknungsgerät misst die relative Luftfeuchte im Trockenraum und vergleicht diese mit dem Schwellwert. Wird dieser überschritten, überprüft das Gerät, ob ein Luftaustausch mit frischer Umgebungsluft günstig wäre, und führt diesen dann je nach Ergebnis durch. Günstige Umgebungsbedingungen herrschen dann, wenn die Umgebungsluft, aufgeheizt auf die Zieltemperatur im Gerät, einen geringeren Feuchtewert besitzt als momentan im Gerät vorhanden. Der Ablauf dieser Regelung ist in Abbildung 36 als Flussdiagramm dargestellt:



Abbildung 36: Flussdiagramm der Luftaustauschregelung der Trockenkammer, Quelle: Eigene Darstellung.

7.5 Schritt 5: Festlegen der Strömungsführung

Für die Auslegung der Strömungsführung müssen die folgenden Punkte beachtet werden. Als Basis für die Überlegungen wird das von Kröll/Krischer (1959) dargelegte System verwendet.

- 1. Während des Trocknungsprozesses muss eine ständige Trockenluftbewegung gewährleistet sein, um das in der Luft aufgenommene Wasser von der Materialoberfläche abzutransportieren.
- 2. Während des Trocknungsprozesses darf keine Luft nach außen dringen, da sich sonst der Wirkungsgrad verschlechtert.
- Die Dauer des Luftaustausches sollte so kurz wie möglich gestaltet werden, um ein Abkühlen der Trockenkammer zu vermeiden.
- 4. Die zugeführte Frischluft während des Luftaustausches sollte bereits beim Einströmen erwärmt werden, um die Trocknungsdauer zu reduzieren.



Abbildung 37: Schematische Darstellung der Strömungsführung des Trocknungsgerätes bei Umluft- (links) wie auch bei Luftaustauschbetrieb (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

Eine mögliche Strömungsführung unter Beachtung der erwähnten Punkte ist in Abbildung 37 zu finden. Das Trocknungsgerät führt so lange einen geschlossenen Trocknungskreislauf durch, bis der Schwellenwert der Kammerfeuchte erreicht wurde. Sind die Umgebungsbedingungen günstig für einen Luftaustausch, das heißt, die relative Feuchte der Frischluft kann durch Erhitzen auf die Trocknungstemperatur auf unter 10 % gesenkt werden, öffnen sich die Frischzu- und Abluftklappen und die Frischschluftgebläse werden aktiviert. Im gleichen Moment wird der Heizlüfter ausgeschaltet, das Heizelement jedoch bleibt an. Dadurch kann sich die einströmende Luft bereits sowohl an den heißen Blechwänden als auch am aktiven Heizelement erwärmen und ein Abkühlen der Trocknungskammer kann verhindert werden.

Ist die gesamte Kammerluft ausgetauscht, schließen sich die Klappen, die Frischluftgebläse schalten sich aus und der Heizlüfter übernimmt wieder die Förderung der Luft im Gerät. Anhand des für die Frischluftgebläse angegebenen Luftmenge-Durchsatzes und der Daten der Trocknungskammergeometrie kann ausgerechnet werden, wie lange die Austauschphase dauern muss, um einen vollständigen Austausch der Luft in der Trockenkammer zu gewährleisten. Da durch etwaige Strömungsverluste oder Verwirbelungen in der Kammer die reale Austauschzeit Zeit von der berechneten abweichen kann, wird zur Austauschzeit eine Art Offset hinzugefügt. Die optimale Austauschzeit kann nach dem Aufbau des Gerätes empirisch ermittelt und eingestellt werden.

7.6 Schritt 7: Überprüfung der Annahmen in einer Pilotanlage

Um die aufgestellten Überlegungen testen zu können, wurde das vorhandene Trocknungsgerät so umgebaut, dass es alle relevanten beschriebenen Funktionalitäten der ausgelegten Anlage zur Verfügung stehen. Außerdem wurde die im Rahmen dieser Arbeit programmierte Steuerung und Regelung implementiert. In Abbildung 38 ist zu erkennen, dass ein Aufheizvorgang von 30 auf 80°C mit einem 600 W Heizelement derzeit etwa 12 Minuten benötigt. Die implementierte Regelung lässt die Temperatur nach dem Aufheizen zwischen 80 + 1,83 und 80 - 0,79°C pendeln.



Aufheizvorgang der Pilottrocknungsanlage

Abbildung 38: Aufheizvorgang der Pilottrocknungsanlage von 30 auf 80°C, Quelle: Eigene Darstellung.

Um zu verstehen, warum und wann ein Luftaustausch der Trockenkammer erforderlich ist, folgt hier eine Beispielrechnung. Für die Berechnung der einzelnen Werte wurden die Formeln aus Kapitel 2.4 verwendet:

Angenommen die herrschenden Umgebungsbedingungen werden mit 23°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % gemessen. Die Nettomasse des zu trocknenden Filaments betrage 1000 g und das Trockenraumvolumen des Trockners 0,065 m³. (Dies entspricht in etwa dem Volumen der geplanten Anlage.) So erhält man einen absoluten Wassergehalt in der Trockenkammer von etwa 0,67 g. Erhitzt man nun die Luft in der Kammer auf 80°C, steigt die Aufnahmefähigkeit beim in Kapitel 7.4 erwähnten Schwellenwert von 10 % relativer Luftfeuchte auf 29 g/m³, also in diesem Trockenraum auf insgesamt 1,89 g Wasser an. Startet man mit einer näherungsweise durchschnittlichen Ausgangsspulenfeuchte von 0,5 %, wie in Kapitel 6 definiert, muss, um den geplanten Zielwert von 0,4 % Feuchte im Material zu erreichen, nur 1 g Wasser herausgetrocknet werden. Da dieser Wert die Differenz zwischen Wasseraufnahmefähigkeit vor und Wasseraufnahmefähigkeit nach dem Erhitzen der Luft unterschreitet, muss hier kein Luftaustausch erfolgen. Erhöht man den Startwert der durchschnittlichen Ausgangsfeuchte oder die Masse des zu trocknenden Materials, wird klar, dass die relative Luftfeuchte im Trockenraum über

10 % ansteigen, und somit eine Trocknung bis 0,4 % Materialfeucht nicht mehr möglich wäre, weshalb ein Luftaustausch notwendig wird.

Um visuell darstellen zu können wie sich die Feuchtezunahme in der Trockenkammer verhält und die Klappensteuerung testen zu können, wurden 100 g Wasser in einem Blechgefäß in die Trockenkammer gestellt und der Zyklus gestartet. Beim Erreichen des Schwellenwertes von 10 % relativer Luftfeuchte, wurde der Luftaustausch für 60 Sekunden durchgeführt. Die aufgezeichneten Daten sind in Abbildung 39 zu finden. Man kann erkennen, dass die relative Feuchtigkeit beim Aufheizvorgang von 46 % auf 6 % absinkt. Nach etwa 8 Minuten erreicht die Kammerfeuchtigkeit den Wert von 10 %, die Klappen der Luftzuund Abfuhr werden geöffnet und das Gebläse aktiviert. Nach 60 Sekunden werden die Klappen wieder geschlossen. Man kann nun erkennen, dass die Feuchtigkeit abgesunken ist und langsam wieder zu steigen beginnt. Dieser Vorgang wurde drei Mal wiederholt.



Luftaustauschtests

Abbildung 39: Feuchte- und Temperaturverlauf bei Luftaustauschtests in der Pilottrocknungsanlage, Quelle: Eigene Darstellung.

7.7 Schritt 8: Dimensionierung des Trockners

Bei der Dimensionierung des Trockners wird auf die Daten, die in der Beurteilung der Gutseigenschaften ermittelt wurden, zurückgegriffen. Außerdem wird angenommen und berücksichtigt, dass der Benutzer mehrere verschieden große Filamentspulen trocknen will. Eine weitere Anforderung stellt die bereits vorhandene Geometrie der Produktpalette von Hage3D dar. Das Trocknungsgerät soll sich sowohl an der Rückseite bestehender 3D-Drucker anschmiegen als auch als Standalone Gerät fungieren können. Unter Berücksichtigung der genannten Punkte wurden folgende Maße des Trockenraums sowie die maximalen Außenabmessungen des Trockners ermittelt (siehe Abbildung 40):



Abbildung 40: Innen- und Außenmaße des geplanten Filamenttrockners in Millimeter, Quelle: Eigene Darstellung.

Um sicherzustellen, dass Display und Steuerung des Trockners von einem stehenden erwachsenen Menschen leicht erreicht werden kann, sollte es auf einem Untergestell betrieben werden. Die Tiefe des Trockners wurde so gewählt, dass bei Anwendung in Kombination mit einem Hage3D 84L-A oder einem Hage3D 140L-C Drucker genau zwei Trockner jeweils links und rechts hinter dem Drucker platziert werden können.

7.8 Schritt 9: Auslegung der benutzten Komponenten

Dieses Kapitel beschreibt die geplanten Komponenten wie etwa Sensoren, Aktoren, Schalter, Rechnereinheiten und zusätzlich nötige elektronische Bauteile. Das Kapitel ist in drei Unterkapitel aufgeteilt, beginnend mit den benötigten Sensoren, Aktoren und Schaltern, gefolgt von den Rechnereinheiten und der dazugehörigen Peripherie und abschließend mit zusätzlich notwendigen Komponenten.

7.8.1 Sensor, Aktor, Schalter

DHT22 Temperatur und Luftfeuchtigkeitssensor bis 80°C		
Technische Daten:		
Temperaturmessbereich	-40 bis +80°C ±2°C	
Feuchtemessbereich	0 – 100 % ±2 % relative Feuchte	
Betriebsspannung	3 – 5 V	
Die Verwendung von DHT22 Sensoren ist kostengünstig und liefert ausreichend präzise Daten für den		
geplanten Verwendungsbereich. Angebracht werden je ein Sensor auf der Außenseite des Geräts, um		
die Umgebungsbedingungen zu überprüfen, und einer im Schaltschrank.		

Pt100 Resistance Temperature Detectors (RTD) bis 550°C

l'échnische Daten:	
Temperaturmessbereich	

-200 bis +550°C ±0,5°C bei -10°C bis +85°C

Da es sich hier um ein Standardbauteil handelt, welches in allen möglichen Varianten (zum Einschrauben, zum, stecken, ...) verfügbar ist, und hohe Präzision bei den Temperaturmessungen zu einem vernünftigen Preis liefert, wird eines dieser Elemente für die Überwachung und Regelung der Trockenkammertemperatur eingesetzt. Da die Widerstandsmessung nicht Plug and Play auf der verwendeten Rechnereinheit durchgeführt werden kann, wird noch ein zusätzlicher Schaltkreis benötigt. Dieser ist auf dem später beschriebenen Shield für die Hauptrechnereinheit zu finden.

KFS140 -TO Kapazitiver Feuchtesensor bis 150°C		
Technische Daten:		
Einsatztemperaturbereich	-30 bis +150°C	
Feuchtemessbereich	0 – 100 % relative Feuchte	
Kapazität	180 pF ±50 pF bei 23°C und 30 % relative Feuchte	
Steigung	0,3 pF / % relative Feuchte	
Hysterese	< 1,5 % relative feuchte	

Da die Temperatur in der Trockenkammer, in welcher dieser Sensor installiert wird, 80°C überschreitet und die Feuchte auch bei hohen Temperaturen ausreichend genau gemessen werden muss, sind dafür die zuvor erwähnten DHT22 Sensoren nicht mehr geeignet. Die kapazitive Feuchtemessung kann bis über 200°C verwendet werden, was bei Erweiterung des Trocknungsgeräts mit der Temper-Funktion, welche für die Zukunft angedacht ist, notwendig wird. Auch dieser Sensor kann nicht Plug and Play mit der Hauptrechnereinheit ausgelesen werden und bedarf einer weiteren Schaltung, damit von der Kapazität auf eine Frequenz und anschließend auf die relative Feuchtigkeit geschlossen werden kann.

ebm-papst R2K Radialgebläse		
Technische Daten:		
Betriebsspannung	220 V	
Luftdurchsatz	200 m³/h	
Leistungsaufnahme	32 W	
Drehzahl 2000 U/min		
Fin Usehleistungsheizgehläss, um dis heißen Luftmassen im Inneren der Treckenkommer umwälzen zu		

Ein Hochleistungsheizgebläse, um die heißen Luftmassen im Inneren der Trockenkammer umwälzen zu können. Dieses Gebläse ist für den Dauereinsatz gerüstet und geräuscharm im Betrieb.

Rundheizelement 600 – 1000 W		
Technische Daten:		
Leistungsaufnahme	600 - 1000 W	

Die nötige Wärme wird mittels Rundheizelement in die Kammer gebracht, welches sich direkt um das Heizgebläse legt. Bei der Pilotanlage wurde ein 600 W Heizelement verbaut. Um die Anlage später mit der Temper-Funktion erweitern zu können, wird dieses Element durch eine 1000 W-Variante ersetzt.

Sanyo Denki 9GV0624P1M03 DC-Lüfter		
Technische Daten:		
Dimensionen	60 mm × 60 mm × 38 mm	
Temperatureinsatzbereich	-20 bis +80°C	
Betriebsspannung	24 V	
Maximale Leistungsaufnahme	17,52 W	
Drehzahlgesteuert	Pulsweitenmodulation (PWM)	
Maximaler Luftdurchsatz	1,93 m³/min	
Betriebsspannung Maximale Leistungsaufnahme Drehzahlgesteuert Maximaler Luftdurchsatz	24 V 17,52 W Pulsweitenmodulation (PWM) 1,93 m³/min	

Um den Luftaustausch zu beschleunigen, die Trockenkammer möglichst schnell von der feuchten Luft zu befreien und die Luftaustauschzeit gering zu halten, wurde ein DC-Motor mit hohem Luftdurchsatz gewählt. Beim ersten Prototypen werden zwei Motoren verbaut, eventuell kann auf einen der beiden verzichtet werden. Das werden weitere Experimente zeigen.

7.8.2 Rechnereinheit und Peripherie

Hauptrechnereinheit Raspberry Pi 4		
Technische Daten:		
Prozessor	Quad core 64-bit ARM-Cortex A72 @ 1.5 GHz	
Speicher	4 GB	
General Purpose Input Output (GPIO)	40-Pin GPIO-Header (28 nutzbare GPIOs)	
Video	2 x Mikro-HDMI 2.0 bis zu 4Kp60	
Betriebsspannung	5 V -0,5 +1 V	
Temperatureinsatzbereich	0 – 50°C	

Um eine ansprechende kostengünstige Benutzererfahrung möglich zu machen, wird ein leistungsfähiger Hauptrechner benötigt, der gleichzeitig kostengünstig sein soll. Die Wahl fiel auf den Raspberry Pi 4, der bereits mit allen notwendigen Komponenten für die Implementation der verwendeten Touch-Screen-Einheit ausgestattet ist. Da die Bildverarbeitung einiges an Rechenleistung fordert, ist auf ausreichende Kühlung im Schaltschrank zu achten.

7 Zoll Touch-Screen-Einheit		
Technische Daten:		
Auflösung	1024 x 600 Pixel	
Input	HDMI	
Betriebsspannung	USB-Spannung direkt vom Raspberry Pi	

Verbaut wird diese Einheit direkt vorne am Gerät und ermöglich so dem Nutzer die Steuerung sämtlicher Funktionen via Touch-Screen. Die Displayeinheit wird direkt via HDMI mit dem Raspberry Pi verbunden und von diesem über USB mit Spannung versorgt.

Raspberry Pi Sensor-Shield

Da nicht alle Sensoren direkt von der Hauptrechnereinheit ausgelesen oder werden können, wurde ein Sensor-Shield entwickelt, welches alle nötigen In- und Outputs an Schraubklemmen nach außen führt. Zusätzlich sind Schaltungen für die Verstärkung des RTDs wie auch der kapazitiven Feuchtemessung verbaut. Letztere benötigt zur Berechnung der Messwerte noch eine Mikrocontroller-Einheit (MCU). In der ersten Version der Leiterplatte (PCB) wurde dafür ein Arduino Nano verbaut.

In Abbildung 41 ist das PCB Layout der ersten Shieldversion zu sehen. Unter Anhang 3 findet sich der zugehörige Schaltplan.



Abbildung 41: PCB Layout Raspberry Pi Shield, Quelle: Eigene Darstellung.

7.8.3 Zusätzlich nötige Komponenten

Die folgenden Komponenten sind zwar für die Funktionsfähigkeit der Anlage erforderlich, können jedoch ohne Einbußen durch verschiedene erhältliche Produkte realisiert werden. Die genauen Bezeichnungen und technischen Daten werden daher hier nicht aufgelistet. Die folgende Liste enthält daher lediglich die Namen der benötigten Komponenten:

Auflistung zusätzliche Komponenten

- Netzteil: Raspberry Pi 4 (5 V min. 3 A)
- Netzteil: DC-Lüfter (24 V)
- Überspannungsschutz

- Bimetal Thermoschutzschalter
- Solid State Relais für die Schaltung des Heizelementes
- Micro Servo zur Klappensteuerung
- Schaltschranklüfter
- Diverse Steckerbuchsen und geschirmte Sensor Kabel

7.9 Aufbau der Trocknungssteuerung

Für die Steuerung des Trocknungsgeräts wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) entwickelt. Es folgen ein paar Ausschnitte aus der Beschreibung der GUI und der Steuerung:

Programmiert und visualisiert wurde die Steuerung mit Node-RED, einer Flow-basierten Entwicklungssprache, welche 2013 als Nebenprojekt der Emerging Technology Services Group von IBM von Nick O'Leary und Dave Conway-Jones ins Leben gerufen wurde.

Abbildung 42 zeigt den Startbildschirm der Trocknungssteuerung mit den vier Hauptauswahlmöglichkeiten. Neben der manuellen Trocknung (Dry) und der auf der in Kapitel 6.1.1 entwickelten Formel zur minimalen Trocknungszeit aufbauenden Schnelltrocknungsfunktion (Quick-Dry), gibt es auch noch einen Platzhalter für ein potenziell erweiterbares Feature, dem Tempern von Bauteilen. Außerdem kann man von diesem Bildschirm aus den Einstellungs-Bildschirm aufrufen.



Abbildung 42: Startbildschirm der Trocknungssteuerung, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 43 zeigt den Auswahlbildschirm der Quick-Dry Funktion und Abbildung 44 wie der Bildschirm bei gestartetem Trocknungsvorgang aussieht.

Auslegung des Vortrocknungsgeräts basierend auf der Bewertung der Messergebnisse



Abbildung 43: Auswahlbildschirm des Trocknungsmodus Quick-Dry, Quelle: Eigene Darstellung.



Abbildung 44: Bildschirm einer Laufenden Trocknung, Quelle: Eigene Darstellung.

7.10 Designvorschlag

Um eine Vorstellung von dem für die Zukunft geplanten Seriengerät zu bekommen, wurde für einen Designvorschlag ein 3D-Modell erstellt (Abbildung 45). Bei dem Vorschlag wurde großer Wert auf eine möglichst kostensparende Produktionsmöglichkeit gelegt. Die Fertigungszeichnungen werden in weiterer Folge von Konstrukteuren der Firma Hage3D übernommen. Das Design orientiert sich stark an dem bereits

vorhandenen Produkt Portfolio der Firma. Außerdem wurden ähnliche Bauteilgruppen, wie etwa spezielle Türscharniere oder der Türgriff, wie bei bestehenden Anlagen der Firma verwendet.



Abbildung 45: Renderings des Trocknungsgerätes aus zwei Ansichten, Quelle: Eigene Darstellung.

Ob und in welcher Form die Glastüre beim Seriengerät vorhanden sein wird, wird nach Betrachtung der im nächsten Projektschritt (außerhalb dieser Masterarbeit) ermittelten Kostentreiber entschieden werden. In Abbildung 46 ist ein möglicher Anwenderfall und eine Tischpositionierung des Trocknungsgeräts zu sehen.



Abbildung 46: Rendering eines möglichen Anwenderfalles in einer Werkstatt, Quelle: Eigene Darstellung.

In diesem Kapitel wurde die Auslegung der Trocknungsanlage in 10 Schritten behandelt. Begonnen wurde mit der Beurteilung der Gutseigenschaften und einer Zusammenfassung möglicher Spulengeometrien. Nachdem beschrieben wurde, warum die Sorptionsisotherme in dieser Arbeit nicht ermittelt wurde, folgte ein Verweis auf die in Kapitel 6 ermittelte Aufnahme des Trocknungsverlaufs. In Schritt 4 der Auslegung wurde als trocknertyp ein Umlufttrockner ausgewählt und darauffolgend die Strömungsführung mittels Grafik erläutert. Nachdem die Tests der Pilotanlage vielversprechende Ergebnisse erwarten lassen, wurden die Dimensionen des Trockenraums bzw. die Außenabmaße beschrieben. Die Auflistung und Beschreibung notwendiger Komponenten bildet als vorletzter Schritt einen wichtigen Teil dieses Kapitels.

Die letzten zwei Abbildungen bilden das Ende der Entwicklung des Trocknungsgeräts und legen gemeinsam mit den in den Kapiteln der letzten Seiten ermittelten Werte den Grundstein für die Konstruktion des zweiten Prototyps wie auch des Seriengeräts.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND ERKENNTNISSE

Dass und warum es sinnvoll ist, sich mit dem Thema Filamentvortrocknung bei hygroskopischen Kunststoffen für FFF-Verfahren auseinanderzusetzen, wurde in den theoretischen Grundlagen beschrieben und bestätigt. Die Verarbeitung von zu feuchten Kunststofffilamenten führt nicht nur optisch, sondern auch mechanisch zur Reduzierung der Qualität des Endproduktes. Durch erhöhten Wassergehalt im Filament kann es bei der Verarbeitung zu unterschiedlichen Durchflussraten aus dem Extruder kommen, was neben der Verschlechterung der Schichthaftung auch die Maßgenauigkeit und die Bauteilhaftung am Druckbett ungünstig beeinflussen kann. Um diese Effekte zu eliminieren ist eine Vortrocknung hygroskopischer Kunststoffe vor der Verarbeitung unausweichlich. Dies gilt jedoch nur direkt vor der Verarbeitung. Im Endprodukt wirkt sich Feuchtigkeit bis zu einem gewissen Grad sogar positiv auf die mechanischen Eigenschaften aus.

Auch wenn die Hersteller der Filamentspulen einen trockenen Auslieferungszustand angeben, hat sich in dieser Arbeit gezeigt, dass die Restfeuchtigkeitswerte von Filamenten sogar derselben Produktionsreihe massiv voneinander abweichen können. Dies kann durch die Handhabung in der Produktion, falsche Trocknung, Lagerung oder Verpackung beim Hersteller sowie Beschädigungen beim Transport verursacht werden. Daher empfiehlt es sich, auch direkt aus der Originalverpackung entnommenen Kunststoff vorzutrocknen oder wenn möglich die Feuchtigkeit zumindest an der äußersten Schicht der Spule zu messen.

Um das Problem der verschiedenen Ausgangsfeuchten in den Griff zu bekommen, wäre es sinnvoll die Spulen einige Wochen vorzutrocknen. Die Untersuchung mehrerer Spulen pro Trocknungszeitraum würde darüber hinaus die Fehlerwahrscheinlichkeit senken und die Aussagekraft der Messergebnisse erhöhen.

Trotz der beschriebenen Einschränkungen konnten aus den Messreihen einige Erkenntnisse bzw. Trends abgeleitet werden. Spulen trocknen außen schneller als innen und es ließ sich ein linearer Feuchteverlauf zwischen der äußersten und der innersten Schicht annähern.

Betrachtet man bei der Auswahl des Trocknertyps nur die Trocknungs- und Energieeffizienz, wäre ein Trockenluft-Trockner die ideale Wahl. Aufgrund der in der Einleitung genannten Zieldefinition welche neben anderen Kriterien auch den finanziellen Aspekt enthält, wurde für diese Arbeit jedoch ein Umlufttrockner ausgewählt. Am Markt orientierend wäre es nicht wirtschaftlich, eine komplexe Technologie zu nutzen, wenn auch mit einfacheren Mitteln akzeptable Ergebnisse erzielt werden können und ein niedriger Produktionspreis notwendig ist, um im Wettbewerb bestehen zu können. Um dennoch die Vorteile von Trockenlufttrocknern mit in die Auslegung des finalen Gerätes einfließen zu lassen, wurde eine Klappensteuerung entwickelt, welche das ausdiffundierte Wasser der Filamentspulen ab Erreichen einer bestimmten Kammerfeuchte aus der Trockenkammer befördert, indem ein kompletter Luftaustausch durchgeführt wird. Um sicherzustellen, dass dies nur bei günstigen Umgebungsbedingungen geschieht, wird in die Regelung auch die Umgebungsfeuchte miteinbezogen.

Aus den Erkenntnissen der Feuchtigkeitsmessung an den unterschiedlichen Stellen der Filamentspulen bei sich unterscheidenden Trocknungszeiten konnte eine Funktion ermittelt werden, mittels derer sich ein Näherungswert für die notwendige Trocknungszeit des getesteten PA6 berechnen lässt. Diese Funktion ist abhängig von der Spulendimension, des Filamentdurchmessers sowie von der für den Druck benötigten Filamentlänge. Weitere Parameter der Funktion sind die Ausgangsfeuchte und die gewünschte Zielfeuchte. Diese Funktion kann nicht direkt auf andere Filamente angewandt werden und muss daher nach Ermittlung von Untersuchungsdaten zum Trocknungsverlauf dieser Filamente entsprechend angepasst werden.

Anhand der für den Trockner implementierten Benutzeroberfläche und einer darin hinterlegten Funktion ist es dem Benutzer möglich, eine Abschätzung über die Trocknungszeit für die benötigte Filamentlänge zu erhalten. Dies ist derzeit allerdings nur möglich, wenn sich im Trocknungsraum nur die zu verwendende Spule befindet. Zusätzlich Feuchtigkeit von anderen Spulen im Trocknungsraum würden das Ergebnis verfälschen.

Der Trocknungsraum wurde so dimensioniert, dass zur simultanen Trocknung mehrere Spulen unterschiedlicher Abmessung gleichzeitig Platz finden. Für die Definition der Spulengröße wurde eine Studie durchgeführt und die dabei gefundenen häufigsten Spulendimensionen ausgewählt. Beim Design wurde Rücksicht auf das von Hage3D bereits bestehende Produkt Sortiment genommen, sodass dieses sowohl optisch als auch in der Handhabung ins Portfolio passt und damit für zukünftige Kunden ein Kaufanreiz geschaffen wird.

Die Versuche in der Pilotanlage waren so erfolgreich, dass das entwickelte Steuerungs- und Regelungskonzept freigegeben wurde.

Zum Schluss bleibt noch zu ergründen, ob das in der Einleitung definierte Ziel erreicht wurde. Das Verhalten von PA6 bei der Aussetzung einer definierten Luftfeuchtigkeit wie auch bei thermischer Vorbehandlung wurde untersucht und dokumentiert. Darauf und auf den theoretischen Grundlagen aufbauend wurde anschließend ein Vortrocknungsgerät zur Filamenttrocknung ausgelegt. Ausgehend von der Formel zur Bestimmung der Trocknungszeit kann mit Hilfe weiterer Untersuchungen eine Funktion für andere Kunststoffe und Spulengeometrien entwickelt werden. Das definierte Design lässt eine Förderung direkt aus der Trocknungskammer zu und ist an die von Hage3D geforderten Eckdaten angepasst. Die Benutzeroberfläche wurde übersichtlich gestaltet. Wegen der vorhandenen Hilfefunktion für jedes Benutzeroberfläche ohne die Zuhilfenahme Funktionsfenster kann die einer gedruckten Bedienungsanleitung genutzt werden. Ein Vergleich mit den Preislisten der am Markt bereits verfügbaren Trocknungsgeräte zeigt, dass das entwickelte Gerät konkurrenzfähig sein sollte. Zur Performance kann zum jetzigen Zeitpunkt noch keine genaue Aussage getroffen werden, da die dazu notwendigen Versuche erst nach Fertigstellung des finalen Gerätes durchgeführt werden können. Eine genaue Vorhersage ist zwar nicht möglich, jedoch sind die bisher gewonnenen Daten vielversprechend.

9 AUSBLICK

Der nächste Schritt, um zu einer serienfertigbaren Trocknungslösung zu gelangen, ist ein dem Produkt entsprechender Prototyp inklusive Blechkonstruktion und Fertigung sämtlicher Bauteile. Dieser befindet sich bereits im Endprodukt-Stadium. In weiterer Folge müssen in dem Prototypen einige Filamentspulen getrocknet und somit seine Funktionsfähigkeit verifiziert werden. Nach Anpassungen infolge der daraus gewonnenen Erfahrungen sollen schließlich die Kostentreiber identifizier und eine kostengünstige Fertigungsmöglichkeit gefunden werden.

Hier folgt eine Sammlung von Ideen und Vorschlägen, die im Zuge dieser Masterarbeit gesammelt wurden und Potential für weitere Untersuchungen und Forschung bieten, bei genauer Ausführung aber den Rahmen sprengen würden.

9.1 Maximal verarbeitbare Feuchte im Filament

Eine der interessantesten Fragen, die sich im Zuge dieses Projektes ergeben hat, war die nach der Maximalfeuchte im Filament, bei der in der Verarbeitung verlässlich gerade noch keine mechanischen oder optischen Defiziten produziert werden. Ein komplexes Themengebiet, dessen Erforschung umfangreiche Materialstudien und Versuchsreihen beinhalten würde. Wären diese Werte für die gebräuchlichen Filamente bekannt, könnte die Auslegung des Trockners und der Trocknungsregelung noch daraufhin optimiert werden. Eine generelle Aussage für verschiedene Kunststofftypen kann hier kaum getroffen werden, da jeder Filamenthersteller seine eigenen Rezepturen verwendet, um die Materialien für den 3D-Druck zu optimieren. Es gibt sogar Untersuchungen, dass schon eine andere Farbe des ansonsten gleichen Materials zu anderen Druckergebnissen führen kann.⁷⁷ Verdeutlichen soll dies, dass die Bestimmung der optimalen Restfeuchte für jedes Filament extra bestimmt werden sollte. Um diesen Wert und die dazu notwendigen Prozessparameter zu definieren wird es notwendig sein, in den Markt einzutauchen und sich die Zielvorgaben der gewünschten Endqualität der gedruckten Bauteile anzusehen. Die Bewertung sollte über die der mechanischen Eigenschaften hinausgehen und auch optische Aspekte wie etwa Unebenheiten, Rillen, Blasen oder Fädenbildung berücksichtigen.

9.2 Mechanische Qualität der Druckergebnisse

Für die mechanische Bauteilbeurteilung eignen sich Zug-, Biege und Torsionsversuche. Aus den Erfahrungen einer klein angelegten Studie über die Veränderung der Zugfestigkeit bei unterschiedlichen Feuchtegraden, zu sehen in Abbildung 47, könnten wertvolle Erkenntnisse für die Vorbereitung der Proben gesammelt werden.

⁷⁷ Vgl. iGo3D GmbH (2016), Online-Quelle [02.11.2016]



Zugfestigkeitsstudie an Zugproben gedruckt bei unterschiedlichen Filamentfeuchten

Abbildung 47: Zugfestigkeitsstudie an Zugproben gedruckt bei unterschiedlichen Filamentfeuchten, Quelle: Eigene Darstellung.

Um aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können, sollte auf mechanische Nachbearbeitung wie etwa das Entfernen verschiedener Hilfsstrukturen am Bauteil, welche die Betthaftung verbessern sollen, verzichtet werden. Beim Entfernen einer solchen Struktur könnten Kerben entstehen, welche das Ergebnis verfälschen würden. Die Vermutung liegt nahe, dass dies bei den Zugprobennummern 1 und 4 des in Abbildung 47 gezeigten Versuchs der Fall war. Ignoriert man diese beiden Messungen lässt sich ein Trend erkennen, wie Abbildung 48 zeigt.

Zugfestigkeitsstudie an Zugproben gedruckt bei unterschiedlichen Filamentfeuchten Potentielle Fehlmessungen ausgeschlossen



Abbildung 48: Zugfestigkeitsstudie an Zugproben gedruckt bei unterschiedlichen Filamentfeuchten - Potenzielle Fehlmessungen ausgeschlossen, Quelle: Eigene Darstellung.

Je höher die Feuchtigkeit im Filament beim Druck, desto niedriger die Zugfestigkeit.

Auch der Ansetzpunkt einer jeden Schicht sollte an der Stirnseite der Proben gewählt und nicht zufällig auf der Probe verteilt werden. Jede Probe sollte außerdem zumindest drei Mal zu Verfügung stehen, um Datenausreißer oder Fehlmessungen lokalisieren zu können.

9.3 Sorptionsisotherme

Nachdem die optimale Restfeuchte bestimmt wurde, wäre es sinnvoll im Versuch die Sorptionsisotherme für das verwendete Filament zu ermitteln. Mit deren Hilfe könnten Lagerbedingungen definiert werden, welche die benötigten Filamenttrocknungszeiten reduzieren. Außerdem wäre es damit möglich die maximal erlaubte Trockenkammerfeuchte genau zu bestimmen. Das könnte sich positiv auf die Energiekosten und die Trocknungszeit auswirken. Ideal wäre, wenn bereits der Hersteller der Filamente sowohl die optimal verdruckbare Filamentfeuchte als auch die passende Sorptionsisotherme angeben würde. Da Hage3D mit einigen Filamentherstellern zusammen arbeitet, wird der Autor bei diesen einen entsprechenden Vorschlag einbringen.

9.4 Weitere Messreihen

Die Trocknungszeiten könnten noch besser optimiert werden, wenn die während dieser Arbeit passierten Fehler vermieden und die Messungen mit den hier gewonnenen Erfahrungen wiederholt werden würden.

Um nicht auf die Herstellerangeben des Trocknungszustandes der originalverpackten Spulen vertrauen zu müssen und vergleichbare Messungen zu erzielen wäre es hilfreich, die Spulen vor Konditionierung bis zu einem definierten Zustand vorzutrocknen.

Für die Feuchtemessung empfiehlt sich außerdem ein Gerät mit einer möglichst geringen Fehlerwahrscheinlichkeit. Da bei der Messung mit einem AQUATRAC® - 3E die Probe immer zuerst eingewogen werden muss, könnte sich ein potenzieller Wiegefehler mit dem Messfehler des Gerätes aufsummieren und zu ungenauen Ergebnissen führen. Es könnte z.B. untersucht werden, ob thermogravimetrische Messungen, etwa mit einem Moisture Analyzer HX204 der Firma Mettler Toledo GmbH, fehlerresistenter wären. Erste Tests und Messungen mit diesem Gerät am definierten Filament sahen sehr vielversprechend aus.

9.5 Räumlicher und zeitlicher Feuchteverlauf

Um Trocknungsgerät und -verfahren weiter optimieren zu können, könnte ein Modell hilfreich sein, welches die den räumlichen und zeitlichen Verlauf der Feuchte im Filament auf der Spule während seiner Trocknung oder auch dem Ausgesetzt sein an die Umgebungsluft abbildet. Die Modellerstellung ist in diesem Fall jedoch nicht trivial. Man könnte den aufgewickelten Kunststoff zwar als zylindrische Probe vereinfachen, um jedoch wirklich aussagekräftige Daten zu bekommen müsste die Wicklung und die daraus resultierenden Luftzwischenräume zwischen den Strängen mitberücksichtigt werden.

9.6 Feuchtemessung per NIR

Bei der Suche nach einer geeigneten Methode, das Filament auf seinen Feuchtegehalt zu überprüfen wurde auch die Möglichkeit in Betracht gezogen, Nahinfrarot einzusetzen. Nach ausgiebiger Diskussion mit dem Hersteller musste diese Technologie zumindest derzeit für die präzise Messung ausgeschlossen werden. Dennoch wurden einige Filamentproben unterschiedlichen Feuchtegehalts in Zusammenarbeit mit dem Hersteller des Messgeräts untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen waren jedenfalls

vielversprechend, da sich die gemessenen Spektren bei unterschiedlichen Materialfeuchten deutlich voneinander unterschieden, wie in Abbildung 40 erkennbar ist:



NIR Spektrum unterschiedlich feuchter Proben

Abbildung 49: Mittels Nahinfrarot gemessenes Spektrum unterschiedlich feuchter Filamentproben, Quelle: Eigene Darstellung.

Es gibt zwar keine direkte Ablesemöglichkeit, da die Absorbanz nicht direkt auf die Feuchte schließen lässt, es lässt allerdings hoffen, dass diese Technologie in Zukunft in ausgereifterer Form für Onlinemessungen direkt am 3D-Drucker verwendet werden könnte. Wesentlich für die Interpretation wird wahrscheinlich der richtige Algorithmus sein, um die Spektren den passenden Feuchtegraden zuordnen zu können. Dies wurde vom Hersteller des Geräts bestätigt.

9.7 Luftzufuhr des Trockners

Weitere Entwicklungszeit könnte bei der Luftzufuhr des Trockners während des Luftaustausches veranschlagt werden. Mit öl- und wasserabgescheideter Druckluft könnte unabhängig von den Umgebungsbedingungen immer sichergestellt werden, dass nur trockene Luft in die Trocknungskammer

eingeblasen wird. Zwar kommt es bei der Expansion komprimierter Luft zur Abkühlung der Trocknungskammer, der positive Effekt, der daraus resultierenden geringeren relativen Feuchte der Trockenluft könnte jedoch überwiegen. Druckluft ist mittlerweile in vielen Produktionsbetrieben Standard, daher müsste dafür nur eine Anschluss- und Steuermöglichkeit am Trockner entwickelt werden.

9.8 Beobachtung des Feuchteverlaufs während der Trocknung

Um den zeitlichen Feuchteverlauf der zu trocknenden Spulen live verfolgen zu können und z.B. passende Abschaltkriterien zu entwickeln, könnten die Spulen während des Trocknungsprozesses durchgehend gewogen werden. Hierfür gälte es eine Wägezelle auszulegen, die minimal Gewichtsreduktionen messen kann. Wahrscheinlich wird hier der Einfluss von Vibrationen des Geräts auf die Zelle und deren Messergebnisse untersucht und berücksichtigt werden müssen. Solche Vibrationen könnte beispielsweise der Heizlüfter bei minimalen Unwuchten verursachen.

9.9 Lagerkammer unter dem Trockner

Als zusätzliche Komponente könnte unter dem Trockner eine zusätzliche Lagerkammer errichtet werden. Damit könnte einerseits das Untergestell eingespart, die Stehhöhe beibehalten und eine Lagermöglichkeit geschaffen werden. Aus den passenden Sorptionsisothermen abgeleitet könnte schließlich das Klima in der Lagerkamme so gewählt werden, dass die Spulen nach Trocknung keine zusätzliche Feuchte mehr aufnehmen.

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (19)

Johannaber, Friedrich; Michaeli, Walter (Hrsg.) (2004): *Handbuch Spritzgießen*, 2 Auflage, Carl Hanser, München

Baehr, Hans (2005): *Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen*, 12 Auflage, Springer-Verlag, Berlin

Baur, Erwin; Brinkmann, Sigrid; Osswald, Tim; Schmachtenberg, Ernst (2007): *Saechtling Kunststoff-Taschenbuch*, 30 Auflage, Carl Hanser, München

Christen, Daniel (2010): *Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik - Handbuch für Chemiker und Verfahrensingenieure*, 2 Auflage, Springer-Verlag, Berlin

Domininghaus, Hans (2012): *DOMININGHAUS - Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*, 8 Auflage, Springer, Berlin

Ehrenstein, Gottfried (2011): *Polymer-Werkstoffe - Struktur - Eigenschaften - Anwendung*, 3 Auflage, Carl Hanser Verlag, München

Fastermann, Petra (2016): *3D-Drucken - Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert*, 2 Auflage, Berlin

Fastermann, Petra (2012): *3D-Druck/Rapid Prototyping - Eine Zukunftstechnologie - kompakt erklärt*, 1 Auflage, Springer Vieweg, Berlin

Fein, Bernd (2016): Kunststoffdatenblätter Spritzgießen, 1 Auflage, Beuth Verlag, Berlin

Gebhardt, Andreas (2016): Additive Fertigungsverfahren - Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion, 5 Auflage, Carl Hanser Verlag, München

Goff, John; Whelan, Tony (2000): The Dynisco Extrusion Processors Handbook, 2 Auflage, Franklin

Krischer, Otto; Kast, Werner (1978): *Trocknungstechnik - Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, 3 Auflage, Springer-Verlag, Berlin

Kröll, Karl; Krischer, Otto (1959): Trockner und Trocknungsverfahren, 1 Auflage, Springer-Verlag, Berlin

Lutterbeck, Karin (2016): Das Verhalten von Kunststoffen unter dem Einfluss wechselnder Umgebungsfeuchte und -temperatur, 1 Auflage, RAM-Verlag, Lüdenscheid

Mersmann, Alfons; Kind, Matthias; Stichlmair, Johann (2005): *Thermische Verfahrenstechnik - Grundlagen und Methoden*, 2 Auflage, Springer-Verlag, Berlin

Ortner, Jens; Hensler, Gerold (1995): *Beurteilung von Kunststoffbränden : bei einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs entstehende Stoffe nach den Anhängen II - IV der 12. BlmSchV*, 1 Auflage, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, München

Smallwood, Ian (2012): Handbook of Organic Solvent Properties, 1 Auflage

Stahl, Peter (1980): *Feuchtigkeit und Trocknen in der pharmazeutischen Technologie*, 1 Auflage, Steinkopff-Verlag, Berlin

Stephan, Peter; Schaber, Karlheinz; Stephan, Karl; Mayinger, Franz (2009): *Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen*, 18 Auflage, Springer-Verlag, Berlin

Wissenschaftliche Artikel (11)

Abacha, N; Kubouchi, M; Sakai, T (2009): *Diffusion behavior of water in polyamide 6 organoclay nanocomposites*, in: Express Polymer Letters, 3/2009, S. 245-255

Fana, Wei; Liuab, Tianxi; Zhang, Xu (2020): *Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications*, in: Composites Communications, 21/2020

Ferreño, Diego; Carrascal, Isidro; Ruiz, Estela; Casado De Prado, J (2001): *Characterisation by means of a finite element model of the influence of moisture content on the mechanical and fracture properties of the polyamide 6 reinforced with short glass fibre*, in: Polymer Testing, 30/2001, S. 420-428

Garces, Irina; Aslanzadeh, Samira; Boluk, Yaman; Ayranci, Cagri (2019): *Effect of Moisture on Shape Memory Polyurethane Polymers for Extrusion-Based Additive Manufacturing*, MDPI, S. 1-19

Heyn, Johannes; Bonten, Christian (2014): *Feuchtigkeitseinfluss auf die fließbruchmechanischen Eigenschaften von PA6-Kautschuk-Blends*, in: Zeitschrift Kunststofftechnik, 10/2014, Carl Hanser Verlag, S. 176-194

Jia, Nanying; Kagan, Val (2001): *Mechanical Performance of Polyamides with Influence of Moisture and Temperature - Accurate Evaluation and Better Understanding*, in: Plastics Failure Analysis and Prevention, Plastics Design Library, S. 95-104

Lechner, Tobias; Noack, Kristina; Thöne, Manuel; Amed, Philipp; Schmidt, Michael; Will, Stefan (2016): Investigating the Moisture Content of Polyamide 6 by Raman-Microscopy and Multivariate Data Analysis, in: Physics Procedia, 83/2016, Elsevier BV, S. 1271-1278

Sharma, P; Sambale, Anna; Stommel, M; Maisl, M; Herrmann, H; Diebels, S (2019): *Moisture transport in PA6 and its influence*, in: Continuum Mechanics and Thermodynamics, 32/2019, Springer-Verlag, S. 307-325

Shinzawa, Hideyuki; Mizukado, Junji (2020): *Water absorption by polyamide (PA) 6 studied with two-trace two-dimensional (2T2D) near-infrared (NIR) correlation spectroscopy*, in: Journal of Molecular Structure, 1217/2020

Silva, Leonel; Tognana, Sebastián; Salgueiro, Walter (2013): *Study of the water absorption and its influence on the Young's modulus*, in: Polymer Testing, 23/2013, S. 158-164

Zaldivar, Rafael; Mclouth, Tait; Ferrelli, Geena; Patel, Dhruv; Hopkins, Alan; Witkin, David (2018): *Effect of initial filament moisture content on the microstructure and mechanical performance of ULTEM*® 9085 *3D printed parts*, in: Additive Manufacturing, Elsevier BV, S. 457 - 466

Konferenzbeiträge (2)

Kast, Oliver; Bonten, C (2015): Vorhersage des Trocknungsverhaltens hygroskopischer Kunststoffe, in: 24. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, IKT, Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart, Stuttgart

Lieneke, Tobias; Denzer, Vera; Adam, Guido; Zimmer, Detmar (2016): *Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for Fused Deposition Modeling*, in: BV, Elsevier (Hrsg.): *14th CIRP CAT 2016 - CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, S. 286-291

Online-Quellen (13)

iGo3D GmbH (2016): *iGo3D*

http://blog.igo3d.com/filament-studie-von-fraunhofer-wki-igo3d-teil-3/ [Stand: 02.11.2016]

Lanxess Corporation (2005): *TechCenter High Performance Materials* https://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/PIB_Durethan_Moisture_Absorption.pdf?docld =76987 [Stand: 09.09.2020]

Mettler Toledo GmbH (2018): *Mettler Toledo* https://www.mt.com/dam/P5/labtec/05_Moisture_Analyzer/01_Professional_Line/03_Documents/04_Data sheets/DS_HX204_en.pdf [Stand: 11.09.2020]

Brabender Messtechnik GmbH & Co. KG (2020): *AQUATRAC Station – Feuchtemessung in Kunststoffen* https://www.brabender-mt.de/wp-content/uploads/AQUATRAC-Station_DE_4P_Web.pdf [Stand: 11.09.2020]

Brabender Messtechnik GmbH & Co. KG (2020): *AQUATRAC-V – Feuchtemessgerät für Kunststoffe* https://www.brabender-mt.de/wp-content/uploads/AQUATRAC-V_DE_4P_Web.pdf [Stand: 11.09.2020]

Solid Scanner (2020): *Solid Scanner – Kompaktes NIR Spektrometer als Mini-Labor* https://www.solidscanner.com/nir-spektrometer-nir-scanner-mobil-faustgross-kompakt/ [Stand: 11.09.2020]

Mettler Toledo GmbH (2016): *Guide to Moisture Analysis - Fundamentals and Applications* https://www.mt.com/dam/non-indexed/po/labtec/moisture-analyzers/white-papers/GU_Moisture-Analyzer-EN.pdf [Stand: 14.09.2020]

Weiss Umwelttechnik GmbH (2020): Weiss Technik

https://www.weiss-

technik.com/fileadmin/Redakteur/Mediathek/Broschueren/WeissTechnik/Umweltsimulation/Voetsch/Voets ch-Technik-VC3-VCS3-EN.pdf [Stand: 01.12.2020]

Fiberthree GmbH (2020): Fiberthree

https://www.fiberthree.com/downloads/tdb/filaments/TDB-F3_PA_Pure_Pro.pdf [Stand: 4.12.2020]

Sartorius AG (2007): *Bayerische Waagenbau Werkstätte - Wägetechnik (fast) ohne Grenzen* https://www.bayernwaage.de/de/download/?dl=ME_Bedienungsanleitung_de.pdf [Stand: 04.12.20]

PURPOSE AM SYSTEMS (2019): iGO3D

https://www.igo3d.com/mediafiles/Sonstiges/PurposeAMS/P2019-A5_Large%20OEMDryers.pdf [Stand: 17.12.2020]

Alpaplastic S.r.I. (2020): *Alpaplastic S.r.I. - Technic in spools* http://alpaplastic.com/en/RS_200_KD.php?cat=3d [Stand: 12.28.2020]

LegalForce, Inc. (2020): Trademarkia

https://trademark.trademarkia.com/fdm-74133656.html [Stand: 10.08.2020]

Normen (2)

Beuth-Verlag (Hrsg.) (2008): DIN EN ISO 291: DIN EN ISO 291:2008-08

Beuth-Verlag (Hrsg.) (2008): DIN EN ISO 62: DIN EN ISO 62:2008-05

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Zugproben gedruckt aus ULTEM [®] 9085 Filament mit verschiedenen Feuchtegraden, Quelle:
Abblidung 2: Amid-Gruppe der Polyamide, Quelle: Dominingnaus (2012), S. 609.
Abbildung 3: Sorptionsisotherme von BASF Ultramid® B3S (PA6), Quelle: Kast/Bonten (2015) 10
Abbildung 4: Absorption von Wassermolekülen von PA6, Quelle: Shinzawa/Mizukado (2020), S. 2 (leicht modifiziert)
Abbildung 5: Einteilungsarten und mögliche Beziehungen zwischen Sorptiv und Sorbens (w Materialfeuchtegrad, φ relative Umgebungsluftfeuchtigkeit), Quelle: Stahl (1980), S. 22
Abbildung 6: PA6 3D-Druck mit unterschiedlich feuchtem Filament (links: 0,35 %, mittig 0,84 %, rechts: 1,56 %), Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 7: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von trockenem, luftfeuchtem und nassem PA6, Quelle: Ehrenstein (2011), S. 229 (leicht modifiziert)
Abbildung 8: Elastizitätsmodul und Streckgrenze in Abhängigkeit vom Wassergehalt von PA6, Quelle: Lechner/Noack/Thöne/Amed/Schmidt/Will (2016), S. 1275 (leicht modifiziert)
Abbildung 9: Mit Doppel-V-Kerbe ermittelte Kerbschlagzähigkeit von PA6 in Abhängigkeit von Temperatur (rechts) und Wassergehalt (links), Quelle: Domininghaus (2012), S. 629
Abbildung 10: Relaxionsprozess von trockenen, feuchten und nassen PA6 Proben, Quelle: Sharma/Sambale/Stommel/Maisl/Herrmann/Diebels (2019), S. 310 (leicht modifiziert)
Abbildung 11: Extrusions Durchflussmengen bei unterschiedlicher Konditionierung von PLA, Quelle: in Anlehnung an iGo3D GmbH (2016), Online-Quelle [02.11.2016]
Abbildung 12: Trocknungsprozess vom feuchten bis zum trockenen Gut, Quelle: Christen (2010), S. 460.
Abbildung 13: Temperaturen- und Feuchtigkeitsverlauf bei konvektiver Granulattrocknung: A = Aufheizphase; I, II, III = Trocknungsphasen; <i>T</i> 1= Temperatur der Eintrittsluft; <i>T</i> 2= Temperatur der Austrittsluft; φ 2= Feuchtigkeit der Austrittsluft, Quelle: Stahl (1980), S. 134 (leicht modifiziert)
Abbildung 14: Beispieltrocknungsverlauf: <i>XG</i> , α = Feuchtegehalt am Anfang; <i>XG</i> , ω = Feuchtegehalt am Ende der Trocknung; <i>XG</i> , <i>E</i> = Gleichgewichtsfeuchte; <i>XG</i> , <i>E</i> max = maximale hygroskopische Beladung, Quelle: Christen (2010), S. 466 (leicht modifiziert)
Abbildung 15: Einteilung unterschiedlicher Trocknungsverfahren und Trocknertypen – Überblick, Quelle: Stahl (1980), S. 155
Abbildung 16: Einteilung der in dieser Arbeit erläuterten Trocknungsverfahren und Typen, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 17: Aufbau eines Frischlufttrockners: Ti = Lufttemperatur; φi = relative Luftfeuchtigkeit; ρi = absolute Luftfeuchtigkeit; Qv = Verlustwärme, Quelle: Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 249 (leicht modifiziert)
Abbildung 18: Mollier-Diagramm einer klassischen Umlufttrocknung, Quelle: Christen (2010), S. 477 32
Abbildung 19: Aufbau eines Umlufttrockners: Ti = Lufttemperatur; φi = relative Luftfeuchtigkeit; ρi = absolute Luftfeuchtigkeit; Qv = Verlustwärme, Quelle: Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 249 (leicht modifiziert). 32
Abbildung 20: Trockenlufttrockner mit kontinuierlicher Luftvortrocknung und zwei Absorptionskammern: Ti = Lufttemperatur; φi = relative Luftfeuchtigkeit; ρi = absolute Luftfeuchtigkeit; Qv = Verlustwärme, Quelle: Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 253 (leicht modifiziert)
Abbildung 21: Strangablage mit Bezeichnungen, schematisch, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 22: Flussdiagramm des Versuchablaufes, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 23: Visuelle Beschreibung der ausgewählten Wicklungsschichten und Zuordnung zu den Probennummern dargestellt auf einer geschnittenen Filamentspule, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 24: Massenzunahme der Probe R00P01 bis einschließlich 168 Stunden nach Öffnen der Originalverpackung, Quelle: Eigene Darstellung51
Abbildung 25: Gemessen Feuchtigkeit der einzelnen Proben R00P01, R00P02 und R00P03 original vom Hersteller mit eingetragener potenzieller Messungenauigkeit, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 26: Normierte Wasserabsorption der einzelnen Spulen nach Konditionierung, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 27: Normierte Gesamtwasserabsorption der einzelnen Spulen nach Konditionierung als Vergleich, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 28: Filamentprobe R00P01 spiralförmig aufgewickelt, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 29: Gemessene Feuchtigkeit der einzelnen Proben R01P01, R01P02 und R01P03, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 30: Tatsächlich gemessene Feuchtewerte der Spulen 2 – 7 und dazu mögliche Feuchteverläufe, Quelle: Eigene Darstellung58
Abbildung 31: Tatsächlich gemessene Feuchtewerte der Spulen 2 – 7 der Wicklungsschichten 1, 12 und 24, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 32: Öffnungen auf der Seite der Filamentspule, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 33: Exponentiell angenäherter Trocknungsverlauf der mittleren Feuchte von Spule 2, 3, 5 und 7 mit einer Untergrenze (unter den Trockenraumbedingungen minimal erreichbare Feuchtigkeit) in Prozent von 0,35 %, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 34:Linearisierung des Feuchteverlaufs auf den einzelnen Wicklungsschichten der Spulen 2, 3, 5 und 8, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 35: Skizze eines Umlufttrockners mit unbehandelter Frischluft und Feuchteregelung zur
Wasserabfuhr, a Trocknungsgut; b Temperaturfühler; c Feuchtefühler; d & e Regler; h Abluftklappe; i
Heizelement, i ventialtor, Quelle. Kroli/Krischer (1959), S. 552 (leicht modiliziert).
Abbildung 36: Flussdiagramm der Luftaustauschregelung der Trockenkammer, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 37: Schematische Darstellung der Strömungsführung des Trocknungsgerätes bei Umluft- (links) wie auch bei Luftaustauschbetrieb (rechts), Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 38: Aufheizvorgang der Pilottrocknungsanlage von 30 auf 80°C, Quelle: Eigene Darstellung. 70
Abbildung 39: Feuchte- und Temperaturverlauf bei Luftaustauschtests in der Pilottrocknungsanlage, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 40: Innen- und Außenmaße des geplanten Filamenttrockners in Millimeter, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 41: PCB Layout Raspberry Pi Shield, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 42: Startbildschirm der Trocknungssteuerung, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 43: Auswahlbildschirm des Trocknungsmodus Quick-Dry, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 44: Bildschirm einer Laufenden Trocknung, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 45: Renderings des Trocknungsgerätes aus zwei Ansichten, Quelle: Eigene Darstellung 78
Abbildung 46: Rendering eines möglichen Anwenderfalles in einer Werkstatt, Quelle: Eigene Darstellung.
Abbildung 47: Zugfestigkeitsstudie an Zugproben gedruckt bei unterschiedlichen Filamentfeuchten, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 48: Zugfestigkeitsstudie an Zugproben gedruckt bei unterschiedlichen Filamentfeuchten - Potenzielle Fehlmessungen ausgeschlossen, Quelle: Eigene Darstellung
Abbildung 49: Mittels Nahinfrarot gemessenes Spektrum unterschiedlich feuchter Filamentproben,
Quere Elgene Dalotonang.

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Basiseigenschaften Vergleich PA6 und PA12, Quelle: in Anlehnung anBaur/Brinkmann/Osswald/Schmachtenberg (2007), S. 528 f.7
Tabelle 2: Sättigungsdampfdruck Gleichungskonstanten für Wasser zwischen 0 und 100°C, Quelle: Smallwood (2012), S. 301
Tabelle 3: Schrittweise Auslegung eines Trockners, Quelle: Christen (2010), S. 489 (leicht modifiziert). 36
Tabelle 4: Zusammenfassung einiger Eigenschaften von den in diesem Kapitel genannten Trocknertypen, Quelle: Kröll/Krischer (1959), S. 89 ff, S. 377 ff, 496 ff; Johannaber/Michaeli (Hrsg.) (2004), S. 247 ff 36
Tabelle 5: Vergleich der vier folgenden Methoden die Feuchtigkeit in Feststoffen zu messen, Quellen: Stahl (1980), S. 73 ff; Mettler Toledo GmbH (2016), Online-Quelle [14.09.2020], S. 32 – 33
Tabelle 6: Technische Daten Moisture Analyzer HX204, Quelle: Mettler Toledo GmbH (2018), Online- Quelle [11.09.2020]. 38
Tabelle 7: Technische Daten AQUATRAC®, Quelle: Brabender Messtechnik GmbH & Co. KG (2020), Online-Quelle [11.09.2020]
Tabelle 8: Technische Daten AQUATRAC®, Quelle: Brabender Messtechnik GmbH & Co. KG (2020), Online-Quelle [11.09.2020]
Tabelle 9: Herstellerangaben der Filamentspule, Quellen: Fiberthree GmbH (2020), Online-Quelle [4.12.2020]; Alpaplastic S.r.I. (2020), Online-Quelle [12.28.2020]
Tabelle 10: Klimatestkammer für die Konditionierung der Filamentproben, Quelle: Weiss UmwelttechnikGmbH (2020), Online-Quelle [01.12.2020]
Tabelle 11: Feuchtemessgerät zur Bestimmung der Restfeuchter der Proben, Quelle: BrabenderMesstechnik GmbH & Co. KG (2020), Online-Quelle [11.09.2020].47
Tabelle 12: Präzisionswaage zur Wiegung der Filamentproben und Feuchteabsorptionsmessung, Quelle:Sartorius AG (2007), Online-Quelle [04.12.20].48
Tabelle 13: Vortrocknungsgerät für Kunststoffe in Filamentform, Quelle: PURPOSE AM SYSTEMS (2019), Online-Quelle [17.12.2020]. 48
Tabelle 14: Probenbenamsung, Konditionier- und Trocknungszeiten, Quelle: Eigene Darstellung 49
Tabelle 15: Nettomassen der Filamentspulen vor den jeweiligen Konditionier- bzw. Trocknungsvorgängen, Quelle: Eigene Darstellung51
Tabelle 16: Ergebnisse der Feuchtemessungen von Spule 0 - 7, Quelle: Eigene Darstellung
Tabelle 17: Prozentuelle Masse bezogen auf die Gesamtmasse, zugehörig zur Probenwicklungsschicht, Quelle: Eigene Darstellung. 56
Tabelle 18: Näherungsweise errechnete mittlere Spulenfeuchte vor Konditionierung wie auch vor Trocknung unter Zuhilfenahme der mittlerer Spulenfeuchte, Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 19: Auflistung bekannter Spulendimensionen, inklusive Filament Nettogewicht, Quelle: Eigene	
Darstellung	64
Tabelle 20: Ausgewählte technische Daten des getesteten Kunststofffilaments, Quelle: Fiberthree Gmb (2020), Online-Quelle [4.12.2020].	H 65
Tabelle 21: Szenarien verschiedene Umgebungsbedingungen und deren Auswirkung auf die relative	
Luftfeuchtigkeit in der Trockenkammer, Quelle: Eigene Darstellung	67

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABSAcryli	nitril-Butadien-Styrol-Copolymere
DLP	Digital Light Processing
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
GPIO	General Purpose Input Output
GUI	Graphical User Interface
MCU	Mikrocontroller Einheit
MFR	Mass Flow Rate
NIR	Nahinfrarot
PA	Polyamid
PA 6	Polyamid 6
PC	Polycarbonat

PCB Printed Circuit Board
PEEK Polyetheretherketon
PEIPolyetherimid
PETPolyethylenterephthalat
PET-G . Polyethylenterephthalat, glykolmodifziert
PLAPolylactide
PMMAPolymethylmethacrylat
PWMPulsweitenmodulation
RTD Resistance Temperature Detectors
SLSSelektives Lasersintern
SMPUShape Memory Polyurethane

ANHANG 1: DATENBLATT FILAMENT

FIBER TREE MATERIAL

Technisches Datenblatt F3 PA Pure Pro

August 2019

					www.fiberthree.com			
Produktbeschreibung								
Eigenschaften	٠	Hochleistungs-Polyamid auf PA 6 basierend (modifiziert)						
	۲	ungefüllt						
	٠	hohe Festigkeit						
 mäßige Wasseraufnahme 								
	•	geringer Verzug						
		exzellente Haftuna auf Druckbett						
		beständig gegen Oel, Fett, Treibstoffe und viele Chemikalien						
	٠	gute Hydrolysebeständigkeit						
	•	sehr glatte Oberflächen druckbar (Farbe Altweiß)						
Mechanische Eigenschaften	Те	stmethode	Einheit	Werte	Bemerkung			
Dichte	DII	N EN ISO 1183	g/ cm ³	1,2				
Zug E_Modul Druckprobe	DI	N EN ISO 527-2 Typ 1A*	MPa (N/mm ²)	3.400				
Zugfestigkeit Druckprobe x-y (+ 45°/-45°)	DI	N EN ISO 527-2 Typ 1A*	MPa (N/mm²)	80				
Zugfestigkeit Druckprobe x-y (0°)	DI	N EN ISO 527-2 Typ 1A*	MPa (N/mm²)	80				
Zugfestigkeit Druckprobe x-y (90°)	DI	N EN ISO 527-2 Typ 1A*	MPa (N/mm ²)	30				
Bruchspannung Druckprobe x-y (0°)	DI	N EN ISO 527-2 Typ 1A*	MPa (N/mm ²)	77,31				
Bruchdehnung Druckprobe x-y (0°)	DI	N EN ISO 527-2 Typ 1A*	%	3,56				
Biegemodul E _f Druckprobe x-y (+ 45°/-45°)	DI	N EN ISO 14125 (Method B)**	GPa (kN/mm²)	2,37				
Schlagzähigkeit Druckprobe	DI	N EN ISO 179eU	kJ/m²					

* Probenkörper gedruckt: E3D V6; Nozzle 0,4mm; Temp Nozzle 275°C Pro/ 285°C Lite ; Temp Druckbett 90°C; Layer 0,2mm; v=50 mm/s; Orientierung Layer in °/ konditioniert 24h bei 50% rel. LF ** Gedruckt: E3D Volcano; Nozzle 0,6mm; Temp Nozzle 275°C; Temp Druckbett 90°C; Layer 0,2mm; v=50 mm/s; Orientierung Layer in */ konditioniert 24h bei 50% rel. LF Zugprobapariantiar

kJ/m²

2.26

DIN EN ISO 179eB

X-Y-Richtung (45°)	X-Y-Richtung (90°)		X-Y-Richtung (0°)		
Thermische Eigenschaften	Testmethode	Einheit	Werte	Bemerkung	
Glasübergangstemperatur	DIN ISO 11357	°C	72		
Wärmeformbeständigkeit (HDT)	DIN ISO 75	°C	90 °C (Conti	inious service temp. 120°C - IEC 60216)	
Elektrische Eigenschaften	Testmethode	Einheit	Werte	Bemerkung	
spezifischer Durchgangswiderstand	IEC 60167	Ohm*m	>10 ¹²		
spezifischer Oberflächenwiderstand	IEC 60093	Ohm	>10 ¹²		
sonstige Eigenschaften	Methode	Einheit	Werte	Bemerkung	
Wasserabsorption (nach 24h)	DIN ISO 62	%	< 0,3		
Verarbeitungsempfehlung	Methode	Einheit	Werte	Bemerkung	
Düsentemperatur	Fiberthree GmbH	°C	260 - 290		
Heizbett	Fiberthree GmbH	°C	Max. 80		
Düsendurchmesser	Fiberthree GmbH	mm	> 0,20		
Kühlung	Fiberthree GmbH	%	max 30%		
Schichthöhe	Fiberthree GmbH	mm	ab 0,10		
Empfohlenen Wandstärke zur Reduzierung von Einfluß durch Feuchte-Aufnahme:	Fiberthree GmbH	mm	3		
Geschwindigkeit	Fiberthree GmbH	mm/s	25		
Füllung	Fiberthree GmbH	%	0 - 100		
Retraction (direct drive/ Bowden System)	Fiberthree GmbH	mm (@ 50mm/sec)	Direct drive min. 2mm / Bowden System min. 6mm		
Heizbettmaterial	Fiberthree GmbH		CFK, GFK, Gla	as, Phenolharz	
Material Düse	Fiberthree GmbH		alle Düsen		
Bauteilempfehlung	Fiberthree GmbH		Hochfeste Ba	auteile mit glatter Oberfläche	
EU & REACH Konformformität					
	gegeben				

Haftungsausschluss

Kerbschlagzähigkeit

Prüfkörp n und nicht auf die ngsmaterial mit gegebenfalls Technische Eigenschaften (sofern nicht spezifisch hergestellten Artikel. erzeugt angegeben) b spritzgu

Alle Angaben beruhen auf unserem derzeitigen Kenntnis- und Erfahrungsstand. Alle Angaben beruhen auf unserem derzeitigen Kenntnis- und Erfahrungsstand. Aufgrund der Vielzahl von unterschiedlichen Druckparametern und Einsatzmöglichkeiten übernehmen wir keine Haftung für die Eignung des Produktes für die verwendeten Produktionsverfahren sowie die vorgesehene Anwendung. Die Eignung sollte durch anwenderseitige Tests und Versuche sichergestellt werden.

Jede Haftung aus den aufgeführten Informationen ist ausdrücklich ausgeschlossen, sofern sie nicht nach zwingendem Produkthaftungsrecht besteht. Aufgrund der Vielzahl von unterschiedlichen Anwendungen und Einsatzmöglichkeiten übernehmen wir keine Haftung für die Eignung des Produktes für die verwendeten Produktionsverfahren sowie die vorgesehene Anwendung. Wir übernehmen keine Haftung für Schäden, die im Zusammenhang mit dem Gebrauch oder der Weiterverarbeitung der Produkte entstehen.

ANHANG 2: T/ ρ DIAGRAMM





ANHANG 3: SCHALTPLAN RASPBERRY PI SHIELD