Verarbeitung von langglasfaserverstärkten Thermoplasten für Spritzgussanwendungen auf dem Planetwalzenextruder

vorgelegt von

M. Eng.

Thomas Birr

geboren in Heidelberg

von der Fakultät III – Prozesswissenschaften

der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Walter Reimers

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Manfred H. Wagner

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Roger Weinlein

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 07. Juli 2015

Berlin 2016

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststofftechnik Darmstadt (IKD) der Hochschule Darmstadt (h_da). Die beschriebenen Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit der Frör Kunststofftechnik GmbH, Erlangen, im Rahmen des Forschungsprojekts „FIBRA – Spritzguss langfaserverstärkter, großvolumiger Bauteile in Kleinserien“ durchgeführt. Das Projekt wurde von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) finanziert (Förderkennzeichen KF2597604GZ1), die Versuche fanden zwischen März 2012 und Februar 2014 am IKD statt.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing Manfred H. Wagner, Leiter des Fachgebiets Polymertechnik und Polymerphysik an der TU Berlin, für die freundliche und entgegenkommende Betreuung meiner Promotion. Ich weiß die Chance, die mir damit geboten wurde, sehr zu schätzen und hatte viel Spaß bei der Bearbeitung meines Themas.

Ich danke Prof. Dr.-Ing. Roger Weinlein, Direktor des Instituts für Kunststofftechnik Darmstadt, für die hervorragende Betreuung meiner Promotion im Rahmen des Forschungsprojekts, für die Anregungen bei dieser Arbeit als Projektverantwortlicher und die konstruktiven Diskussionen. Neben langjähriger Förderung und Unterstützung wurde mir von ihm viel Vertrauen und noch mehr Geduld entgegen gebracht, diese wertvollen Erfahrungen möchte ich nicht missen.

Vielen Dank auch an Prof. Dr. rer. nat. Walter Reimers, Leiter des Fachgebiets metallische Werkstoffe an der TU Berlin, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich möchte mich an dieser Stelle herzlich bei all jenen am IKD und am Fachbereich für Maschinenbau und Kunststofftechnik der h_da bedanken, die einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet und mich – in welcher Form auch immer – unterstützt haben. Allen voran seien meine wissenschaftlichen Mitarbeiter M. Eng. Svenja Dill und M. Eng. Martin Naaß genannt, die mit ihrem motivierten Einsatz und umfangreichem Zuarbeiten über die gesamte Dauer der Projektes einen sehr großen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Besonderer Dank richtet sich auch an Dipl.-Ing. Georg Bernhard Köhler für seine fachliche und kollegiale Unterstützung und seine scheinbar unerschöpfliche Bereitschaft, mit Rat und Tat zur Seite zu stehen.

Mein Dank richtet sich auch an folgende Unternehmen und Personen, die mich bei der Durchführung des Forschungsprojektes unterstützt haben: Frör Kunststofftechnik GmbH, Familie Lehmann und insbesondere B. Eng. Johannes Lehmann für die gute Zusammenarbeit, umfangreiche Unterstützung und die gern genossene Gastfreundschaft. ENTEX Rust & Mitschke GmbH, Dipl. Ing. Harald Rust, M. Eng. Michael Gerdon und Dipl.- Ing. Thomas Malzahn für die Bereitstellung der Versuchsanlage und die technische Unterstützung. XYZ high precision GmbH, Dipl.-Ing. Norbert Höhn für die wertvolle und kollegiale Unterstützung bei der Faserlängenanalyse und die Weiterentwicklung der FASEP-Software. Celanese GmbH, Dipl.-Ing Olaf Herd und Dr. Thorsten Neidhöfer und PolymersNet GmbH für die Bereitstellung von Versuchsmaterialien.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden dafür bedanken, dass sie mich mit Unterstützung, Ermutigung und Förderung auf meinem Weg begleitet und diesen damit überhaupt erst ermöglicht haben.

Zu guter Letzt möchte ich Manuela danken – für Alles.

Kurzzusammenfassung

Die Thematik, polymere Werkstoffe als Substituenten von Metallen für die Herstellung mechanisch beanspruchter Bauteile und Strukturen einzusetzen, ist aktueller denn je. Dabei spielen in der industriellen Massenanwendung langfaserverstärkte, spritzgegossene Thermoplaste eine zentrale Rolle.

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften solcher Materialien stellt neben der Faser-Matrix-Kombination die vorliegende Faserlängenverteilung eine entscheidende Rolle. Längere Verstärkungsfasern bewirken eine Steigerung der Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit, wodurch Material- und Kostenersparnisse durch geringere Materialquerschnitte oder die Erweiterung des Einsatzbereiches kostengünstiger Werkstoffe erreichbar sind.

Bei der Verarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten auf konventionellen Spritzgussmaschinen mit Einschneckenplastifiziereinheit werden die enthaltenen Fasern durch Kompression, Abrasion und Strömungseffekte zerbrochen, sodass ein Teil des theoretisch erreichbaren mechanischen Potentials des Werkstoffes aufgrund des Verarbeitungsprozesses verloren geht.

Die vorliegende Arbeit behandelt die Untersuchung einer alternativen Verarbeitungsmethode von langfaserverstärkten Thermoplasten unter Verwendung eines Planetwalzenextruders als Plastifiziereinheit. Mit dieser Methode wird die Zielsetzung verfolgt, eine möglichst geringe Glasfaserschädigung während der Plastifizierung zu bewirken. Um dies zu erreichen werden die Zusammenhänge zwischen Maschinenkonfigurationen, Prozessparametern und der resultierenden Faserschädigung anhand der Faserlängenverteilung im Extrudat untersucht und optimiert.

Als wichtigste Einflussfaktoren auf die Faserschädigung im Planetwalzenextruder wurden der Extrusionsdruck, der spezifische Massedurchsatz und das resultierende Verweilzeitspektrum identifiziert. Basierend auf diesen Erkenntnissen konnten Rückschlüsse auf die Arbeitsweise des Planetwalzenextruders, auftretende Mechanismen und Strömungsvorgänge gezogen werden, die das allgemeine Verständnis dieses bisher wenig beschriebenen Maschinentyps unterstützen.

Planetwalzenextruder sind primär für Compoundier- und Aufbereitungsanwendungen vorgesehen und zunächst nicht für die direkte Herstellung spritzgegossener Bauteilen geeignet. Um dies zu ermöglichen, wurde der Extruder mittels eines Schmelzespeichersystems zum Spritzcompounder erweitert. In der vorliegenden Arbeit wird auf die Konstruktion und Erprobung dieses speziell auf die Langfaserverarbeitung ausgerichteten Systems eingegangen und der gesamte Verarbeitungsprozess betrachtet.

Um eine Vergleichbarkeit zum konventionellen Spritzguss zu gewährleisten wurden die Untersuchungen unter Verwendung pultrudierter PP-LGF-Granulate durchgeführt, einer gängigen Materialgruppe für die industrielle Produktion. Es konnte festgestellt werden, dass mit derartigen Materialien unter Einsatz des Planetwalzenextruders ein Aufschmelzprozess mit geringer Faserschädigung realisiert werden kann. Die dabei gesammelten Erfahrungen legen zusätzlich die Vermutung nahe, dass ein Direktverarbeitungsprozess ebenfalls möglich ist und noch weitere positive Effekte hinsichtlich der faserschonenden Aufbereitung mit sich bringen könnte.

Abstract

For the manufacturing of load bearing components and structures, the use of polymer-based materials as a substitute for metals is more than ever a vital subject. For industrial mass production, injection molded long-fiber reinforced plastics play an essential role.

Along with the fiber-matrix-combination, the fiber length distribution is a key aspect regarding the mechanical properties of such material. The effects of longer fibers are an increase of stiffness, toughness and impact resistance. These advantages can help to save resources by extending the properties of low-cost materials, reducing part weights or lowering material costs.

By processing materials with long fiber reinforcement on a conventional single-screw injection-molding machine, fiber attrition occurs. It is caused by abrasion, compression and rheological effects. As a result, only a fraction of the theoretically possible reinforcement can be realized in the finished product.

This work approaches this problem with an alternative processing method by using a planetary roller extruder as a plasticizing unit. The method is supposed to reduce fiber attrition during the melting and homogenization procedure. To reach this goal, the relations between different extruder configurations, process parameter settings and the resulting fiber length distribution are investigated and optimized.

Extrusion pressure, specific throughput and the resulting residence time spectrum were identified as the key impacts on fiber attrition while using a planetary roller extruder. Based on these results, conclusions concerning the working principle of the planetary roller extruder and the occurring mechanisms are drawn and described. These help understanding the planetary roller extruder, since there are only few investigations about this type of machine yet.

The planetary roller extruder is intended for compounding tasks, it is not suitable for injection molding in its initial state. To achieve this capability, it was extended with a melt accumulation system to set up an injection molding compounder. The construction and testing of this system, which focuses especially on the processing of fiber reinforced materials, is also described in this work.

To maintain comparability with conventional injection molding processes, the investigations were conducted using pultrudet PP-LGF granules, a common material group for industrial production. By using such material in combination with a planetary roller extruder, a plasticizing process with very little fiber damage was achieved. Furthermore, the experiences from the investigations lead to the assumption that direct processing of fibers might be possible as well and might return even better results regarding fiber attrition.

Inhalt

VORWORT UND DANKSAGUNG I

KURZZUSAMMENFASSUNG II

ABSTRACT III

1 EINLEITUNG 1

1.1 Zielsetzung und Vorgehensweise 2

2 STAND DER TECHNIK 3

2.1 Faser-Kunststoff-Verbunde 3
2.1.1 Fasermaterialien 4
2.1.2 Faserlänge und Verstärkungswirkung 6
2.1.3 Faserschädigungsmechanismen im Spritzguss 11

2.2 Planetwalzenextruder 16
2.2.1 Funktionsprinzip 16
2.2.2 Aufbau 18
2.2.2.1 Module 18
2.2.2.2 Anlauf- und Stauringe 18
2.2.2.3 Planetspindeln 20
2.2.2.4 Anlagenbauformen 21
2.2.3 Bisherige Forschung am Planetwalzenextruder 22

2.3 Spritzgussverfahren 23
2.3.1 Langfaser-Direkspritzgießen 23
2.3.2 Spritzgieß-Compounder 23

3 KONSTRUKTIONEN 25

3.1 Schmelzespeichersystem 25
3.1.1 Anforderungsprofil des Speichersystems 28
3.1.2 Aufbau des Speichers 28
3.1.3 Aufbau der Ventile 29

3.2 Spritzgusswerkzeug 31

3.3 Modifikation der Anlaufplatte 32

3.4 Transparentes Extrudermodell 34
3.4.1 Modell-Fluid 35

4 BESTIMMUNG DER FASERLÄNGENVERTEILUNG 36

4.1 Beschreibung des FASEP-Systems 36

4.2 Begriffe 37
4.2.1 Proben, Samples, Objekte und Cluster 37
4.2.2 Anzahlgemittelte und gewichtsgemittelte Faserlänge 37
4.2.3 Faserlängenklassen und Histogramme 38
4.2.4 Uni- und multimodale Verteilungen 38
4.2.5 Quantile 39

4.3 Anlehnung der Prüfmethodik an die ISO 22314:2006 40

4.4 Prüfmethodik 43
4.4.1 Prüfablauf 43
4.4.2 Probenentnahme- und Auswertungsschema bei Extrusionsversuchen 44
4.4.3 Probenentnahme- und Auswertungsschema bei Spritzgussversuchen 47

4.5 Erweiterung des Prüfsystems 48
4.5.1 Funktionsweise des Batch-Prozesses 48
4.5.2 Validierung 49

5 VERARBEITUNGSVERSUCHE 51

5.1 Versuchsplanung 51

5.2 Anlagenaufbau 52
5.2.1 Dosierung 53
5.2.2 Temperierung 54
5.2.3 Spindelkonfiguration 54
5.2.4 Werkzeugplatte 55
5.2.5 Sensorik 55
5.2.6 Materialien 55

5.3 Simulation 57

6 VERSUCHSERGEBNISSE 60

6.1 Begriffe 60
6.1.1 Spezifische Antriebsleistung 60
6.1.2 Spezifischer Massendurchsatz 61
6.1.3 Verweilzeitspektrum 61

6.2 Prozesse im Planetwalzenextruder 63
6.2.1 Energieeintrag 63
6.2.2 Transportmechanismus 64
6.2.3 Füllgrad 67

6.3 Werkzeugwiderstand 70

6.4 Spindelkonfiguration 72
6.4.1 Spindelanzahl 72
6.4.2 Spindeltyp 76
6.4.2.1 Noppenspindeln 76
6.4.2.2 Standardspindeln 77
6.4.2.3 Transport- und Trocknungsspindeln 78

6.5 Faserausgangslänge 83

6.6 Anlaufplatte 85

6.7 Spritzgussversuche 87

6.8 Zusammenfassung der Ergebnisse 89

7 FAZIT 90

7.1 Verarbeitung von LFT-Materialien auf dem Planetwalzenextruder 90

7.2 Schmelzespeichersystem 91

7.3 Ausblick 92

8 LITERATURVERZEICHNIS 94

9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS 98

10 TABELLENVERZEICHNIS 101

11 FORMELVERZEICHNIS 102

12 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS 103

13 ANHANG 104

13.1 Aufbau der Versuchsanlage 104

13.2 Prüfablauf zur Bestimmung der Faserlängenverteilung 106
13.2.1 Probenpräparation 106
13.2.2 Bilderzeugung 107
13.2.3 Bildanalyse 108

13.3 Einfluss der Faserkonzentration auf die Faserschädigung 109

13.4 Simulationsergebnis des Rückstromes im vollgefüllten Bereich 110

13.5 Spaltquerschnitte 111

1 Einleitung

Faser-Kunststoff-Verbunde beweisen seit geraumer Zeit ihr Leistungsvermögen in diversen Industriezweigen. Insbesondere im Automotive-Bereich, in der Luft- und Raumfahrt und dem Sportgerätebau sind diese längst unverzichtbar geworden und spielen bei der Substitution metallischer Werkstoffe durch Kunststoffe eine zentrale Rolle.

Trotz der derzeit rapide zunehmenden Verbreitung von mit Endlosfasern verstärkten Kunststoffverbunden in Großserienanwendungen bilden in der Massenanwendung den Hauptanteil spritzgegossene, mit Glasfasern verstärkte Thermoplaste. Dabei wird allgemein zwischen kurz- und langfaserverstärkten Materialien unterschieden, wobei insbesondere die Letztgenannten aufgrund ihrer hohen mechanischen Belastbarkeit auch für tragende Elemente und Strukturen eingesetzt werden können. Das Anwendungsspektrum dieser Werkstoffgruppe erweitert sich beständig, die Triebkraft dieses Trends ist das Einsparpotential durch niedrige Werkstoffkosten bei gleichzeitig vorteilhaften physikalischen Werkstoffeigenschaften. Dazu zählen unter anderem hohe Steifigkeit und Schlagzähigkeit, geringe Dichte, gute Dämpfungseigenschaften und eine geringe Kriechneigung. [1] [2]

Die Nutzbarmachung dieser positiven Eigenschaften wird durch den Spritzgießprozess einerseits ermöglicht, zugleich jedoch auch limitiert. Die mechanischen Eigenschaften glasfaserverstärkter Thermoplaste werden neben der Faserorientierung und der Faser-Matrix-Haftung maßgeblich von der im Werkstoff vorliegenden Faserlängenverteilung bestimmt, wobei längere Fasern im Bauteil eine höhere Verstärkungswirkung erzielen können. Durch den Spritzgießprozess werden die Fasern jedoch zerkleinert, wodurch bereits ein erheblicher Anteil des Verstärkungspotentials während der Verarbeitung verloren geht. Um die Leistungsfähigkeit der thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunde weiter zu erschließen, wird stets an der Verbesserung dieses Verarbeitungsverfahrens gearbeitet.

Die Faserschädigung durch das Spritzgießen ist sowohl auf den Aufschmelzprozess als auch den Einspritzvorgang der Schmelze in das Werkzeug zurückzuführen. Während letztgenannter Anteil auf geometrische Aspekte des eingesetzten Werkzeugs und das Einspritzprofil zurückzuführen ist, resultiert die Faserschädigung während des Plastifiziervorgangs aus den Bewegungs-,- Strömungs- und Friktionsvorgängen in der Spritzeinheit. Diese sind mit dem Funktionsprinzip von Schneckenmaschinen unlösbar verknüpft. Daher soll in der vorliegenden Arbeit die Frage behandelt werden, ob mit einem alternativen Aufschmelzkonzept eine Verringerung der Faserschädigung während des Plastifiziervorgangs erreicht werden kann.

1.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Für Spritzgussanwendungen werden heute nahezu ausschließlich Einschnecken-Plastifizieraggregate eingesetzt, andere Aufschmelzkonzepte sind äußerst selten anzutreffen. Im Zuge dieser Arbeit soll die Eignung eines Planetwalzenextruders hinsichtlich der faserschonenden Verarbeitung von LFT-Materialien untersucht werden, da diesem Maschinentyp eine besondere Eignung für die Aufbereitung empfindlicher Materialien zugesprochen wird.

Die Zielsetzung besteht darin, einen Planetwalzenextruder dahingehend zu modifizieren, dass dieser als Plastifiziereinheit für den Spritzguss von LFT-Materialien eingesetzt werden kann, um auf diesem Wege eine möglichst hohe mittlere Glasfaserlänge zunächst im Extrudat und letztlich im spritzgegossenen Bauteil zu erreichen. Da dieser Maschinentyp jedoch für den Einsatz als kontinuierlich arbeitendes Compoundier- oder Aufbereitungsagregat vorgesehen ist, muss er für den angestrebten Einsatzzweck mit einer Speicher- und Einspritzeinheit ergänzt werden, die ermöglicht, das Extrudat in einer Wärme direkt spritzgießen zu können.

Da die Speicher- und Einspritzeinheit die Anforderungen dieses speziellen Prozesses erfüllen und zum Planetwalzenextruder kompatibel sein muss, wurde diese im Zeitraum der praktischen Untersuchungen zu dieser Arbeit entworfen und konstruiert, ein Prototyp gebaut und dieser in die Versuchsanlage integriert. Parallel zu diesen Arbeiten wurden Verarbeitungsversuche am Planetwalzenextruder durchgeführt, um den Aufschmelzprozess so weit wie möglich im Voraus für den LFT-Verarbeitungsprozess zu optimieren, sodass ab dem Zeitpunkt der Zusammenführung von Speichereinheit und Extruder auf diese Erkenntnisse aufgebaut werden konnte.

Im Vergleich zu Ein- und Doppelschneckenextrudern kann hinsichtlich des Prozessverhaltens eines Planetwalzenextruders auf deutlich wenig bestehendes Wissen zurückgegriffen werden, was auf die geringere Verbreitung dieses Maschinentyps zurückzuführen ist. Ob ein Planetwalzenextruder für die LFT-Verarbeitung geeignet ist, ist zu Beginn dieser Arbeit lediglich eine Vermutung, die es zu bestätigen oder zu widerlegen gilt.

Daher besteht die Motivation dieser Arbeit neben der möglichen Erweiterung des Einsatzspektrums des Planetwalzenextruders auch darin, die erarbeiteten Erkenntnisse dahingehend aufzubereiten, dass Rückschlüsse auf das allgemeine Prozessverhalten gezogen werden können.

Um in Ergänzung zu den Experimenten an der Versuchsanlage einem besseren Einblick in die Arbeitsweise des Extruders zu erlangen, wurden verschiedene Varianten der Modellbildung verfolgt.

Es wurden detaillierte CAD-Modelle der prozessrelevanten Bestandteile des Extruders erstellt, die neben kinematischen Betrachtungen als Basis für FEM-Simulationen dienen. Anhand dieser Simulationen konnten wertvolle Hinweise auf die Vorgänge im Extruder erarbeitet werden, die messtechnisch nicht erfasst werden konnten. Des Weiteren wurde ein transparentes Funktionsmodell des Planetwalzen-Moduls im Maßstab 1:1 gebaut, durch das realitätsnahe Einblicke in das Förder- und Mischverhalten und die Effekte unterschiedlicher Spindelkonfigurationen ermöglicht wurden.

2 Stand der Technik

2.1 Faser-Kunststoff-Verbunde

Ein Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) setzt sich stets aus einem organischem Matrixwerkstoff und darin eingebundenen Fasern zusammen. Letztgenannte können in organische und anorganische Fasern natürlichen oder und synthetischen Ursprungs unterteilt werden. Des Weiteren werden diese anhand ihrer mittleren Länge in die Kategorien *Kurz-, Lang-,* oder *Endlosfasern* eingeteilt. Ähnlich vielfältig wie die Einsatzgebiete dieser umfangreichen Werkstoffgruppe sind heutzutage die auf dem Markt verfügbaren Werkstoffpaarungen.

In einem FKV-Bauteil erfüllt die Matrix eine Vielzahl von Aufgaben. Sie stellt die Geometrie des Bauteils dar und dient dabei der Kraftübertragung äußerer Lasten auf die Fasern und der Weiterleitung der dabei entstehenden inneren Kräfte zwischen den Fasern. Neben diesen mechanischen Aufgaben erfüllt die Matrix zusätzlich die typischen Aspekte eines Kunststoffbauteils, wie Farbwirkung, Haptik und die Aufnahme von Zusatzstoffen wie Stabilisatoren, Haftvermittlern und Ähnlichem.

Die Rolle der Fasern im Verbund ist hingegen meist rein mechanischer Natur, sie dienen der Verbesserung von Zugfestigkeit, Steifigkeit, Schlagzähigkeit, Kriechneigung, Wärmeformbeständigkeit und mehr. [1]- [9] Diese mechanischen Aspekte können nur durch einen funktionsfähigen Werkstoffverbund effizient positiv beeinflusst werden, dafür müssen folgende Kriterien erfüllt werden:

- Der E-Modul in Längsrichtung der Faser muss höher sein als der der Matrix
- Die Bruchdehnung der Matrix muss größer sein als die der Faser
- Die Zugfestigkeit der Faser muss größer sein als die der Matrix
- Die Fasern müssen vollständig mit Matrix benetzt sein
- Eine hohe Haftung zwischen Fasern und Matrix muss gewährleistet sein
- Die Fasern müssen homogen im Werkstoff verteilt sein
- Der Fasern sollen einen möglichst hohen mittleren Schlankheitsgrad aufweisen

2.1.1 Fasermaterialien

Die bereits erwähnte Kategorisierung in Kurz-, Lang- und Endlosfasern ist nicht einheitlich definiert und orientiert sich sowohl am jeweiligen Verarbeitungsverfahren als auch an der Bauteilgröße.

Im Spritzguss ist bei mittleren Faserlängen von weniger als 1mm die Bezeichnung als *Kurzfaserverstärkung* gängig, höhere mittlere Faserlängen werden dementsprechend als *Langfaserverstärkung* bezeichnet. Ab einer Faserlänge von mehr als 50mm, oder aber wenn sich die Länge der Fasern den äußeren Abmaßen des Bauteiles annähert, kann von *Endlosfaserverstärkung* gesprochen werden. [2] Diese Größenordnung kann bis dato jedoch nur mittels besonderer Spritzgussverfahren, beispielsweise durch Einlegen von Tapes oder Organosheets, erzielt werden. Sehr feine Faserbruchstücke mit einer Länge von weniger als 50µm werden als *Faserschutt* bezeichnet, da sie aufgrund ihres geometrischen L/D-Verhältnisses von kleiner 10:1 nach gängiger Definition nicht mehr als Faser gelten.

Bei mittels Pressverfahren hergestellten Bauteilen werden trotz ähnlicher Ausgangsstoffe typischerweise andere Maßstäbe für die Kategorisierung angesetzt als bei Spritzgussbauteilen, da durch Pressverfahren sowohl wesentlich größere Bauteile als auch deutlich höhere Faserlängen realisiert werden können.

Für die Herstellung von glasfaserverstärkten Spritzgussbauteilen steht auf dem Markt eine große Bandbreite an Ausgangsmaterialien verschiedenster Rezepturen und Hersteller zur Verfügung. Hierbei kann zwischen den in Abbildung 1 dargestellten Materialtypen unterschieden werden: Granulierte Kurzfaser-Compounds (links), litzenummantelte (mitte) und pultrudierte (rechts) Stäbchengranulate.

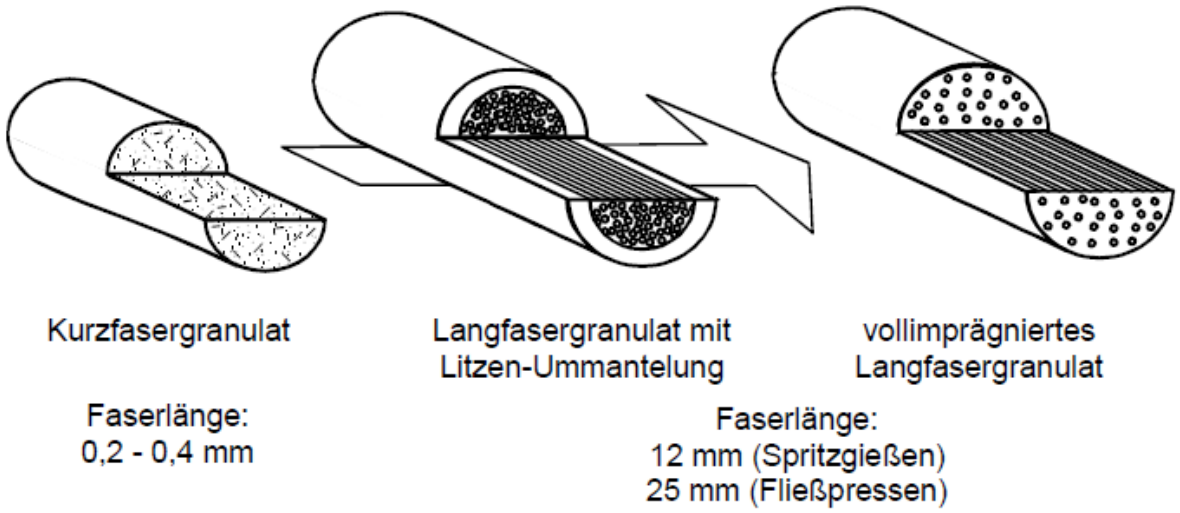

Abbildung 1: Schematische Darstellung der handelsüblichen Granulattypen [10]

Als vierte Variante können Direktverfahren angesehen werden, bei denen kein gebrauchsfertiges Granulat mit vorgegebener Rezeptur, sondern Matrixpolymer, Glasfasern und Zuschlagstoffe separat dem Prozess zugeführt werden.

Kurzfasergranulate können für alle gängigen Verarbeitungsverfahren, wie Spritzguss-, Extrusions- und Blasform-Prozesse eingesetzt werden. Dieser Materialtyp wird typischerweise durch die Zufuhr von Rovings oder Schnittfasern in den Schmelzestrom eines Doppelschneckenextruders mit nachfolgender Kaltabschlag-Granulierung hergestellt. Die Faserlängenverteilung im Granulat kann sowohl durch die Zugabeposition als auch durch die Schneckenbestückung und Prozessführung des Compounders beeinflusst werden. [11]

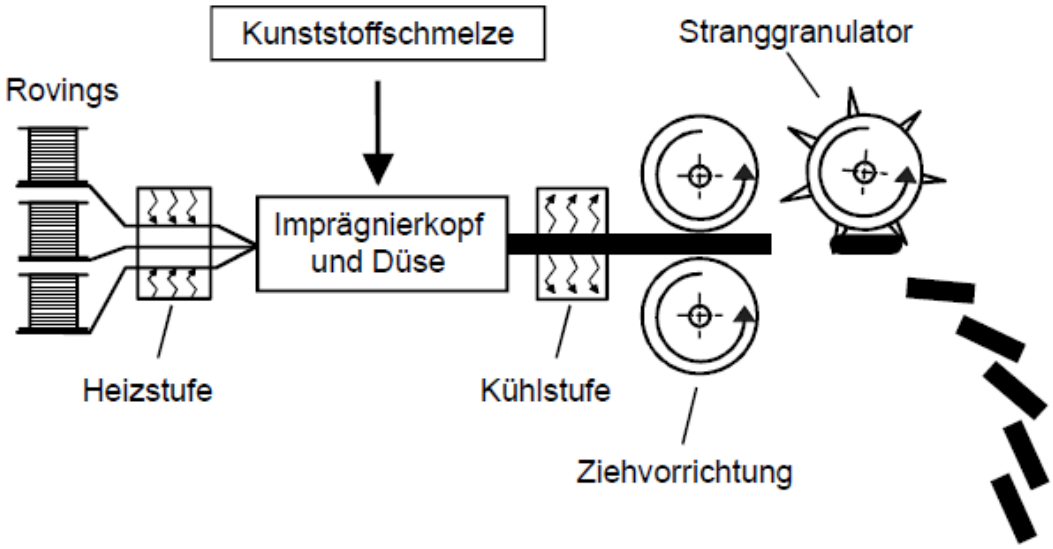

Abbildung 2: Schematischer Darstellung der Herstellung von LFT-Materialien [12]

Litzenummantelte Granulate werden durch einen Beschichtungsprozess, vergleichbar mit der Ummantelung von Kabeln, hergestellt. Dabei wird ein Rovingbündel mittels einer Abzugsvorrichtung durch ein entsprechendes Extrusionswerkzeug geführt und durchläuft danach eine Kühlstrecke, woraufhin der erstarrte Strang auf die gewünschte Länge geschnitten wird. Die enthaltenen Fasern weisen dementsprechend dieselbe Länge wie das jeweilige Granulatkorn auf. Durch den Ummantelungsprozess hat diese Materialtype die Eigenschaft, dass die enthaltenen Fasern als überwiegend unbenetztes Bündel im Inneren des Kornes vorliegen. Die Faserbenetzung wird erst während der darauf folgenden Verarbeitung erreicht, was im jeweiligen Prozess gezielt berücksichtigt werden muss, da dies einen entscheidenden Aspekt für die Verstärkungswirkung im Produkt darstellt.

Der Ablauf des Herstellungsprozesses pultrudierter Granulate ähnelt dem der litzenummantelten Granulate. Auch hier werden Rovings in einem Extrusionswerkzeug mit Schmelze beaufschlagt, abgezogen, gekühlt und auf die gewünschte Länge geschnitten. Der entscheidende Unterschied besteht im Extrusionswerkzeug. In diesem werden die Fasern der Rovingstränge vereinzelt und unter hohem Druck mit Schmelze beaufschlagt. Dadurch liegen die Fasern bereits dispergiert und vollständig benetzt im Granulat vor, wodurch dieser Aspekt im eigentlichen Verarbeitungsprozess nicht mehr berücksichtigt werden muss. Damit wird eine Vereinfachung und höhere Prozesssicherheit für den Anwender erreicht. Auf die Einflüsse der verschiedenen Materialtypen auf die sich ergebenden Werkstoffcharakteristiken gehen Truckenmüller und Fritz in [13] ein.

2.1.2 Faserlänge und Verstärkungswirkung

Bei der Verarbeitung von FKV-Werkstoffen im Spritzgießprozess zeigen sich diverse Zusammenhänge zwischen Charakteristiken des Werkstoffs im fertigen Bauteil und dem Verarbeitungsprozess. Diese wurden von Hafellner et. al. [14] zusammengetragen und dargestellt:

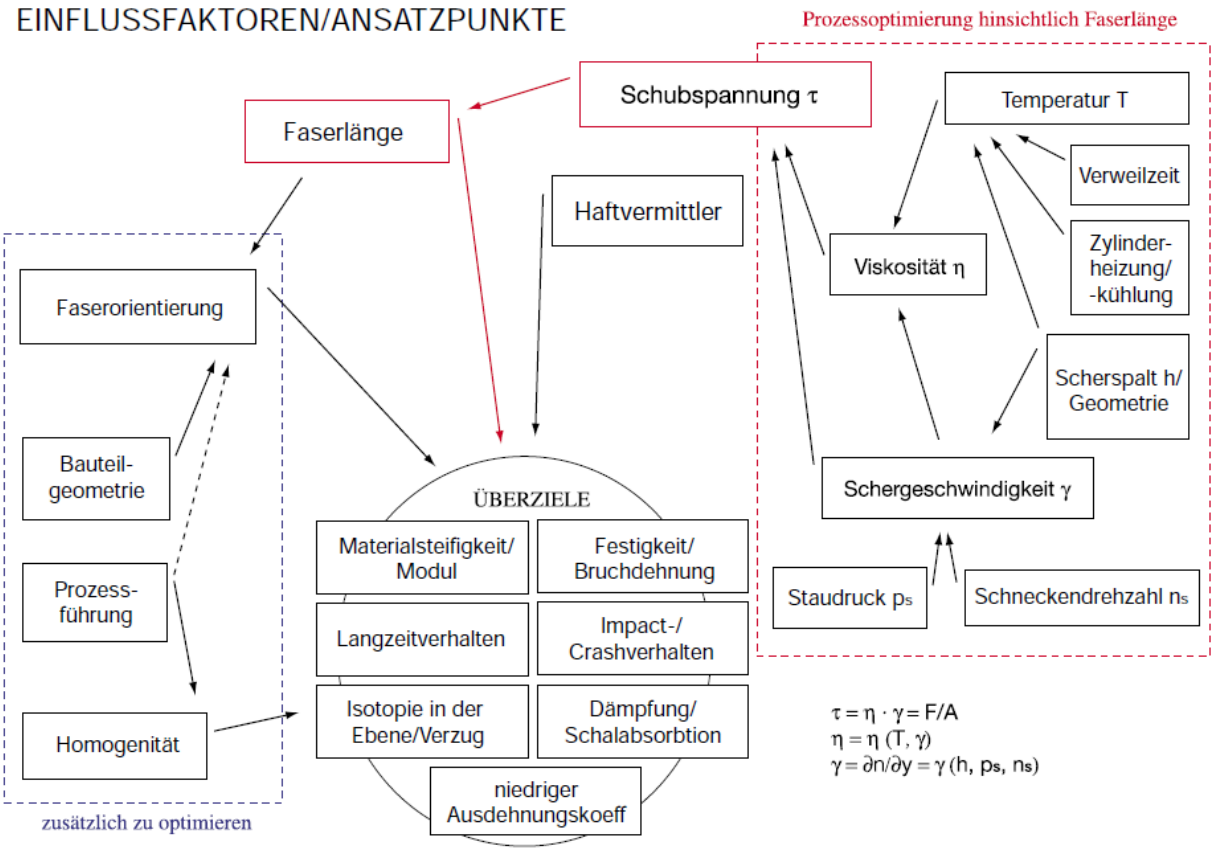

Abbildung 3: Einflussfaktoren und deren Effekte bei der Faserverarbeitung [14]

In dieser Darstellung sind insbesondere die Zusammenhänge zwischen Anlagen- und Prozessparametern und der Faserschädigung durch rote Einrahmungen hervorgehoben. In diesem Feld liegen auch die Anknüpfungspunkte der vorliegenden Arbeit an die Thematik, da einige der darin genannten Aspekte durch die Verwendung eines Planetwalzenextruders beeinflusst werden.

Doch warum sind lange Fasern in einem FKV-Bauteil erstrebenswert? Um diese Frage zu beantworten ist es notwendig, die Verstärkungswirkung von Fasern differenziert hinsichtlich Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit zu betrachten. Diese mechanischen Aspekte sind nicht nur von der Faser-Matrix-Kombination und dem Fasergehalt im Werkstoff abhängig, sondern auch unterschiedlich stark von der vorliegenden Faserlänge. Diese Abhängigkeiten ist exemplarisch in Abbildung 4 anhand von PP-GF40 dargestellt.

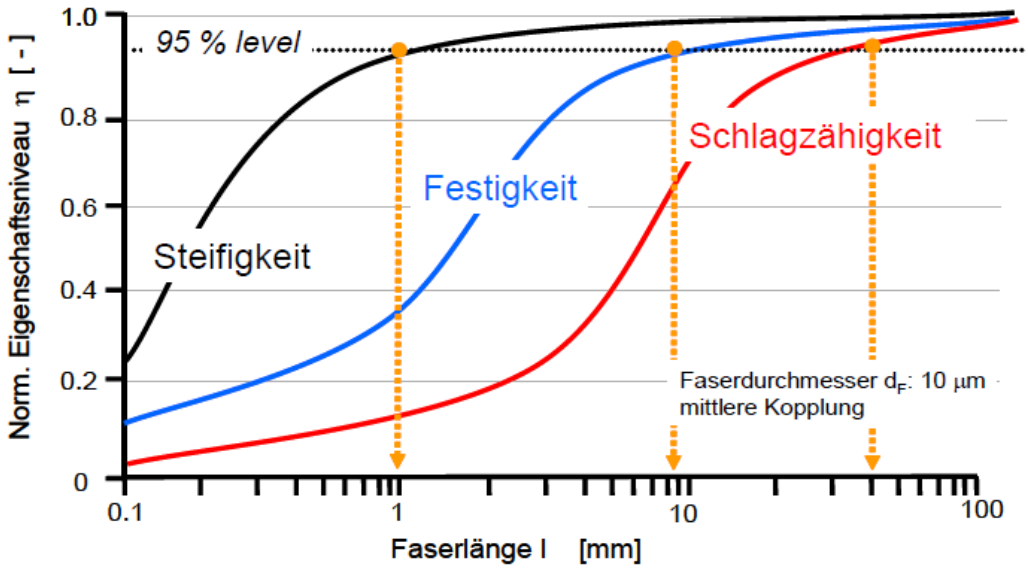

Abbildung 4: Qualitativer Verlauf des normierten mechanischen Eigenschaftsniveaus von PP-GF40 über die Faserlänge [15]

Es ist zu erkennen, dass bereits sehr kurze Fasern mit weniger als 1mm Länge einen deutlichen Effekt auf die Steifigkeit eines FKV zeigen. Dabei strebt die Verstärkungswirkung schon bei einer mittleren Faserlänge von 1mm dem Maximalwert entgegen, was im Umkehrschluss bedeutet, dass längere Fasern nur noch eine geringfügige Steigerung der Steifigkeit bewirken. Besteht also das Ziel eines Prozesses in der Herstellung von Bauteilen, die lediglich ein hohes Steifigkeitsniveau aufweisen sollen, sind eine Kurzfasern, Glaskugeln oder ähnliche Zuschlagstoffe ausreichend.

Wesentlich wichtiger ist eine hohe mittlere Faserlänge für die Steigerung von Festigkeit und Schlagzähigkeit. Dieser Zusammenhang basiert auf der mikromechanischen Kraftübertragung zwischen Fasern und Matrix. Daher werden zunächst verschiedene Versagensmodi beim Bruch eines Faser-Matrix-Verbundes betrachtet.

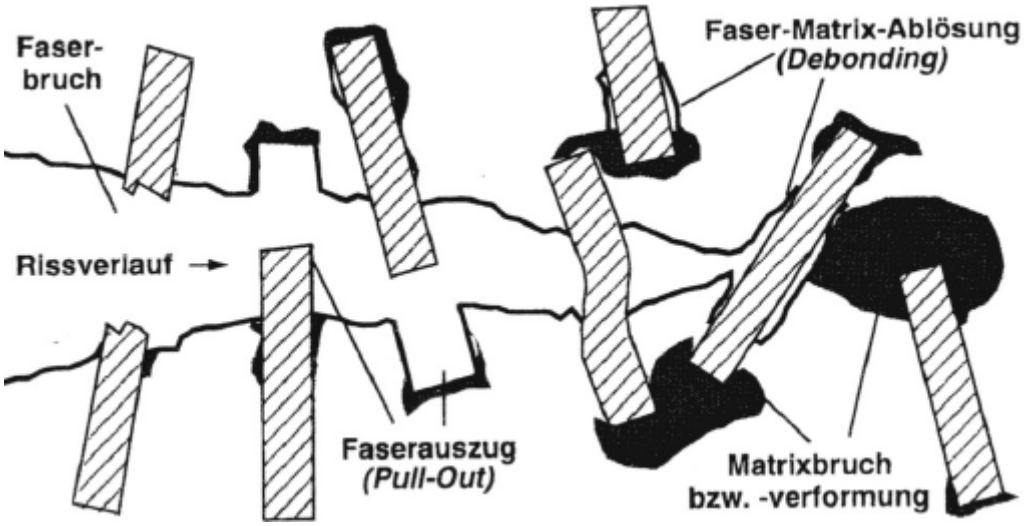

Abbildung 5: Mikromechanische Versagensformen von diskontinuierlich verstärkten FKV [16] in [17]

Wird ein faserverstärktes Bauteil belastet, überträgt die Matrix die äußere Last auf die enthaltenen Fasern. Des Weiteren dient die Matrix der Weiterleitung der Kräfte von Faser zu Faser im Inneren des Verbundes. Die Kraftübertragung erfolgt dabei stets über die Grenzfläche zwischen Fasern und Matrix, daher ist die maximal übertragbare Kraft in diesem Bereich ausschlaggebend für den gesamten Werkstoffverbund. Aus diesem Zusammenhang ergeben sich unterschiedliche Versagensformen in einem FKV, die in Abbildung 5 dargestellt sind. Aus diesen lassen sich die in Abbildung 4 gezeigten Charakteristiken herleiten.

Matrixdeformationen sind typische Erstreaktionen eines FKV auf eingebrachte Lasten. Durch den Steifigkeitssprung zwischen Faser und Matrix ergeben sich lokale Spannungsüberhöhungen, insbesondere an den scharfkantigen Faserenden, die zu Kleinbereichs-Fließvorgängen und Mikrorissen in der Matrix führen. Bei zunehmender Last kann sich dieser Effekt ausweiten und zum Ablösen der Matrix von der Faser (*Debonding*) führen, wodurch der Verbund geschwächt und ein späterer *Faserauszug* begünstigt wird. Eine schlechte Faser-Matrix Haftung – auch durch inhomogene Grenzschichtbedingungen aufgrund schlechter Benetzung – begünstigen dieses Verhalten.

Der *Faserbruch* ist hingegen die angestrebte Versagensform von FKV. Wird diese in ausreichendem Anteil erreicht, äußert sich dies bei makroskopischer Betrachtung in einer hohen Steifigkeit und Festigkeit des Verbundes. Voraussetzung für diese Versagensform ist, dass seitens der Matrix ausreichend hohe Kräfte auf die Fasern übertragen werden können, um diese zu zerreißen. Dafür muss eine ausreichend gute *Faser-Matrix-Haftung* gegeben sein und die Fasern müssen relativ dazu in *überkritischer Länge* vorliegen.

Der *Faserauszug*, auch *Pull-Out* genannt, kann hinsichtlich hoher Festigkeiten als das Gegenteil des Faserbruchs angesehen werden und ist damit eine meist unerwünschte Versagensform. Dieser Fall tritt ein, wenn die Matrix keine ausreichend hohen Kräfte auf die Faser übertragen kann, als dass diese zuerst bricht. Stattdessen versagt die weniger feste Matrix, die Faser löst sich dabei aus einer Seite des Bruchs und hinterlässt dort einen Kanal. Bei makroskopischer Betrachtung zeigt sich ein überwiegendes Auftreten dieser Versagensform durch Erreichen einer hohen Steifigkeit, jedoch niedriger Festigkeit. Allerdings kommt es beim Herausziehen der Faser aus besagtem Kanal auch zu Reibungseffekten, wodurch Energie umgesetzt wird. Dieser Effekt kann sich positiv durch erhöhte Energieaufnahme bei schlagartiger Belastung auswirken. Voraussetzung ist jedoch, dass die Faser möglichst weit aus einer Bruchhälfte gezogen wird, ohne selbst zu brechen.

Die Betrachtung der Versagensformen verdeutlicht, dass diese stets auf die Kraftübertragung zwischen Faser und Matrix und die Länge der Fasern zurückgeführt werden können. Aus diesen beiden Aspekten leitet sich die bereits erwähnte *kritische Faserlänge* ab, auf die näher eingegangen werden soll.

Wird über die Matrix eine Zuglast auf eine Faser übertragen, führt dies zu einer inhomogen verteilten Schublast in der Grenzfläche. Welche Kraft dabei bis zum Versagen des Werkstoffverbundes übertragen werden kann und welche der obigen Versagensformen daraufhin auftritt, resultiert aus dem Zusammenspiel der Faser-Matrix-Haftung und der verfügbaren *Faseroberfläche*, die sich wiederum aus der *Faserlänge* und ihrem *Durchmesser* ergibt. Stelzer [17] erläutert diesen Zusammenhang und die sich daraus ergebende kritische Faserlänge, aufbauend auf der Forschung von Cox [18], Kelly und Tyson [19] [20]. In Abbildung 6 wird die Lastübertragung zwischen Faser und Matrix anhand eines idealisierten Modells dargestellt. Dabei handelt es sich um ein zylindrisches

Matrixvolumen, in das konzentrisch eine ebenso zylindrische Faser eingebettet ist. Es erfolgt eine Zugkrafteinleitung über die kreisförmigen Endflächen des Matrixzylinders, die zu einer Verformung des Systems und einer daraus resultierenden, internen Spannungsverteilung führt.

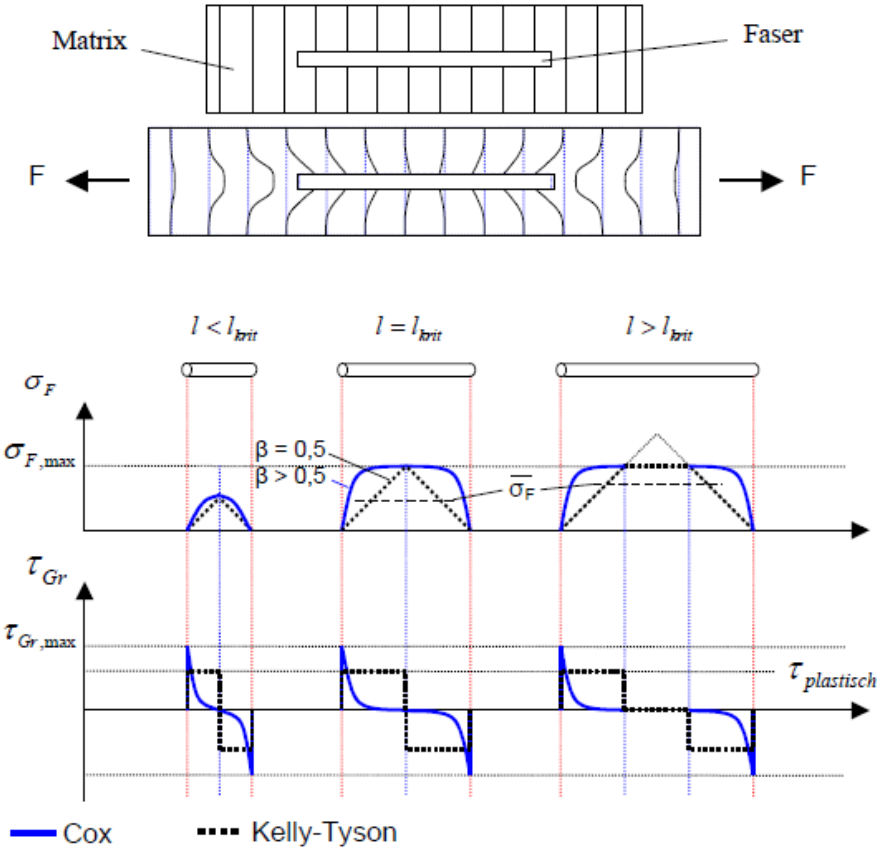

Abbildung 6: Spannungsverlauf Grenzflächenschub- und Faserzugspannungsverlauf bei ideal elastisch (nach Cox) und ideal plastisch (nach Kelly-Tyson) angenommener Matrix, nach [18] in [17]

Die kritische Faserlänge l_k kann vereinfacht mit Formel 1 beschrieben werden, darin sind $\sigma_{B,F}$ die Zugbruchfestigkeit der Faser, d_F der Faserdurchmesser und $\tau_{B,G}$ die Schubbruchfestigkeit in der Grenzfläche. [21]

$$l_k = \frac{\sigma_{B,F}}{\tau_{B,G}} \cdot \frac{d_F}{2}$$

Formel 1: Vereinfachte Berechnungsgrundlage für die kritische Faserlänge [21]

Da die beschriebenen Effekte letztlich mit der für die Kraftübertragung zur Verfügung stehenden Mantelfläche der Faser verknüpft sind, beeinflusst auch das Verhältnis zwischen Faserquerschnitt und –länge, die *Schlankheit* der Faser, das Versagensverhalten. Dünnere Fasern ergeben dementsprechend eine geringere kritische Faserlänge, weshalb diese, falls verfügbar, zu bevorzugen sind. In LFT-Werkstoffen sind meist Fasern mit einem Durchmesser zwischen 10 und 20µm anzutreffen, wobei je nach Rezeptur kritische Faserlängen zwischen 2 und 3mm erreicht werden.

Im realen Anwendungsfall ist das Überschreiten der theoretischen kritischen Faserlänge jedoch nicht gleichbedeutend damit, dass das Bauteil optimale mechanische Eigenschaften aufweist. Allein bei der Faser-Matrix Haftung spielen viele Einflussfaktoren eine Rolle, wie beispielsweise die Gleichmäßigkeit

der Schlichte, die tatsächliche Benetzungsgüte der Fasern mit Matrix und ähnliche Aspekte. Bei der kritischen Faserlänge handelt es sich folglich um einen spezifischen Wert, der in der praktischen Anwendung nicht nur von der Rezeptur des vorliegenden Werkstoffverbundes, sondern auch vom Verarbeitungsprozess abhängig ist, da dieser Aspekte der Faser-Matrix-Haftung mit beeinflusst. Dieser Zusammenhang wird ebenfalls durch die Darstellung der Verknüpfungen zwischen dem Verarbeitungsprozess und der Verstärkungswirkung in Abbildung 3 verdeutlich.

Wird die kritische Faserlänge überschritten, ist damit also zunächst nur eine Grundvoraussetzung für eine hohe Festigkeit des Verbundes erfüllt. Die Verstärkungswirkung durch Fasern ist jedoch zusätzlich richtungsgebunden, wobei in Faserrichtung die höchste Last übertragen werden kann. [22] Durch Strömungseffekte in der Polymerschmelze während der Spritzgussverarbeitung erfahren die enthaltenen Fasern eine gewisse Orientierung im Bauteil, die durch die Positionierung der Anspritzpunkte in Korrelation mit dem für das Bauteil vorgesehenen Lastfall gezielt beeinflusst werden kann. Dennoch liegen die Fasern im fertigen Bauteil typischerweise in einer Art geordnetem Chaos vor, was zur Folge hat, dass bei Belastung stets nur eine Teilmenge der Fasern im Lastpfad optimal belastet wird und so die volle Verstärkungswirkung entfalten kann. Da es sich bei der angegeben Faserlänge um einen Mittelwert handelt, kommt hinzu, dass im Werkstoff auch Fasern unterhalb der kritischen Faserlänge vorliegen. Mit zunehmender mittlerer Faserlänge erhöht sich somit die Wahrscheinlichkeit, dass eine relevante Menge Fasern jenseits der kritischen Faserlänge ausreichend genau in Lastrichtung vorliegen, um den Verbund effizient verstärken zu können. Aufgrund dieser zusätzlichen Faktoren zeigt der Verlauf der Festigkeitskurve in Abbildung 4 einen weiteren Anstieg jenseits der kritischen Faserlänge und erreicht das Maximum erst bei eine mittleren Faserlänge von mehr als 10mm.

Für eine hohe Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs gegen Schlagbelastung sind besonders lange Fasern erforderlich. [6] Ursache für diesen Zusammenhang ist, dass diese, wie in Abbildung 7 zu erkennen, eine erhöhte Schadenstoleranz des Werkstoffes bewirken. Alle drei dargestellten Probekörper bestehen aus PP-GF30, weisen jedoch unterschiedliche Faserlängen auf. Der linke Probekörper ist aus Kurzfasermaterial spritzgegossen und weist die geringste Faserlänge auf. Dieser zeigt bei niedriger Energieaufnahme einen scharfkantigen, klar abgegrenzten Schädigungsbereich, was auf sprödes Bruchverhalten schließen lässt. Der mittlere Probekörper ist ebenfalls spritzgegossen, jedoch unter Verwendung von pultrudiertem Material mit 10mm Ausgangslänge, wodurch eine höhere mittlere Faserlänge erreicht wurde. Die Energieaufnahme ist deutlich höher, zusätzlich ist ein verändertes Schadensbild zu erkennen. Der Bruch ist weniger klar abgegrenzt, die Bruchstücke sind teilweise noch mit der Probe verbunden. Der rechts abgebildete Probekörper wurde im Fließpressverfahren unter Verwendung von pultrudiertem Material mit 25mm Ausgangslänge gefertigt, wodurch die im Vergleich höchste mittlere Faserlänge und ebenso die höchste Energieaufnahme erreicht wurden. Ebenso zeigt sich ein unscharfes Bruchbild, bei dem sich die Fragmente nicht vom restlichen Probekörper gelöst haben.

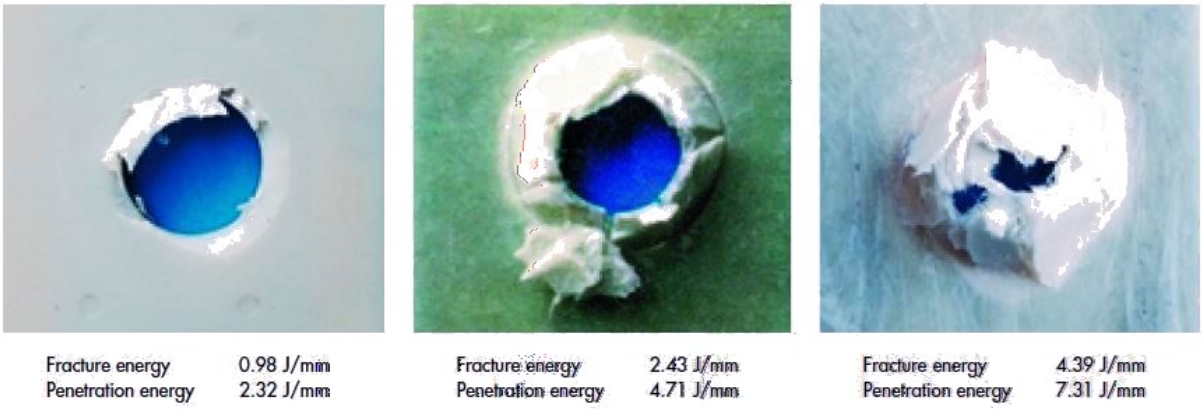

Abbildung 7: Bruchbild nach Schlagbeanspruchung von PP-GF30 mit niedriger (li.), mittlerer (mi.) und hoher Faserlänge (re.) [23]

Wird ein faserverstärktes Bauteil auf Schlag beansprucht, führt die eingeleitete Energie im umliegenden Volumen zu Schäden in Form von Debonding, Faser- und Matrixbruch. Unabhängig von der jeweiligen Schadensform bewirkt dies eine lokale Schwächung des Werkstoffes. Diese führt nur dann nicht zum Versagen des Bauteiles, wenn übergeordnete Strukturen vorhanden sind, um die Schadensausbreitung einzugrenzen und bereits geschädigte Bereiche zu überbrücken. Um diese Aufgabe erfüllen zu können müssen Fasern entsprechend lang sein, sodass diese aus einem geschädigten Bereich heraus und mit möglichst hoher Restlänge in einen ungeschädigten Bereich hinein reichen, um so den Verbund zusammenhalten. Diese Werkstoffcharakteristik ist in Abbildung 7 insbesondere an den Fragmenten zu erkennen, die sich trotz hoher Energieaufnahme nicht von der restlichen Probe gelöst haben. Eine zusätzliche Rolle für die Energieaufnahme spielt dabei die bereits beschriebene Umsetzung von Reibungsenergie durch den Pull-Out langer Fasern.

2.1.3 Faserschädigungsmechanismen im Spritzguss

Bei der Verarbeitung von faserverstärkten Kunststoffen im Spritzguss treten diverse Schädigungsmechanismen auf, die sich beim Durchlaufen des Prozesses bis zum fertigen Bauteil, wie in Abbildung 8 dargestellt, zur Gesamtschädigung aufsummieren. Da der zentrale Gegenstand der vorliegenden Arbeit ein alternatives Plastifizierkonzept ist, soll auf die Vorgänge im Spritzgusswerkzeug nicht weiter eingegangen werden. [17] [24]

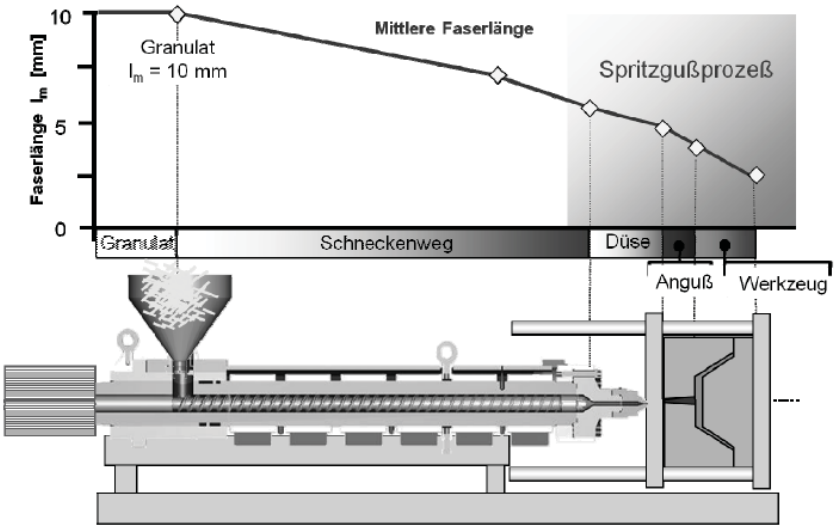

Abbildung 8: Typischer Abbau der Glasfaserlänge während der Verarbeitung [21]

Die Problematik der Faserschädigung im Spritzguss und ihre Ursachen sind schon lange bekannt, insbesondere aus den 1980er und 1990er Jahren ist eine Fülle von Veröffentlichungen zu diesem Themenbereich zu finden. Daher soll hier nur ein zusammenfassender Überblick gegeben werden, wobei allgemein auf die Publikationen von Wölfel [25], Thieltges [26], Wolf [27] [28] und Gupta et. al. [29] [30] verwiesen wird, die diese Thematik ausführlich behandeln und dabei auch eine Vielzahl weitere Quellen zu Detailaspekten berücksichtigen.

Die Schädigung der Fasern ist an diverse Randbedingungen des Prozesses gekoppelt, die größtenteils schon in Abbildung 3 ersichtlich sind. Für eine faserschonende Spritzgussverarbeitung von pultrudiertem Material mit 10mm Ausgangslänge finden sich in [31] und [10] folgende Empfehlungen für die Auslegung und Prozessführung einer Spritzeinheit:

- Drei-Zonen- Spritzgussschnecke, Durchmesser ≥40mm
- L/D-Verhältnis zwischen 18/1 bis 22/1
- Tief geschnittene Einzugszone mit einer Gangtiefe von ≥4,5mm
- Niedriges Kompressionsverhältnis zwischen 1,8 und 2,5
- Ring-Rückstromsperre mit großen Kanalquerschnitten
- Niedrige Schneckendrehzahl zwischen 30 und 60 min^{-1}
- Niedrige bis mittlere Einspritzgeschwindigkeit
- Möglichst geringer Staudruck
- Hohe Schmelzetemperatur
- Möglichst große Fließkanäle mit gehärteter, polierter Oberfläche

Die mechanischen Belastungen, denen die Fasern während der Verarbeitung ausgesetzt sind, beruhen stets auf der Interaktion mit ihrer Umgebung, wobei die Varianten *Faser/Wand-*, *Faser/Faser-* und *Faser/Matrix-Interaktion* auftreten können. Anhand der Interaktionsvarianten erfahren die Fasern unterschiedliche Lastfälle, die in folgenden Grundformen zusammengefasst werden können: Abrasion, Querbelastung, Biegebelastung, Zug-/Drucklasten und Scherung.

Wolf [27] beschreibt die in Abbildung 8 zusammengefasste Faserschädigung detailliert anhand einzelner, entlang des Prozesses auftretenden Mechanismen, wobei insbesondere Effekte durch den zunehmenden Aufschmelzgrad berücksichtigt werden.

Zur ersten Faserverkürzung kommt es im Übergang zwischen Maschinentrichter und Schnecke. Im Einlaufbereich (1 in Abbildung 9) liegen die Granulate statistisch ausgerichtet vor und stehen dabei aufgrund ihrer Länge teilweise aus dem Schneckenkanal heraus. Zusätzlich weist das einzelne Element aufgrund der Morphologie des LFT-Granulats eine stark eingeschränkte Beweglichkeit auf, was dazu führt, dass einige der Granulate vom Schneckengang, der die Trichteröffnung in Förderrichtung passiert, zerteilt werden. Durch die Verwendung einer Schnecke mit großem Durchmesser und tief geschnittener Einzugszone wird dieser Effekt aufgrund des größeren zur Verfügung stehenden Volumens abgemildert, da das Verhältnis der überstehenden Granulate zum Gesamtvolumenstrom abnimmt. Eine weitere Verbesserung kann durch Abmischen eines Fasergranulates mit entsprechend höherem Faseranteil mit reinem Matrix-Granulat erreicht werden, da dadurch die Rieselfähigkeit der Schüttung verbessert wird, sodass die Granulatstäbchen der Belastung ausweichen können.

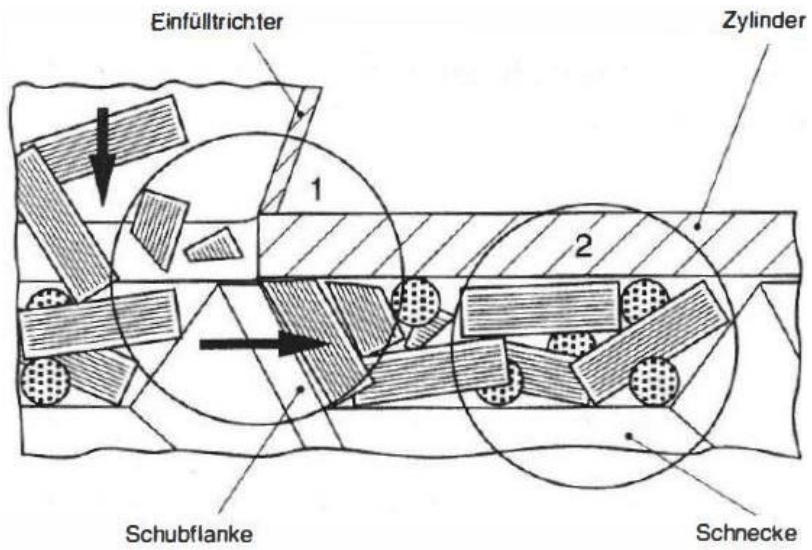

Abbildung 9: Granulatbruch am Einzug und während der Feststoffförderung [27]

In der darauf folgenden Feststoffförderzone (2 in Abbildung 9) erfahren die Granulate hohe Druck-, Biege-, und Scherbelastungen aufgrund der Kompression und der Kanalgeometrie, wobei die Granulate auch gegenseitig hohe Belastungen aufeinander ausüben. Die dabei auftretenden Deformationen führen zum Faserbruch in den noch unaufgeschmolzenen Granulaten. Zusätzlich werden Faserenden, die aus den Schnittflächen der Granulate hervorstehen, durch Abrasion an Zylinderwand und Schnecke abgeschliffen. Auch hier sind ein großer Gangquerschnitt und das zuvor beschriebene Abmischen hilfreich, da so die Deformation der Fasergranulate und die relative Schädigung im Verhältnis zum Gesamtvolumen vermindert werden kann.

Sobald ein Schmelzepool an der treibenden Flanke entsteht, kommt es entgegen der Extrusionsrichtung zu einer Leckströmung zwischen Schneckensteg und Zylinder (3 in Abbildung 10). In den Spalt mitgeschleppte Fasern werden zwischen den Maschinenteilen hohen Scherbelastungen ausgesetzt, wodurch sie zerkleinert werden.

In der Umwandlungszone wird das Feststoffbett zunehmend aufgeschmolzen und dabei von einem Schmelzefilm umströmt (5 und 6 in Abbildung 10). Dabei werden Fasern in den Granulaten sukzessive freigelegt, was dazu führt, dass sie teilweise noch in der festen Phase verankert sind und in den Schmelzestrom ragen, was dem Lastfall einer einseitigen Einspannung entspricht. In diesem Zustand kann es zum Biegebruch sowohl durch Strömungsbewegung als auch durch Wandkontakt kommen. Die Strömungsgeschwindigkeiten des bereits aufgeschmolzenen Anteils und die Leckströmung über den Schneckensteg nehmen im Verhältnis zum Staudruck zu, weshalb dieser möglichst niedrig gehalten werden soll. Ähnlich verhält es sich mit dem Schmelzestrom, der das Feststoffbett umströmt, wobei dieser maßgeblich von der Schneckendrehzahl beeinflusst wird. Daher sind niedrige Drehzahlen vorzuziehen.

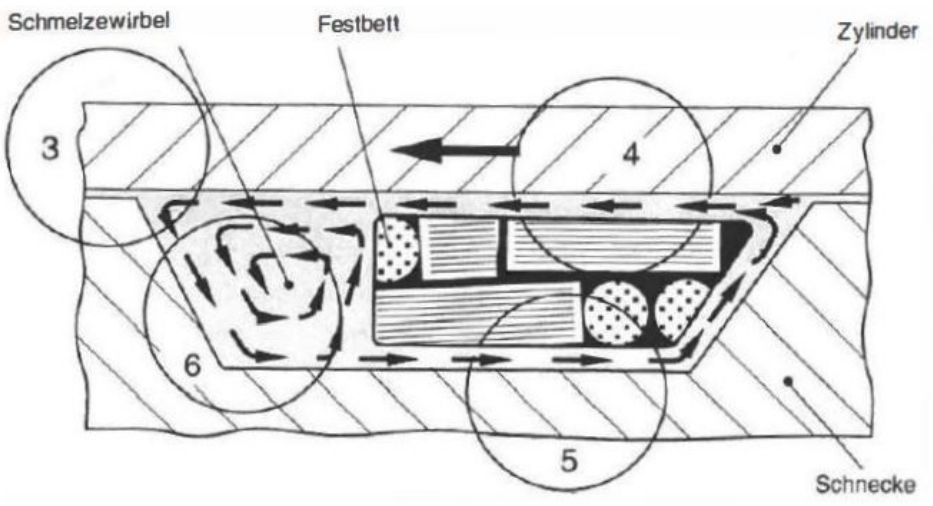

Abbildung 10: Faserbruchbereiche in der Umwandlungszone [27]

Durch die Relativbewegung zwischen Schnecke und Zylinder kommt es im Schmelzepool an der treibenden Schneckenflanke (6 in Abbildung 10) zu einer Zirkulationsbewegung, die mit der Deformation der darin enthaltenen Fasern einhergeht. Neben Abrasionseffekten an den Maschinenwandungen kann es in diesem Bereich auch zum Zerbrechen der Fasern durch Biegung kommen, die sowohl durch Faser/Faser- als auch aus Faser/Matrix-Interaktion resultiert. Es wird angenommen, dass die Schädigung in diesem Bereich mit zunehmendem Querschnitt des Schmelzepools abnimmt, da sich damit der Umlenkungsradius verringert. Diesem Effekt entgegen wirkt der abnehmende Gangquerschnitt in der Kompressionszone, daher wirkt sich ein niedriges Kompressionsverhältnis positiv aus. Eine niedrigere Schmelzeviskosität durch hohe Temperaturen mildert zusätzlich die Schädigung durch Faser-Matrix-Interaktion.

Wolf gibt einen zusammenfassenden Überblick auf die Mechanismen, indem er den Gang der Plastifizierschnecke abgewickelt darstellt:

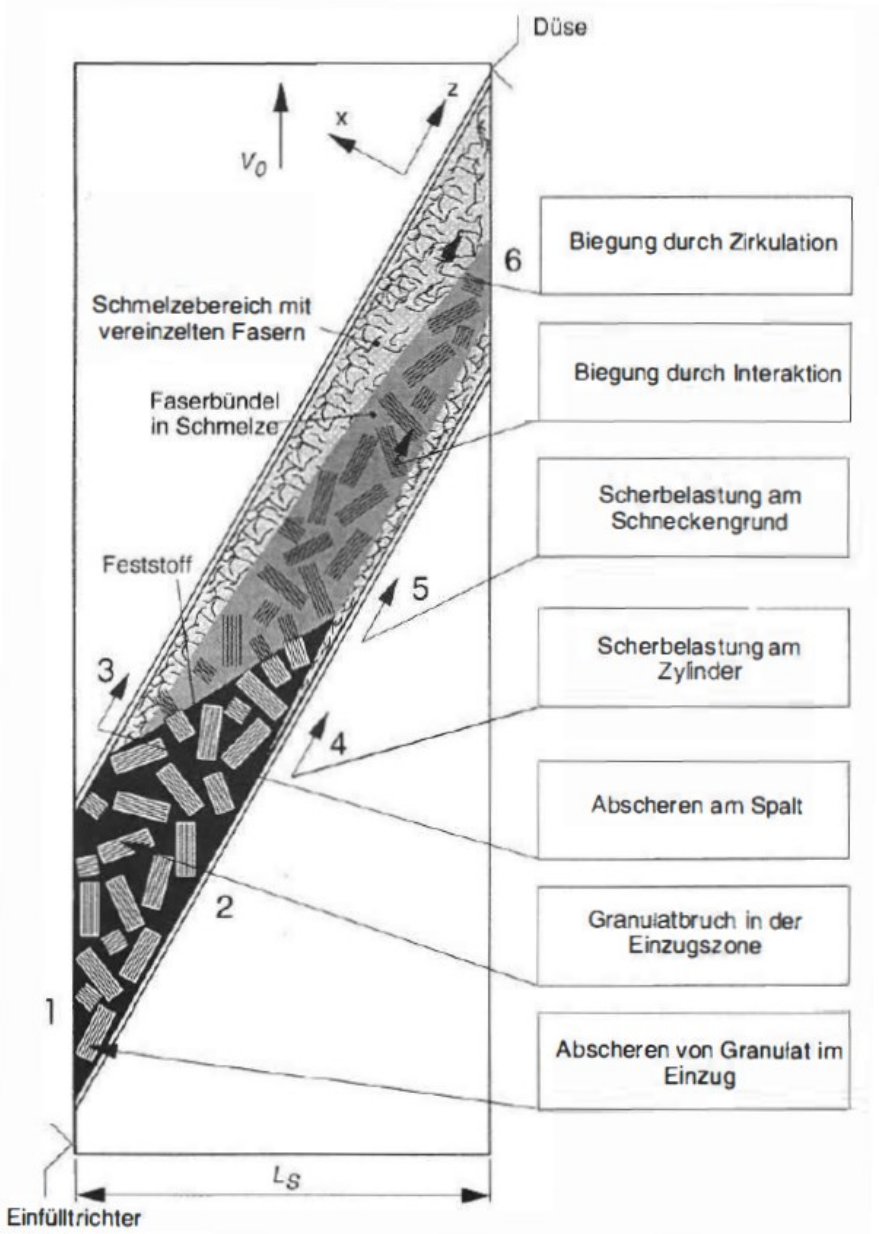

Abbildung 11: Faserschädigungsmechanismen entlang des Aufschmelzprozesses nach Wolf [27]

Anhand der Untersuchungsergebnisse der LFT-Verarbeitung auf dem Planetwalzenextruder wird nach Parallelen und Unterschieden zu den beschriebenen Mechanismen gesucht, um auf Basis dieser Erkenntnisse den Prozess und den Anlagenaufbau gezielt zu verändern.

2.2 Planetwalzenextruder

Der Planetwalzenextruder (PWE) wurde bereits in den 1950er Jahren von Ludwig Wittrock erfunden. Die in den zugehörigen Patentschriften formulierte Zielsetzung bestand dabei in der Entwicklung eines Maschinenkonzeptes mit hoher Aufschmelz- und Homogenisierungsleistung, insbesondere für zusammenbackende und schwierig zu verarbeitende, pulverförmige Kunststoffrezepturen. [32] Dieses Anforderungsprofil leitet sich daraus ab, dass der PWE primär für den Einsatz in der PVC-Verarbeitung vorgesehen war. Den Einsatzschwerpunkt in diesem Industriezweig bilden auch heute noch Granulieraufgaben und die Direktbeschickung von Kalandern. Neben der PVC-Verarbeitung wurde der Planetwalzenextruder auch schon früh in der Aufbereitung von duroplastischen Formmassen [33] und Pulverlacken eingesetzt.

Im Vergleich zu Ein- und Doppelschneckenextrudern fand der PWE in der übrigen Kunststoffindustrie nur geringe Verbreitung und gilt auch heute noch als Exot. Zu einer Steigerung des Bekanntheitsgrades führte die Fähigkeit des PWE, höchstgefüllte Formmassen zu verarbeiten, wodurch die Herstellung von Wood-Polymer-Compounds (WPC) mit einem Holzgewichtanteil von bis zu 80% erzielt werden konnte. Durch diese und andere speziellen Eigenschaften des PWE können zunehmend spezielle Anwendungsfelder erschlossen werden, sodass der Maschinentyp heutzutage etwas weitere Verbreitung findet und unter anderem in der Elastomer-, Chemie-, Lebensmittel- und Recyclingindustrie anzutreffen ist.

2.2.1 Funktionsprinzip

Die Entwicklung des Planetwalzenextruders basiert auf dem Einschneckenextruder und ist meist in Kombination mit einem solchen als Einzugs- und Austragseinheit anzutreffen, dennoch ist der Maschinentyp der Kategorie der Mehrwellenextruder zuzuordnen.

Die Hauptbestandteile des Planetwalzenprinzips sind die Zentralspindel, der Zylinder und im Zwischenraum angeordnete Planetspindeln variabler Anzahl. Diese Bauteile weisen eine ineinander greifende Evolventen-Schrägverzahnung mit einer Gangsteigung von ca. 45° auf, wodurch die Elemente mechanisch miteinander gekoppelt sind. Ein weiteres essentielles Element sind die Stau- und Anlaufringe (orange in Abbildung 12). Die Antriebsenergie wird über die Zentralspindel in das System eingebracht. Deren Rotationsbewegung bewirkt ein Umlaufen der Planetspindeln, während diese sowohl auf der Zentralspindel als auch auf dem Zylinder abrollen. Durch die Schrägverzahnung der Elemente wird im Betrieb das Antriebdrehmoment dem Verzahnungswinkel entsprechend in eine radiale und axial Komponente aufgeteilt. [34] Während die Radialkomponente die Umlaufbewegung der Planetspindeln bewirkt, resultiert die Axialkomponente in einer Kraft auf die Planetspindeln in Extrusionsrichtung, die durch den Anlaufring abgefangen wird. (vgl. Abbildung 14, Kapitel 6.2.2)

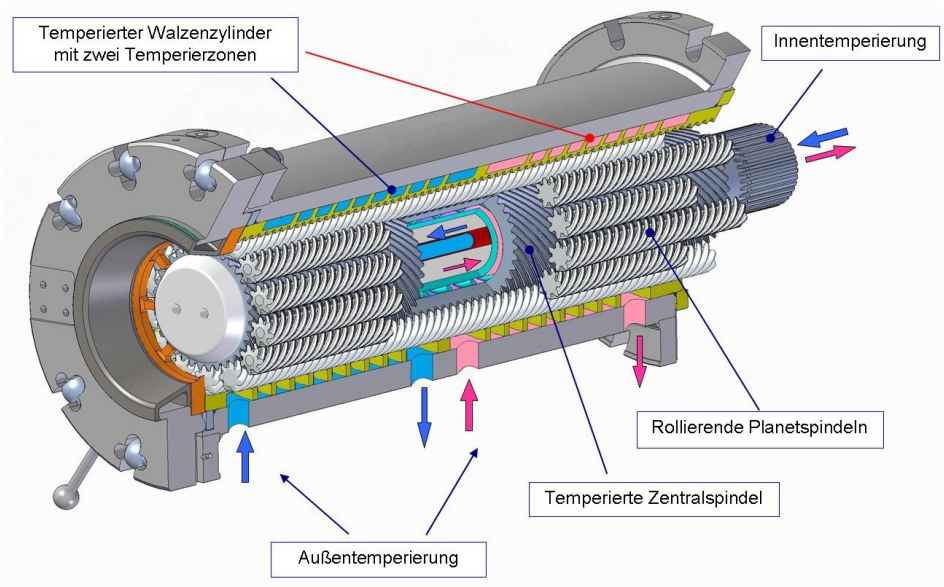

Abbildung 12: Schnittdarstellung eines Planetwalzenmoduls [35]

Im Betrieb wird das Extrudat wiederholt von den Planetspindeln erfasst und zu dünnen Schichten ausgewalzt. Dabei bildet sich – analog zu einem Walzwerk – ein Schmelzeknet vor den Elementen, der ein Umwälzen und Transportieren des Extrudats entlang der Gangsteigung bewirkt. An einer Planetspindel bilden sich stets zwei Knete, in denen ähnliche Druck- und Strömungsbedingungen wie im Spaltbereich eines Walzwerks angenommen werden.

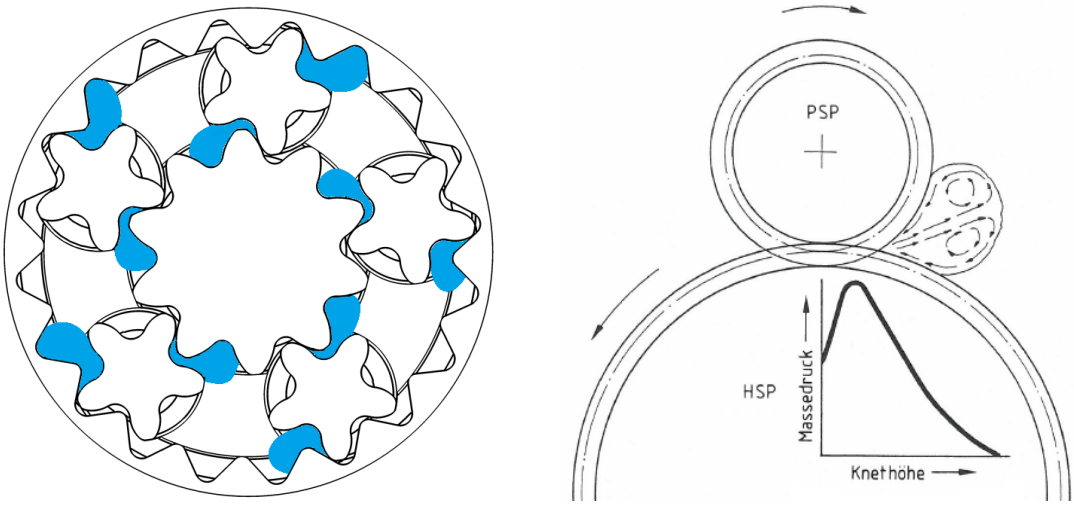

Abbildung 13: Knetbildung im PWE (li.), Druck- und Strömungsbedingungen im Knet in Analogie zu Walzwerken (re.) [36]

Aufgrund der Verzahnung weist der PWE im Vergleich zu Ein- und Doppelschneckenextrudern eine vielfach größere innere Oberfläche auf. Durch den Auswalzvorgang kommt es zu einem häufigen und intensiven Wandkontakt, woraus sich aufgrund der großen Austauschfläche in Verbindung mit der vollflächigen Temperierung des Zylinders und der Zentralspindel eine besonders hohe Temperierleistung ergibt. Die Auswälz- und Umlagerungsvorgänge bewirken große, sich ständige erneuernde Extrudatoberflächen, was vorteilhaft für Misch- und Entgasungsvorgänge ist.

2.2.2 Aufbau

Die Extrusionsversuche zu der vorliegenden Arbeit wurden an einem Planetwalzenextruder der ENTEX GmbH durchgeführt, welche in verschiedenen Baugrößen und Konfigurationen verfügbar sind. Diese werden mit dem Kürzel „WE“ für „Walzen-Extruder“ und einer Zahl bezeichnet, die sich auf den Kopfkreisdurchmesser der Zylinderverzahnung in Millimeter bezieht. Ergänzend wird die Anzahl der eingesetzten Planetwalzenmodule, angeführt mit dem Kürzel *M* angegeben. Die Bezeichnung *WE70 M2* beschreibt dementsprechend einen Extruder der Baugröße 70mm mit zwei Planetenmodulen.

Für die Versuchsdurchführung wurde ein solcher Extruder der Baugröße 70 eingesetzt, diese Maschinengröße wird als Laborextruder eingestuft und kann laut Herstellerangaben eine maximale Ausstoßleistung von ca. 120kg/h erreichen. Die kleinste verfügbare Baugröße sind WE50-Extruder, die bis dato größte gebaute Anlage ist ein WE650.

Die Maschinen sind als modulares Baukastenprinzip konzipiert, sodass innerhalb einer Baugröße verschiedenste Elemente miteinander kombiniert werden können, um eine auf den jeweiligen Prozess angepasste Anlage zusammenstellen zu können.

2.2.2.1 Module

Den ersten Prozessabschnitt eines Planetwalzenextruders bildet das Einzugsmodul mit dem Maschinentrichter, in dem die Zentralspindel als kompressionslose, tief geschnittene Einschnecke ausgeführt ist. Das temperierte Modul kann mit glatter Buchse in Standardlänge oder verkürzter Bauform ausgeführt sein.

Dem Einzugsmodul folgt eine theoretisch beliebige Anzahl von Planetwalzenmodulen. Der limitierende Faktor für die Modulanzahl ist das maximale Antriebsdrehmoment, da dieses von der durch alle Module führenden Zentralspindel übertragen werden muss.

Jedes Modul kann in der Gesamtanlage als separater Prozessabschnitt angesehen werden, sodass sich die Modulanzahl meist an den durchzuführenden Prozessschritten orientiert. Dementsprechend stehen unterschiedliche Zylindertypen mit Entgasungs-, Side Feeder-, Flüssigdosier-Option oder Ähnlichem zur Verfügung. Dabei fungieren die im nächsten Abschnitt beschriebenen Stauringe als systeminterne Grenze, indem sie, ähnlich wie rückfördernde Elemente in Doppelschneckenextrudern, durch Drosselung des Schmelzestroms eine Teilfüllung des nachfolgenden Bereichs bewirken. Durch entsprechende Verbindungselemente können jedoch auch zwei oder mehrere Module zu einem durchgehenden Prozessabschnitt vereint werden.

2.2.2.2 Anlauf- und Stauringe

Im Übergangsbereich zwischen zwei Modulen weist die Zentralspindel jeweils einen kurzen, zylindrisch glatten, unverzahnten Abschnitt auf (1 in Abbildung 15). An dieser Position ist in den Verbindungsflanschen der Module jeweils ein Anlauf- (2) und Stau-Ring (3) angeordnet. Ein weiterer Anlaufring in entsprechend abgeänderter Bauform befindet sich in der Werkzeugplatte, sofern eine solche den Abschluss des Extruders bildet.

Der Anlaufring nimmt die im Betrieb auftretenden Axialkräfte der Planetspindeln des vorangegangenen Moduls auf. Um Verschleiß vorzubeugen, besteht das Bauteil aus einem extrem harten Werkstoff, mit dem auch die korrespondierenden Kontaktflächen der Planetspindeln ausgestattet sind.

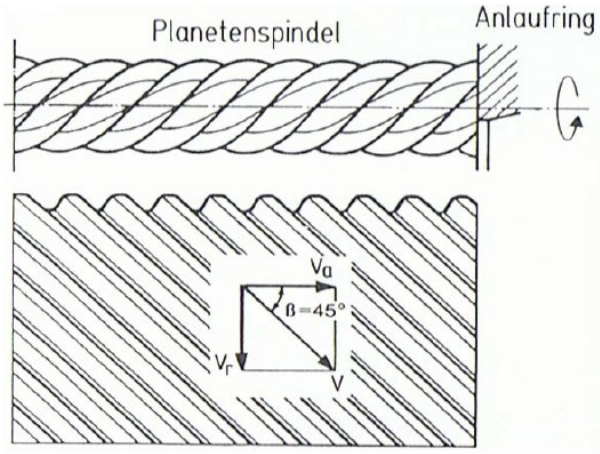

Abbildung 14: Betriebskräfte im Planetwalzenteil [34]

Hinter dem Anlaufring ist der Stauring angeordnet, der stellenweise auch als *Dispergierring* bezeichnet wird, wobei es sich lediglich um zwei unterschiedliche Begriffe für dasselbe Element handelt. Es können Ringe mit verschiedenen Innendurchmessern und Geometrien eingesetzt werden, wodurch der Querschnitt der Durchtrittsöffnung zwischen den Modulen variiert wird. Dies bewirkt eine Drosselung des Schmelzestroms, wodurch Rückstaulänge und Verweilzeit im vorangehenden Modul beeinflusst werden.

Stauringe können zusätzliche Funktionen erfüllen, wie die Aufnahme von Schmelzedruck- und Temperatursensoren oder als Schnittstelle für Entgasungsvorgänge oder Flüssigdosierungen.

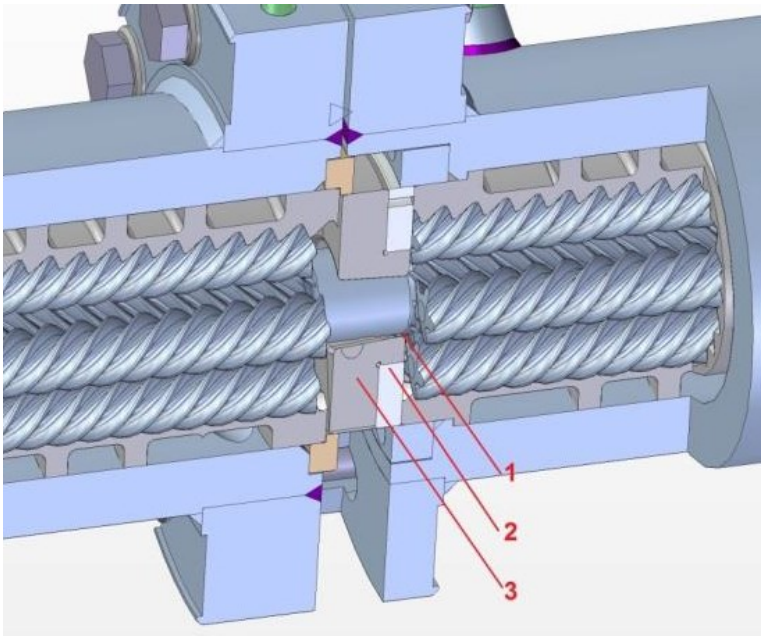

Abbildung 15: Anordnung des Anlauf- (2) und des Stau-Rings (3) zwischen zwei Modulen des Extruders [35] in [37]

2.2.2.3 Planetspindeln

Die Module des Planetwalzenextruders können unabhängig voneinander mit diversen Typen von Planetspindeln in variabler Anzahl bestückt werden. Die maximale Spindelanzahl ist von der Baugröße des Extruders abhängig. Pro Modul müssen jedoch stets mindestens drei Spindeln möglichst symmetrisch angeordnet sein, um die Betriebssicherheit der Anlage durch die mechanische Abstützung der Zentralspindel gegen den Zylinder zu gewährleisten.

Durch die Veränderung der Spindelkonfiguration wird das Prozessverhalten im jeweiligen Modul maßgeblich beeinflusst. Spindeltyp und -anzahl beeinflussen das Transportverhalten hinsichtlich Verweilzeit und Fördersteifigkeit, woraus sich weiterführend Auswirkungen auf Art und Intensität des Energieeintrags in das Extrudat ergeben.

Um ein gutes Einzugs- und Förderverhalten zu erreichen, werden Planetspindeln unterschiedlicher Längen eingesetzt. Dabei entspricht die *lange* Variante mit geringem Untermaß der Modullänge, um Totströmungsgebiete zu vermeiden, die *kurze* Variante ist beispielsweise um 30mm kürzer. Insbesondere bei hoher Spindelanzahl im Modul werden beide Varianten möglichst im Wechsel angeordnet. Dadurch ergeben sich Freiräume im Beschickungsbereich des Moduls, welche die Materialübergabe aus dem vorherigen Modul – insbesondere bei noch unaufgeschmolzenem Extrudat – begünstigen.

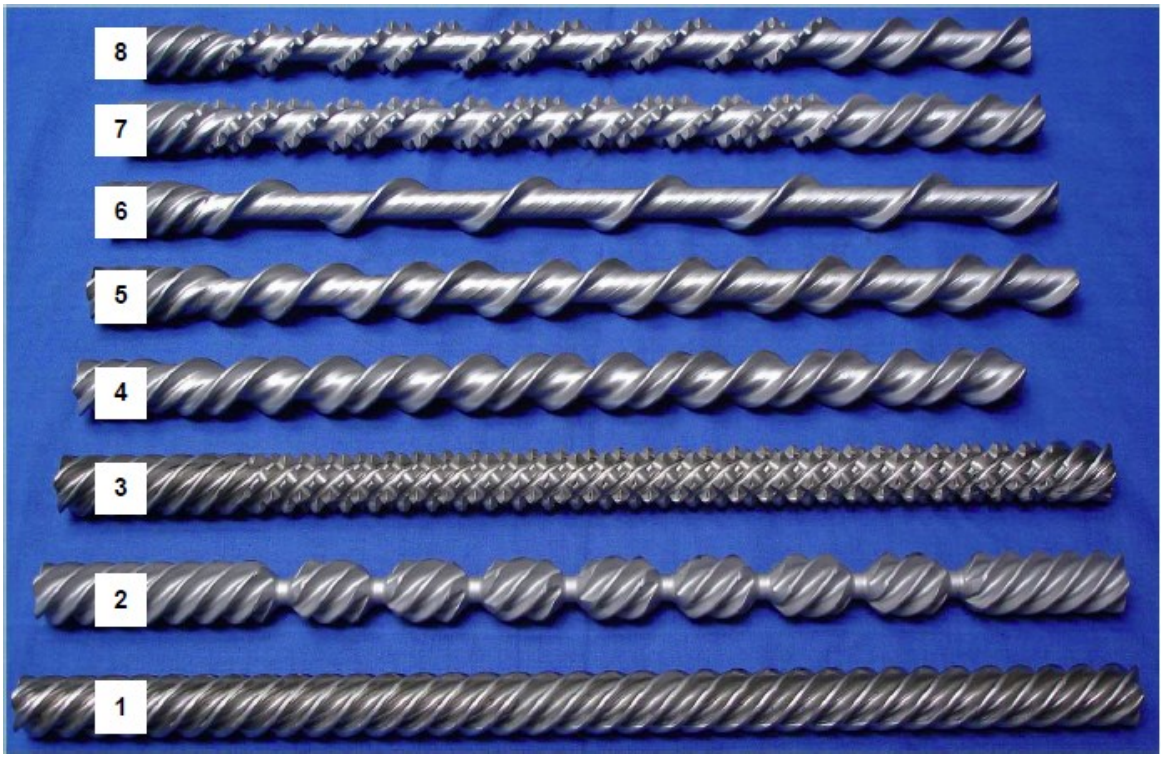

Abbildung 16: Eine Auswahl verfügbarer Spindeltypen [35] in [38]

Einige Planetspindeltypen sind in Abbildung 16 dargestellt. Die verschiedenen Varianten leiten sich stets von der Standardspindel (1) ab, die eine durchgehende Verzahnung über die gesamte Länge aufweist.

Igelspindeln (2) weisen mehrere radiale Einstiche auf und werden zur Erhöhung der Quervermischung im Modul eingesetzt. Mit diesem Effekt geht eine erhöhte Verweilzeit und verringerte Förderleistung einher.

Noppenspindeln (3) weisen mehrere spiralförmige, zur Gangsteigung gegenläufige Einstiche auf, woraus eine näherungsweise pyramidenförmige Struktur auf der Spindel resultiert. Der Spindeltyp ist für die Verbesserung der Plastifizierleistung vorgesehen, der Effekt wird durch eine verringerte Förderwirkung und erhöhte Querdurchmischung erreicht, wodurch die Verweilzeit des Extrudats zunimmt.

Bei den Nummern 4, 5 und 6 handelt es sich um so genannte *Transport- und Trocknungsspindeln (TT-Spindeln)*, die eine reduzierte Verzahnung aufweisen. Diese Varianten werden anhand der verbliebenen Zahnanzahl benannt, eine Spindel mit beispielsweise zwei Zähnen wird dementsprechend als *TT2-Spindel* bezeichnet.

Werden wie bei 7 und 8 auf einem Spindelabschnitt zwei Bauarten miteinander kombiniert, werden diese als *Hybridspindeln* bezeichnet, in diesem Fall *TT-Noppen-Hybride*. Als *Zonenspindeln* werden Varianten bezeichnet, bei denen mehrere Bauarten in separaten Abschnitten auf einer Spindel vorliegen. [38]

Neben der besprochenen Auswahl existieren weitere Varianten und Bauarten, wie beispielsweise das von Limper et. al. beschriebene Konzept der dichtkämmenden Schnecken [39]. Auf diese soll jedoch nicht näher eingegangen werden, da sie hier nicht relevant sind.

Im Zuge der Versuchsdurchführung wurden folgende Spindeltypen eingesetzt, für die im weiteren Verlauf der Arbeit die angegebenen Kürzel verwendet werden.

Spindeltyp	**Kurzbezeichnung und Länge**		
	400mm	**370mm**	**50mm**
Standardspindel	STD 400	STD 370	STD 50
Noppenspindel	NPP 400	NPP 370	
TT2-Spindel	TT2		
TT1-Spindel	TT1		

Tabelle 1: Kürzel für die verwendeten Planetspindeln

2.2.2.4 Anlagenbauformen

Ein Planetwalzenmodul ist nicht in der Lage hohen Extrusionsdruck aufzubauen, typisch ist ein Druckniveau von weniger als 60bar [40]. Ein Aufbau der Anlage mit einem Planetwalzenmodul als letzte Prozesseinheit ist daher nur für Aufgaben mit niedrigem Druckbedarf geeignet, wie Compoundier- und Granulieraufgaben oder die Beschickung eines Kalanders oder ähnlicher Folgeeinrichtungen. Sind höhere Extrusionsdrücke notwendig, muss dem Planetwalzenmodul eine Schmelzefördereinheit folgen. Zu diesem Zweck kann die Zentralspindel mit einem weiteren Einschnecken-Abschnitt ergänzt werden, oder aber der Extruder in Kaskadenbauform mit einer separat angetriebenen Austragseinheit kombiniert werden. Letztgenannte Bauform hat den Vorteil, dass durch den separaten Antrieb der Austragseinheit eine vollständige Entkopplung vom Prozess im Planetwalzenextruder möglich ist, was bei der Bauform mit durchgehender Welle nicht der Fall ist. Durch Anlegen eines Vakuums im Übergabeschacht kann eine zusätzliche Entgasung des Extrudats

erreicht werden kann. Nachteilhaft an der Kaskadenanordnung ist, dass die Komplexität und Größe der Anlage durch die zweite Antriebseinheit zunimmt.

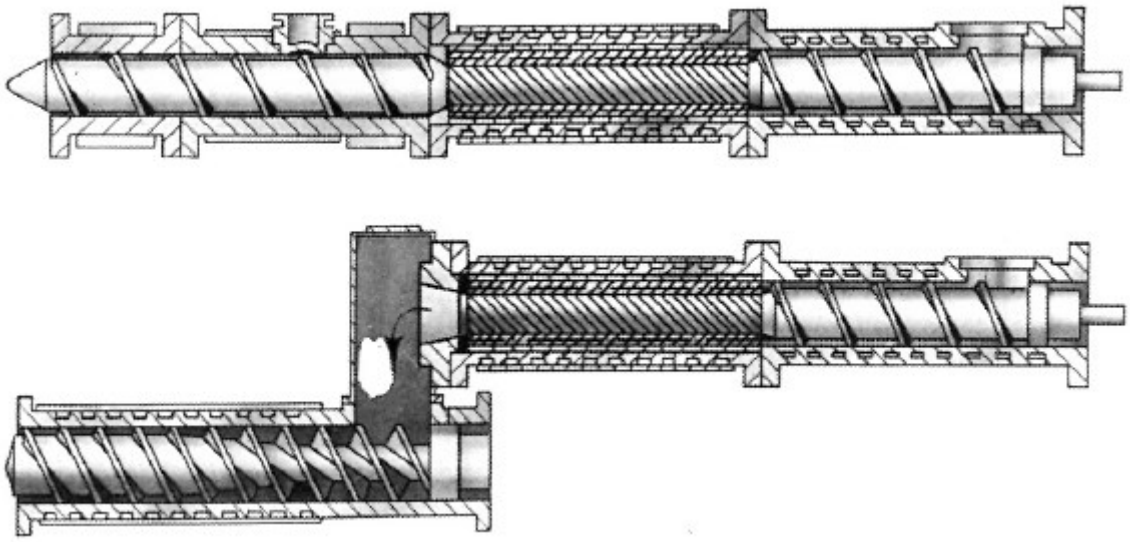

Abbildung 17: Planetwalzenextruder mit Austragsschnecke (oben) und in Kaskaden-Bauform (unten) [34]

2.2.3 Bisherige Forschung am Planetwalzenextruder

Obwohl das Prinzip des Planetwalzenextruders schon seit mehreren Jahrzehnten industriell eingesetzt wird, gibt es nur sehr wenige Publikationen, die diesen Maschinentyp behandeln. Erst in jüngerer Vergangenheit kommt es vermehrt zu Veröffentlichungen, was auch auf die Platzierung einiger Anlagen dieses Typs in Forschungsinstituten zurückzuführen ist. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick zu Publikationen gegeben werden, die für die Thematik dieser Arbeit relevant sind.

Stehr geht in seiner Dissertation [33] und einem gemeinsamen Fachartikel mit Limper [36] ausführlich auf die prozesstechnischen Besonderheiten des Maschinentyps ein, darunter die Parallelen zwischen dem Planetwalzenextruder und einem Walzwerk. Diese Modellvorstellung für den teilgefüllten Bereich wird seitdem stets wieder aufgegriffen und als Betrachtungsgrundlage in jüngeren Publikationen herangezogen, so auch in der vorliegenden Arbeit. Ebenso wird in jenem Fachartikel bereits auf Zusammenhänge zwischen dem Knetvolumen, das von der Spindelanzahl beeinflusst wird und den Effekt der Stauringe auf das Misch- und Plastifizierverhalten eingegangen.

Greger geht in seiner Dissertation [41] und einem Artikel [42] auf die Einflüsse der Stauringe im Detail ein und untersucht den Zusammenhang zwischen dem Stauringdurchmesser und der Mischgüte des Extrudats. Dabei wird festgestellt, dass Stauringe mit kleinerem hydraulischem Querschnitt eine Verbesserung der Dispergiergüte bewirken, was zugleich mit einem erhöhten Energieeintrag in die Schmelze durch dissipierte Antriebsleistung einhergeht.

Gerdon [38] untersucht die Einflüsse verschiedener Spindeltypen und Prozessparameter hinsichtlich Druckaufbau, Verweilzeit, Energieeintrag, Förder- und Mischverhalten. Ein Fokus liegt dabei auf der differenzierten Betrachtung des Verhältnisses zwischen dem mechanischen Energieeintrag über die Antriebsleistung und dem Wärmeenergieeintrag über das Temperiersystem der Anlage. Gerdon

beurteilt auf Basis seiner Messergebnisse die Eignung verschiedener Spindeltypen für die genannten Aspekte der Prozessführung.

Rudloff et. al. [43] beschreiben in einem Artikel die Herangehensweise an die rechnerische Erfassung und Modellierung des Planetwalzenextruders. In dem beschriebenen Ansatz werden teil- und vollgefüllte Bereiche differenziert betrachtet und die Randbedingungen dieser Zonen berücksichtigt. Dabei werden auch die Rolle des freien Querschnitts im vollgefüllten Bereich und eine Überlagerung der Schleppströmung mit einer Druckströmung in dieser Zone erwähnt.

Radovanovic [44] beschreibt die Prozess- und Rezepturoptimierung hochgefüllter Wood-Polymer-Compounds. Dabei wird auch auf die Beeinflussung der Holzfasern durch den Verarbeitungsprozess eingegangen, Rückschlüsse auf konkrete Schädigungsmechanismen werden jedoch nicht gezogen.

Taufertshöfer beschreibt in seiner Dissertation [45] und einem Fachartikel [46] die Herstellung höchstgefüllter Leitruß-Compounds in Polyolefin-Matrix auf dem Planetwalzenextruder. Dabei werden verschiedene Anlagenkonfigurationen betrachtet, wobei auch mehrmodulige Aufbauten, verschiedene Stauringe und Werkzeuge eingesetzt wurden. Dabei bestand die Zielsetzung in einer schonenden Verarbeitung des hochgefüllten Extrudats, genauer darin, einen sehr niedrigen mechanischen Energieeintrag in das Compound zu erzielen, um die Struktur der Leitruß-Partikel nicht zu zerstören. Mit diesem Ansatz konnten außergewöhnlich hohe Füllgrade und Leitfähigkeitswerte erreicht werden.

2.3 Spritzgussverfahren

Eine gängige Methode, um LFT-Materialien schädigungsarm im Spritzguss zu verarbeiten, besteht in der Verwendung einer dafür optimierten Schnecke, die die in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Kriterien erfüllt. Darüber hinaus gibt es jedoch diverse Sonderverfahren, auf die in diesem Abschnitt eingegangen werden soll.

2.3.1 Langfaser-Direkspritzgießen

Der Spritzgießmaschinenhersteller Arburg hat in Kooperation mit dem Süddeutschen Kunststoffzentrum ein Spritzgießverfahren entwickelt, bei dem unbenetzte Fasern direkt dem Spritzgussprozess zugeführt werden. Die Fasern werden der Anlage als Roving zugeführt, die mittels eines elektrischen Schneidwerks auf eine vorgegebene Länge geschnitten werden. Die Faserschnittstücke rieseln in ein unmittelbar unterhalb angeordnetes Sidefeed-Stopfaggregat, das diese in den Schmelzestrom der Plastifiziereinheit dosiert. [47]

Der beschriebene Aufbau ist sehr kompakt, die Gesamtanlage ist unwesentlich größer ist als eine konventionelle Spritzgussmaschine. Ebenso wird vom Hersteller angegeben, dass die Bedienbarkeit des Systems im Vergleich zu einer konventionellen Anlage nicht komplizierter ist.

2.3.2 Spritzgieß-Compounder

Als Spritzgieß-Compounder werden Anlagen bezeichnet, bei denen das Extrudat eines Compoundier-Extruders in einer Wärme zu Spritzgussbauteilen verarbeitet wird. Dabei werden meist

Doppelschneckenextruder in Kombination mit einem in Reihe geschalteten Zwischenspeichersystem und einem Kolben-Einspritzmechanismus eingesetzt (Abbildung 18). Diese Konfiguration ist mit geringer Verbreitung im industriellen Einsatz oder in Form von Versuchsanlagen anzutreffen. Spritzgieß-Compounder bieten gegenüber konventionellen Spritzgießmaschinen Vorteile hinsichtlich Aufschmelzleistung, Schmelzehomogenität, Massedurchsatz und Rezepturgestaltung. Diesen Vorteilen stehen höhere Investitionskosten bei der Anschaffung und höhere Anforderungen an das Bedienpersonal gegenüber. Neben der Krauss-Maffei GmbH werden derartige Anlagen auch von weiteren Unternehmen hergestellt bzw. entwickelt, beispielsweise bei der Engel Austria GmbH in Zusammenarbeit mit dem Extruderhersteller Leistritz Extrusionstechnik GmbH oder in einer Kooperation zwischen Husky Injection Molding Systems Ltd. mit der Coperion GmbH. Derartige Anlagen sind nicht ausschließlich für die Verarbeitung von faserverstärkten Materialien vorgesehen, vielmehr handelt es sich dabei um eine Option unter einer Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. [48] [12] [49]

Neben der Kombination aus Doppelschneckenextrudern und einem einzelnen Spritzkolben sind verschiedenste Kombinationen und Anordnungen aus Aufschmelz- und Einspritzkonzepten denkbar. Eine Vielzahl derartiger Konzepte ist in Patenten, Artikeln und Firmenschriften zu finden, wobei in diesen Quellen häufig nicht ersichtlich ist, ob diese je umgesetzt wurden oder gar eine gewisse Verbreitung gefunden haben. Daher soll auf dieses Thema an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

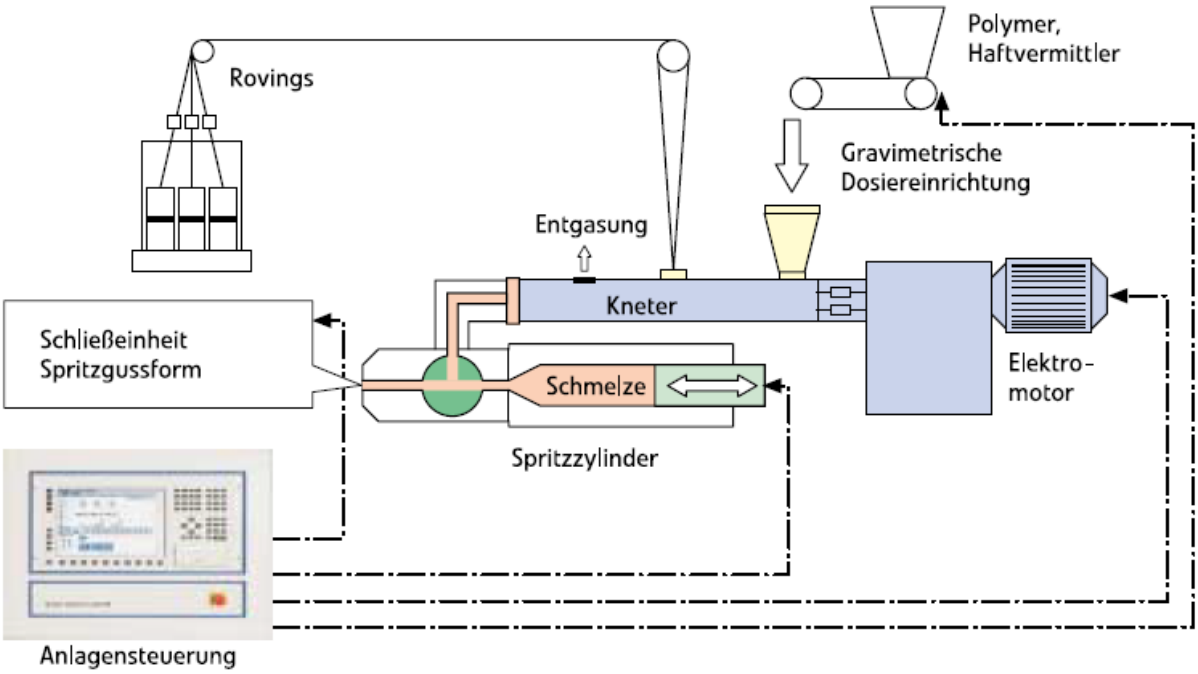

Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Spritzgieß-Compounders [49]

Bei der Glasfaserverarbeitung auf dem Spritzgieß-Compounder werden diese meist als Rovings ohne Vorzerkleinerung in den Extruder eingezogen, der Zerkleinerungsvorgang findet allein durch die mechanische Belastung der Fasern im Schmelzestrom statt. Das Maß der Zerkleinerung ist dementsprechend von der Schneckengestaltung, den Parametern des Extrusionsprozesses und der Strecke abhängig, die die Fasern durch den Extruder zurücklegen. Bürkle et. al. beschreiben, dass nach Verlassen des Extruders noch über 90% der Fasern in der Schmelze eine Länge von mindestens 5mm aufweisen. [50]

3 Konstruktionen

Um die Verarbeitung von Langglasfasercompounds auf dem Planetwalzenextruder zu erforschen wurden diverse Konstruktionen erarbeitet und als Prototypen und Versuchsaufbauten umgesetzt. In diesem Kapitel sollen die für die vorliegende Arbeit relevanten Konstruktionen dargestellt und erläutert werden. Auf zugehörige Versuchsergebnisse wird in Kapitel 6 eingegangen.

3.1 Schmelzespeichersystem

Eine der zentralen Zielsetzungen ist die Ergänzung des Planetwalzenextruders mit einem Schmelzespeichersystem, um auf diesem Wege in einer Wärme spritzgegossenen Teile herstellen zu können. Ziel des Gesamtsystems ist, die Schädigung der Glasfasern in der Schmelze zu reduzieren, um auf diesem Wege die mechanischen Eigenschaften spritzgegossener Bauteile zu verbessern.

Da es sich bei dem verwendeten Planetwalzenextruder um eine Anlage für Compoundieranwendungen handelt, soll dieser während dem Prozess unterbrechungsfrei mit konstanter Drehzahl und konstantem Massedurchsatz betrieben werden. Daher besteht die Aufgabe des Schmelzespeichersystems darin, den kontinuierlich austretenden Schmelzestrom zu puffern und dem Bedarf des zyklisch ablaufenden Spritzgussprozesses entsprechend zur Verfügung zu stellen. Des Weiteren soll das Speichersystem den Einspritzdruck für den Spritzgussprozess aufbringen und die Schmelze während des Speichervorgangs temperieren.

Nach Betrachtung existierender Konstruktionen fiel die Entscheidung, ein System mit zwei identischen, hydraulisch betriebenen Kolbenspeichereinheiten in paralleler Anordnung anzustreben. Die beiden Speichereinheiten führen den Betriebsmodus *Füllen/Puffern* und *Spritzgießen* jeweils im Wechsel aus. Die Verteilung des Schmelzestroms zwischen den beiden Einheiten erfolgt ein- und ausgangsseitig mit jeweils einem Umschaltventil. Während Speicher A zum Extruder hin geöffnet ist und über die Dauer des Spritzgusszyklus mit Schmelze befüllt wird, steht Speicher B für die Ausführung des Spritzgussprozesses zur Verfügung. Ist der Spritzgusszyklus beendet, schalten beide Ventile zeitgleich um, sodass nun Speicher B befüllt wird, solange sich Speicher A im Spritzguss-Modus befindet. Das Prozesszyklus-Schema ist in Abbildung 19 grafisch dargestellt.

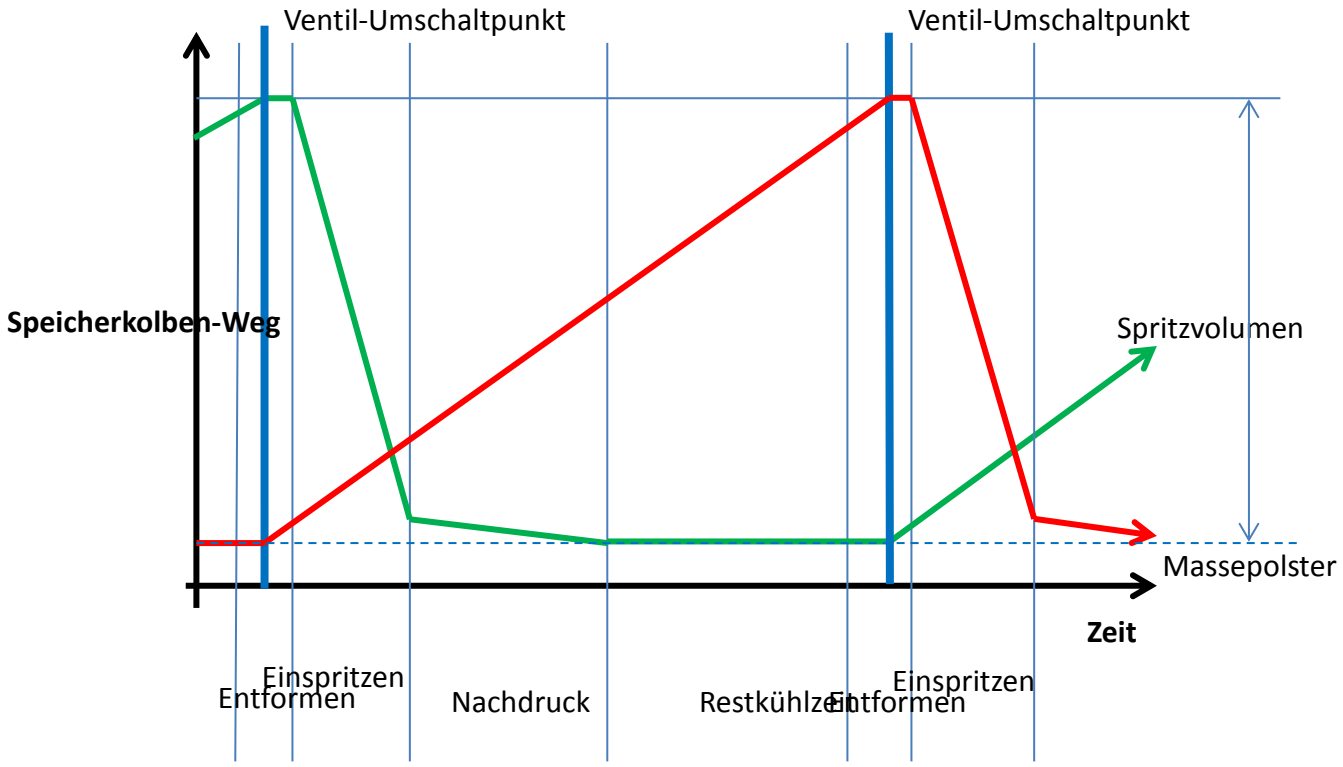

Abbildung 19: Prozessablaufschema des Schmelzespeichersystems

Der Planetwalzenextruder weist im Hinblick auf die geplante Anwendung im Vergleich zu einer Einschnecken-Maschine ähnliche Dimensionen auf. Für die Verarbeitung des verwendeten 10mm-LFT-Granulates empfiehlt der Materialhersteller eine Schnecke mit einem L/D-Verhältnis zwischen 18/1 und 22/1 bei einem Durchmesser von 40mm oder mehr [10], woraus sich eine aktive Schneckenlänge von etwa 800mm ergibt. Meist sind jedoch Anlagen mit größeren Schneckendurchmessern anzutreffen, da auf diesem Wege die Faserschädigung reduziert werden kann. Der WE70 weist eine Modullänge von 400mm auf, wodurch sich bei dem verwendeten Aufbau mit einem Einzugs- und einem Planetwalzenmodul ebenfalls eine Länge von ca. 800mm ergibt. Daher wurde bereits in der Entwurfsphase in Betracht gezogen, den Verbund aus Extruder und Speichersystem als Einheit zu gestalten, die als Ganzes ein konventionelles Plastifizieraggregat auf einer Spritzgussmaschine ersetzen kann. Abbildung 20 zeigt den geplanten Anlagenaufbau mit Nummerierungen, um die Positionen der Elemente zu verdeutlichen.

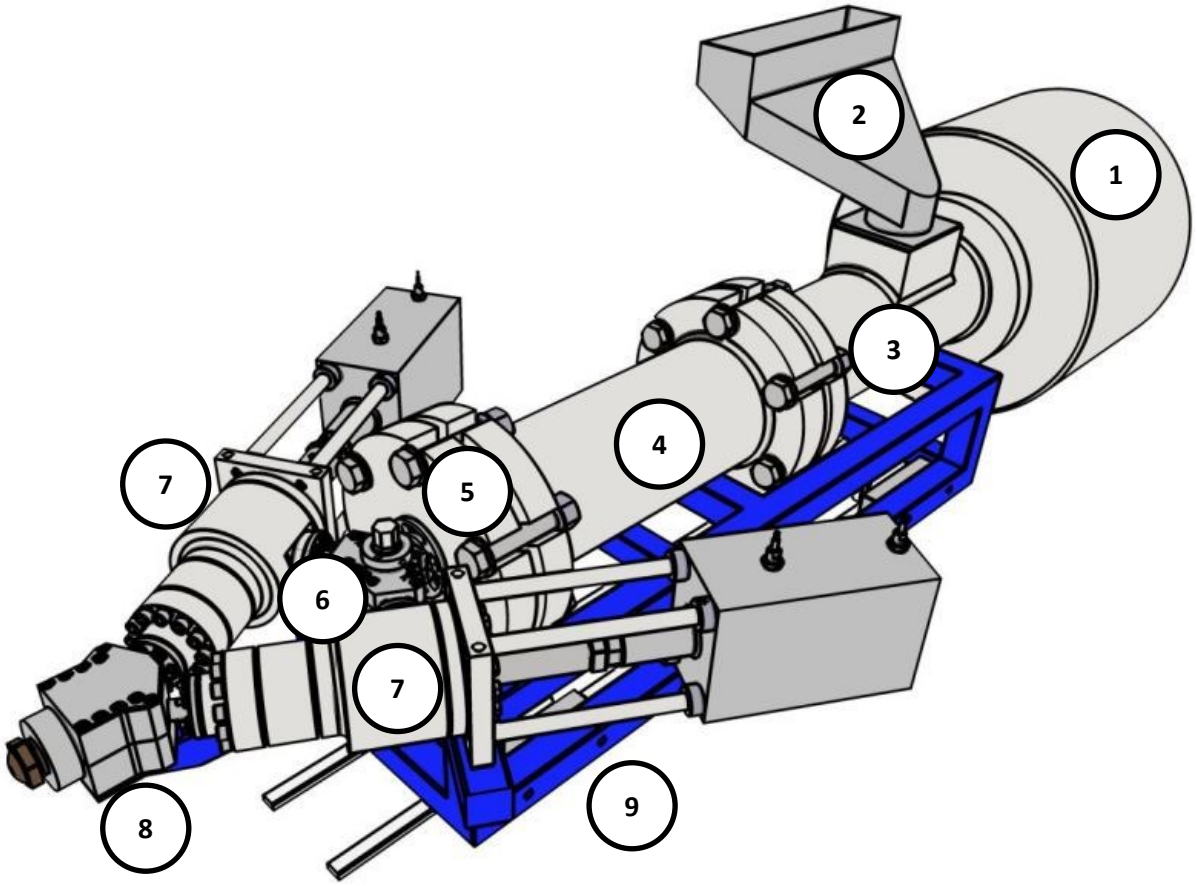

Abbildung 20: Darstellung des Anlagenkonzeptes mit Nummerierungen

1 Antriebseinheit des Extruders
2 Trichter
3 Einzugsmodul
4 Planetwalzenmodul
5 Werkzeugplatte mit Anlaufring und Düse
6 Füllventil
7 Schmelzespeichereinheiten
8 Ausstoßventil mit Spritzgussdüse
9 Tragende Unterkonstruktion, die ein Verschieben auf dem Maschinenbett ermöglicht

Für die in dieser Arbeit beschriebene Erprobung des Speicherkonzepts wurde das oben dargestellte System zunächst in reduzierter Form mit nur einer Schmelzespeichereinheit aufgebaut, um Aufwand und Risiko im Falle einer Überarbeitung der Komponenten gering zu halten. Zu diesem Zweck wurde anstatt 8 und 9 eine direkte Verbindung zum Spritzgusswerkzeug hergestellt. Der Aufbau der Versuchsanlage wird in Kapitel 5.2 und im Anhang, Kapitel 13.1 näher beschrieben.

3.1.1 Anforderungsprofil des Speichersystems

Mit dem Ziel, die Schädigung von Fasern und Matrix zu minimieren ist das Konzept darauf ausgerichtet, die thermische und mechanische Belastung der Schmelze im Speichersystem gering zu halten. Aus dieser Zielsetzung ergeben sich folgende Anforderungen:

- FIFO-Prinzip (**F**irst **I**n – **F**irst **O**ut) im gesamten System
- Kurze Fließwege mit großen Querschnitten und ohne Totströmungsbereiche
- Temperierung der Schmelze
- Geringe Scherbelastung der Schmelze
- Keine scharfkantigen Übergänge oder kleinen Radien
- Geringer Gegendruck beim Füllen, da der PWE nur geringen Förderdruck aufbaut

3.1.2 Aufbau des Speichers

Die Realisierung des FIFO-Prinzip unter Vermeidung von Totströmungsbereichen wird durch den Einsatz eines Pinolenverteilers in Kombination mit einem konzentrisch angeordneten Kolben erreicht. Der Pinolenverteiler umgibt den Kolben, der im Inneren des Bauteils durch eine Messingbuchse geführt und abgedichtet wird. Der Ringspalt des Pinolenverteilers setzt sich zwischen dem Mantel des Speichers und dem Kolben fort, sodass die Schmelze den Kolben während des Füllvorgangs überströmen und sich vor dessen Spitze sammeln kann.

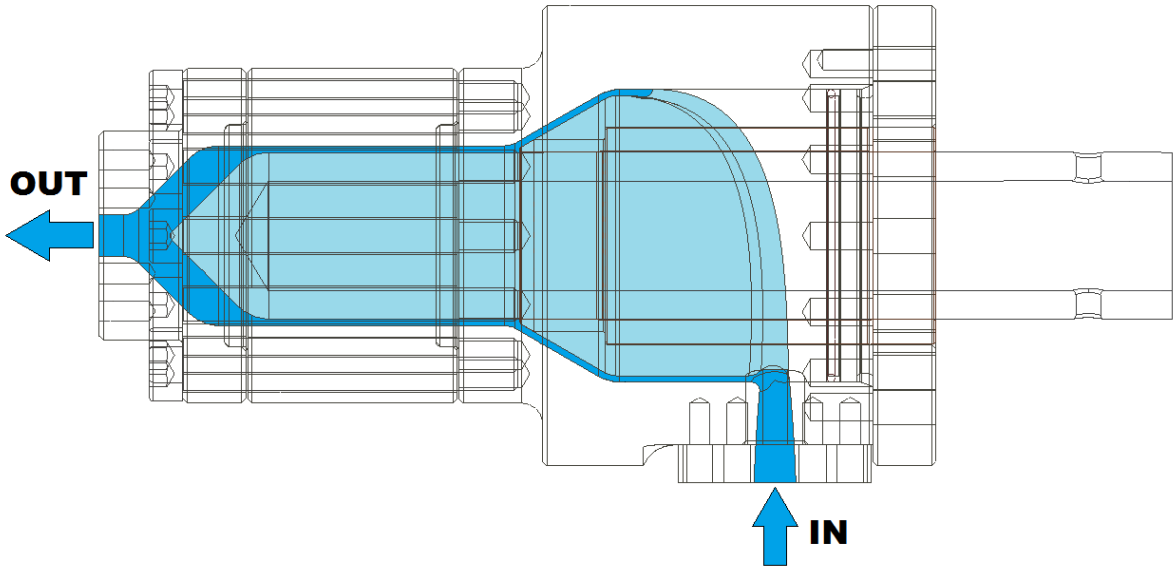

Abbildung 21: Schematische Darstellung des Kolbenspeichers

Während des Füllvorgangs ist das Ausstoßventil des Speichers geschlossen. Die Pinole wird seitlich mit Schmelze gespeist, verteilt diese ringförmig und leitet sie durch den Spalt zwischen Kolben und Mantel, wodurch die Schmelze vor die Spitze des Kolbens strömt. Analog zum Füllgrad bewegt sich der Kolben zurück und gibt das von der Schmelze benötigte Volumen frei. Die Bewegung des Kolbens kann dabei sowohl passiv durch den Extrusionsdruck erfolgen als auch aktiv mittels Hydraulik, um gezielt den Füll- bzw. Gegendruck zu beeinflussen. Ist das gewünschte Speichervolumen erreicht, wird das Füllventil verschlossen, um während des Spritzvorgangs ein Zurückströmen der Schmelze in den Extruder zu unterbinden. Das Ausstoßventil des Speichers wird geöffnet, sodass die Schmelze durch das Verfahren des Kolbens ausgestoßen werden kann. Das Weg- und Geschwindigkeitsprofil

des Kolbens kann dabei, entsprechend dem Einspritzprofil einer konventionellen Spritzgussmaschine, an die Anforderungen des jeweiligen Spritzgussprozesses angepasst werden. Da der Speicher in allen Bereichen stets in nur einer Richtung durchströmt wird, kann bei dieser Bauart uneingeschränkt ein Massepolster für den Spritzgussprozess vorgesehen werden, ohne dass es dadurch zu dauerhaften Ablagerungen aufgrund mangelnder Durchspülung kommt, was bei einigen anderen Bauformen als Problem angeführt wird.

Die Temperierung der Schmelze im Speicher und den Ventilen wird durch mehrere separat geregelte Heizelemente gewährleistet. Dabei handelt es sich um zwei Heizmanschetten, die den Mantel des Speichers auf Höhe des Pinolenverteilers und des Schmelzereservoirs umfassen. Zusätzlich ist der Kolben des Speichers hohl ausgeführt, im Inneren ist eine Heizpatrone installiert. Die Beheizung des Speichersystems ist unverzichtbar, da es sonst insbesondere beim Anfahren der Anlage unweigerlich zum Verstopfen der Fließkanäle durch das Einfrieren der Schmelze käme.

3.1.3 Aufbau der Ventile

Das Speichersystem verfügt über ein Füllventil und ein Ausstoßventil. Das Füllventil dient der Lenkung des Schmelzestroms zwischen dem Extruder und den Speichereinheiten, das Ausstoßventil zwischen den Speichereinheiten und der Spritzgussdüse. Beide Ventile sind als Drehkükenventile ausgeführt, die Bauweise unterscheidet sich jedoch aufgrund unterschiedlicher geometrischer Anforderungen.

Das Gehäuse des Füllventils weist drei Kanäle auf, die jeweils in einem Winkel von 120° zueinander stehen. Die Rotationsachse des Drehkükens, das einen ebenfalls um 120° abgewinkelten Kanal aufweist, liegt im Schnittpunkt der drei Kanäle im Ventilgehäuse. Somit verbindet das Küken stets zwei der drei Kanäle, während der Dritte gesperrt ist. Durch diese Anordnung ist gewährleistet, dass der Pfad zum Speicher im Puffer-Modus geöffnet ist, während der Rückstrom in den Extruder von jenem Speicher im Spritzguss-Modus verhindert wird. Während des Umschaltvorgangs verbleibt ein kleines Schmelzevolumen im Kanal des Drehkükens, dieses wird nach Abschluss des Umschaltvorgangs jedoch sofort entgegen der vorherigen Eintrittsrichtung wieder ausgespült.

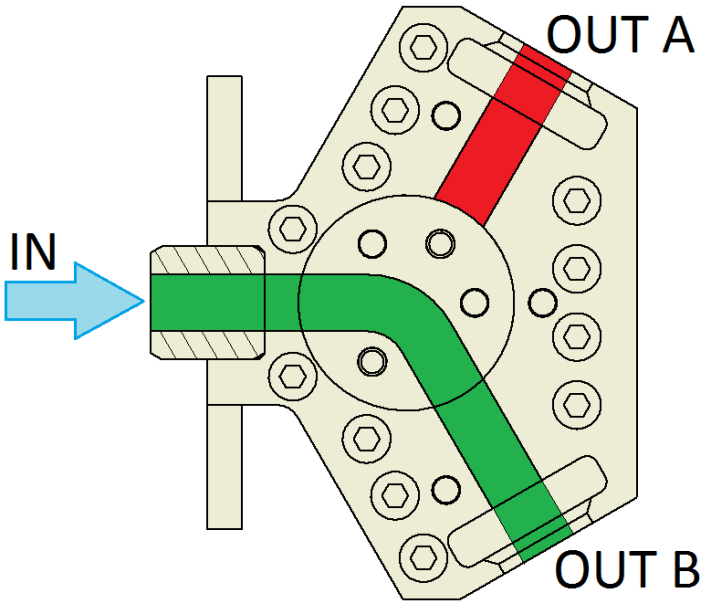

Abbildung 22: Schematische Schnittansicht des Füllventils

Die Schaltpositionen des Drehkükens sind durch einen mechanischen Anschlag definiert, da die Betätigung in der Versuchsanlage noch manuell erfolgt. Eine fehlerhafte Schaltposition ist zu vermeiden, da bei einem teilgeöffneten Kanal eine Querschnittsverengung mit scharfkantigen Übergängen entsteht, die sowohl den Prozess durch erhöhten Gegendruck beeinflusst als auch zusätzliche Faserschädigungen hervorruft.

Sowohl das Gehäuse als auch das Küken des Füllventils weisen eine Trennebene auf. Diese Bauweise vereinfacht die Fertigung, ermöglicht die strömungsgünstige Gestaltung des Kanals im Drehküken als ununterbrochenen Radius und das Erzielen einer hohen Oberflächengüte in den Kanälen. Die Verbindungselemente zwischen Ventilgehäuse und Schmelzespeicher können aufgrund der Trennebene formschlüssig, jedoch rotationsfähig in das Ventilgehäuse eingesetzt werden, wodurch das Verbinden und Ausrichten der Systemkomponenten vereinfacht wird.

Das Ausstoßventil weist einen ähnlichen Aufbau auf, jedoch mit einem entlang der Rotationsachse durchströmten Küken, das zugleich der Aufnahme der Spritzgussdüse dient. Durch die Geometrie des Füllventils und der Schmelzespeicher stehen die Einlasskanäle des Ausstoßventils in einem Winkel von 60° zueinander, während des Umschaltvorganges rotiert das Küken um 180°.

Anders als bei einem konventionellen Plastifizieraggregat kann die Düsenanpresskraft nicht über den Zylinder des Extruders übertragen werden, da die Verbindungselemente des Speichersystems diese Belastung nicht zulassen. Daher ist vorgesehen, die Düsenanpresskraft über die Unterkonstruktion (9 in Abbildung 20) direkt in das Gehäuse des Ausstoßventils einzuleiten und so auf dem kürzest möglichen Weg auf die Düse zu übertragen.

3.2 Spritzgusswerkzeug

Bei dem Versuchswerkzeug handelt es sich um ein einfaches Plattenwerkzeug, das jedoch aufgrund der unkonventionellen Anordnung der Bestandteile der Versuchsanlage speziell für diesen Zweck konzipiert wurde. Da der Winkel des Schmelzespeichers durch die Lage des Extruders und die Geometrie des Füllventils fest vorgegeben ist, muss das Werkzeug zwischen den Aufspannplatten fluchtend zum Speicher ausgerichtet werden. Es wurde zu diesem Zweck mit runden Aufspannflanschen ausgestattet, um es in beliebigem Winkel montieren zu können. Die Spritzguss-Schließeinheit ist in der Versuchsanlage aus Platzgründen orthogonal zum Extruder ausgerichtet, weshalb der Anguss des Werkzeugs in der Trennebene liegt. Hinsichtlich der Faserschädigung während des Einspritzvorgangs ist diese Anordnung vermutlich vorteilhaft, da der Schmelzestrom nach Verlassen des Speichers keine Umlenkung mehr erfährt. Der Angussbereich des Werkzeugs weist einen keilförmig ausgeführten Übergang vom runden Ausgangsquerschnitt der Düse des Speichersystems auf den kurzen Querschnitt der Prüfplatte auf. Dieser bewirkt eine näherungsweise gerade Fließfront beim Füllen der Kavität.

Der ebene Bereich der Prüfplatte weist eine Länge von 140mm, eine Breite von 100mm und eine Dicke von 4mm auf. Diese Abmessungen ermöglichen die Entnahme von Schlagprüfkörpern nach EN ISO 179-1 in Längs- und Querrichtung und gekürzten Zugprüfkörpern in Anlehnung an EN ISO 527-2_1996 1A und 1B in Längsrichtung. Zuzüglich des Angusses ergibt sich ein Kavitätsvolumen von 67ml.

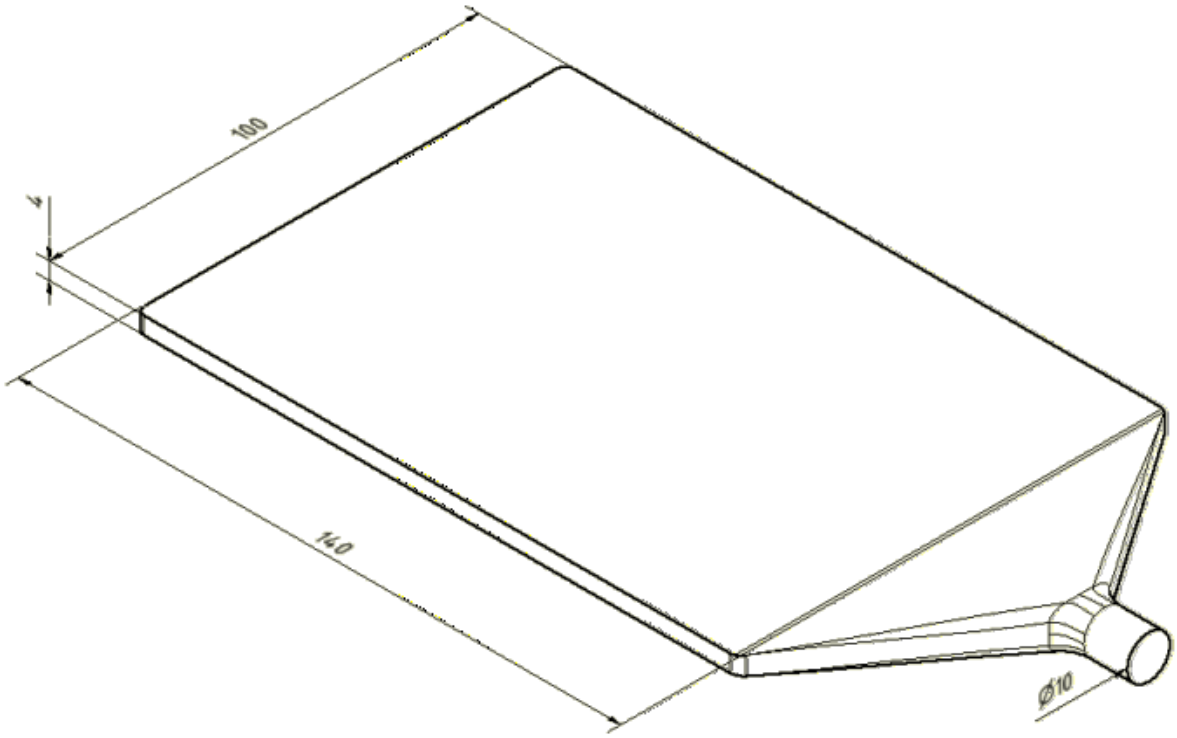

Abbildung 23: CAD-Darstellung der spritzgegossenen Prüfplatte mit Anguss-Geometrie

3.3 Modifikation der Anlaufplatte

Der Planetwalzenextruder weist im Ausströmbereich der Werkzeugplatte ein Anlaufelement auf, das die im Betrieb entstehenden Axialkräfte der Planetspindeln abfängt. Im WE70 hat dieses Element die Form eines flachen Zylinders mit einem zentralen, sich verjüngenden Loch mit einem Einlaufdurchmesser von 48mm.

Das Arbeitsprinzip des Extruders bewirkt, dass durch die Knetbildung (siehe Abbildung 13) zwischen den aufeinander abrollenden Elementen des Extruders sowohl ein Materialstrom in Extrusionsrichtung an der Zentralspindel (blau in Abbildung 24) als auch am Zylinder (rot in Abbildung 24) entsteht. Während der Materialstrom entlang der Zentralspindel das System auf direktem Wege durch die Anlaufplatte verlassen kann, ist im Bereich der Zylinderwand der Austritt durch die Werkzeugplatte versperrt. Die Simulation des entsprechenden Bereichs legt nahe, dass dadurch das Extrudat des Knetes an der Zylinderwand zum Großteil zwischen den Spindeln entgegen der Extrusionsrichtung zurückströmt. Auf dieses Thema wird in Kapitel 6.2.3 näher eingegangen, in Kapitel 13.4 ist eine Strömungssimulation des Bereiches dargestellt.

Die Modifikation des Anlaufringes soll zeigen, ob die Faserschädigung reduziert werden kann, wenn die Schmelze das System auch im Zylinderwandbereich ohne Umlenkung verlassen kann, was wiederum Rückschlüsse auf die Transport- und Strömungsvorgänge im Extruder zulässt.

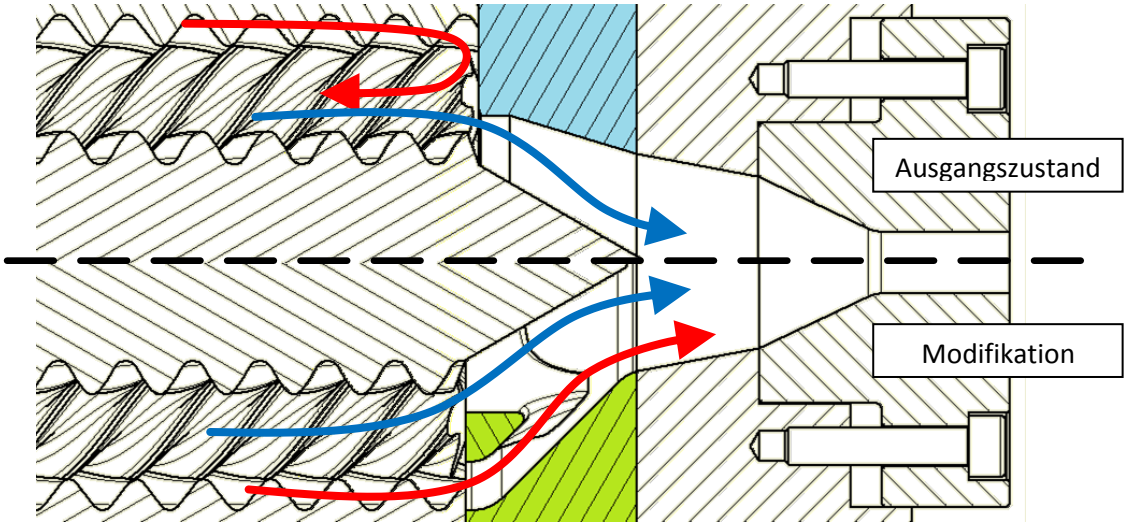

Abbildung 24: Querschnitt durch den PWE mit angedeuteten Strömungspfaden durch die Anlaufplatte im Ausgangszustand (oben, blau) und der modifizierten Konstruktion (unten, grün)

Es wurde ein modifiziertes Anlaufelement konstruiert und erprobt, das im Bauraum der ursprünglichen Anlaufplatte untergebracht wird und diese ersetzt. Das Element ist zweiteilig aufgebaut, es besteht aus einem Gehäuse und dem eigentlichen Anlaufelement, das aufgrund seiner Form im Folgenden als *Krone* bezeichnet wird. Diese sitzt konzentrisch im Gehäuse und wird rückseitig mit diesem verschraubt.

Das Gehäuse weist eine flache zylindrische Außenkontur auf. Die Innenkontur ist ein kreisförmiger, sich verjüngender Strömungskanal. Die Abmessungen des Bauteils ergeben sich aus dem Außendurchmesser der Verzahnung und dem Eingangs-Innendurchmesser des Schmelzekanals in der Werkzeugplatte. Um scharfkantige Übergänge und enge Radien zu vermeiden, wird die Querschnittsverringerung durch eine flaschenhalsartige Geometrie realisiert, die im Kontaktbereich zur Krone eine Kegelstumpfkontur aufweist.

Abbildung 25: Fotographie des modifizierten Anlaufelements

Die Krone nimmt die Axial- und Radialkräfte der Planetspindeln auf und leitet diese über das Gehäuse in die Werkzeugplatte ab. Der Kontaktbereich zu den Spindeln wurde zu einer schmalen, ringförmigen Fläche reduziert, die der Stirnfläche zuzüglich des Bewegungsspielraums der Planetspindeln entspricht. Die Krone stützt sich an fünf symmetrisch verteilten Positionen am Gehäuse ab, wodurch sie von Schmelze umströmt werden kann. Um Verschleiß vorzubeugen, muss der Anlaufring im Kontaktbereich zu den Planetspindeln eine hohe Oberflächenhärte aufweisen, im Falle des Prototyps wurde das gesamte innere Bauteil gehärtet.

3.4 Transparentes Extrudermodell

Aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten, den zur Verfügung stehenden Planetwalzenextruder mit zusätzlicher Prozessmesstechnik zu bestücken (siehe Kapitel 5.2.5) wurde nach Alternativen gesucht, um die in der Maschine ablaufenden Prozesse zu erfassen. Da sich bei Ein- und Doppelschneckenextrudern transparente Sichtmodelle bereits bewährt haben, wurde ein solches Modell des Planetwalzenextruders konstruiert.

Das Modell bildet ein Planetwalzenmodul und die Werkzeugplatte mit Düse ab. Auf den Bau eines Einzugsmoduls wurde verzichtet, da mit dem verwendeten Modellfluid ausschließlich der Schmelzezustand des Polymers darstellbar ist. Dieser liegt im Einzugsbereich noch nicht vor, weshalb die Abbildung dieses Bereichs nicht zielführend ist. Der transparente Betrachtungsbereich des Modells ist aus hochtransparenten Kunststoffen hergestellt, hierfür wurden PMMA-Halbzeuge und ein Epoxid-Gießharzsystem verwendet. Die faserhaltige Schmelze wird durch ein Gemisch aus transparenter Silikonpaste und dunkel eingefärbten, geschnittenen Polyamidfasern mit einer Dicke von 160µm und einer Länge zwischen 1 und 12mm dargestellt.

Aufgrund der komplexen Geometrien und zugunsten einer hohen Realitätsnähe des Modells wurden Zylinder, Zentralspindel und Planetspindeln durch Abformen originaler Maschinenbauteile im Vakuum-Gussverfahren hergestellt. Für die Reproduktion der Zentralspindel wurde eine weiße Einfärbung gewählt, um einen kontrastreichen Hintergrund für die Betrachtung der dunkel gefärbten Fasern zu erzeugen.

Das Modell weist, wie der reale Extruder auch, eine abnehmbare Werkzeugplatte auf, sodass verschiedene Konfigurationen hinsichtlich Spindelanzahl und -typ eingesetzt werden können. Ergänzend können über den Antrieb des Modells verschiedene Drehzahlen eingestellt werden. Dadurch können vergleichende Betrachtungen sowohl zu den Extrusionsversuchen als auch zu den FEM-Simulationen durchgeführt werden. Es wurden Standard- und TT1-Spindeln hergestellt und in verschiedenen Konfigurationen eingesetzt, da mit diesen beiden Typen besonders aussagekräftige Ergebnisse in den Verarbeitungsversuchen erzeugt wurden. Das Modell bietet nicht die Möglichkeit, verschiedene Düsenwerkzeuge einzusetzen, es wurde mit einem konstanten Düsendurchmesser von 13mm und einem flexiblen Schlauch gearbeitet, um die Silikonpaste zwecks Wiederverwendung in einen Auffangbehälter zu leiten. Durch lokale Verengung des Schlauchdurchmessers kann dennoch der Werkzeugwiderstand variiert werden.

Eine Besonderheit des Modells im Vergleich zur realen Versuchsanlage besteht darin, dass beide in Kapitel 5.3 erläuterten Bewegungsmodi am Modell darstellbar sind. Zu diesem Zweck wurde der Zylinder ebenfalls als drehbares Bauteil ausgeführt, der bei Bedarf mit dem Antrieb gekoppelt werden kann. Im gekoppelten Zustand dreht sich der Zylinder mit halber Drehzahl entgegen der Zentralspindel, wodurch die Planetspindeln – ohne umzulaufen – weiterhin rotieren. Dieser Modus ist sehr hilfreich für die Betrachtung, da beispielsweise der Spaltdurchtritt und das freie Volumen zwischen den Spindeln stets im Betrachtungsbereich bleiben.

3.4.1 Modell-Fluid

Aufgrund der Kunststoffe, aus denen das Extrudermodell gefertigt wurde, kann dieses lediglich bei Raumtemperatur betrieben werden. Daher musste ein transparentes Fluid gefunden werden, das in Anlehnung an die rheologischen Eigenschaften der Kunststoffschmelze unter dieser Bedingung eine Nullviskosität von ca. 230 Pa·s und strukturviskoses Fließverhalten aufweist.

Dieses Eigenschaftsprofil wurde durch das Mischen zweier Silikontypen aus der Produktgruppe *Compound VS* der EVONIK Hanse GmbH erreicht. Bei diesen Materialien handelt es sich um Zubereitungen aus pyrogener Kieselsäure und vinylfunktionellem Silikonpolymer, die in verschiedenen Viskositätsabstufungen angeboten werden. Die Ziffern in der Namensbezeichnung entsprechen der Viskosität der Gemische in Pa·s bei Raumtemperatur. [51]

Zum Einsatz kamen Compound VS 100 und 6000. Es wurde diverse Mischungsverhältnisse zubereitet, deren Fließkurven auf einem Platte-Platte-Rotationsviskosimeter des Typs Physica MCR300 der Anton Paar GmbH ermittelt wurden. Ein Mischungverhältnis von 9:1 des Typs 100 zu Typ 6000 hat sich als geeignet erwiesen, die Fließkurve ist in folgendem Diagramm dargestellt.

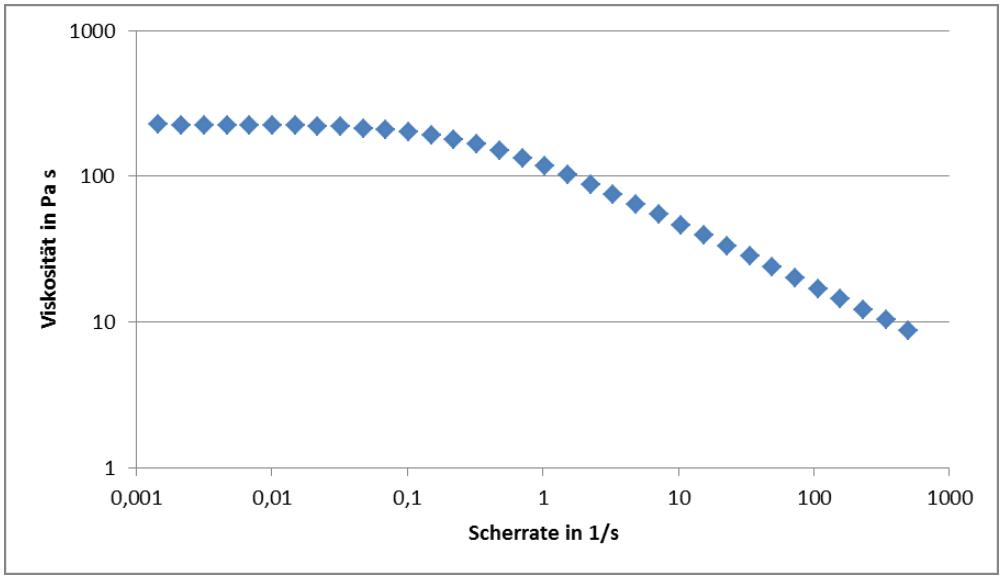

Abbildung 26: Fließkurve der Mischung Compound VS 100 und Compound VS 6000 im Verhältnis 9:1

4 Bestimmung der Faserlängenverteilung

Die Bestimmung der Glasfaser-Längenverteilung im Extrudat ist zentraler Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Am Institut für Kunststofftechnik Darmstadt steht ein FASEP-System[1] zur Verfügung, mit dem die Messungen durchgeführt wurden. Ein Großteil der Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit basiert auf den Ergebnissen dieser Messungen, weshalb auf die Erzeugung dieser Messwerte detailliert eingegangen werden soll.

4.1 Beschreibung des FASEP-Systems

Das FASEP-System ist eine Gesamtlösung zur Bestimmung von Faserlängenverteilungen. Es können verschiedenste Fasermaterialien mit dem System betrachtet werden, hierfür muss jedoch eine passende Methode für das bildgebende Verfahren und dazu passende Einstellungen in der Auswertungssoftware gewählt werden. Da in den durchgeführten Versuchsreihen ausschließlich Glasfasern verwendet wurden, soll auf die Vorgehensweise für andere Fasermaterialien nicht näher eingegangen werden.

Um eine computergestützte Auswertung zu ermöglichen, wird zunächst eine digitale Mikroskopieaufnahme angefertigt. Dies geschieht bei glasfaserhaltigen Proben mit Hilfe eines hochauflösenden Flachbettscanners, der mit einem Dunkelfeld-Belichtungssystem ausgestattet ist. Von Dunkelfeld-Mikroskopie wird gesprochen, wenn der Betrachtungspunkt nicht orthogonal zum Lichtpfad angeordnet ist, sondern in einem flachen Winkel zu diesem. In dieser Anordnung wird nur jener Anteil des eingestrahlten Lichtes erfasst, der vom Gegenstand gebrochen bzw. gestreut und in Richtung des Betrachtungspunkts abgestrahlt wird; Die Methode eignet sich insbesondere für transparente Materialien. Werden Objekte wie Glasfasern im Dunkelfeld betrachtet, erscheinen diese als hell strahlendes Abbild vor dunklem Hintergrund, wodurch sie im Vergleich zu einer Auflicht- oder Durchlicht-Betrachtung deutlich besser erkennbar sind. Dadurch sind auch kleine Glaspartikel von wenigen Mikrometer noch abbildbar, da diese an ihren Bruchkanten eine starke Lichtstreuung bewirken.

Den Kern des FASEP-Systems bildet eine Bildanalyse-Software, die ausgehend von einer digitalen Aufnahme automatisiert die Länge der darauf abgebildeten Objekte bestimmen kann. Diese Messergebnisse werden von der Software gesammelt und nach Abschluss der Analyse als MS Excel-Datei ausgegeben, um sie der statistischen Auswertung zugänglich zu machen.

[1] Allgemeine Informationen dazu unter www.fasep.de

4.2 Begriffe

Im Zusammenhang mit der Bestimmung der Faserlängenverteilung werden diverse Begriffe verwendet, die zunächst erläutert werden sollen. Dabei soll lediglich auf jene eingegangen werden, die für die Interpretation der in dieser Arbeit verwendeten Ergebnisse relevant sind.

4.2.1 Proben, Samples, Objekte und Cluster

Das Wort *Probe* und das englische Wort *Sample* haben zwar an sich dieselbe Bedeutung, werden in der vorliegenden Arbeit jedoch zur Bezeichnung zweier unterschiedlicher Prozessstufen herangezogen. Der Begriff *Probe* bezeichnet hier eine Teilmenge des zu untersuchenden Extrudats aus einem Versuch, die zu diesem Zweck wie in Kapitel 4.4.1 und 13.2 beschrieben aufbereitet wird. Von der in einer Probe vorliegenden Fasermenge werden einzelne *Samples* untersucht, bis eine ausreichend große Anzahl an Einzelfasern, den sog. *Objekten*, erfasst wurden, um die Faserlängenverteilung in der Probe beurteilen zu können. Im Zusammenhang mit dem verwendeten System bezeichnet der Begriff *Sample* hier sowohl eine Petrischale, in der die Faserteilmenge vorliegt als auch das zugehörige digitale Abbild und die jeweilige Berichtsdatei. Ein Sample umfasst eine Teilmenge von bis zu mehreren tausend Fasern aus einer Probe. Die Faseranzahl in einem Sample muss passend zu der in der Probe vorliegenden Faserlängenverteilung gewählt werden, da diese durch die Bildung von *Clustern* limitiert wird. Der Begriff *Cluster* bezeichnet eine Anhäufung von zwei oder mehreren kreuzliegenden oder sich untereinander berührenden Fasern. Je länger die in einem Sample enthaltenen Fasern sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese sich auf der zur Verfügung stehenden Fläche der Petrischale berühren bzw. überlagern. Cluster werden im elektronischen Auswertungsvorgang zunächst als ein zusammenhängendes Objekt erkannt, das in einem Zwischenschritt von einem Algorithmus in die enthaltenen Einzelfasern aufgeteilt wird. Je größer und komplexer ein Cluster ist, desto höher ist das Risiko eines Fehlers bei der Auswertung. Um diesen Effekt auf ein vertretbares Maß zu reduzieren, muss die Fasermenge pro Sample entsprechend angepasst werden.

4.2.2 Anzahlgemittelte und gewichtsgemittelte Faserlänge

Die anzahlgemittelte Faserlänge entspricht dem arithmetischen Mittelwert L_n der Gesamtmenge der Einzelergebnisse. Dieser berechnet sich aus der Gesamtanzahl n der ausgezählten Fasern und deren jeweiligen Objektlänge L_i.

$$L_n = \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i}{n}$$

Formel 2: Formel zur Berechnung der arithmetisch gemittelten Faserlänge [52]

Die gewichtsgemittelte Faserlänge L_p hingegen ordnet einer Faser proportional zu ihrer Eigenlänge eine höhere Gewichtung bei der Berechnung des Mittelwerts zu.

$$L_p = \frac{\sum_{i=1}^{n} n_i \cdot L_i^2}{\sum_{i=1}^{n} n_i \cdot L_i}$$

Formel 3: Formel zur Berechnung der gewichtsgemittelten Faserlänge [52]

Dieser Algorithmus führt zu einer gezielten Verzerrung der Auswertung, wodurch eine zunehmende Hervorhebung längerer Fasern erreicht wird. Was zunächst wie eine Verfälschung scheint, erzeugt besser nachvollziehbare Ergebnisse. Mit dieser Vorgehensweise wird dem Effekt Rechnung getragen, dass mit zunehmender Zerkleinerung einer einzelnen Faser eine große Anzahl an Bruchstücken entsteht, die Fasermasse jedoch unverändert bleibt. Dadurch werden längere Fasern, die im Vergleich zu einer gleichgroßen Fasermasse in Form kleiner Bruchstücke bei der statistischen Auswertung in den Hintergrund gedrängt; Die gewichtete Auswertungsmethode wirkt diesem Effekt entgegen. Diese Betrachtungsweise ist sinnvoll, beispielsweise werden mechanischen Eigenschaften weniger durch das Vorhandensein einer großen Anzahl von Bruchstücken beeinflusst, jedoch eher durch die Wirkung weniger langer Fasern. Aus diesem Grund stützen sich die Betrachtungen in dieser Arbeit auf die gewichtgemittelte Faserlänge.

4.2.3 Faserlängenklassen und Histogramme

In Anlehnung an die ISO 22314 wird zur Darstellung der Faserlängenverteilung die Gesamtmenge der erfassten Objekte in Längenklassen eingeteilt. Diese werden zur Visualisierung als prozentueller Wert der Gesamtmenge in einem Histogramm aufgetragen. In einem Standard-Berichtsdatenblatt wird jeweils ein Histogramm für die anzahlgemittelte und eines für die gewichtsgemittelte Häufigkeitsverteilung ausgegeben.

Bei der Ergebnisdarstellung wurde im Zuge dieser Arbeit stets mit 80 Faserlängenklassen gleicher Breite gearbeitet. Diese bilden den Bereich von 0 bis 12mm bei Versuchen mit 10mm Faserausgangslänge und 0 bis 27mm bei Versuchen mit 25mm Faserausgangslänge ab. So ergibt sich eine Klassenbreite von 150µm bei 10mm und von 337,5µm bei 25mm Faserausgangslänge.

Die Verwendung von Klassen oberhalb der nominellen Faserausgangslänge hat sich als notwendig erwiesen, da die Schnittlänge des Granulats Schwankungen aufweist. Unerwartet lange Fasern würden sonst von der statistischen Auswertung ausgeschlossen werden, was insbesondere bei der gewichteten Betrachtung zu Fehlern führt, da bei dieser sehr lange Fasern besonders stark gewertet werden.

4.2.4 Uni- und multimodale Verteilungen

Wird eine Häufigkeitsverteilung in Form eines Histogramms dargestellt, ergibt sich durch das vermehrte Vorkommen von Messwerten in einem Bereich ein Gipfel im Diagramm. Dessen höchster Punkt wird als *Modus* bezeichnet, dieser repräsentiert den am häufigsten vorkommenden Wert der Verteilung.

Sofern sich in einer Verteilung nur ein Gipfel abzeichnet, wird von einer unimodalen Verteilung gesprochen. Sind aufgrund der Anhäufung von Messwerten in unterschiedlichen Bereichen zwei, drei oder mehr Gipfel erkennbar, wird die Verteilung als *bi-* oder *trimodal* oder allgemein als *multimodale* Verteilung bezeichnet.

Bei der Betrachtung der Faserlängenverteilung von langfaserverstärkten Kunststoffen zeigen sich häufig trimodale Verteilung, die sich durch die Überlagerung von drei Unterverteilungen unterschiedlicher Ausprägung ergeben. Es zeigt sich typischerweise einen Anteil langer, nur wenig oder gänzlich unbeschädigter Fasern (schwarz in Abbildung 27), eine breite Verteilung von mäßig geschädigten Fasern über einen weiten Bereich des Längenspektrums (rot in Abbildung 27) und eine weitere Anhäufung im Kurzfaserbereich (blau in Abbildung 27).

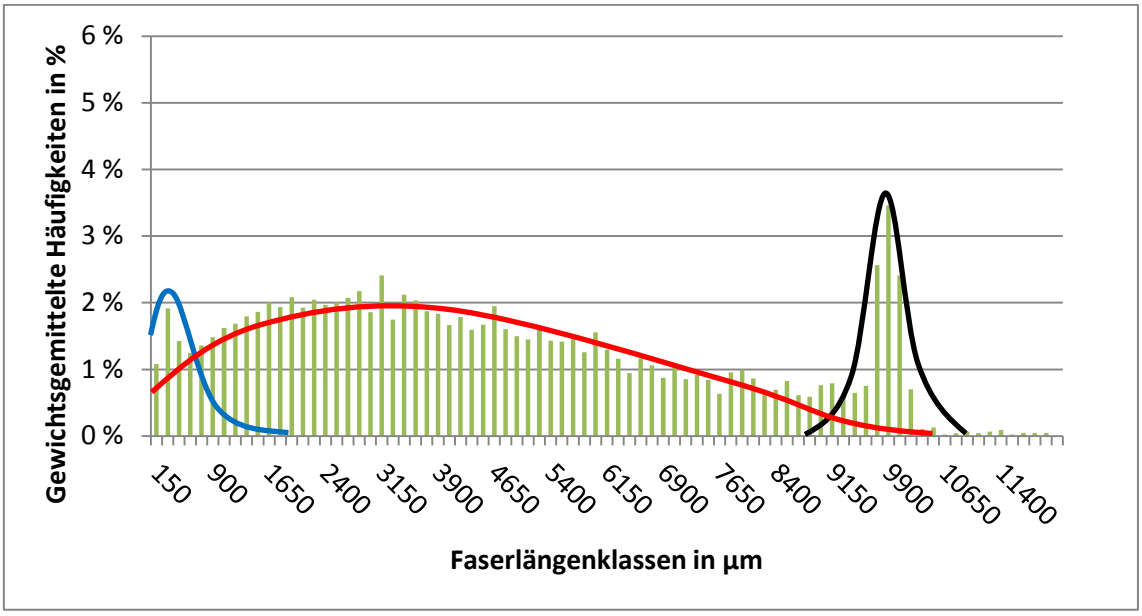

Abbildung 27: Trimodale Faserlängenerteilung einer Probe

4.2.5 Quantile

Als *Quantile* werden Schwellenwerte innerhalb einer Häufigkeitsverteilung bezeichnet. Zur Bestimmung eines Quantils werden zunächst alle Werte einer Datenmenge der Größe nach aufsteigend sortiert, wobei mehrfach auftretende Werte weiterhin einzeln geführt werden. An der Lage eines Quantils wird die Wertemenge zweigeteilt. Ein Anteil aller Werte ist dem entsprechend kleiner als der Schwellenwert, der Rest größer. Das 0,1-, 0,5- und 0,9 Quantil geben beispielsweise an, welcher Wert in dieser Reihenfolge nach 10%, 50% und 90% der Gesamtanzahl der Einzelwerte erreicht ist. Das 0,5-Quantil wird auch als *Median* bezeichnet.

Liegt der Median einer Faserlängenverteilung beispielsweise bei einem Längenwert von 4mm, ist dies gleichbedeutend mit der Aussage: „50% der enthaltenen Fasern sind länger als 4mm.“

Die Angabe eines oder mehrere solcher Schwellenwerte bietet die Möglichkeit, einen Überblick über die Verteilung einer Wertemenge zu geben. Anders als der Mittelwert einer Datenmenge sind Quantile robust gegenüber Ausreißern, da sie nicht von der Größe der Einzelwerten innerhalb der Datenmenge abhängig sind. Damit bieten sie bei der Bestimmung der Faserlängenverteilung einen guten Anhaltspunkt für den Vergleich von Datenmengen untereinander. Bei der Betrachtung einer Datenmenge anhand mehrerer Quantile lassen sich, im Gegensatz zur Betrachtung anhand des Mittelwerts, Rückschlüsse auf multimodale Faserlängenverteilungen ziehen.

4.3 Anlehnung der Prüfmethodik an die ISO 22314:2006

Es existiert zum Zeitpunkt der Versuchsauswertung keine Norm, die sich explizit auf die Bestimmung der Faserlängenverteilung in langglasfaserverstärkten Polymeren bezieht. Die Norm ISO 22314 beschreibt zwar die Untersuchung glasfaserverstärkter Kunststoffe, allerdings wird sie für die Betrachtung von Materialien mit Faserlängen von bis zu einem Millimeter empfohlen. Dennoch findet die Prüfung der LFT-Proben im Zuge dieses Projekts in Anlehnung an diese Norm statt, da einige der beschriebenen Methoden auch für längere Fasern angewendet werden können. Dazu gehört insbesondere die Ermittlung der anzahlgemittelten und der gewichtsgemittelten Faserlänge und Teile der Ergebnisdarstellung.

Hinsichtlich Probenpräparation und Messverfahren weicht die Vorgehensweise von der Norm ab. Die Norm sieht zwar ebenfalls vor, dass eine Materialprobe verascht und der Rückstand zur Separation der Fasern aufgeschwemmt wird. Dann soll jedoch ein Objektträger in eine Kristallisierschale gelegt und mit der Faser-Suspension überschichtet werden. Vor Mess- und Auszählvorgang wird die Flüssigkeit bei 130°C bis zur Trockene eingedampft, daraufhin der Objektträger aus der Kristallisierschale entnommen und nur die darauf liegen gebliebenen Fasern unter einem Mikroskop manuell vermessen. Für die Bestimmung der Faserlängenverteilung in einer Probe wird eine Auswertung von drei Samples mit einer Faseranzahl von je 100 ±20 Fasern als ausreichend angegeben.

Zur Ergebnisdarstellung der Auswertung nach Norm werden die anzahlgemittelte und die gewichtsgemittelte Faserlänge, der Maximal- und Minimalwert und die Standardabweichung der Verteilung angegeben. Zusätzlich soll die Verteilung anhand eines Histogramms dargestellt werden.

Die Vorgehensweise nach Vorgabe der Norm stößt bei der Betrachtung von Langfaserproben an ihre Grenzen. Die Beurteilung einer Probe anhand von insgesamt 300 ±60 Fasern bei einem Faserlängenspektrum zwischen 0 und 12mm oder mehr ist nicht ausreichend. Es wurde festgestellt, dass ein Vielfaches dieser Anzahl betrachtet werden muss, um die Faserlängenverteilung realitätsnah darzustellen. Diese niedrige Faseranzahl ergibt zu wenige Stützpunkte für die Darstellung der zu erwartenden trimodalen Verteilung, wohingegen bei Kurzglasfasern, wie in der Norm angenommen, von einer unimodalen Verteilung ausgegangen werden kann. Somit ist auch die Beurteilung von Langglasfaserproben anhand von Mittelwert und Standardabweichung nur begrenzt sinnvoll, da mit diesen Werten nur ein Modus einer Verteilung beschrieben werden kann. Die Lage und Größe weiterer Modi in der Verteilung kann dabei nicht wiedergegeben werden.

Wie bereits beschrieben nimmt mit steigendem Anteil an langen Fasern auch die Wahrscheinlichkeit zu, dass sich komplexe Cluster in den Samples bilden. Diese können zwar bis zu einem gewissen Grad seitens der verwendeten Messsoftware ausgewertet werden, mit steigender Komplexität erhöht sich jedoch das Fehlerpotential. Dem entsprechend muss die Fasersuspension stärker verdünnt werden, wodurch wiederum die benötigte Anzahl an Samples steigt, um eine repräsentative Datenmenge zu generieren. Drei Samples sind hier bei Weitem nicht ausreichend, oft ist für die Beurteilung einer Probe die Auswertung von zehn bis zwanzig Samples notwendig. Dies summiert sich für die vorliegende Arbeit zu einem Umfang von mehreren tausend Samples auf.

Die in der Norm empfohlene Methodik ist für einen solchen Umfang unter anderem durch den Schritt des Eindampfens der Probe zu zeitaufwändig. Darüber hinaus ist auch die Fläche von 76 x 26 mm eines Mikroskopie-Objektträgers nach DIN ISO 8037-1 für diese Anwendung zu klein, da mit zunehmender Faserlänge auf dieser Fläche deutlich weniger als die empfohlenen 100 Fasern

unterzubringen sind. Vor dem Hintergrund der untersuchten Probenanzahl musste eine schnellere Methode mit größerem Umfang verwendet werden, um einen vertretbaren Zeitaufwand zu realisieren. Gleiches gilt für das manuelle Mess- und Auszählverfahren, das vor diesem Hintergrund nicht vertretbar ist. Die Modifikation und Erweiterung des Messsystems hinsichtlich dieser Problematik sind in Kapitel 4.5 beschrieben.

Wie bereits zuvor angesprochen, muss eine geeignete Anzahl an Fasern ausgezählt werden, um die Faserlängenverteilung in einer Probe realitätsnah abbilden zu können. Je breiter das Faserlängenspektrum ist, desto mehr Fasern werden benötigt, um für alle Bereiche eine ausreichende Abdeckung zu gewährleisten. In den folgenden Diagrammen ist exemplarisch anhand von realen Versuchsergebnissen mit einer Faserausgangslänge von 10mm dargestellt, wie sich das Ergebnis einer Analyse mit steigender Faseranzahl verändern kann.

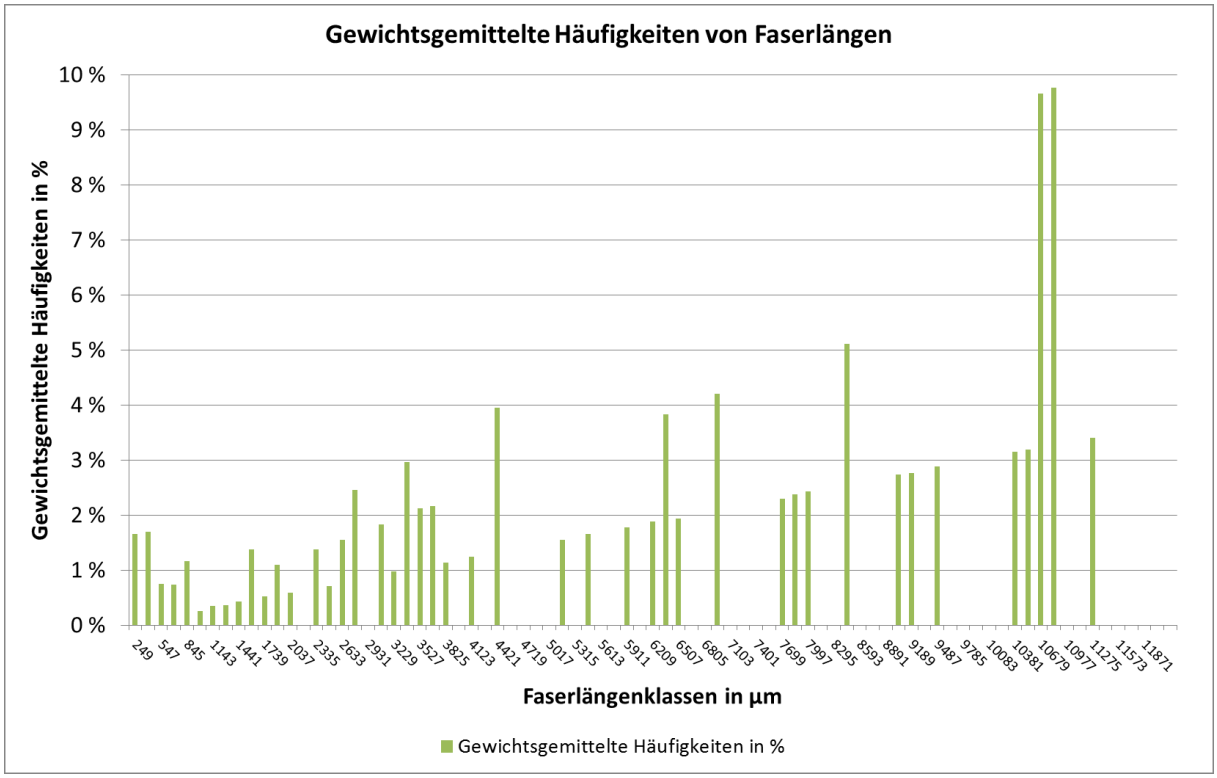

Abbildung 28: 1 Sample, 128 Objekte, gewichtsgemittelte Faserlänge: 6,765mm

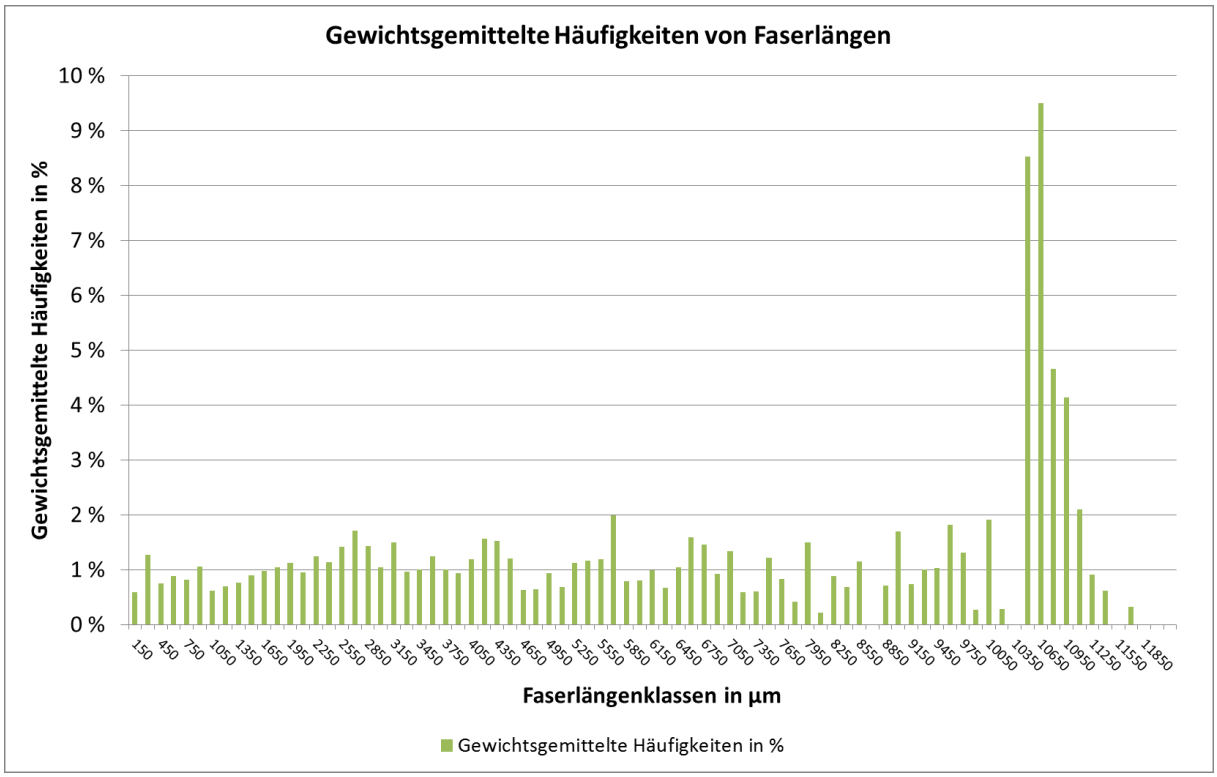

Abbildung 29: 7 Samples, 1337 Objekte, gewichtsgemittelte Faserlänge: 6,772mm

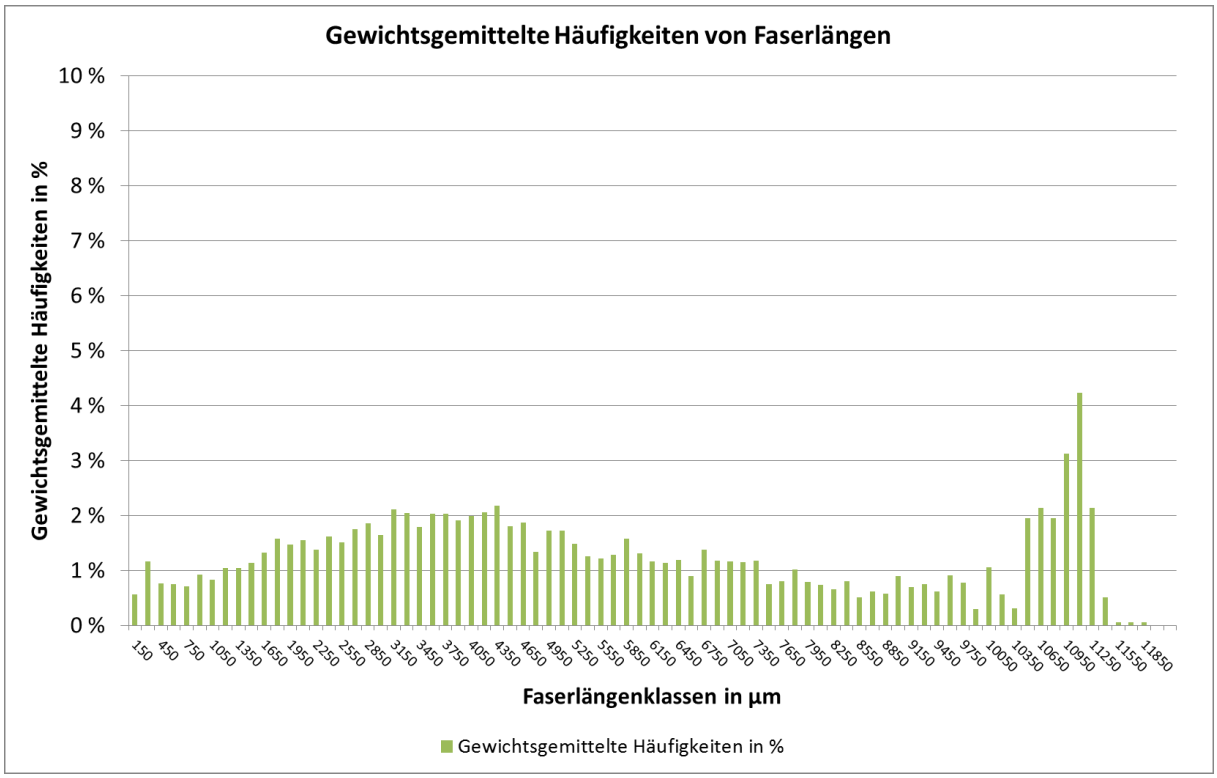

Abbildung 30: 34 Samples, 7758 Objekte, gewichtsgemittelte Faserlänge: 5,639mm

Mit steigender Objektanzahl hat sich in diesem Fall eine Verringerung der gewichtsgemittelten Faserlänge ergeben, in den ersten Samples befand sich zufallsbedingt ein höherer Anteil an langen Fasern. Zu beachten ist hier, dass die gewichtsgemittelte Faserlänge zu Abbildung 28 und Abbildung 29 noch nahezu identisch ist. Ein geringerer Probenumfang hätte in diesem Fall also zu einer deutlichen Überbewertung der Faserlänge in der Probe geführt. Dies kann auch umgekehrt der Fall sein, in welche Richtung sich eine Längenverteilung mit zunehmendem Umfang entwickelt, ist nicht vorhersehbar.

Anhand des ersten Diagramms ist auch die später abgebildete Faserlängenverteilung noch nicht erkennbar. Dadurch, dass die einzelnen Faserlängenklassen im Histogramm nur mit einzelnen Objekten oder gar nicht besetzt sind, lassen sich noch keine klaren Trends erkennen. In Abbildung 29 hingegen ist die finale Form der Verteilung bereits zu erahnen, allerdings lässt dieser Zustand einen deutlich größeren Bestandteil an Fasern im Längenbereich zwischen 10 und 11mm vermuten. Erst in Abbildung 30 ist eine klare, trimodale Verteilung zu erkennen. Der Faseranteil zwischen 10 und 11mm hat dabei im Gesamtverhältnis abgenommen bzw. der zugehörige Modus hat sich verbreitert. Wie aus der Bildbezeichnung ersichtlich, erfordert eine solche Abbildung der Faserlängenverteilung einer Probe die Auszählung von mehreren tausend Fasern. Um die entsprechende Anzahl an Proben aus einer Vielzahl von Versuchsreihen in diesem Umfang betrachten zu können, muss ein möglichst schnelles Analyseverfahren zur Verfügung stehen. Um diesen Aspekt zu verbessern, wurden Ergänzungen am bestehenden System umgesetzt, die in Kapitel 4.5 beschrieben werden. [53]

4.4 Prüfmethodik

4.4.1 Prüfablauf

Der Prüfablauf gliedert sich in drei Hauptabschnitte, über die hier eine kurze Übersicht gegeben werden soll. Die Probenpräparation, Bilderzeugung und rechnergestützte Bildanalyse setzen sich jeweils aus einer Vielzahl von Einzelschritten zusammen, auf die näher im Anhang in Kapitel 13.2 eingegangen wird.

Während der Versuchsdurchführung am Extruder wird ein Schmelzestrang mit einer Gesamtlänge von etwa 1,5 bis 2m abgezogen und nach dem Erkalten in ca. 10cm lange Stücke zerteilt. Zu Beginn der Analyse werden Stücke von 2-3cm Länge aus diesen Strangabschnitten herausgetrennt, diese stellen die in Kapitel 4.2.1 erwähnten *Proben* dar. Im Folgeschritt erfolgt die Separation von Fasern und Matrix durch Veraschung. In Vorbereitung auf die Bilderzeugung wird der Veraschungsrückstand in einem ausreichend großen Flüssigkeitsvolumen aufgeschwemmt, um die Fasern zu vereinzeln. Die Fasersuspension wird in mehrere Petrischalen aufgeteilt, diese stellen die in Kapitel 4.2.1 beschriebenen *Samples* dar. Jede Schale wird daraufhin nacheinander einzeln in die Aufnahme des Scanners eingesetzt und ein digitales Abbild in 256 Graustufen erzeugt.

An jedem zu analysierenden Bild wird ein *Area of Interest* (AOI) festgelegt, um Bildrandbereiche, Verschmutzungen oder optische Artefakte von der Auswertung auszuschließen. Im Anschluss erfolgt die Ermittlung eines passenden Schwellenwertes innerhalb der Graustufen des Bilds, durch den bei der nachfolgenden Binarisierung des Bilds die Einteilung in *Hell* und *Dunkel* definiert wird.

Das binarisierte Bild durchläuft dann das eigentliche Auswertungsprogramm, wodurch die Faserlängenverteilung des jeweiligen Samples ermittelt und dokumentiert wird.

4.4.2 Probenentnahme- und Auswertungsschema bei Extrusionsversuchen

Zu Beginn der Verarbeitungsversuche wurde von einer annähernd homogenen Faserlängenverteilung entlang des Extrudatstrangs innerhalb eines Betriebspunktes ausgegangen. Um den Aufwand für die Analytik überschaubar zu halten, wurde von jedem Betriebspunkt der ersten Versuchsreihe lediglich eine Probe entnommen und aus dieser jeweils etwa viertausend Einzelfasern ausgewertet.

Während der Ergebnisbetrachtung dieser Versuchsreihe kamen Zweifel an der Homogenität des Extrudats auf, da sich unplausible, teils widersprüchliche Ergebnisse zeigten. Zur Überprüfung wurden daraufhin von mehreren beliebig gewählten Betriebspunkten zehn weitere Einzelproben untersucht, um die Homogenität zu überprüfen. Dabei stellte sich heraus, dass es insbesondere bei weniger prozessstabilen Betriebspunkten zu intensiven Schwankungen der Faserlängenverteilung innerhalb eines Betriebspunkts kommen kann, die folgende Grafik stellt dies exemplarisch an den Ergebnissen einer der Vergleichsuntersuchungen dar.

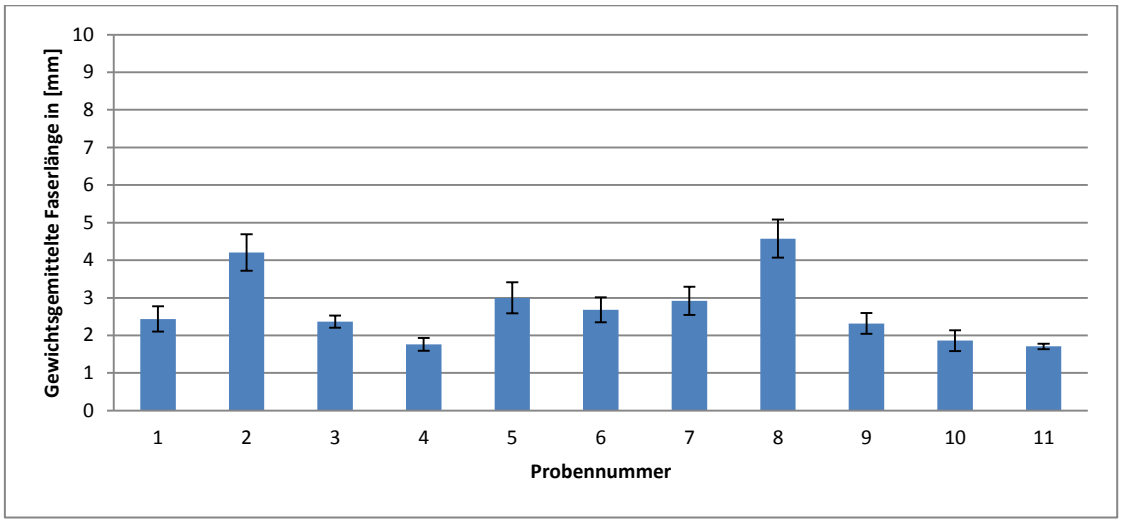

Abbildung 31: Übermäßige Streuung der gewichtsgemittelten Faserlänge mehrerer Proben eines Betriebspunktes

Die Grafik zeigt, dass die Charakterisierung eines Betriebspunkts anhand einer Probe nicht ausreichend ist. Darüber hinaus ist es notwendig, dass derartige Schwankungen anhand von Messergebnissen identifizierbar sind, da ausgeprägte Inhomogenität auf einen instationären Extrusionsprozess aufgrund ungeeigneter Einstellungen hinweist.

Folgendes Probenentnahme- und Auswertungsschema wurde daraufhin aufgestellt, alle durchgeführten Versuche wurden nach diesem ausgewertet:

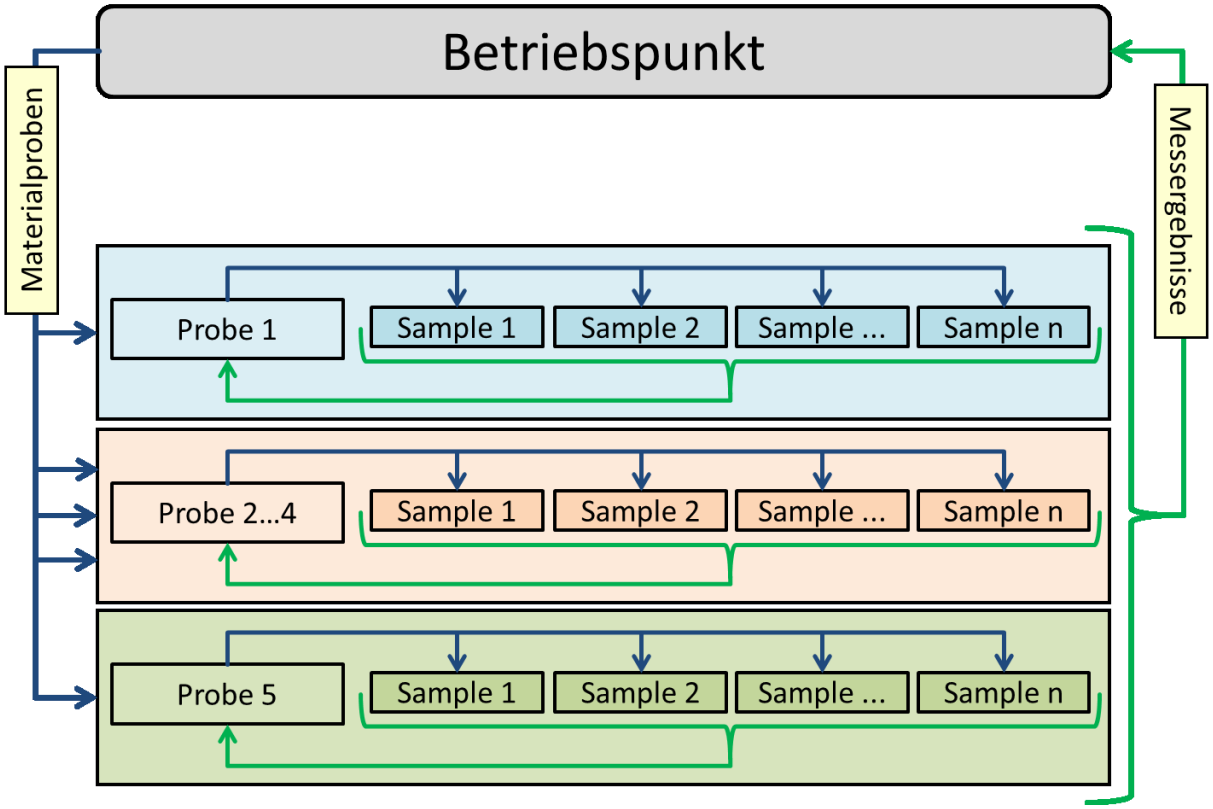

Abbildung 32: Schema zur Charakterisierung eines Betriebspunktes

Zur Charakterisierung eines Betriebspunkts werden dem zugehörigen Extrudatstrang fünf Proben an jeweils zufällig gewählten Positionen entnommen. Diese Proben werden aufbereitet und jeweils so viele Samples ausgewertet, bis aus jeder Probe drei- bis viertausend Objekte erfasst wurden.

Dabei entsteht für jedes Sample ein Berichtsdatenblatt. Die jeweilige gewichtsgemittelte Faserlänge in Millimeter wird, wie in Tabelle 2 dargestellt, entlang der Zeilen unterhalb der waagerecht fortlaufenden Sample-Nummerierung angeordnet. Durch den Vergleich der Ergebnisse anhand der Standardabweichung in Spalte B wird überprüft, ob die Samples ausreichend ähnlich sind. Auf diesem Wege können Fehler im Prüfablauf identifiziert und eingegrenzt werden.

Die Gesamtmenge an Objekten aller Samples einer Probe wird in jeweils einer übergreifenden Berichtsdatei zusammengefasst, wodurch die Charakterisierung der Probe ermöglicht wird. Die gewichtsgemittelten Faserlängen der fünf Proben sind in Tabelle 2 in Spalte A in Millimeter aufgetragen. Dieser Vorgang wird für alle Proben separat durchgeführt, sodass jede anhand der in Kapitel 4.2 beschriebenen Daten einzeln beurteilt werden kann. Durch den Vergleich der fünf Proben lässt sich darüber die Homogenität des Extrudatstrangs beurteilen.

Probe	A	B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4,50	0,363	4,67	3,72	4,94	4,98	4,43	4,60	4,62	4,62	4,36	4,28	4,13	
2	3,70	0,383	3,52	3,41	3,67	4,21	4,19	3,89	3,60	3,76	4,30	3,26	3,22	3,28
3	4,84	0,252	4,85	4,48	4,84	4,70	5,11	5,32	4,96	4,74	4,77	4,49	5,03	
4	3,65	0,289	3,39	3,97	3,46	3,81	3,23	4,10	3,39	3,80	3,27	3,76	3,87	3,55
5	4,34	0,295	3,88	4,29	4,32	4,32	3,79	4,66	4,60	4,26	4,61	4,48		
C	4,21													
D	0,463													

Tabelle 2: Exemplarische Ergebnistabelle zur Charakterisierung eines Betriebspunktes

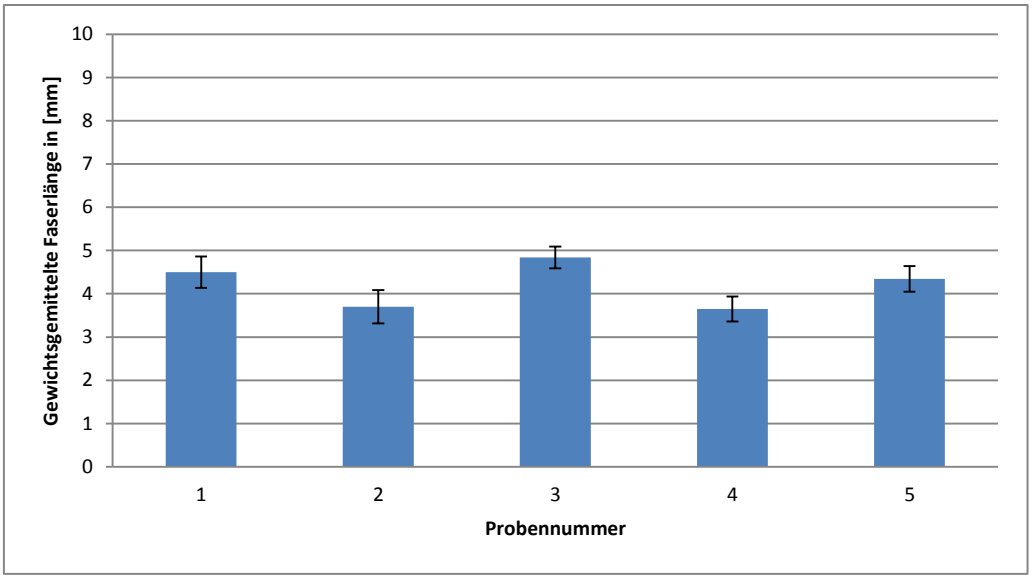

Abbildung 33: Grafische Darstellung der gewichtsgemittelten Faserlängenwerte in der einzelnen Proben (A) und ihrer Standardabweichung (B) aus Tabelle 2

Eine zusammenfassende Betrachtung der fünf Proben bildet die Basis zur Charakterisierung des Betriebspunkts. Durch die Bestimmung des arithmetischen Mittelwertes der fünf gewichtsgemittelten Faserlängenwerte ergibt sich der charakteristische Faserlängenwert des Betriebspunkts in Millimetern, der in Tabelle 2 unter **C** vermerkt ist. Der Wert **D** gibt die Standardabweichung der fünf Werte an, durch deren Bestimmung die Homogenität der Proben in Hinblick auf die eingangs beschriebene Problematik beurteilt werden kann. Die Zusammenführung aller Objekte in einer Berichtsdatei führt zu einer repräsentativen Darstellung der zum Betriebspunkt zugehörigen Faserlängenverteilung, die das folgende Diagramm zeigt.

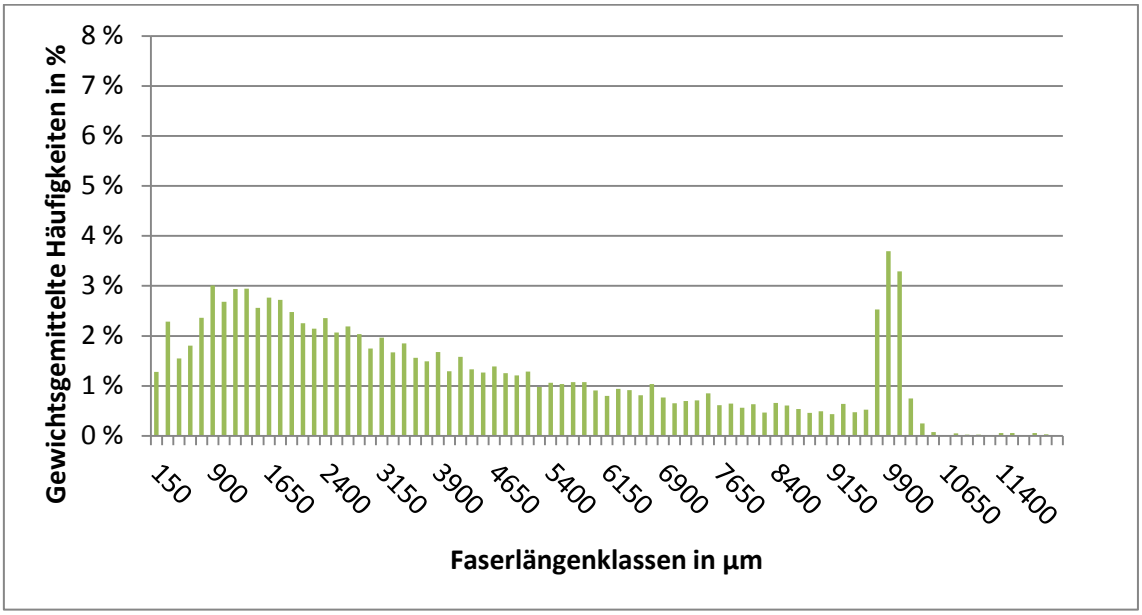

Abbildung 34: Abschließende Darstellung der Faserlängenverteilung des besprochenen Betriebspunktes mit einem Umfang von ca. 27500 Fasern

4.4.3 Probenentnahme- und Auswertungsschema bei Spritzgussversuchen

Da bei Spritzgussversuchen kein kontinuierlich austretender Strang vorliegt, wurde das zuvor beschriebene Schema angepasst.

Um die Faserlängenverteilung und deren Mittelwert in einer Platte zu beurteilen, werden jeweils drei Proben entnommen. Dies erfolgt, wie in Abbildung 35 zu erkennen, entlang der Mittellinie der Platte angussnah, mittig und angussfern. Jede dieser Proben wird, analog zu den Extrusionsproben, mit einem Umfang von ebenso drei- bis viertausend Fasern ausgewertet, der Mittelwert für die Platte wird durch Zusammenfassung der Einzelergebnisse analog zum Schema der Extrusionsversuche erreicht. Durch eine weitere übergeordnete Zusammenfassung der Ergebnisse mehrerer Platten wird das Ergebnis eines Betriebspunkts ermittelt.

Die Probenentnahme aus einer Platte kann beispielsweise durch Sägen oder Stanzen erfolgen, das herausgetrennte Stück wird analog zu den Extrudat-Proben verascht und für den weiteren Prüfablauf aufbereitet. In Einzelfällen wurden auch wie hier dargestellt komplette Spritzgussplatten verascht, um das Faserskelett als Ganzes betrachten zu können.

Abbildung 35: Zwei vollständig veraschte Spritzgussplatten mit beschriebenen Probenentnahmepositionen

4.5 Erweiterung des Prüfsystems

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben muss eine große Anzahl von Samples ausgewertet werden, um belastbare Ergebnisse zu erzeugen. Für diese Aufgabe haben sich auch die bereits weitgehend automatisierten und dadurch schnellen Abläufe des vorhandenen FASEP-Systems als zu zeitaufwändig erwiesen. Die Ursache dieses Problems besteht darin, dass mit zunehmender Faserlänge in einer Probe umso weniger Objekte pro Sample abgebildet werden können, da sonst aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Fasern komplexe Cluster entstehen. So können in einer Petrischale mit einem Durchmesser von ca. 95mm Durchmesser bei einer Kurzfaserprobe bis zu zehntausend Objekte in einem Sample erfasst werden, was bereits mehr als ausreichend ist, um die zugehörige Probe zu charakterisieren. Bei einer gewichtsgemittelten Faserlänge von mehreren Millimeter kann dahingegen meist nur eine Anzahl von wenigen hundert Objekten pro Sample abgebildet werden, weshalb eine entsprechend höhere Anzahl von Samples zur Charakterisierung der Probe herangezogen werden muss.

Aus diesem Zusammenhang ergibt sich der bereits angesprochene zu hohe Zeitbedarf der Analytik, den es auf ein zu bewältigendes Maß zu reduzieren galt. Dies wurde durch eine weitere Erhöhung des Automatisierungsgrads der Bildauswertung und deren Vorbereitung durch eine übergeordnete Stapelverarbeitungs-Software erreicht. Dadurch wird das System in die Lage versetzt, eine vorgegebene Anzahl von Sample-Aufnahmen, das sog. *Batch*[2], ohne Eingriff durch den Operator nacheinander auszuwerten und die zugehörigen Berichtsdatenblätter zu erstellen. Diese Software-Erweiterung wird im Folgenden als *Batch-Prozess* bezeichnet.

4.5.1 Funktionsweise des Batch-Prozesses

Mit dem Batch-Prozess geht einher, dass die Arbeitsabläufe der Probenpräparation und der Bilderzeugung und die Bestimmung der Faserlängenverteilung über computergestützte Bildauswertung voneinander getrennt werden können.

Die Sampleaufnahmen werden dabei weiterhin wie in Kapitel 4.4.1 und 13.2 beschrieben erzeugt und nach interner Nomenklatur benannt. Die rechnergestützte Auswertung der Aufnahmen erfolgt zeitlich unabhängig davon, jedoch frühestens, nachdem alle Sample-Aufnahmen eines Betriebspunkts vorliegen, um zusammengehörige Ergebnisse in einem Durchlauf auszuwerten.

Zu Beginn der Auswertung wird eine beliebige Anzahl an Bildern als Aufgabenstapel zur Bearbeitung ausgewählt. Anhand des ersten Bilds im Stapel wird exemplarisch ein AOI festgelegt, das daraufhin für alle weiteren Bilder im Stapel angewendet wird. Aus diesem Grund sind einheitliche Belichtungsverhältnisse und eine exakt reproduzierbare Positionierung der Samples im Scanner besonders wichtig. Die Software bestimmt automatisch einen jeweils zum Bild passenden Hell-Dunkel-Schwellenwert, führt die Binarisierung durch und startet daraufhin die Auswertung. Nach Beendigung der Bildanalyse wird automatisch ein Berichtsdatenblatt als Excel-Datei mit dem Namen des zugehörigen Samples erzeugt und abgespeichert, sodass die Bild- und Excel-Dateien eines Samples später zweifelsfrei einander zuzuordnen sind.

Das nächste Bild des Stapels wird daraufhin geöffnet und der Vorgang startet solange von neuem, bis das letzte Bild des Stapels erreicht ist. Abschließend erzeugt das Programm ein zusätzliche

[2] *Batch*, engl.: Menge von etwas, das in einem Durchgang produziert wird; *Informatik:* Reihe von Daten, die mit einer Ausführung eines Programms verarbeitet werden

Berichtsdatei, in dem alle Werte des zuvor abgearbeiteten Stapels zusammengefasst werden. Dies ist beispielsweise hilfreich, wenn alle Bilder im Stapel zu derselben Probe gehören, da somit direkt eine Zusammenfassung der Daten wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben erfolgt.

Durch die Software-Erweiterung führt der Rechner die Bildanalyse und deren Vorbereitung nun weitestgehend automatisch durch, ohne währenddessen weitere Befehle oder Eingaben vom Operator zu benötigen. Dadurch kann der Vorgang zeitlich parallel zu anderen Tätigkeiten oder außerhalb der Arbeitszeit ablaufen, beispielsweise über Nacht, wodurch die angestrebte Beschleunigung des Prozesses erreicht wird. Zusätzlich verringert sich das Fehlerpotential durch die reduzierte Anzahl an Eingriffen in den Prozess durch den Operator, da aus den immer wiederkehrenden, monotonen Abläufen ein hohes Risiko für Routine- und Flüchtigkeitsfehler entsteht. [53]

4.5.2 Validierung

Um die Funktionsfähigkeit des Batch-Prozesses zu überprüfen, wurden alle bis zur Einführung der Softwareerweiterung ausgewerteten Samples noch einmal mittels des Batch-Prozesses bearbeitet und die Ergebnisse gegenüber gestellt. Diese Gegenüberstellung soll hier exemplarisch an den Ergebnissen der fünf Proben eines Betriebspunkts und den Sample-Ergebnissen einer Probe daraus dargestellt werden.

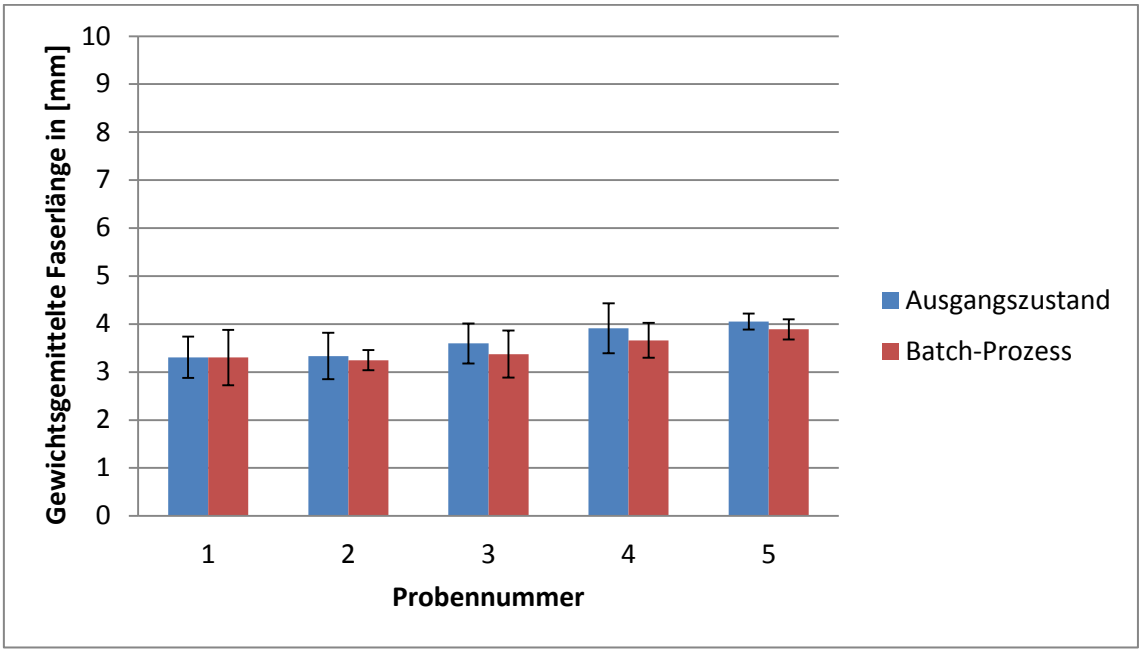

Abbildung 36: Vergleich der gewichtsgemittelten Faserlänge der Proben eines Betriebspunkts

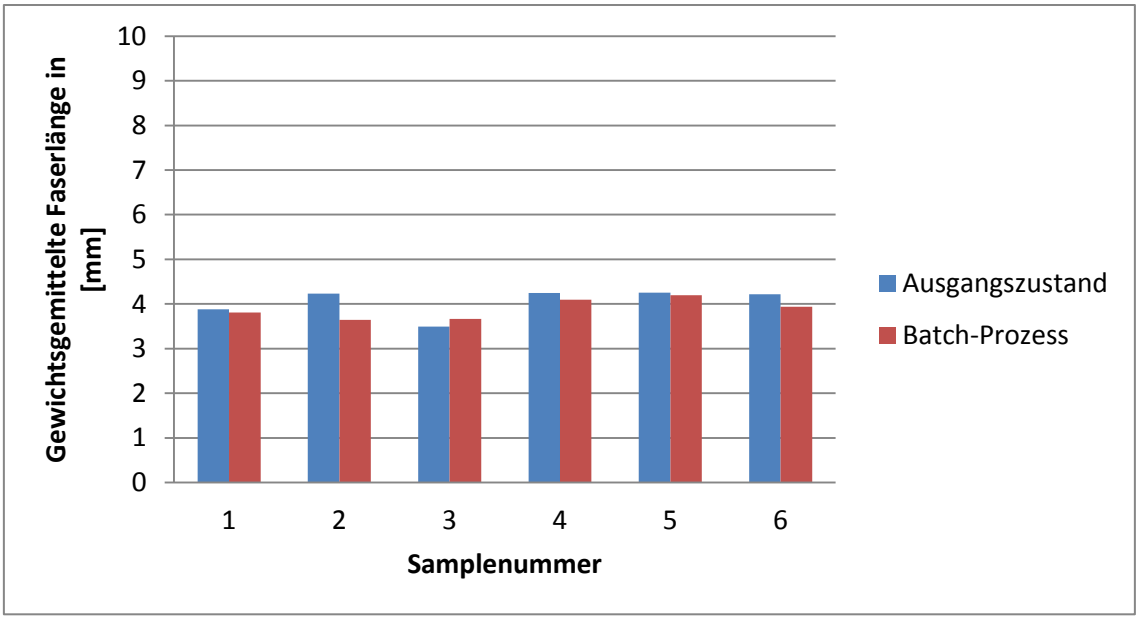

Abbildung 37: Vergleich der gewichtsgemittelten Faserlänge der einzelnen Samples zu Probennummer 5 aus Abbildung 36

Es zeigt sich, dass die mit Hilfe des Batch-Prozesses ermittelten Ergebnisse meist geringfügig niedriger sind als jene, die halbautomatisch ermittelt wurden. Die Ursache hierfür sind Fehlstellen in den Sampleaufnahmen, die zuvor durch den Operator durch das manuelle setzen des AOI eliminiert werden konnten. Die Fehlstellen werden nun einzig durch Filteralgorithmen von der Auszählung ausgeschlossen, diese können jedoch insbesondere sehr kleine Fehlerobjekte nicht von Faserschutt unterscheiden. Dies zeigt sich in den Ergebnissen als erhöhter Feinanteil in der Faserlängenverteilung und senkt dadurch den Mittelwert. Dieses Verhalten kann jedoch als systematischer Fehler angesehen und als solcher akzeptiert werden.

Die Vergleichsuntersuchung zeigte eine durchgängige Korrelation zwischen den halbautomatisch ermittelten Werten und den Batchprozess-Werten. Die Abweichung bewegt sich stets im kleinen, einstelligen Prozentbereich. Die Gegenüberstellung der Verfahren wurde daraufhin als positiv bewertet und der Batch-Prozess im Fortlauf der Untersuchungen für die Bestimmung der Faserlängenverteilung eingesetzt.

5 Verarbeitungsversuche

Die Durchführung der Versuche fand in den Räumlichkeiten des Instituts für Kunststofftechnik Darmstadt (IKD) statt. Dort steht ein Planetwalzenextruder TP-WE70 der ENTEX GmbH mit einer breiten Auswahl an Maschinenkomponenten und Peripheriegeräten zur Verfügung. Die Bezeichnung WE70 gibt an, dass die Zylinder-Innenverzahnung dieser Maschine einen Nenndurchmesser von 70mm aufweist. Die Planetwalzenmodule dieser Anlage haben eine Länge von je 400mm. Diese Anlagengröße wird als Laborextruder angesehen und ist, je nach Aufbau, für Massedurchsätze bis ca. 120kg/h geeignet.

5.1 Versuchsplanung

Um die Effekte verschiedener Extruderkonfigurationen vergleichen zu können, wurde mit jedem Aufbau zunächst derselbe Basisversuchsplan absolviert. Eine Erweiterung dieses Versuchsplans für weiterführende Betrachtungen wurde je nach Bedarf und Zielsetzung der jeweiligen Versuchsreihe vorgenommen.

Der Basisversuchsplan beinhaltet für die Parameter *Massedurchsatz* und *Drehzahl* jeweils einen hohen und einen niedrigen Wert, durch deren Kombination sich zunächst lediglich vier Betriebspunkte ergeben. Dies ist bereits ausreichend, um die grundsätzliche Prozessfähigkeit einer Extruderkonfiguration beurteilen zu können und eine Vergleichsgrundlage zu anderen Versuchen aufgrund der gemessenen Faserlängenverteilung im Extrudat zu schaffen.

Meist wurden Versuchspläne mit weiteren Durchsatz- und Drehzahlwerten ergänzt, sodass Ergebnisse für den Drehzahlbereich von 30min^{-1} bis 120min^{-1} und Durchsätze von 5kg/h bis 25kg/h gesammelt wurden.

					SOLL	IST
Betriebspunkt 1		Durchsatz IST	5,3 kg/h	Einzug	20 °C	22 °C
Massetemperatur	255 °C	Massetemp IST	258 °C	PWE-Zylinder	285 °C	285 °C
Massedurchsatz	5 kg/h	Werkzeugdruck	6 bar	Lanze	270 °C	252 °C
Drehzahl	30 1/min	Drehmoment	180 Nm	Werkzeug	270 °C	267 °C
Betriebspunkt 2		Durchsatz IST	4,9 kg/h	Einzug	20 °C	24 °C
Massetemperatur	255 °C	Massetemp IST	259 °C	PWE-Zylinder	285 °C	285 °C
Massedurchsatz	5 kg/h	Werkzeugdruck	6 bar	Lanze	270 °C	270 °C
Drehzahl	60 1/min	Drehmoment	157 Nm	Werkzeug	270 °C	267 °C
Betriebspunkt 3		Durchsatz IST	14,9 kg/h	Einzug	20 °C	24 °C
Massetemperatur	255 °C	Massetemp IST	256 °C	PWE-Zylinder	285 °C	285 °C
Massedurchsatz	15 kg/h	Werkzeugdruck	6,5 bar	Lanze	270 °C	270 °C
Drehzahl	30 1/min	Drehmoment	205 Nm	Werkzeug	270 °C	267 °C
Betriebspunkt 4		Durchsatz IST	14,5 kg/h	Einzug	20 °C	24 °C
Massetemperatur	255 °C	Massetemp IST	254 °C	PWE-Zylinder	285 °C	285 °C
Massedurchsatz	15 kg/h	Werkzeugdruck	5,5 bar	Lanze	270 °C	270 °C
Drehzahl	60 1/min	Drehmoment	165 Nm	Werkzeug	270 °C	267 °C

Tabelle 3: Exemplarischer Basisversuchsplan mit eingetragenen Soll- und Ist-Werten

5.2 Anlagenaufbau

In folgenden Abbildungen sind die Versuchsaufbauten der Extrusionsanlage schematisch dargestellt. Einige der verwendeten Komponenten werden im Verlauf dieses Kapitels näher erläutert. Zu besseren Übersichtlichkeit der Abbildungen wurden Buchstabenkürzel verwendet:

Extruderantrieb ***M***; Einzugsmodul ***E***; Trichter ***T***; Planetwalzenmodul ***P***; Werkzeugplatte ***W***; Schmelzespeicher ***S***; Schmelzeverteilerventil ***V***; Spritzgusswerkzeug ***SG***; Dosieraggregate ***D1*** und ***D2***; Öltemperieraggregate ***Ö1-Ö3***; Wassertemperieraggregat ***WA***.

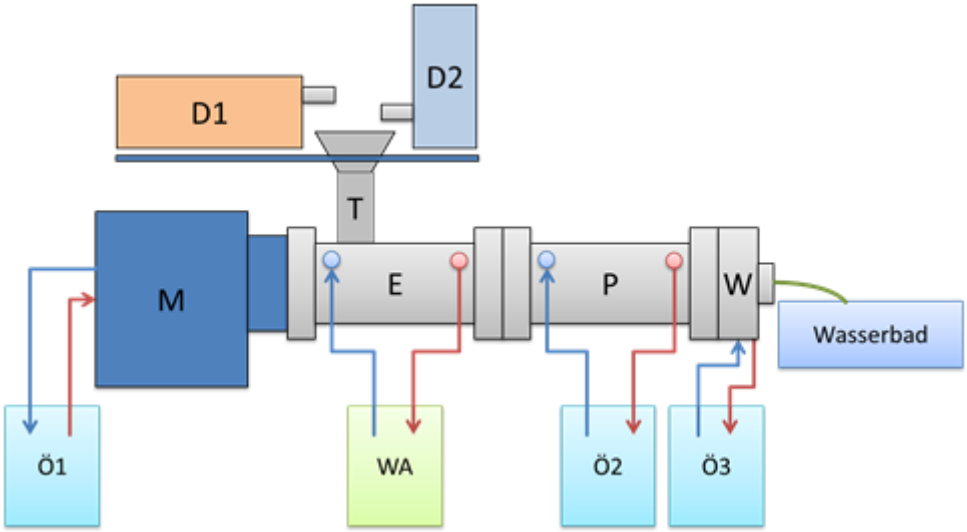

Abbildung 38: Anlagenschema für Extrusionsversuche

Das Einzugsmodul ist das erste Prozesselement des Extruders und weist einen glatten, temperierten Zylinder auf. In diesem Modul ist die Zentralspindel als tief geschnittene Einschnecke mit hoher Gangsteigung und einem konstantem Kern- und Außendurchmesser ausgeführt. Der Extruder wurde stets dosiert gefahren, die Materialzufuhr erfolgt frei rieselnd in den Trichter des Einzugsmoduls. Je nach verwendetem Material kamen entweder das Dosierwerk D1 oder D2 zum Einsatz, mehr dazu in Kapitel 5.2.1.

Im Anschluss an das Einzugsmodul folgt das Planetwalzenmodul, in das verschiedene Spindelkonfigurationen eingesetzt wurden. Für die hier beschriebene Anwendung wurde mit nur einem Standard-Modul gearbeitet, ein Aufbau mit mehreren Modulen wurde nicht erprobt, der Maschinentyp bietet jedoch diese Möglichkeit. Ebenfalls wurden Versuche mit einem aufklappbaren Planetwalzenmodul durchgeführt, dieses wurde anstelle des Standard-Moduls in die Anlage eingesetzt.

Den Abschluss des Systems bildet eine geschlossene Werkzeugplatte, die den Einsatz verschiedener Düsenwerkzeuge ermöglicht. Bei der Durchführung von Extrusionsversuchen wurde die Schmelze nach dem Austritt aus dem Werkzeug direkt in ein Wasserbad geleitet, eine Abzugvorrichtung oder Stranggranulierung wurde nicht eingesetzt.

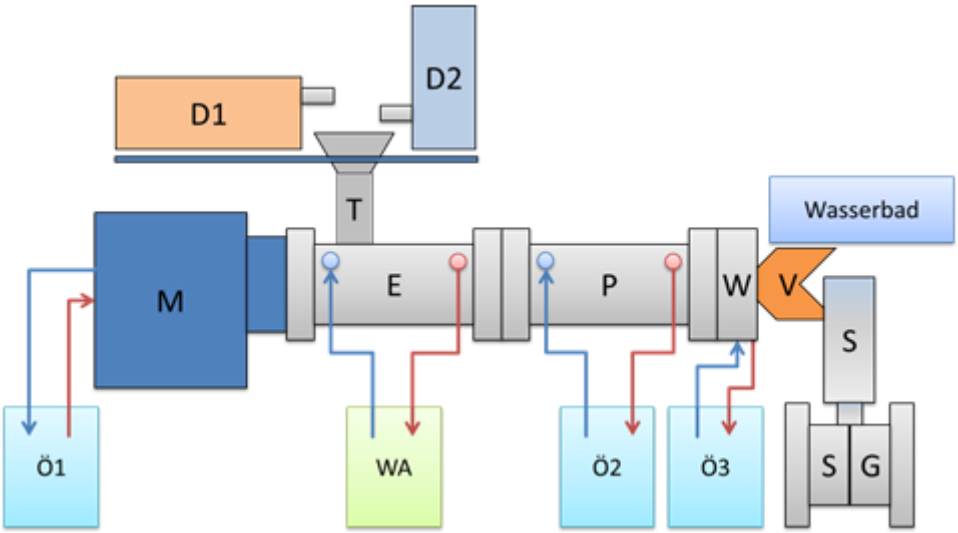

Abbildung 39: Anlagenschema für Spritzgussversuche

Für die Durchführung von Spritzgussversuchen wurde derselbe Aufbau verwendet wie für Extrusionsversuche, dieser jedoch mit dem Speichermodul ab der Werkzeugplatte ergänzt. In die Werkzeugplatte wurde zu diesem Zweck eine modifizierte Düse eingesetzt, die den Anschluss des Schmelzeverteilerventils als Verbindungselement zum Speichersystem ermöglicht. Das Ventil hat zwei identische Ausgänge und ermöglicht damit, den Schmelzestrom wahlweise in den Speicher oder direkt ins Freie abzuleiten. Dieser Aufbau ist für den Betrieb mit nur einem Speicher notwendig, da dem Speicher während des Spritzvorgangs keine Schmelze zugeführt werden kann. Um im Zeitraum des Spritzvorgangs ein Aufstauen des Materials im unterbrechungsfrei betriebenen Extruder zu verhindern, wird dieses, analog zu den Extrusionsversuchen, in ein Wasserbad abgeführt. Zusätzlich ermöglicht dieser Aufbau, die Schmelze vor und nach Durchlaufen des Speichers zu untersuchen.

Das Schmelzespeichersystem ist mit einem einfach aufgebauten Versuchswerkzeug in einer Kniehebel-Schließeinheit verbunden, wodurch die direkte Fertigung von Prüfplatten in einer Wärme möglich ist.

5.2.1 Dosierung

Für die Zuführung der Materialien wurden zwei verschiedene Dosierwerke eingesetzt. Für Granulate mit 10mm Länge wurde ein Gerät des Typs DDW-MD5-FW40/5 der Brabender Technologie GmbH verwendet (D2). Dieser Einschneckendosierer kann sowohl gravimetrisch als auch volumetrisch arbeiten. Das Gerät wurde für diese Aufgabe mit einer Spiralschnecke ausgestattet.

Für Granulate mit 25mm Länge wurde eine kontinuierliche Dosierwaage KDE-FS 100 E der KTG Engelhardt GmbH eingesetzt (D1). Dieses Dosierwerk arbeitet mit der Kombination einer Waagschale und zwei Vibrationslaufbändern, wodurch auch schlecht rieselfähige Granulate verarbeitet werden können.

Beide Dosieraggregate wurden dauerhaft auf der dafür vorgesehenen Plattform der Anlage platziert und über dem Trichter ausgerichtet, sodass für einen Materialwechsel keine weiteren Umbauarbeiten notwendig waren.

5.2.2 Temperierung

Für die Temperierung des Extruders wurden vier Aggregate eingesetzt, um die einzelnen Zonen separat beeinflussen zu können. Für Zylindermantel und Zentralspindel kamen Öltemperieraggregate der Single Temperiertechnik GmbH mit einer maximalen Betriebstemperatur von 300°C zum Einsatz. Ein Gerät des Typs STO 1-24-60-D2 (Ö2) wurde für die Temperierung des Planetmodul-Mantels eingesetzt, an die Zentralspindel wurde der Typ STO 1-9-42-D1 (Ö1) angeschlossen. An der Werkzeugplatte wird ebenfalls eine Öltemperierung eingesetzt (Ö3), hier wurde ein Gerät des Typs Thermostat LTH 350 der Lauda GmbH & Co. KG verwendet. Die Einzugszone wurde aufgrund des niedrigeren Temperaturniveaus mit einem Wassertemperieraggregat des Typs THN 6P der Firma Piovan S.p.a. ausgestattet (WA).

Das Schmelzespeichersystem und das Verteilerventil werden unabhängig von der restlichen Anlage elektrisch beheizt. Der Mantel des Speichers ist mit zwei separat geregelten Heizmanschetten ausgestattet, im Inneren des Kolbens befindet sich eine Heizpatrone, die in den Regelkreis der oberen Mantel-Manschette integriert ist. Am Gehäuse des Verteilerventils ist ein weiteres Heizelement angebracht, um ein Erkalten der Schmelze zu vermeiden und die Funktionsfähigkeit des Ventils, insbesondere während des An- und Abfahrens, zu sichern.

5.2.3 Spindelkonfiguration

Es wurden diverse Spindelkonfigurationen erprobt, um zu untersuchen, wie sich Spindeltyp und -anzahl auf die Faserlängenverteilung im Extrudat auswirken. Nähere Erläuterungen zu den verschiedenen Spindeltypen sind in Kapitel 2.2.2.3 zu finden.

Es wurden Versuche mit vier, fünf und sechs Spindeln durchgeführt. Zwar kann der WE70-Extruder auch mit drei und sieben Spindeln bestückt werden, dies wurde jedoch aufgrund der bereits gewonnenen Ergebnisse mit den erstgenannten Spindelanzahlen als nicht zielführend erachtet und nicht weiter verfolgt. Neben Extruderbestückungen mit Spindeln ausschließlich eines Typs wurden diverse Mischkonfigurationen betrachtet.

Konfigurationsnummer	Spindel-Anzahl, -Typ und -Länge			
1	3	STD 400	3	STD 370
2	2	STD 400	2	STD 370
3	4	STD 400		
4	4	NPP 400		
5	3	STD 400	3	TT2 400
6	2	STD 400	3	TT1 400
7	5	TT2 400		
8	4	TT2 400	1	STD 370
9	5	TT1 400		
10	3	TT2 400	3	STD 50

Tabelle 4: Tabellarische Auflistung der erprobten Spindelkonfigurationen

5.2.4 Werkzeugplatte

Die Werkzeugplatte bildet bei den Extrusionsversuchen den Abschluss des Systems und ermöglicht den Einsatz verschiedener Düseneinsätze. Es wurden drei verschiedene Einzelrundloch-Düsen mit 5mm, 10mm und 20mm Durchmesser erprobt, um den Einfluss des Werkzeugwiderstands und der Werkzeuggeometrie zu erfassen.

Im Anlagenaufbau für Spritzgussversuche wurde eine modifizierte Einzellochdüse mit 10mm Durchmesser als Verbindungselement für das Füllventil des Schmelzespeichers eingesetzt.

Die Werkzeugplatte nimmt innenseitig den Anlaufring auf, an dem sich die Planetspindeln während des Betriebs abstützen. Während der Extrusionsversuche wurden sowohl das Standardelement als auch das in Kapitel 3.3 beschriebene, modifizierte Anlaufelement erprobt.

5.2.5 Sensorik

Zwecks Prozessüberwachung kann der Planetwalzenextruder an diversen Positionen mit Sensoren ausgestattet werden. Aufgrund der Bauweise ist dies mit den vorhandenen Anlagenbauteilen nur an den Schnittstellen zwischen den Modulen möglich. Da nur ein Planetwalzenmodul eingesetzt wurde, konnten lediglich ein Druck- und ein Temperatursensor in der Werkzeugplatte eingesetzt werden. Die Schmelzetemperatur an der Düse wurde zusätzlich mit einem Handthermometer erfasst, da der interne Sensor nur eine Messung in unmittelbarer Wandnähe vornimmt. Die Schmelzetemperatur in der Kanalmitte kann von dieser jedoch deutlich abweichen.

Seitens der Anlagensteuerung werden die Drehzahl der Zentralspindel und das dort anliegende Drehmoment ausgegeben, letzteres wird aus der Leistungsaufnahme des elektrischen Antriebes errechnet. Weitere Daten können von den Temperieraggregaten gewonnen werden, diese erfassen die Vor- und Rücklauftemperatur sowie den Volumenstrom im Temperierkreislauf.

5.2.6 Materialien

Es wurden für alle Versuchsreihen naturfarbene Polypropylen-Glasfaser-Materialtypen aus der Celstran- und Compel-Reihe der Celanese GmbH verwendet. Dabei handelt es sich um LFT-Granulate, die, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, im Pultrusionsverfahren hergestellt werden. Als Standardmaterial wurde Celstran PP-GF30 04 P10 eingesetzt, eine hitzestabilisierte, niederviskose Spritzgusstype mit einem Fasergewichtsanteil von 30% und einer Granulatlänge von 10mm. [10] Zusätzlich wurden Materialien mit derselben Matrixrezeptur, jedoch 20% und 40% Faseranteil mit ebenfalls 10mm Länge und ein Granulat mit 30% Glasfaseranteil mit 25mm Länge eingesetzt.

Da es sich bei allen eingesetzten Granulaten um dieselbe Faser-Matrix-Kombination handelt, gelten identische Verarbeitungsvorgaben. Für den Spritzguss wird eine Massetemperatur von 230°C bis 270°C empfohlen. Um die thermische Schädigung während der Verarbeitung gering zu halten, wurde während der Versuche stets eine Massetemperatur von 250°C bis 255°C angestrebt. Diese Vorgehensweise wurde aufgrund des Arbeitsprinzips des Planetwalzenextruders beschlossen, da bei diesem die Zylinderwandtemperatur deutlich über der an der Düse gemessenen Schmelzetemperatur liegen kann.

Die beschriebenen Materialien wurden eingesetzt, da diese Vorteile hinsichtlich Versuchsdurchführung und Ergebnisermittlung bieten. Da es sich bei allen verwendeten Materialien lediglich um verschiedene Varianten derselben Rezeptur handelt, kann das Material als Einflussfaktor weitestgehend ausgeschlossen werden. Bei gebrauchsfertigen LFT-Granulaten muss nur eine Komponente dosiert werden, wodurch das Faser-Matrixverhältnis als feste Ausgangsgröße angesehen werden kann, gleiches gilt für die Faserausgangslänge. Beide Aspekte wurden zusätzlicher anhand von Stichproben validiert. Eine separate Zuführung des Polymers und der Fasern in endloser oder vorgeschnittener Form bietet möglicherweise Vorteile hinsichtlich Prozessführung und Materialkosten. Durch eine getrennte Zuführung und die schwierige Dosierbarkeit von Glasfasern kann es jedoch im Gegenzug auch zu Rezepturschwankungen kommen, die die Ergebnisinterpretation erschweren.

5.3 Simulation

Da der PWE im Vergleich zu Ein- und Doppelschneckenextrudern ein derzeit noch wenig erforschter Maschinentyp ist, kann kaum auf bestehendes Wissen oder etablierte Modelle zurückgegriffen werden. Auch die von der Anlagensensorik ausgegebenen Messdaten und die Ergebnisse der Faserlängenverteilung geben nur wenig Aufschluss über die Details der im Extruder auftretenden Vorgänge, die jedoch ausschlaggebend für das Verständnis der Faserschädigungsmechanismen sind.

Um gezielt nach Möglichkeiten suchen zu können, die Faserschädigung im Planetwalzenextruder zu reduzieren, wurden Modellbetrachtungen des Systems durchgeführt, um die Vorgänge in der Maschine zu visualisieren und zu verstehen. Zu diesem Zweck wurde versucht, den vollgefüllten Abschnitt des Planetwalzenextruders mittels FEM-Simulation abzubilden.

Die Finite-Element-Methode (FEM) ist eine heutzutage vielfach eingesetzte Vorgehensweise, um jegliche Art von physikalischen Vorgängen zu modellieren, darzustellen und nach Möglichkeit zu quantifizieren. Die Berechnungen von Fließvorgängen in Polymerschmelzen hat sich insbesondere bei der Spritzguss-Simulation durchgesetzt, um beispielsweise den Füll- und Abkühlvorgang von Formteilen vorherzusagen, um so Fließnähte, Verzug und ähnliche Aspekte bereits in der Planungsphase optimieren zu können. Aber auch in der Extrusion kommt das Verfahren zum Einsatz, beispielsweise bei der Auslegung von Düsenwerkzeugen.

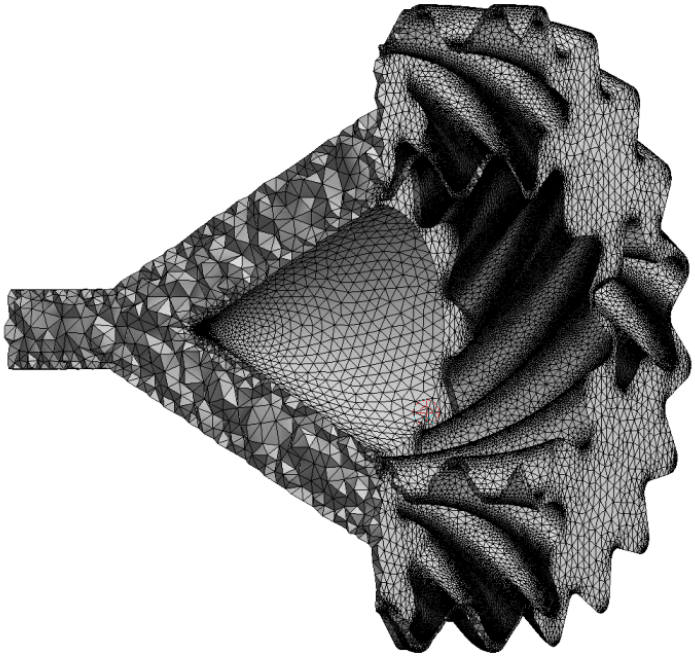

Abbildung 40: Ausströmbereich des Planetwalzenmoduls als vernetztes Modell (halbierte Darstellung) [54]

Mit Hilfe der Simulation wurde ausschließlich ein Abschnitt des vollgefüllten Bereichs des Extruders betrachtet. Dieser Fokus wurde gewählt, da Untersuchungsergebnisse der Versuchsanlage darauf hinweisen, dass ein Großteil der Faserschädigung in dieser Zone verursacht wird. Darüber hinaus sind für die Schmelzebewegungen im Knet in teilgefüllten Bereichen bereits Modellvorstellungen vorhanden [40], für den vollgefüllten Bereich jedoch nicht. Durch die Simulation sollen Rückschlüsse auf die mechanische Belastungen der Fasern aufgrund von Förder- und Strömungsvorgängen und damit verbundenen Effekten getroffen werden, wie beispielsweise Druckverhältnisse, Deformation,

Scherbelastung und Ähnliches. Die Herangehensweise und der Aufbau der Simulationen sind detailliert in der Arbeit von Naaß [54] dargestellt.

Die Herausforderung des Simulationsaufbaus besteht darin, dass ein PWE aus mehreren beweglichen, mechanisch gekoppelten Elementen besteht, die aufgrund der Drallverzahnung eine komplizierte Oberflächengeometrie aufweisen. Die Kinematik des Extruders gibt vor, dass die Planetspindeln sowohl eine Rotationsbewegung (grüner Pfeil in Abbildung 41) als auch eine Umlaufbewegung (roter Pfeil in Abbildung 41) um die Zentralspindel absolvieren. Um diesen Bewegungsvorgang in der Simulationsumgebung zu vereinfachen, wird hier der Mantel ebenfalls als bewegliches Bauteil (gelber Pfeil in Abbildung 41) angenommen. Wird diesem eine entgegengesetzte, halb so schnelle Rotationsgeschwindigkeit im Verhältnis zur Zentralspindel zugeordnet, führt dies zum Ausbleiben der Umlaufbewegung der Planetspindeln, während die Rotationsbewegung erhalten bleibt. Die beiden Bewegungsmodi sind in folgender Abbildung zur besseren Übersichtlichkeit mit nur einer Planetspindel dargestellt.

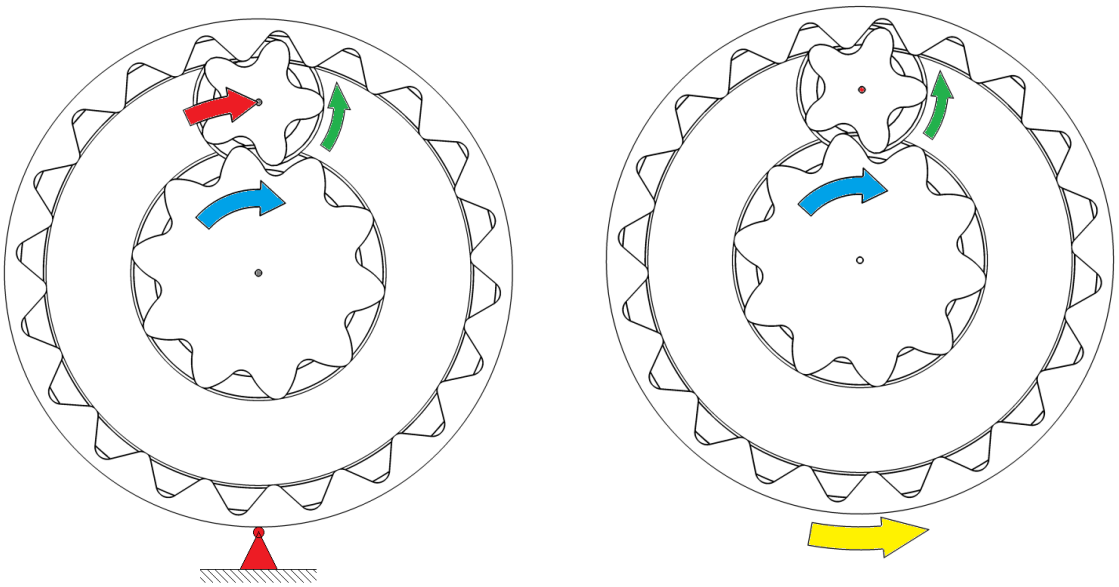

Abbildung 41: Vergleichende Darstellung der realen (links) und der Modellkinematik (rechts)

In Analogie zu real erprobten Konfigurationen wurden Berechnungen mit vier, fünf und sechs Standard- und TT2-Spindeln durchgeführt. Zusätzlich wurden Massedurchsatz, Drehzahl und Temperaturverhältnisse ebenfalls in Anlehnung an die realen Versuche vorgegeben. Es wurden jeweils Berechnungen zu $5^{kg}/_{h}$ und $15^{kg}/_{h}$ Durchsatz bei einer Massetemperatur von 255°C und einer Drehzahl von $30min^{-1}$ unter Verwendung folgender Materialdaten durchgeführt:

Parameter	Wert	Einheit
P1	84,74	Pa·s
P2	$2{,}574 \cdot 10^{-3}$	s
P3	0,667	
T_0	250	°C
T_S	33,83	°C
Wärmeleitfähigkeit	0,174	W/m·K
Wärmekapazität	2428	J/kg·K
Schmelzedichte	918	Kg/m³

Tabelle 5: Für die Simulation verwendete Materialdaten und Carreau-Parameter [54]

Die beschriebene Simulation ist in vielerlei Hinsicht stark vereinfacht und idealisiert. Wichtige Aspekte des realen Prozesses können daher nicht berücksichtigt und abgebildet werden, wie beispielsweise die Lage und mechanische Beeinflussung der Glasfasern in der Schmelze oder Effekte durch die Einmischung von Luft. Dadurch stellt sich stets die Frage, wie realitätsnah und belastbar die Ergebnisse einer Simulation sind. Letztlich können die bisherigen Ergebnisse lediglich als erste Annäherung an den Prozess gesehen werden, weshalb die Angabe quantitativer Berechnungsergebnisse im Zuge dieser Arbeit vermieden wird.

Wünschenswert wäre eine direkte Validierung am realen Prozess, was aufgrund der eingeschränkten Messmöglichkeiten nicht realisierbar war. Auch um diesbezüglich eine Alternative zu schaffen wurde das in Kapitel 3.4 beschriebene transparente Modell entwickelt und gebaut. Damit sind realitätsnahe Betrachtungen der Abläufe im Extruder möglich. Es können Faserorientierungen, Bewegungsabläufe, Stau- und Mischvorgänge und Ähnliches betrachtet und sowohl mit den Erkenntnissen aus der Simulation als auch den realen Versuchen verglichen werden. Zusätzlich bietet sich die Möglichkeit, die ermittelten rheologischen Eigenschaften des Modell-Fluids in die FEM-Umgebung zu implementieren, um so am Sichtmodell einen Validierungsbezug für die Simulation herzustellen.

6 Versuchsergebnisse

Auf der Suche nach einer Methode, Langglasfasern möglichst schädigungsarm zu verarbeiten, wurden am Planetwalzenextruder die Effekte verschiedener Extruderkonfigurationen, Material- und Prozessparameter untersucht. Auf Basis dieser Ergebnisse und der zugehörigen Modellbetrachtungen wurden Rückschlüsse auf Vorgänge im Planetwalzenextruder und deren Auswirkungen auf die in der Schmelze enthaltenen Fasern gezogen. Zunächst sollen jedoch einige grundlegende Begriffe angesprochen werden, die für die Interpretation der Versuchsergebnisse relevant sind.

6.1 Begriffe

6.1.1 Spezifische Antriebsleistung

Die Antriebsleistung *P* in Watt [W] ergibt sich aus dem Drehmoment *M* in Newtonmetern [Nm] und der Drehzahl *n* in [1/s].

$$P = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n$$

Formel 4: Berechnungsformel für die Antriebsleistung

Ein Extruder überträgt seine Antriebsleistung entlang der Prozessstrecke über die Schnecke in das Extrudat, um dieses zu transportieren, aufzuschmelzen, zu homogenisieren und unter Überwindung des Werkzeugwiderstands auszustoßen. Die eingetragene Energiemenge steht dabei im direkten Zusammenhang mit physikalischen Zustandsänderungen im Extrudat, wie beispielsweise Druck- und Temperaturprofil, Materialdegradation und Mischwirkung. Die Ausprägung dieser Effekte hängt neben der Energiemenge von der Materialmenge ab, von der sie aufgenommen wird. Dieses Verhältnis zwischen Massendurchsatz $\dot{m}$ in [kg/h] und Antriebsleistung P in [W] wird als spezifische Antriebsleistung P_{spez} in [Wh/kg] bezeichnet.

$$P_{spez} = \frac{P}{\dot{m}}$$

Formel 5: Berechnungsformel für die spezifische Antriebsleistung

Die spezifische Leistung gibt somit an, welche Energiemenge eine diskrete Materialmenge bei ihrem Durchlauf durch einen Extruder aufgrund des Eintrags von Antriebsleistung aufnimmt.

Die Betrachtung eines Extrusionsprozesses anhand der spezifischen Leistung bietet sich an, um die Effekte verschiedener Betriebszustände oder Versuchsaufbauten auf das Material zu vergleichen. Insbesondere dispersive und distributive Mischvorgänge zeigen eine starke Korrelation zum mechanischen Energieeintrag. Die Schädigung von Glasfasern kann als ein dazu eng verwandter Vorgang angesehen werden, weshalb die spezifische Leistung eine geeignete Kenngröße zur Beurteilung darstellt.

Um die Faserschädigung zu minimieren wurde meist versucht, die spezifische Antriebsleistung des PWE möglichst niedrig zu halten. Dadurch liegen einige der erprobten Betriebspunkte im Grenzbereich eines stabilen Prozessfensters oder jenseits davon, worauf auch die in Kapitel 4.4.2 beschriebene Inhomogenität des Extrudates zurückgeführt werden kann. In Kombination mit dem eingesetzten Stäbchengranulat neigt der PWE in einem solchen Betriebszustand zu

Drehmomentschwankungen, was die Ergebnisqualität der spezifischen Leistung zu sehr beeinträchtigt, als dass der Kennwert für eine verlässliche Beurteilung des Prozesses angewendet werden kann. Daher wird der spezifische Massendurchsatz als weitere Betrachtungsgrundlage herangezogen.

6.1.2 Spezifischer Massendurchsatz

Der spezifische Massendurchsatz $\dot{m}_{spez}$ in [kg min/h] ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen dem Massendurchsatz $\dot{m}$ in [kg/h] und der Schneckendrehzahl n in [1/min].

$$\dot{m}_{spez} = \frac{\dot{m}}{n}$$

Formel 6: Berechnungsformel für den spezifischen Massendurchsatz

Der spezifische Massendurchsatz gibt an, welche Materialmenge pro Extruderwellenumdrehung transportiert wird.

Der Kennwert wird meist zur Beurteilung des Förderverhaltens bzw. der Fördersteifigkeit eines Extruders angewendet, insbesondere im Zusammenhang mit Einschneckenextrudern ist dieser anzutreffen. [55] Bei der Ermittlung einer Förderkennlinie wird der Massendurchsatz über die Schneckendrehzahl aufgetragen, die Steigung des Graphen in einem Punkt entspricht somit dem spezifischen Massendurchsatz. Davon ausgehend kann der Kennwert mit weiteren Prozessparametern verknüpft werden, beispielsweise mit der Beeinflussung der Massetemperatur und der Schmelzehomogenität durch Drehzahländerung bei gleichbleibendem Durchsatz, wodurch die spezifische Leistung variiert wird. Die Veränderung des Massendurchsatzes hat zusätzlich einen Einfluss auf das Verweilzeitspektrum. Letztgenannte Verknüpfung ist für die Betrachtungen in dieser Arbeit besonders wichtig. Deshalb soll im folgenden Abschnitt genauer darauf eingegangen werden.

6.1.3 Verweilzeitspektrum

Wird Extrudat in einem System gegen einen Werkzeugwiderstand gefördert, resultiert daraus ein druckbedingter Rückstrom entgegen der Extrusionsrichtung. Dieser Rückstrom verursacht eine Durchmischung des Extrudats entlang der Prozessstrecke; Je stärker dieser Effekt zum Tragen kommt, desto länger dauert der Ausspülvorgang des Extrudats. Dies wird als Verbreiterung des Verweilzeitspektrums bezeichnet.

Das Verweilzeitprofil eines solchen Ausspülvorgangs ist das Resultat einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Neben der Überlagerung von Quer- und Längsmischeffekten entlang der Prozessstrecke ist es auch von der Arbeitsweise und Charakteristik des Extruders im Zusammenspiel mit der Materialrezeptur abhängig. Aspekte wie die Selbstreinigungsfähigkeit des Extruders oder die Anhaftungscharakteristik von Polymeren oder Zuschlagstoffen an den Maschinenwandungen beeinflussen ebenfalls das Verweilzeitspektrum.

Limper et. al. beschreiben in einer Veröffentlichung das Verweilzeitspektrum von Polymerschmelze im Planetwalzenextruder in Abhängigkeit von Drehzahl, Spindelkonfiguration, Modullänge und

Rückstaulänge. [40] Die minimale Verweilzeit t_{min} in [s] in einem durchgehend teilgefüllten System aus Einzugsschnecke und Planetwalzenmodul wird darin mit folgender Gleichung beschrieben:

$$t_{\min} = \frac{l_F \cdot \rho_{SS} \cdot i \cdot b \cdot h \cdot g}{\dot{m} \cdot D_F \cdot \pi \cdot (\cos\varphi)^3} + \frac{l_P}{\overline{V}_Z}$$

l_F = Länge der Einzugsschnecke [mm];
D_F = Durchmesser Einzugsschnecke [mm];
$\overline{V}_Z$ = Mittlere axiale Geschwindigkeit [mm/s];
l_P = Länge der Zentralspindel [mm];
ρ_{SS}= Schüttdichte[g/mm³];
h = Kanalhöhe [mm];
b = Kanalbreite [mm];
$\dot{m}$ = Massendurchsatz [g/s]
i = Anzahl der Flanken;
g = Steigung [mm];
φ = Steigungswinkel [°];

Formel 7: Minimale Verweilzeit im Planetwalzenextruder [40]

In Formel 7 beschreibt der erste Summand die Einzugsschnecke, der zweite das Planetenmodul. Die Drehzahl der Anlage ist in $\overline{V}_Z$ enthalten. Dieser Term beschreibt die axiale Fortbewegungsgeschwindigkeit der Schmelze im Planetwalzenmodul. Für die Berechnung wird davon ausgegangen, dass im teilgefüllten Bereich kein Gegendruck in Extrusionsrichtung herrscht, sodass die Schmelze sich analog zu den Kontaktpunkten der aufeinander abrollenden Extruderelemente bewegt. Durch die Überlagerung von Rotations- und Umlaufbewegung der Planeten ergeben sich für den Knet im Zylinderbereich und auf der Zentralspindel unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten. Diese werden über die Gleichungen in Formel 8 errechnet:

$$\overline{V}_Z = \left(\frac{V_{axZSP} + V_{axZYL}}{2}\right) \text{mit}$$

$$V_{axZSP} = \frac{d_{PSP} \cdot \pi}{\tan\beta} \cdot |n_{rel1}| \text{ mit } n_{rel1} = n_{ZSP} - n_{uPSP}$$

$$V_{axZYL} = \frac{d_{PSP} \cdot \pi}{\tan\beta} \cdot |n_{rel2}| \text{ mit } n_{rel2} = n_{PSP} - n_{uPSP}$$

V_{axZSP} = Axialgeschwindigkeit an der Zentralspindel [mm/s];
n_{uPSP} = Umlaufgeschwindigkeit Planetspindel [1/s];
n_{PSP} = Drehzahl der Planetspindeln [1/s];
β = Steigungswinkel der Verzahnung [°]
V_{axZyl} = Axialgeschwindigkeit am Zylinder [mm/s];
d_{PSP} = Durchmesser Planetspindel [mm];
n_{ZSP} = Drehzahl der Zentralspindel [mm];

Formel 8: Berechnung der axialen Geschwindigkeitskomponente [40]

Für die Betrachtung eines Prozesses kann Formel 7 vereinfacht werden, da sich die meisten Faktoren auf Aspekte beziehen, die als konstant angenommen werden können. Es ergibt sich:

$$t_{\min} = \left(\frac{1}{\dot{m}}\right) \cdot k_E + \left(\frac{1}{n}\right) \cdot k_P$$

k_E = Größenfaktor Einzugsschnecke
k_P = Größenfaktor Planetenmodul
$\dot{m}$ = Massendurchsatz [g/s]
n = Antriebsdrehzahl [1/s]

Formel 9: Vereinfachte Gleichung für die minimale Verweilzeit im Planetwalzenextruder [40]

Anhand der vereinfachten Gleichung ist die Verknüpfung zum spezifischen Massendurchsatz erkennbar. Wird der Massendurchsatz bei konstanter Drehzahl erhöht, geht dies mit einer Abnahme der Verweilzeit einher. Auch die Erhöhung der Drehzahl bewirkt eine Abnahme der Verweilzeit, was jedoch auch mit einer Zunahme der spezifischen Leistung einhergeht.

Es wird vermutet, dass die Glasfaser-Schädigungseffekte im PWE sowohl von der spezifischen Leistung als auch von der Verweilzeit der Schmelze im Extruder abhängig sind, weshalb der spezifische Massendurchsatz als Betrachtungsgrundlage geeignet scheint.

6.2 Prozesse im Planetwalzenextruder

Die Arbeitsweise des Planetwalzenextruders weist sowohl Parallelen als auch deutliche Unterschiede zu Ein- und Doppelschneckenextruder auf, insbesondere hinsichtlich der Mechanismen der Materialförderung und des Energieeintrags. Die Auswirkungen dieser Unterschiede auf die Schmelze und die darin enthaltenen Fasern sind entscheidend dafür, ob der Planetwalzenextruder für die schonende Verarbeitung von Glasfasern geeignet ist.

6.2.1 Energieeintrag

In Vorbereitung auf den Spritzgießprozess muss die Formmasse sowohl aufgeschmolzen als auch homogenisiert werden.

Für das eigentliche Aufschmelzen des Polymers wird der Eintrag von Wärmeenergie benötigt. Dies erfolgt einerseits über die Dissipation von Antriebsleistung im Extrudat, andererseits über den direkten Eintrag von Heizleistung über das Temperiersystem des Extruders, die durch Schmelzekontakt am Zylindermantel und an der Zentralspindel eingeleitet wird.

Für die Homogenisierung der Schmelze ist der Eintrag mechanischer Arbeit in die Schmelze unumgänglich. Ziel ist, die anfangs bündelförmig vorliegenden Glasfasern in der Schmelze voneinander zu trennen, zu vereinzeln und möglichst gleichmäßig innerhalb des Schmelzevolumens zu verteilen, was einem rein distributiven Mischvorgang entspräche. Aufgrund der dafür notwendigen Bewegungs- und Strömungsvorgänge kommt es jedoch auch zu dispersiven Mischvorgängen, die mit dem Zerbrechen und Zerkleinern der Fasern einhergehen.

Um eine faserschonende Plastifizierung zu erreichen, soll versucht werden, nur das notwendige Minimum an mechanischer Energie in die Schmelze einzubringen, das für eine ausreichende Homogenisierung benötigt wird. Der für das Aufschmelzen der Matrix benötigte Energieeintrag soll möglichst ausschließlich über Heizleistung zugeführt werden. Des Weiteren soll eine Konfiguration des Extruders gefunden werden, die überwiegend distributive Mischvorgänge bewirkt.

Gerdon [38] beschreibt die Aufteilung des Energieeintrags über Wärme- und Antriebsenergie in Abhängigkeit von diversen Spindeltypen, deren Anzahl und weiteren Parametern. Darin ist zu erkennen, dass der PWE durch sein Arbeitsprinzip grundsätzlich in der Lage ist, wie gewünscht einen Großteil der Plastifizierenergie über Heizleistung einzutragen. Die in Gerdons Arbeit beschriebenen Ergebnisse des Energieeintragsverhaltens zeigen deutliche Parallelen zu den Untersuchungsergebnissen zur Faserschädigung, die im späteren Verlauf dieses Kapitels beschrieben werden.

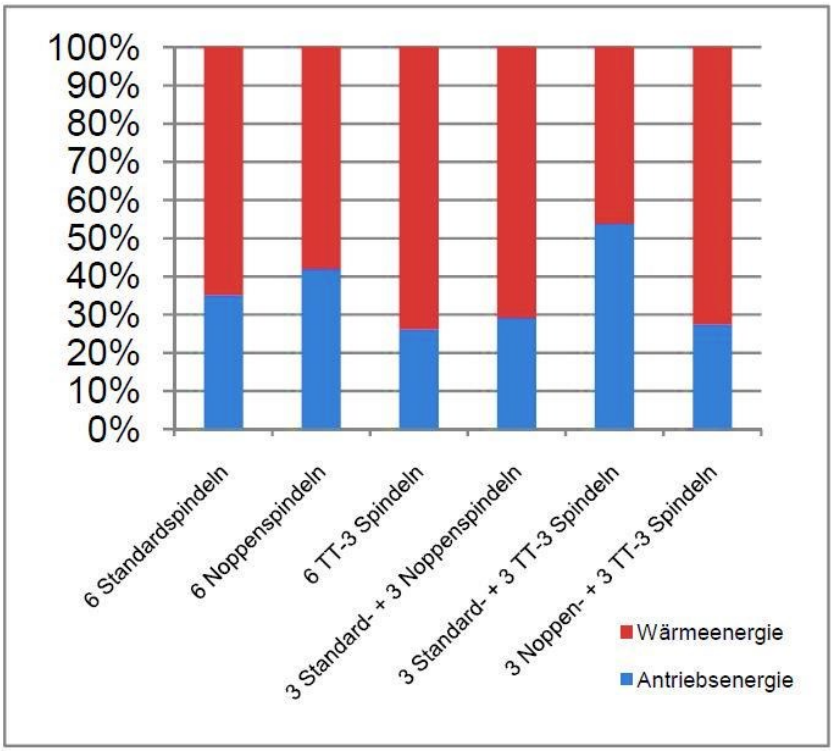

Abbildung 42: Vergleich des Energieeintrags in PE-LD in Abhängigkeit verschiedener Spindelkonfigurationen [38]

In Abbildung 42 ist zu erkennen, dass die Bestückung des Extruders mit TT-Spindeln die angestrebte Verschiebung des Energieeintrags bewirkt. Daher wurden verschiedene Konfigurationen mit TT-Spindeln für die Faserverarbeitung erprobt und festgestellt, dass diese eine gute Eignung für diesen Anwendungsfall zeigen. Auf die Effekte dieses Spindeltyps wird in Kapitel 6.4.2.3 im Detail eingegangen.

6.2.2 Transportmechanismus

Anders als bei konventionellen Schneckenmaschinen wird die Schmelze im Planetwalzenextruder sowohl durch Schleppströmung als auch durch einen kontinuierlichen Verdrängungsvorgang gefördert. Der Transportmechanismus spielt eine zentrale Rolle für den mechanischen Energieeintrag in die Schmelze und die daraus resultierende Faserschädigung. Die Effekte der später beschriebenen Extruderkonfigurationen basieren maßgeblich auf der Variation dieser Mechanismen, weshalb diese detailliert betrachtet werden.

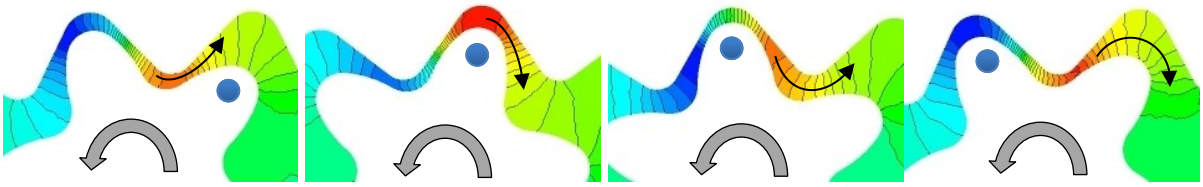

Abbildung 43 : Darstellung des Verdrängungsmechanismus zwischen einer rotierenden Planetwalze und dem Zylindermantel anhand einer FEM-Simulation der Druckverhältnisse

Der Verdrängungsfördermechanismus des PWE kann in seinen Grundzügen mit der Arbeitsweise einer Innenzahnradpumpe verglichen werden, was bei der qualitativen Betrachtung der Druckverhältnisse in der Schnittdarstellung in Abbildung 43 deutlich wird. In dieser sind Bereiche mit hohem Druckniveau rot und niedrigem Druckniveau blau dargestellt. Die ineinandergreifende Verzahnung verdrängt das Extrudat in Abrollrichtung entlang des schwarz dargestellten Pfeils. Die Rotationsbewegung der Planetspindeln bewirkt zusätzlich eine Schleppströmung (blau in Abbildung 44), die das Extrudat in den Zwickelbereich zieht. Durch das kontinuierliche Ineinandergreifen der Drallverzahnung der Maschinenbauteile verdrängt der jeweils eingreifende Zahn die Schmelze in Drallrichtung aus dem gegenüberliegenden Zahngrund (grün in Abbildung 44). Ein Anteil Schmelze wird dabei in Drallrichtung als Knet vor der Planetspindel hergetrieben, der übrige Anteil wird von dieser überrollt, wobei er durch den Spalt zwischen den Elementen hindurchtritt.

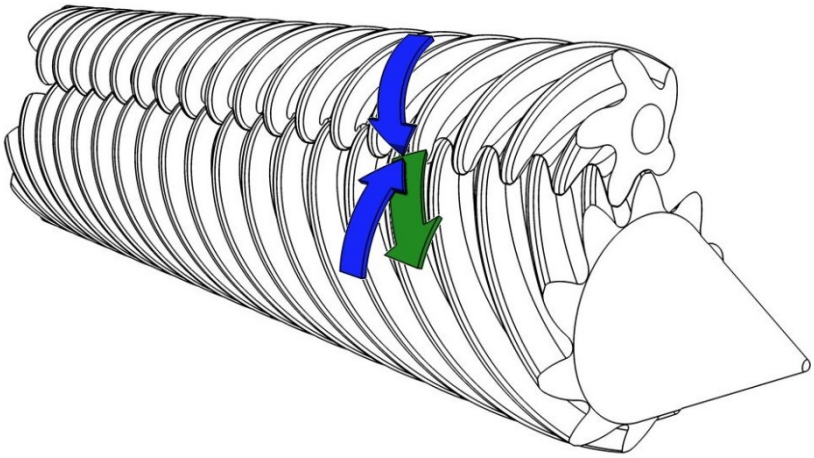

Abbildung 44: Darstellung von Schleppströmung und Verdrängungsrichtung

Dieser Vorgang bewirkt sowohl einen distributiven Mischvorgang durch Aufteilung und Quervermischung des Extrudats als auch einen dispersiven Mischvorgang durch mechanischen Energieeintrag während des Überrollvorgangs. Das Verhältnis der Anteile zwischen der im Knet verbleibenden und der überrollten Masse wird durch die Größe des Spalts zwischen den Maschinenelementen bestimmt. Ist der Spaltquerschnitt sehr eng, passiert nur ein kleiner Anteil den Spalt, erfährt dabei jedoch hohe Belastung. Mit zunehmendem Spaltquerschnitt passiert mehr Schmelze den Spalt und erfährt dabei geringere mechanische Belastung.

Ausschlaggebend für die letztlich resultierende Faserschädigung ist daher sowohl die jeweilige Schädigung der Fasern beim einzelnen Spaltdurchtritt als auch die Häufigkeit dieses Vorganges, die wiederum von der Verweilzeit der Schmelze widerspiegelt wird.

Die Antriebsleistung des Extruders wird über die Zentralspindel in das System eingebracht, durch die Drallverzahnung ergibt sich die in Abbildung 14 dargestellte Aufteilung der Kräfte. Die Planetspindeln werden von der Zentralspindel angetrieben und stützen sich an der Zylinderverzahnung ab, die Bauteile stehen dadurch auf den in Abbildung 45 (rechts) blau markierten Punkten in Kontakt zueinander. Durch die beschriebene Kraftübertragung stehen die Elemente an nur einer Seite ihrer Zahnflanken im Kontakt zueinander, die gegenüberliegenden Flanken berühren sich nicht. Unter Verwendung einer Standardspindel ergibt sich dadurch ein Spalt mit der in Abbildung 45 (rechts) rot dargestellten Querschnittsfläche.

Es ist zu erkennen, dass die Bauteile des Extruders nicht exakt dichtkämmend ausgeführt sind. Die Planetspindeln sind zwischen Zylinder und Zentralspindel mit einem Spiel von ca. ±0,8 mm in axialer und ±0,5 mm in radialer Richtung frei schwimmend gelagert. Die tatsächliche Lage der Planetspindeln im laufenden Prozess ergibt sich aus dem Zusammenspiel zwischen den Antriebskräften und den Strömungswiderständen des Extrudats, die diesen entgegen wirken. Die Geometrie des Spaltes zwischen den Elementen ist somit eine sich dynamisch verändernde Größe, die im Prozess nicht direkt mess- und beeinflussbar ist, diesen jedoch mitbestimmt.

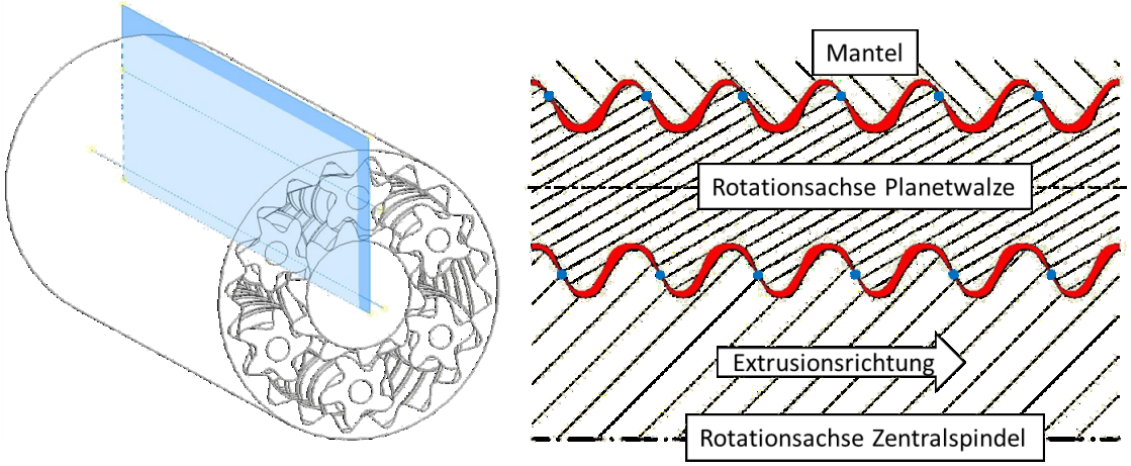

Abbildung 45: Teilquerschnitt entlang der links dargestellten Ebene durch den Extruder mit Standardspindel

Der Querschnitt der Spaltfläche ist mit mehreren Aspekten des Prozesses verknüpft:

- Verhältnis zwischen Leckströmung und Verdrängungungsmechanismus, ausschlaggebend für
    - Distributive Querdurchmischung der Schmelze
    - Fördersteifigkeit / Verweilzeitspektrum
- Mechanische Belastung des Extrudats während des Spaltdurchtritts
    - Dispersive Mischwirkung
    - Faserschädigung

6.2.3 Füllgrad

Analog zu Schneckenmaschinen ergibt sich im Planetwalzenextruder ein voll- und ein teilgefüllter Bereich, verbunden durch eine Übergangszone mit zunehmendem Füllgrad.

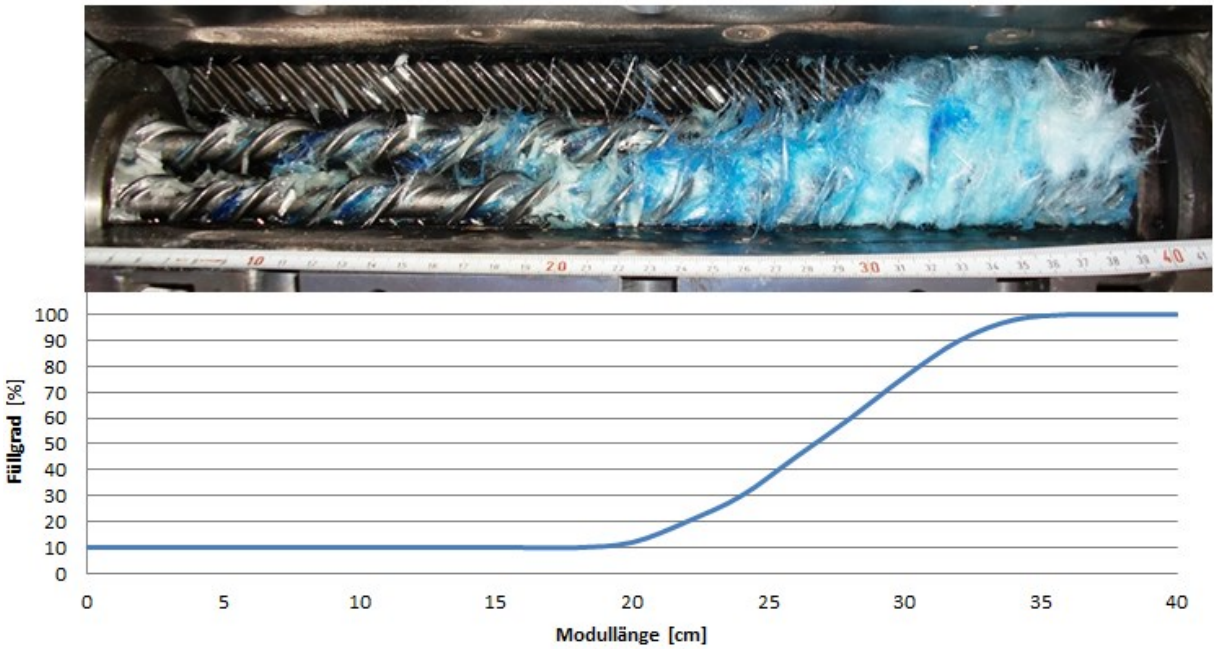

Abbildung 46: Exemplarische Darstellung des Füllgrads

Die Länge des vollgefüllten Bereichs steht im engen Zusammenhang mit dem Verweilzeitspektrum und ist damit einer der wichtigsten Faktoren für die Faserschädigung. Sie ergibt sich aus dem spezifischen Massedurchsatz in Abhängigkeit zum Werkzeugwiderstand und der Förderwirksamkeit der Spindelkonfiguration. Die Rückstaulänge konnte nicht mittels Anlagensensorik bestimmt werden und wurde näherungsweise, wie in Abbildung 46 dargestellt, mit Hilfe des aufklappbaren Planetwalzenmoduls betrachtet. Bei der Verarbeitung von PP-GF30 P10-Granulat unter Verwendung von vier TT2-, einer Standardspindel und einer 10mm-Düse zeigt sich der in Abbildung 47 dargestellte Zusammenhang zwischen Massedurchsatz, Drehzahl und Rückstaulänge.

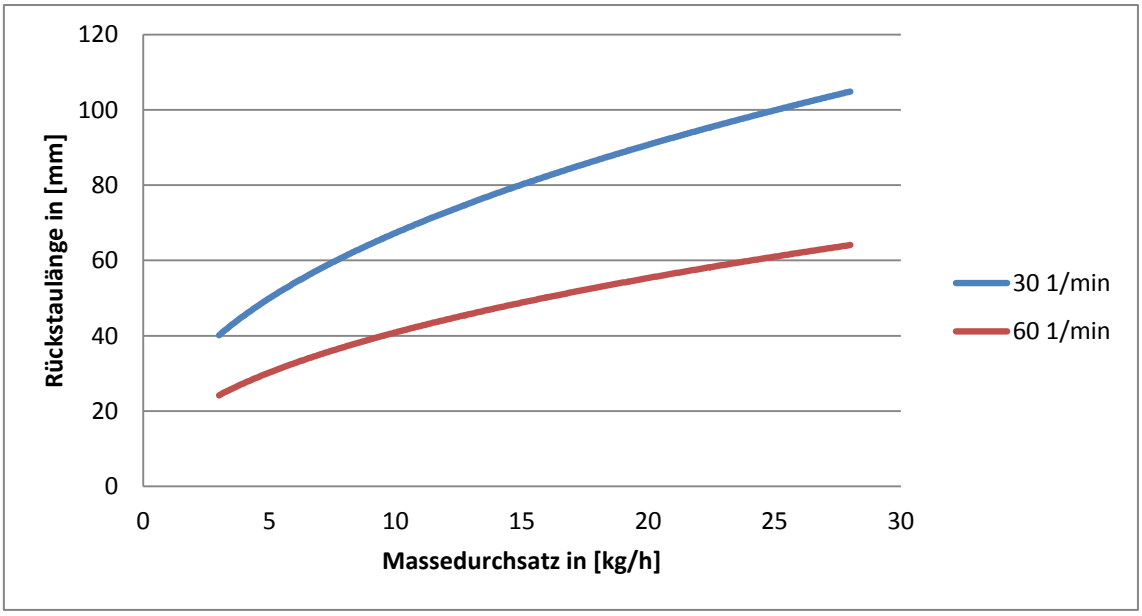

Abbildung 47: Zusammenhang zwischen Rückstaulänge, Massedurchsatz und Drehzahl

In derselben Messreihe wurde zusätzlich mittels Farbzugabe die Verweilzeit bestimmt. Hier wird als Messwert der Zeitabstand zwischen Farbzugabe am Trichter und erstem Farbaustritt an der Düse herangezogen. Es ist zu beachten, dass diese Messmethode nicht das Verweilzeitspektrum wiedergibt, sondern lediglich einen Teilaspekt, der Rückschlüsse auf das Transportverhalten zulässt. Eine Bestimmung des gesamten Verweilzeitspektrums mit besagter Spindelkonfiguration zeigte keine eindeutigen Ergebnisse, was auf das Transportverhalten (siehe Kapitel 6.4.2.3) der TT2-Spindeln zurückzuführen ist.

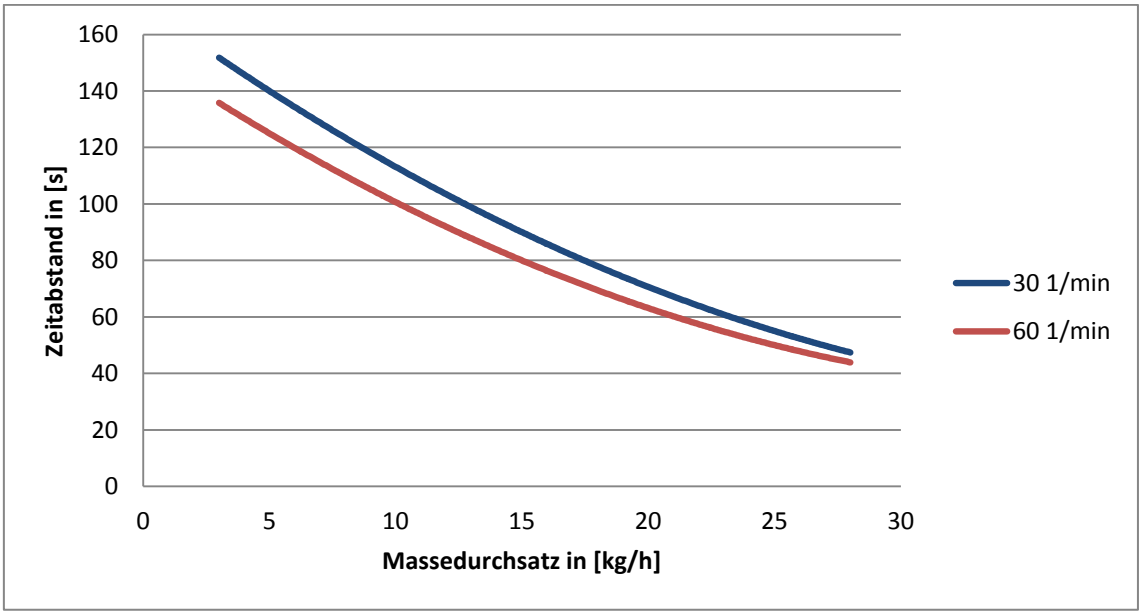

Abbildung 48: Zusammenhang zwischen Verweilzeit, spezifischem Massedurchsatz und Drehzahl

Bei der Betrachtung von Abbildung 47 und Abbildung 48 wird deutlich, dass mit zunehmendem Massedurchsatz eine größere Rückstaulänge entsteht, diese jedoch mit einer kürzeren Zeitspanne zwischen Farbzugabe und erstem Farbaustritt an der Düse einhergeht. Eine höhere Drehzahl steigert die Förderwirkung im Planetenmodul, was eine Verringerung der Rückstaulänge bei gleichem

Massedurchsatz bewirkt. Einen deutlich geringeren Einfluss zeigt die Drehzahl auf den Zeitabstand zwischen Farbzugabe und -austritt an der Düse.

Im vollgefüllten Bereich kommt es zu einer Überlagerung des in Abbildung 44 dargestellten Fördermechanismus mit einer Druckströmung, die entgegen der Extrusionsrichtung wirkt [43]. Die Ursache für diesen Vorgang ist eine Aufteilung des Schmelzestroms im Austrittsbereich des Walzenmoduls. Ein Anteil verlässt dort das Modul durch den Anlaufring (blau in Abbildung 49), der übrige Teil wird in dem freien Volumen zwischen den Spindeln entgegen der Extrusionsrichtung zurück gedrückt (rot in Abbildung 49). Das Verhältnis zwischen den Anteilen wird vom Werkzeugwiderstand und dem Strömungsbild im Austrittsbereich beeinflusst; die Darstellung eines Simulationsergebnisses dieses Bereiches ist im Anhang in Kapitel 13.4 zu finden.

Das zurückströmende Volumen kann auf dem Rückweg zum Beginn des vollgefüllten Bereiches sowohl Extrudat aus dem Förderstrom bzw. Knet herauslösen als auch anteilig durch die Schleppströmung wieder in diesen hineingezogen werden. FEM-Simulationen dieses Bereiches sind in Kapitel 6.4.1 dargestellt

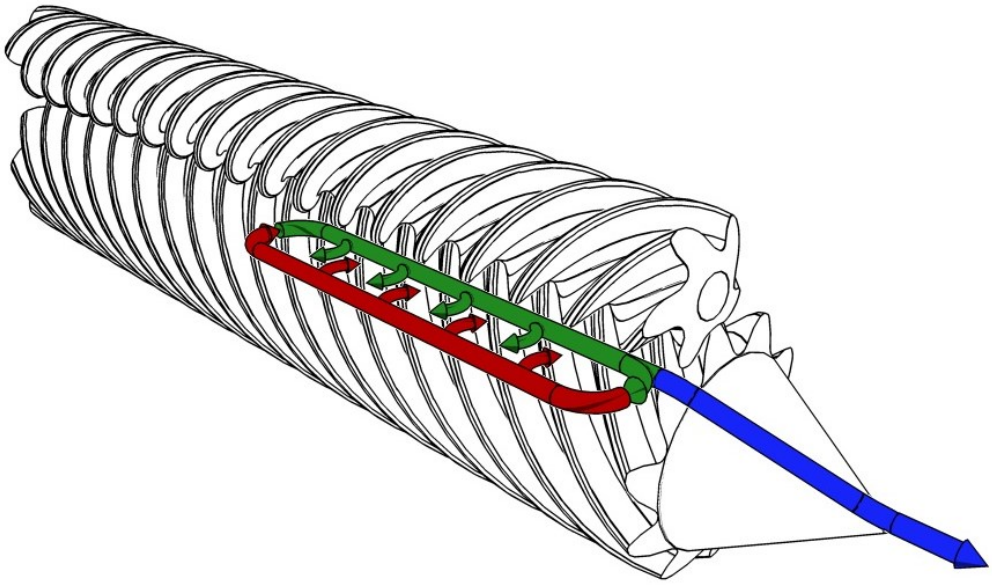

Abbildung 49: Schematische Darstellung der Schmelzezirkulation im vollgefüllten Bereich

Durch diesen Zirkulationsvorgang der Schmelze kommt es zu einer intensiven distributiven Durchmischung der Schmelze in Axialrichtung. Dispersive Effekte treten dadurch ebenfalls verstärkt auf. Dies ist auf die erhöhte Anzahl der Spaltdurchtritte beim mehrfachen Durchlaufen des vollgefüllten Bereiches und intensive Faser-Faser-Interaktion aufgrund der Strömungsvorgänge zurückzuführen.

Der Hauptanteil der Mischwirkung und Faserschädigung im Planetwalzenextruder kann somit auf den vollgefüllten Bereich zurückgeführt werden. Dies zeigt sich besonders deutlich an den Versuchsergebnissen im folgenden Abschnitt, hier wurde durch die Variation des Werkzeugwiderstands der Füllgrad gezielt beeinflusst.

6.3 Werkzeugwiderstand

Die Variation des Werkzeugwiderstands zeigt einen sehr deutlichen Einfluss auf die Faserlängenverteilung im Extrudat. Dies ist auf die direkte Beeinflussung des Füllgrads im Planetwalzenmodul zurückzuführen, wodurch die im vorigen Abschnitt beschriebenen Effekte unterschiedlich stark zum Tragen kommen.

Um den Werkzeugwiderstand zu variieren wurden Düsen mit einem Durchmesser von 5, 10 und 20mm eingesetzt, die daraus resultierenden mittleren Faserlängen sind in Abbildung 50 dargestellt. Die Versuche wurden mit einer Faserausgangslänge von 10mm durchgeführt, es wurden für jede der drei Düsen dieselbe Spindelkonfiguration von vier TT2- und einer Standardspindel und derselbe Versuchsplan angewendet.

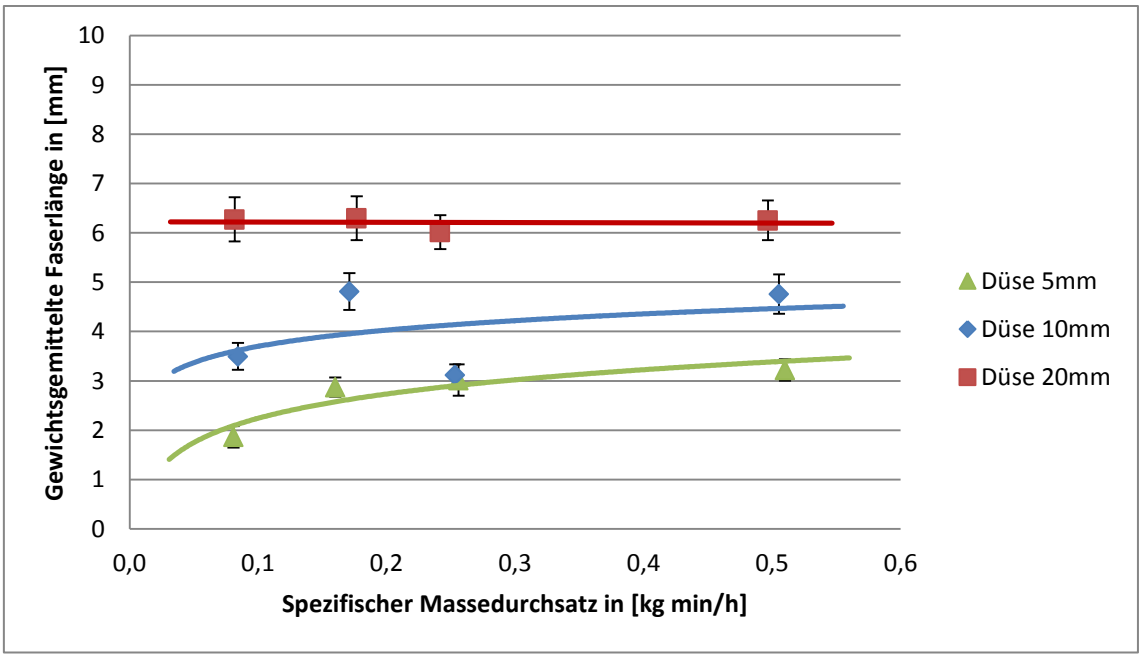

Abbildung 50: Der Einfluss des Düsendurchmessers auf die gewichtsgemittelte Faserlänge

Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmendem Düsendurchmesser die Faserschädigung abnimmt. Bei den Versuchsreihen mit 5 und 10mm Düsendurchmesser ist eine Abhängigkeit der Faserschädigung vom spezifischen Massedurchsatz erkennbar, und unter Einsatz der 20mm-Düse ist dieser Zusammenhang nicht mehr ersichtlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einem sehr großen Düsendurchmesser kein vollgefüllter Bereich mehr entsteht, wodurch die Schmelze nur noch eine minimale Verweilzeit im Extruder erlebt. Der im vorherigen Kapitel beschriebene Rückstrom- und Zirkulationsvorgang entfällt dabei, was die Aussage bestätigt, dass der Hauptanteil der Faserschädigung auf den vollgefüllten Bereich zurückzuführen ist.

Die Betrachtung der sich ergebenden Faserlängenverteilungen im Extrudat in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser zeigt, wie stark die Faserschädigung mit steigendem Füllgrad zunimmt. Zur Verdeutlichung wurden die drei Ergebnisse mit dem geringsten spezifischen Massedurchsatz von ca. 0,85 kg min/h aus Abbildung 50 gegenübergestellt.

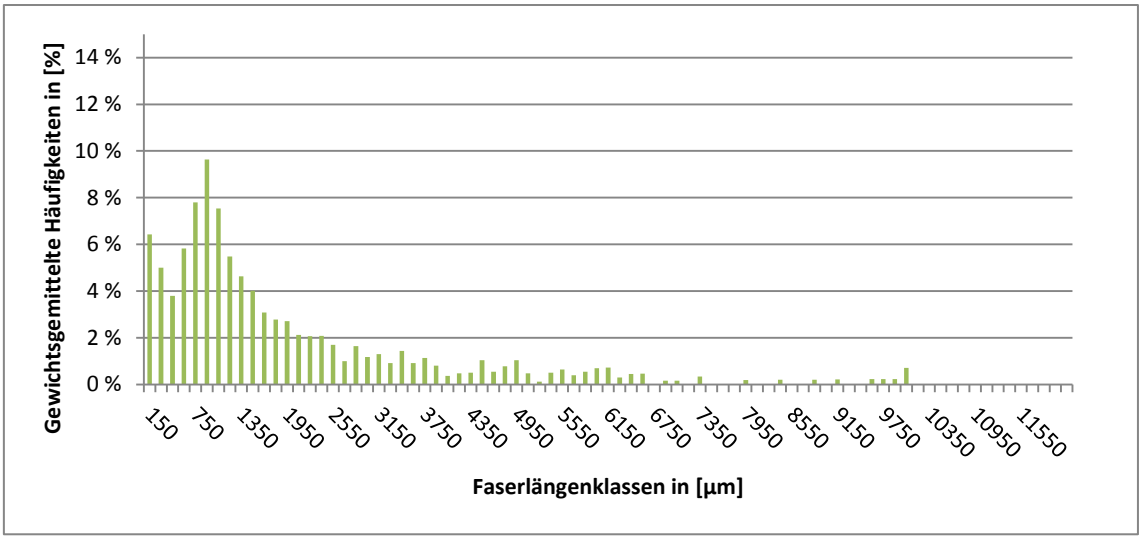

Abbildung 51: Düsendurchmesser 5mm, gewichtsgemittelte Faserlänge 1,9mm

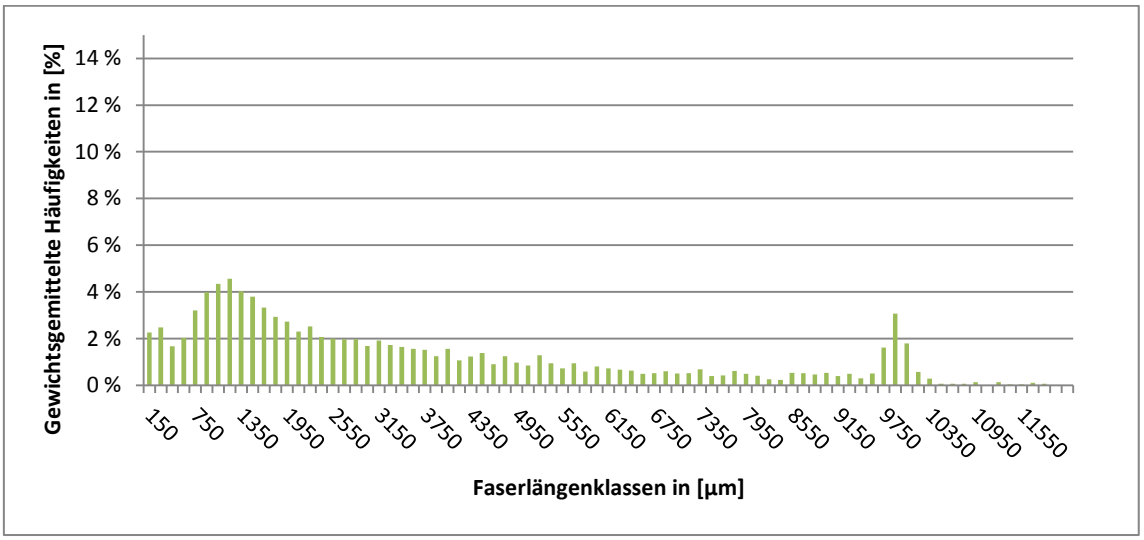

Abbildung 52: Düsendurchmesser 10mm, gewichtsgemittelte Faserlänge 3,5mm

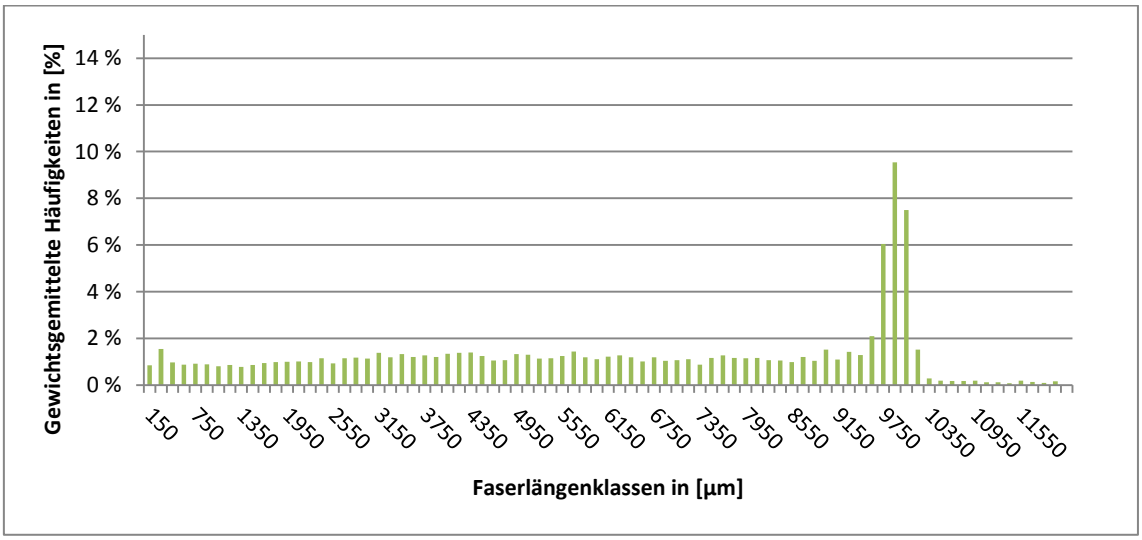

Abbildung 53: Düsendurchmesser 20mm, gewichtsgemittelte Faserlänge 6,3mm

Beim Vergleich der drei Diagramme ist klar die Zunahme der Häufigkeitsverteilung im 10mm-Bereich bei gleichzeitiger Abnahme des Feinanteils in Abhängigkeit zum Düsendurchmesser erkennbar. Während unter Einsatz der 5mm-Düse nur einzelne lange Fasern im Extrudat zu finden sind, erhöht sich deren Anteil deutlich bei Zunahme des Düsendurchmessers. Im Gegenzug nimmt der Faserfeinanteil ab, was auf eine reduzierte Verweilzeit und somit auf eine geringere Anzahl an Spaltdurchtritten im vollgefüllten Bereich zurückzuführen ist.

Die dargestellten Ergebnisse decken sich auch mit Erkenntnissen anderer Arbeiten zum Planetwalzenextruder. Neben der eingangs erwähnten Arbeit von Gerdon [38] beschreibt Greger [41] in seiner Arbeit über verstellbare Dispergierringe, dass sich die Mischgüte eines mit Farbpigmenten versetzten Compounds verbessert, wenn ein Dispergierring mit kleinerem hydraulischem Querschnitt eingesetzt wird. Dabei wurde ein besonders feinkörniger, zur Agglomeration neigender Farbstoff eingesetzt, um das Aufbrechen der Sekundärpartikel des Pigments beurteilen zu können. Der Dispergierring zwischen zwei Modulen kann als Werkzeugwiderstand innerhalb des Extruders angesehen werden, die Verbesserung der Mischgüte kann auch hier auf die längere Verweilzeit des Extrudats im vollgefüllten Bereich zurückgeführt werden.

Zwar ist unter Einsatz der 20mm-Düse die geringste Faserschädigung feststellbar, jedoch ergeben sich bei den dargestellten Betriebspunkten schwere Nachteile im Prozess. Der Schmelzestrang tritt in diesem Betriebsmodus durch den vollständig fehlenden Rückstau als hohler, luftiger Strang aus. Eine Entgasung der Schmelze ist dadurch nicht möglich, da im Extruder kein Druck aufgebaut wird. Des Weiteren zeigt sich, dass in diesem Betriebszustand bereits zu wenig Energie in die Schmelze eingetragen wird, was sich während der Versuchsdurchführung durch Unterschreiten der Schmelze-Solltemperatur und teilweise mangelhaft aufgeschmolzenes und unzureichend homogenisiertes Extrudat zeigte. Das in Kapitel 6.2.1 formulierte Ziel, nur das Minimum an mechanischer Energie in das Extrudat einzubringen, wurde in diesem Fall also unterschritten. Für ein stabiles Prozessfenster müsste daher ein höherer Werkzeugwiderstand im Bereich zwischen der 10mm- und 20mm-Düse gewählt werden.

6.4 Spindelkonfiguration

Die Wahl der Spindelkonfiguration ist ein zentraler Aspekt, um den Planetwalzenextruder für einen Prozess anzupassen. Dabei kann sowohl der Spindeltyp als auch die Spindelanzahl in einem Modul variiert werden, auch verschiedene Spindeltypen können innerhalb eines Moduls miteinander kombiniert werden.

6.4.1 Spindelanzahl

Die Module des WE70 können mit drei bis sieben Planetspindeln bestückt werden. Bei Versuchen zeigt sich im Trend, dass mit steigender Spindelanzahl die Faserschädigung zunimmt, ebenso ist die Aufschmelzleistung von der Spindelanzahl abhängig.

Wie bereits erwähnt ist für die schädigungsarme Verarbeitung von Langglasfasern das Ziel, möglichst wenig mechanische Arbeit in die Schmelze einzubringen, weshalb eine geringe Spindelanzahl günstig erscheint. Werden jedoch zu wenige Planetspindeln eingesetzt, macht sich auch dies durch Prozessinstabilität in Form von Schmelzepulsation, unaufgeschmolzenen Granulatkörner im Extrudat

und die Unterschreitung der Schmelze-Solltemperatur bemerkbar. Aufgrund dieses Verhaltens sind in Abbildung 54 keine Ergebnisse für höhere spezifische Durchsätze unter Verwendung von vier Standardspindeln vorhanden. Die zugehörigen Betriebspunkte zeigten keine ausreichende Prozessstabilität, um verwertbare Ergebnisse zu erzeugen. Die Verwendung von mindestens fünf Standard- oder TT-Spindeln stellte sich als Untergrenze heraus, um das verwendete Material prozesssicher verarbeiten zu können. Lediglich unter Einsatz von Noppenspindeln ist ein durchgehend stabiler Prozess mit nur vier Spindeln möglich, allerdings bewirken diese unabhängig von ihrer Anzahl eine sehr starke Faserschädigung.

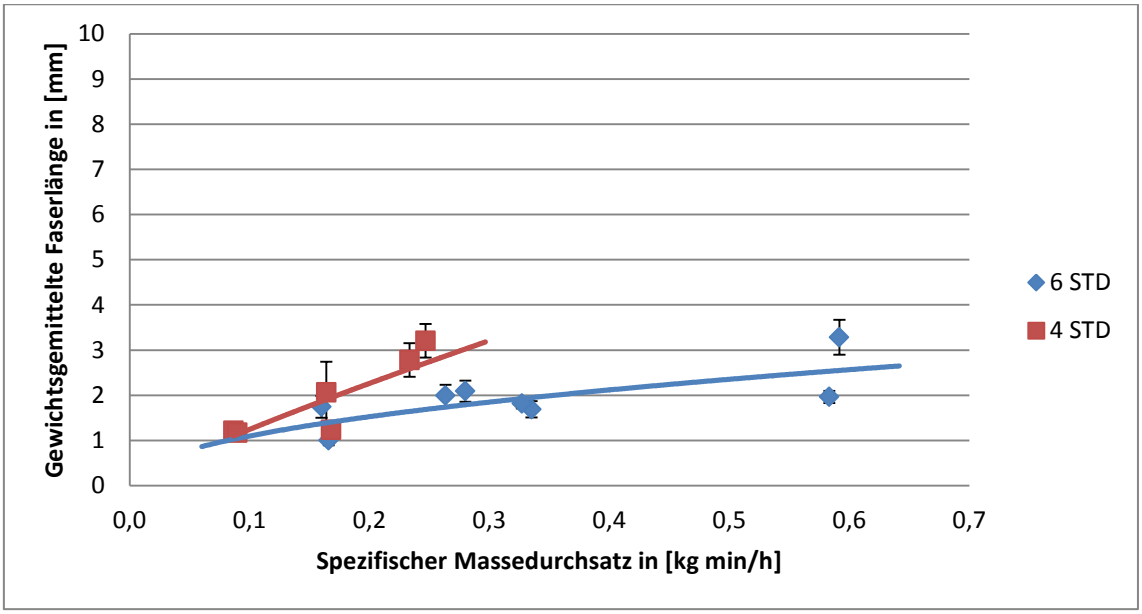

Abbildung 54: Vergleich der Faserschädigung bei der Bestückung mit vier und sechs Standardspindeln

Die Ursache für den Zusammenhang zwischen Spindelanzahl, Aufschmelzleistung und Faserschädigung soll im Folgenden betrachtet werden.

Im teilgefüllten Bereich teilt sich der Gesamtmassestrom wie in 2.2.1 beschrieben in zwei Knete pro Spindel auf, sodass mit steigender Spindelanzahl der Querschnitt des einzelnen Knetes reduziert wird. Mit abnehmendem Knetdurchmesser steigen sowohl der thermische als auch der mechanische Energieeintrag in die Masse, da ein kleinerer Knet schneller, häufiger und unter stärkerer Deformation umgewälzt wird, wobei auch ein häufigerer Wandkontakt zustande kommt [36]. Dabei kommt es auch zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit eines Spaltdurchtritts, was zu einer höheren Faserschädigung führt.

Im vollgefüllten Bereich beeinflusst die Spindelanzahl die in Kapitel 6.2.3 und Abbildung 49 dargestellte Rückstrombewegung im freien Volumen zwischen den Spindeln. Der dort beschriebene Austausch zwischen Förder- und Rückstrom und die damit verbundene Auswirkung auf die Faserschädigung scheint abhängig von der Ausbildung eines Wirbels (***A*** in Abbildung 55) zu sein. Durch die Umwälzbewegung verringert sich die Kontakthäufigkeit mit den Maschinenteilen, die im Wirbel befindliche Masse erfährt nur eine geringe mechanische Belastung und weniger Austausch nach außen. Dadurch wird weniger Wärmeenergie in das Material eingebracht, da diese über die Oberflächen von Zentralspindel und Zylinder übertragen wird. Die reduzierte Aufschmelz- und Homogenisierungsleistung des Extruders bei geringer Spindelanzahl wird somit durch diesen Strömungsvorgang mit verursacht.

Die Bewegung der Schmelze wird im freien Volumen jeweils von den Schleppwirkungen zweier Planetspindeln (**B** in Abbildung 55), der Zentralspindel (**C** in Abbildung 55) und des Mantels (**D** in Abbildung 55) beeinflusst. Durch die Variation der Spindelanzahl verändert sich der Abstand zwischen den Planetspindeln, wodurch sich auch deren Einfluss auf die Schmelze im freien Volumen ändert.

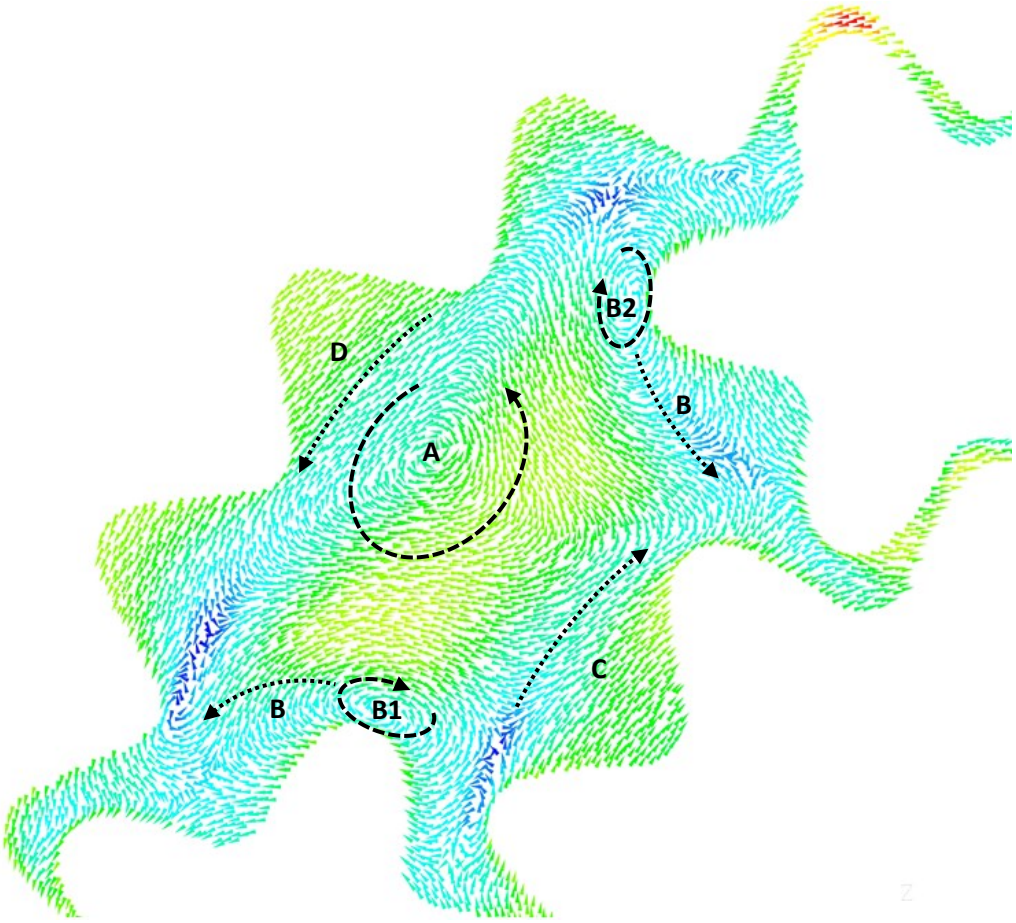

Abbildung 55: Strömungssimulation bei der Bestückung mit vier Standardspindeln

An den Zahnspitzen der Planetspindeln entstehen Wirbelschleppen (**B1** und **B2** in Abbildung 55), die der Rotationsrichtung der Wirbels **A** entgegenwirken und diesen stören. Bei der Bestückung des Extruders mit nur vier Spindeln, wie in Abbildung 55 dargestellt, überwiegt jedoch der Einfluss der Schleppwirkung von Zentralspindel (**C**) und Zylinder (**D**) auf das im freien Volumen befindliche Extrudat. Die Ausdehnung und Stabilität des Wirbels erhöht sich, je größer der Abstand zwischen den Spindeln ist.

Mit der Verringerung des Abstands zwischen den Planetspindeln nimmt der Einfluss von **B1** und **B2** auf das freie Volumen zu, sodass **A** zunehmend gestört wird. Bei der Bestückung des Extruders mit sechs Spindeln zeigt die Simulation in Abbildung 56, dass sich die Wirbelschleppen **B1** und **B2** überschneiden und einen weiteren Wirbel **B‘** mit umgekehrter Rotationsrichtung zu **A** bilden. **A** wird dabei in Richtung Zylinderwand verdrängt und stark deformiert.

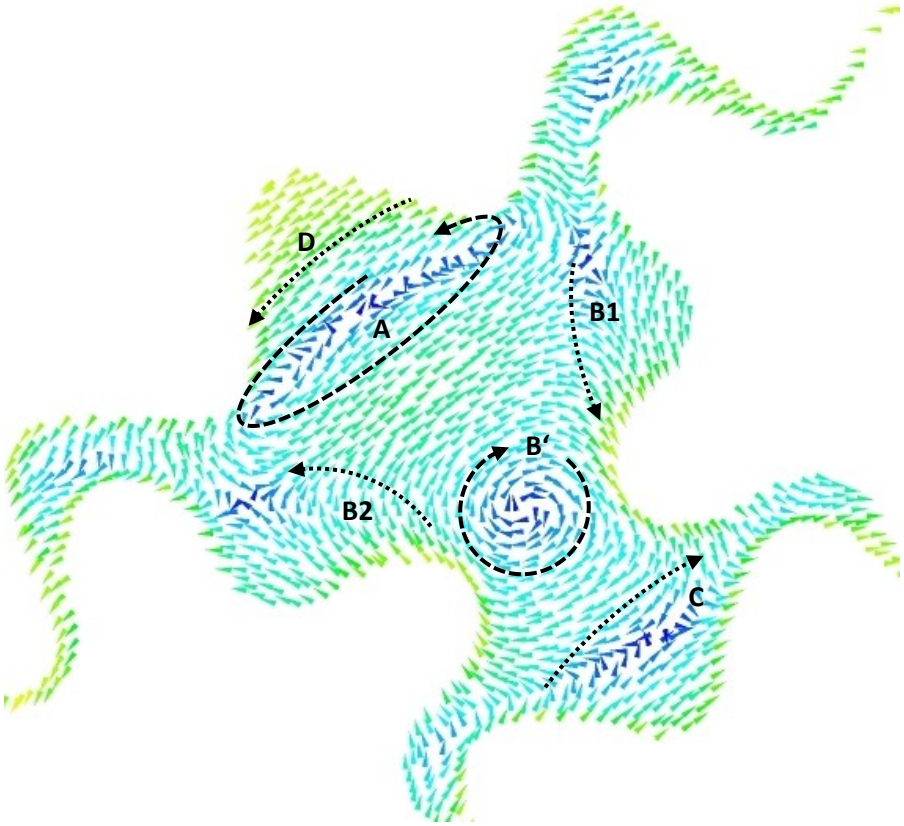

Abbildung 56: Strömungssimulation bei der Bestückung mit sechs Standardspindeln

Im Vorgriff auf Kapitel 6.4.2.3 soll an dieser Stelle dargestellt werden, dass auch die Reduktion der Zahnanzahl auf den Spindeln einen ähnlichen Effekt wie die Verringerung der Spindelanzahl mit sich bringt. Dadurch wird ebenfalls der Querschnitt des freien Volumens zwischen den Spindeln vergrößert. Zusätzlich nimmt die Beeinflussung des freien Volumens durch die Planetspindeln ab, da diese aufgrund der reduzierten Verzahnung eine geringe Schleppwirkung aufweisen. Infolge dessen bildet sich der Wirbel im freien Volumen stärker aus, wodurch der Energieeintrag abnimmt.

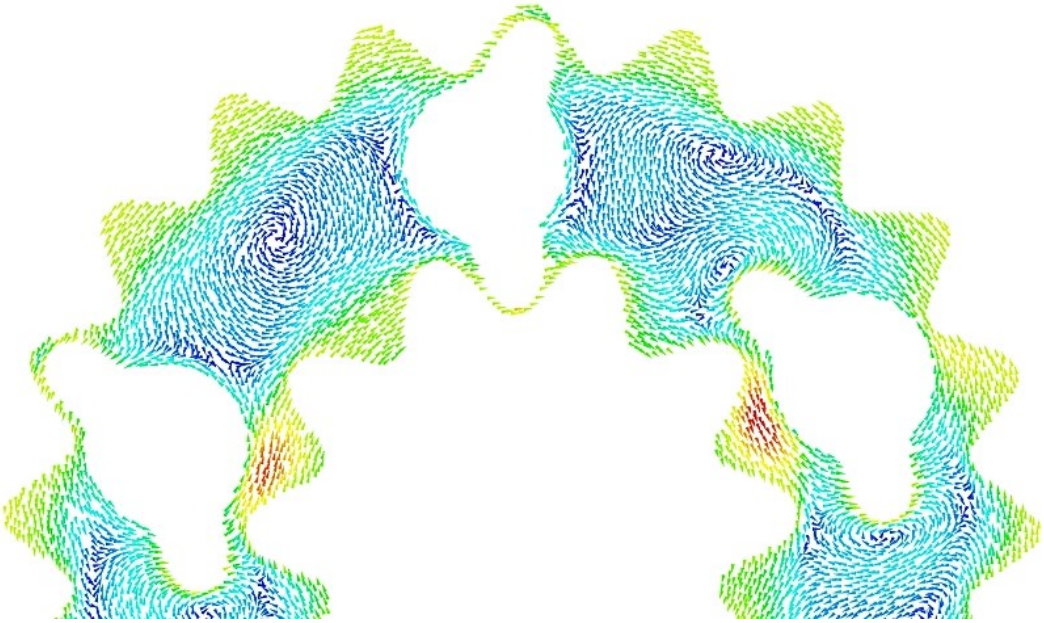

Abbildung 57: Strömungssimulation bei der Bestückung mit fünf TT2-Spindeln

Bei vergleichenden Betrachtungen am transparenten Modell ist die Rückstrombewegung zwischen den Spindeln deutlich sichtbar. Unter Einsatz von sechs Spindeln ist in dieser kein stationärer Bereich mehr erkennbar, die Fasern zeigen im freien Volumen chaotische Bewegungsmuster und werden häufig von den Schleppströmungen der Spindeln erfasst und durch den Walzenspalt gezwungen. Unter Einsatz von vier Spindeln ist insbesondere an längeren Fasern erkennbar, dass diese länger im freien Volumen verbleiben und seltener von den Planetspindeln erfasst werden.

6.4.2 Spindeltyp

6.4.2.1 Noppenspindeln

Bei der Verwendung von Noppenspindeln ist im Vergleich zu den anderen erprobten Spindeltypen die höchste Faserschädigung zu beobachten. Dies ist auf die scharfkantige Oberflächengeometrie dieses Spindeltyps zurückzuführen, die hohe Scherbelastungen, punktuelle Querbelastungen und eine vielfache scharfkantige Umlenkung der Fasern verursacht. Die Fasern verfangen sich in den Zähnen der Spindel, wodurch eine sehr viel stärkere Schleppwirkung in Richtung des Walzenspalts entsteht und ein höherer Schmelzeanteil durch den Walzenspalt gefördert wird. Durch diesen Mechanismus zeigen Noppenspindeln jedoch auch eine höhere Aufschmelzleistung, da sie eine erhöhte Dissipation der Antriebsleistung und einen intensiveren Kontakt des Extrudats mit den Maschinenbauteilen bewirken.

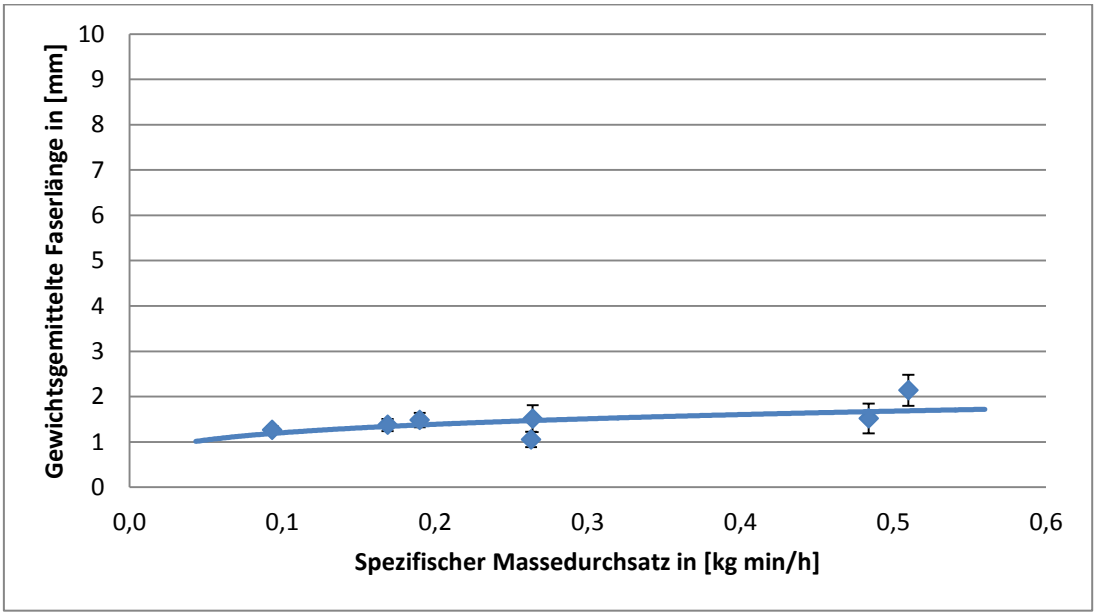

Abbildung 58: Zusammenhang zwischen spezifischen Durchsatz und gewichtsgemittelter Faserlänge bei Verwendung von vier Noppenspindeln

Unter Verwendung von vier Noppenspindeln wurden gewichtsgemittelte Faserlängen zwischen 1,0 und 2,1mm erreicht. Abbildung 59 zeigt eine für die Versuchsreihe typische Verteilung. Es ist zu erkennen, dass keine langen Glasfasern mehr in der Schmelze vorhanden sind.

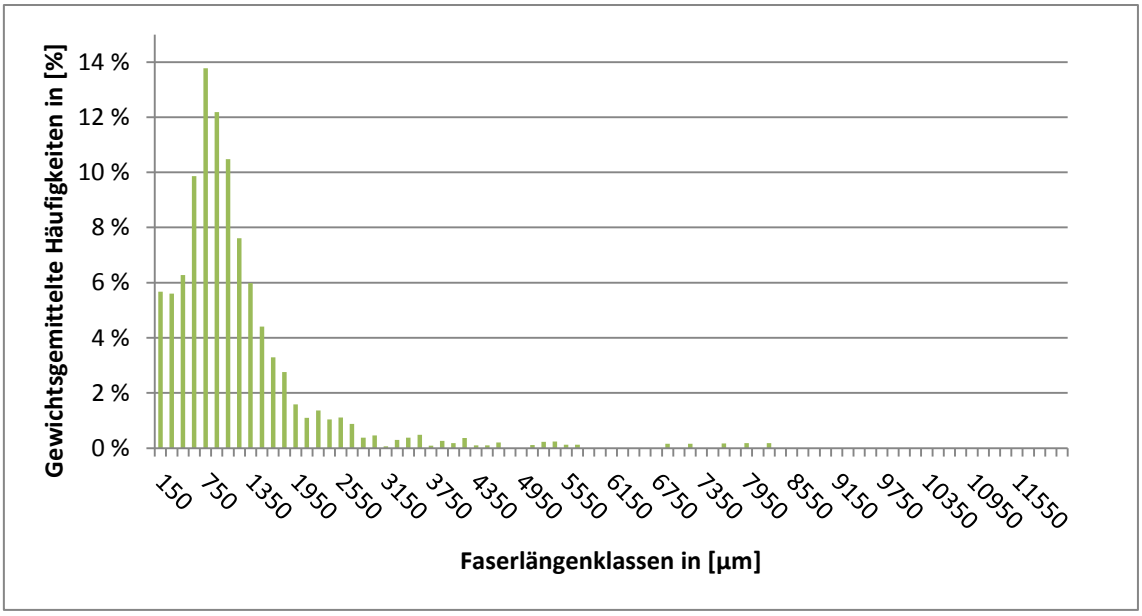

Abbildung 59: Gewichtete Faserlängenverteilung bei Verwendung von vier Noppenspindeln

6.4.2.2 Standardspindeln

Standardspindeln zeigen eine gutes Transport- und Aufschmelzverhalten bei etwas geringerer Faserschädigung im Vergleich zu Noppenspindeln. Dennoch verursacht auch dieser Spindeltyp eine intensive Faserschädigung, was auf die Umwälzbewegungen im Knet und auf den geringen Spaltquerschnitt zurückzuführen ist. Dadurch kommt es zu einem hohen mechanischen Energieeintrag in diesem Bereich.

Als Beispiel wurde hier die Konfiguration mit drei langen und drei kurzen Standardspindeln gewählt, da diese Konfiguration ein stabiles Prozessverhalten zeigt und als Standardkonfiguration des PWE angesehen werden kann. Ergebnisse zu vier Standardspindeln sind in Abbildung 54 dargestellt.

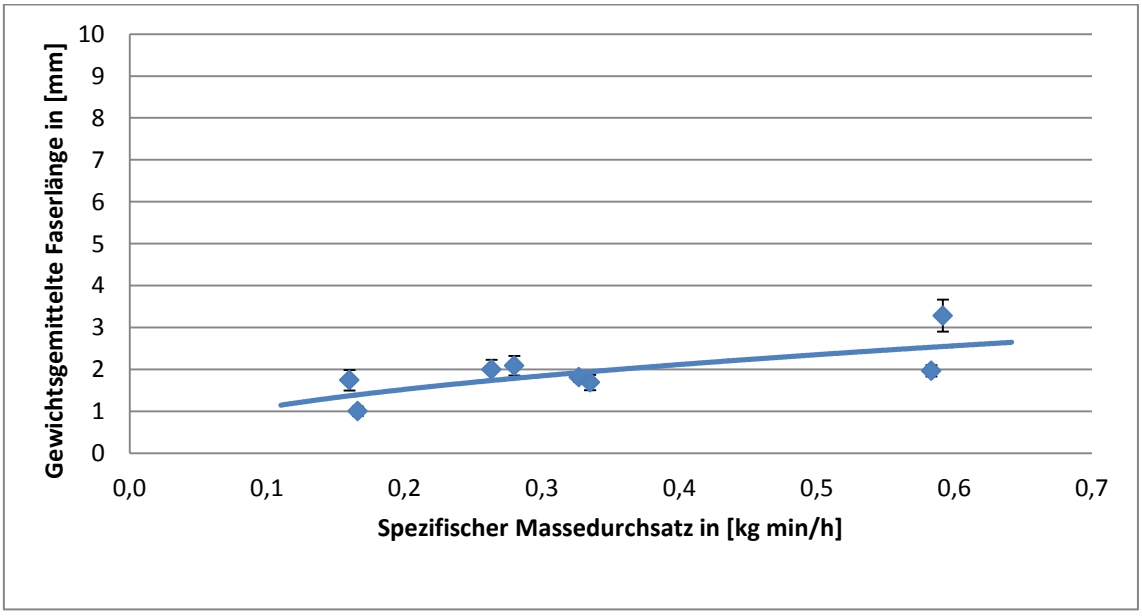

Abbildung 60: Zusammenhang zwischen spezifischem Durchsatz und gewichtsgemittelter Faserlänge bei Verwendung von sechs Standardspindeln

Unter Verwendung von sechs Standardspindeln wurden gewichtsgemittelte Faserlängen zwischen 1,0 und 3,3mm erzielt. Der Peak im 10mm-Bereich in der unten dargestellten Faserlängenverteilung lässt die etwas mildere Charakteristik der Standardspindeln erkennen, ein geringer Prozentsatz an Fasern in Ausgangslänge liegt noch im Extrudat vor.

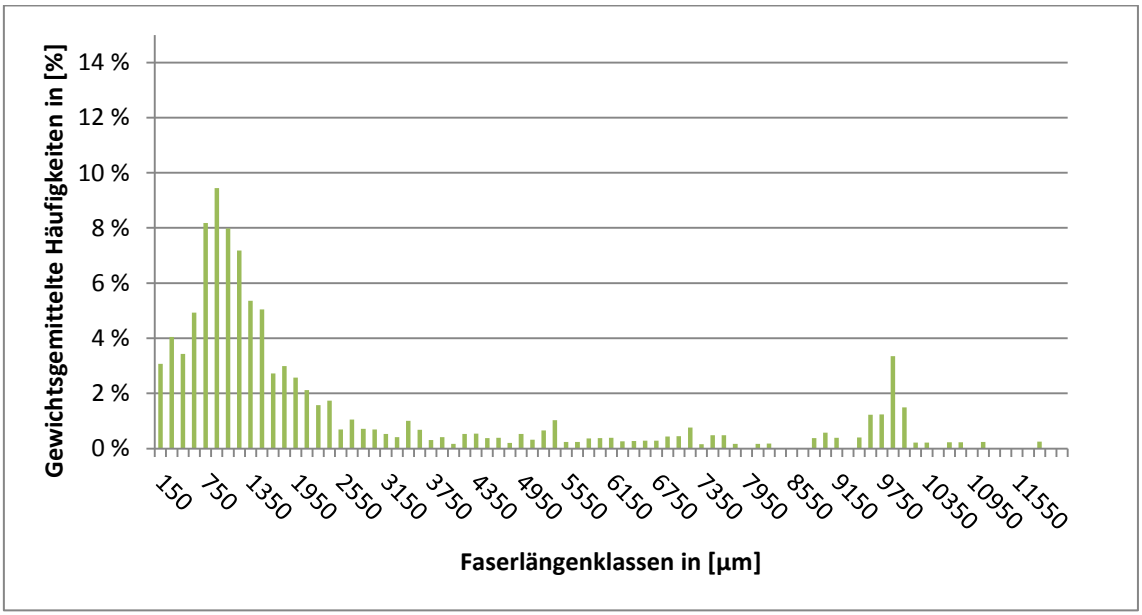

Abbildung 61: Gewichtete Faserlängenverteilung bei Verwendung von sechs Standardspindeln

6.4.2.3 Transport- und Trocknungsspindeln

Die verschiedenen TT-Spindelvarianten bewirken eine deutlich geringere Faserschädigung als die beiden zuvor genannten Spindeltypen, allerdings geht die Reduktion der Zahnanzahl auf den Spindeln mit einer niedrigeren Plastifizier- und Förderleistung des Extruders einher. Durch die Verfügbarkeit von TT-Spindeltypen mit verschiedenen Zahnanzahlen und die Möglichkeit, verschiedene Spindeltypen zu kombinieren, kann das Prozessverhalten in feinen Abstufungen auf einen entsprechenden Kompromiss eingestellt werden.

Unter Verwendung von fünf TT1-Spindeln wurden gewichtsgemittelte Faserlängen zwischen 4,3 und 5,3mm erzielt, allerdings wurde diese Konfiguration wegen zu geringer Fördersteifigkeit nicht weiter verfolgt. Als guter Kompromiss zwischen Förderverhalten und Faserschädigung stellte sich für die Extrusionsversuche die Kombination von vier TT2- und einer Standardspindel heraus, die zugehörigen Ergebnisse wurden bereits in Abbildung 50, Kapitel 6.3 dargestellt.

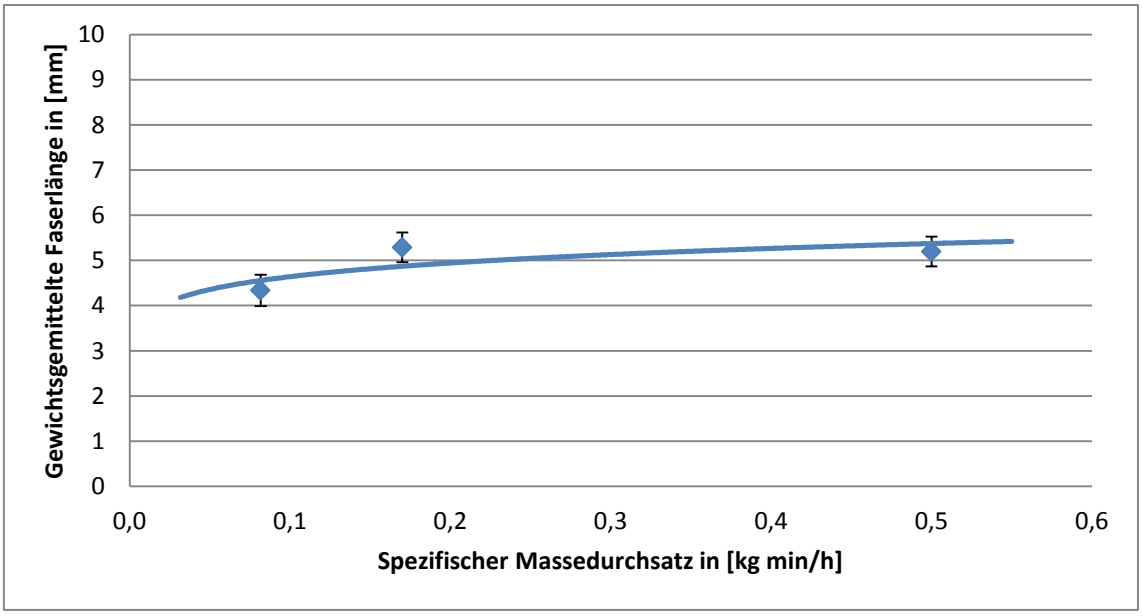

Abbildung 62: Zusammenhang zwischen spezifischem Durchsatz und gewichtsgemittelter Faserlänge bei Verwendung von fünf TT1-Spindeln und einer 10mm-Düse

Bei der Betrachtung der Faserlängenverteilung werden die Unterschiede im Schädigungsverhalten der TT-Spindeln deutlich. Es ist ein deutlicher Peak im Längenbereich von 10mm vorhanden, was darauf hinweist, dass ein Anteil der im Extrudat enthaltenen Fasern den Verarbeitungsprozess unbeschadet durchlaufen hat. Ebenfalls auffällig ist das geringe Vorkommen von Faserlängen von weniger als 1mm. Wo die Standard- und Noppenspindeln den Hauptanteil der Faserlängenverteilung zeigen, ist bei TT-Spindeln kein ausgeprägter Peak erkennbar.

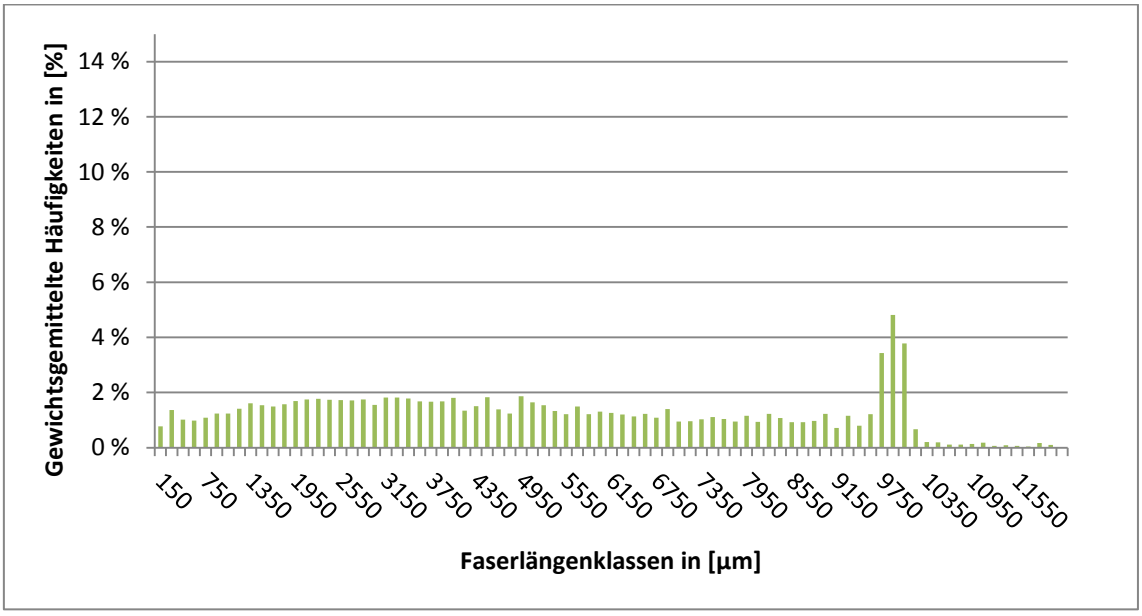

Abbildung 63: Gewichtete Faserlängenverteilung bei Verwendung von fünf TT1-Spindeln und einer 10mm-Düse

Die schädigungsarme Plastifizierwirkung der TT-Spindeln ist auf ein verändertes Transportverhalten aufgrund ihrer Geometrie zurückzuführen. Durch die partielle Entfernung der Verzahnung auf den Spindeln wird der in Kapitel 6.2.2 beschriebene Spaltquerschnitt stark vergrößert (siehe Abbildung

83, Kapitel 13.5), wodurch das Extrudat beim Spaltdurchtritt entsprechend geringere mechanische Belastungen erfährt. Betrachtet man den spezifischen mechanischen Energieeintrag (Abbildung 64), ist zu erkennen, dass dieser abnimmt, je geringer die Verzahnungsanzahl und je höher der spezifische Massedurchsatz ist.

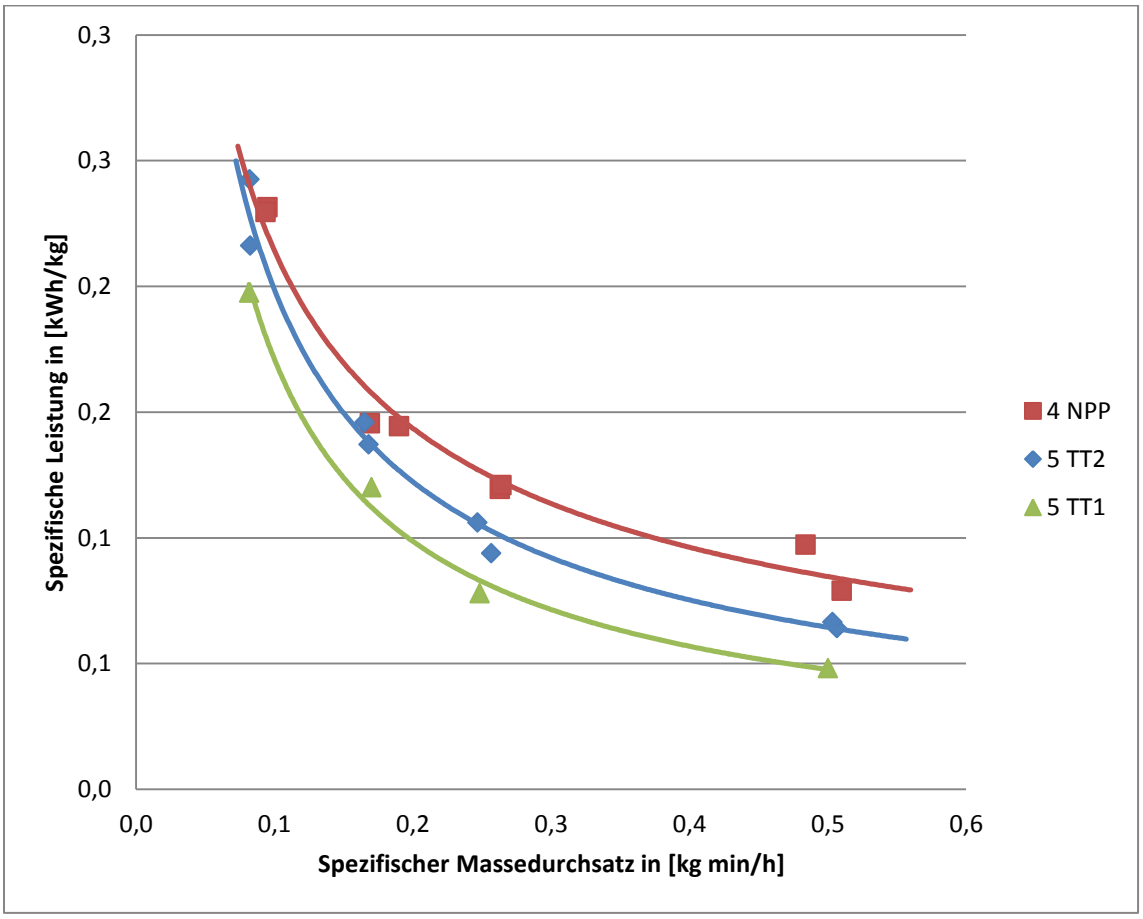

Abbildung 64: Energieeintrag über Antriebsleistung bei verschiedenen Spindelkonfigurationen

Fehlen ausreichend Zähne auf der Spindel, führt dies im teilgefüllten Bereich zum Ausbleiben eines Knets vor der Spindel. Stattdessen sammelt sich die Schmelze spiralförmig auf dem Kern der Planetspindeln und nimmt dort jene Volumina ein, die durch die fehlenden Anteile der Verzahnung freigegeben werden. Das Extrudat bleibt dadurch lange in Kontakt mit den Planetspindeln, wodurch es viel Wärmeenergie von der Spindel aufnimmt und dennoch nur geringste mechanische Belastungen erfährt.

Dieses Phänomen ist auf den folgenden Abbildungen erkennbar. Hier wurden sowohl TT2-Spindeln (Abbildung 65, unten) als auch eine Standardspindel (Abbildung 65, oben), die gemeinsam in einem Versuch zur Farbverweilzeitbestimmung eingesetzt wurden, mitsamt der anhaftenden Schmelze gleichzeitig dem aufklappbaren Modul entnommen. Der Anfang des mit abgebildeten Maßbands entspricht dem Einlaufbereich des Planetenmoduls.

Abbildung 65: Unterschiedliche Schmelzeanlagerung auf TT2- und Standardspindel

Der Standardspindel haftet über die gesamte Länge nur wenig Schmelze an. Bereits nach ca. 5cm ab dem Einlauf sind auf der Standardspindel keine geordnet zusammenhängenden Faserbündel mehr erkennbar, die faserverstärkte Schmelze haftet als luftiges Gespinst gleichmäßig über die Gesamtlänge verteilt an der Spindel. Die Verteilung des Farbstoffs ist bereits bis zum düsenseitigen Ende der Spindel fortgeschritten und zeigt einen gleichmäßigen und flachen Gradienten entlang der Spindel. Diese Beobachtungen lassen auf eine intensive distributive und dispersive Mischwirkung und eine starke Transportwirkung der Standardspindel schließen, was mit den übrigen Ergebnissen zu diesem Spindeltyp korreliert.

Betrachtet man im Vergleich die TT2-Spindel, zeigt sich ist eine durchgehende, überwiegend kompakte Anhaftung von Extrudat über die gesamte Länge, die sich größtenteils in den von der reduzierten Verzahnung freigegebenen Volumina befindet. Die farbstoffhaltige Schmelze ist auf dieser Spindel deutlich weniger weit fortgeschritten, zusätzlich ist eine inhomogene Verteilung des Farbstoffes erkennbar. Betrachtet man die TT2-Spindeln näher (Abbildung 66), sind auch ca. 25cm nach dem Moduleinlauf, im Übergang zum vollgefüllten Bereich, noch im Ausgangszustand zusammenhängende Faserbündel zu finden, deren Matrix jedoch vollständig aufgeschmolzen ist. Die Vereinzelung der Fasern findet in diesem Fall erst durch die Schmelzezirkulation im vollgefüllten Bereich statt, die Untersuchung der Proben aus dem laufenden Prozess zeigte keine auffällige Inhomogenität des Extrudats. Daher kann davon ausgegangen werden kann, dass eine ausreichende Homogenisierung stattgefunden hat.

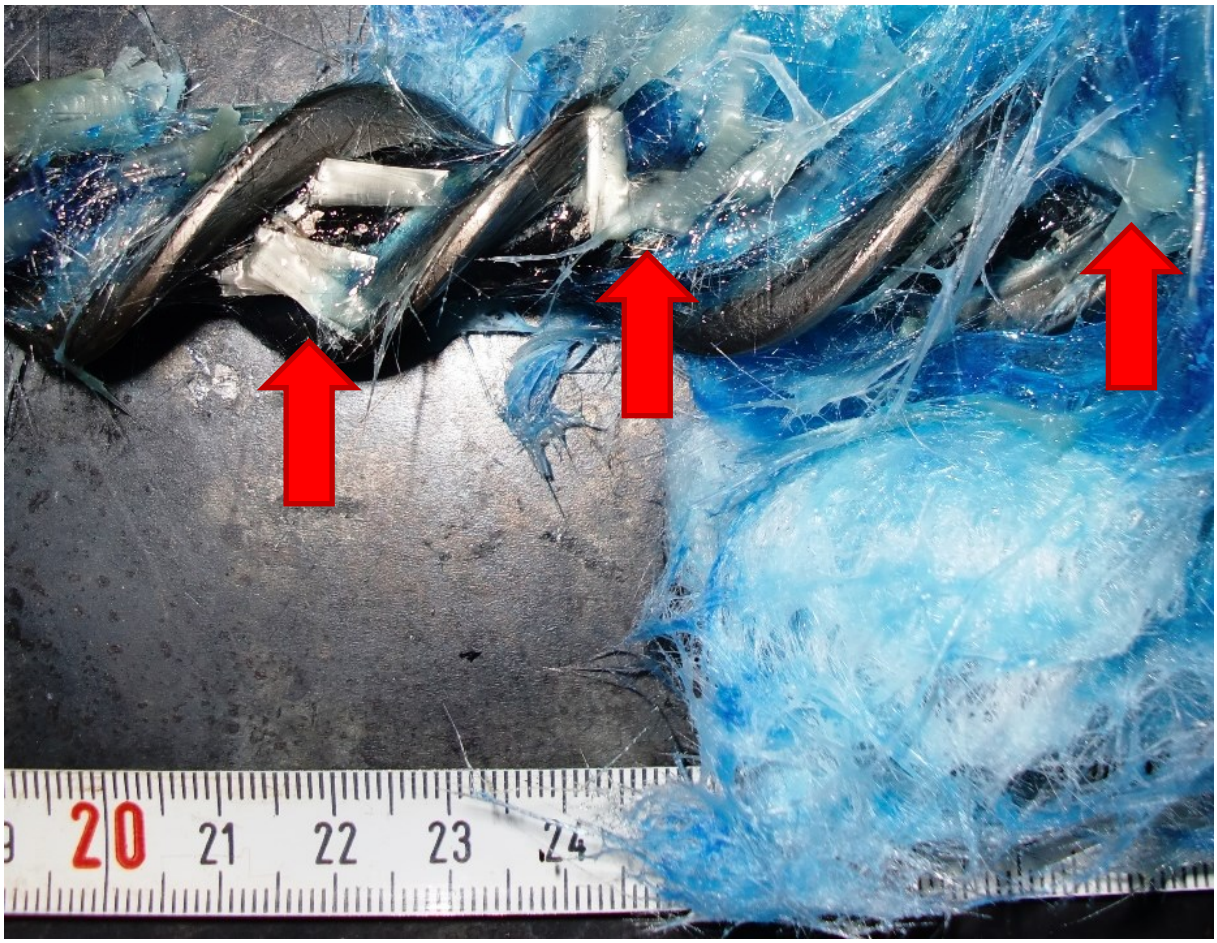

Abbildung 66: Aufgeschmolzene, zusammenhängende Faserbündel im Übergang zum vollgefüllten Bereich

Die obigen Betrachtungen zeigen, dass der Einsatz von TT-Spindeln sowohl die Möglichkeit bietet, den Energieeintrag über dissipierte Antriebsleistung auf ein geringes Maß zu reduzieren, als auch den Zeitpunkt des mechanischen Energieeintrages in die Schmelze für die schädigungsarme Verarbeitung von Langglasfasern günstig zu beeinflussen. Dies geht jedoch durch die verringerte Förderwirksamkeit mit einer starken Verbreiterung des Verweilzeitspektrums einher. Auch das Selbstreinigungsverhalten der Anlage wird dadurch beeinträchtigt.

6.5 Faserausgangslänge

Um eine möglichst hohe mittlere Faserlänge im Extrudat zu erreichen, ist ein naheliegender Ansatz, Fasern mit einer größeren Ausgangslänge zu verarbeiten. Es wurden Vergleichsuntersuchungen zwischen den in Kapitel 5.2.6 beschriebenen LFT-Granulaten mit 10mm und 25mm Ausgangslänge unter Verwendung von vier TT2- und einer Standardspindel mit einer 10mm-Düse durchgeführt.

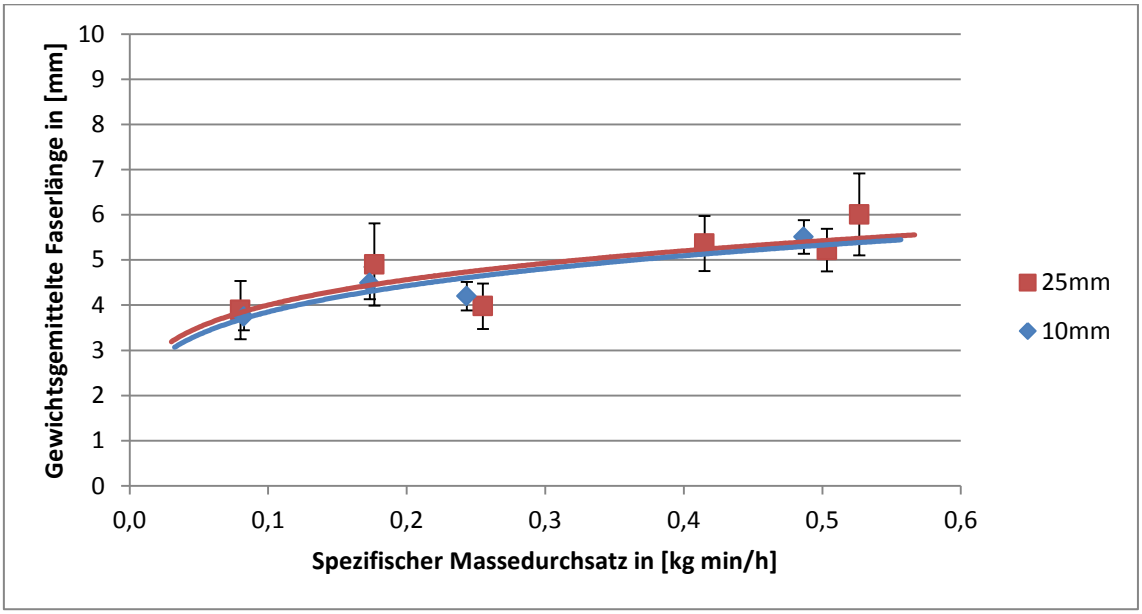

Abbildung 67: Vergleich der gewichtsgemittelten Faserlängen bei 10mm und 25mm Faserausgangslänge

Es ergibt sich, dass trotz der deutlich unterschiedlichen Faserausgangslängen die resultierenden gewichtsgemittelten Faserlängen quasi identisch sind. Das Granulat mit 25mm Ausgangslänge zeigt jedoch ein schwierigeres Verarbeitungsverhalten, was eine größere Streubreite der zugehörigen Messpunkte bewirkt. Das Antriebsdrehmoment des Extruders zeigte bei dieser Versuchsreihe höhere Mittelwerte mit sehr starken Schwankungen. Auch die Vorlauftemperatur der Heizaggregate musste deutlich höher gewählt werden, um die Schmelze-Solltemperatur zu erreichen.

Bei der Betrachtung der Faserlängenverteilungen der beiden Granulattypen wird deutlich, dass sich trotz sehr ähnlicher Mittelwerte die Faserlängenverteilung im Extrudat grundlegend unterscheidet. Dies ist auf ein unterschiedliches Prozess- und Schädigungsverhalten aufgrund der Ausgangslänge zurückzuführen.

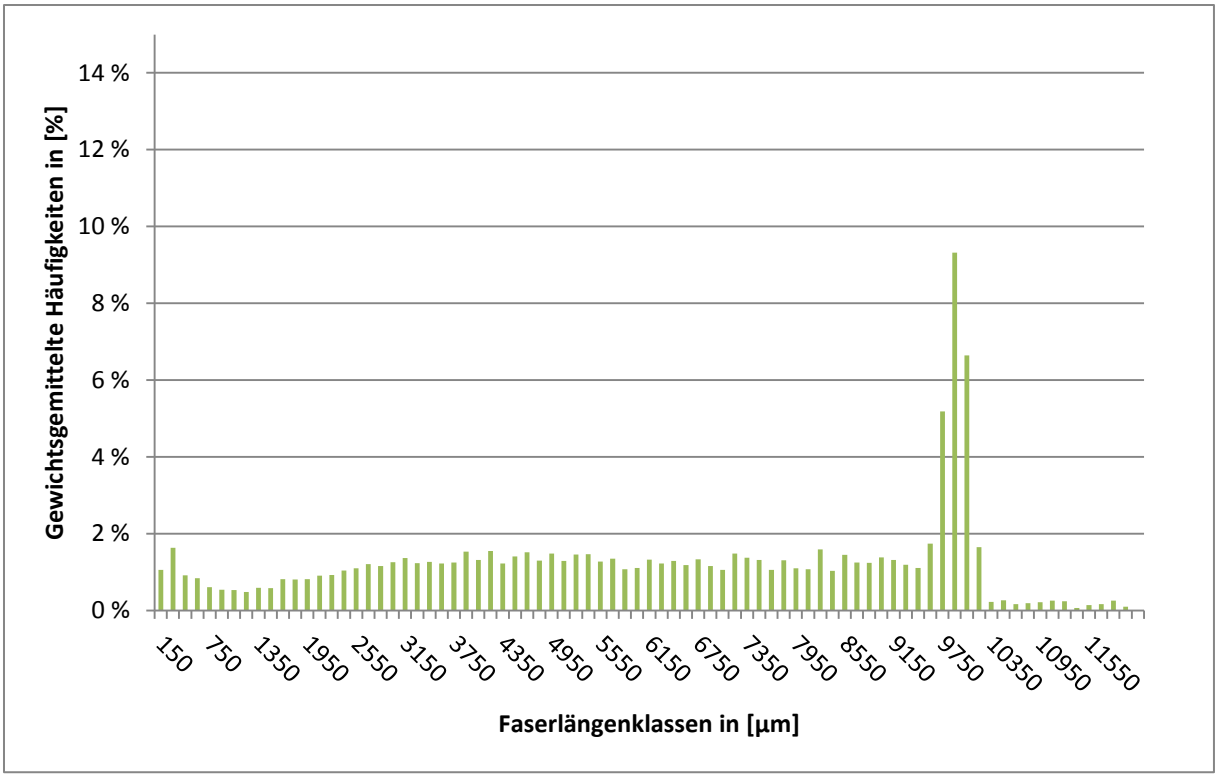

Abbildung 68: Faserlängenverteilung zu 10mm Faserausgangslänge, gewichtsgemittelte Faserlänge 5,5mm, spezifischer Massendurchsatz 0,49 kg min/h

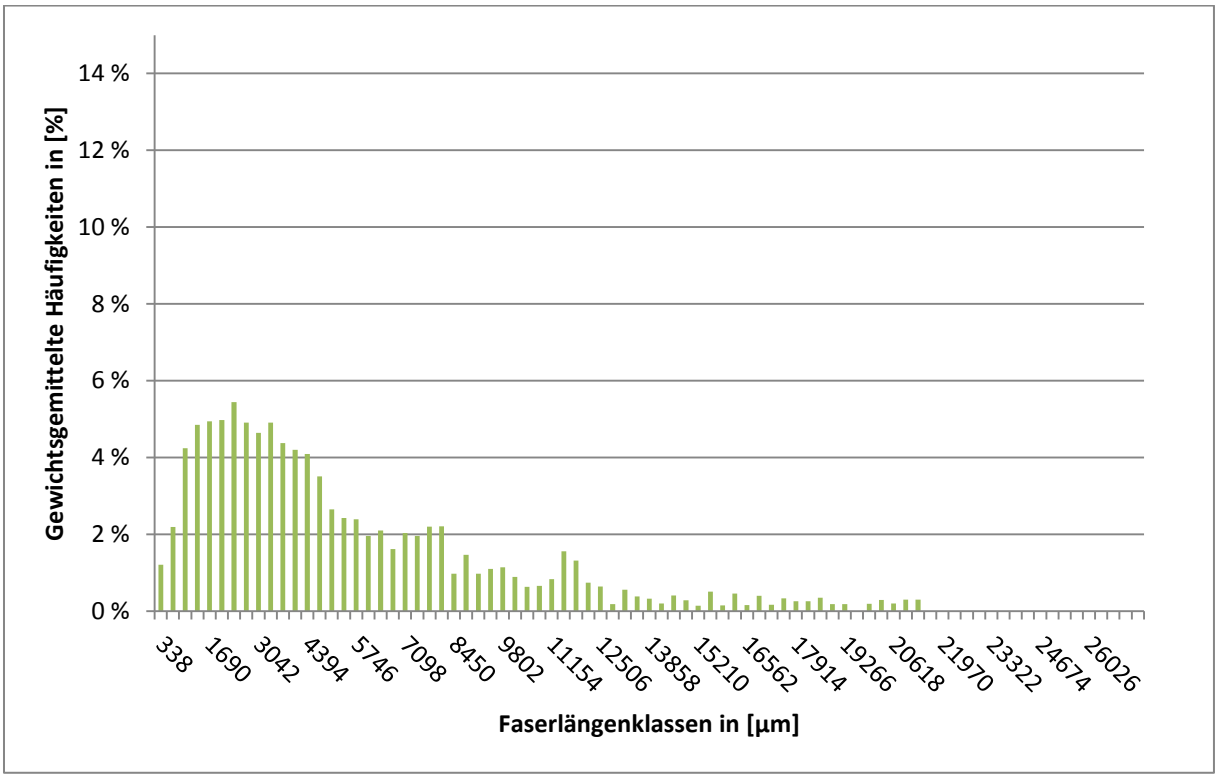

Abbildung 69: Faserlängenverteilung zu 25mm Faserausgangslänge, gewichtsgemittelte Faserlänge 5,2mm, spezifischer Massedurchsatz 0,5 kg min/h

Die Faserlängenverteilung des 10mm-Granulats (Abbildung 68) zeigt auch hier einen geringen Faserfeinanteil und einen deutlichen Anteil an Fasern, die den Prozess unbeschadet durchlaufen haben. Unter Verwendung des Granulats mit 25mm Ausgangslänge ist ein sehr viel höherer Faserfeinanteil im Extrudat erkennbar, ungeschädigte Fasern sind dagegen nicht vorhanden. Zwar zeigt sich ebenfalls ein schwach ausgeprägter Peak im Längenbereich zwischen 10 und 12mm, insgesamt ist jedoch festzustellen, dass die enthaltenen Fasern aufgrund ihrer größeren Ausgangslänge eine überproportional höhere Schädigung erfahren.

Dies ist auf eine schlechtere geometrische Kompatibilität des langen Granulates mit dem WE70-Extruder zurückzuführen, auch die in Kapitel 6.4.2.3 beschriebenen positiven Effekte der TT-Spindeln kommen dadurch weniger zum Tragen. Das 25mm-Granulat kann sich aufgrund seiner Länge schlechter am Kern der TT-Spindeln anlagern, wird stattdessen abgelöst, häufiger umgewälzt und stärker mechanisch belastet. Die Betrachtung des Prozesses mit Hilfe des aufklappbaren Moduls zeigt, dass die Faserbündel dadurch wesentlich früher aufgespalten werden. Am Übergang in den vollgefüllten Bereich konnten nur vereinzelt zusammenhängende Faserbündel gefunden werden. Der schwächer ausgeprägte Kontakt zu den Spindeln führt auch zu einer geringeren Wärmeübertragung, was erklärt, weshalb eine höhere Extrudertemperatur benötigt wird, um die Schmelzesolltemperatur zu erreichen.

6.6 Anlaufplatte

Bei der Betrachtung des vollgefüllten Bereichs entstand die Vermutung, dass an der Anlaufplatte des Extruders eine hohe Faserschädigung auftritt, da es in dieser Zone zu intensiven Umlenkungen der Schmelze kommt. Jener Anteil der Schmelze, der im Bereich zwischen einer Planetspindel und dem Zylinder gefördert wird, kann das System nicht direkt verlassen und wird in den Rückstrom gefördert.

Um die Faserschädigung in diesem Prozessabschnitt abzumildern, wurde eine modifizierte Anlaufplatte konstruiert (siehe Kapitel 3.3) und sowohl mit 10mm- als auch mit 25mm-Granulat erprobt.

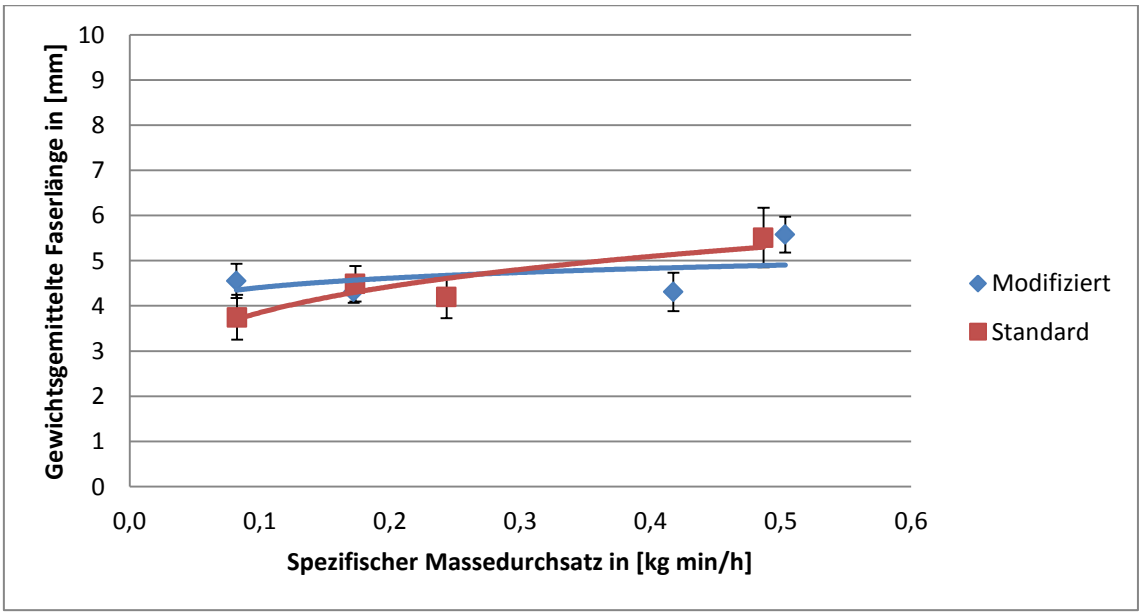

Abbildung 70: Vergleich der Anlaufelemente bei 10mm Faserausgangslänge

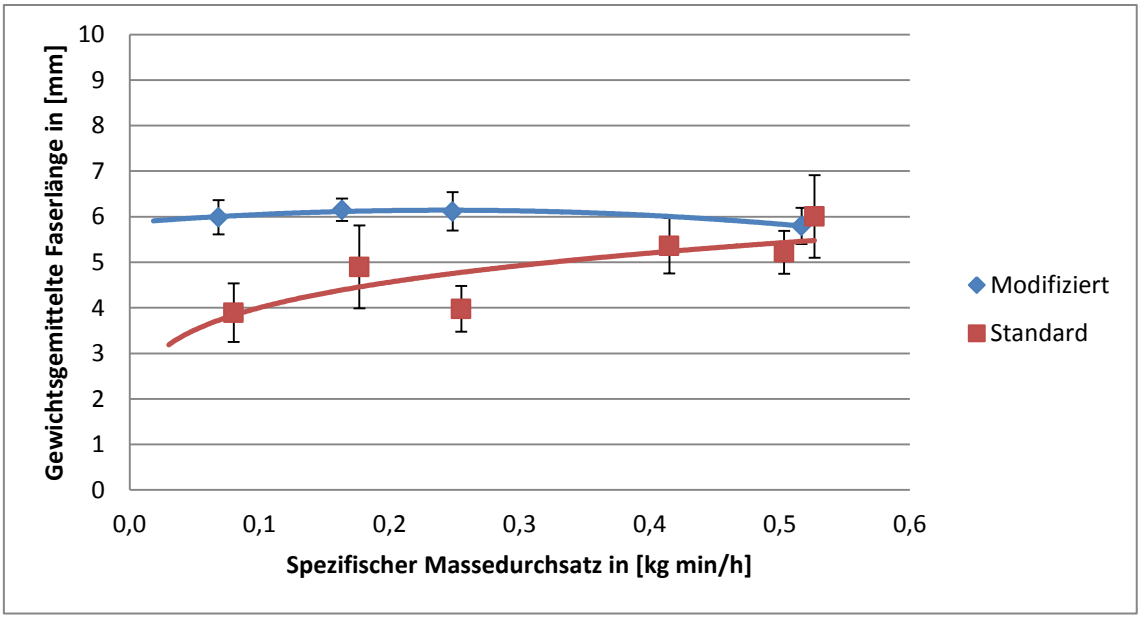

Abbildung 71: Vergleich der Anlaufelemente bei 25mm Faserausgangslänge

Unter Verwendung des 10mm-Granulats zeigt der modifizierte Anlaufring keine signifikanten Effekte auf die Faserschädigung, auch die Betrachtung der sich ergebenden Faserlängenverteilungen zeigt vergleichbare Ergebnisse zu dem herkömmlichen Anlaufelementes (Abbildung 70).

Anders stellen sich die Ergebnisse bei der Verwendung von 25mm-Granulat dar (Abbildung 71), hier zeigt der geänderte Anlaufring eine geringere Faserschädigung bei niedrigen spezifischen Massedurchsätzen. Die Streuung der Messwerte ist geringer als bei den mit dem herkömmlichen Anlaufring ermittelten Vergleichswerten, was auf ein stabileres Prozessverhalten schließen lässt. Positive Effekte sind auch bei der Betrachtung der Faserlängenverteilung erkennbar. Im Gegensatz zu dem in Abbildung 69 gezeigten Diagramm sind in Abbildung 72 vereinzelt Faseranteile im Längenbereich zwischen 20 und 26mm verzeichnet.

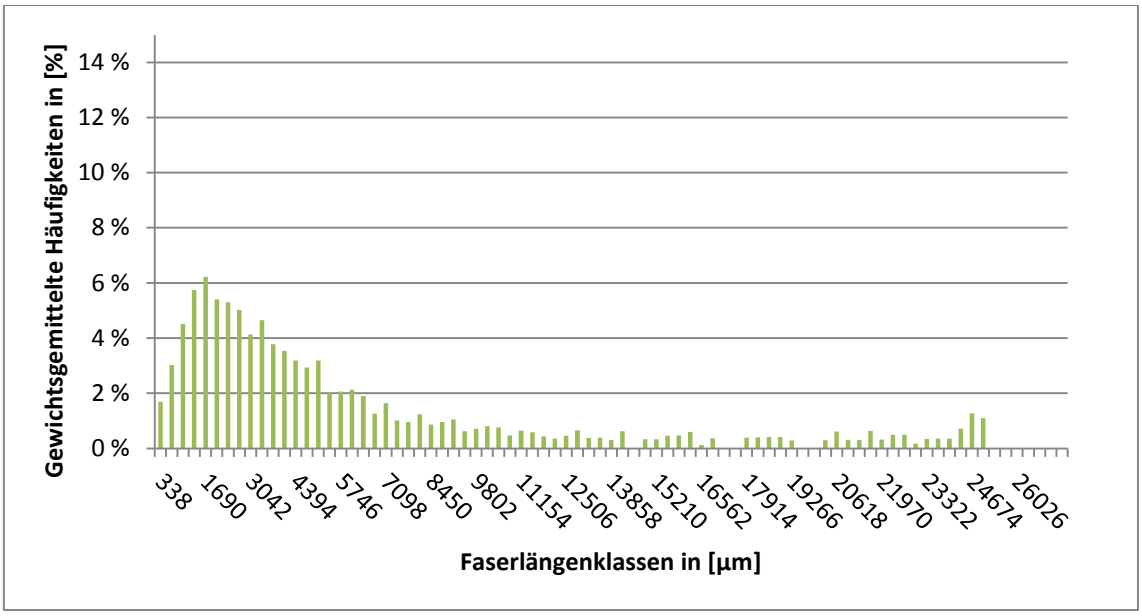

Abbildung 72: Faserlängenverteilung bei 25mm Faserausgangslänge unter Verwendung des geänderten Anlaufringes

6.7 Spritzgussversuche

Die Versuchsanlage wurde wie in Kapitel 3.1 beschrieben mit dem Schmelzespeichermodul ergänzt und auf diesem Wege aus dem Extrudat in einer Wärme spritzgegossene Platten hergestellt. Bei diesen Versuchen wurden beide zuvor beschriebenen Granulatlängen erprobt, jedoch unter Verwendung des Standard-Anlaufrings.

Die für Extrusionsversuche gut geeignete Bestückung des Planetmoduls mit vier TT2- und einer Standardspindel zeigte eine für diese Anwendung zu geringe Förderwirksamkeit, da bei diesem Versuchsaufbau durch das angeschlossene Speichersystem ein höherer Werkzeugwiderstand zu überwinden ist. Bei der Betrachtung des Prozesses mit Hilfe des aufklappbaren Moduls wurde festgestellt, dass die Rückstaulänge bei angeschlossenem Speichersystem das gesamte Modul und noch einen kurzen Bereich der Einzugszone einnimmt, wodurch sich eine sehr hohe Faserschädigung ergibt. Am Speicheraustritt wurden mit dieser Konfiguration gewichtsgemittelte Faserlängen zwischen 1,3mm und 2mm erreicht.

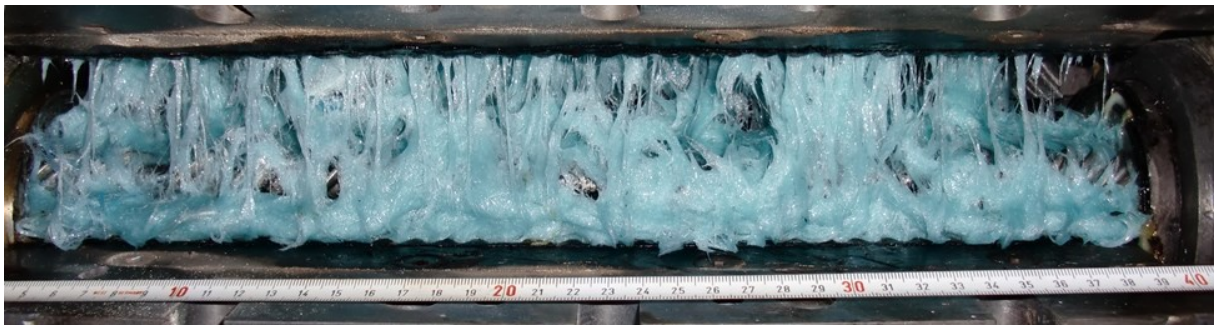

Abbildung 73: Überhöhter Füllgrad des Moduls bei Verwendung von fünf TT2-Spindeln und einer Standardspindel bei angeschlossenem Schmelzespeichersystem

Als geeignete Konfiguration für diesen Versuchsaufbau stellte sich die Kombination von drei TT2-Spindeln und drei Standardspindeln bei einer Extruderdrehzahl von 60 min^{-1} und einem Massedurchsatz von $15^{kg}/_{h}$ heraus. Anders als bei den zuvor beschriebenen Extrusionsversuchen mit unterschiedlichen Granulatlängen gleichen sich die Faserlängenverteilungen in den spritzgegossenen Platten sehr viel stärker. Bei 10mm Faserausgangslänge wurde in den Spritzgussplatten eine gewichtsgemittelte Faserlänge von 2,6mm und bei 25mm Faserausgangslänge 3,0mm erreicht.

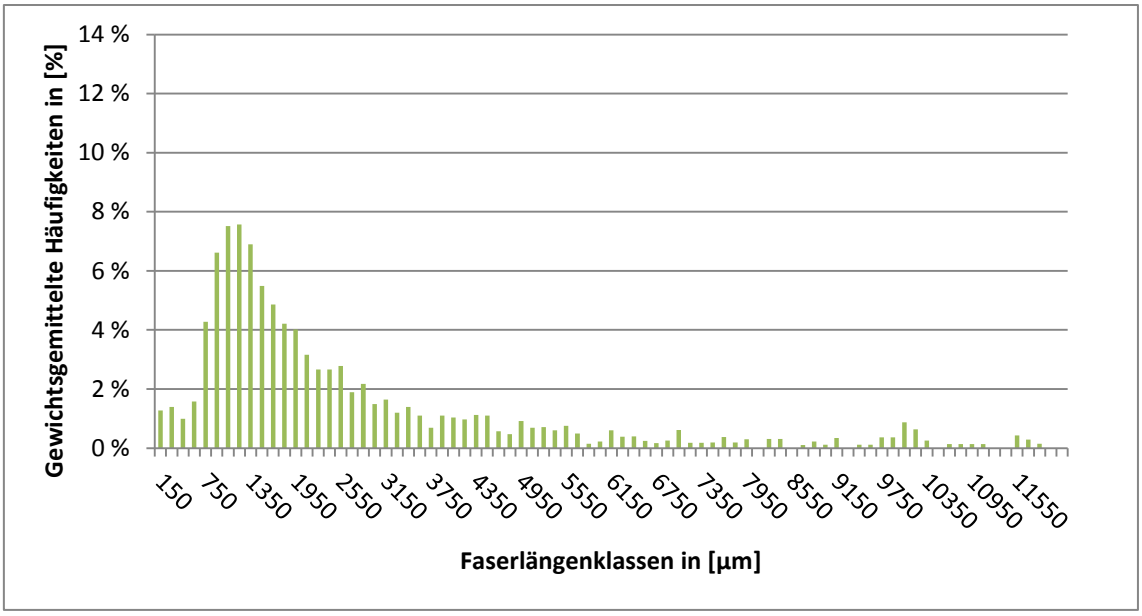

Abbildung 74: Gewichtete Faserlängenverteilung der spritzgegossenen Platten bei 10mm Faserausgangslänge

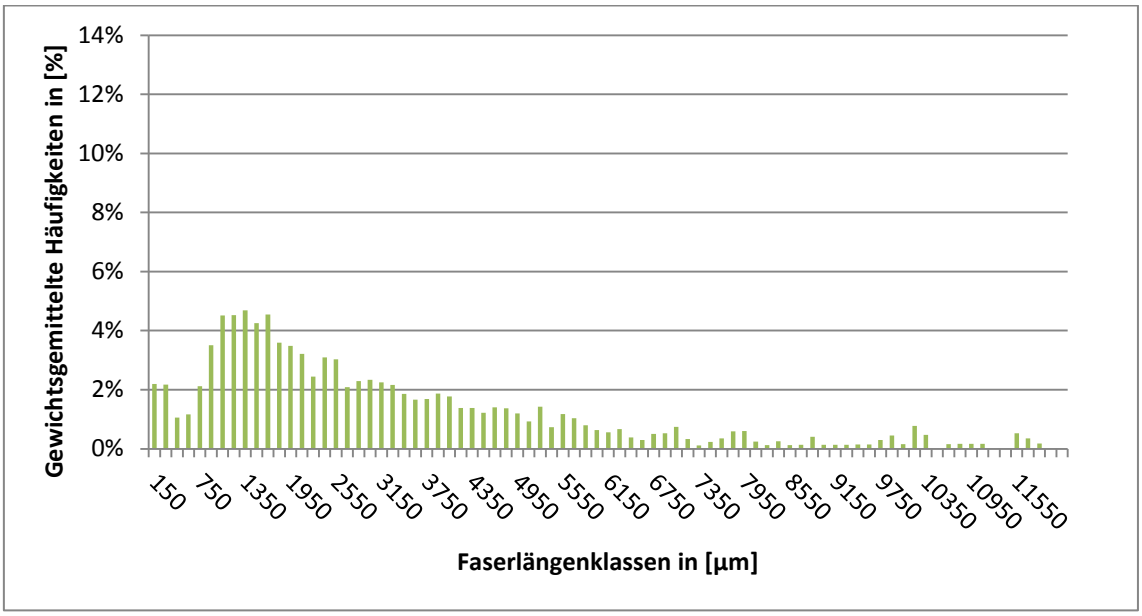

Abbildung 75: Gewichtete Faserlängenverteilung der spritzgegossenen Platten bei 25mm Faserausgangslänge

6.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die zusammengetragenen Versuchsergebnisse bestätigen die Abhängigkeit der Faserschädigung im Planetwalzenextruder vom mechanischen Energieeintrag in die Schmelze.

Die Spindelkonfiguration und der sich daraus ergebende Spaltquerschnitt zwischen Planetspindeln, Zentralspindel und Zylinder spielen dabei eine entscheidende Rolle. Mit zunehmendem Spaltquerschnitt nimmt die Faserschädigung beim Spaltdurchtritt ab. Wird beim einzelnen Spaltdurchtritt weniger Schädigung verursacht, wirkt sich dies entsprechend positiv auf die Faserschädigung im gesamten Prozess aus.

Die Faserschädigung steigt demzufolge mit einer zunehmenden Anzahl an Spaltdurchtritten. Dieser Faktor spiegelt sich im Verweilzeitspektrum der Schmelze wieder, das sich aus dem Zusammenspiel von Rückstaulänge und spezifischem Massedurchsatz im Modul ergibt.

Wird die Rückstaulänge bei gleich bleibendem spezifischen Massedurchsatz erhöht, ergibt sich eine erhöhte Verweilzeit und die Faserschädigung nimmt zu. Dieser Zusammenhang ist besonders deutlich in Kapitel 6.3 ersichtlich.

Wird der spezifische Massedurchsatz bei gleichbleibender Rückstaulänge erhöht, verringert sich die Verweilzeit und die Faserschädigung nimmt ab. Dieser Zusammenhang ist in allen Diagrammen in diesem Kapitel, die eine Abhängigkeit zum spezifischen Massedurchsatz darstellen, ersichtlich. Die Steigerung des spezifischen Massedurchsatzes zeigt stets eine Zunahme der gewichtsgemittelten Faserlänge.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Länge des vollgefüllten Bereichs und die Vorgänge in dieser Zone das Prozessverhalten des Planetwalzenextruders entscheidend beeinflusst. Die Funktion des teilgefüllten Bereichs ist dabei jedoch nicht zu vernachlässigen, denn insbesondere bei der Verwendung von TT-Spindeln ist ein entscheidender Anteil des Wärmeenergie-Eintrags auf diese Zone zurückzuführen. Durch die Variation der Spindelkonfiguration wird das Transport- und Prozessverhalten im Modul beeinflusst, wodurch die Positionen und Effekte des Eintrages von mechanischer Energie und Wärmeenergie verändert werden. Bei dem in dieser Arbeit betrachteten Prozess konnte auf diesem Weg erreicht werden, dass das Faser-Matrix-Granulat zunächst durch Wärmeenergieeintrag aufgeschmolzen und erst dann durch mechanischen Energieeintrag durchmischt wird. Dadurch wird eine schonende Verarbeitung in Hinblick auf die enthaltenen Glasfasern erreicht.

7 Fazit

Aufbauend auf der Beschreibung der Vorgänge im Planetwalzenextruder können die in dieser Arbeit vorgestellten Konstruktionen und Versuchsaufbauten als Machbarkeitsstudie verstanden werden, um aufzuzeigen, ob der Planetwalzenextruder eine zweckmäßige Basis für derartige Anwendungen bietet. Aufgrund der Vielschichtigkeit der Problemstellung soll im Folgenden zunächst getrennt auf den LFT-Extrusionsprozess und die Speicherkonstruktion eingegangen werden, um abschließend im Ausblick Ansätze für nachfolgende Untersuchungen zu geben.

7.1 Verarbeitung von LFT-Materialien auf dem Planetwalzenextruder

Die vorliegende Arbeit soll die Fragestellung beantworten, ob der Planetwalzenextruder ein für die Verarbeitung von LFT-Materialien geeignetes Konzept darstellt und ob damit bessere Ergebnisse erzielt werden können als mit den für diese Anwendung etablierten Schneckenmaschinen.

Die Versuchsergebnisse lassen darauf schließen, dass der Planetwalzenextruder für die Verarbeitung von Langglasfasern grundsätzlich geeignet ist. Es konnte gezeigt werden, dass der Maschinentyp die Möglichkeit bietet, das Faser-Matrix-Gemisch aufzuschmelzen, zu homogenisieren und dabei die enthaltenen Fasern nur geringfügig zu schädigen.

Diese Schlussfolgerung muss jedoch relativiert werden, denn die im Prozess auftretende Faserschädigung zeigt eine starke Abhängigkeit vom Werkzeugwiderstand. In der Konfiguration mit vier TT2-Spindeln und einer Standardspindel unter Verwendung einer 10mm-Düse kann lediglich ein Werkzeugwiderstand von ca. 10bar unter Einhaltung einer akzeptablen Rückstaulänge überwunden werden – ein verschwindend kleiner Wert im Vergleich zu den üblichen Betriebsdrücken von Ein- und Doppelschneckenextrudern. Bereits eine geringe Zunahme des Werkzeugwiderstands verursacht einen sprunghaften Anstieg der Faserschädigung durch eine erhöhte Rückstaulänge im Modul, wie an den Ergebnissen in Kapitel 6.3 ersichtlich ist.

Grundsätzlich ist der Planetwalzenextruder durchaus in der Lage, einen deutlich höheren Extrusionsdruck aufzubringen. Eine Voraussetzung dafür ist jedoch der Einsatz einer entsprechenden Spindelkonfiguration und der Betrieb mit höheren Drehzahlen. Beide genannte Aspekte gehen jedoch mit einer Steigerung der Faserschädigung einher und sind somit hier nicht zielführend.

Aufgrund dieses eingeschränkten Prozessfensters ist fraglich, ob und inwieweit das günstige Glasfaser-Schädigungsverhalten des Planetwalzenextruders industriell genutzt werden kann, denn nach aktuellem Stand der Erkenntnisse kommen nur Anwendungen mit minimalen Anforderungen hinsichtlich des Förderdrucks in Frage. Mögliche Herangehensweisen, um diesen Einschränkungen zu begegnen, werden in Kapitel 7.3 erläutert.

7.2 Schmelzespeichersystem

Wird der Planetwalzenextruder mit dem beschriebenen Speichersystem ergänzt, bewirkt dies eine Erhöhung des Werkzeugwiderstands um ca. 10bar im Vergleich zu den Extrusionsversuchen. Wie in Kapitel 6.7 erwähnt, muss dementsprechend eine Spindelkonfiguration mit ausreichendem Förderverhalten gewählt werden, was mit einer Erhöhung der Faserschädigung einhergeht. Dennoch konnten spritzgegossene Platten mit einer mittleren gewichteten Faserlänge von ca. 3mm hergestellt werden, womit die Versuchsanlage ein vergleichbares Ergebnis zu der Verarbeitung von pultrudiertem LFT-Granulat auf einer konventionellen Spritzgussmaschine erreicht (vgl. Abbildung 8, Kapitel 2.1.3). Das Ziel, diesen Wert mittels der alternativen Aufschmelzmethode zu übertreffen, wurde nicht erreicht.

Die Erprobung des Speichersystem-Prototyps verlief erfolgreich mit durchweg positiven Ergebnissen. Der Speichervorgang selbst scheint nur einen geringen Anteil zur Gesamtfaserschädigung beizutragen. Die in Kapitel 3.1.1 aufgestellten Anforderungen wurden erfüllt.

Das Schmelzespeichersystem stellt eine nützliche Erweiterung für den Planetwalzenextruder dar, denn es ist nicht ausschließlich für die Verarbeitung von LFT-Materialien einsetzbar, prinzipiell kann es für beliebige Compounds eingesetzt werden. Zwar ist aufgrund der Betriebspunktabhängigkeit einer Pinole bei Extrudaten unterschiedlicher Viskosität mit einem veränderten Strömungsbild im Verteiler zu rechnen, dieser wird dennoch das FIFO-Kriterium im Speicher erfüllen, welches das Hauptziel dieser Bauweise ist.

Das Speichersystem ist damit eine wertvolle Ergänzung des Labor- und Technikumsbetriebs, da es beispielsweise das Abmustern von Prüfkörpern im Zuge einer Rezepturentwicklung in einem Prozess ermöglicht. Dadurch entfällt der Schritt des Granulierens und des Wiederaufschmelzens in der Spritzgussmaschine, wodurch einerseits das Material geschont und andererseits Zeit- und Kosteneinsparungen ermöglicht werden.

7.3 Ausblick

Um den Umfang der durchgeführten Untersuchungen in einem zu bewältigenden Rahmen zu halten, musste auf die Variation der Faser-Matrix-Kombination und der Materialzufuhr verzichtet werden. Insbesondere die Erkenntnisse zu den TT-Spindeltypen und das kritische Prozessverhalten des 25mm-Granulats legen jedoch die Vermutung nahe, dass eine getrennte Zugabe von Fasern und Matrix auch im Planetwalzenextruder eine betrachtenswerte Alternative darstellt. Dabei scheint das Einbringen der Fasern direkt vor der Übergangszone in den vollgefüllten Bereich sinnvoll. In diesem Prozessabschnitt ist das Matrixmaterial bereits aufgeschmolzen, das Aufteilen der Faserbündel und die Homogenisierung des Gemisches finden auch bei Verarbeitung von pultrudiertem Granulat hauptsächlich erst im vollgefüllten Bereich statt.

Es wird vermutet, dass durch getrennte Zugabe von Fasern und Matrix insbesondere längere Fasern weniger Schädigung erfahren. Zusätzlich könnte sich die Prozessstabilität verbessern, da in jenen Bereichen, in denen das Matrixmaterial aufgeschmolzen wird, eine wesentlich aggressivere und förderwirksamere Spindelkonfiguration gewählt werden könnte. Die Entwicklung eines auf diesen Prozess spezialisierten Hybrid-Spindeltyps bietet sich dabei an. Folgender Aufbau könnte zweckmäßig sein:

- Noppen-Ausführung im Anfangsbereich, um rasches Aufschmelzen durch hohen mechanischen Energieeintrag zu erreichen
- Standardausführung im mittleren Bereich für gute Förder- und Homogenisierungsleistung
- TT2-Ausführung ab Faserzugabe für schonendes Einmischen in die Matrix

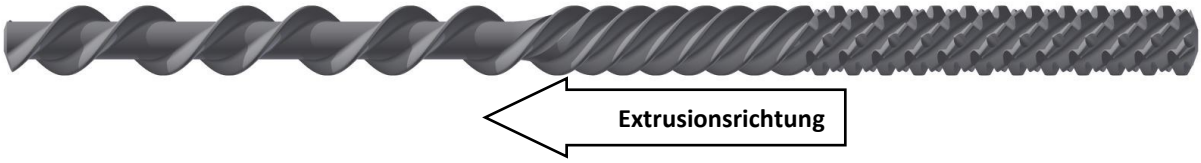

Abbildung 76: Planetspindelentwurf für die getrennte Dosierung von Fasern und Matrix

Die Einschränkungen durch die Druckempfindlichkeit des LFT-Verarbeitungsprozesses auf dem PWE konnten im Zuge der praktischen Untersuchungen zu der vorliegenden Arbeit nicht mehr verbessert werden, da zu diesem Zweck umfangreiche bauliche Veränderungen an der Versuchsanlage notwendig gewesen wären. Einige der in Betracht gezogenen Möglichkeiten sollen hier noch abschließend erwähnt werden.

Die Hauptursache für den Werkzeugwiderstand des Schmelzespeichers ist der Pinolenverteiler. Dieser könnte durch einen einfacheren Ringverteiler ersetzt werden. Durch diese Bauweise würde sich vermutlich das Ausspülverhalten des Speichers verschlechtern, der Werkzeugwiderstand könnte jedoch erheblich reduziert werden. Zusätzlich ist diese Bauweise einfacher zu fertigen und ermöglicht einen kompakteren Aufbau des Systems unter Beibehaltung des Speichervolumens.

Des Weiteren bietet der Prototyp des Speichersystems ausreichend Bauraum, um die Fließkanalquerschnitte zu vergrößern. Diese könnten bei den bestehenden Komponenten von 10 auf bis zu 13mm erweitert werden, was nahezu eine Verdopplung des Querschnitts bedeutet, wodurch ebenfalls eine Verringerung des Fließwiderstandes im Speichersystem erreicht werden könnte.

Der Problematik des Werkzeugwiderstands könnte jedoch auch durch die Ergänzung des Planetwalzenextruders mit einer Austragsschnecke begegnet werden. Es wird vermutet, dass dadurch nur eine geringfügige zusätzliche Faserschädigung verursacht würde, denn Brast beschreibt in seiner Dissertation, dass in einem langsam drehenden Einschneckenextruder mit 80mm Durchmesser bei niedrigem Gegendruck nahezu keine weitere Faserschädigung auftritt, nachdem das Material vollständig aufgeschmolzen ist. [12]

Während die Kaskadenanordnung für den angestrebten Einsatzzweck aufgrund der resultierenden Bauhöhe und der Komplexität einer solchen Anlage zu unhandlich erscheint, könnte eine Inline-Anordnung (vgl. Abbildung 17 oben) eine vorteilhafte Option sein. Vermutlich würde eine kurze Austragsschnecke von etwa 2-3D ausreichen, da diese lediglich die Überwindung des geringen Werkzeugwiderstands des Speichersystems unterstützen soll. Dadurch würde die Rückstaulänge im Planetmodul minimiert, wodurch möglicherweise eine geringere Faserschädigung als durch eine Spindelkonfiguration mit entsprechender Förderwirksamkeit resultiert.

Die durchgeführten Versuche zeigen auch, dass die Einzugsschnecke der Anlage für den LFT-Verarbeitungsprozess eine untergeordnete Rolle spielt, da nur geringe Massedurchsätze gefahren wurden. Dementsprechend könnte die Einzugsschnecke von der aktuellen Länge von 5D auf 2D verkürzt oder gar vollständig eliminiert werden, um die Anlage kompakter zu gestalten.

Im Portfolio des Extruderherstellers sind Bauweisen mit kurzer Einzugsschnecke und zusätzlicher Austragsschnecke bereits vorhanden. Die angedachte Inline-Anordnung ist jedoch für den WE70 aufgrund seiner vorgesehenen Rolle als Laborextruder derzeit noch nicht verfügbar.

8 Literaturverzeichnis

[1] W. Michaeli und M. Wegener, Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1989.

[2] H. Schürmann, Konstruieren mit Faserverbundwerkstoffen, Heidelberg: Springer, 2007.

[3] J. L. Thomason und M. A. Vlug, „Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: 1. Tensile and flexural modulus," *Composites: Part A 27A,* pp. 477-484, 1996.

[4] J. L. Thomason und W. M. Groenewoud, „The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 2. Thermal properties," *Composites: Part A 27A,* pp. 555-565, Januar 1996.

[5] J. L. Thomason, M. A. Vlug, G. Schipper und H. G. L. T. Krikor, „Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: 3. Strength and strain at failure," *Composites: Part A 27A,* pp. 1075-1084, 1996.

[6] J. L. Thomason und M. A. Vlug, „Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: 4. Impact properties," *Composites: Part A 27A,* pp. 277-288, 1997.

[7] J. L. Thomason, „Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: Injection moulded long and short fibre PP," *Composites: Part A 33,* pp. 1641-1652, 2002.

[8] J. L. Thomason, „Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: 6. The properties of injection molded long fibre PP at high fibre content," *Composites: Part A 36,* pp. 995-1003, 2005.

[9] J. L. Thomason, „Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: 7. Interface strength and fibre strain in injection moulded long fibre PP at high fibre content," *Composites: Part A 38,* pp. 210-216, 2007.

[10] Ticona GmbH, *Product guide for long-fibre-reinforced thermoplastics CELSTRAN/COMPEL,* Frankfurt am Main, 2000.

[11] B. Fisa, „Mechanical Degradation of Glass Fibers During Compounding with Polypropylene," *Polymer Composites,* pp. 232-241, Oktober 1985.

[12] K. Brast, Verarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten im direkten Plastifizier-/Pressverfahren, Aachen: IKV Aachen, 2001.

[13] H.-G. Fritz und F. Truckenmüller, „Injection molding of long fiber-reinforced plastics: A comparison of extruded and pultruded materials with direct addition of roving strands," *Polymer Engineering and Science,* pp. 1316-1329, September 1991.

[14] R. Hafellner, M. Pichler, R. Wörndle, G. Steinbichler und P. Egger, „Lange Fasern Spritzgießen - Faserschädigung und Faserlängeneinfluss auf die Materialeigenschaften bei LFT," *Kunststoffe,* pp. 44-48, 2000.

[15] M. Schemme, „Langfaserverstärkte Thermoplaste," *Kunststoffe,* pp. 106-109, 8 2009.

[16] K. Friedrich, „Fracture mechanical behaviour of short fibre reinforced thermoplastics," in *Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 18, Nr. 18*, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1984.

[17] G. Stelzer, Zum Faser- und Eigenschaftsabbau bei Verarbeitung und Recycling diskontinuierlich faserverstärkter Kunststoffe, Kaiserslautern, 2002.

[18] H. L. Cox, „The elasticity and strength of paper and other fibrous materials," *British Journal of Apllied Physics,* pp. 72-79, März 1952.

[19] A. Kelly und W. R. Tyson, „Tensile properties of fibre-reinforced metals: copper/tungsten and copper/molybdenum," *Journal of Mechanics and Physics of solids,* pp. 329-350, Dezember 1965.

[20] A. Kelly, „Strong solids - fibre reinforcement," *Oxford University Press,* 1966.

[21] M. Schemme, „Langfaserverstärkte Thermoplaste - Status und Perspektiven," in *Thermoplastische Faserverbundkunststoffe*, Erlangen, LKT Universität Erlangen-Nürnberg, 2011, pp. 1-35.

[22] A. Puck, Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten, München: Carl Hanser, 1996.

[23] Ticona GmbH, *COMPEL Product Guide,* Frankfurt am Main, 2000.

[24] R. von Turkovich und L. Erwin, „Fiber fracture in reinforced thermoplastic processing," *Polymer Engineering and Science,* pp. 743-749, September 1983.

[25] U. Wölfel, Verarbeitung Faserverstärkter Formmassen im Spritzgiessprozess, Aachen: IKV, TH Aachen, 1987.

[26] H.-P. Thieltges, Faserschädigung beim Spritzgiessen verstärkter Kunststoffe, Aachen: RWTH Aachen, 1991.

[27] H. J. Wolf, Zum Einfluß der Schneckenplastifizierung auf die Faserstruktur, Darmstadt: Technische Hochschule Darmstadt, 1996.

[28] H. J. Wolf, „Screw Plasticating of Discontinuous Fiber Filled Thermoplastics: Mechanisms and Prevention of Fiber Attrition," *Polymer Composites,* pp. 375-383, Oktober 1994.

[29] V. B. Gupta, R. K. Mittal und P. K. Sharma, „Some Studies on Glass Fiber-Reinforced Polypropylene. Part I: Part I: Reduction in Fiber Length During Processing," *Polymer Composites,* pp. 8-15, Februar 1989.

[30] V. B. Gupta, R. K. Mittal und P. K. Sharma, „Some Studies on Glass Fiber-Reinforced Polypropylene. Part II: Mechanical Properties and Their Dependence on Fiber Length, Interfacial Adhesion, and Fiber Dispersion," *Polymer Composites,* pp. 16-27, Februar 1989.

[31] O. Herd, „Langfaserverstärkte Kunststoffe und ihre Einsatzgebiete im Automobil," in *Kunststoff Kolloquium 2006*, FH Deggendorf, 2006.

[32] L. Wittrock, „Vorrichtung zum Plastifizieren von thermoplastischen Kunststoffen und ähnlichen Massen". Österreich Patent AT000000233816B, 29. November 1960.

[33] R. Stehr, Verarbeitung technischer Kunststoffe; ein Beitrag zur sicherheitsgerechten und wirtschaftlichen Aufbereitung auf dem Planetwalzenextruder, Wuppertal, 1990.

[34] H. Potente, F. Hensen und W. Knappe, Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik I - Grundlagen, München: Hanser, 1989.

[35] ENTEX Rust & Mitschke GmbH, *Firmeneigenes Bildmaterial,* Heinrichstraße 67a, Bochum.

[36] A. Limper und R. Stehr, „Der Planetwalzenextruder - Ein vielseitiges Aufbereitungsaggregat," *Kunststoffe,* pp. 26-30, Januar 1990.

[37] R. Hollosi, Versuche auf dem Planetwalenextruder - Bericht zur berufspraktischen Phase, Darmstadt: Hochschule Darmstadt, 2013.

[38] M. Gerdon, Untersuchen verschiedener Planetspindelkonzepte im Bezug auf Druckaufbau, Förderverhalten und Energieeinbringung, Darmstadt: Hochschule Darmstadt, 2010.

[39] A. Limper, S. Seibel, C.-J. Wefelmeier und M. Roth, „Homogene Compounds - Kämmende Spindeln verbessern die Mischwirkung im Planetwalzenextruder," *Kunststoffe,* pp. 83 - 86, 2002.

[40] A. Limper, S. Seibel und G. Fattmann, „Compounding Unit Planetary Roller Extruder," *Macromolecular Materials and Engineering,* pp. 815-823, 2002.

[41] M. Greger, Entwicklung einer verstellbaren Dispergierringtechnik für Planetwalzenextruder, Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2012.

[42] M. Greger, R. Weinlein und M. H. Wagner, „Verstellbare Dispergierringe reduzieren Rüstzeiten," *Kunststoffe,* pp. 24-26, 2 2012.

[43] J. Rudloff, M. Bastian, P. Heidemeyer und K. Kretschmer, „Modellierung von Planetwalzenextrudern," *Kunststoffe,* pp. 56-58, Juni 2011.

[44] I. Radovanovic, Verarbeitung und Optimierung der Rezeptur von Wood Plastic Compounds (WPC), Osnabrück, 2007.

[45] T. Taufertshöfer, Einfluss der Verfahrenstechnik eines Planetwalzenextruders auf die elektrische Leitfähigkeit rußgefüllter Polyolefine, Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2013.

[46] T. Taufertshöfer, M. Wagner, R. Weinlein und N. Baldassi, „Untersuchung von Masterbatches mit unterschiedlich hohen Konzentrationen an Ruß," *Kunststoffe,* April 2015.

[47] Arburg GmbH & Co KG; SKZ - Süddeutsches Kunststoffzentrum, *Langfaser-Direktspritzgießen - Leichtbau mit hoher Festigkeit,* Broschüre, 2013.

[48] E. Bürkle und M. Würtele, „Plastifizieren im Grenzbereich - Potential der Einschnecke ausgeschöpft?," *Kunststoffe,* pp. 38-45, 2002.

[49] M. Bastian, V. Kolupaev, A. Ujma, K. Kapfer und F. Mack, „Ernst zu nehmende Alternative - Beachtliche Bauteileigenschaften durch Variation der Prozessbedingungen beim S-LFT-Verfahren," *Kunststoffe,* pp. 22-27, 2002.

[50] E. Bürkle, M. Sieverding und J. Mitzler, „Spritzgießverarbeitung von Langfaserverstärktem PP," *Kunststoffe,* pp. 47-50, März 2003.

[51] Evonik Hanse GmbH, *Dental- und Medizintechnik Produktportfolio,* Geesthacht: Broschüre, 2013.

[52] ISO 22314:2006.

[53] T. Birr, „Prozessoptimierung mittels Faserlängenanalyse," *Ingenieurwissenschaften Jahresmagazin,* pp. 26-27, Oktober 2014.

[54] M. Naaß, Visualisierung der rheologischen Vorgänge eines Planetwalzenextruders mittels Ansys Fluent, Darmstadt: Hochschule Darmstadt, 2014.

[55] J. Wortberg und R. Michels, „Innovative Entwicklungen in der Einschneckenextrusion," in *Der Einschneckenextruder - Grundlagen und Systemoptimierung, VDI-Tagung*, Baden-Baden, 1997.

[56] S. Dill, Forschungsarbeit - Aufbau und Anwendung des Faseranalysesystems FASEP, Darmstadt: Hochschule Darmstadt, 2013.

[57] P. Ditjo, Studienarbeit - Untersuchungen zum Einfluss der Extraktionsmethode auf die Faserschädigung, Darmstadt: Hochschule Darmstadt, 2013.

[58] B. Schmidt, „Spritzgießen von Langfaserverstärkten Kunststoffen," *Kunststoffe,* pp. 624-630, 1989.

[59] S. Dill, Vergleichende Untersuchungen zur Langglasfaserschädigung mittels verschiedener Spritzaggregate und einem Planetwalzenextruder, Darmstadt: Hochschule Darmstadt, 2014.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Schematische Darstellung der handelsüblichen Granulattypen [10] 4
Abbildung 2: Schematischer Darstellung der Herstellung von LFT-Materialien [12] 5
Abbildung 3: Einflussfaktoren und deren Effekte bei der Faserverarbeitung [14] 6
Abbildung 4: Qualitativer Verlauf des normierten mechanischen Eigenschaftsniveaus von PP-GF40 über die Faserlänge [3] in [15] 7
Abbildung 5: Mikromechanische Versagensformen von diskontinuierlich verstärkten FKV [16] 7
Abbildung 6: Spannungsverlauf Grenzflächenschub- und Faserzugspannungsverlauf bei ideal elastisch (nach Cox) und ideal plastisch (nach Kelly-Tyson) angenommener Matrix [16] 9
Abbildung 7: Bruchbild nach Schlagbeanspruchung von PP-GF30 mit niedriger (li.), mittlerer (mi.) und hoher Faserlänge (re.) [22] 11
Abbildung 8: Typischer Abbau der Glasfaserlänge während der Verarbeitung [20] 11
Abbildung 9: Granulatbruch am Einzug und während der Feststoffförderung [26] 13
Abbildung 10: Faserbruchbereiche in der Umwandlungszone [26] 14
Abbildung 11: Faserschädigungsmechanismen entlang des Aufschmelzprozesses nach Wolf [26] 15
Abbildung 12: Schnittdarstellung eines Planetwalzenmoduls 17
Abbildung 13: Knetbildung im PWE (li.), Druck- und Strömungsbedingungen im Knet in Analogie zu Walzwerken (re.) [34] 17
Abbildung 14: Betriebskräfte im Planetwalzenteil [33] 19
Abbildung 15: Anordnung des Anlauf- (2) und des Stau-Rings (3) zwischen zwei Modulen des Extruders [35] 19
Abbildung 16: Eine Auswahl verfügbarer Spindeltypen [36] 20
Abbildung 17: Planetwalzenextruder mit Austragsschnecke (oben) und in Kaskaden-Bauform (unten) [33] 22
Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Spritzgieß-Compounders [46] 24
Abbildung 19: Prozessablaufschema des Schmelzespeichersystems 26
Abbildung 20: Darstellung des Anlagenkonzeptes mit Nummerierungen 27
Abbildung 21: Schematische Darstellung des Kolbenspeichers 28
Abbildung 22: Schematische Schnittansicht des Füllventils 30
Abbildung 23: CAD-Darstellung der spritzgegossenen Prüfplatte mit Anguss-Geometrie 31
Abbildung 24: Querschnitt durch den PWE mit angedeuteten Strömungspfaden durch die Anlaufplatte im Ausgangszustand (oben, blau) und der modifizierten Konstruktion (unten, grün) 32
Abbildung 25: Fotographie des modifizierten Anlaufelements 33
Abbildung 26: Fließkurve der Mischung Compound VS 100 und Compound VS 6000 im Verhältnis 9:1 35
Abbildung 27: Trimodale Faserlängenerteilung einer Probe 39
Abbildung 28: 1 Sample, 128 Objekte, gewichtsgemittelte Faserlänge: 6,765mm 41
Abbildung 29: 7 Samples, 1337 Objekte, gewichtsgemittelte Faserlänge: 6,772mm 42
Abbildung 30: 34 Samples, 7758 Objekte, gewichtsgemittelte Faserlänge: 5,639mm 42
Abbildung 31: Übermäßige Streuung der gewichtsgemittelten Faserlänge mehrerer Proben eines Betriebspunktes 44
Abbildung 32: Schema zur Charakterisierung eines Betriebspunktes 45

Abbildung 33: Grafische Darstellung der gewichtsgemittelten Faserlängenwerte in der einzelnen Proben (A) und ihrer Standardabweichung (B) aus Tabelle 2 46
Abbildung 34: Abschließende Darstellung der Faserlängenverteilung des besprochenen Betriebspunktes mit einem Umfang von ca. 27500 Fasern 46
Abbildung 35: Zwei vollständig veraschte Spritzgussplatten mit beschriebenen Probenentnahmepositionen 47
Abbildung 36: Vergleich der gewichtsgemittelten Faserlänge der Proben eines Betriebspunkts 49
Abbildung 37: Vergleich der gewichtsgemittelten Faserlänge der einzelnen Samples zu Probennummer 5 aus Abbildung 36 50
Abbildung 38: Anlagenschema für Extrusionsversuche 52
Abbildung 39: Anlagenschema für Spritzgussversuche 53
Abbildung 40: Ausströmbereich des Planetwalzenmoduls als vernetztes Modell (halbierte Darstellung) [51] 57
Abbildung 41: Vergleichende Darstellung der realen (links) und der Modellkinematik (rechts) 58
Abbildung 42: Vergleich des Energieeintrags in PE-LD in Abhängigkeit verschiedener Spindelkonfigurationen [36] 64
Abbildung 43 : Darstellung des Verdrängungsmechanismus zwischen einer rotierenden Planetwalze und dem Zylindermantel anhand einer FEM-Simulation der Druckverhältnisse 64
Abbildung 44: Darstellung von Schleppströmung und Verdrängungsrichtung 65
Abbildung 45: Teilquerschnitt entlang der links dargestellten Ebene durch den Extruder mit Standardspindel 66
Abbildung 46: Exemplarische Darstellung des Füllgrads 67
Abbildung 47: Zusammenhang zwischen Rückstaulänge, Massedurchsatz und Drehzahl 68
Abbildung 48: Zusammenhang zwischen Verweilzeit, spezifischem Massedurchsatz und Drehzahl 68
Abbildung 49: Schematische Darstellung der Schmelzezirkulation im vollgefüllten Bereich 69
Abbildung 50: Der Einfluss des Düsendurchmessers auf die gewichtsgemittelte Faserlänge 70
Abbildung 51: Düsendurchmesser 5mm, gewichtsgemittelte Faserlänge 1,9mm 71
Abbildung 52: Düsendurchmesser 10mm, gewichtsgemittelte Faserlänge 3,5mm 71
Abbildung 53: Düsendurchmesser 20mm, gewichtsgemittelte Faserlänge 6,3mm 71
Abbildung 54: Vergleich der Faserschädigung bei der Bestückung mit vier und sechs Standardspindeln 73
Abbildung 55: Strömungssimulation bei der Bestückung mit vier Standardspindeln 74
Abbildung 56: Strömungssimulation bei der Bestückung mit sechs Standardspindeln 75
Abbildung 57: Strömungssimulation bei der Bestückung mit fünf TT2-Spindeln 75
Abbildung 58: Zusammenhang zwischen spezifischen Durchsatz und gewichtsgemittelter Faserlänge bei Verwendung von vier Noppenspindeln 76
Abbildung 59: Gewichtete Faserlängenverteilung bei Verwendung von vier Noppenspindeln 77
Abbildung 60: Zusammenhang zwischen spezifischem Durchsatz und gewichtsgemittelter Faserlänge bei Verwendung von sechs Standardspindeln 77
Abbildung 61: Gewichtete Faserlängenverteilung bei Verwendung von sechs Standardspindeln 78
Abbildung 62: Zusammenhang zwischen spezifischem Durchsatz und gewichtsgemittelter Faserlänge bei Verwendung von fünf TT1-Spindeln und einer 10mm-Düse 79
Abbildung 63: Gewichtete Faserlängenverteilung bei Verwendung von fünf TT1-Spindeln und einer 10mm-Düse 79
Abbildung 64: Energieeintrag über Antriebsleistung bei verschiedenen Spindelkonfigurationen 80
Abbildung 65: Unterschiedliche Schmelzeanlagerung auf TT2- und Standardspindel 81

Abbildung 66: Aufgeschmolzene, zusammenhängende Faserbündel im Übergang zum vollgefüllten Bereich 82
Abbildung 67: Vergleich der gewichtsgemittelten Faserlängen bei 10mm und 25mm Faserausgangslänge 83
Abbildung 68: Faserlängenverteilung zu 10mm Faserausgangslänge, gewichtsgemittelte Faserlänge 5,5mm, spezifischer Massendurchsatz 0,49 kg min/h 84
Abbildung 69: Faserlängenverteilung zu 25mm Faserausgangslänge, gewichtsgemittelte Faserlänge 5,2mm, spezifischer Massedurchsatz 0,5 kg min/h 84
Abbildung 70: Vergleich der Anlaufelemente bei 10mm Faserausgangslänge 85
Abbildung 71: Vergleich der Anlaufelemente bei 25mm Faserausgangslänge 86
Abbildung 72: Faserlängenverteilung bei 25mm Faserausgangslänge unter Verwendung des geänderten Anlaufringes 86
Abbildung 73: Überhöhter Füllgrad des Moduls bei Verwendung von fünf TT2-Spindeln und einer Standardspindel bei angeschlossenem Schmelzespeichersystem 87
Abbildung 74: Gewichtete Faserlängenverteilung der spritzgegossenen Platten bei 10mm Faserausgangslänge 88
Abbildung 75: Gewichtete Faserlängenverteilung der spritzgegossenen Platten bei 25mm Faserausgangslänge 88
Abbildung 76: Planetspindelentwurf für die getrennte Dosierung von Fasern und Matrix 92
Abbildung 77: Skizze der Versuchsanlage – das Spritzgusswerkzeug ist an der Trennebene halbiert dargestellt, um die Ausrichtung der Kavität zu verdeutlichen 104
Abbildung 78: Fotographie der Versuchsanlage – Das Spritzgusswerkzeug ist von den Aufspannplatten der Kniehebel-Schließeinheit verdeckt 105
Abbildung 79: Blick von schräg oben auf Schmelzespeicher, Werkzeug und Schließeinheit 105
Abbildung 80: Exemplarische Darstellung unterschiedlicher Kontrastverhältnisse an einem Sample 107
Abbildung 81: Einfluss des Fasermassenanteils auf die Faserschädigung 109
Abbildung 82: Simulationsdarstellung der Rückstrombewegung im freien Volumen zwischen zwei Planetspindeln 110
Abbildung 83: Vergleichende Darstellung des resultierenden Walzenspaltes bei Verwendung einer Standardspindel und einer TT2-Spindel 111

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kürzel für die verwendeten Planetspindeln 21
Tabelle 2: Exemplarische Ergebnistabelle zur Charakterisierung eines Betriebspunktes 45
Tabelle 3: Exemplarischer Basisversuchsplan mit eingetragenen Soll- und Ist-Werten 51
Tabelle 4: Tabellarische Auflistung der erprobten Spindelkonfigurationen 54
Tabelle 5: Für die Simulation verwendete Materialdaten und Carreau-Parameter [51] 59

11 Formelverzeichnis

Formel 1: Vereinfachte Berechnungsgrundlage für die kritische Faserlänge [20] 9
Formel 2: Formel zur Berechnung der arithmetisch gemittelten Faserlänge [49] 37
Formel 3: Formel zur Berechnung der gewichtsgemittelten Faserlänge [49] 37
Formel 4: Berechnungsformel für die Antriebsleistung 60
Formel 5: Berechnungsformel für die spezifische Antriebsleistung 60
Formel 6: Berechnungsformel für den spezifischen Massendurchsatz 61
Formel 7: Minimale Verweilzeit im Planetwalzenextruder [38] 62
Formel 8: Berechnung der axialen Geschwindigkeitskomponente [38] 62
Formel 9: Vereinfachte Gleichung für die minimale Verweilzeit im Planetwalzenextruder [38] 62

12 Abkürzungsverzeichnis

AOI	Area of interest
CAD	Computer-aided design
FEM	Finite-Elemente-Methode
FIFO	First In – First Out
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
GF	Glasfaser
LFT	Langfaserverstärkter Thermoplast
MS	Microsoft®
NPP	Kürzel für Noppenspindeln
PP	Polypropylen
PWE	Planetwalzenextruder
STD	Kürzel für Standard-Planetspindeln
TT	Kürzel für Transport- und Trocknungsspindeln, gefolgt von einer Zahl, die die verbleibende Zahnanzahl bezeichnet
WPC	Wood-Polymer-Compounds

13 Anhang

13.1 Aufbau der Versuchsanlage

In Ergänzung zu den Kapiteln 3.1 und 5.2 soll hier die Versuchsanlage im Aufbauzustand für Spritzgussversuche dargestellt werden.

Für die beschriebenen Versuche wurde nur ein Schmelzespeicher an das Füllventil angeschlossen. Das Ventil lenkt die Schmelze während des Spritzgussvorgangs in ein Wasserbad, um den kontinuierlichen Betrieb des Extruders zu ermöglichen.

Der Schmelzespeicher ist, dem Kanalwinkel des Füllventils entsprechend, oberhalb des Extruders angeordnet. Das Spritzgusswerkzeug ist fluchtend zum Speicher angeordnet, weshalb es in der Kniehebel-Schließeinheit schräg aufgespannt werden muss.

Das Spritzguss-Werkzeug wird in der Trennebene angespritzt und in einer orthogonal zum Extruder angeordneten Kniehebel-Schließeinheit montiert. Die Anbindung an den Schmelzespeicher wird durch ein starres Verbindungselement gewährleistet, das während des Schließvorgangs von beiden Werkzeughälften umschlossen und fixiert wird.

Nummerierte Elemente:

1 Antriebseinheit
2 Einzugsmodul mit Trichter
3 Planetwalzenmodul
4 Werkzeugplatte
5 Speicher-Füllventil
6 Schmelzespeicher
7 Hydraulik-Kolben
8 Spritzguss-Werkzeug

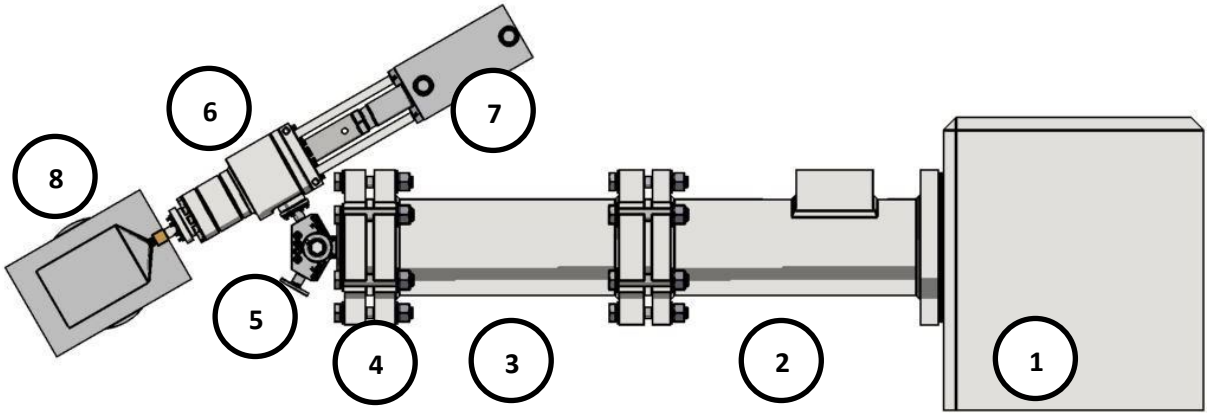

Abbildung 77: Skizze der Versuchsanlage – das Spritzgusswerkzeug ist an der Trennebene halbiert dargestellt, um die Ausrichtung der Kavität zu verdeutlichen

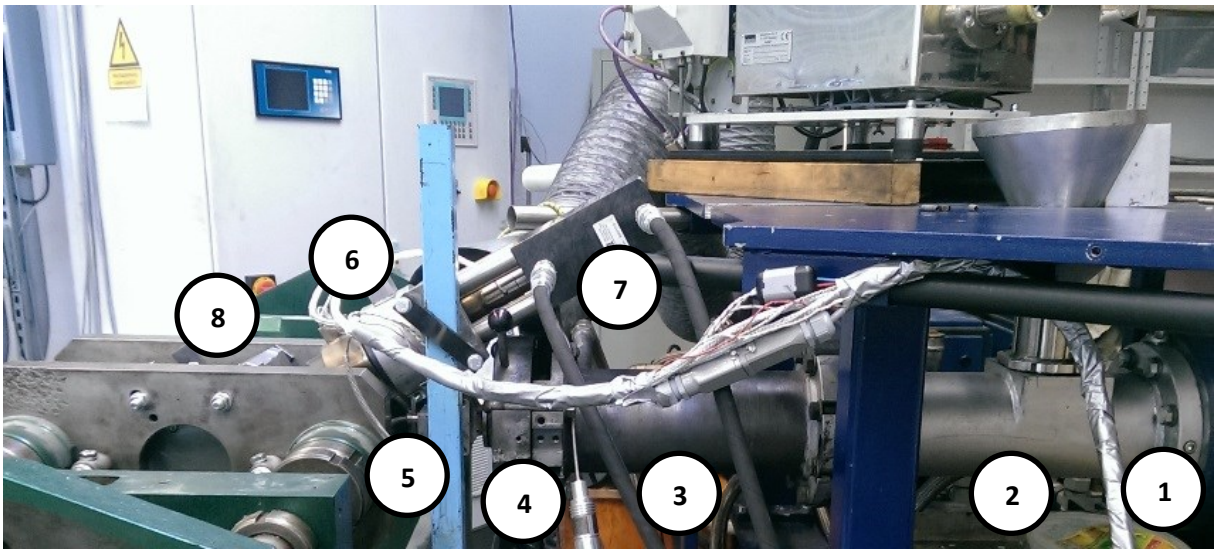

Abbildung 78: Fotographie der Versuchsanlage – Das Spritzgusswerkzeug ist von den Aufspannplatten der Kniehebel-Schließeinheit verdeckt

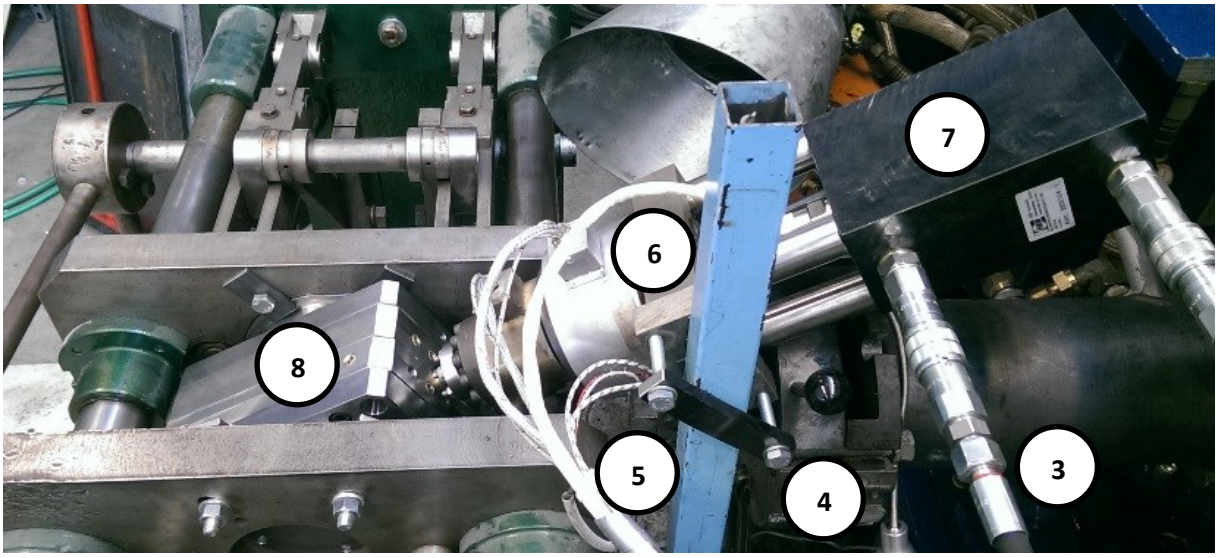

Abbildung 79: Blick von schräg oben auf Schmelzespeicher, Werkzeug und Schließeinheit

13.2 Prüfablauf zur Bestimmung der Faserlängenverteilung

Das Verfahren zur Bestimmung der Faserlängenverteilung beinhaltet eine Vielzahl von Faktoren, die das Messergebnis beeinflussen. In Ergänzung zu Kapitel 4.4.1 soll hier der Prüfablauf näher beschrieben werden. Die Untersuchungen zu dieser Thematik wurden in einer internen Arbeit von Dill [56] bearbeitet und zusammengefasst.

13.2.1 Probenpräparation

Während der Versuchsdurchführung am Extruder wird ein Schmelzestrang mit einer Länge von etwa 1,5 bis 2m abgezogen und nach dem Erkalten in ca. 10cm lange Stücke zerbrochen, um die Aufbewahrung zu erleichtern und die folgende Probenentnahmeposition zu chaotisieren. Im folgenden Schritt werden Proben aus beliebigen Strangabschnitten herausgetrennt, Stücke von 2-3cm Länge enthalten bereits ein Vielfaches der für eine Analyse benötigten Fasermenge. Um eine Ergebnisverfälschung durch zusätzliche Faserschädigung aufgrund eines Schneidvorgangs zu minimieren, kann der Strang lokal auf Schmelzetemperatur erhitzt und durch vorsichtiges Abziehen ein Stück entsprechender Größe herausgetrennt werden.

Als nächster Schritt muss eine Separation von Fasern und Matrix vorgenommen werden, im Falle von Glasfasern erfolgt dies typischerweise durch Veraschung der Proben. Es wurde auch die Trennung durch Auflösen der Matrix in diversen Lösungsmitteln erprobt, um eine mögliche thermische Schädigung der Fasern zu vermeiden [57]. Die Veraschung wurde jedoch als besser geeignetes Verfahren bestätigt, da die nasschemische Herangehensweise mit einem deutlich höheren Zeit- und Arbeitsaufwand einhergeht. Insbesondere die tatsächlich rückstandsfreie Entfernung der Matrix ist auf diesem Wege nur mit hohem Aufwand zu erreichen. Zusätzlich geht der Vorteil einer geringeren Ergebnisverfälschung verloren, da die Vielzahl an Bearbeitungsschritten ebenso eine mechanische Schädigung der Fasern bewirken.

Für die thermische Trennung von Fasern und Matrix wird die Probe in einen Keramiktiegel gegeben und in einem Ofen für mehrere Stunden hohen Temperaturen ausgesetzt, die zur gasförmigen Zersetzung der Matrix führen. Durch eine gerade ausreichend gewählte Maximaltemperatur mit flachen Aufheiz- und Abkühlrampen kann das Ausmaß der Faserschädigung durch den Veraschungsvorgang gering gehalten werden. Für die verwendete Polypropylenmatrix hat sich eine Maximaltemperatur von 550°C bei einer Gesamtlaufzeit von vier bis fünf Stunden als ausreichend erwiesen, um das Polymer rückstandsfrei zu entfernen. Nach dem Prozess liegen die Fasern als zusammenhängendes, luftiges Gefüge vor. (vgl. Abbildung 35)

Zwecks Vereinzelung der Fasern wird der Veraschungsrückstand aufgeschwemmt. Für die Erfassung von vier- bis fünftausend Objekten hat sich ein Suspensionsvolumen von ca. 0,5l bewährt, in das ca. 100mm³ des Veraschungsrückstands gegeben wird. Die Verwendung des gesamten Rückstands ist für das angegebene Suspensionsvolumen nicht zielführend, da dieser deutlich zu viele Fasern enthält, was die spätere Bildauswertung behindern würde. Alternativ zu der zufälligen Entnahme einer kleinen Teilmenge des Rückstands kann dieser jedoch vollständig aufgeschwemmt werden und mittels einer Verdünnungsreihe eine für die Bildanalyse geeignete Konzentration erreicht werden.

Für die Erzeugung der Suspension hat sich eine Lösung aus destilliertem Wasser, 20-prozentiger Essigsäure und Glycerin im Verhältnis von 100:10:2 als gut geeignete Rezeptur herausgestellt. Diese Lösung bewirkt eine gute Benetzung und Vereinzelung der Fasern, sodass üblicherweise mildes

Aufrühren genügt, um miteinander verfilzte Fasern voneinander zu trennen. Der Einsatz eines Ultraschallbads war nicht notwendig.

13.2.2 Bilderzeugung

In Vorbereitung der Bilderzeugung wird das Volumen der beschriebenen Fasersuspension in eine entsprechende Anzahl an Petrischalen aufgeteilt, diese stellen die in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Samples dar. Während dieses Arbeitsschritts wird die Suspension wiederholt gründlich aufgerührt, um ein zwischenzeitliches Sedimentieren der Fasern zu vermeiden. Die Absinkrate einer Faser in einer Flüssigkeit ist von ihrer Länge abhängig. Wird die Suspension während der Aufteilung ungenügend aufgerührt, kommt es zu einer Vorfraktionierung und damit zur Verfälschung der Ergebnisse. Dies zeigt sich an einer erhöhten Standardabweichung bei der Gegenüberstellung der Samplewerte einer Probe.

Jedes Sample wird daraufhin nacheinander einzeln in die Aufnahme des Scanners eingesetzt und in 256 Graustufen mit einer Auflösung von 9600dpi ein digitales Abbild erzeugt. Bei korrekt gewählten Belichtungsverhältnissen ermöglicht dies die Detektion von Objekten ab einer Größe von ca. 5µm. Durch die Anpassung der Belichtungseinstellungen wird das Kontrastverhältnis des Samples beeinflusst. Es ist darauf zu achten, dass dieses sich in einer Gruppe von Aufnahmen möglichst wenig ändert, um eine Vergleichbarkeit der Samples untereinander zu gewährleisten. Das Kontrastverhältnis beeinflusst den Grauwert des Hintergrundes. Ist dieser zu hell, wird die automatisierte Unterscheidung zwischen Objekt und Hintergrund erschwert. Dadurch können insbesondere kleine Objekte weniger gut erkannt werden, wodurch die Bestimmung des Feinanteils verfälscht wird. Die Einstellungen an dieser Stelle beeinflussen damit die Qualität der späteren Binarisierung der Aufnahme und haben so einen direkten Einfluss auf die Messergebnisse.

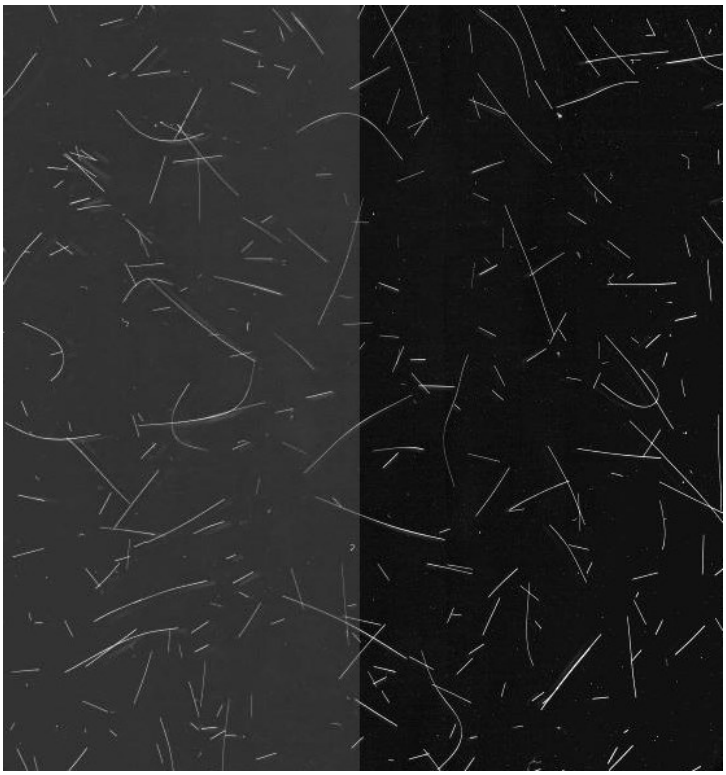

Abbildung 80: Exemplarische Darstellung unterschiedlicher Kontrastverhältnisse an einem Sample

13.2.3 Bildanalyse

Zunächst wird in dem zu analysierenden Bild ein AOI festgelegt, um Bildrandbereiche, Verschmutzungen oder optische Artefakte von der Auswertung auszuschließen. Danach folgt die Ermittlung eines zum Kontrastverhältnis passenden Schwellenwerts innerhalb der 256 Graustufen des Bildes, durch den die Unterscheidung zwischen *Hell/Objekt* und *Dunkel/Hintergrund* festgelegt wird. Diese Einstellung bildet die Grundlage für die Binarisierug des Bildes.

Nach erfolgter Binarisierung beginnt der automatisierte Auswertungsablauf des Systems, auf die der Operator im Normalfall keinen Einfluss mehr zu nehmen braucht.

Das System nimmt zur Beschleunigung des Auswertungsvorgangs zunächst eine grobe Einteilung aller Objekte in drei Klassen vor. Dabei werden *Faserbruchstücke*, *kurze Fasern* und *lange und gebogene Fasern / Cluster* unterschieden. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, an dieser Stelle Filter eingreifen zu lassen, um unerwünschte Objekte von der Auswertung auszuschließen, sofern dies noch nicht mit Hilfe des AOI erfolgt ist. So können Messfehler durch Objekte mit einem unpassenden Verhältnis von Länge zu Breite oder unvollständig sichtbare Fasern im Bildrandbereich eliminiert werden.

Nach der Bearbeitung aller auf dem Bild erkannten Objekte wird eine Auflistung der Ergebnisse angezeigt. Diese wird durch einen Exportbefehl in eine Excel-Vorlage übertragen, wo dann die statistische Auswertung und die Erstellung des Berichtsblatts erfolgen.

13.3 Einfluss der Faserkonzentration auf die Faserschädigung

Um den Schädigungsanteil durch Faser-Faser-Interaktionen an der Gesamtfaserschädigung erfassen zu können, wurde ein identischer Versuchsplan mit zwei Versuchsmaterialien durchgeführt, die sich lediglich im Fasergehalt unterscheiden. Hierbei kamen LFT-Materialien mit 20% und 40% Fasermassenanteil und einer Faserausgangslänge von 10mm zum Einsatz, der Extruder wurde auch hier mit vier TT2-Spindeln und einer Standardspindel bestückt.

Die Ergebnisse der Versuche sind im folgenden Diagramm dargestellt. Es wurde hier auf die Sichtbarmachung der einzelnen Messwerte verzichtet, da dies die Übersichtlichkeit beeinträchtigt hätte. Der Streuungsbereich der Messwerte ist durch die Umhüllenden angedeutet.

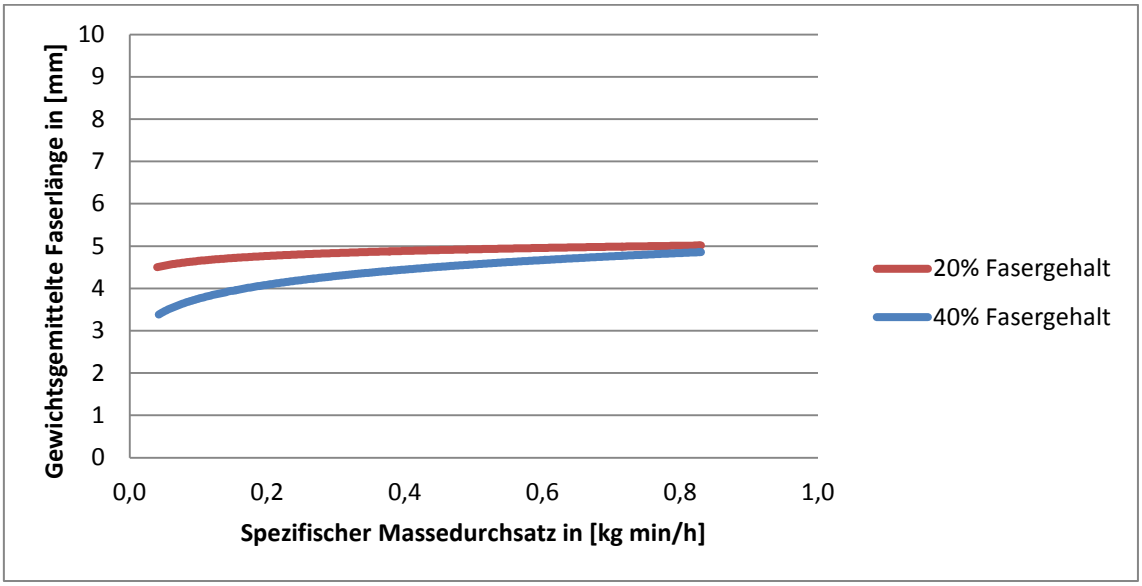

Abbildung 81: Einfluss des Fasermassenanteils auf die Faserschädigung

Bei höherem Fasermassenanteil zeigt sich eine etwas stärkere Faserschädigung, was auf eine intensivere Faser-Faser-Interaktion in der Schmelze zurückzuführen ist. Die Streuungsbereiche der Versuchsergebnisse sind jedoch breit und überschneiden sich deutlich, weshalb auf die Darstellung einzelner Messwerte verzichtet wurde. Der Effekt des Fasermassenanteils im untersuchten Umfang bei der Verarbeitung auf dem Planetwalzenextruder kann jedoch als gering angesehen werden.

13.4 Simulationsergebnis des Rückstromes im vollgefüllten Bereich

Folgende Abbildung zeigt eine FEM-Simulation des vollgefüllten Bereiches des PWE vor der Anlaufplatte. Die Schnittebene liegt dabei mittig zwischen zwei Standard-Spindeln.

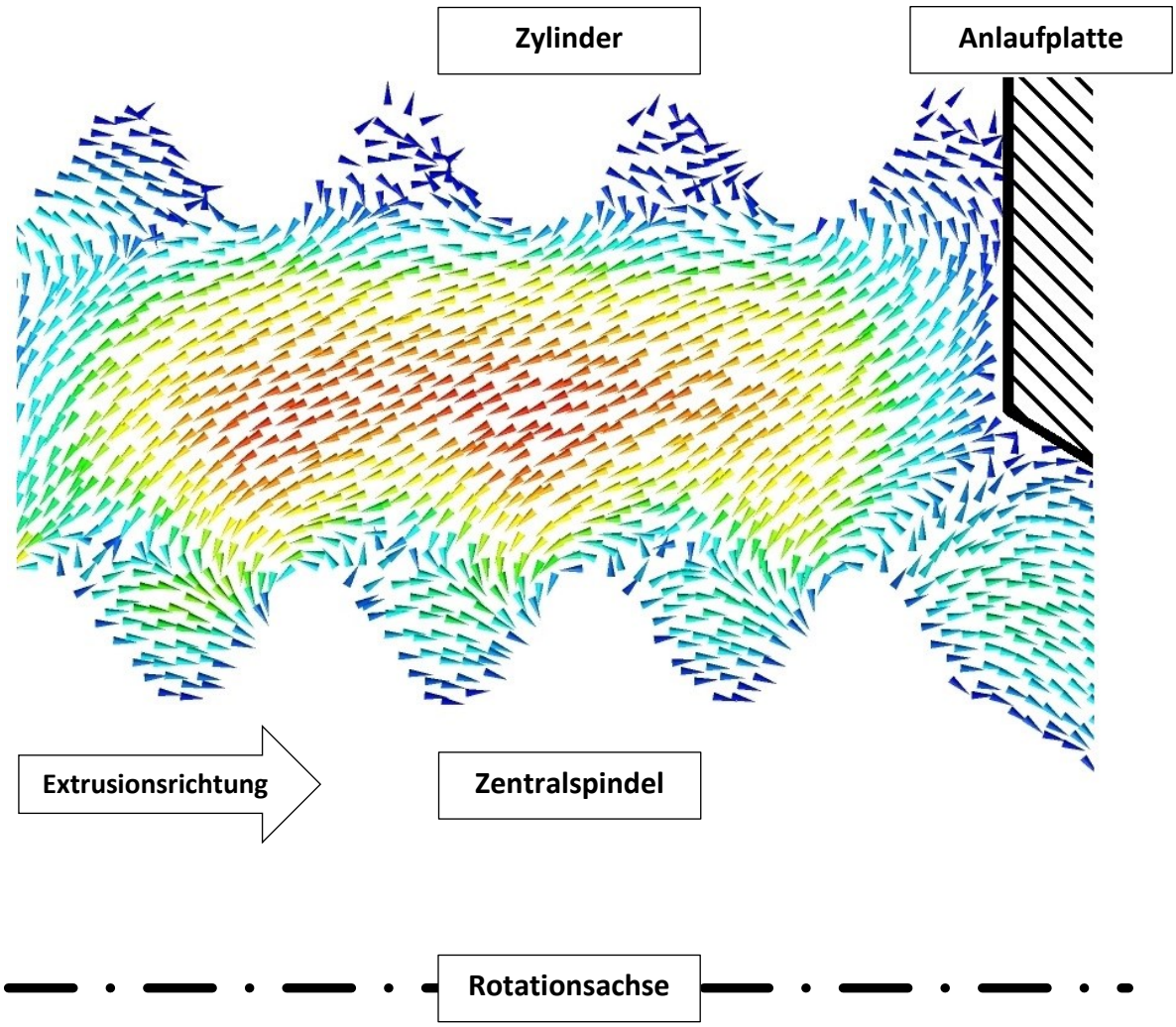

Abbildung 82: Simulationsdarstellung der Rückstrombewegung im freien Volumen zwischen zwei Planetspindeln

13.5 Spaltquerschnitte

Folgende Abbildung zeigt den sich ergebenden Spaltquerschnitt (rot), der sich zwischen dem Mantel, der Zentralspindel und einer Standard- bzw. TT2-Spindel ergeben.

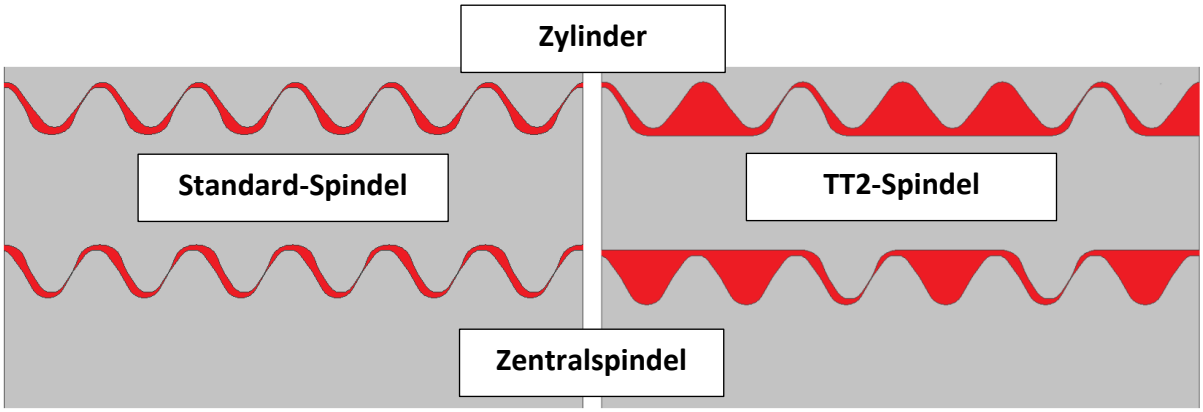

Abbildung 83: Vergleichende Darstellung des resultierenden Walzenspaltes bei Verwendung einer Standardspindel und einer TT2-Spindel