

eingereicht/handed in: 22.06.2020
angenommen/accepted: 21.10.2020

M. Sc. Jochen Kettemann und Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten
Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart

Untersuchung der Aufschmelzzone von Hochleistungsextrudern mit wendelgenuteter Plastifizierzone

Untersuchungen und Vorhersage der Aufschmelzprozesse in der Einschneckenextrusion sind bereits seit vielen Jahrzehnten von wissenschaftlichem Interesse. In dieser Arbeit wird erstmals die Aufschmelzzone eines Hochleistungsextruders mit einer durchgehend wendelgenuteten Plastifizierzone experimentell untersucht. Hierzu wurde ein axial-teilbarer Extruder entwickelt, um die Barrierschnecke samt der Kunststoffschmelze freizulegen. Durch eine visuelle Untersuchung der eingefrorenen Schmelze werden Annahmen des vorhandenen Aufschmelzmodells validiert. Zudem werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung mit denen des analytischen Modells verglichen. Diese Untersuchungen bestätigen die wesentlichen mathematischen Modellannahmen und stehen in guter Übereinstimmung zu vorherigen Untersuchungen auf einem axial-genuteten Einschneckenextruder.

Investigation of the melting zone of high-performance extruders using a helically grooved plasticizing zone

Investigations and prediction of the melting processes in single-screw extrusion have been of scientific interest for many decades. In this study, the melting zone of a high-performance extruder with a continuous helically grooved plasticizing zone is experimentally investigated for the first time. For this purpose, an axially divisible extruder was developed to expose the barrier screw together with the plastic melt. An optical examination of the frozen melt validates assumptions of the existing melting model. In addition, the results of the experimental investigation are compared with those of the analytical model. These investigations confirm the essential mathematical model assumptions and are in good agreement with previous investigations on an axially grooved single-screw extruder.

Untersuchung der Aufschmelzzone von Hochleistungsextrudern mit wendelgenuteter Plastifizierzone

J. Kettemann, C. Bonten

1 EINLEITUNG

Zur maschinellen Verarbeitung von Kunststoffen kommen häufig Extruder zum Einsatz. Viele verschiedene Extruderbauformen haben sich seit dem 19. Jahrhundert in der Kunststoffindustrie etabliert. Dabei tritt der Einschneckenextruder am Häufigsten auf [1]. Ein Extruder soll wirtschaftlich arbeiten – das heißt er soll ressourcenschonend in kürzester Zeit möglichst viel Kunststoff mit optimaler Mischungsqualität ausstoßen. Zudem soll idealerweise mit nur einer einzigen Schnecken-Zylinder-Konfiguration eine Vielzahl von Kunststoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften verarbeitet werden können. Um dieses Spannungsfeld an Anforderungen möglichst umfassend zu erfüllen, hat sich seit Beginn des ersten voll-elektrisch beheizten Einschneckenextruders der Paul Troester Maschinenfabrik GmbH in Hannover im Jahre 1935 [2, 3] die Extrusion stetig weiterentwickelt, bis hin zur heutigen Hochleistungsextrusion. Da allerdings bis heute noch nicht alle Vorgänge in einem Extruder im Detail verstanden sind, ist die Erforschung der ablaufenden Mechanismen immer noch von wissenschaftlichem Interesse. Insbesondere in Bezug auf eine valide mathematische Vorhersage einzelner Verfahrenszonen.

2 DIE HOCHLEISTUNGSEXTRUSION

Hochleistungsextruder sind eine Weiterentwicklung der sog. Standardextruder und zeichnen sich in der Regel durch die folgenden drei Merkmale aus [4]:

- Genutete Einzugszone (vgl. Nutbuchsenextruder),
- Barrierschnecke in der Aufschmelzzone und
- distributive und/oder dispersive Mischelemente in der Meteringzone.

Neben den zuvor definierten Hochleistungsextrudern wurde am Institut für Kunststofftechnik ein weiterer Maschinentyp der Kategorie Hochleistungsextruder erforscht und im Jahre 1999 beim Deutschen Patentamt angemeldet [5]. Dieser Extrudertyp besitzt eine durchgehend genutete Plastifizierzone in Kombination mit einer Barrierschnecke. Vertrieben wird das System unter dem Handelsnamen HELIBAR® und im Folgenden als *Einschneckenextruder mit genuteter Plastifizierzone* (EEgP) bezeichnet.

2.1 Der Einschneckenextruder mit genuteter Plastifizierzone

Im Gegensatz zu einem Nutbuchsenextruder ist bei einem EEgP die innere Zylinderwand nicht nur in der Einzugszone, sondern bis zum Ende der Aufschmelzzone mit Nuten versehen [6]. Die Einzugs- und Aufschmelzzone kann dabei wahlweise mit Axial- oder Wendelnuten ausgestattet werden. In Bild 1 sind die beiden charakteristischen Merkmale eines EEgP grafisch dargestellt, wobei hier beispielhaft ein durchgehend wendelgenuteter Zylinder abgebildet ist.

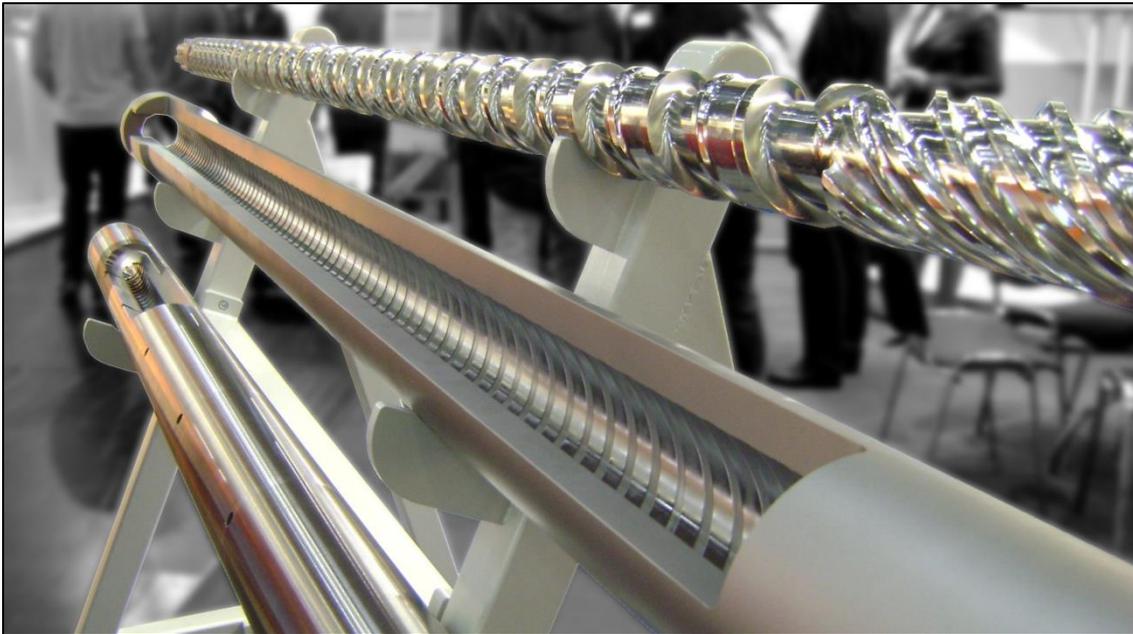


Bild 1: Barrierschnecke in Kombination mit einer durchgehend genuteten Plastifizierzone definieren einen weiteren Hochleistungsextruder [7]

Die eingebrachten Nuten im Zylinder begünstigen das Aufschmelzen, da die Schmelze effizient vom Feststoffkanal in den Schmelzekanal abtransportiert und somit der Schmelzefilm zwischen Feststoffbett und Zylinderwand sehr dünn gehalten wird, Bild 2. Obwohl die Nuten primär Schmelze transportieren, können in der Theorie je nach Querschnitt der Nut bzw. Granulatgröße auch geringe Mengen an Feststoff-Teilchen durch die Nut in den Schmelzekanal gelangen. Diese werden dort von der umgebenen Schmelze aufgeschmolzen und kühlen diese leicht ab. [6, 8, 9]

Der EEgP wurde bereits mehrfach experimentell untersucht, mit dem Ergebnis einer durchweg verbesserten Hochleistungsextrusion [8–11]. Chung konnte anhand zahlreicher Experimente nachweisen, dass der Durchsatz eines EEgP im Vergleich zu anderen Hochleistungsextrudern drei- bis viermal größer ist. Zudem verdoppelt sich in seinen experimentellen Untersuchungen der sowohl drehzahl- als auch gegendruckunabhängige spezifische Durchsatz [11]. Der damit einhergehenden Beeinflussung der Schmelzeshomogenität wird beim

EEgP (und allgemein bei der Hochleistungsextrusion) anwendungsspezifisch anhand von distributiven und/oder dispersiven Mischelementen in der Meteringzone entgegengewirkt. Neben der reinen Effizienzsteigerung zeichnen sich EEgP durch eine exzellente Prozessstabilität und geringere Schmelztemperatur aus. Aufgrund der durchgängigen Nuten im Inneren der Zylinderwand baut sich der Druck über eine längere Distanz hinweg auf und entlastet das Druckaufbauvermögen der Einzugszone. Diese muss im Gegensatz zu anderen Hochleistungsextrudern nicht mehr thermisch getrennt werden, und eine passive Luftkühlung reicht in der Regel aus [12]. Die daraus resultierende geringere Kühlleistung sowie der einfachere Extruderaufbau führen neben dem effizienteren Aufschmelzen zu geringeren Prozesskosten und einer effizienteren Energienutzung [6].

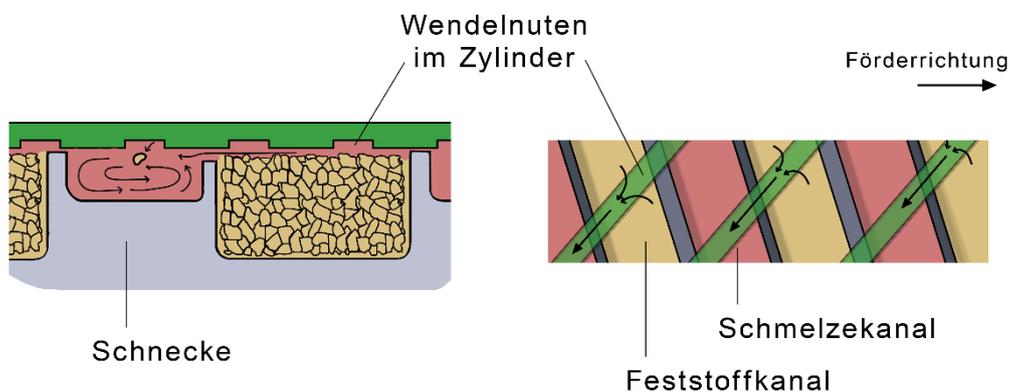


Bild 2: Schematische Darstellung des Aufschmelzvorgangs in einem Einschneckenextruder mit genuteter Plastifizierzone

2.1.1 Experimentelle Untersuchungen der Aufschmelzzone

Die ersten experimentellen Untersuchungen der Aufschmelzzone gehen zurück auf Maddock [13]. Anhand von zahlreichen Experimenten stellte er ein immer wiederkehrendes Muster fest und erlangte so ein tiefgreifendes Verständnis über die ablaufenden Prozesse während des Aufschmelzvorgangs innerhalb eines Einschneckenextruders. Basierend darauf entstand ein qualitativer Aufschmelzmechanismus, bei dem sich ein Schmelzefilm zwischen Feststoffbett und Zylinderwand bildet sowie ein Schmelzepool an der aktiven Flanke. Diese Beschreibung galt fortan als Basis für viele Modellierungsansätze der Aufschmelzzone. Unabhängig davon stellten weitere Wissenschaftler einen abweichenden Mechanismus fest. Bei der Extrusion von PVC fand Klenk [14] heraus, dass sich der Schmelzepool an der gegenüberliegenden (passiven) Flanke ausbildet. Bei den Versuchen von Dekker [15] umgab die PP-Schmelze gleichmäßig das Feststoffbett ohne Schmelzepool. Beide Mechanismen stellen jedoch Ausnahmen dar, weshalb sich der Mechanismus nach Maddock in der Vergangenheit durchgesetzt hat. Bild 3 stellt schematisch die drei Mechanismen gegenüber.

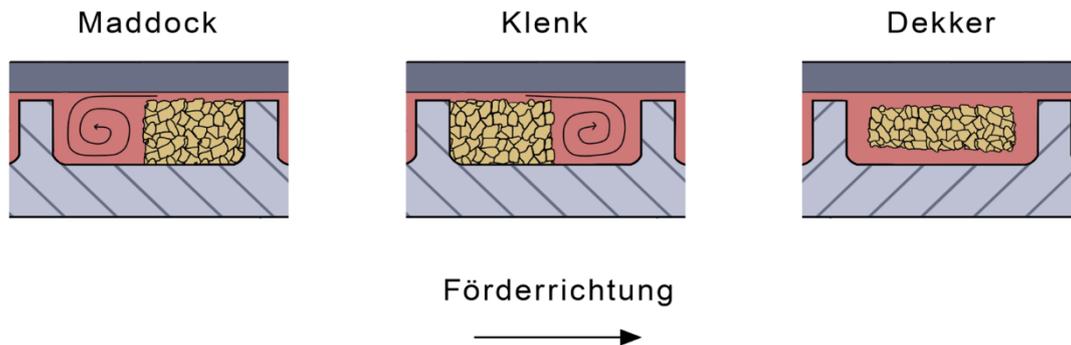


Bild 3: Schematische Darstellung der drei wesentlichen Aufschmelzmodelle in einer Drei-Zonen-Schnecke

Die zuvor vorgestellten Aufschmelzmechanismen sind aufgrund der Verwendung einer Barrierschnecke in Kombination mit einem durchgehend genuteten Zylinder nicht ohne weiteres auf einen EEGP übertragbar. Um jedoch auch die ablaufenden Aufschmelzprozesse dieses Extruders visuell zu untersuchen, wurde in vergangenen Arbeiten ein axial-genuteter Zylinder experimentell untersucht [16–18]. Dieser ermöglicht ein „Ziehen“ der Schnecke ohne Abscheren der Nuten, Bild 4. Ziel dieser Untersuchungen war es, angelehnt an die Versuche durch Maddock, ein tieferes Verständnis über das Aufschmelzen in einem EEGP zu erlangen, einen qualitativen Aufschmelzmechanismus zu entwickeln und basierend darauf die theoretischen Modellannahmen der analytischen Berechnung zu validieren.

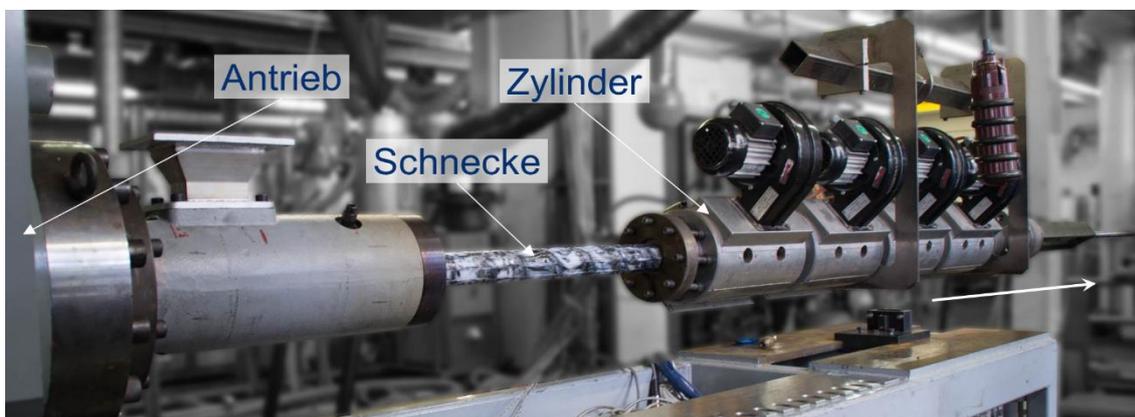


Bild 4: Abziehversuche zur Visualisierung der Aufschmelzmechanismen in einem axial-genuteten EEGP

Auf Basis dieser Ergebnisse konnten bereits wesentliche Annahmen des Berechnungsmodells (siehe folgendes Kapitel) für ein axial-genutetes System untersucht und validiert werden. So ist beispielsweise für die untersuchten Zylinder-Schnecken-Werkstoff Kombinationen der Feststoffkanal bis zum Ende hin voll gefüllt mit Feststoff, und es bildet sich kein Schmelzpool darin aus. Außerdem wurde nachgewiesen, dass das Aufschmelzen in einem EEGP prinzipiell nach demselben Wärmeübertragungsmechanismus abläuft, wie es

Maddock [13] bereits qualitativ für den konventionellen Einschneckenextruder beschrieben hat. Die theoretische Modellvorstellung eines EEgP geht davon aus, dass die Nuten vollständig mit Schmelze gefüllt sind. Auf eine Schmelzbewegung innerhalb der Nut deuten sichtbare Stromlinien hin. Ausschließlich mit Schmelze gefüllte Nuten konnte jedoch anhand der untersuchten Schliffbilder nicht eindeutig bestätigt werden, und es ist auch möglich, dass vereinzelte Feststoffpartikel vorhanden sind. Aufgrund einer geringen Nuttiefe hingegen wird für eine analytische Modellierung der Aufschmelzzone weiterhin angenommen, dass sich ausschließlich Schmelze in den Nuten befindet [16–18].

Jin et al. [19] haben einen ähnlichen Extrudertyp experimentell untersucht. Anders als der EEgP besitzt dieser jedoch eine Barrierschnecke mit flacherem Feststoffkanal sowie deutlich tiefer geschnittenen Nuten im Zylinder. Dabei haben sie herausgefunden, dass auch in den Nuten ein Feststoffbett vorliegt, und basierend darauf ein eigenes Rechenmodell entwickelt. Da sich allerdings der konstruktive Aufbau dieser Anlage signifikant von dem eines EEgP unterscheidet, können die Erkenntnisse von Jin et al. nicht auf dieses System übertragen werden.

2.1.2 Modellierung der Aufschmelzleistung

Das erste mathematische Modell der Aufschmelzzone basiert auf den experimentellen Untersuchungen von Maddock. Es wurde von Tadmor [20] entwickelt und dient seitdem als Grundlage für eine Vielzahl an weiteren mathematischen Untersuchungen. Das erste veröffentlichte Modell im Jahre 1966 behandelte lediglich eine Newton'sche Flüssigkeit mit einer temperaturunabhängigen Viskosität. Allerdings wurde bereits ein Jahr später die klassische Modelltheorie um die Berücksichtigung einer nicht-Newton'schen Flüssigkeit mit temperaturabhängiger Viskosität erweitert [21]. Darauf aufbauend entstanden in den folgenden Jahren eine Vielzahl an weiteren analytischen Modellen [22–37] sowie numerische Simulationen [38–44] zur Vorhersage der Aufschmelzzone, auf die hier im Detail nicht näher eingegangen wird.

Da die bisher bekannten Aufschmelzmodelle nicht ohne weiteres auf einen EEgP übertragen werden können, wurde zur Berechnung dieses Extrudertyps ein eigenes Modell entwickelt [4, 16, 17]. Dieses Modell basiert auf den Arbeiten von Tadmor [20, 21], Vermeulen et al. [24, 25] sowie auf umfassenden mathematischen Analysen durch Pearson [26] und Rauwendaal [45]. Aufgrund der eingebrachten Nuten im Zylinder werden in der Modelltheorie zwei Bereiche unterschieden: Zone 1 für den Bereich zwischen zwei Nuten und Zone 2 für den Bereich innerhalb einer Nut. Für beide Zonen wird getrennt eine Aufschmelzleistung, basierend auf der klassischen Modelltheorie, ermittelt und die Summe der einzelnen Aufschmelzleistungen mit einem Faktor multipliziert. Dieser geometrische Faktor berücksichtigt, wie oft jeweils Zone 1 und 2

innerhalb der Feststoffbettbreite liegen. Für eine ausführliche Beschreibung der Modelltheorie sowie auf die Herleitung der analytischen Gleichungen wird auf weiterführende Literatur [4; 16; 17] verwiesen.

2.1.3 Zielsetzung

Um das Aufschmelzverhalten eines Extruders vorhersagen zu können, sind tiefgreifende experimentelle Untersuchungen der Aufschmelzzone notwendig. Basierend auf diesen Erkenntnissen können analytische Modellierungsansätze entwickelt, validiert und optimiert werden. Im Jahre 2015 wurde hierzu bereits ein analytisches Berechnungsmodell für einen EEgP am Institut für Kunststofftechnik entwickelt [4, 16, 17] und mit experimentellen Untersuchungen auf einem axial-genuteten Zylinder verglichen, Bild 5 (rechts) [7, 17, 18]. Ziel der vorliegende Forschungsarbeit ist die experimentelle Untersuchung der Aufschmelzzone eines EEgP mit durchgehend wendelgenuteter Plastifizierzone, Bild 5 (links), zur Validierung eines bestehenden Aufschmelzmodells.

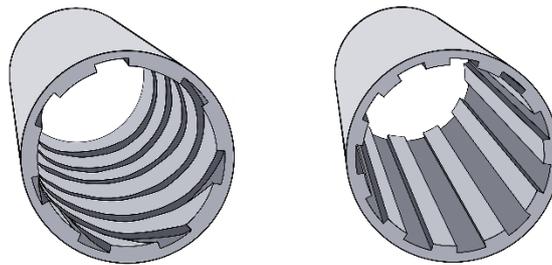


Bild 5: Vergleich der eingebrachten Nuten im Zylinder: wendelförmig (links) und axial (rechts)

Dabei sollen explizit die folgenden Modellannahmen des Aufschmelzvorgangs adressiert werden [16]:

- A1: Der Feststoffkanal ist vollständig gefüllt mit Feststoff und die Breite des Feststoffbettes entspricht der Feststoffkanalbreite.
- A2: Das Aufschmelzen des Kunststoffes findet lediglich an der Grenzschicht zwischen Zylinder und Feststoff statt.
- A3: Die Nuten sind vollständig mit Schmelze gefüllt und es befindet sich kein Festkörper darin.

Hierzu wird in einem ersten Schritt ein axial-teilbarer Einschneckenextruder mit durchgehend wendelförmigen Nuten gebaut und anschließend experimentell untersucht. Dieser Zylinder bietet die Möglichkeit die obere Hälfte anzuheben, um die Barrierschnecke samt der Kunststoffschmelze freizulegen. Durch eine visuelle Untersuchung der eingefrorenen Schmelze können die Annahmen des vorhandenen Aufschmelzmodells validiert und die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung mit denen des analytischen Modells verglichen werden.

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

3.1 Der axial-teilbare Hochleistungsextruder

Bild 6 zeigt eine schematische Darstellung eines axial-teilbaren Einschneckenextruders. Dieser wurde am Institut für Kunststofftechnik in Kooperation mit der Firma Helix GmbH, Winnenden, konstruiert und gefertigt. Er bietet die Möglichkeit die obere Hälfte anzuheben und somit einen schnelleren Einblick in die Aufschmelzzone zu gewähren.

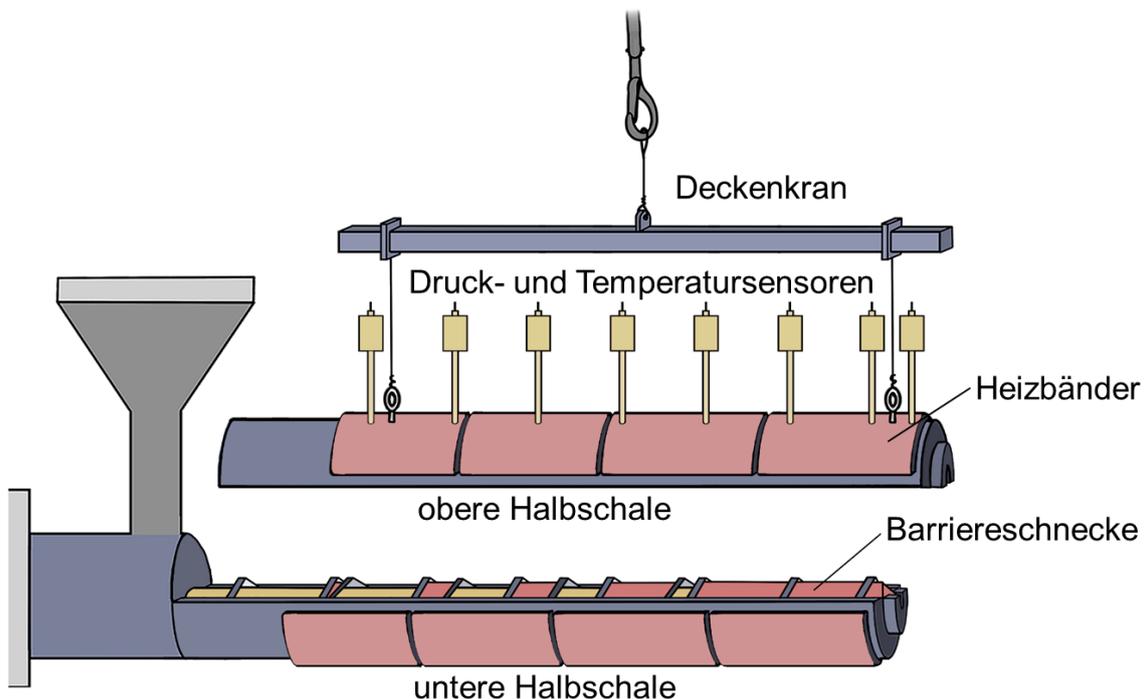


Bild 6: Schematische Darstellung eines axial-teilbaren Extruders

Um einen modularen Aufbau zu gewährleisten, können die inneren Halbschalen des Zylinders ausgetauscht werden, sodass zukünftig auch weitere Nut-Geometrien experimentell untersucht werden können. Die Heizbänder sind als Halbschalen ausgeführt, wobei jeweils die obere und untere Halbschale zusammen angesteuert werden. Die Dichtigkeit des Zylinders wird über reine Flächenpressung realisiert, bei der Schraubverbindungen entlang des Zylinders die zwei Halbschalen zusammenhalten. Damit sich die untere Halbschale des Zylinders beim Abheben der oberen Halbschale nicht mit anhebt, ist diese konstruktiv mit dem Maschinenbett verbunden. Der Zylinder besitzt einen Innendurchmesser von 35 mm und eine Prozesslänge von 34D. Die Nuten in der Einzugs- und Aufschmelzzone sind dabei wendelförmig ausgeführt. Auf der oberen Zylinderhälfte besteht die Möglichkeit, über die gesamte Extruderlänge insgesamt 14 kombinierte Druck- und Temperatursensoren anzubringen. Die Positionen der Messstellen sind so gewählt, dass sie sich außerhalb der Nuten

befinden. Der axial-teilbare EEgP wurde auf Grundlage eines bereits vorhandenen Zylinders konzipiert. Dies ermöglicht einen Vergleich beider Systeme, wodurch sichergestellt werden kann, dass sich durch die axial-teilbare Ausführung kein unerwünschtes Verhalten ergibt.

Wesentliche Vorteile eines geteilten Zylinders im Vergleich zum bisherigen „Schneckenziehen“ sind unter anderem, dass beliebige Nut-Geometrien und Nut-Orientierungen untersucht werden können, sowie eine erhebliche Zeitersparnis beim „Öffnen“ des Zylinders. Konstruktive und fertigungstechnische Herausforderungen ergaben sich jedoch hinsichtlich der Dichtigkeit, Zentrierung der Halbschalen sowie eine maßgetreue Einbringung der Nuten.

3.2 Verwendete Werkstoffe

Das Aufschmelzverhalten wurde anhand von fünf Standard-Polyolefin-Kunststoffen experimentell untersucht. Es handelt sich dabei um ein Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD): Eltex PF 6220 AA der Firma INEOS Olefins & Polymers Europe, London, Großbritannien, ein Polyethylen hoher Dichte (PE-HD): Hostalen ACP 5331 A der Firma LyondellBasell, Rotterdam, Niederlande, ein Polystyrol (PS): 486N der Firma INEOS Styrolution, Frankfurt am Main, Deutschland sowie zwei Polypropylen (PP1): Hostalen H2150 und (PP2): Moplen EP 445L, beide von der Firma LyondellBasell, Rotterdam, Niederlande.

Die Viskositätskurven der verwendeten Kunststoffe wurden mittels eines Platte-Platte-Rotationsrheometers Discovery Hybrid Rheometer DHR-2 der Firma TA Instruments, New Castle, USA, bei drei Temperaturen aufgenommen und daraus die Carreau-Arrhenius-Parameter ermittelt. Die spezifische Wärmekapazität, Schmelztemperatur und Schmelzenthalpie wurden anhand der Differential Scanning Calorimetry (DSC) vom Typ DSC 2/700 der Firma Mettler Toledo GmbH, Gießen, Deutschland, bestimmt. Die Temperaturleitfähigkeit wurde durch das Laser-Flash Temperaturleitmessgerät LFA 447 der Firma Netzsch, Selb, Deutschland, gemessen. Die Dichte der Schmelze wurde mit einem Schmelzindex-Prüfgerät MP-D der Firma Göttfert, Buchen, Deutschland, erfasst und die Dichte des Feststoffs durch das Auftriebverfahren nach DIN EN ISO 1183-1. Die physikalischen Eigenschaften der für die Berechnung verwendeten Kunststoffe sind in Tabelle 1 und die Viskositätskurven in Bild 23, jeweils im Anhang, dargestellt.

3.3 Versuchsaufbau

Die experimentellen Untersuchungen fanden auf einem Extruder der Firma Soplar, Altstätten, Schweiz, statt. Der Extruder hat eine maximale Leistung von 100 kW und kann Drehzahlen bis 400 U/min realisieren. Bild 7 zeigt den schematischen Aufbau der Extrusionsanlage.

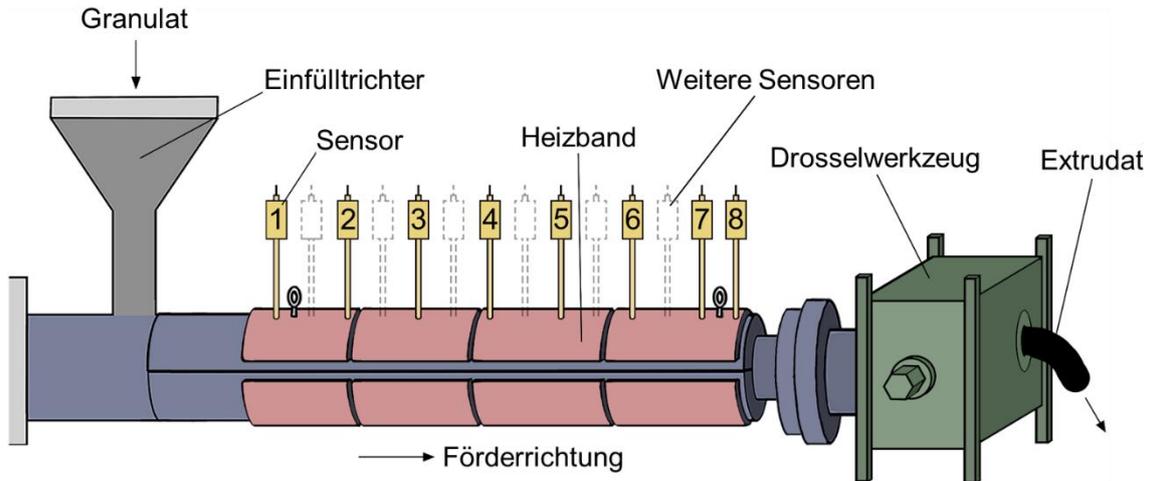


Bild 7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus inklusive Anordnung der kombinierten Druck- und Temperatursensoren

Als Schnecke kam eine Barrierschnecke mit einem Saxton-Mischteil zum Einsatz. Für die Regulierung des Gegendrucks wurde ein Drosselwerkzeug mit zweifacher Pinolen-Umlenkung des Schmelzestroms verwendet. Dadurch können beliebige Werkzeuggegendrücke stufenlos eingestellt werden. Zur Aufzeichnung der Druck- und Temperaturdaten wurden insgesamt acht zuvor kalibrierte kombinierte Druck- und Temperatursensoren der Firma Gneuß, Bad Oeynhausen, Deutschland, verwendet. Die Datenerfassung erfolgte über das Programm LabVIEW von National Instruments, Austin, Texas, USA. Die experimentelle Untersuchung der Aufschmelzzone fanden auf dem zuvor entwickelten axial-teilbaren Zylinder statt. Für Vergleichsversuche wurde zusätzlich ein baugleicher (geschlossener) Zylinder verwendet.

3.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung wird im Folgenden in zwei Teile unterteilt. Zum einen wurden Vergleichsexperimente zwischen dem axial-teilbaren Zylinder und einem baugleichen, geschlossenen Zylinder durchgeführt und zum anderen Visualisierungsversuche, bei dem die obere Hälfte des axial-teilbaren Zylinders abgehoben wird.

Die jeweilige Messdatenerfassung fand in einem stationären Extrusionsprozess statt, bei dem Werkzeuggegendruck, Zylindertemperatur und Drehzahl zeitlich konstant sind und eine visuell homogene Schmelze extrudiert wird. Druck- und Temperaturdaten wurden automatisch mittels LabVIEW aufgezeichnet und ausgewertet, wohingegen der spezifische Massendurchsatz manuell gemessen wurde. Hierfür wurde die Schmelze nach einer definierten Zeitspanne abgetrennt und gewogen. Bild 8 zeigt den Versuchsaufbau des axial-teilbaren Zylinders im geschlossenen Zustand.

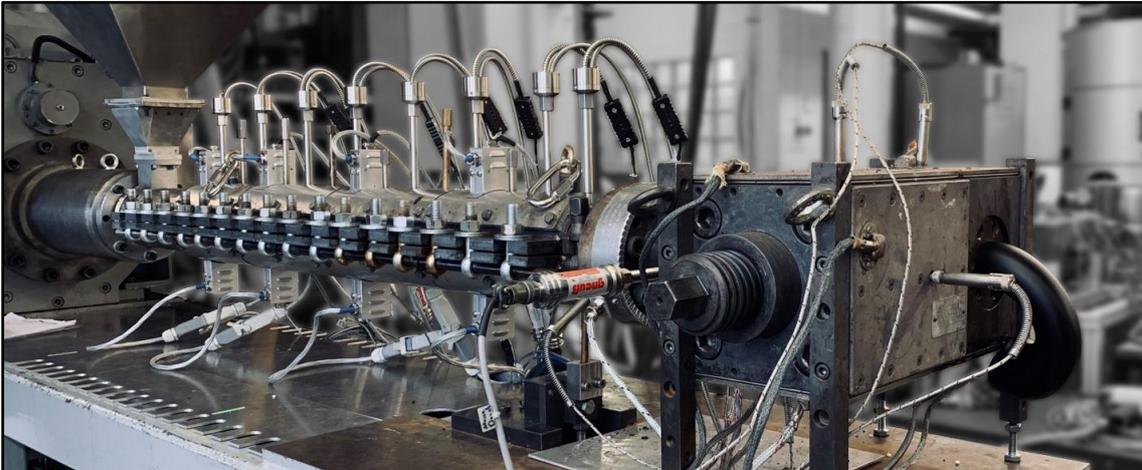


Bild 8: Versuchsaufbau der Extrusionsanlage, beispielhaft dargestellt für den axial-teilbaren Zylinder

Im Folgenden werden die Besonderheiten der jeweiligen Versuchsdurchführung sowie die Variation der Prozessparameter näher beschrieben.

3.4.1 Vergleichsexperimente

Das Ziel der Vergleichsexperimente ist eine Untersuchung, ob der axial-teilbare Zylinder ein identisches Verhalten aufweist wie ein baugleicher, geschlossener Zylinder. Untersucht wurde dies bei einer Zylindertemperatur von 230 °C anhand von drei verschiedenen Werkstoffen (PE-LD, PE-HD und PP1) bei je drei Werkzeuggedrücken (100, 200 und 300 bar) und Drehzahlen (25, 50 und 75 U/min).

Verglichen wurden die Zylinder anhand des ermittelten, spezifischen Massedurchsatzes sowie anhand der Druck- und Temperaturverläufe. Ein direkter, quantitativer Vergleich der Druck- und Temperatursignale war nicht zielführend, da die Sensoren beider Extruder konstruktionsbedingt nicht exakt an derselben Stelle positioniert werden konnten. Im axial-teilbaren Zylinder sind die Messpositionen im Abstand von 70 cm angeordnet und im Gegensatz dazu beträgt dieser beim Vergleichszylinder 72 cm bis 76 cm.

3.4.2 Visualisierungsversuche

Für eine qualitative Analyse des Aufschmelzverhaltens wurde der Extruder nach vollständiger Messung aller relevanter Prozess- und Messdaten abrupt gestoppt, abgekühlt und die obere Zylinderhalbschale abgehoben, Bild 9.

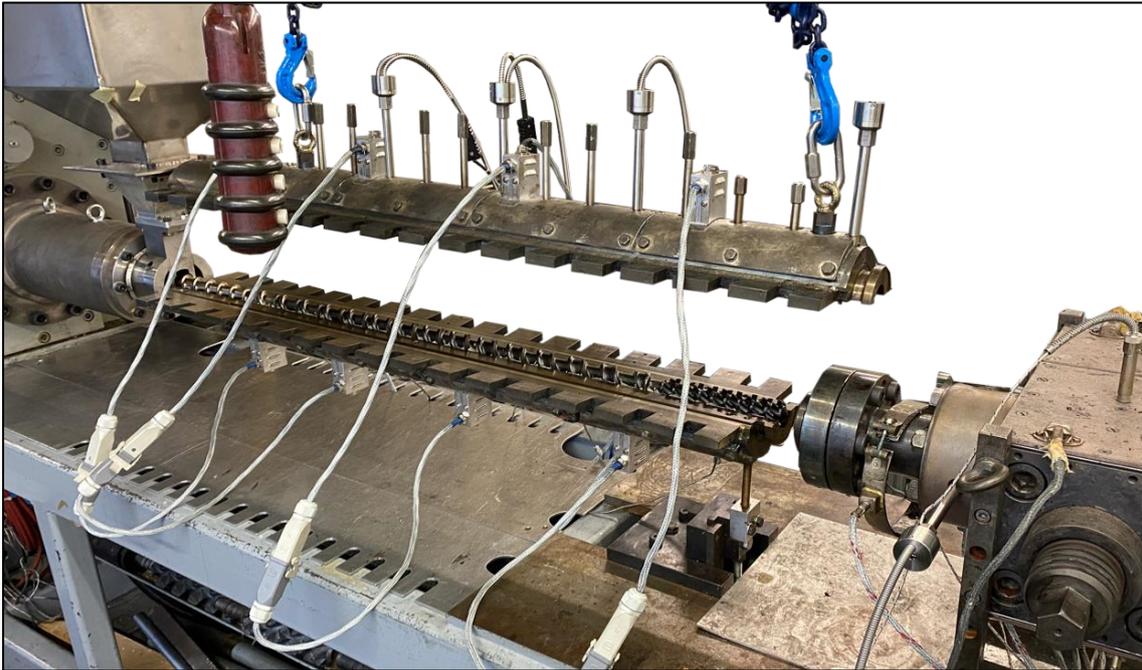


Bild 9: Anheben der oberen Zylinder-Halbschale, um die Schnecke und die Schmelze freizulegen

Ziel ist dabei, den momentanen Zustand der Kunststoffschmelze „einzufrieren“, Bild 10 (links). Um zudem auf der freigelegten Schnecke die Phasen Feststoff und Schmelze visuell voneinander abzugrenzen, wurde ein Dry-Blend, bestehend aus 99 M.-% Basiswerkstoff und einem Prozent eines schwarzpigmentierten Masterbatches, extrudiert. In Vorversuchen zeigte sich, dass dies bereits ausreicht, um die gesamte Schmelze tiefschwarz zu färben.

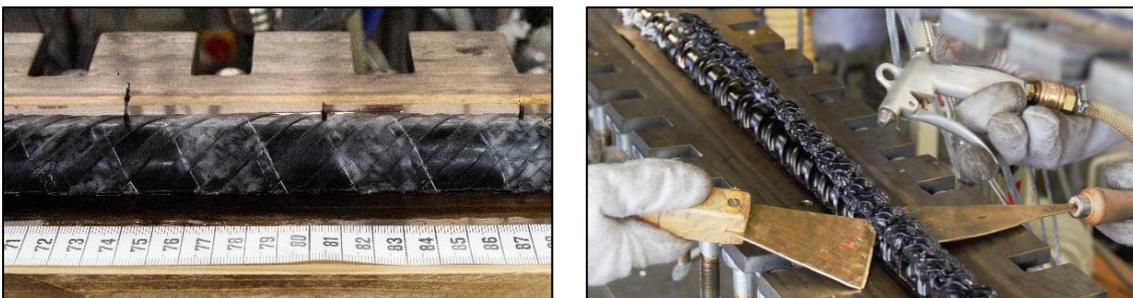


Bild 10: Freigelegte Kunststoffprobe (links) und Probenentnahme von der Barrierschnecke (rechts)

Zur Probenentnahme wurde der Kunststoff entlang der Zylinderkanten und dem Schneckensteg abgeschnitten und von der Schnecke gelöst, Bild 10 (rechts). Neben der Aufschmelzzone wurden ebenfalls Proben aus dem Mischteil sowie aus dem Werkzeug entnommen.

Wie auch in den Vergleichsexperimenten in Kapitel 3.4.1 wurden verschiedene Parameter innerhalb der Visualisierungsversuche variiert, um deren Einfluss auf den Aufschmelzprozess näher zu untersuchen. Untersucht wurden alle fünf Werkstoffe (PE-HD, PE-LD, PP1, PP2 und PS) bei Variation der Drehzahl (25, 50 und 75 U/min) und des Werkzeuggegendrucks (50, 100 und 150 bar). Die untersuchten Parameter wurden basierend auf einem Stern-Versuchsplan variiert und sind in Tabelle 2 im Anhang aufgelistet. Im folgenden Kapitel 3.5 wird näher auf die Probenaufbereitung und -auswertung eingegangen.

3.5 Versuchsauswertung der Visualisierungsversuche

Zur eindeutigen Zuordnung und Beschreibung des Aufschmelzverhaltens wurden alle Segmente (bestehend aus Schmelze- und Feststoffkanal) durchnummeriert. Das Segment mit dem ersten Schmelzekanal wird als Segment 1 definiert. Die gesamte Schnecke besitzt 16 Segmente, wobei das 16. Segment geometriebedingt keinen Feststoffkanal mehr aufweist. Da zudem die Feststoffkanaltiefe zum Ende hin abnimmt, ist dieser ab dem 15. Segment bereits so dünn, dass die Probe bei der Entnahme beschädigt wurde. Die Segmente in der Einzugszone sind als negative Zahlen definiert. Bild 11 zeigt die Barrierschnecke mit den definierten Segmenten und Sensorpositionen und Bild 12 beispielhaft die entnommenen Segmente entlang der Schnecke.

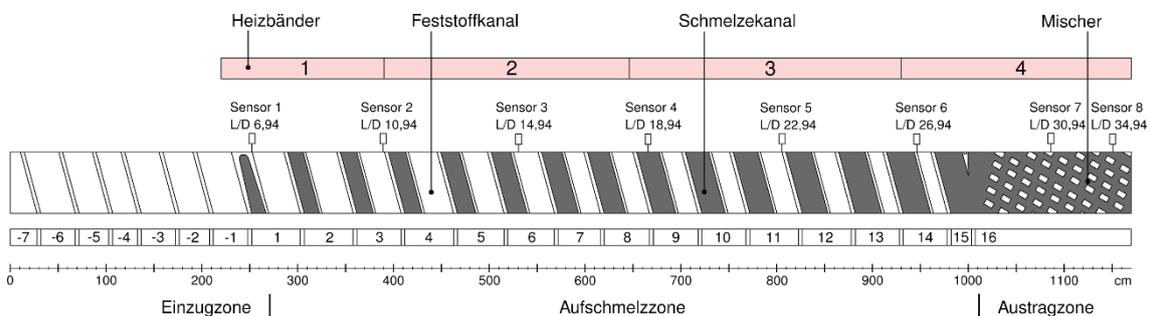


Bild 11: Definition der Positionen von Segmenten und Sensoren auf der Barrierschnecke

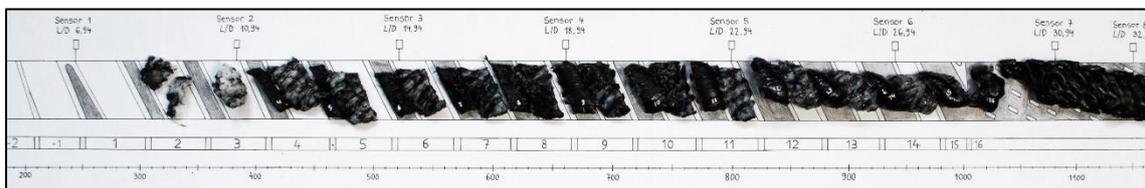


Bild 12: Eingeteilte Segmente bestehend jeweils aus Feststoffkanal und Schmelzekanal entlang der Barrierschnecke beispielhaft für den Werkstoff PE-HD bei einer Drehzahl von 75 U/min und einem Werkzeuggegendruck von 50 bar

Zur Auswertung des Aufschmelzverhaltens wurden die Segmente in Bild 12 in axialer Richtung durchgeschnitten, fein poliert und eingescannt. Bild 13 zeigt eine Detailaufnahme eines Segments (links) sowie eine eingescannte Probe (rechts). Aufgrund einer Mischung aus Grundkomponente und Masterbatch können die zwei Phasen (Feststoff und Schmelze) visuell voneinander unterschieden werden. Schmilzt der Kunststoff auf, so mischt sich die Grundkomponente mit dem Masterbatch und erscheint schwarz. Liegt hingegen eine weiße Farbe vor, so kann von Feststoff ausgegangen werden.

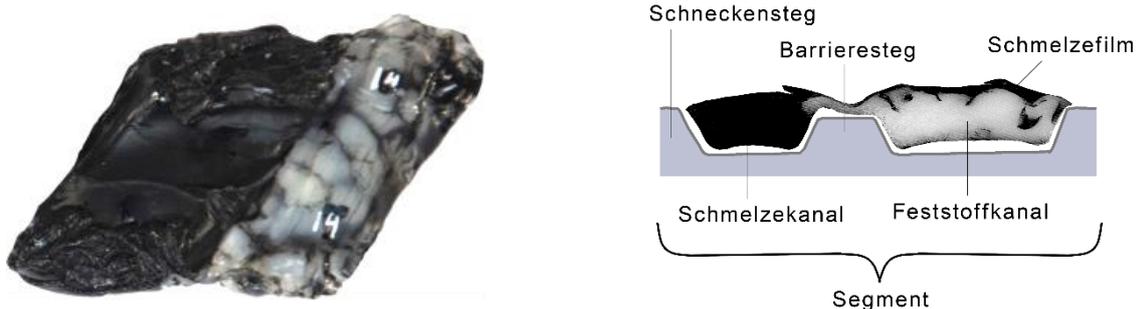


Bild 13: Beispielhafte Detailaufnahme eines entnommenen Segments (links) sowie einer polierten und eingescannten Probe (rechts)

Neben der Analyse des Aufschmelzvorgangs anhand polierter Querschnitte der Kunststoffsegmente werden im Folgenden für die Werkstoffe PE-HD und PP1 unterschiedliche Stadien des Aufschmelzens definiert. Bild 14 verdeutlicht grafisch den Übergang vom rieselfähigen Granulat hin zum homogenen Feststoffbett. Durch Kompression in der Einzugszone bildet sich aus dem rieselfähigem Granulat ein kompaktiertes Feststoffbett (im Folgenden als Granulatkomplex bezeichnet). Entlang des Feststoffkanals verschwimmen optisch die Korngrenzen und sind ab einer gewissen Position mit dem bloßen Auge nicht mehr zu sehen. Dies wird als Vorstufe der Schmelze definiert und im weiteren Verlauf als homogenes Feststoffbett bezeichnet. Die Länge zwischen Granulatkomplex und homogenen Feststoffbett wird schließlich als Homogenisierungslänge definiert.

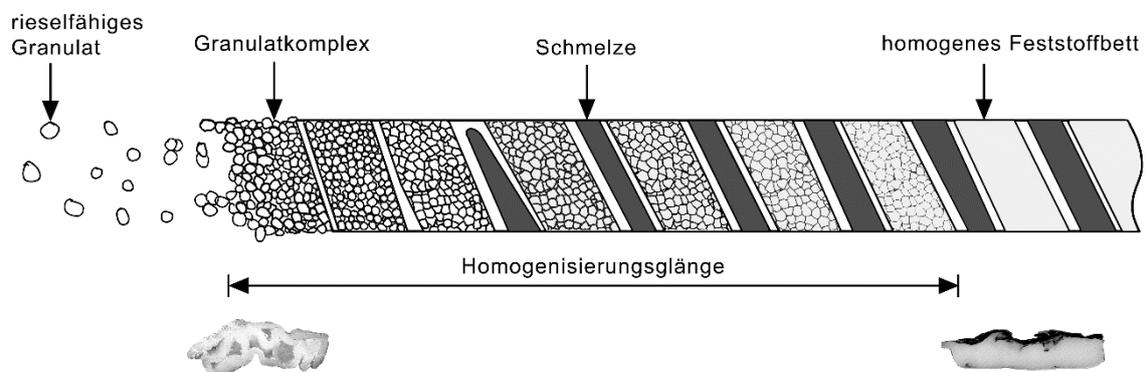


Bild 14: Definition der Aufschmelzstadien und schematische Darstellung der Homogenisierungslänge

Zusätzlich wurden die Werkstoffe PP2 und PS quantitativ mittels dem Bildbearbeitungsprogramm Adobe Photoshop, Adobe Ing., San Jose, California, USA, hinsichtlich ihrer schwarz-weiß-Anteile untersucht. Hierzu wurden die vorhandenen schwarzen, respektive weißen Pixel gezählt und deren Anteil gemessen an der gesamten Schnittfläche ermittelt. Für eine prozentuale Auswertung des Feststoffanteils wurde die Pixelanzahl des Weißanteils mit der Gesamtpixelanzahl des Querschnitts verglichen und daraus der prozentuale Feststoffanteil berechnet. Diese quantitative Analyse dient als Vergleich der experimentellen Untersuchungen mit dem vorhergesagten prozentualen Feststoffanteil aus der Berechnung, siehe Kapitel 4.3.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Vergleichsexperimente

Im Folgenden werden die beiden Zylinder (axial-teilbar und geschlossen) anhand repräsentativer Druck- und Temperaturkurven sowie anhand des ermittelten spezifischen Massendurchsatzes verglichen. Die gezeigten Ergebnisse sind übertragbar auf alle untersuchten Werkstoff- und Betriebsparameter und somit allgemeingültig.

Der Massendurchsatz wird bei einem EEgP primär durch die Nutkonfiguration und Schneckenengeometrie im Einzugsbereich bestimmt, ist unabhängig vom Werkzeugendruck und sollte für jeden Werkstoff sowie jede Extruderkonfiguration unabhängig vom gewählten Betriebspunkt konstant sein. Da die Konfiguration beider untersuchten Zylinder gleich ist, sollte sich somit auch kein Unterschied in den spezifischen Massendurchsätzen der jeweiligen Werkstoffe ergeben. Bild 15 zeigt die ermittelten Massendurchsätze für beide Zylinder.

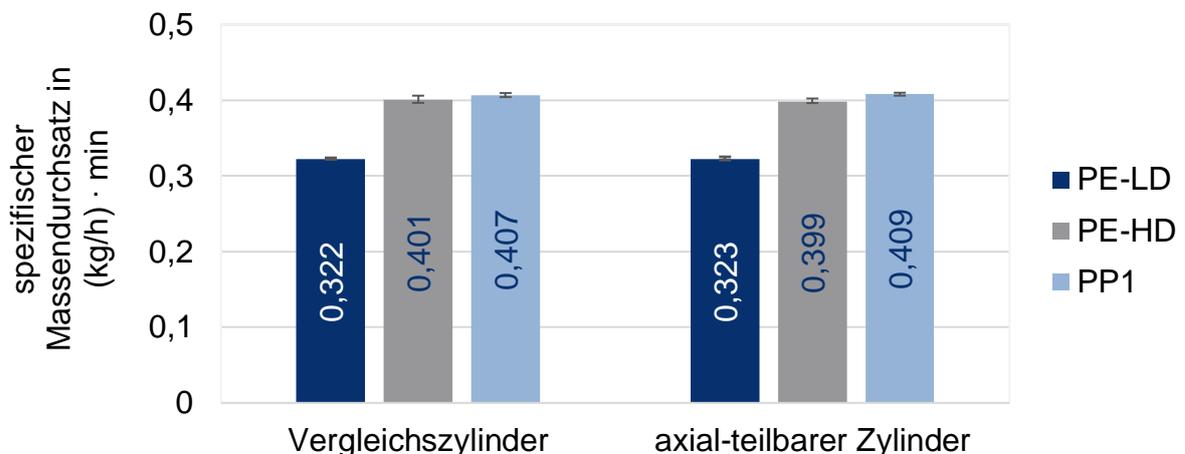


Bild 15: Vergleich des spezifischen Massendurchsatzes des geschlossenen Vergleichszylinders und des entwickelten, axial-teilbaren Zylinders

Die maximale Abweichung der gemittelten, spezifischen Durchsätze zwischen den Zylindern beträgt $0,002 \text{ (kg/h)·min}$, was einer prozentualen Abweichung von 0,5 % entspricht. Da die Messung manuell erfolgte, kann diese Differenz auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden. Somit zeigen diese Ergebnisse, dass die Zwangsförderung durch die axiale Trennebene im axial-teilbaren Zylinder nicht beeinflusst wird. Die Fehlerbalken in Bild 15 verdeutlichen die minimale bzw. maximale Abweichung des spezifischen Massendurchsatzes bezogen auf eine Variation der Drehzahl.

Bild 16 zeigt zudem die gemittelten Temperatur- und Druckverläufe des geschlossenen Vergleichszylinders sowie die des axial-teilbaren Zylinders exemplarisch für PE-LD und einer Drehzahl von 50 U/min, einem Werkzeuggegendruck von 100 bar und einer eingestellten Zylindertemperatur von 220 °C. Die Fehlerbalken in Bild 16 stellen die Standardabweichung der gemessenen (gemittelten) Drucksignale dar, die jeweils über eine Zeitspanne von 60 s erfasst wurden.

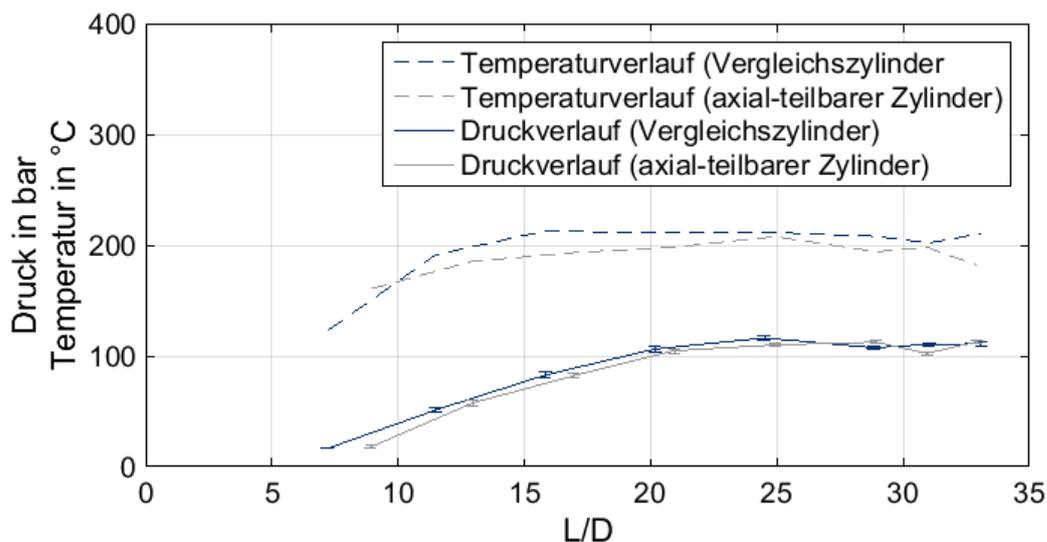


Bild 16: Vergleich der Druck- und Temperatursignale des geschlossenen Vergleichszylinders mit denen des axial-teilbaren Zylinders exemplarisch für den Werkstoff PE-LD bei einer Drehzahl von 50 U/min, einem Werkzeuggegendruck von 100 bar und einer eingestellten Zylindertemperatur von 220 °C.

Es ist zu erkennen, dass beide Zylinder vergleichbare Druck- und Temperaturverläufe besitzen. Zudem deutet die geringe Streuung (Fehlerbalken) in den Druckmessungen auf einen stabilen Prozess hin. Hervorzuheben sind jedoch Unterschiede in den Absolutwerten der Temperatur. Der axial-teilbare Zylinder weist über alle Versuche hinweg im Mittel eine ca. 20 % höhere Temperatur im Einzugsbereich auf. Dies lässt sich konstruktiv erklären, da zwar die Aufschmelzzone von der Einzugszone in den inneren Halbschalen thermisch getrennt ist, darüber allerdings die äußere Halbschale

liegt und somit die Funktionsweise der thermischen Trennung in gewisser Weise einschränkt. Die Einzugszone des axial-teilbaren Zylinders erwärmt sich dadurch im Vergleich zum Vergleichszylinder geringfügig mehr. Zudem wurde beim axial-teilbaren Zylinder festgestellt, dass für nahezu alle Versuche die maximal erreichbare, gemessene Zylindertemperatur in der Aufschmelz- und Meteringzone im Mittel ca. 8 % unterhalb der des Vergleichszylinders liegt. Teilweise wurde zudem selbst über eine lange Extrusionsdauer im stationären Extrusionsprozess die eingestellte Zylindertemperatur von 220 °C nicht für alle Versuche vollständig erreicht. Dies lässt darauf schließen, dass die Heizleistung der Heizbänder nicht ausreicht und viel Wärme über die konstruktiv bedingten Freiflächen am Zylinder verloren geht. Dies begründet auch die Verstärkung des Effekts bei erhöhter Drehzahl, da mehr „kaltes“ Material gefördert und in kürzerer Zeit aufgeschmolzen werden muss. Bei den geringen Drehzahlen hat dies jedoch keine signifikante Auswirkung auf die experimentellen Untersuchungen mit dem axial-teilbaren Zylinder. Dies limitiert aktuell lediglich das Maximum der zu untersuchenden Drehzahlen.

4.2 Visualisierungsversuche

Zur Analyse des Aufschmelzvorgangs werden die polierten Querschnitte der Kunststoffsegmente visuell ausgewertet. Aufgrund der umfangreichen Daten werden die erlangten Erkenntnisse hier exemplarisch an ausgewählten Betriebspunkten und Werkstoffen diskutiert. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf einer Validierung der im Rechenmodell getroffenen Annahmen.

Annahme A1 konnte über alle untersuchten Werkstoffe und Betriebspunkte experimentell bestätigt werden. Selbst eine Variation des Gegendrucks und der Drehzahl haben keinen Einfluss auf einen bis zum Ende mit Feststoff vollgefüllten Feststoffkanal. Bild 17 zeigt dies exemplarisch für den Werkstoff PP1. Die Fehlstellen in den Segmenten zwei, drei und vier sowie der fehlende Feststoffkanal in den Segmenten zehn und elf sind der Probenentnahme und -aufbereitung geschuldet. Hier wurde diese entweder bei der Entnahme der Versuchsprobe von der Schnecke leicht beschädigt, oder im anschließenden Schneiden und Polieren sind Teile herausgebrochen oder zu Bruch gegangen. Unabhängig vom Werkstoff wurde dieses charakteristische Verhalten für alle durchgeführten Untersuchungen beobachtet. Zudem ist der Schmelzkanal tiefschwarz eingefärbt, wodurch davon ausgegangen werden kann, dass darin lediglich Schmelze vorliegt. Lediglich bei transparenten Materialien, wie bspw. PS kann diesbezüglich keine eindeutige Aussage über die Homogenität im Inneren getroffen werden, da womöglich durch eingeschlossene, nicht gefärbte Teile hindurchgesehen werden kann. Dies kann in zukünftigen Untersuchungen durch eine Verwendung von eingefärbtem Ausgangsmaterial optimiert werden.

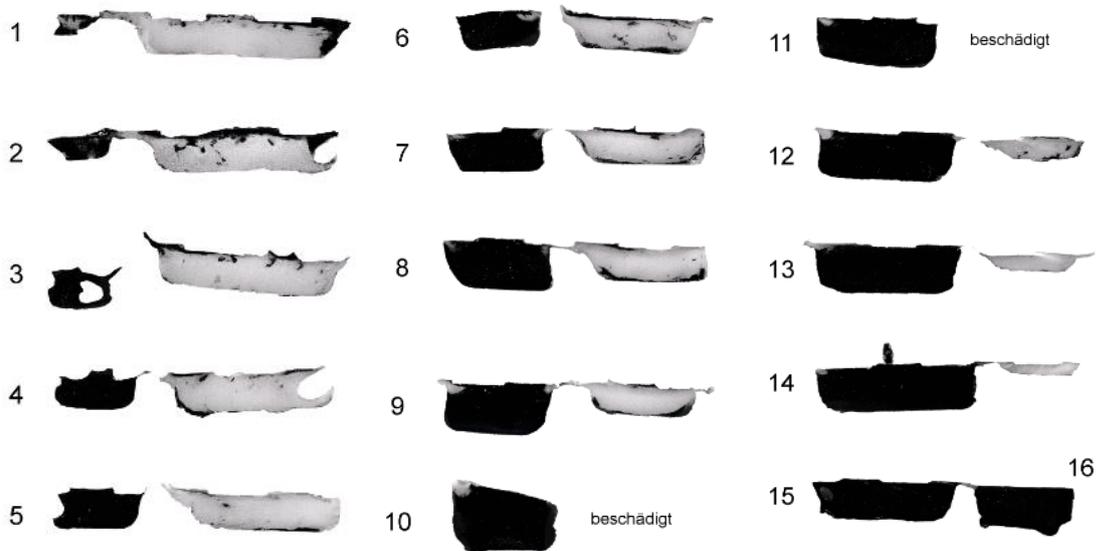


Bild 17: Eingescannte Querschnitte (Schnittbilder) von PP1 bei einer Drehzahl von 50 U/min, einem Werkzeuggegendruck von 100 bar und einer Zylinder-temperatur von 220 °C

Für den Werkstoff PE-HD hat sich in den Versuchen bei 25 U/min gezeigt, dass sich auch in den letzten Segmenten des Feststoffkanals ein geringer Schmelzpool ausbildet. Dies stellte jedoch in den durchgeführten Experimenten eine Ausnahme dar und kann mit den längeren Verweilzeiten aufgrund der geringen Drehzahl und den guten Schmelzeigenschaften des Kunststoffes begründet werden. Ein Vergleichsversuch dieses Werkstoffes mit reduzierter Zylindertemperatur von 190 °C weist hingegen erneut einen vollständig gefüllten Feststoffkanal auf. Obwohl die Annahme A1 für die durchgeführten Versuche generell zutrifft, sollte dies dennoch nicht allgemeingültig statuiert werden. Ein bis zum Ende mit Feststoff gefüllter Feststoffkanal (ohne Schmelzpool) hängt im Allgemeinen von mehreren Faktoren ab. So wird dieser beeinflusst durch das Schneckendesign, die Werkstoffparameter und der gewählte Betriebspunkt (Drehzahl, Temperatur und Gegendruck). Demnach kann zwar A1 nicht pauschal validiert werden, optimale Prozessbedingungen eines EEgP sollten jedoch als Zielfunktion einen durchgehend mit Feststoff gefüllten Feststoffkanal besitzen.

Eine experimentelle Verifizierung der Annahme A2 stellt hingegen eine größere Herausforderung dar. Die Querschnitte der Proben liefern hierzu visuell keine eindeutige Aussage. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das Aufschmelzen primär in der Grenzschicht zwischen Feststoffbett und Zylinderwand stattfindet und die Nuten das frisch aufgeschmolzene Material unmittelbar in den Schmelzekanal abtransportiert. Um die möglichen Transport- und Aufschmelzvorgänge detaillierter zu untersuchen, wurden zusätzliche Experimente für PP1 und PE-HD durchgeführt, bei denen anstelle eines Dry-Blends lediglich ein Korn eines Masterbatches hinzugegeben wurde. Bild 18 zeigt die Rückseite einer entnommenen Probe von PE-HD.

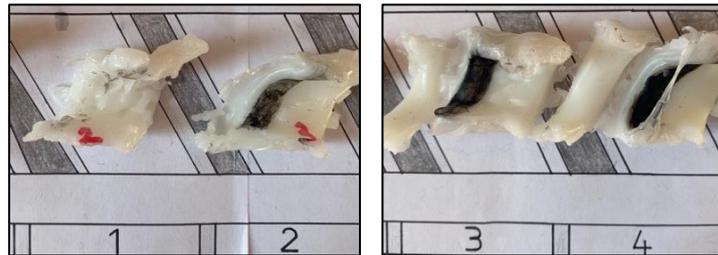


Bild 18: Versuchsprobe eines PE-HD (Anhaltezeitpunkt 1:30 min) bei einer Drehzahl von 25 U/min, einem Werkzeuggegendruck von 50 bar und einer Zylindertemperatur von 220 °C

Hier ist zu erkennen, dass ein sehr dünner Schmelzefilm auch am Schneckenrund existiert. Dieser ist zwar teilweise auch in den Schnittbildern (vgl. Bild 17) zu erahnen, kann jedoch in Bild 18 eindeutig visualisiert werden. Identisches gilt auch für den Werkstoff PP1. Es wird vermutet, dass das Farbmasterrand in der Einzugszone bis auf den Schneckenkern gefallen ist. Das Korn scheint im Feststoffkanal unter dem Feststoffbett eingeklemmt worden zu sein, so dass sich die Farbe nicht wie bei den anderen Versuchen im gesamten Kanal verteilen konnte. Daher liegt weiterhin die Vermutung nahe, dass lediglich ein sehr geringer Schmelzefilm am Schneckenrund existiert und nicht wie bei den Versuchen von Dekker das Feststoffbett vollständig von Schmelze umgeben ist. Somit ist Annahme A2 im Modell zwar nicht exakt erfüllt, aber die Versuche zeigen einen zu vernachlässigen kleinen Schmelzefilm, der zudem unter dem Feststoffbett eingeschlossen ist. Dafür spricht auch, dass die schwarze Farbe in Bild 18 erst in späteren Segmenten (erstmal ab Segment 10) im Schmelzkanal aufzufinden ist. Neben der Annahme A2 bestätigt diese Untersuchung zudem erneut Annahme A1, da sich im Falle eines Schmelzepools im Feststoffkanal die schwarze Farbe am Schneckenrund mischen würde und nicht, wie im Versuch zu beobachten, lediglich eine Art Schmierfilm bildet.

Auch die Annahme A3 lässt sich nicht eindeutig anhand der erstellten Probenquerschnitte verifizieren. Daher wird hierzu die Probenvorderseite untersucht. Bild 19 zeigt beispielhaft die Draufsicht zweier entnommener Versuchsproben (PP1 und PE-HD), wobei links ein Dry-Blend extrudiert wurde und rechts erneut lediglich ein einzelnes Masterbatch-Korn dem Kunststoff hinzugegeben wurde. Die eindeutige Schwarzfärbung innerhalb der Nuten lässt auf einen Schmelzetransport schließen. Damit ist jedoch noch nicht verifiziert, ob ausschließlich Schmelze in den Nuten vorliegt. Diese Annahme konnte auch in den vorliegenden Versuchen visuell nicht eindeutig nachgewiesen werden. Es ist durchaus möglich, dass trotz mit Feststoffpartikeln oder erweichtem Granulat teilweise verstopfte Nuten einen Schmelzetransport ermöglichen. Zudem könnte das frisch aufgeschmolzene Granulat auch weiterhin ungehindert über den Barrieresteg strömen. Allerdings wäre in beiden Fällen ein effizienter Schmelzetransport behindert, und aus theoretischen Überlegungen heraus würde dies einhergehen mit einer abnehmenden

Aufschmelzleistung. Folglich würde sich ggf. ein dickerer Schmelzefilm zwischen Zylinderwand und Feststoffbett bilden und womöglich sogar ein Schmelzpool im Feststoffkanal ausbilden.



Bild 19: Draufsicht der entnommenen Versuchsproben. Links: PE-HD bei einer Drehzahl von 75 U/min und einem Werkzeuggedruck von 100 bar. Rechts: PP1 bei einer Drehzahl von 25 U/min und einem Werkzeuggedruck von 100 bar (Anhaltezeitpunkt: 1 min)

Abschließend zu den experimentellen Untersuchungen soll im Folgenden noch auf die Auswertung der Homogenisierungslänge eingegangen werden. Diese wurde für die Werkstoffe PE-HD und PP1 ausgewertet. Bild 20 zeigt beispielhaft die Homogenisierungslänge (blau gefärbt) für den Werkstoff PE-HD.

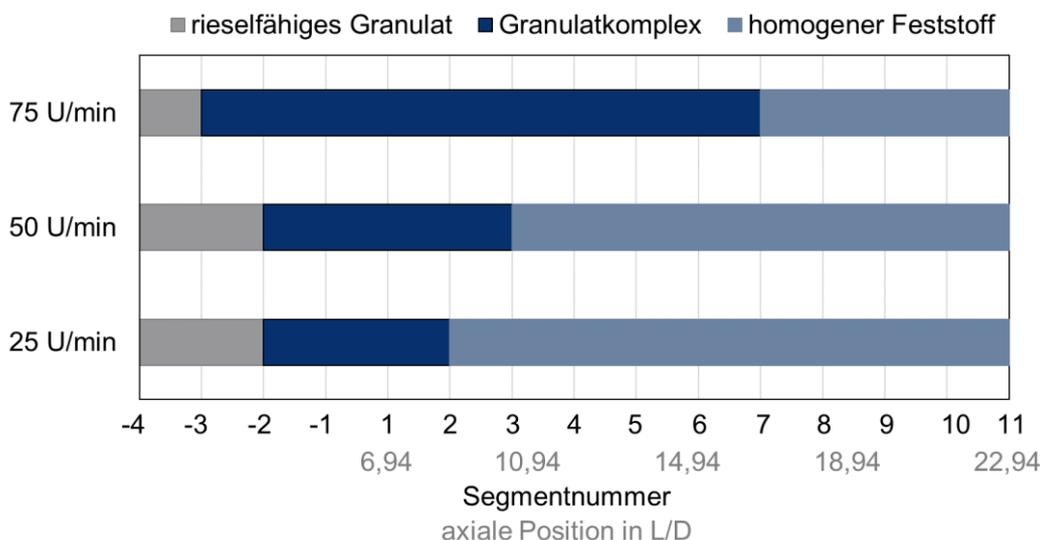


Bild 20: Homogenisierungslänge für PE-HD bei einer Variation der Drehzahl und konstantem Werkzeuggedruck von 100 bar und einer Werkzeugtemperatur von 220 °C

Es ist zu erkennen, dass mit steigender Drehzahl die Länge des Granulatkomplexes zunimmt und sich somit auch die Homogenisierungslänge verlängert. Zudem beginnt bei steigender Drehzahl das Granulatkomplex früher, da das Granulat zunehmend verdichtet wird. Diese Beobachtungen sind auch

ansatzweise mit PP1 (Bild 24, Anhang) zu erkennen, wobei die Zusammenhänge nicht so deutlich ausgeprägt sind, wie dies bei PE-HD der Fall ist.

Vergleichend lässt sich festhalten, dass die Homogenisierungslänge von PP1 im Allgemeinen kürzer ist als die von PE-HD. Eine mögliche Erklärung ist, dass PP1 mehr Reib- und Scherwärme erzeugt, wodurch sich bereits zu Beginn der Aufschmelzzone die Aufschmelzleistung erhöht und früher ein Granulatkomplex erzeugt. Warum sich jedoch bei PE-HD erst später ein homogener Feststoff ergibt, kann nicht abschließend geklärt werden und muss in weiterführenden Arbeiten näher untersucht werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Auswertung auf einer subjektiven (visuellen) Beurteilung der Proben basiert und daher gewissen Schwankungen unterliegt. Um allgemeingültige Tendenzen der Homogenisierungslänge zu formulieren, sind weitere Untersuchungen notwendig. Hierzu sollte zudem eine standardisierte, objektive Auswertemethode entwickelt werden, die zudem aufgrund des hohen Präparations- und Analyseaufwandes möglichst automatisch abläuft.

4.3 Vergleich experimenteller Untersuchungen und des Berechnungsmodells

Im Folgenden werden die Querschnitte der Werkstoffe PP2 und PS quantitativ hinsichtlich ihres prozentualen Feststoffanteils näher untersucht. Diese Auswertung dient einem Vergleich mit dem Berechnungsmodell für einen EEgP. Die Eingabeparameter der analytischen Berechnung sind Tabelle 1 und Tabelle 3 im Anhang zu entnehmen.

Bild 21 und Bild 22 zeigen jeweils eine Gegenüberstellung der vorhergesagten und experimentell ermittelten prozentualen Feststoffanteile für die Werkstoffe PP2 und PS bei einem Werkzeuggedruck von 100 bar. In beiden Diagrammen ist ein ähnlicher Verlauf des prozentualen Feststoffanteils zwischen Experiment und Berechnung festzustellen. Das analytische Modell kann für den teilkristallinen Werkstoff PP2 den qualitativen Verlauf der experimentell ermittelten prozentualen Feststoffanteile für die Drehzahlen von 50 U/min und 75 U/min gut abbilden, Bild 21. Bis zu einem L/D-Verhältnis von 25 liegt dabei die mittlere Abweichung bei ca. 13 %. Für geringe Drehzahlen hingegen überschätzt das Berechnungsmodell deutlich die reale Aufschmelzleistung des Extruders.

Ein vergleichbares Verhalten ist auch bei dem untersuchten amorphen Werkstoff PS zu erkennen, wobei jedoch die Unterschiede zwischen Experiment und Berechnung auch bei höheren Drehzahlen deutlicher sind, Bild 22. Für 75 U/min liegt die Abweichung (bis zu L/D=25) im Mittel noch bei ca. 9 %, wohingegen diese mit sinkender Drehzahl immer stärker zunimmt. Wie auch für PP2 überschätzt somit das Berechnungsmodell für geringe bis mittlere Drehzahlen deutlich die voraussichtlich im Prozess vorliegende reale Aufschmelzleistung von PS.

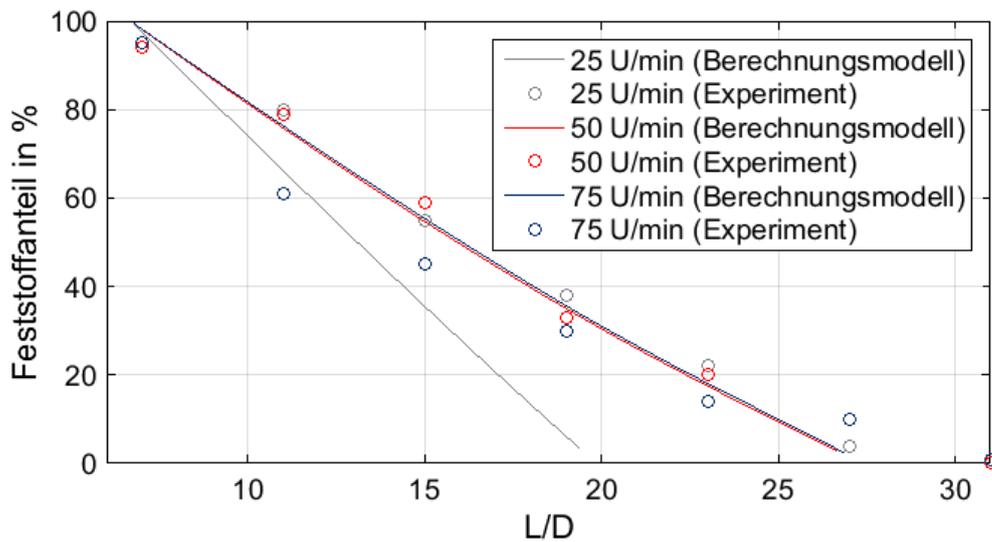


Bild 21: Vergleich berechneter und experimentell ermittelter prozentualer Feststoffanteil für PP2 und einem Werkzeuggedruck von 100 bar

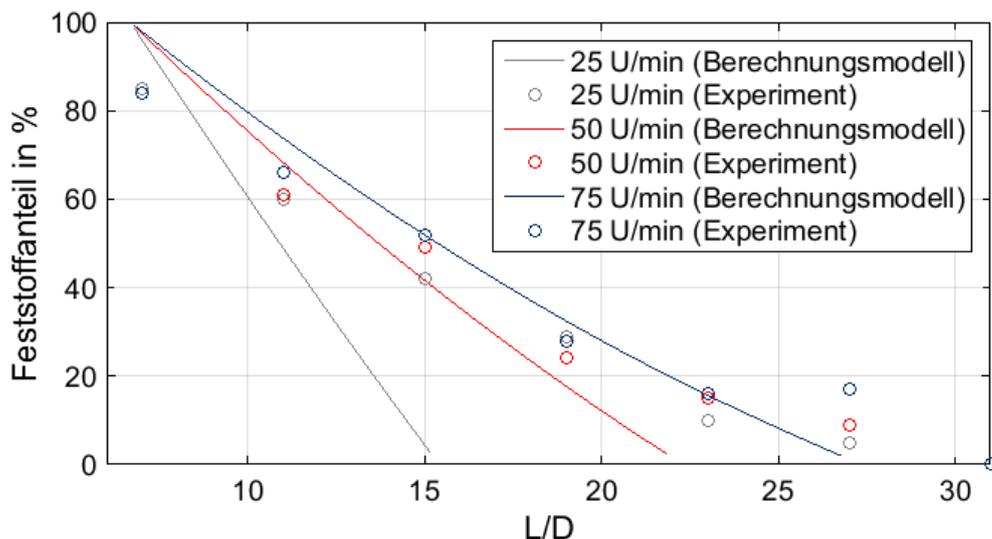


Bild 22: Vergleich berechneter und experimentell ermittelter prozentualer Feststoffanteil für PS und einem Werkzeuggedruck von 100 bar

Unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen sowie zum Teil erheblichen Vereinfachungen des realen Aufschmelzprozesses im analytischen Modell und hinsichtlich der Abweichungen bzw. Unschärfe bei der visuellen Auswertung, kann das Berechnungsmodell für die untersuchten Drehzahlen von 50 U/min und 75 U/min das tendenzielle Verhalten bei Variation einzelner Prozessparameter abbilden. Die ermittelten quantitativen, prozentualen Feststoffanteile (im Experiment und in der Berechnung) sollten allerdings nicht als isolierte Fixwerte einzelner Positionen entlang des Extruders betrachtet werden.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde erstmals die Aufschmelzzone eines wendelgenuteten Hochleistungsextruders experimentell untersucht. Vorab wurde hierzu ein axial-teilbarer Zylinder entwickelt und dessen Verhalten mit einem baugleichen, geschlossenen Zylinder verglichen. Die Vergleichsexperimente haben gezeigt, dass der axial-teilbare Zylinder ein vergleichbares Verhalten aufweist und somit die Aufschmelzzone experimentell untersucht werden kann.

Basierend auf den Visualisierungsversuchen konnten die Modellannahmen, auf welchen sich die analytische Berechnung stützt, abschließend weder umfassend validiert noch widerlegt werden. Auch wenn ein vollständig mit Feststoff gefüllter Feststoffkanal von vielen Einflussfaktoren abhängt, wurde dies jedoch im Rahmen der durchgeführten Experimente bestätigt. Im Feststoffkanal befand sich ausschließlich Feststoff, und der Feststoffkanal war vollständig bis zum Ende mit Feststoff gefüllt. Zudem bildete sich für alle untersuchten Betriebspunkte kein deutlicher Schmelzepool im Feststoffkanal aus, weshalb davon ausgegangen wird, dass die Nuten die frisch aufgeschmolzene Kunststoffschmelze effizient vom Feststoffkanal in den Schmelzekanal abtransportieren können. Die sichtbaren Stromlinien in der Nut stützen zudem die Annahme, dass die Nuten vollständig mit Schmelze gefüllt sind, widerlegen jedoch auch nicht, dass kleine Feststoffpartikel oder erweichter Kunststoff mit hindurchgepresst werden. Weiterhin wurde festgestellt, dass ein kleiner Schmelzefilm an der Schnecke existiert, welcher jedoch aufgrund seiner geringen Dicke lediglich als Schmierfilm anzusehen ist. Daher wird auch hier weiterhin davon ausgegangen, dass das Feststoffbett nicht wie bei den Versuchen durch Dekker vollständig in der Schmelze schwimmt. Ein Vergleich zwischen den experimentell ermittelten und berechneten prozentualen Feststoffanteilen zeigt, dass trotz der stark vereinfachten Modellannahmen das analytische Modell den prinzipiellen Verlauf des prozentualen Feststoffanteils abbilden kann. Für die untersuchten Drehzahlen von 50 U/min und 75 U/min stehen die Ergebnisse für PP2 in guter Übereinstimmung bei einer mittleren Abweichung von ca. 13 % (bis $L/D=25$). Für geringere Drehzahlen und den Werkstoff PS hingegen überschätzt das Berechnungsmodell deutlich die Aufschmelzleistung der realen Anlage. Ob hierbei die Unterschiede in der berechneten Aufschmelzleistung zwischen den beiden untersuchten Werkstoffen (PP2 und PS) in der Berechnung auf Phänomene zwischen teilkristallinen und amorphen Werkstoffen zurückzuführen ist, muss in Zukunft näher untersucht werden.

In weiterführenden Arbeiten soll für eine genauere Reproduzierbarkeit der Versuchsablauf (zeitlich definiertes Kühlen und Abheben der oberen Halbschale) und die quantitative Auswertung der Versuchsproben standardisiert werden. Zudem sollen transparente Materialien, wie bspw. PS, vorab eingefärbt und die Querschnitte anhand hinterleuchteten Dünnschnitten untersucht werden. Des Weiteren soll durch eine Variation der Einsätze ein glatter Zylinder

sowie weitere Nutgeometrien in der Aufschmelzzone untersucht und mit den Ergebnissen aus dieser Arbeit verglichen werden. Auch hinsichtlich der Modellierung und Berechnung sind weitere Arbeiten zielführend. Hier soll die analytische Berechnung der Aufschmelzzone um numerische Simulationen ergänzt werden. Eine sehr vielversprechende Methode zur Simulation der Aufschmelzzone stellt die Kopplung von DEM und CFD dar, um auch den Phasenübergang von Granulat zur Schmelze simulativ zu erfassen. Eine Analyse der numerischen Simulationen bietet die Möglichkeit, bestehende analytische Modellansätze für die Auslegung von Einschneckenextruder mit genuteter Plastifizierzone weiter zu optimieren.

6 DANKSAGUNG

Die hier vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG) geförderten Forschungsprojekts zum Thema „Einfluss der Nuten auf die verfahrenstechnischen Vorgänge in genuteten Plastifizierzonen von Einschneckenextrudern“ mit dem Förderkennzeichen BO 1600/36-1. Weiterer Dank gilt Viviane Fischer für die Erstellung der Grafiken sowie an alle Studierende, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeit an den hier vorgestellten Ergebnissen mitgewirkt haben: Viviane Fischer, Dominik Kröhl, Matthias Mauz, Henrike Prokopp und Anette Skatula.

Literatur

- [1] Baur, E.; Brinkmann, S.; Osswald, T. A.; et al. Saechtling Kunststoff Taschenbuch 31. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2013
ISBN: 978-3-446-43442-4
DOI: 10.3139/9783446437296
- [2] Osswald, T. A. Understanding Polymer Processing: Processes and Governing Equations
Carl Hanser Verlag, München, 2011
ISBN: 978-1-56990-472-5
- [3] White, J. L.; Potente, H. Screw Extrusion: Science and Technology
Carl Hanser Verlag, München, 2002
ISBN: 978-3-446-19624-7
DOI: 10.3139/9783446434189
- [4] Avila-Alfaro, J. A.; Grünschloß, E.; Epple, S.; et al. Analysis of a Single Screw Extruder with a Grooved Plasticating Barrel – Part I: The Melting Model
International Polymer Processing 30 (2015), S. 284–296
DOI: 10.3139/217.3021
- [5] Grünschloß, E. Schutzrecht DE 19928870-C2 (02.10.2003)
19928870.4-16, 24.06.1999
- [6] Bonten, C. Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen
2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2016
ISBN: 978-3-446-44674-8
DOI: 10.3139/9783446449176
- [7] Kettemann, J.; Avila-Alfaro, J. A.; Bonten, C. Licht ins Dunkel bringen – Aufschmelzleistung in genuteten Plastifizierzylindern vorhersagen
Kunststoffe 1 (2018), S. 55–59
- [8] Grünschloß, E. A New Style Single Screw Extruder with Improved Plastification and Out-put Power
International Polymer Processing 17 (2002), S. 291–300
DOI: 10.3139/217.1703

- [9] Grünschloß, E. A Powerful Universal Plasticating System for Single-screw-extruders and Injection-moulding Machines
International Polymer Processing 18 (2003),
S. 226–234
DOI: 10.3139/217.1752
- [10] Chung, C. I.;
Choi, M.;
Yoon, M.;
et al. Performance of HELIBAR® Extruder using a grooved
Barrel
SPE-ANTEC (2009), S. 1192–1196
- [11] Chung, C. I. Extrusion of Polymers: Theory and Practice
3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2019
ISBN: 978-1-56990-609-5
DOI: 10.3139/9781569907382
- [12] Grünschloß, E. HELIBAR® - a Powerful Single Screw Plasticizing
System
SPE-ANTEC (2007), S. 405–140
- [13] Maddock, B. H. A Visual Analysis of Flow and Mixing in Extruder
Screws
SPE Journal 5 (1959), S. 383–389
- [14] Klenk, P. Plastifiziermodelle für die Verarbeitung benetzender
und nichtbenetzender Thermoplaste auf
Einschnecken-Extrudern
Rheologica Acta 7 (1968), S. 75–78
DOI: 10.1007/BF01970317
- [15] Dekker, J. Verbesserte Schneckenkonstruktion für das
Extrudieren von Polypropylen
Kunststoffe 66 (1976), S. 130–135
- [16] Avila-Alfaro, J. A. Der Aufschmelzvorgang in Einschneckenextrudern
mit genutetem Plastifizierzylinder
Dissertation am Institut für Kunststofftechnik,
Universität Stuttgart, 2016
- [17] Kettemann, J.;
Avila-Alfaro, J. A.;
Bonten, C. Experimental investigation and improved modeling of
the melting process in single-screw extruders with a
grooved plasticizing barrel
AIP Conference Proceedings 2055, 070015 (2019)
DOI: 10.1063/1.5084859

- [18] Kettemann, J.; Avila-Alfaro, J. A.; Bonten, C. Analysis of a Single-Screw Extruder with a Grooved Plasticizing Barrel – Experimental Investigation
International Polymer Processing 34 (2019), S. 143–150
DOI: 10.3139/217.3732
- [19] Jin, X.-M.; Jia, M.-Y.; Xue, P.; et al. Study on the melting performance of single screw extruder with grooved melting zone and barr screw
Journal of Materials Processing Technology 214 (2014), S. 2834–2842
DOI: 10.1016/j.matprotec.2014.06.022
- [20] Tadmor, Z. Fundamentals of plasticating extrusion. I. A theoretical model for melting
Polymer Engineering and Science 6 (1966), S. 185–190
DOI: 10.1002/pen.760060303
- [21] Tadmor, Z.; Duvdevani, I.; Klein, I. Melting in plasticating extruders theory and experiments
Polymer Engineering and Science 7 (1967), S. 198–217
DOI: 10.1002/pen.760070313
- [22] Hinrichs, D. R.; Lilleleht, L. U. A modified melting model for plastifying extruders
Polymer Engineering and Science 11 (1970), S. 268–278
DOI: 10.1002/pen.760100504
- [23] Donovan, R. C. A theoretical melting model for plasticating extruders
Polymer Engineering and Science 11 (1971), S. 247–257
DOI: 10.1002/pen.760110313
- [24] Vermeulen, J. R.; Gerson, P. M.; Beek, W. J. The Melting of a Bed of Polymer Granules on a Hot Moving Surface
Chemical Engineering Science 26 (1971), S. 1445–1455
DOI: 10.1016/0009-2509(71)80064-7

- [25] Vermeulen, J. R.; Scargo, P. G.; Beek, W. J. The melting of a crystalline polymer in a screw extruder
Chemical Engineering Science 26 (1971), S. 1457–1465
DOI: 10.1016/0009-2509(71)80065-9
- [26] Pearson, J. R. A. On the Melting of Solids near a Hot Moving Interface, with Particular Reference to Beds of Granular Polymers
International Journal of Heat and Mass Transfer 19 (1976), S. 405–411
DOI: 10.1016/0017-9310(76)90096-X
- [27] Edmondson, I. R.; Fenner, R. T. Melting of thermoplastics in single screw extruders
Polymer 16 (1975), S. 49–56
DOI: 10.1016/0032-3861(75)90095-6
- [28] Shapiro, J.; Halmos, A. L.; Pearson, J. R. A. Melting in single screw extruders
Polymer 17 (1976), S. 905–918
DOI: 10.1016/0032-3861(76)90258-5
- [29] Halmos, A. L.; Pearson, J. R. A.; Trottnow, R. Melting in single screw extruders
Polymer 19 (1978), S. 1199–1216
DOI: 10.1016/0032-3861(78)90072-1
- [30] Elbirli, B.; Lindt, J. T.; Gottgetreu, S. R.; et al. Mathematical modeling of melting polymers in a single screw extruder
Polymer Engineering and Science 24 (1984), S. 988–999
DOI: 10.1002/pen.760241208
- [31] Lindt, J. T.; Elbirli, B. Effect of the cross channel flow on the melting performance of a single screw extruder
Polymer Engineering and Science 25 (1985), S. 412–418
DOI: 10.1002/pen.760250706
- [32] Rauwendaal, C. An improved analytical melting theory
Advances in Polymer technology 9 (1989), S. 331–336
DOI: 10.1002/adv.1989.060090407

- [33] Rauwendaal, C. Melting theory for temperature-dependent fluids, exact analytical solution for power-law fluids
Advances in Polymer technology 11 (1991),
S. 19–25
DOI: 10.1002/adv.1991.060110104
- [34] Potente, H. An Analytical Model for Partial and Thorough Melting in Single-screw Extruders
International Polymer Processing 6 (1991),
S. 297–303
DOI: 10.3139/217.910297
- [35] Potente, H.; Stenzel, H. Theoretical Principles Governing the Design of Barrier Sections in Extruders
International Polymer Processing 6 (1991),
S. 126–135
DOI: 10.3139/217.910126
- [36] Gaspar-Cunha, A.; Covas, J. A. The Plasticating Sequence in Barrier Extrusion Screws Part I: Modeling
Polymer Engineering and Science 54 (2014),
S. 1791–1803
DOI: 10.1002/pen.23722
- [37] Dörner, M.; Marschik, C.; Schöppner, V.; et al. Development of an Analytical Model to Describe the Disperse Melting in Wave-Dispersion Screws
Polymers 12 (2020)
DOI: 10.3390/polym12040946
- [38] Viriyayuthakorn, M.; Kassahun, B. A three dimensional model for plasticating extrusion screw design
SPE-ANTEC (1984), S. 81–84
- [39] Syrjälä, S. A new approach for the simulation of melting in extruders
International communications in heat and mass transfer 27 (2000), S. 626–634
DOI: 10.1016/S0735-1933(00)00144-5

- [40] Altinkaynak, A.; Gupta, M.; Spalding, M.; et al. Melting in a single screw extruder: experiments and 3D finite element simulations
International Polymer Processing 26 (2011), S. 182–196
DOI: 10.3139/217.2419
- [41] Michaeli, W.; Hopmann, C.; Grammel, S. A fully three dimensional numerical approach simulating the melting zone in a single screw extruder
SPE-ANTEC (2012), S. 623–634
- [42] Hopmann, C.; Grammel, S. Plastifizierzone virtuell auslegen
Kunststoffe 10 (2013), S. 220–224
- [43] Karrenberg, G.; Wortberg, J. 3D-CFD-simulation of melting processes in a high-speed-extruder with solid-melt-seperation
AIP Conference Proceedings 1593 (2014)
DOI: 10.1063/1.4873857
- [44] Karrenberg, G.; Neubrecht, B.; Wortberg, J. CFD-Simulation der Kunststoffplastifizierung in einem Extruder mit durchgehend genutetem Zylinder und Barrierschnecke
Zeitschrift für Kunststofftechnik 3 (2016), S. 205–238
DOI: 10.3139/O999.04032016
- [45] Rauwendaal, C. Polymer Extrusion
5. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2014
ISBN: 978-1-56990-516-6
DOI: 10.3139/9781569905395

Bibliography

DOI 10.3139/O999.01012021
Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics
Technology 17 (2021) 1; page 1–36
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 1864 – 2217

Anhang

Werkstoffeigenschaft	Einheit	PP2	PS
Feststofftemperatur	°C	25	25
Carreau-Parameter A	Pa s	4098	20.487
Carreau-Parameter B	s	0,34	0,94
Carreau-Parameter C	-	0,55	0,69
Referenztemperatur	°C	200	200
Fließaktivierungsenergie	kJ/mol	41,9	114,1
Schmelztemperatur	°C	167	190
Spezifische Wärmekapazität der Schmelze	J/(kg·K)	2940	2270
Spezifische Wärmekapazität des Feststoffes	J/(kg·K)	1900	1500
Wärmeleitfähigkeit der Schmelze	W/(m·K)	0,192	0,242
Dichte der Schmelze	kg/m ³	734	935
Dichte des Feststoffes	kg/m ³	817	930
Schmelzeenthalpie	kJ/kg	89,69	0

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften der für die analytische Berechnung verwendeten Kunststoffe PP2 und PS

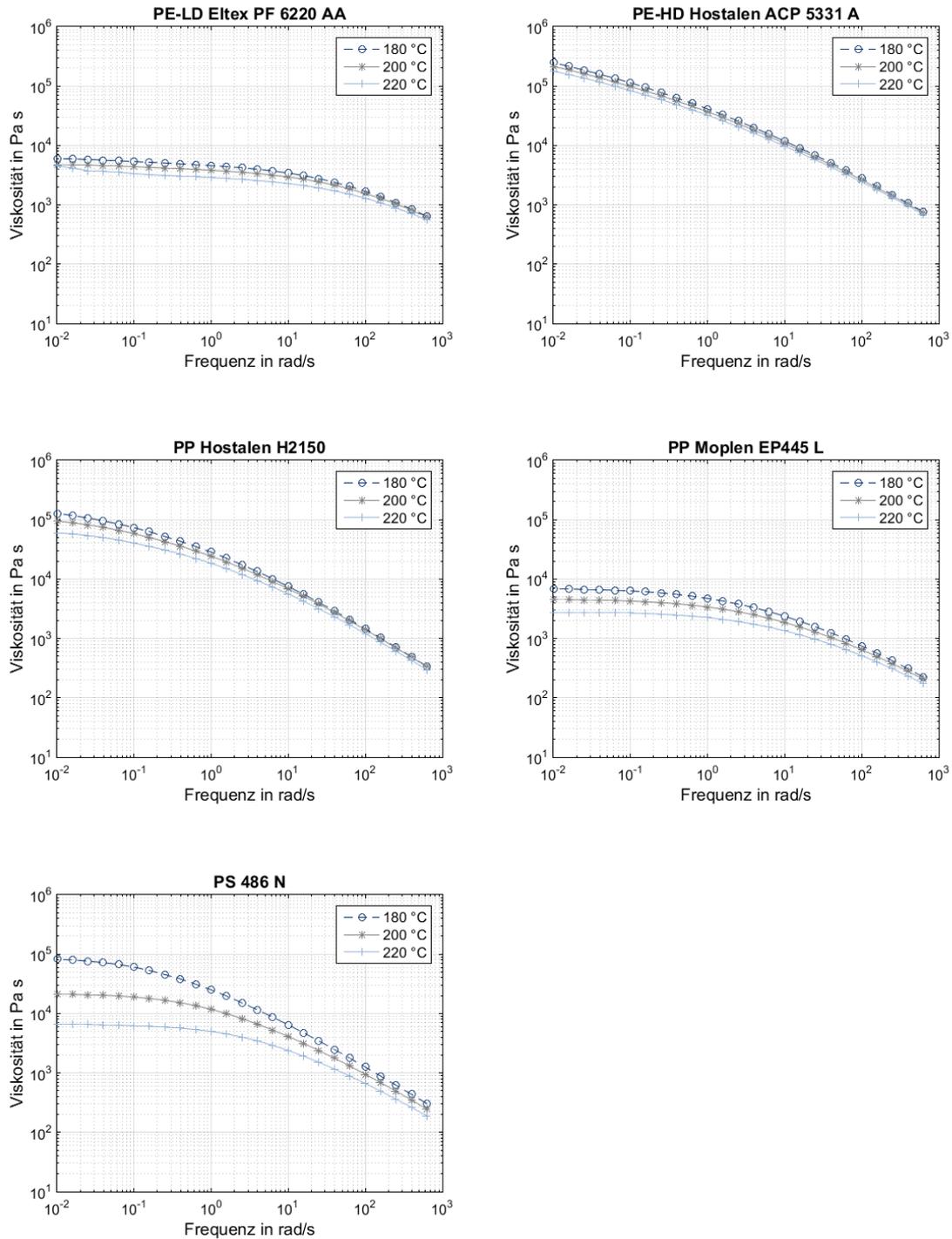


Bild 23: Viskositätskurven der verwendeten Kunststoffe

Werkstoff	Versuchsparameter		
	Drehzahl in U/min	Werkzeuggegen- druck in bar	Temperatur in °C
PE-LD	25	100	220
	50	50	
		100	
		150	
	75	100	
PP1	25	100	220
	50	50	
		100	
		150	
	75	100	
PP2	25	100	220
	50	50	
		100	
		150	
	75	100	
PS	25	100	220
	50	50	
		100	
		150	
	75	100	
PE-HD	25	100	220
			190
	50	50	220
		100	
		150	
	75	100	
		150	

Tabelle 2: Versuchsplan der Visualisierungsversuche

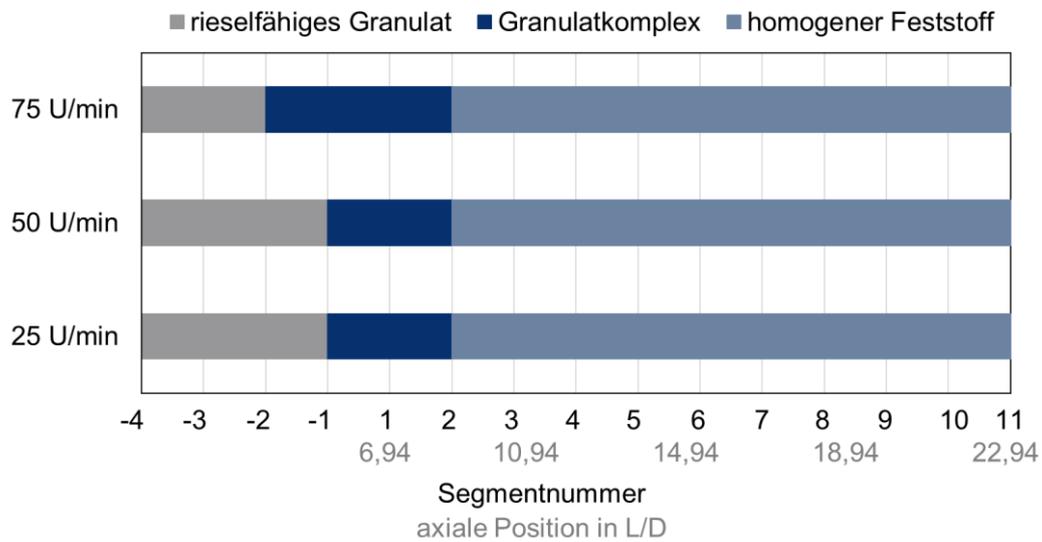


Bild 24: Homogenisierungslänge für PP1 bei einer Variation der Drehzahl und konstantem Werkzeuggedruck von 100 bar und einer Werkzeugtemperatur von 220 °C

Konstruktionsmaß	Einheit	50x34D
Durchmesser des Zylinders	mm	35
Länge der Plastifizierzone	mm	805
L/D Verhältnis	-	23
Anzahl der Nuten	-	6
Nutbreite	mm	5,5
Nuttiefe (konischer Verlauf)	mm	0,7-0
Nutsteigung	mm	105
Durchmesser der Schnecke	mm	34,85
Feststoffkanaltiefe zu Beginn	mm	6,2
Feststoffkanaltiefe am Ende	mm	1
Schmelzekanaltiefe zu Beginn	mm	2,4
Schmelzekanaltiefe am Ende	mm	7,5
Steigung des Barrierestegs	mm	54
Steigung des Sperrstegs	mm	52,5
Barrierebreite	mm	6,2
Breite des Sperrstegs	mm	4,8

Tabelle 3: Geometrie-Eingabeparameter des wendelgenuteten Zylinders und der Barrierschnecke für das analytische Berechnungsmodell

Stichworte:**Hochleistungsextrusion**, genutete Aufschmelzzone, Klappzylinder**Keywords:****high-performance extrusion**, grooved plasticizing zone, divisible barrel**Autor / author:**M. Sc. Jochen Kettemann,
Prof. Dr.-Ing. Christian BontenE-Mail: jochen.kettemann@ikt.uni-stuttgart.de
Webseite: www.ikt.uni-stuttgart.de
Tel.: +49 (0)711/685-62866Institut für Kunststofftechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 32
70569 Stuttgart**Herausgeber / Editors:**Editor-in-ChiefProf. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29703
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
E-Mail: ehrenstein@lkt.uni-erlangen.deEuropa / EuropeProf. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, verantwortlich
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29700
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
E-Mail: drummer@lkt.uni-erlangen.deAmerika / The AmericasProf. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald, verantwortlich
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Tel.: +1 608/263 9538
Fax: +1 608/265 2316
E-Mail: osswald@enr.wisc.edu**Verlag / Publisher:**Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG
Wolfgang Beisler
Geschäftsführer
Kolbergerstraße 22
D-81679 München
Tel.: +49 (0)89/99830-0
Fax: +49 (0)89/98480-9
E-Mail: info@hanser.de**Redaktion / Editorial Office:**Dr.-Ing. Eva Bittmann
Jannik Werner, M.Sc.
E-Mail: redaktion@kunststofftech.com**Beirat / Advisory Board:**Experten aus Forschung und Industrie, gelistet unter
www.kunststofftech.com