

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Abschlussbericht

FKZ 031B1113A (IANUS Simulation GmbH)

FKZ 031B1113B (Hochschule Hannover, Institut für Biokunststoffe und
Bioverbundwerkstoffe)

Computersimulationen in der Extrusionstechnik für maßgeschneiderte Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe

Datum: 23.12.2024

Rückfragen richten Sie bitte an:

IANUS Simulation GmbH:

Dr. Kai Wenz – k.wenz@ianus-simulation.de

Hochschule Hannover, IfBB:

Markus Kammer – markus.kammer@hs-hannover.de

Projektleitung IANUS: Dr. Max Pohl

Projektleitung IfBB: Prof. Dr.-Ing. Andrea Siebert-Raths

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2021 – 30.06.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031B1113A und 031B1113B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildungsverzeichnis..... | I |
| Tabellenverzeichnis | II |
| Teil I: Kurzbericht..... | 1 |
| Teil II: Eingehende Darstellung..... | 2 |
| 1. Arbeits- und Zeitplanung..... | 2 |
| 2. Kostenplanung Soll/Ist..... | 4 |
| 2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse | 5 |
| Arbeitspaket 1: Materialauswahl und Identifizierung relevanter Materialeigenschaften..... | 5 |
| Arbeitspaket 2: Charakterisierung der Materialien zur Generierung der Datenbasis | 6 |
| Arbeitspaket 3: Simulation des Extrusionsprozesses anhand ausgewählter Beispiele..... | 9 |
| Arbeitspaket 4: Durchführung der Extrusionsversuche als experimentelle Datenbasis zur Validierung | 11 |
| Arbeitspaket 5: Validierung der Simulationsmodelle und Identifizierung von methodischem Entwicklungsbedarf..... | 30 |
| Arbeitspaket 6: Optimierung des Extrusionsprozesses in der praktischen Umsetzung..... | 33 |
| Arbeitspaket 7: Auswertung und Einpflegen der Ergebnisse in Datenbanken | 36 |
| 3. F&E Ergebnisse Dritter | 36 |
| 4. Verwertungsplan (IANUS)..... | 36 |
| Schutzrechte..... | 36 |
| Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende..... | 37 |
| Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende..... | 37 |
| Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase | 37 |
| 5. Verwertungsplan (IfBB) | 38 |
| Schutzrechte..... | 38 |
| Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende..... | 38 |
| Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende..... | 38 |
| Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase | 38 |
| 6. Veröffentlichungen..... | 39 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| <i>Abbildung 1: Zeitplanung - Soll/Ist-Abgleich mit Verschiebungen</i> | 2 |
| Abbildung 2: Prozessdiagramm zweier Doppelschneckenelemente | 9 |
| Abbildung 3: Darstellung von Einzelsegmenten (v.l.n.r. Fördererelemente, Rückfördererelement, Knetblock)..... | 9 |
| <i>Abbildung 4: Eingabemaske</i> | 10 |
| Abbildung 5: Beispiel eines der Materialmodelle in der StrömungsRaum® Benutzeroberfläche | 10 |
| Abbildung 6: Beispielhafte Darstellungen aus dem Report, Geschwindigkeiten (links) und Druck-Durchsatz-Kennkurve (rechts)..... | 11 |
| Abbildung 7: Schneckenkonfiguration des Doppelschneckenextruders ZE34B in den Vorversuchen . | 11 |
| Abbildung 8: Schneckenkonfiguration des Doppelschneckenextruders ZE34B in den Vorversuchen . | 12 |
| Abbildung 9: Fließkurve PE Lupolen 2420K (170/190/210 °C)..... | 12 |
| Abbildung 10: Schneckenkonfigurationen der ZE42B mit 5, 10 und 15 Knetblöcken..... | 13 |
| Abbildung 11: Messscheibe bestehend aus Gehäuseteil (links) und Flanschstücke oben und unten (rechts) | 13 |
| Abbildung 12: Tandemkonfiguration der ZE34B und ZE42B mit den Positionen der Druck- und Temperatursensoren..... | 18 |
| <i>Abbildung 13: 3-D Modell der finalen Version des Schmelzeleitungs-Drehteils mit Zentrierbohrungen, Dichtungsnuten und einer orthogonalen Bohrung zur Montage eines Temperatursensors.</i> | 19 |
| <i>Abbildung 14 ERGE Keramikheizband/Heizmanschette (Quelle: erge-elektrowaermetechnik.de)</i> | 19 |
| <i>Abbildung 15: Schmelzeleitung mit Heizmanschetten und Steuereinheit (Links) und vereinfachtem Schaltplan (Rechts)</i> | 20 |
| Abbildung 16: Grafische Darstellung der MFR/MVR-Ergebnisse für PLA und PLLA..... | 22 |
| Abbildung 17: Grafische Darstellung der MFR/MVR-Ergebnisse für PE..... | 24 |
| Abbildung 18: Grafische Darstellung der MFR/MVR-Ergebnisse für PET | 26 |
| Abbildung 19: Viskositätskurve vom PLA Ingeo 3251D (Virgin = rot; Übergang ZE34B/ZE42B = blau; 15 Knetblöcke = grün) | 27 |
| Abbildung 20: Viskositätskurve vom PLLA Luminy L105 (Virgin = rot; Übergang ZE34B/ZE42B = blau; 15 Knetblöcke = grün) | 28 |
| Abbildung 21: Viskositätskurve von PE Lupolen 2420K | 29 |
| Abbildung 22: Viskositätskurve von BioPE HDPE STHC 7260 | 29 |
| Abbildung 23: Viskositätskurve von rPE HD 201-S | 30 |
| Abbildung 24: Bestimmung der vollgefüllten Bereiche über Pressure-Shift..... | 31 |
| Abbildung 25: Simulierter und gemessener Druck bei 100rpm (links) und 200rpm (rechts) | 31 |
| Abbildung 26: Korrelation zwischen simulierter Leistung und gemessener Temperaturerhöhung | 31 |
| Abbildung 27: Simulierter und gemessener Druck bei 300rpm und 50 kg/h; Links: Variante 1, rechts: Variante 2 | 32 |
| Abbildung 28: Simulierter und gemessener Druck bei 300rpm und 50 kg/h für Variante 3 | 32 |
| Abbildung 29: Tandemaufbau der Extruder für die Versuche zur Optimierung des Extrusionsprozesses | 33 |
| Abbildung 30: Schneckenkonfigurationen für die Optimierungsversuche | 34 |
| Abbildung 31: Ergebnisse der MVR-Messung bei konstantem Durchsatz | 35 |
| Abbildung 32: Ergebnisse der MVR-Messung bei konstanter Drehzahl | 36 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Auflistung der beschafften und verwendeten Materialien im Projekt ComEx..... | 5 |
| Tabelle 2: Rheologische, Physikalische und Thermische Kennwerte der verschiedenen PE- (grün), PET- (blau) und PLA-Typen (gelb) im Vergleich zu den Datenblättern..... | 8 |
| Tabelle 3: Versuchsplan PLA Ingeo 3251D | 14 |
| Tabelle 4: Versuchsplan PLLA Luminy L105..... | 14 |
| Tabelle 5: Versuchsplan Lupolen 2420K..... | 15 |
| Tabelle 6: Versuchsplan Bio-PE STHC 7260 | 15 |
| Tabelle 7: Versuchsplan rPE HD 201-S | 16 |
| Tabelle 8: Versuchsplan PET Luxyclear PET 702K..... | 16 |
| Tabelle 9: Versuchsplan Bio-PET Eastlon CB-602A..... | 17 |
| Tabelle 10: Versuchsplan rPET Kecalloy ECO FE 220404 | 17 |
| Tabelle 11: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit PLA Ingeo 3251D | 21 |
| Tabelle 12: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit PLLA Luminy L105 | 21 |
| Tabelle 13: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit PE Lupolen 2420K | 22 |
| Tabelle 14: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit Bio-PE STHC 7260..... | 23 |
| Tabelle 15: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit rPE-HD 201-S..... | 23 |
| Tabelle 16: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit PET Luxyclear 702K | 25 |
| Tabelle 17: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit Bio-PET Eastlon CB-602AB | 25 |
| Tabelle 18: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit rPET Kecalloy ECO FE 220404..... | 26 |
| Tabelle 19: Versuchsplan und Ergebnisse der Fließfähigkeiten für die Optimierungsversuche..... | 34 |

Teil I: Kurzbericht

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Projekt zielte darauf ab, die Verarbeitung von Biokunststoffen in der Extrusionstechnik zu verbessern und die Annahme und Verwendung der biobasierten Materialien in der Industrie zu verbessern. Der Fokus lag auf der Entwicklung von Simulationsmodellen, die es ermöglichen, das Verhalten von Biokunststoffen während des Extrusionsprozesses präzise vorherzusagen und zu optimieren, sowie auf der Generierung von Materialdaten. Ausgangspunkt war der Stand der Technik in der Strömungssimulation von Kunststoffen, die für konventionelle Materialien bereits weitgehend etabliert ist. Jedoch fehlten bisher angepasste Modelle und Werkzeuge, um die besonderen Anforderungen von Biokunststoffen – wie ihre höhere Variabilität und Temperaturempfindlichkeit – effektiv abzubilden. Ziel war es, diese Lücke durch innovative Simulationsmethoden zu schließen.

2. Ablauf des Vorhabens

- Zunächst wurde mit dem Fokus auf Verfügbarkeit und Marktrelevanz eine Auswahl an Materialien getroffen, die innerhalb dieses Vorhabens untersucht werden sollten.
- Die Materialien wurden untersucht/analysiert, um den Materialeingangszustand festzustellen.
- Es wurden geeignete Materialdaten für die Modellierung ausgewählt und angepasst, um die besonderen Fließeigenschaften von Biokunststoffen präzise abzubilden.
- Anschließend wurden die Extrusionsprozesse simuliert. Hierbei kamen segmentweise Simulationsansätze zum Einsatz, die eine schnelle Analyse und Optimierung einzelner Prozessabschnitte ermöglichten.
- In enger Zusammenarbeit mit dem IfBB Hannover wurden experimentelle Daten generiert, die zur Validierung der Simulationsmodelle verwendet wurden.
- Schließlich wurde das cloudbasierte Simulationsframework StrömungsRaum® weiterentwickelt, um den Zugang zu den Simulationslösungen für Unternehmen zu vereinfachen und die Ergebnisse effizient auszuwerten.

Die Arbeiten wurden trotz anfänglicher Verzögerungen durch vorausschauende Planung und parallele Vorarbeiten erfolgreich umgesetzt.

3. Wesentliche Ergebnisse sowie Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Das Projekt lieferte wichtige Ergebnisse für die Verarbeitung von Biokunststoffen:

- Es wurde ein modularer Simulationsansatz entwickelt, der flexibel an unterschiedliche Materialien und Prozesse angepasst werden kann. Dies erleichtert die Optimierung von Extrusionsprozessen mit Biokunststoffen erheblich.
- Die entwickelten Modelle wurden erfolgreich validiert und zeigen eine hohe Übereinstimmung mit experimentellen Daten.
- Durch die Erweiterung des Simulationsframeworks StrömungsRaum® können Unternehmen nun komplexe Simulationsaufgaben auch ohne eigene Infrastruktur durchführen, was die Akzeptanz und Anwendung von Simulationslösungen und die Anwendung von Biokunststoffen in der Industrie fördert.

Die Zusammenarbeit unter den Projektpartnern war ein zentraler Erfolgsfaktor. Das IfBB stellte experimentelle Daten bereit und unterstützte bei der praktischen Validierung der Modelle. IANUS konnte die Simulationen dadurch zielgenau weiterentwickeln. Diese enge Kooperation ermöglichte eine optimale Abstimmung zwischen Simulation und experimentellen Ergebnissen.

Teil II: Eingehende Darstellung

1. Arbeits- und Zeitplanung

In Abbildung 1 ist die Zeitplanung auf Basis des im Antrag eingereichten Zeitplans im Soll/Ist-Abgleich dargestellt. Die gelben Balken zeigen hierbei Arbeitspakete, bei denen sich der zeitliche Ablauf seitens des IfBB verschoben hat. Für IANUS werden blaue Balken verwendet. Die ursprüngliche Zeitplanung ist in grau dargestellt.

| | 2021 | | 2022 | | | | 2023 | | | | 2024 | |
|---|------|----|------|----|----|----|------|----|----|----|------|----|
| | Q3 | Q4 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q1 | Q2 |
| AP 1: Materialauswahl und Identifizierung relevanter Materialeigenschaften | | | | | | | | | | | | |
| 1.1 Auswahl und Beschaffung der zu charakterisierenden Werkstoffe (IfBB) | | | | | | | | | | | | |
| 1.2 Festlegung des Prüfplans (IfBB) | | | | | | | | | | | | |
| AP 2: Charakterisierung der Materialien zur Generierung der Datenbasis | | | | | | | | | | | | |
| 2.1 Durchführung der Werkstoffprüfung (IfBB) | | | | | | | | | | | | |
| 2.2 Auswertung und Ableitung der Werkstoffkennwerte (IfBB) | | | | | | | | | | | | |
| AP 3: Simulation des Extrusionsprozesses anhand ausgewählter Beispiele | | | | | | | | | | | | |
| 3.1 Modellierung und Simulation der Extrusionsversuche (IANUS) | | | | | | | | | | | | |
| - Simulationsreihe 1: Bio-PE, PE, rPE | | | | | | | | | | | | |
| - Simulationsreihe 2: Bio-PET, PET, rPET | | | | | | | | | | | | |
| - Simulationsreihe 3: PLA, PLLA | | | | | | | | | | | | |
| - optional Simulationsreihe 4: PHB | | | | | | | | | | | | |
| 3.2 Bestimmung der simulierten Ergebnisgrößen zur Validierung (IANUS) | | | | | | | | | | | | |
| AP 4: Durchführung der Extrusionsversuche als experimentelle Datenbasis zur Validierung | | | | | | | | | | | | |
| 4.1 Festlegung der Extrusionsversuche (IfBB) | | | | | | | | | | | | |
| 4.2 Festlegung der Messgrößen für Validierung (IANUS) | | | | | | | | | | | | |
| 4.3 Durchführung der Extrusionsversuche (IfBB) | | | | | | | | | | | | |
| - Versuchsreihe 1: Bio-PE, PE, rPE | | | | | | | | | | | | |
| - Versuchsreihe 2: Bio-PET, PET, rPET | | | | | | | | | | | | |
| - Versuchsreihe 3: PLA, PLLA | | | | | | | | | | | | |
| - optional Versuchsreihe 4: PHB | | | | | | | | | | | | |
| AP 5: Validierung der Simulationsmodelle und Identifizierung von methodischem Entwicklungsbedarf | | | | | | | | | | | | |
| 5.1 Validierung der Simulationsmodelle (IANUS) | | | | | | | | | | | | |
| 5.2 Identifizierung von methodischem Entwicklungsbedarf (IANUS) | | | | | | | | | | | | |
| AP 6: Optimierung des Extrusionsprozesses in der praktischen Umsetzung | | | | | | | | | | | | |
| 6.1 Optimierung des Extrusionsprozesses (IfBB) | | | | | | | | | | | | |
| AP 7: Auswertung und Einpflegen der Ergebnisse in Datenbank | | | | | | | | | | | | |
| 7.1 Aufbereitung der Werkstoff- und Verarbeitungsdaten und Einarbeitung in Datenbank (IfBB) | | | | | | | | | | | | |

Abbildung 1: Zeitplanung - Soll/Ist-Abgleich mit Verschiebungen

Erklärung zu Abweichungen des Soll-/Ist-Abgleichs

Allgemein:

Zu Beginn des Projektes stand dem IfBB noch kein qualifiziertes Personal zur Verfügung, wodurch eine sechs Monate verzögerte Einstellung erfolgte. Hierdurch ergab sich eine generelle Verschiebung aller am IfBB durchgeführten Arbeitspakete. Als Folge davon ergaben sich auch Verzögerungen bei IANUS aufgrund der zeitlichen Abhängigkeiten der verschiedenen Arbeitspakete. Zusätzlich kam es durch Lieferverzögerungen von Anlagenbauteilen zu einer weiteren Verzögerung von 26 Wochen.

AP 1.1

Die Beschaffung einiger Materialien stellt sich auf Grund der aktuellen Rohstoff- und Lieferprobleme als herausfordernd dar. Durch eine mögliche Anpassung der Prüfreihefolge wurde der Gesamtablauf des Projektes hierdurch jedoch nicht gefährdet.

AP 1.2

Die Festlegung des Prüfplans konnte nach Start des Projektes zügig abgeschlossen werden.

AP 2.1

Da aus logistischen Gründen nicht alle zu prüfenden Materialien zur selben Zeit bestellt und geliefert werden konnten, wurde die Durchführung der Werkstoffprüfung parallel zu den Extrusionsversuchen durchgeführt. Der Gesamtablauf des Projektes wurde hierdurch nicht gefährdet.

AP 2.2

Die Auswertung und Ableitung der Werkstoffkennwerte war an die Materialprüfung von AP 2.1 gekoppelt und erstreckte sich somit ebenfalls auf den Gesamtzeitraum der Extrusionsversuche. Der Gesamtablauf des Projektes wurde hierdurch ebenfalls nicht gefährdet.

AP 3.1

Während der allgemeinen anfänglichen Verzögerung des Projektstarts nutzte IANUS die Zeit, um Referenzlisten für die iterative Anpassung der mathematischen Beschreibung der Materialeigenschaften sowie des auszuführenden Solvers zu erstellen. Durch den Zugriff auf am Markt verfügbare Referenzmaterialien und thematisch verwandte DSE-Projekte konnte ein Teil der Zeitverzögerung kompensiert werden, so dass die vom IfBB im Rahmen der kostenneutralen Verlängerung generierten Daten zügig verarbeitet werden konnten. Darüber hinaus wurde die Validierung und Nachjustierung überlappend mit AP 4 durchgeführt. Durch den von IANUS entwickelten modularen Aufbau des Prozesses konnten die Projektziele effizient erreicht werden.

AP 3.2

In diesem Arbeitspaket wurden alle relevanten Einflussgrößen identifiziert und auf Korrelation geprüft, sodass die Datenbasis entsprechend komprimiert werden konnte. Die eingeschränkten Ermittlungsmöglichkeiten an der realen Anlage konnten so vollständig kompensiert werden.

AP 4.1

Die Verschiebung dieses Arbeitspakets basiert auf dem oben genannten verspäteten Projektstart seitens IfBB. Der Gesamtablauf des Projektes wurde hierdurch nicht gefährdet.

AP 4.2

Im Laufe des Projektes hat es sich als notwendig erwiesen, die Messgrößen für die Validierung nach Festlegung der Messtechnik und auch kontinuierlich während der Extrusionsversuche zu definieren. Damit konnte eine aussagekräftige Auswertemethodik etabliert werden, so dass die gewünschten Kennwerte wie Verweilzeit, distributive oder disperse Durchmischung, Scherverteilung etc. exakt erfasst und visuell mit den Simulationsergebnissen verglichen werden konnten.

AP 4.3

Die Verschiebung dieses Arbeitspakets basierte auf dem oben genannten verspäteten Projektstart seitens IfBB sowie den Lieferverzögerungen von Anlagenbauteilen. Aufgrund der Erkenntnisse aus den Vorversuchen (AP 4.1), wurde die Reihenfolge der Versuchsreihen angepasst. Diese konnten dann im Gesamten plangemäß abgeschlossen werden, wodurch der Gesamtablauf des Projektes nicht gefährdet wurde.

AP 5.1

Ein Teil der Datenbasis für die Validierung wurde vom IfBB während der regulären Projektlaufzeit bereitgestellt. Durch die Vorarbeiten von IANUS konnten dann die noch ausstehenden Datenpunkte während der kostenneutralen Verlängerung bearbeitet werden.

AP 5.2

Aufgrund des Verzugs wurden die Arbeiten initial mit zugänglichen Referenzdaten durchgeführt. Es konnten keine Besonderheiten detektiert werden. Abschließend wurde das Simulationsframework von IANUS so weit automatisiert, dass während der kostenneutralen Verlängerung des Projekts die noch ausstehenden Daten des IfBB schnell und effizient nachgeprüft werden konnten.

AP 6.1

Die Verschiebung dieses Arbeitspakets basiert auf dem oben genannten verspäteten Projektstart seitens IfBB sowie den Lieferverzögerungen von Anlagenbauteilen. Der Gesamtablauf des Projektes wurde hierdurch nicht gefährdet.

AP 7.1

Die Verschiebung dieses Arbeitspakets basiert auf dem oben genannten verspäteten Projektstart seitens IfBB sowie den Lieferverzögerungen von Anlagenbauteilen. Der Gesamtablauf des Projektes wurde hierdurch nicht gefährdet.

2. Kostenplanung Soll/Ist

Partner IANUS

Gegenüber der ursprünglichen Kostenplanung gab es bei den Personalkosten (F0831) keine Änderungen.

Bedingt durch die Corona Pandemie konnte ein Teil der Reisen (F0838) nicht stattfinden und wurde durch virtuelle Meetings ersetzt.

Zu den sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten (F0850) zählten ausschließlich die Kosten für Rechnerclusterstunden. Gegenüber der ursprünglichen Kostenplanung gab es dabei keine Veränderungen, sondern es kam nur zu einer Verzögerung in der Durchführung der Simulationen für AP 3.1 aufgrund der verspäteten Durchführung von AP 4.3 seitens IfBB.

Partner IfBB

Gegenüber der ursprünglichen Kostenplanung für Personalgeldern gab es keine absehbare Änderung der Gesamtkosten. Durch den verzögerten Projektstart seitens des IfBB kam es lediglich zu einer genehmigten Verlegung der Projektgelder ins erste Halbjahr 2024. Das Erreichen der Projektziele war nicht gefährdet. Durch die kostenneutrale Verlängerung des Vorhabens von 6 Monaten konnte sichergestellt werden, dass alle Arbeitspakete auch trotz der Lieferverzögerungen bearbeitet werden konnten. Das Vorgehen wurde mit dem Projektpartner IANUS abgesprochen.

Zum 01.06.23 gab es personelle Veränderung, da Herr Konrad auf eigenen Wunsch das IfBB verlassen hat. Folgende Personalplanung ergab sich im Berichtszeitraum:

Marie Tiemann, 01.05.23 bis 30.06.24, 25% E13 (Überschneidung mit Herrn Konrad zur Übergabe)

Jan Kuckuck, 01.10.23 bis 31.03.24, 25% E13

Markus Kammer, 01.10.23 bis 30.06.24, 50% E11

Anna Dörgens, 01.10.23 bis 31.12.23, 100% E13

Dadurch ergeben sich Umwidmungen der Personalgelder von 0812 (E12-E15) zu 0817 (E1-E11).

Gegenüber der ursprünglichen Kostenplanung gab es beim Verbrauchsmaterial (F0843) keine Änderung.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Materialauswahl und Identifizierung relevanter Materialeigenschaften

AP 1.1 Auswahl und Beschaffung der zu charakterisierenden Werkstoffe (IfBB)

Für die Materialauswahl wurde auf marktgängige bzw. -verfügbare Biokunststoff-Typen mit für die Industrie relevanten Kapazitäten zurückgegriffen. Neben Drop-In- und neuartigen Biokunststoffen wurden konventionelle, erdöl-basierte Pendants sowie rezyklierte Kunststoffe ausgewählt. Die Tabelle 1 beinhaltet alle beschafften Materialien. Zur Auswahl der Kunststoffe wurden folgenden Kriterien erstellt:

- 1) Verfügbarkeit:
Das Material sollte leicht am Markt verfügbar sein.
- 2) Repräsentativität:
Wird von einem Material nur ein Typ verarbeitet so sollte dieser möglichst weit am Markt etabliert sein und eine gute Repräsentativität bieten. Werden mehrere Typen geprüft, so sollten diese über möglichst unterschiedliche Materialeigenschaften verfügen, um ein breites Materialspektrum abzudecken.
- 3) Vergleichbarkeit:
Bei der Auswahl von Bio- und konventionellen Polymeren sollten möglichst gut vergleichbare Typen gewählt werden, um einen direkten Vergleich der erzielten Ergebnisse zu ermöglichen.

Tabelle 1: Auflistung der beschafften und verwendeten Materialien im Projekt ComEx

| Polymer | Hersteller | Typ |
|---------|--------------------------|------------------------|
| Bio-PE | <i>Braskem / FKUR</i> | STHA 7260 |
| Bio-PE | <i>Braskem / FKUR</i> | STHC 7260 |
| Bio-PE | <i>Braskem/FKuR</i> | STHG 7252NS |
| PE | <i>Lyondellbasell</i> | Lupolen 2420K |
| Bio-PET | <i>FKuR</i> | Eastlon CB-602AB |
| rPE | <i>Vogt Plastic</i> | HD 201-S |
| rPET | <i>Barlog Plastics</i> | KEBALLOY ECO FE 220404 |
| PET | <i>Indorama Ventures</i> | Luxyclear PET 702K |
| PLA | <i>Natureworks</i> | Ingeo 3251D |
| PLLA | <i>Total Corbion</i> | Luminy L105 |

Der Polymertyp PHB, dessen Beschaffung und Verarbeitung im Antrag optional eingeplant war, wurde aufgrund der Verfügbarkeit und preislichen Situation nicht weiter betrachtet.

Für die weitere Planung der Extrusionsversuche in AP 4 wurde nur einer der drei Polymere vom Typ Bio-PE verwendet, da der Aufwand für extrusionstechnische Verarbeitung sowie die anschließende Materialprüfung sehr hoch gewesen wäre. Die Materialdaten für den Anlieferungszustand wurden

allerdings, wie für alle anderen Materialien erhoben und konnten im Rahmen von AP 7 in die Datenbanken übertragen werden. Für die Verarbeitung in den Extrusionsversuchen wurde sich für das Material STHC 7260 von *Braskem/FKuR* entschieden, da es im Vergleich zu dem verwendeten rPE und PE eine unterschiedliche Fließfähigkeit aufweist. Damit konnte ein größerer Bereich für die Simulation abgedeckt werden.

AP 1.2 - Festlegung der zu charakterisierenden Eigenschaften (Prüfplan) (IfBB)

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner wurde ein zweistufiger Prüfplan festgelegt. Je nach Simulationstyp (Isotherm / nicht Isotherm) werden unterschiedliche Prüfparameter zur Charakterisierung des zu simulierenden Materials benötigt. Während für Isotherme Simulationen Rheologische Kennwerte zur Charakterisierung ausreichen, ist für die Simulation nicht Isothermer Systeme besonders die Erfassung thermischer Materialkennwerte von großer Bedeutung. Der zweistufige Prüfplan beinhaltet folgende Prüfmethoden:

Prüfplan Stufe 1 (Isotherme Simulation):

Viskosität nach Carreau-Ansatz in [Pa*s]

Schmelzedichte in [g/cm³]

Prüfplan Stufe 2 (nicht-isotherme Simulation):

Viskosität mit Temperaturverschiebungsfaktor in [Pa*s]

Wärmeleitfähigkeit in [W/(m*K)]

Schmelzeenthalpie in [J/g]

Wärmekapazität in [J/(K*kg)]

In Absprache mit dem Projektpartner IANUS wurde sich für den Prüfplan Stufe 1 entschieden. Die für die Stufe 2 notwendigen PVT-Messungen haben in der Anzahl die der Versuchsplan (siehe AP 4.1) für die verschiedenen Polymertypen vorsieht einen zu großen zeitlichen Aufwand, sodass diese im Projektzeitraum nicht abgedeckt werden können. Die Erreichung der Projektziele sind davon nicht betroffen.

Zusätzlich zu dem oben aufgeführten Prüfplan werden bei den Extrusionsversuchen der Prozessdruck und die Massetemperaturen an bis zu 5 Messpunkten gleichzeitig in Echtzeit gemessen. Die so erhaltenen Messdaten dienen zur Evaluierung des Prozesses und der dazu durchgeführten Simulation.

Arbeitspaket 2: Charakterisierung der Materialien zur Generierung der Datenbasis

AP 2.1 Durchführung der Werkstoffprüfungen zur Charakterisierung (IfBB)

Die thermische, physikalische und rheologische Charakterisierung der Virgin-Materialien (Anlieferungszustand) erfolgt anhand von DSC-, MFR- bzw. MVR-Messungen, Viskositätskurven sowie einer Dichteprüfung. Neben den Analysen zu den Virgin-Materialien wurden im Anschluss an AP 4 die Viskositätskurven für die extrudierten Materialien bestimmt. Aus Gründen der Zeitersparnis wurde der Großteil der Charakterisierung gebündelt in Anschluss an AP 4 durchgeführt. Die Ergebnisse aus AP 2.1 sind in der Tabelle 2 aufgeführt. Die Durchführung der Analysemethoden wird unten beschrieben.

Um den Schmelzpunkt bzw. -bereich (T_m) nach DIN EN ISO 11357-1 und die spezifische Wärmekapazität (c_p) definieren zu können, wurde das Granulat der Materialien mittels Differentialthermoanalyse (DSC) analysiert (*NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix; Intracooler TC100*). Die

Proben wurden dafür in einem geschlossenen, ungelochten Concavustiegel (Einwaage: 5 mg bis 5,5 mg; n = 2) dynamisch unter Stickstoffatmosphäre (Durchflussrate: 20 ml/min) über den Schmelzpunkt aufgeheizt und definiert abgekühlt. (Heiz- bzw. Kühlrate: 10 K/min). Der Glasübergang (T_g) nach DIN EN ISO 11357-2 wurde ebenfalls mit geschlossenem, ungelochtem Concavustiegel (Einwaage: 10 mg bis 10,5 mg; n = 2) dynamisch unter Stickstoffatmosphäre (Durchflussrate: 20 ml/min) mit einer Heiz- bzw. Kühlrate: 20 K/min ermittelt.

Die Bestimmung der Melt Flow Rate wurde mit dem Fließprüfgerät *MFR Roell BMF-001* der Firma *Zwick/Roell* in Anlehnung an die DIN EN ISO 1133 mit 2,16 kg (5 kg bei rPE HD 201-S) Auflagegewicht und materialspezifischer Temperatur (190 °C für PE und PLA, 270 °C bei PET) durchgeführt (Probenumfang n = 2).

Die Viskositätskurven wurden in Anlehnung an ISO 11443 mit einem Kapillarrheometer *Rheograph 25* der Fa. *Göttfert* bei je 3 verschiedenen Temperaturen erstellt (spezifische Temperatur s. Versuchsplan in Tabelle 3 bis Tabelle 10). Zur Validierung wurde mindestens eine Fließkurve bei einer Temperatur geprüft. Die Messung erfolgte nach 5 Min Aufschmelzzeit an zwei Kapillaren mit einem Durchmesser von 1 mm und einer Länge von 20 mm bzw. 0,2 mm inkl. Einlaufwinkel von 90°. Die Viskosität wurde nach Bagley und Weißenberg-Rabinowitsch korrigiert. Aus den ermittelten Werten wurde die Bagley Juncture Loss Coefficients (Koeffizienten für die Methode des Druckverlusts) C1 und C2 abgeleitet, sowie die Viskositätskurven per Temperaturshift und Cross-WLF-Modell dargestellt.

Die Dichte wurde anhand des Verfahrens A bei 23 °C in destilliertem Wasser oder Ethanol ermittelt (n=5, ISO 1183).

AP 2.2 Auswertung der Prüfungen und Ableitung der für die Datenbasis erforderlichen Werkstoffkennwerte (IfBB)

Die Tabelle 2 zeigt die rheologischen, physikalischen und thermischen Kennwerte der PE- (grün), PET- (blau) und PLA-Typen (gelb). Die Auswertung erfolgte nach den in AP 2.1 beschriebenen Messverfahren. Zum Vergleich sind die Angaben aus den Datenblätter der Matrices aufgeführt und in grau markiert.

Werte, die aufgrund der Messmethode oder fehlender Informationen aus dem Datenblatt nicht erfasst werden konnten, sind mit N/A gekennzeichnet. Die Werte für die spezifische Wärmekapazität (c_p) und die Glasübergangstemperatur (T_g) konnten mit den verfügbaren Messmethoden teilweise nicht bestimmt werden. In diesen Fällen sind Literaturwerte angegeben, die mit einem Stern (*) markiert sind.

Tabelle 2: Rheologische, Physikalische und Thermische Kennwerte der verschiedenen PE- (grün), PET- (blau) und PLA-Typen (gelb) im Vergleich zu den Datenblättern

| Polymer | Hersteller | Typ | Rheologische Kennwerte | | | | Physikalische Kennwerte | Thermische Kennwerte | | | | |
|---|-------------------|--------------------------|-----------------------------------|------|--------------------------|------|-------------------------|----------------------|-----------------|----------------------------|------------------|--|
| | | | MFR | | MVR | | Dichte ρ | c_p | T_m | T_g | | |
| | | | DIN EN ISO 1133 (190 °C; 2,16 kg) | | | | | | DIN EN ISO 1183 | DIN EN ISO 11357 (20-23°C) | DIN EN ISO 11357 | |
| | | | [g/10min] | s | [cm ³ /10min] | s | [g/m ³] | [J/(g*K)] | [°C] | [°C] | | |
| PE | Lyondellbasell | Lupolen 2420k | 3,79 | 0,01 | 5,02 | 0,01 | 0,92 | 1,8 - 3,4 * | 113 | -100 * | | |
| Datenblatt Lyondellbasell Lupolen 2420K | | | 4,0 | | N/A | | 0,92 | N/A | 111 | N/A | | |
| Bio-PE | Braskem/FKuR | STHA 7260 | 16,92 | 0,23 | 22,30 | 0,26 | 0,94 | 1,8 - 3,4 * | 131 | -100 * | | |
| Datenblatt Braskem/FKuR STHA 7260 | | | 18,0 | | N/A | | 0,96 | N/A | N/A | N/A | | |
| Bio-PE | Braskem/FKuR | STHC 7260 | 6,39 | 0,10 | 8,51 | 0,10 | 0,94 | 1,71 | 134 | -100 * | | |
| Datenblatt Braskem/FKuR STHC 7260 | | | 6,30 | | N/A | | 0,96 | N/A | N/A | N/A | | |
| Bio-PE | Braskem/FKuR | STGE 7252 NS | 2,06 | 0,06 | 2,74 | 0,11 | 0,94 | 1,8 - 3,4 * | 133 | -100 * | | |
| Datenblatt Braskem/FKuR STGE 7252 NS | | | 2,0 | | - | | 0,95 | N/A | N/A | N/A | | |
| rPE | Vogt Plastic | HDPE Regranulat 210-S/-U | 1,72 (5 kg) | 0,07 | 2,24 (5 kg) | 0,09 | 0,94 | 1,8 - 2,7 * | 134 | -100 * | | |
| Datenblatt Vogt Plastic HDPE Regranulat | | | 1,3 (5 kg) | | N/A | | 0,95 | N/A | N/A | N/A | | |
| PET | Indorama Ventures | Luxyclear PET 702K | N/A | | 94,26 (270 °C) | 0,76 | 1,37 | 1,04 - 1,17 * | 224 | 75,6 | | |
| Datenblatt Indorama Ventures Luxyclear PET 702K | | | N/A | | N/A | | 1,38 | N/A | 232 | N/A | | |
| Bio-PET | FKuR | Eastlon CB-602AB | 20,11 (270 °C) | 0,07 | 18,46 (270 °C) | 0,76 | 1,38 | 1,04 - 1,17 * | 247 | 82,3 | | |
| Datenblatt FKUR Eastlon CB-602AB | | | N/A | | N/A | | 1,3-1,4 | N/A | 240-260 | N/A | | |
| rPET | Barlog Plastics | KEBALLOY ECO FE 220404 | N/A | | 19,57 (270 °C) | 0,67 | 1,34 | 1,04 - 1,17 * | 246 | 81,9 | | |
| Datenblatt Barlog Plastics KEBALLOY ECO FE 220404 | | | N/A | | N/A | | 1,33 | N/A | 247 | N/A | | |
| PLA | NatureWorks | Ingeo 3251D | N/A | | 30,36 | 0,52 | 1,25 | 1,25 | 167 | 62,5 | | |
| Datenblatt NatureWorks Ingeo 3251D | | | 35 | | N/A | | 1,24 | N/A | 155-170 | 55-60 | | |
| PLLA | Total Corbion | Luminy L105 | N/A | | 29,47 | 0,68 | 1,25 | 1,22 | 172 | 61,7 | | |
| Datenblatt Total Corbion Luminy L105 | | | 30 | | N/A | | 1,24 | N/A | 175 | 60 | | |

Arbeitspaket 3: Simulation des Extrusionsprozesses anhand ausgewählter Beispiele

AP 3.1 - Modellierung und Simulation der Extrusionsversuche (IANUS)

Während der allgemeinen anfänglichen Projektverzögerung erstellte IANUS zur Vorbereitung eine Referenzliste von ca. 30 geeigneten PE-Kunststoffen. Aus der langjährigen Projektarbeit verfügte IANUS bereits über eine umfangreiche Materialdatenbank mit geeigneten Materialmodellen, die direkt für die Simulation verwendet werden konnten. So konnte ein erster Überblick über die relevanten Materialeigenschaften und -parameter gewonnen werden.

Darüber hinaus wurde eine Liste von DSE-Referenzprojekten aus dem IANUS-Projektarchiv erstellt. Dabei wurde auf thematische Überschneidungen mit dem Projekt geachtet, so dass wertvolle Inputs und erste Erkenntnisse für die Projektbearbeitung gewonnen werden konnten.

IANUS hat über das Unternehmen KraussMaffei Extrusion GmbH (KM) CAD-Geometrien der am IfBB verwendeten Schneckenelemente bezogen. Diese wurden für die Simulation vorbereitet, sodass verschiedenste Simulationen automatisiert durchgeführt werden konnten. Hierbei wurde zudem für jedes Schneckenelement nach Simulation ein entsprechendes Prozessdiagramm (vgl. Abbildung 2) bereitgestellt, welche die Beziehung zwischen Druck und Durchsatz für das Element angibt. Durch diesen modularen Simulationsaufbau (vgl. Abbildung 3) ist es somit möglich, schnell Aussagen über das Prozessverhalten bei veränderten Durchsätzen noch vor der eigentlichen Simulation zu erzielen. Weiterhin kann eine erste Optimierung des Schneckendesign so ebenfalls ohne aufwendige 3D-Simulation je Iterationsschritt durchgeführt werden.

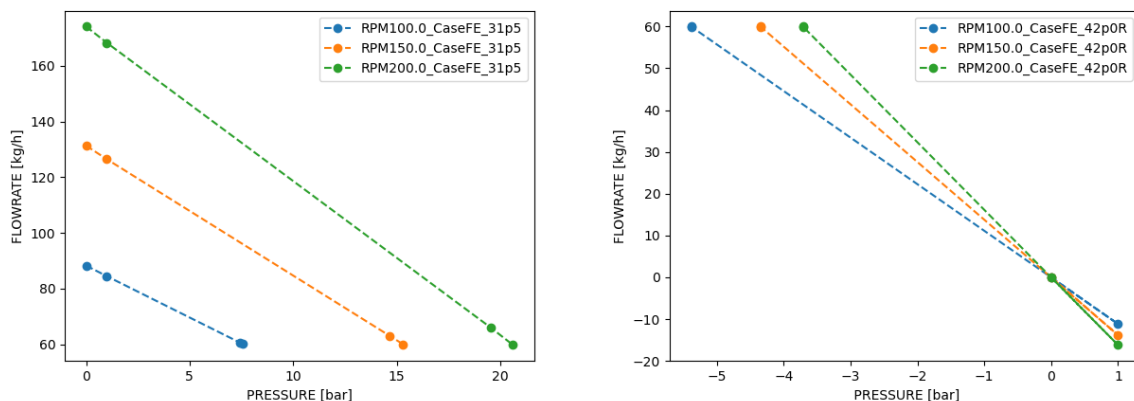


Abbildung 2: Prozessdiagramm zweier Doppelschneckenelemente

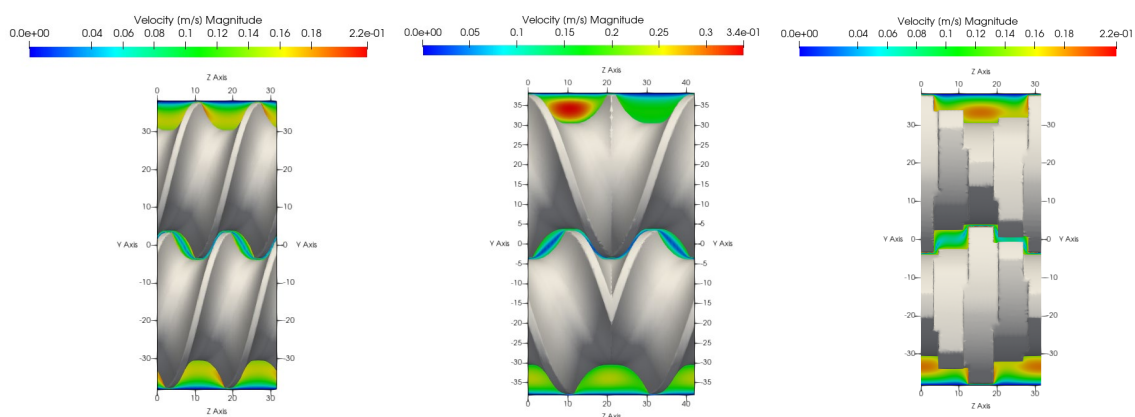


Abbildung 3: Darstellung von Einzelsegmenten (v.l.n.r. Fördererlemente, Rückfördererlement, Knetblock)

Im Cloud-basierten Simulationsframework StrömungsRaum® von IANUS wurde eine spezielle Schnittstelle geschaffen (s. Abbildung 4), so dass CFD-Simulationen schnell und einfach über die Benutzeroberfläche durchgeführt und ausgewertet werden können. Dadurch konnte der gesamte Simulationsworkflow deutlich beschleunigt werden, was sich insbesondere während der Projektverlängerung als sehr vorteilhaft erwies.

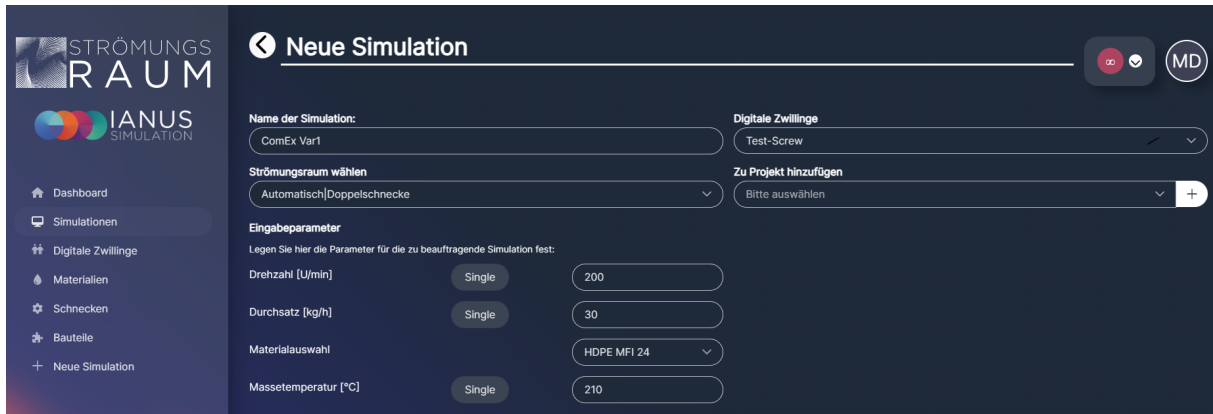


Abbildung 4: Eingabemaske

Weiterhin wurden die vom IfBB vermessenen Materialparameter in der internen Materialdatenbank von IANUS hinterlegt, sodass die entsprechenden Materialmodelle ebenfalls sofort von der StrömungsRaum® Benutzeroberfläche genutzt und bearbeitet werden können (s. Abbildung 5).



Abbildung 5: Beispiel eines der Materialmodelle in der StrömungsRaum® Benutzeroberfläche

Die Simulation erfolgte dabei segmentweise. Dadurch konnten insbesondere verschiedene Schneckenkonfigurationen ohne erneute Simulation abgebildet werden. Hierbei ist besonders das Druck-Durchsatzverhalten zur Bestimmung der vollgefüllten Bereiche und die Leistungseinbringung als Basis von Materialschädigung von Interesse (s. Abbildung 2). Letztere kann aus den Simulationsergebnissen mittels der Bestimmung des Drehmoments bestimmt werden.

AP 3.2 - Bestimmung der simulierten Ergebnisgrößen zur Validierung (IANUS)

Zum Zwecke der Validierung der Versuchsergebnisse wurde die Benutzeroberfläche um einen automatischen Reporter erweitert. Dies ermöglicht die vollautomatische Analyse der Simulationsergebnisse (s. Abbildung 6). Dabei werden wesentliche Größen wie Temperatur, Druck, Drehmoment, Verweilzeit und Mischwirkung aus den Simulationsdaten extrahiert, visualisiert und in Form einer PDF-Datei bereitgestellt. Diese standardisierte Auswertungsmethode wird für verschiedene Materialien verwendet, um eine hohe Vergleichbarkeit zu erreichen.

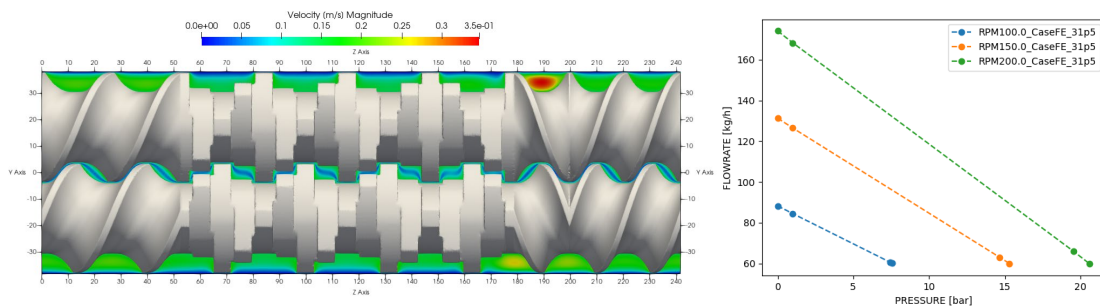


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellungen aus dem Report, Geschwindigkeiten (links) und Druck-Durchsatz-Kennkurve (rechts)

Im weiteren Projektverlauf wurde der Funktionsumfang des Reporters durch die Integration einer Option zur Erstellung von CSV-Dateien erweitert. Diese Erweiterung ermöglicht eine Auswertung und Validierung der Extrusionsversuche, die mit der vorhandenen Messperipherie kompatibel ist und an jeder Position innerhalb der Schnecke durchgeführt werden kann.

Arbeitspaket 4: Durchführung der Extrusionsversuche als experimentelle Datenbasis zur Validierung

AP 4.1 - Festlegung des Versuchsplans für die Extrusionsversuche (IfBB)

Zur Validierung der zum Einsatz kommenden Simulationsmodelle und des verwendeten Extrusionsverfahrens wurde ein Vorversuch mit dem PE Lupolen 2420k von *Lyondellbasell* durchgeführt. Die Schneckenkonfiguration des Doppelschneckenextruders ZE34B der *KraussMaffei Extrusion GmbH*, die in den Versuchen lediglich der Plastifizierung des Materials dient, wurde mit der Konfigurationssoftware *ScrewCon 3* angefertigt und ist in Abbildung 7 dargestellt.

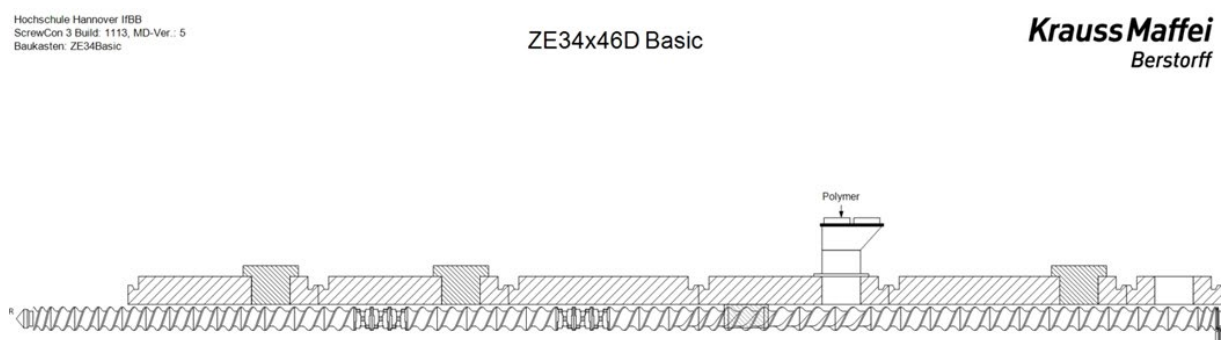


Abbildung 7: Schneckenkonfiguration des Doppelschneckenextruders ZE34B in den Vorversuchen

Die Verfahrensrichtung verläuft in den schematischen Darstellungen von rechts nach links. In Abbildung 8 ist die Konfiguration der ZE42B, ebenfalls ein Zweischnckenextruder der Fa. *KraussMaffei*, abgebildet. Der Schmelzeintritt aus der ZE34B in die ZE42B ist in der Abbildung 8 mit einem roten Pfeil markiert. Etwa mittig der Schnecke sind vier Knetblockelemente eingesetzt. Die Konfiguration besteht ansonsten ausschließlich aus Förderelementen mit unterschiedlicher Steigung.

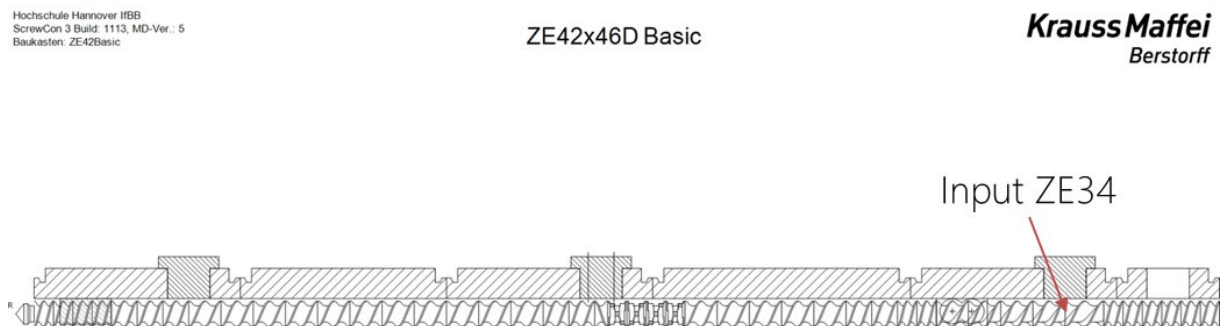


Abbildung 8: Schneckenkonfiguration des Doppelschneckenextruders ZE34B in den Vorversuchen

Die Untersuchung der Drehzahl n als Prozessvariable erfolgte an der ZE42B mit 100, 150 und 200 rpm. Bei der Auswertung der Versuche mithilfe der Fließkurven bei 170, 190 und 210 °C und Scherraten von 23 bis 23.000 s^{-1} konnte kein Abbau der Viskosität/Molmasse und somit auch keine Materialschädigung des Lupolen 2420K festgestellt werden. Die minimalen Unterschiede in den rheologischen Kennwerten der Materialproben sind in der Abbildung 9 dargestellt.

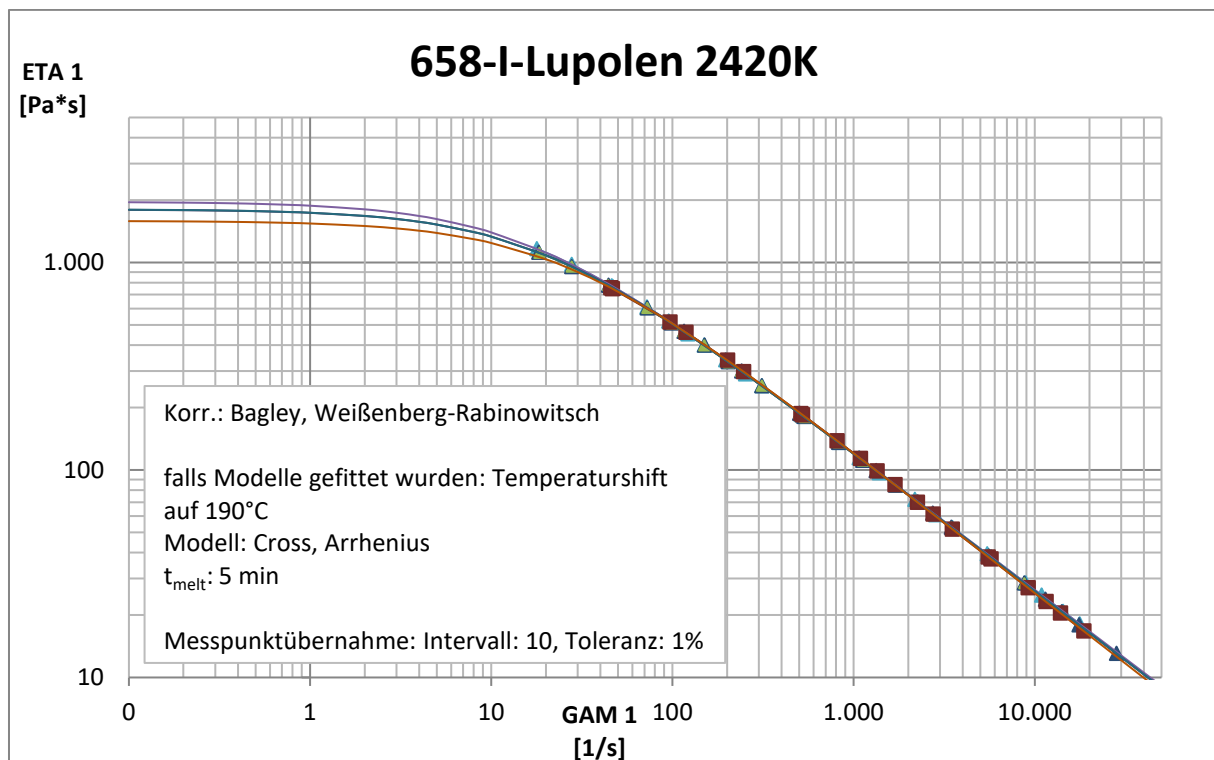


Abbildung 9: Fließkurve PE Lupolen 2420K (170/190/210 °C)

Auf der x-Achse ist die Schergeschwindigkeit γ (GAM) in $1/s$ aufgetragen. Die y-Achse bildet hierbei die Scherviskosität η (ETA) in $Pa*s$ ab, genauer das Verhältnis der Schubspannung zur Schergeschwindigkeit in der fließenden Masse, wobei η damit ein Maß für den Widerstand darstellt, den die Schmelze der Strömung entgensetzt. Die Fließkurven, die nahezu vollständig übereinander

liegen, sprechen für eine hohe Widerstandsfähigkeit des PE-Typen Lupolen 2420K, zumindest gegenüber den getesteten Drehzahlen im Extrusionsprozess. Für den weiteren Versuchsverlauf wurde auf Basis dieser Ergebnisse festgelegt, die Anlagenparameter in Abhängigkeit des Materials stärker zu variieren, um einen größeren Einfluss des Extrusionsprozesses auf das Material beobachten zu können. Die Polymertypen PLA Ingeo 3251D und PLLA Luminy L105 wurden als Materialien für die nächsten Versuche ausgewählt, da PLA im Allgemeinen als temperatur- und scherempfindlicher gilt. Darüber hinaus wurden drei Schnecken konfiguriert, die eine steigende Anzahl an Knetblöcken aufweisen, um das Material durch höhere Scherkräfte einer größeren Beanspruchung auszusetzen. In Abbildung 10 sind die Bereiche mit den Knetblöcken rot umrahmt. Für die Messung der Prozessdrücke und Massentemperaturen werden entsprechende Sensoren in das Extrudergehäuse eingeschraubt. Um die Variabilität und Anzahl der Einschraubpunkte zu erhöhen, wurden sogenannte Messscheiben angefertigt. Damit lassen sich die Messwerte an verfahrenstechnisch interessanten Positionen aufnehmen. Die angefertigten Messscheiben sind in Abbildung 11 dargestellt. In Abbildung 10 ist die Position der Messscheiben in blau gekennzeichnet. Sie wurden in den Aufbau des Extrudergehäuses integriert.

Hochschule Hannover IfBB
ScrewCon 3 Build: 1113, MD-Ver.: 5
Baukasten: ZE42Basic

ZE42x46D Basic

KraussMaffei
Berstorff

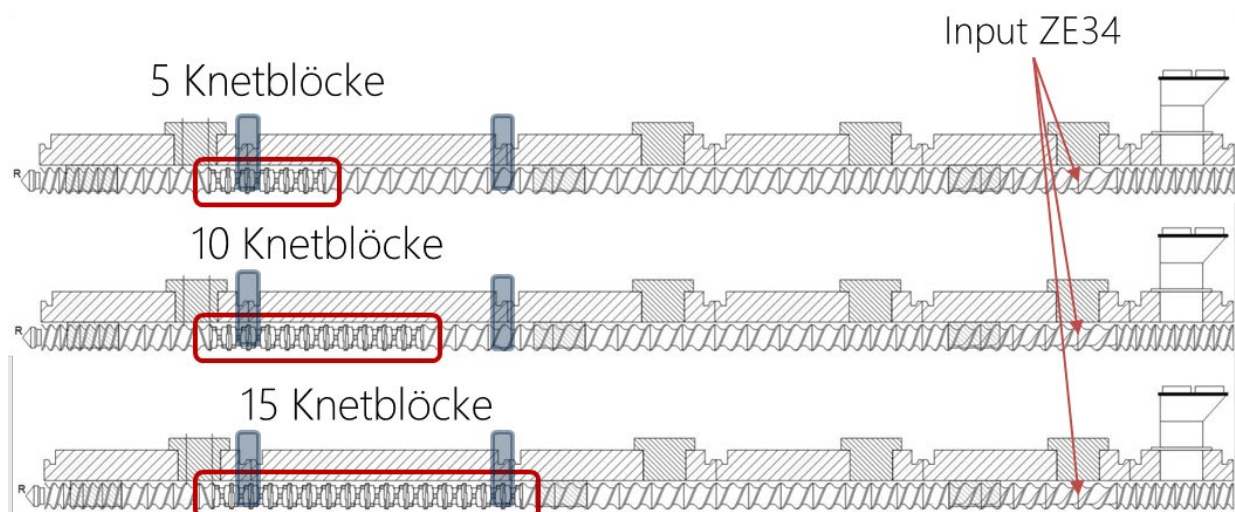


Abbildung 10: Schneckenkonfigurationen der ZE42B mit 5, 10 und 15 Knetblöcken



Abbildung 11: Messscheibe bestehend aus Gehäuseteil (links) und Flanschstücke oben und unten (rechts)

Bei den Versuchen wurden die Drehzahlen n mit 100, 200 und 300 rpm stärker variiert.

Die Drehzahl der ZE34B lag bei allen Parametern konstant bei 200 rpm, der Durchsatz beider Zweischneckenextruder konstant bei 50 kg/h. Für die Viskositätskurven wurden in Absprache mit IANUS die drei Temperaturen (T1-3) 190, 200 und 210 °C geprüft. Es ergeben sich mit den Materialien PLA und PLLA folgende Versuchspläne, die in Tabelle 3 und Tabelle 4 abgebildet sind.

Tabelle 3: Versuchsplan PLA Ingeo 3251D

| PLA Ingeo 3251D | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | Viskositätsmessungen | | |
|----------------------|----------------|------------------|----------------------|-----|-----|
| | | | T1 | T2 | T3 |
| Übergang ZE34B/ZE42B | 200 | 50 | 190 | 200 | 210 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 200 | - |
| 5 Knetblöcke | 200 | 50 | 190 | 200 | 210 |
| 5 Knetblöcke | 300 | 50 | - | 200 | - |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 200 | - |
| 10 Knetblöcke | 200 | 50 | 190 | 200 | 210 |
| 10 Knetblöcke | 300 | 50 | - | 200 | - |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 200 | - |
| 15 Knetblöcke | 200 | 50 | 190 | 200 | 210 |
| 15 Knetblöcke | 300 | 50 | - | 200 | - |

Tabelle 4: Versuchsplan PLLA Luminy L105

| PLLA Luminy L105 | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | Viskositätsmessungen | | |
|----------------------|----------------|------------------|----------------------|-----|-----|
| | | | T1 | T2 | T3 |
| Übergang ZE34B/ZE42B | 200 | 50 | 190 | 200 | 210 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 200 | - |
| 5 Knetblöcke | 200 | 50 | 190 | 200 | 210 |
| 5 Knetblöcke | 300 | 50 | - | 200 | - |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 200 | - |
| 10 Knetblöcke | 200 | 50 | 190 | 200 | 210 |
| 10 Knetblöcke | 300 | 50 | - | 200 | - |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 200 | - |
| 15 Knetblöcke | 200 | 50 | 190 | 200 | 210 |
| 15 Knetblöcke | 300 | 50 | - | 200 | - |

Durch die Ergebnisse des Vorversuchs wurde bei den darauffolgenden Versuchsreihen mit den PE- und PET-Typen die Drehzahlen nochmals auf 100, 300 und 500 rpm erhöht. Die Schneckenkonfigurationen kamen dagegen mit den genannten Anzahlen an Knetblöcken (vgl. Abbildung 10) unverändert zum Einsatz. Die Temperaturen für die Viskositätsmessungen wurden auf Basis der Schmelztemperaturen gewählt. In den folgenden Tabellen (Tabelle 5 bis Tabelle 10) sind die Pläne für die Versuchsreihen mit PE und PET aufgezeigt.

Tabelle 5: Versuchsplan Lupolen 2420K

| PE Lupolen 2420K | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | Viskositätsmessungen | | |
|----------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-----|-----|
| | | | T1 | T2 | T3 |
| Übergang ZE34B/ZE42B | 300 | 50 | 170 | 190 | 210 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 190 | - |
| | 300 | 50 | 170 | 190 | 210 |
| | 500 | 50 | - | 190 | - |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 190 | - |
| | 300 | 50 | 170 | 190 | 210 |
| | 500 | 50 | - | 190 | - |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 190 | - |
| | 300 | 50 | 170 | 190 | 210 |
| | 500 | 50 | - | 190 | - |

Tabelle 6: Versuchsplan Bio-PE STHC 7260

| Bio-PE STHC 7260 | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | Viskositätsmessungen | | |
|----------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-----|-----|
| | | | T1 | T2 | T3 |
| Übergang ZE34B/ZE42B | 300 | 50 | 170 | 190 | 210 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 190 | - |
| | 300 | 50 | 170 | 190 | 210 |
| | 500 | 50 | - | 190 | - |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 190 | - |
| | 300 | 50 | 170 | 190 | 210 |
| | 500 | 50 | - | 190 | - |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 190 | - |
| | 300 | 50 | 170 | 190 | 210 |
| | 500 | 50 | - | 190 | - |

Tabelle 7: Versuchsplan rPE HD 201-S

| rPE HD 201-S | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | Viskositätsmessungen | | |
|----------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-----|-----|
| | | | T1 | T2 | T3 |
| Übergang ZE34B/ZE42B | 300 | 50 | 170 | 190 | 210 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 190 | - |
| | 300 | 50 | 170 | 190 | 210 |
| | 500 | 50 | - | 190 | - |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 190 | - |
| | 300 | 50 | 170 | 190 | 210 |
| | 500 | 50 | - | 190 | - |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 190 | - |
| | 300 | 50 | 170 | 190 | 210 |
| | 500 | 50 | - | 190 | - |

Tabelle 8: Versuchsplan PET Luxyclear PET 702K

| PET Luxyclear PET 702K | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | Viskositätsmessungen | | |
|---------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-----|-----|
| | | | T1 | T2 | T3 |
| Übergang ZE34B/ZE42B | 300 | 50 | 250 | 260 | 270 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 260 | - |
| | 300 | 50 | 250 | 260 | 270 |
| | 500 | 50 | - | 260 | - |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 260 | - |
| | 300 | 50 | 250 | 260 | 270 |
| | 500 | 50 | - | 260 | - |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 260 | - |
| | 300 | 50 | 250 | 260 | 270 |
| | 500 | 50 | - | 260 | - |

Tabelle 9: Versuchsplan Bio-PET Eastlon CB-602A

| Bio-PET Eastlon CB-602A | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | Viskositätsmessungen | | |
|----------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-----|-----|
| | | | T1 | T2 | T3 |
| Übergang ZE34B/ZE42B | 300 | 50 | 260 | 270 | 280 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 270 | - |
| | 300 | 50 | 260 | 270 | 280 |
| | 500 | 50 | - | 270 | - |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 270 | - |
| | 300 | 50 | 260 | 270 | 280 |
| | 500 | 50 | - | 270 | - |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 270 | - |
| | 300 | 50 | 260 | 270 | 280 |
| | 500 | 50 | - | 270 | - |

Tabelle 10: Versuchsplan rPET Kecalloy ECO FE 220404

| r-PET Kecalloy ECO FE 220404 | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | Viskositätsmessungen | | |
|---------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-----|-----|
| | | | T1 | T2 | T3 |
| Übergang ZE34B/ZE42B | 300 | 50 | 260 | 270 | 280 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 270 | - |
| | 300 | 50 | 260 | 270 | 280 |
| | 500 | 50 | - | 270 | - |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 270 | - |
| | 300 | 50 | 260 | 270 | 280 |
| | 500 | 50 | - | 270 | - |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | - | 270 | - |
| | 300 | 50 | 260 | 270 | 280 |
| | 500 | 50 | - | 270 | - |

AP 4.2 - Festlegung der Messgrößen für die Validierung (IANUS)

Die von IANUS erstellten Referenzlisten mit PE-Kunststoffen und Doppelschnecken-Projekten aus der Unternehmenshistorie dienten als Grundlage zur Vorauswahl simulativ zugänglicher Messgrößen. In iterativer Abstimmung mit dem IfBB konnte die Analyse parallel zum Aufbau der Messperipherie fortlaufend angepasst und optimiert werden. Die Benutzeroberfläche und der automatische Reporter wurden dabei auf die jeweiligen Materialien und ausgewählte Messperipherie zugeschnitten.

AP 4.3 – Durchführung der Extrusionsversuche (IfBB)

Um konstante Bedingungen bzw. einen konstanten Ausgangspunkt während der Extrusion in dem Doppelschneckenextruder ZE42B, der zur Generierung der Daten für die Simulation eingesetzt wurde,

für alle Versuche zu ermöglichen, wurde die Aufschmelzzone aus diesem System ausgekoppelt. Für dieses Vorgehen spricht außerdem, dass die Simulation von Aufschmelzprozessen aktuell noch nicht ausreichend weit entwickelt ist und dafür noch keine geeigneten Modelle zur Verfügung stehen. Die Abbildung 12 zeigt die Tandemkonfiguration der beiden Extruder und die Messpunkte der Druckaufnehmer sowie Temperaturfühler. Die Dosierung der Polymere erfolgt durch den eingezeichneten Trichter der ZE34B. Beide Extruder wurden durch eine mit einem Keramikheizband beheizte Schmelzleitung verbunden. Die Durchführung der Extrusionsversuche mit allen Polymertypen (PLA, PLLA, PE und PET) erfolgt gemäß des Versuchsplans aus AP 4.1.

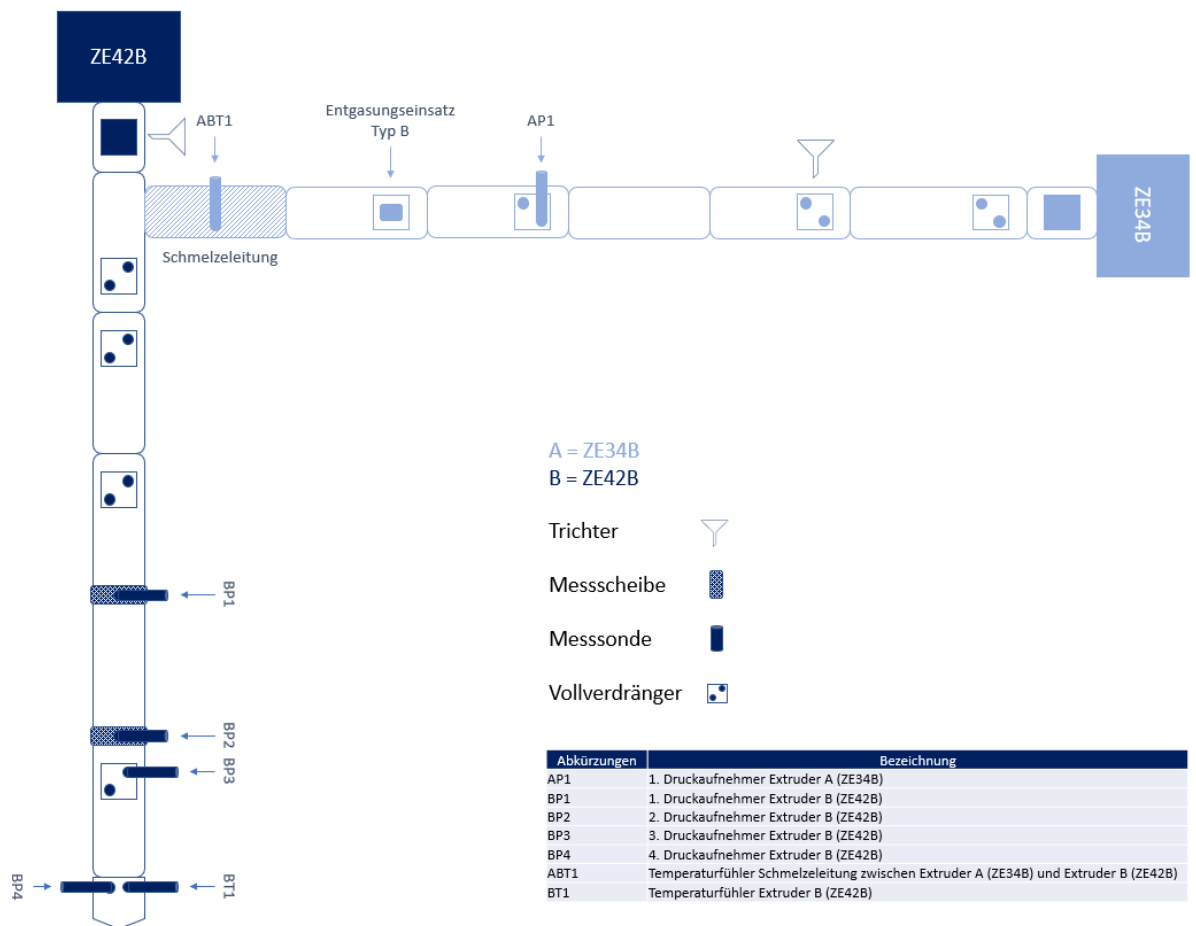


Abbildung 12: Tandemkonfiguration der ZE34B und ZE42B mit den Positionen der Druck- und Temperatursensoren

Zur Verbindung der Extruder und Realisierung des Tandem-Aufbaus wird eine Schmelzleitung benötigt. Diese wird dazu verwendet, das aufgeschmolzene Material aus dem ZE34 Extruder in den Schneckenang des ZE42 Extruders einzuleiten. Aufgrund der Individualität einer solchen Anlagenkonfiguration musste die Schmelzleitung speziell entwickelt und angefertigt werden.

Sie besteht aus den zwei Hauptkomponenten Stahlgehäuse bzw. Adapter und einer Keramikheizung (s. Abbildung 13, Abbildung 14 und Abbildung 15). Der Adapter wurde als ein Stahl-Drehteil entworfen. Dieser dient neben der mechanischen Verbindung beider Anlagen auch dazu, die durch die Anlagengeometrie bedingte Lücke zwischen den Zylinder zu überbrücken und die Schmelze zu führen. Um eine druckbeständige und dichte Verbindung zwischen Adapter und Extruder herstellen zu können wurde der Adapter an den Enden mit Flanschen entsprechend der Flanschmaße der beiden zu verbindenden Extruder versehen. Dies ermöglicht eine feste Verbindung mittels der standartmäßig zum Extruderaufbau genutzten C-Clamps.

Das Innenmaß des Adapters wurde entsprechend dem Bohrungsdurchmesser des ZE34 Extruders gewählt, sodass die Bildung von Strömungskanten und Toträumen am Übergang zwischen Extruder und Adapter verhindert wird. Zusätzlich ist es hierdurch möglich die Schnecke des ZE34 Extruders mithilfe von Dornverlängerungen in den Adapter fortzuführen. Somit kann die Verweilzeit des Materials im Adapter minimiert werden.

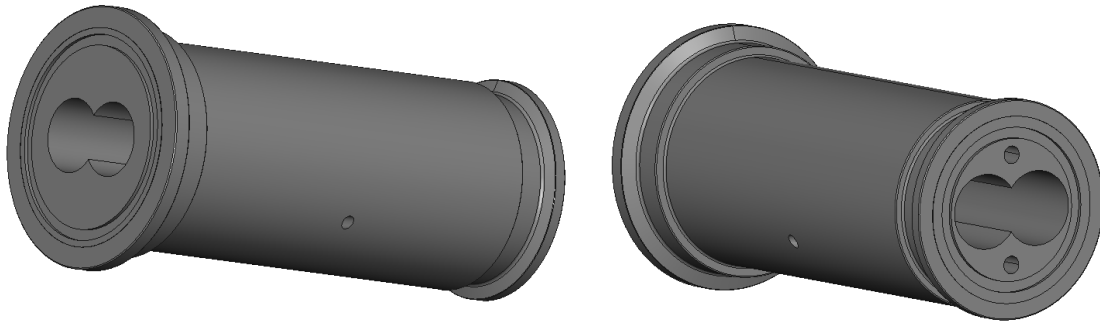


Abbildung 13: 3-D Modell der finalen Version des Schmelzeleitungs-Drehteils mit Zentrierbohrungen, Dichtungsnuten und einer orthogonalen Bohrung zur Montage eines Temperatursensors.

Um ein Einfrieren der Schmelze im inneren des Adapters zu verhindern, musste dieser mit einer steuerbaren Heizung ausgestattet werden. Es wurde sich für die Verwendung von elektrisch betriebenen Keramik-Heizmanschetten entschieden. Der Adapter wurde so konstruiert, dass sofort verfügbare und für den Spritzguss entwickelte Heizmanschetten des Herstellers ERGE verwendet werden können. Diese sind bis zu einer Prozesstemperatur von 800 °C einsetzbar und werden mit 230 V/50 Hz Netzstrom betrieben.

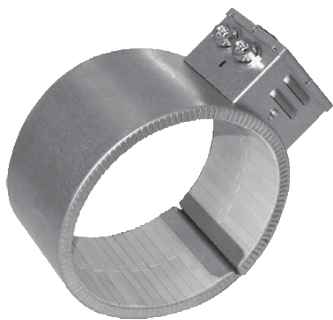


Abbildung 14 ERGE Keramikheizband/Heizmanschette (Quelle: erge-elektrowaermetechnik.de)

Zur Heizung des Adapters werden zwei Heizbänder mit jeweils 95 mm breite und 1450 W Heizleistung verwendet.

Um die Heizleistung der Heizmanschetten zu steuern, wurde eine Temperatursteuerung auf Basis eines Controllers des Herstellers ESCO angefertigt. Der verwendete PT10-Controller nutzt den Messwert eines PT100 Temperaturfühlers und eine einstellbare Soll-Temperatur, um die Heizbänder per Relais ein- und abzuschalten. Dies ermöglicht es, die Temperatur des Adapters auf den zu verarbeitenden Kunststoff anzupassen. Die Stromversorgung des Controllers und der Heizbänder wird dabei über einen 32 Ampere Drehstromstecker gewährleistet. Zur zusätzlichen Absicherung wurden beide Heizbänder jeweils mit einer separaten 8-Ampere-Feinsicherung versehen.

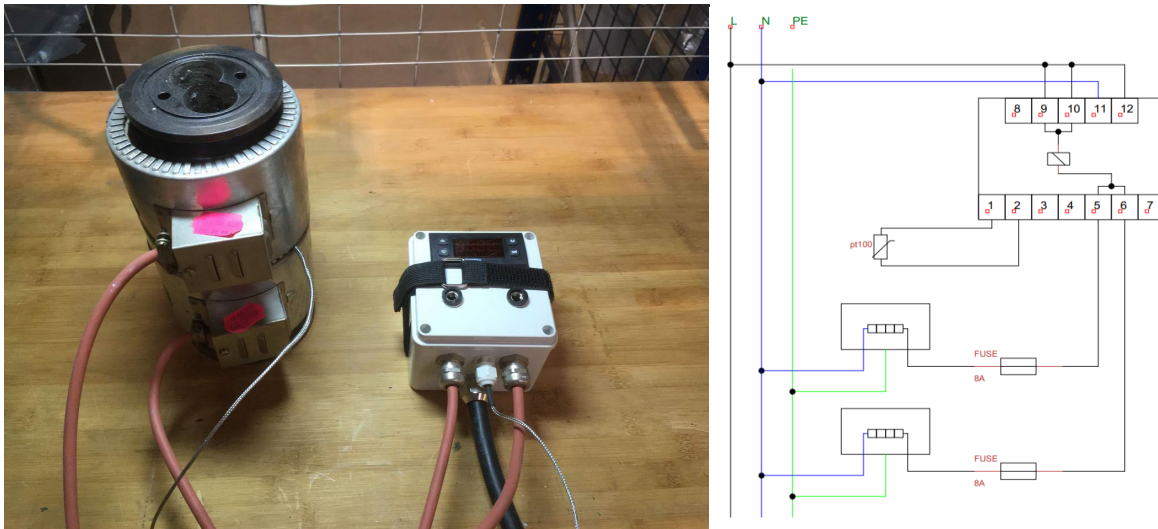


Abbildung 15: Schmelzeleitung mit Heizmanschetten und Steuereinheit (Links) und vereinfachtem Schaltplan (Rechts)

Mit dem in Abbildung 12 dargestellten Aufbau und den in Abbildung 10 aufgeführten Schneckenzeichnungen konnten in diesem Arbeitspaket alle Versuche aus dem Versuchsplan aus AP 4.1 erfolgreich durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Materialanalyse sind im Folgenden aufgeführt.

Materialanalyse: Schmelzefließrate

Wie eingangs beschrieben, wurde für die isotherme Simulation die Viskosität mit Temperaturverschiebungsfaktor mit Hilfe von Fließkurven sowie die Schmelzedichte/Schmelzefließrate anhand von MFI- bzw. MVR-Messungen ermittelt. Tabelle 11 bis Tabelle 18 beinhalten die Auswertung der MFR- bzw. MVR-Messungen der Kunststoff-Materialien. In Abbildung 16, Abbildung 17 und Abbildung 18 sind die Ergebnisse der MVR-Werte grafisch dargestellt. Die Messung erfolgt nach DIN EN ISO 1133. Die Materialien wurden vor dem Messvorgang getrocknet, um Messfehler zu vermeiden. Aufgelistet sind jeweils die Virgin-Materialien, die Materialien, die nur durch den Extruder ZE34B gelaufen sind (Übergang der ZE34B und ZE42B nach der Aufschmelzzone) und die Materialien mit den verschiedenen Schneckenkonfigurationen mit 5, 10 und 15 Knetblöcken. Für einige Materialien war die Bestimmung des MFR-Wertes nicht möglich. Dies betrifft vor allem die besonders fließfähigen Materialien. In diesen Fällen ist nur der MVR-Wert angegeben.

Im Allgemeinen gilt, dass eine Erhöhung des MFR- bzw. MVR-Wertes eines Materials auf eine Verringerung der Molmasse hindeutet und damit auf einen Kettenbruch im molekularen Aufbau der Kunststoffe. Wird also das Material stärker thermisch oder mechanisch beansprucht, kann man von einem Anstieg der Fließfähigkeit und gleichzeitig von einer Verringerung der Viskosität ausgehen. Sowohl beim PLA Ingeo 3251D als auch beim PLLA Luminy L105 entsprechen die Ergebnisse der MVR-Prüfungen grundsätzlich den Erwartungen. Die Virgin-Materialien liegen bei $30,36 \text{ cm}^3/10\text{min}$ (PLA) und $29,47 \text{ cm}^3/10\text{min}$ (PLLA). Insgesamt ist zu erkennen, dass je höher die Anzahl an Knetblöcken, desto höher die Beanspruchung der beiden PLA-Typen und desto höher auch die MVR. Werden die Ergebnisse der Proben mit verschiedenen Drehzahlen innerhalb einer Schneckenkonfiguration verglichen, ist keine so deutliche Kohärenz festzustellen. Eine Tendenz, dass bei steigender Drehzahl und gleicher Anzahl an Knetblöcken die MVR steigt, ist zwar bis auf wenige Ausnahmen festzustellen, allerdings liegen die Einzelwerte sehr nah beieinander. Dadurch lässt sich keine fundierte Aussage zu einer Korrelation der Werte treffen. Es ist anzunehmen, dass eine deutlichere Differenz zwischen den Drehzahlen zu einem deutlicheren Ergebnis bei dieser Betrachtung führen würde. Wie bereits in AP

4.1 bei der Versuchsplanung erläutert, werden für die folgenden Versuchsreihen (PE und PET) auf Basis dieses Ergebnisses die Abstände der Drehzahlen von 100 rpm auf 300 rpm und 500 rpm erhöht.

Table 11: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit PLA Ingeo 3251D

| PLA Ingeo 3251D | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | MFR | | MVR | |
|--------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|------|
| | | | DIN EN ISO 1133 (190 °C; 2,16 kg) | | DIN EN ISO 1133 (190 °C; 2,16 kg) | |
| | | | [g/10min] | s | [cm ³ /10min] | s |
| Virgin | - | - | N/A | N/A | 30,36 | 0,52 |
| Nur ZE34B | 200 | 50 | N/A | N/A | 32,17 | 0,35 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 36,55 | 0,4 |
| 5 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 35,26 | 0,74 |
| 5 Knetblöcke | 300 | 50 | N/A | N/A | 38,02 | 0,97 |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 36,01 | 0,21 |
| 10 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 36,55 | 0,91 |
| 10 Knetblöcke | 300 | 50 | N/A | N/A | 39,57 | 0,76 |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 37,18 | 0,32 |
| 15 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 37,23 | 0,25 |
| 15 Knetblöcke | 300 | 50 | N/A | N/A | 40,37 | 0,13 |

Table 12: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit PLLA Luminy L105

| PLLA Luminy L105 | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | MFR | | MVR | |
|---------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|------|
| | | | DIN EN ISO 1133 (190 °C; 2,16 kg) | | DIN EN ISO 1133 (190 °C; 2,16 kg) | |
| | | | [g/10min] | s | [cm ³ /10min] | s |
| Virgin | - | - | N/A | N/A | 29,47 | 0,68 |
| Nur ZE34B | 200 | 50 | N/A | N/A | 32,95 | 0,08 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 36,68 | 0,12 |
| 5 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 33,7 | 0,4 |
| 5 Knetblöcke | 300 | 50 | N/A | N/A | 35,3 | 0,45 |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 36,87 | 0,62 |
| 10 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 37,15 | 0,37 |
| 10 Knetblöcke | 300 | 50 | N/A | N/A | 37,4 | 0,48 |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 38,07 | 0 |
| 15 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 38,59 | 0,69 |
| 15 Knetblöcke | 300 | 50 | N/A | N/A | 39,45 | 0,11 |

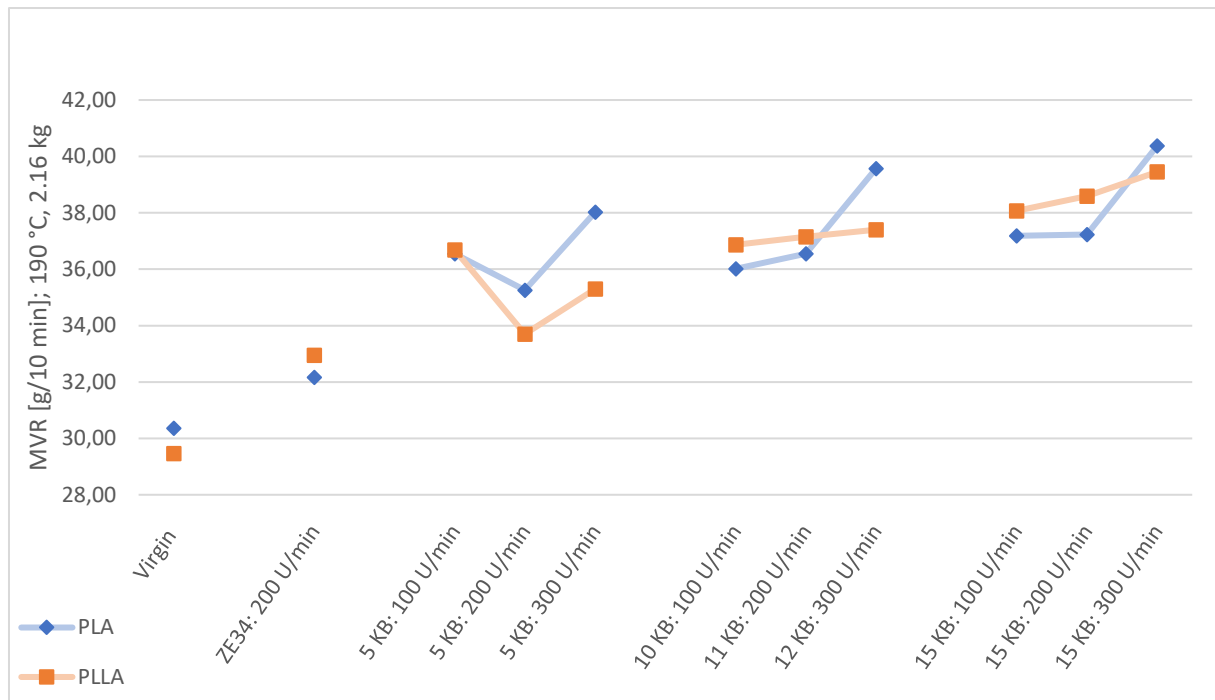


Abbildung 16: Grafische Darstellung der MFR/MVR-Ergebnisse für PLA und PLLA

In den folgenden Tabellen und Abbildungen für den Materialtyp PE (Tabelle 13, Tabelle 14, Tabelle 15 und Abbildung 17) ist die Auswirkung der thermischen und mechanischen Beanspruchung auf das Material durch die unterschiedlichen Extrusionsbedingungen zu erkennen. Obwohl die Extruder-Drehzahl im Vergleich zu den PLA-Versuchen erhöht wurde, fällt die Auswirkung auf die Fließfähigkeit des Materials sehr gering aus. Eine Tendenz für einen leichten Anstieg der Fließfähigkeit durch die Erhöhung der Drehzahl ist zu erkennen. Die Erhöhung der Anzahl der Knetblöcke zeigt keine Auswirkung auf die Fließfähigkeit.

Tabelle 13: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit PE Lupolen 2420K

| PE Lupolen 2420K | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | MFR | | MVR | |
|------------------|----------------|------------------|-----------------------------------|------|-----------------------------------|------|
| | | | DIN EN ISO 1133 (190 °C; 2,16 kg) | | DIN EN ISO 1133 (190 °C; 2,16 kg) | |
| | | | [g/10min] | s | [cm ³ /10min] | s |
| Virgin | - | - | 3,79 | 0,01 | 5,02 | 0 |
| Nur ZE34B | 200 | 50 | 3,7 | 0,01 | 4,93 | 0,06 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | 3,53 | 0 | 4,69 | 0,06 |
| 5 Knetblöcke | 200 | 50 | 3,28 | 0,01 | 4,36 | 0,03 |
| 5 Knetblöcke | 500 | 50 | 3,38 | 0,02 | 4,47 | 0,02 |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | 3,53 | 0,01 | 4,67 | 0,01 |
| 10 Knetblöcke | 200 | 50 | 3,23 | 0,04 | 4,29 | 0,08 |
| 10 Knetblöcke | 500 | 50 | 3,35 | 0,01 | 4,42 | 0,02 |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | 3,49 | 0,01 | 4,61 | 0,03 |
| 15 Knetblöcke | 200 | 50 | 3,25 | 0 | 4,28 | 0 |
| 15 Knetblöcke | 500 | 50 | 3,37 | 0,03 | 4,45 | 0,02 |

Tabelle 14: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit Bio-PE STHC 7260

| Bio-PE STHC 7260 | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | MFR | | MVR | |
|---------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|------|-----------------------------------|------|
| | | | DIN EN ISO 1133 (190 °C; 2,16 kg) | | DIN EN ISO 1133 (190 °C; 2,16 kg) | |
| | | | [g/10min] | s | [cm ³ /10min] | s |
| Virgin | - | - | 6,39 | 0,1 | 8,51 | 0,1 |
| Nur ZE34B | 200 | 50 | 6,42 | 0,01 | 8,5 | 0,01 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | 6,4 | 0,01 | 8,44 | 0,03 |
| 5 Knetblöcke | 200 | 50 | 6,3 | 0,03 | 8,35 | 0,04 |
| 5 Knetblöcke | 500 | 50 | 6,55 | 0,05 | 8,68 | 0,01 |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | 6,42 | 0,04 | 8,51 | 0,09 |
| 10 Knetblöcke | 200 | 50 | 6,32 | 0,05 | 8,38 | 0,05 |
| 10 Knetblöcke | 500 | 50 | 6,61 | 0,04 | 8,82 | 0,04 |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | 6,46 | 0,04 | 8,56 | 0,04 |
| 15 Knetblöcke | 200 | 50 | 6,37 | 0 | 8,46 | 0,04 |
| 15 Knetblöcke | 500 | 50 | 6,54 | 0,01 | 8,66 | 0 |

Tabelle 15: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit rPE-HD 201-S

| rPE-HD 201-S | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | MFR | | MVR | |
|---------------|-------------------|---------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|
| | | | DIN EN ISO 1133 (190 °C; 5 kg) | | DIN EN ISO 1133 (190 °C; 5 kg) | |
| | | | [g/10min] | s | [cm ³ /10min] | s |
| Virgin | - | - | 1,72 | 0,07 | 2,24 | 0,09 |
| Nur ZE34B | 200 | 50 | 1,64 | 0,06 | 2,12 | 0,07 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | 1,69 | 0,03 | 2,21 | 0,06 |
| 5 Knetblöcke | 200 | 50 | 1,48 | 0,06 | 1,93 | 0,1 |
| 5 Knetblöcke | 500 | 50 | 2,11 | 0,03 | 2,74 | 0,03 |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | 1,73 | 0,03 | 2,26 | 0,04 |
| 10 Knetblöcke | 200 | 50 | 1,61 | 0,02 | 2,11 | 0,04 |
| 10 Knetblöcke | 500 | 50 | 1,73 | 0 | 2,25 | 0 |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | 1,71 | 0,05 | 2,23 | 0,09 |
| 15 Knetblöcke | 200 | 50 | 1,65 | 0,02 | 2,15 | 0,04 |
| 15 Knetblöcke | 500 | 50 | 2,05 | 0,01 | 2,67 | 0,01 |

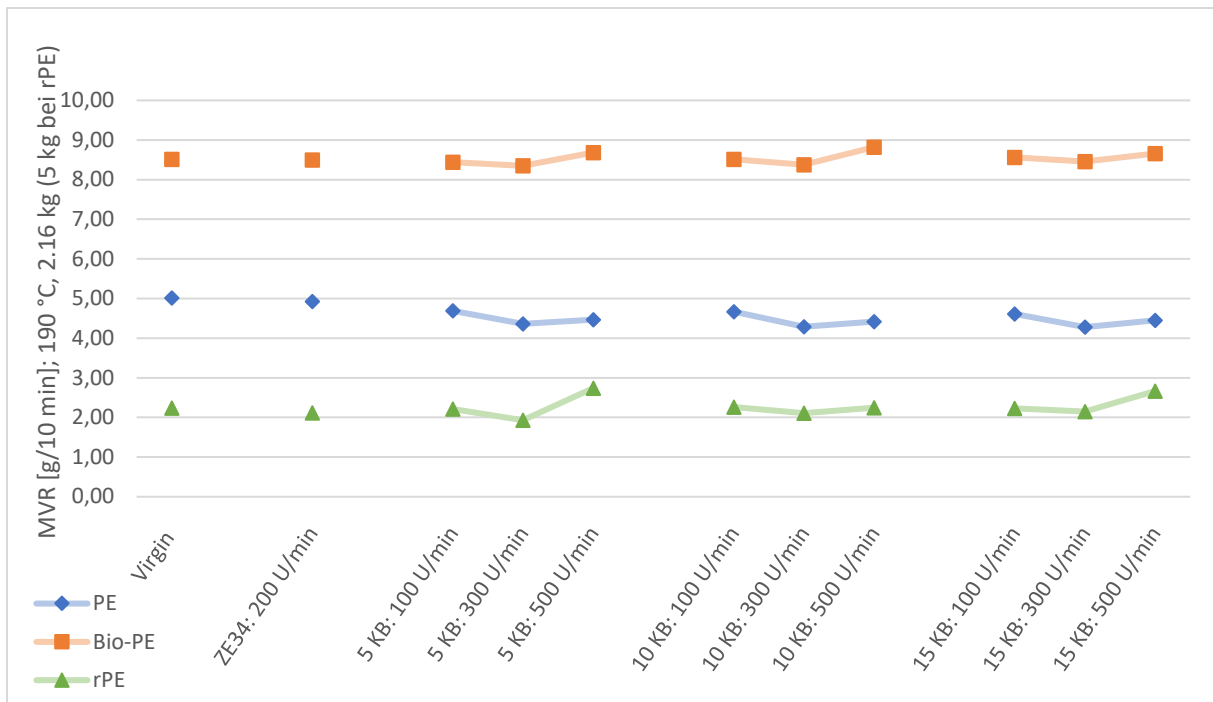


Abbildung 17: Grafische Darstellung der MFR/MVR-Ergebnisse für PE

Die Messwerte der Fließfähigkeit für die PET-Materialien sind in Tabelle 16, Tabelle 17, Tabelle 18 und Abbildung 18 dargestellt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei PLA und PE sind hier deutlichere Unterschiede in der Fließfähigkeit festzustellen. Das PET ist dabei weniger anfällig für den Anstieg der Fließfähigkeit durch die mechanische und thermische Belastung des Materials. Beim Bio-PET und rPET hingegen ist ein hoher Anstieg der Fließfähigkeit besonders bei der hohen Extruderdrehzahl von 500 rpm zu erkennen. Die Schneckenengeometrie bzw. Anzahl der Knetblöcke hat weniger Einfluss auf die Veränderung der Fließfähigkeit. Eine Auffälligkeit bei den PET-Materialien ist allerdings auch, dass die Standardabweichung höher ist als bei den anderen Materialtypen.

Tabelle 16: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit PET Luxyclear 702K

| PET Luxyclear 702K | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | MFR | | MVR | |
|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|-------|
| | | | DIN EN ISO 1133 (270 °C; 2,16 kg) | | DIN EN ISO 1133 (270 °C; 2,16 kg) | |
| | | | [g/10min] | s | [cm ³ /10min] | s |
| Virgin | - | - | N/A | N/A | 94,26 | 0,76 |
| Nur ZE34B | 200 | 50 | N/A | N/A | 98,82 | 10,23 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 90,41 | 3,79 |
| 5 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 83,91 | 0,16 |
| 5 Knetblöcke | 500 | 50 | N/A | N/A | 83,72 | 6,95 |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 81,55 | 2,99 |
| 10 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 85,45 | 3,24 |
| 10 Knetblöcke | 500 | 50 | N/A | N/A | 100,37 | 9,01 |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 72,25 | 0,59 |
| 15 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 88,56 | 0,31 |
| 15 Knetblöcke | 500 | 50 | N/A | N/A | 91,43 | 1,33 |

Tabelle 17: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit Bio-PET Eastlon CB-602AB

| Bio-PET Eastlon CB- 602AB | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | MFR | | MVR | |
|---------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|------|
| | | | DIN EN ISO 1133 (270 °C; 2,16 kg) | | DIN EN ISO 1133 (270 °C; 2,16 kg) | |
| | | | [g/10min] | s | [cm ³ /10min] | s |
| Virgin | - | - | N/A | N/A | 18,46 | 0,76 |
| Nur ZE34B | 200 | 50 | N/A | N/A | 41,98 | 1,19 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 26,57 | 0,42 |
| 5 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 47,35 | 0,24 |
| 5 Knetblöcke | 500 | 50 | N/A | N/A | 101,47 | 0,71 |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 42,95 | 0,4 |
| 10 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 51,69 | 4,98 |
| 10 Knetblöcke | 500 | 50 | N/A | N/A | 141,05 | 13,8 |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 24,51 | 0,17 |
| 15 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 45,74 | 2,47 |
| 15 Knetblöcke | 500 | 50 | N/A | N/A | 124,5 | 1,06 |

Tabelle 18: MFR/MVR-Messungen der Materialien mit rPET Kecalloy ECO FE 220404

| rPET Kecalloy ECO FE 220404 | Drehzahl [rpm] | Durchsatz [kg/h] | MFR | | MVR | |
|--------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|-------|
| | | | DIN EN ISO 1133 (270 °C; 2,16 kg) | | DIN EN ISO 1133 (270 °C; 2,16 kg) | |
| | | | [g/10min] | s | [cm ³ /10min] | s |
| Virgin | - | - | N/A | N/A | 19,57 | 0,67 |
| Nur ZE34B | 200 | 50 | N/A | N/A | 52,84 | 1,32 |
| 5 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 40,62 | 1,49 |
| 5 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 30,36 | 1,53 |
| 5 Knetblöcke | 500 | 50 | N/A | N/A | 75,29 | 2,52 |
| 10 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 22,7 | 1,49 |
| 10 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 43,3 | 2,53 |
| 10 Knetblöcke | 500 | 50 | N/A | N/A | 96,65 | 5,96 |
| 15 Knetblöcke | 100 | 50 | N/A | N/A | 33,65 | 1,69 |
| 15 Knetblöcke | 200 | 50 | N/A | N/A | 43,29 | 2,79 |
| 15 Knetblöcke | 500 | 50 | N/A | N/A | 107,97 | 28,86 |

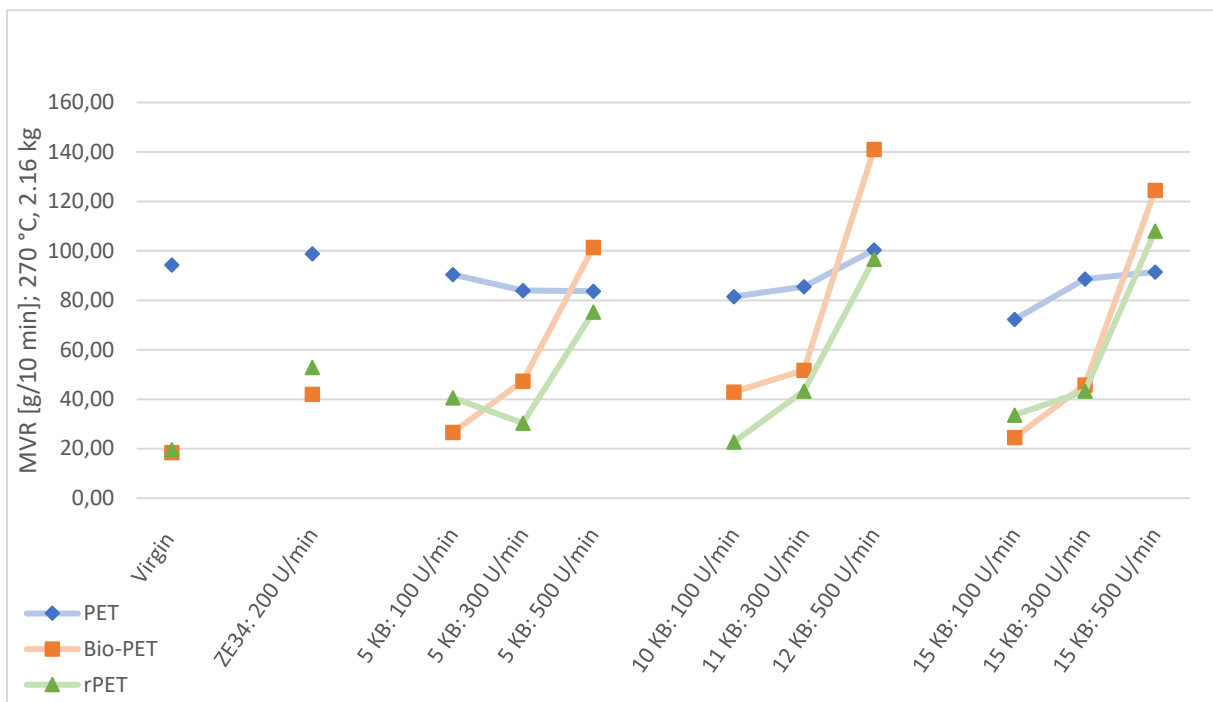


Abbildung 18: Grafische Darstellung der MFR/MVR-Ergebnisse für PET

Materialanalyse: Viskositätskurven

Im Folgenden werden die Viskositätskurven der untersuchten Materialien dargestellt. Dabei werden für jedes Material die Ergebnisse der Materialproben mit unterschiedlicher Beanspruchung durch den Extrusionsprozess in einem Diagramm dargestellt. Darin ist die dynamische Viskosität η (ETA) auf der y-Achse dargestellt und die Scherrate γ (Gamma) auf der x-Achse.

Bei der Auswertung der Viskositätskurven ist die höhere Beanspruchung des PLA und PLLA mit steigender Anzahl an Knetblöcken festzustellen. In der Abbildung 19 sind die Fließkurven des PLA Ingeo 3251D und in der Abbildung 20 die Kurven des PLLA Luminy L105 dargestellt. Die roten Kurven kennzeichnen jeweils die Messungen der Virgin-Materialien, die blauen Kurven die Messungen, nachdem die Materialien durch die Aufschmelzzone (ZE34B) gefahren wurden. Dieser Punkt wird, wie bereits erwähnt als konstanter Ausgangspunkt in der Simulation angesehen. Die grüne Kurve zeigt die Viskositätskurve beider Materialien nach deren Beanspruchung durch 15 Knetblöcke. Um eine Vergleichbarkeit zu schaffen, wurden hierbei nur die Drehzahlen mit 200 rpm aufgezeigt. Bei niedrigen Scherraten ist bei beiden PLA-Typen zu erkennen, dass die unbeanspruchten Matrices die höchste Viskosität aufweisen und diese mit Stärke der thermischen und mechanischen Belastung abnimmt. Wie anfangs beschrieben, deuten eine abnehmende Viskosität und eine damit einhergehende, wachsende MVR auf eine Verringerung der Molmasse, Kettenbruch und damit einer zunehmenden Materialschädigung hin. Mit zunehmender Schergeschwindigkeit nimmt die Scherviskosität aller Materialien in ähnlichem Maße ab, bis sich die Kurven jeweils grob bei 2.000 s^{-1} schneiden.

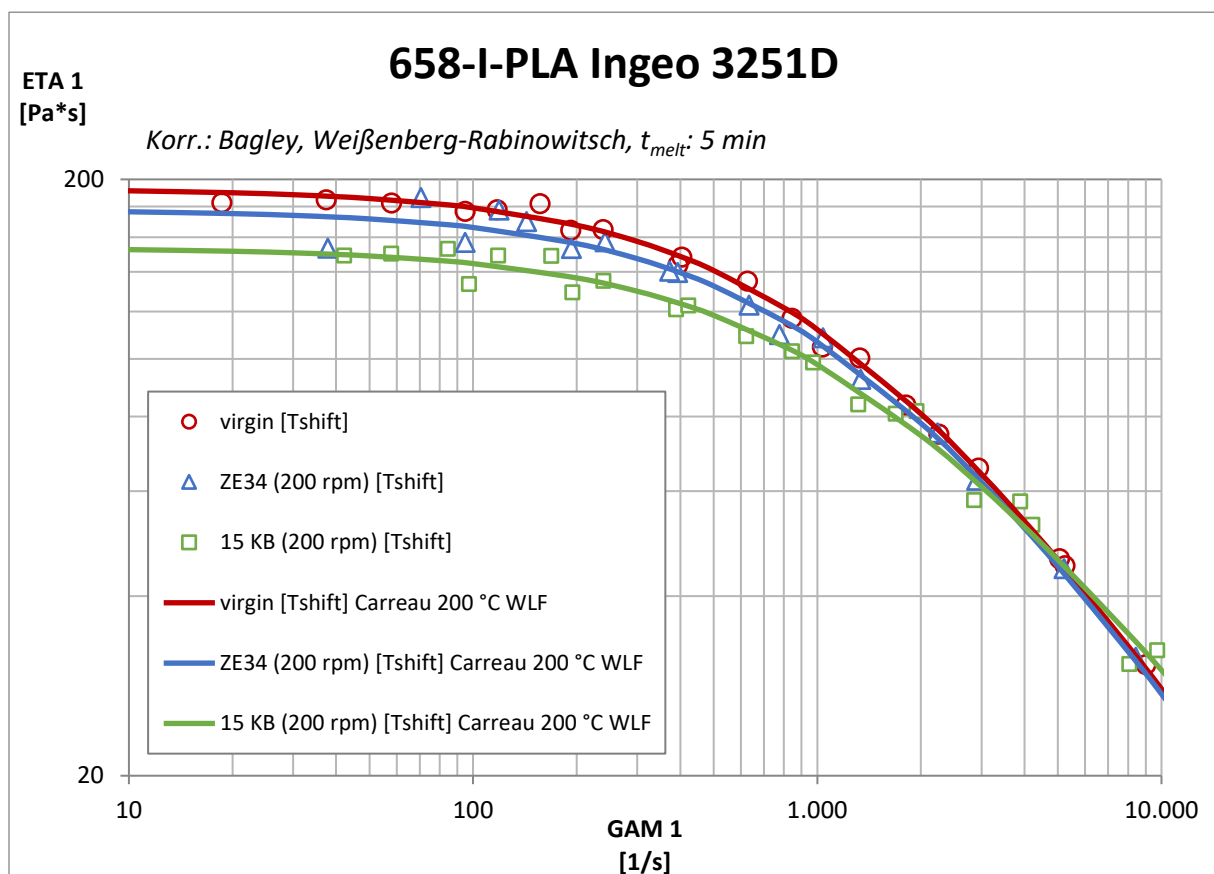


Abbildung 19: Viskositätskurve vom PLA Ingeo 3251D (Virgin = rot; Übergang ZE34B/ZE42B = blau; 15 Knetblöcke = grün)

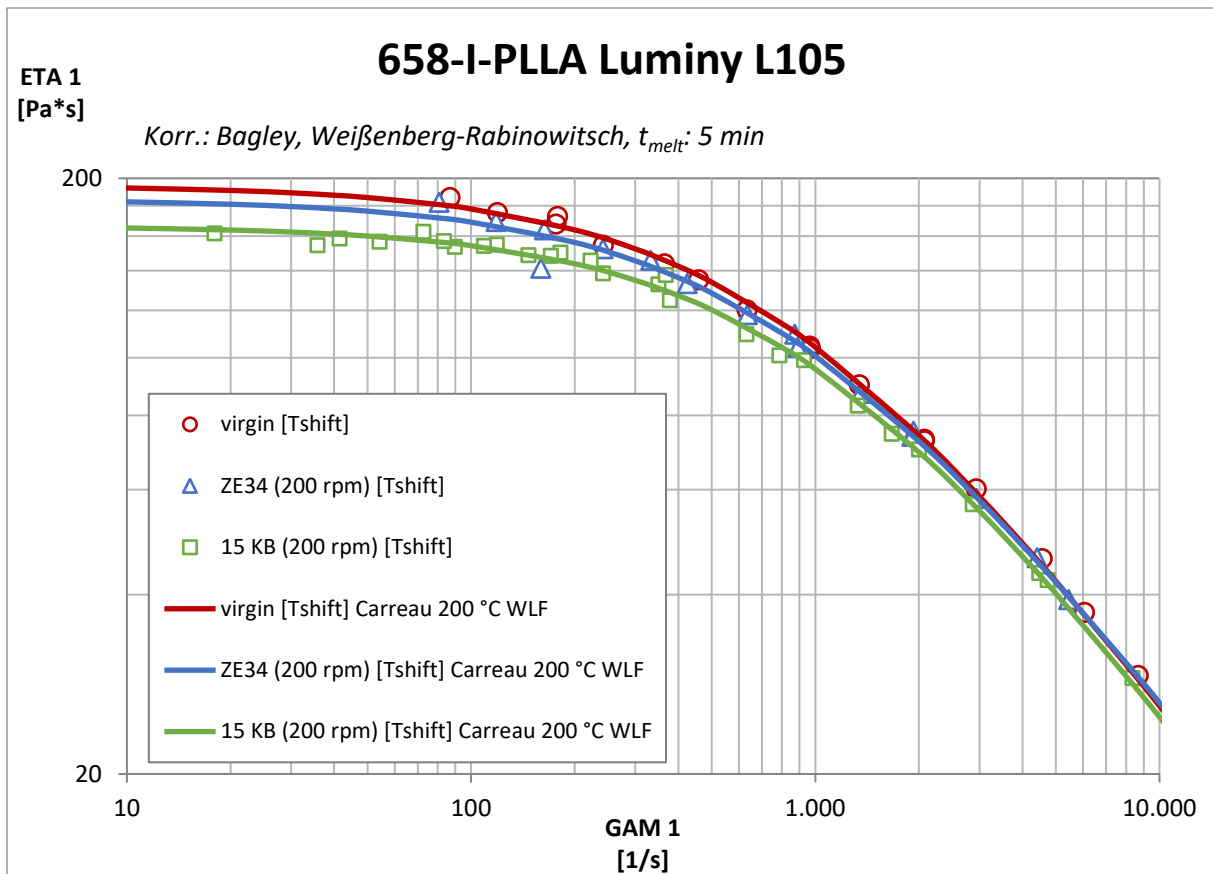


Abbildung 20: Viskositätskurve vom PLLA Luminy L105 (Virgin = rot; Übergang ZE34B/ZE42B = blau; 15 Knetblöcke = grün)

Auch bei den Viskositätskurven für die PE-Materialien die in Abbildung 21, Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt sind, ist ein ähnliches Verhalten wie bei PLA festzustellen. Die Kurven aller Proben liegen weitestgehend übereinander und sind teilweise deckungsgleich, was unabhängig von den Extrusionsbedingungen auf unveränderte Materialeigenschaften hindeutet. Dieses Verhalten ist sowohl für das herkömmliche PE, das bioPE und das rPE zu erkennen.

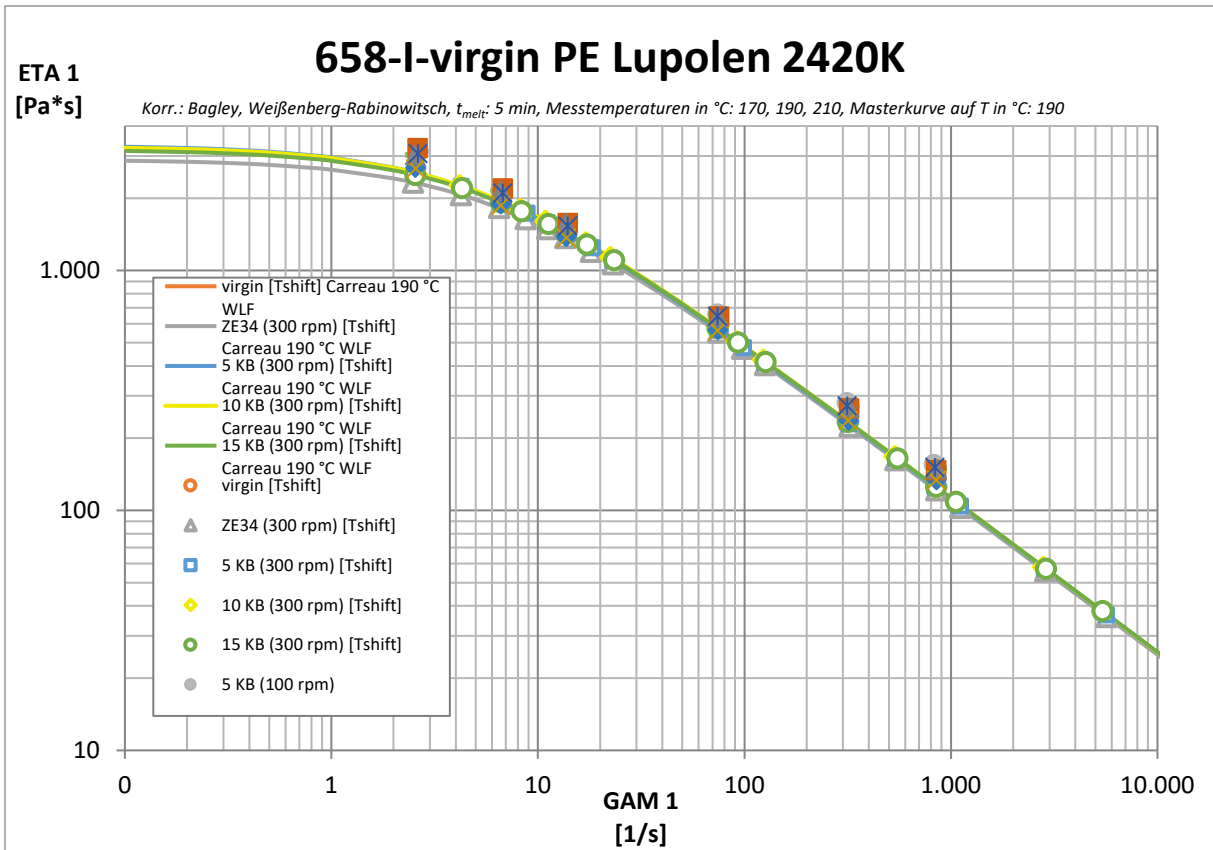


Abbildung 21: Viskositätskurve von PE Lupolen 2420K

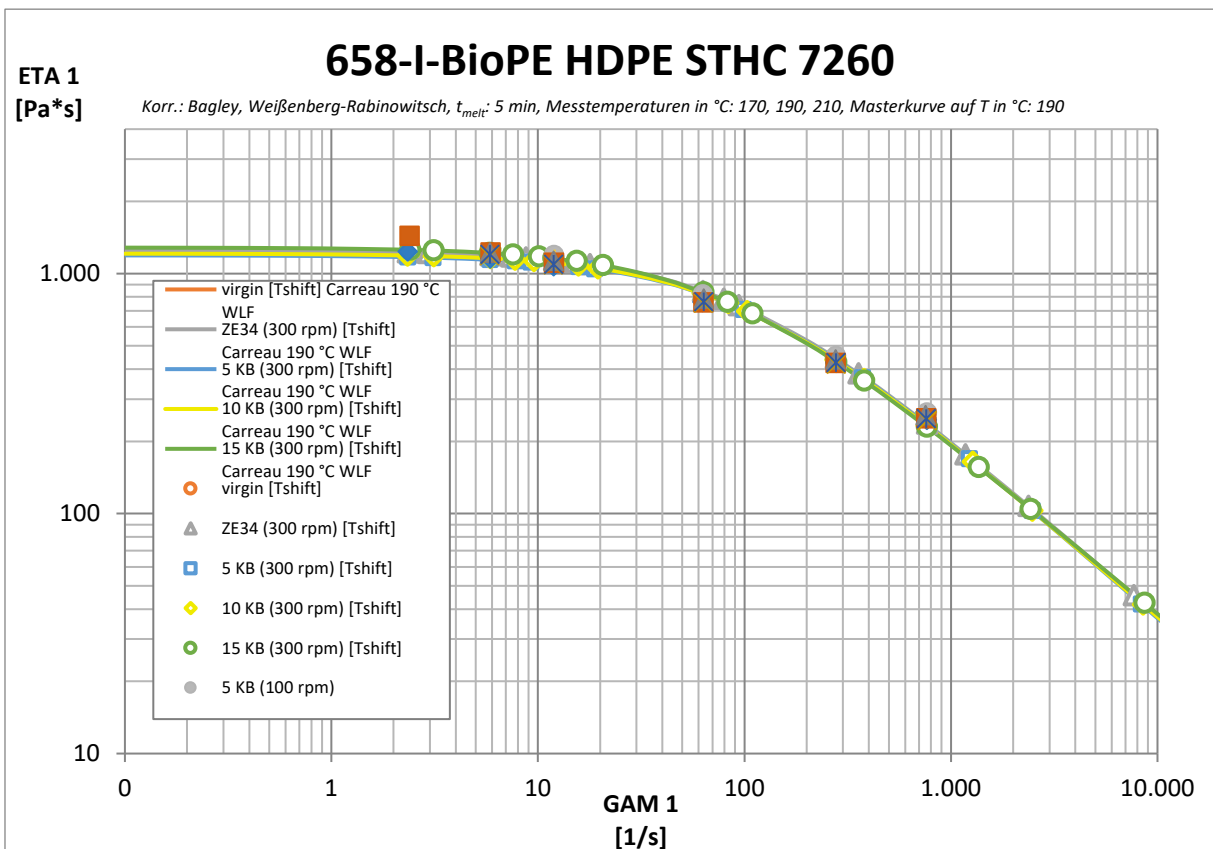


Abbildung 22: Viskositätskurve von BioPE HDPE STHC 7260

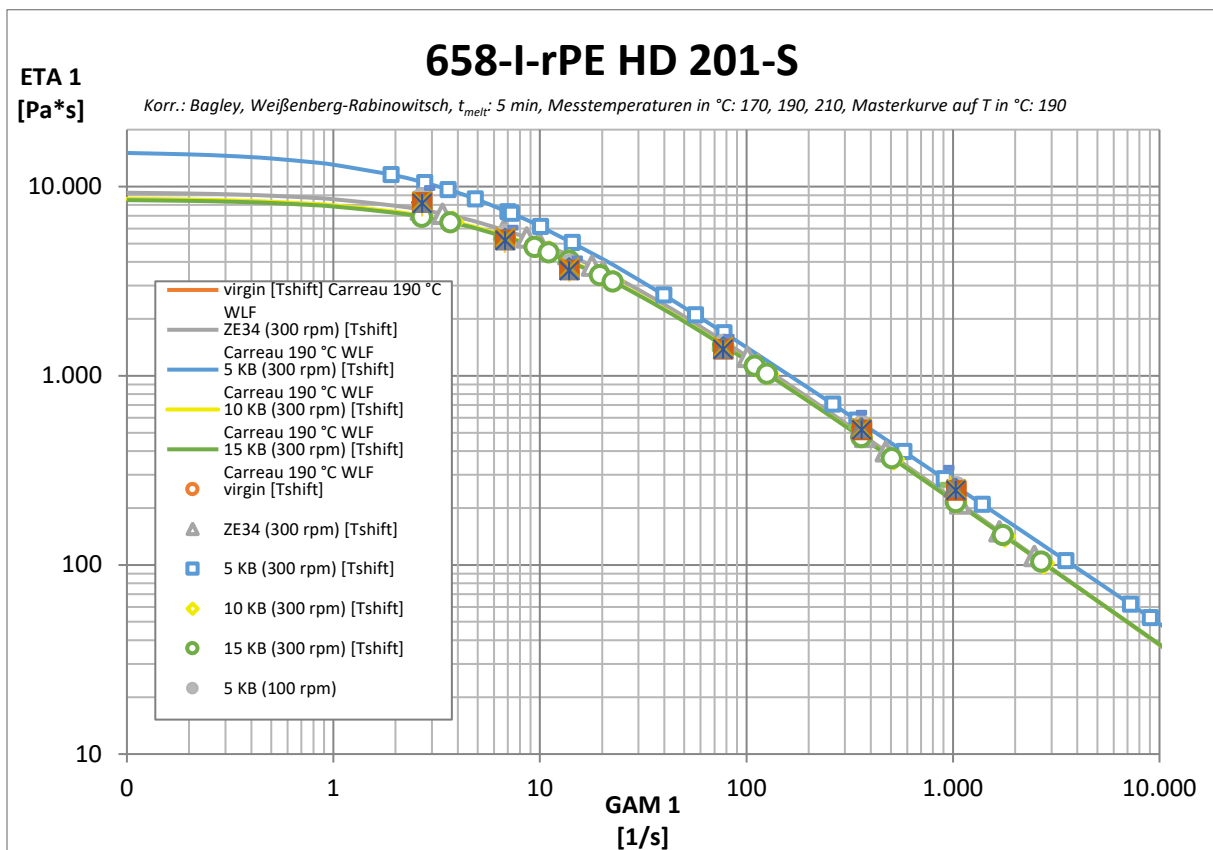


Abbildung 23: Viskositätskurve von rPE HD 201-S

Bei den Ergebnissen der PET-Viskositätsmessung konnte im Vergleich zu PLA und PE ein höherer Einfluss der Extruderdrehzahl auf das Material festgestellt werden. Aufgrund des hohen zeitlichen Aufwands für die Auswertung und Erstellung der graphischen Darstellungen der Viskositätskurven, wurde sich dazu entschieden die Messwerte der PET-Materialien nicht in einem Diagramm zusammenzufassen und grafisch darzustellen. Die Rohdaten der PET- Messungen wurden wie bei allen anderen Daten aller Fließkurven, der MFR-Messungen sowie alle während des Extrusionsprozesses gemessenen Daten (Temperatur, Druck, Drehmoment, Leistung, usw.) vom IfBB für die Modellierung und Simulation der Extrusionsversuche an IANUS weitergegeben.

Arbeitspaket 5: Validierung der Simulationsmodelle und Identifizierung von methodischem Entwicklungsbedarf

AP 5.1 – Validierung der Simulationsmodelle (IANUS)

Zur Validierung der Simulationsmodelle wurde eine erste Simulationsreihe anhand der drei initial durchgeführten Versuchspunkte des IfBB durchgeführt. Hierzu wurden die einzelnen Schneckenelemente gemäß der Prozessbedingungen des IfBB simuliert und entsprechend dem modularen System zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt. Durch dieses Vorgehen wurde es möglich, Simulationszeit einzusparen und somit die verschiedensten Polymere und Schneckenkonfigurationen simulativ untersuchen zu können.

Über das Shiften des Druckniveaus der vollgefüllten Simulation auf den bekannten Gegendruck konnten anschließend die vollgefüllten Bereiche der Schnecke definiert werden, in welchen die Auswertung stattfinden sollte. Auch der vollgefüllte Bereich auf Höhe der Knetelemente konnte über

dieses Vorgehen bestimmt werden. Ein Beispiel für einen Betriebspunkt ist in der folgenden Abbildung 24 dargestellt.

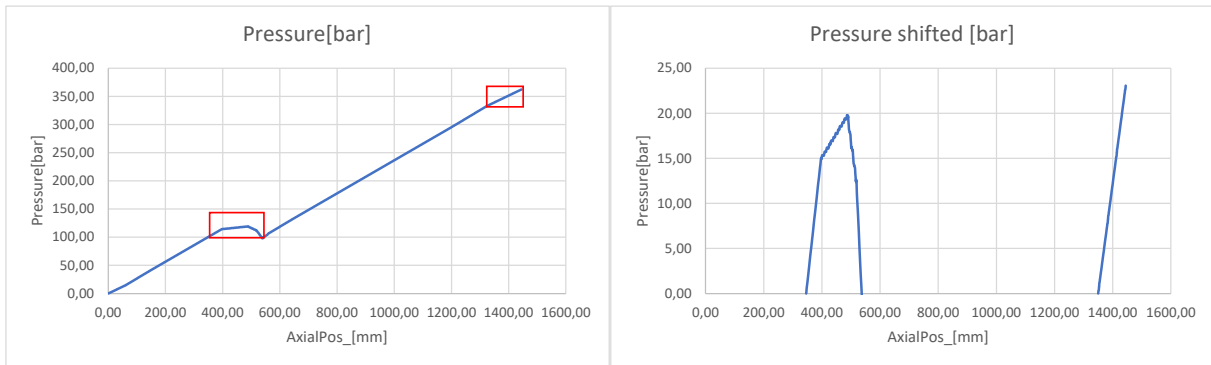


Abbildung 24: Bestimmung der vollgefüllten Bereiche über Pressure-Shift

Durch die Simulation konnten die gemessenen Druckwerte erfolgreich im Rahmen der Messungenauigkeit von Druckaufnehmern abgebildet werden (s. Abbildung 25). Weiterhin zeigt sich, dass der simulierte Energieeintrag in den Kunststoff mit dem Temperaturanstieg einhergeht. Hier lässt sich also eine Korrelation feststellen (s. Abbildung 26).

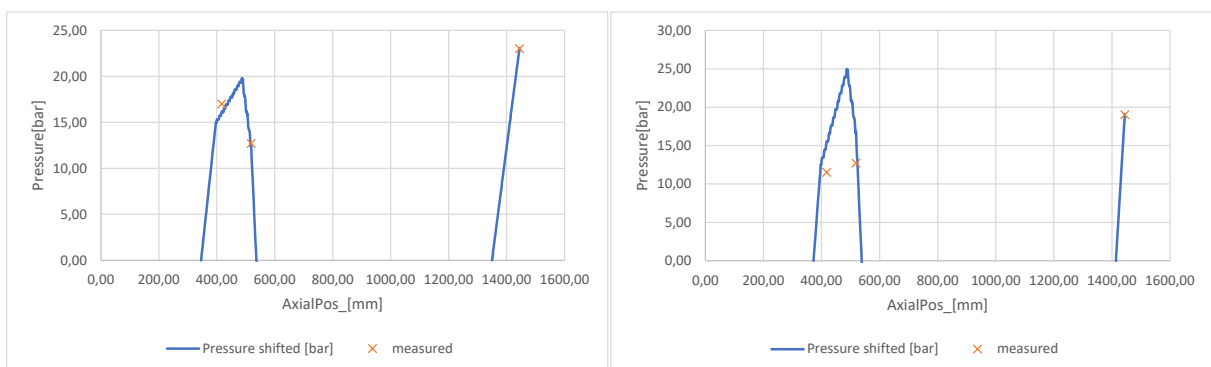


Abbildung 25: Simulierter und gemessener Druck bei 100rpm (links) und 200rpm (rechts)

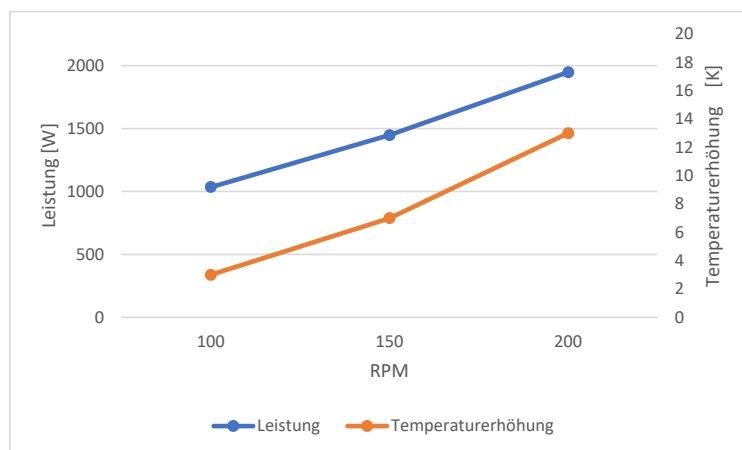


Abbildung 26: Korrelation zwischen simulierter Leistung und gemessener Temperaturerhöhung

Basierend auf den Ergebnissen der durchgeführten Versuche sowie der vorhandenen Expertise im Fachgebiet wurden drei weitere Varianten entwickelt und in Extrusionsversuchen mit PLA getestet (vgl. Abbildung 8). Die Varianten 1 und 2 basieren auf einer identischen Grundauslegung der Schnecken, unterscheiden sich jedoch in den letzten 6 L/D durch eine geringere Gangsteigung bei Variante 2. Diese

Modifikation zeigte in den Simulationsergebnissen keine signifikanten Auswirkungen, wie in Abbildung 27 dargestellt.

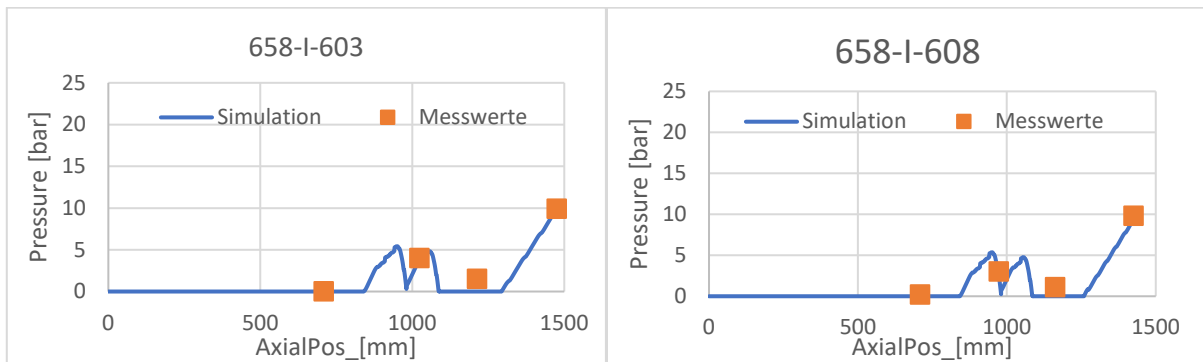


Abbildung 27: Simulierter und gemessener Druck bei 300rpm und 50 kg/h; Links: Variante 1, rechts: Variante 2

Variante 3 weist dieselbe Grundauslegung wie Variante 2 auf, jedoch wurde nach dem letzten Knetblock ein klassisches Fördererelement anstelle eines Rückfördererelements integriert. Diese Änderung hatte einen klaren Einfluss auf die Simulationsergebnisse: Vor der Entgasungszone konnten keine Druckschwankungen festgestellt werden und die Druckwerte an der Schneckenspitze blieben vergleichbar stabil (s. Abbildung 28).

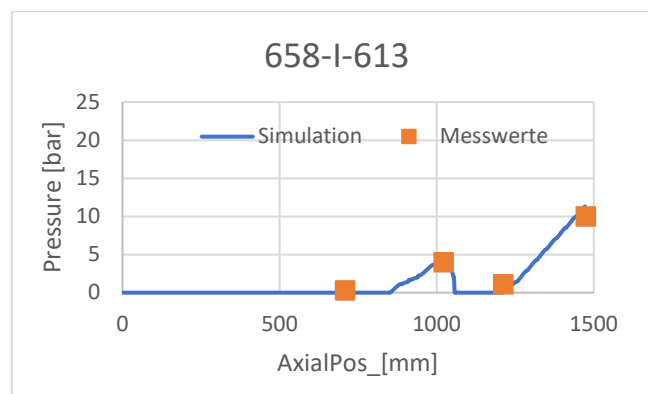


Abbildung 28: Simulierter und gemessener Druck bei 300rpm und 50 kg/h für Variante 3

Insgesamt zeigen die Simulationsergebnisse eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten.

AP 5.2 - Identifizierung von methodischem Entwicklungsbedarf (IANUS)

Mit der segmentweisen Vorgehensweise wurde die Grundlage geschaffen, das Know-how und die Erkenntnisse aus den ersten Simulationsreihen auf neue Materialdaten übertragen zu können. Bei dieser Vorgehensweise mussten lediglich die Materialparameter für die anderen Materialien entsprechend angepasst werden, um deren Eigenschaften in der Simulation korrekt abbilden zu können.

Nach der Anpassung konnte das Verhalten der einzelnen Segmente erneut simuliert werden. Dabei wurden verschiedene Schneckenausführungen berücksichtigt, um die Auswirkungen auf das Material genau zu erfassen. Diese Vorgehensweise ermöglichte es, die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Schneckenausführungen für die Verarbeitung der neuen Materialien zu bewerten.

Der Vergleich der Simulationsdaten mit den experimentellen Daten aus der Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigte dabei eine sehr gute Übereinstimmung, sodass kein weiterer methodischer Entwicklungsbedarf ergeben hat.

Arbeitspaket 6: Optimierung des Extrusionsprozesses in der praktischen Umsetzung

AP 6.1 – Optimierung des Extrusionsprozesses (IfBB)

Für die Optimierung des Extrusionsprozesses wurden die Erkenntnisse aus den Materialanalysen aus AP 4 herangezogen. Für die PE-Typen lässt sich die Aussage treffen, dass alle der in AP 4 getesteten Verarbeitungseinstellungen prinzipiell geeignet sind, da das Material keine „Beschädigung“ im Sinne einer maßgeblichen Erhöhung der Fließfähigkeit aufweist. Für die PET-Typen lässt sich diese Aussage bedingt gleichfalls treffen. Die Materialanalyse zeigt hierbei allerdings eine größere Auswirkung auf höhere Extruderdrehzahlen.

Mit PLA als sehr relevanten Biokunststoff wird in diesem Arbeitspaket eine genauere Untersuchung für die Extrusionsoptimierung im Rahmen einer praktischen Anwendung durchgeführt. Dazu wird erneut der Tandemaufbau der Versuche aus AP 4 verwendet. Dieser ist in Abbildung 29 dargestellt. Untersucht wird in diesen Versuchen wie sich verschiedene Schneckenkonfigurationen im Bereich der Knetzone und der Druckaufbauzone auf das Material auswirken. Diese Schneckenkonfigurationen sind in Abbildung 30 dargestellt. Die verwendeten Kombinationen von Schneckenelementen entsprechen den in der Realität häufig eingesetzten Aufbau. Die Variante 1 legt den Fokus auf eine Knetzone mit mehr Scherwirkung. Variante 2 verwendet eine moderate Knetzone und sorgt dafür in der Druckaufbauzone mit Fördererlementen mit geringer Steigung für mehr Druckaufbau am Extruderkopf. Variante 3 kombiniert die beiden Ansätze der ersten Varianten.

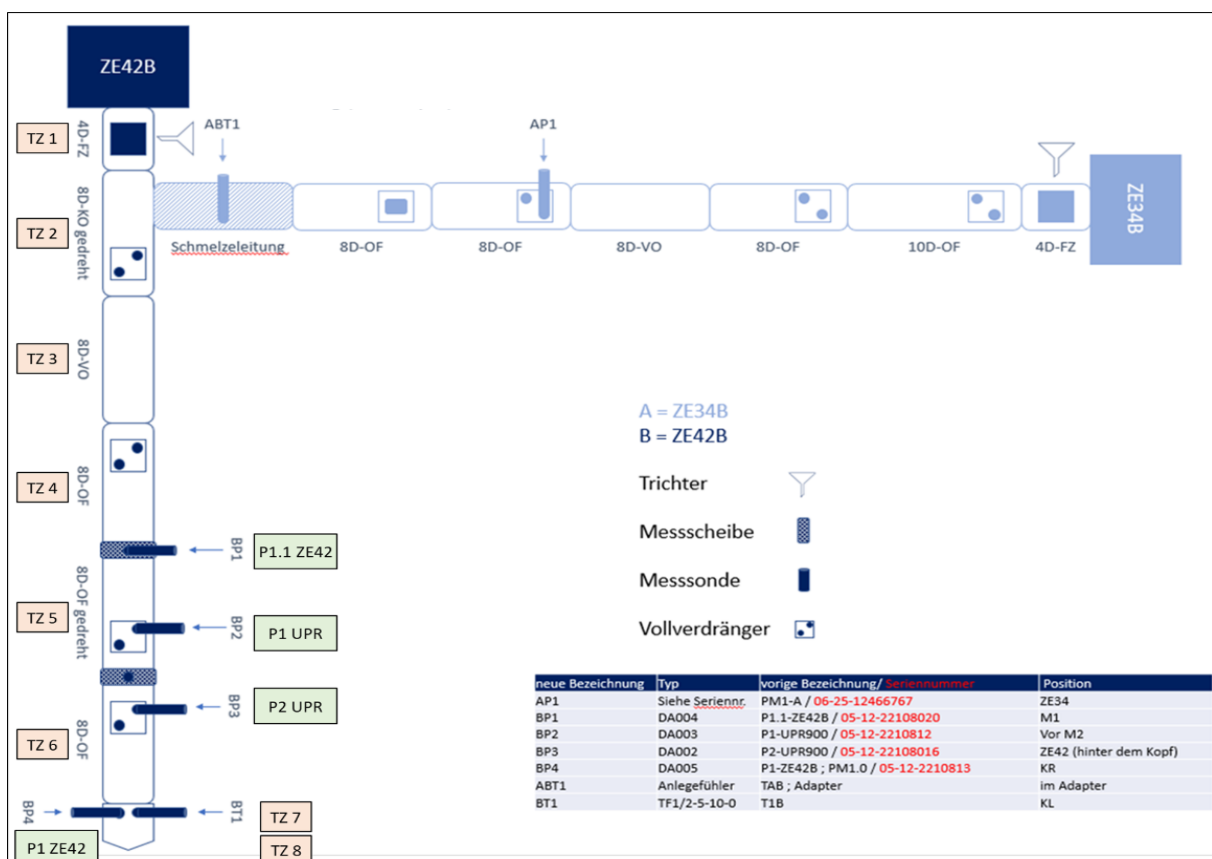


Abbildung 29: Tandemaufbau der Extruder für die Versuche zur Optimierung des Extrusionsprozesses

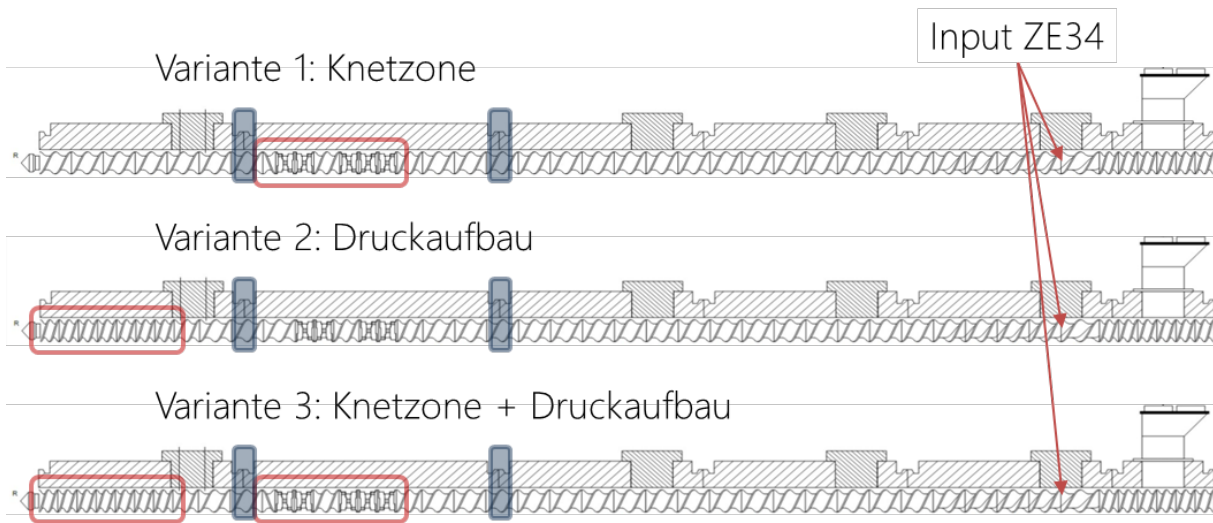


Abbildung 30: Schneckenkonfigurationen für die Optimierungsversuche

Tabelle 19 listet den Versuchsplan für dieses Arbeitspaket auf. Es wurde der PLA Typ Ingeo 3251D verwendet. Für die drei Varianten der Schneckenkonfiguration wurden jeweils drei verschiedene Drehzahlen (100 U/min, 300 U/min und 500 U/min) und drei verschiedene Materialdurchsätze (30 kg/h, 50 kg/h und 70 kg/h) eingestellt. Für alle diese Einstellungen wurden Materialproben genommen. Auch für diese Versuchsreihe wurde erneut die Fließfähigkeit der Materialien als Ansatz zur Beurteilung der Materialschädigung herangezogen und bestimmt. Die MVR-Werte sind ebenfalls in Tabelle 19 aufgeführt.

Tabelle 19: Versuchsplan und Ergebnisse der Fließfähigkeiten für die Optimierungsversuche

| Material | Verwendete Extruderschnecke | Drehzahl [U/min] | Durchsatz [kg/h] | MVR [cm ³ /10 min] @ 190 °C; 2,16 kg | |
|-----------|-----------------------------|------------------|------------------|---|------|
| | | | | x | s |
| PLA 3251D | Variante 1 | 100 | 50 | 44,75 | 1,20 |
| PLA 3251D | Variante 1 | 300 | 30 | 57,77 | 0,29 |
| PLA 3251D | Variante 1 | 300 | 50 | 50,51 | 1,03 |
| PLA 3251D | Variante 1 | 300 | 70 | 46,68 | 0,31 |
| PLA 3251D | Variante 1 | 500 | 50 | 57,03 | 1,09 |
| PLA 3251D | Variante 2 | 100 | 50 | 45,77 | 0,29 |
| PLA 3251D | Variante 2 | 300 | 30 | 54,58 | 0,72 |
| PLA 3251D | Variante 2 | 300 | 50 | 47,72 | 0,33 |
| PLA 3251D | Variante 2 | 300 | 70 | 44,61 | 0,29 |
| PLA 3251D | Variante 2 | 500 | 50 | 53,26 | 0,71 |
| PLA 3251D | Variante 3 | 100 | 50 | 46,20 | 0,23 |
| PLA 3251D | Variante 3 | 300 | 30 | 56,05 | 0,23 |
| PLA 3251D | Variante 3 | 300 | 50 | 49,60 | 2,22 |
| PLA 3251D | Variante 3 | 300 | 70 | 47,49 | 0,45 |
| PLA 3251D | Variante 3 | 500 | 50 | 56,77 | 0,73 |

In der Abbildung 31 und Abbildung 32 werden die Ergebnisse der MVR-Messung bei variabler Drehzahl und konstantem Durchsatz (Abbildung 31) und bei variablem Durchsatz und konstanter Drehzahl (Abbildung 32) dargestellt. Es sind jeweils die drei verschiedenen Schneckenvarianten in einem Diagramm vergleichend gegenübergestellt. Je nach Anwendungsfall eignen sich verschiedene Prozessparameter, um das Material möglichst schonend zu verarbeiten und die Fließfähigkeit gering zu halten. Es ist zu erkennen, dass die Schneckenvariante 2 die Fließfähigkeit des Materials weniger stark erhöht als die anderen beiden Varianten. Dies ist bei nahezu allen Versuchspunkten zu sehen. Die Schneckenvarianten 1 und 3 liegen näher beieinander, wobei allerdings bei niedrigen Durchsätzen die Variante 1 die Fließfähigkeit stärker erhöht.

Auch die Material- und Verarbeitungsdaten dieser Versuchsreihe wurden an IANUS zum Abgleich der Simulation übergeben.

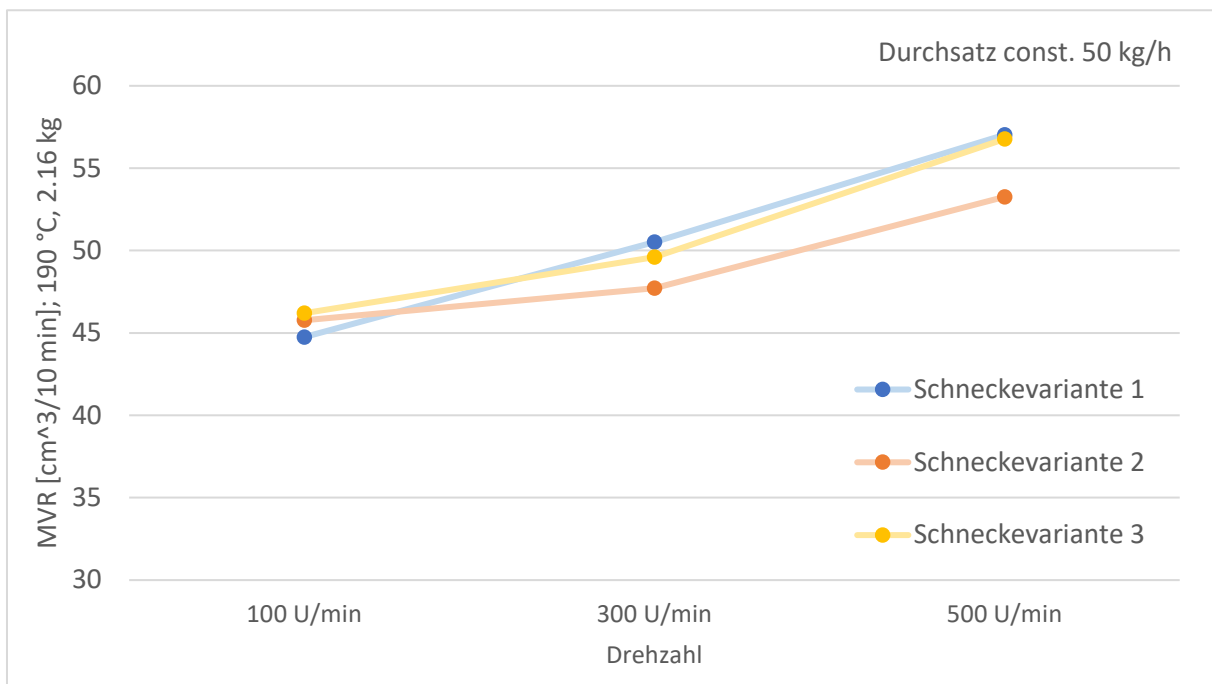


Abbildung 31: Ergebnisse der MVR-Messung bei konstantem Durchsatz

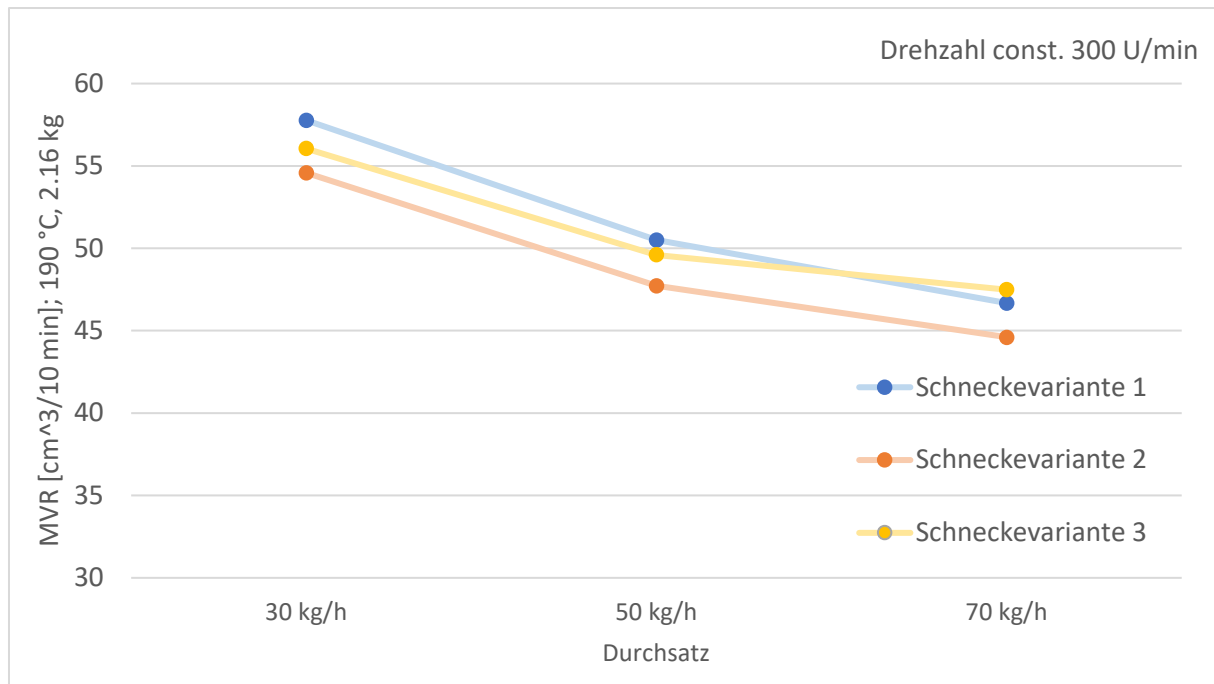


Abbildung 32: Ergebnisse der MVR-Messung bei konstanter Drehzahl

Arbeitspaket 7: Auswertung und Einpflegen der Ergebnisse in Datenbanken

AP 7.1 - Aufbereitung der Werkstoff- und Verarbeitungsdaten und Einarbeitung in Datenbank (IfBB)

Die in AP 4 generierten Material- und Verarbeitungsdaten wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes für die Veröffentlichung in Datenbanken aufbereitet. Zum großen Teil sind diese aufbereiteten Daten bereits innerhalb des AP 4 dargestellt.

Im Projektantrag wurde geplant die Daten in mehreren Datenbanken zu platzieren. Explizit wurden dabei folgende Datenbanken genannt:

Material Data Center <https://www.materialdatacenter.com/mb/>

Datenbank zur Verarbeitung von Biokunststoffen <http://ifbb-knvb.wp.hs-hannover.de/db/>

Des Weiteren ist eine aus dem Projekt DaKeBiKu hervorgegangene und vom IfBB entwickelte Datenbank eine geeignete Stelle zum Platzieren der Daten. Sie ist unter folgendem Link abrufbar: <https://dakebiku.ifbb-hannover.de/home>

Im Rahmen der Verwertung werden nach Projektabschluss laufend weitere Möglichkeiten zum Platzieren und Veröffentlichenden der generierten Daten gesucht.

3. F&E Ergebnisse Dritter

Im Projektverlauf sind keine Ergebnisse und Fortschritte von anderer Stelle bekannt geworden, die im Bereich der Ziele im Projekt ComEx liegen.

4. Verwertungsplan (IANUS)

Schutzrechte

Nach derzeitigem Kenntnisstand wurden im Rahmen des Projekts seitens IANUS keine Schutzrechte Dritter verletzt, die Auswirkungen auf die Verwertung der Projektergebnisse haben würden.

Zusammen mit dem IfBB ist die Anmeldung von Schutzrechten und Patenten zu neuen, innovativen Schneckenelementen und genuteten Zylindern für die Extrusionsverarbeitung geplant.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende werden wie zu Beginn als sehr hoch angesehen. Aus Sicht des Industriepartners IANUS ergeben sich die folgenden Benefits:

- (1) Die Projektergebnisse und die Validierung der Simulationsmodelle führen zu einer **Stärkung des Produktportfolios für Extrusionssimulationen:**
 - (a) Simulation als Software-Produkt/Weiterentwicklung
 - (b) Simulation als Dienstleistung
- (2) Durch die Validierung der Simulationsmodelle und der durchgeführten Prozessoptimierung wird die **Position als Anbieter von Simulationsleistungen in der Extrusionstechnik von Kunststoffen** (Biokunststoffe, Bioverbundwerkstoffe, Kunststoffrezyklate, konventionelle Kunststoffe) **weiter gestärkt.**
- (3) Durch die Weiterentwicklung der CFD-Simulationen werden derzeit **neue Märkte erschlossen**, insbesondere im Bereich Verarbeitung von Biowerkstoffen und Kunststoffrezyklaten.
- (4) Mithilfe der Projektergebnisse und der parametrischen Beschreibung von Materialschwankungen im Bio-Polymerbereich wird zurzeit das **Produktportfolio für Materialcharakterisierungen erweitert.**
- (5) Durch neue Geschäftsfelder und Beratungsleistungen werden **vorhandene Arbeitsplätze gesichert und neue geschaffen.**
- (6) Die **Erarbeitung von Patenten und Schutzrechten** wurde weiter oben bereits erläutert und befindet sich in der Planung.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die wissenschaftlich-technischen Erfolgsaussichten nach Projektende werden wie zu Beginn als sehr hoch angesehen. Aus Sicht des Industriepartners IANUS ergeben sich die folgenden Benefits:

- (1) Durch Neuprogrammierung bzw. Erweiterung der Simulationsmodelle werden **tiefere Erkenntnisse zur Extrusionssimulation von Biokunststoffen und Bioverbundwerkstoffen sowie von Kunststoffrezyklaten im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen** erlangt.
- (2) Durch die Übertragung der Ergebnisse auf neue Simulationsanwendungen ergibt sich die **Möglichkeit zur Erweiterung des Produktportfolios bei der Extrusionssimulation.**
- (3) Durch die Erkenntnisse aus den Simulationen und mithilfe von Realexperimenten bei weiteren Herstellungsverfahren (z. B. Extrusionsblasformen, Folienextrusion) können **weitere Verarbeitungsmethoden in der Extrusionstechnik erschlossen** werden.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase

Das Vorhaben bietet insgesamt großes Potential für die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit in Folgeprojekten. Es ergeben sich drei konkrete Ansatzpunkte, um die Verwertung der Projektergebnisse in eine nächste Phase zu tragen:

- (1) Die Bandbreite an Biopolymeren ist sehr umfangreich und bietet die Möglichkeit durch das Mischen (Blenden) verschiedener Biopolymertypen oder durch die Zugabe von (Natur)-Fasern als Verstärkungskomponente die Eigenschaftsprofile maßschneidern zu können. Durch die **Faserverstärkung** ergeben sich zahlreiche neue Themenfelder, die in Folgeprojekten systematisch angegangen werden könnten. Simulationen bieten hier die ideale Möglichkeit, aussichtsreiche Kandidatenmischungen berechnen zu können. Folgeprojekte sind bereits in Planung.

- (2) Durch Weiterentwicklung der Extrusionstechnik (z. B. Schneckenelemente, Zylinder, Prozessführung) können konkrete **neue Produktentwicklungen auf Basis von Biopolymeren** angestoßen werden. Aus Simulationssicht besteht beispielsweise die Möglichkeit, die bestehenden Modelle weiterzuentwickeln, sodass auch komplexe Materialrezepturen vollaufgelöst simuliert werden können. Auch hier werden zur konkrete Folgeprojekte geplant.
- (3) Die **Entwicklung von entsprechenden KI-Verfahren** basierend auf Deep Machine Learning und evolutionären Algorithmen bietet neue Möglichkeiten, wie Biopolymere effizient und gewinnbringend in der Extrusion eingesetzt werden können. Dies wird als ein langfristiges Ziel angesehen.

5. Verwertungsplan (IfBB)

Schutzrechte

Nach derzeitigem Kenntnisstand sind im Rahmen der Forschungsarbeiten am IfBB keine Erfindungen geplant und es werden keine Schutzrechte tangiert. Nach Abschluss des Projekts wird mit dem Partner IANUS die Anmeldung von Schutzrechten und Patenten zu neuen, innovativen Schneckenelementen und genuteten Zylindern für die Extrusionsverarbeitung angestrebt.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Das im Projekt generierte Fachwissen im Bereich der Extrusion und Extrusionssimulation von Biopolymeren ermöglicht es dem IfBB sowohl durch Consultings als auch durch fachlich tangierende Folgeprojekte weitere Geldmittel für Forschungszwecke zu Akquirieren.

Des Weiteren wird durch die vereinfachte Implementierung von Biopolymeren in bestehende industrielle Herstellungsprozesse eine Steigerung der Anwendung und damit verbundenen Nachfrage nach Biopolymeren erwartet. Die Steigerung der Nachfrage nach Biopolymeren und biobasierten Compounds kann dabei sowohl für Deutschland als Produktionsstandort als auch für das IfBB als Forschungseinrichtung wirtschaftliche Vorteile mit sich bringen.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die während des Projekts gesammelten wissenschaftlichen Erkenntnisse führen zu einer Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit sowohl für das IfBB, als auch für Deutschland als Forschungsstandort im Bereich der Biopolymere.

Das generierte Wissen kann mithilfe von Tagungen, Messen und Veröffentlichungen an Hersteller, Verarbeiter, Anwender und andere Wissenschaftler weitervermittelt werden, um sowohl die wissenschaftliche Adaption der Forschungsergebnisse als auch die technischen Einsatzgebiete von Biopolymeren zu erweitern.

Des Weiteren kann das Projekt durch die direkte Einbindung von Lehrveranstaltungen sowie Projekt- und Abschlussarbeiten zur Weiterbildung von Studenten und Heranbildung zukünftiger Wissenschaftler genutzt werden.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase

Je nach Verfügbarkeit und Entwicklung neuartiger Biopolymere kann sich eine Erweiterung der erzeugten Datensätze durch Folgeprojekte sowohl aus wissenschaftlicher als auch wirtschaftlicher Sicht als vorteilhaft erweisen. Hierbei könnten neben gegebenenfalls neuartigen polymeren auch Compoundierungsversuche mit biobasierten Fasern und Füllstoffen durchgeführt werden.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit anhand der erzielten Ergebnisse Aufschlüsse über Extrusionsprozesse zu erhalten welche die Entwicklung und Untersuchung von Schneckenelementen, Zylindern oder Prozessen mittels Folgeprojekten begünstigen oder sogar erfordern.

6. Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit wurden vom IfBB mehrere Webinare im Rahmen der monatlich veröffentlichten Webinarreihe „Biowerkstoffe im Fokus“ gehalten. Diese sind unter folgendem Link abrufbar.

<https://www.ifbb-hannover.de/de/webinare.html>

Zum Abschluss des Projekts ist innerhalb dieser Webinarreihe eine weitere Veröffentlichung der Ergebnisse geplant.

Die generierten Material- und Verarbeitungsdaten werden innerhalb des AP 7 und in der weiteren Verwertung der Projektergebnisse in Datenbanken veröffentlicht.