

FORSCHUNGSBERICHT

Verbesserte Betriebspunktauslegung durch Simulation des axial-ortsaufgelösten Energieeintrags bei der Verarbeitung von Kunststoffen auf gleichläufigen Doppelschneckenmaschinen

Energieeintrag in Doppelschneckenextrudern

Kilian Dietl, Laura Austermeier, Hatice Malatyali, Johannes Rudloff, Benjamin Baudrit, Thomas Hochrein, Volker Schöppner, Martin Bastian

Danksagung

Das Vorhaben 21056 N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V. (FSKZ) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kurzfassung

Projektziel war es Simulationsbetrachtungen zum Energieeintrag über die Zonen des Doppelschneckenextruders (DSE) voranzubringen. Hierfür sollte ein Messansatz entwickelt und validiert werden, der axial-ortausgelöst das angreifende Drehmoment online ermittelt und zur Simulationsvalidierung genutzt werden kann.

Der Messansatz beruhte auf der Bestimmung der Schneckenverdrehung (Torsion) aufgrund der Drehmomentbelastung. Mittels Sensoren über den Schneckenelementen wurde das Passieren der Schneckenstege zeitlich erfasst. Infolge eines Drehmoments zwischen zwei Sensoren führte dies zur Phasenverschiebung zwischen beiden Messsignale.

Da sich die Verdrehung nicht nur zwischen beiden Sensoren, sondern von der Schnecken-einspannung bis zum Angriffspunkt aufbaut sowie mehrere Drehmomentbelastungen entlang der Schnecke sich überlagern (Superpositionsprinzip), zeigte sich, dass eine eindeutige örtliche Drehmomentbestimmung nicht möglich war. Daher wurden zur Simulationsvalidierung die Zonen abschnittsweise aufgebaut und das Gesamtdrehmoment als Referenz genutzt.

Bei den Versuchen konnten die einzelnen Zonen des DSE offline betrachtet und die Prozessparametereinflüsse auf den Energieeintrag untersucht werden. Für die Feststoffförderung konnte gezeigt werden, dass der Energieeintrag gegenüber den weiteren Zonen vernachlässigbar gering ausfällt. Zudem konnten Erkenntnisse über die asymmetrische Lastverteilung beider Schnecken gewonnen werden.

Für die Schmelzeförderung konnte ein Modell entwickelt werden, welches mittels Schergeschwindigkeit und Viskosität eine Schubkraft an der Elementoberfläche berechnet. Mit Hilfe eines durch geometrische Daten und Füllgradberechnung ermittelten Hebelarms kann diese Kraft zum Drehmoment und spezifischen Energieeintrag weiterberechnet werden. Somit ist es möglich im schmelzeflüssigen Bereich des DSE den Energieeintrag axial-ortsaufgelöst zu berechnen. Mit den experimentellen Daten konnte die Richtigkeit der Simulationsergebnisse nachgewiesen werden.

Abstract

The aim of the project was to investigate the simulation of energy input over the zone areas of a twin screw extruder. For this purpose, it was necessary to develop and validate a measurement approach that determines the applied torque online in an axial location and can also be used for simulation validation.

The measurement approach was based on the determination of the screw twist (torsion) created by the torque load. By using sensors directly above the screw elements, the passing of the screw flights was recorded over time. The torque between the two sensors led to a phase shift between the two measurement signals.

Since the torsion builds up not only between the two sensors, but also from the screw clamping to the point of application, and since several torque loads are superimposed along the screw (superposition principle), it became apparent that a clear local torque determination was not possible. Therefore, for the simulation validation, the zones were built up section by section and the total torque was used as a reference.

During the tests, the individual zones of the twin screw extruder were examined offline and the effects of the process parameter on the energy input were investigated. For solids conveying, it was shown that the energy input is negligible compared to the other zones. In addition, findings were obtained on the asymmetrical load distribution of the two screws.

For melt conveying, a model was developed which uses shear rate and viscosity to calculate a shear force at the element surface. With the aid of a lever arm determined by geometric data and filling degree calculation, this force can be further utilized for the calculation of the torque and the specific energy input. It is thus possible to calculate the energy input with axial spatial resolution in the molten zone of the twin-screw extruder. With the experimental data, the accuracy of the simulation results could be proven.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Projektsteckbrief.....	VI
1 Einleitung.....	8
1.1 Anlass für Forschungsvorhaben.....	8
1.2 Problemstellung	9
1.3 Zielsetzung.....	10
2 Stand der Technik.....	11
2.1 Leistungsberechnungsmodelle.....	11
2.2 Drehmomentmessung	15
3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	18
4 Durchgeführte Arbeiten	21
4.1 Auswahl, Ermittlung und Beschreibung der Materialien	21
4.2 Voruntersuchungen zur Drehmoment-Messsystementwicklung	21
4.3 Drehmoment-Messsystementwicklung.....	26
4.4 Experimentelle Untersuchungen ungefüllter Materialsysteme.....	33
4.5 Experimentelle Untersuchungen gefüllter Materialsysteme.....	47
4.6 Modellierung in der Schmelzeförderung	48
4.7 Modellierung bis zum Ende der ersten vollgefüllten Zone.....	54
4.8 Validierung Simulationsergebnisse mit experimentellen Untersuchungen	55
4.9 Zusammenführung in einem Excel-Berechnungs-Tool.....	56
5 Diskussion der Ergebnisse	57
5.1 Auswahl, Ermittlung und Beschreibung der Materialien	57
5.2 Voruntersuchungen zur Drehmoment-Messsystementwicklung	58
5.3 Drehmoment-Messsystementwicklung.....	67
5.4 Experimentelle Untersuchungen ungefüllter Materialsysteme.....	80
5.5 Experimentelle Untersuchungen gefüllter Materialsysteme.....	124
5.6 Modellierung in der Schmelzeförderung	129
5.7 Modellierung bis zum Ende der ersten vollgefüllten Zone.....	137

5.8	Validierung Simulationsergebnisse mit experimentellen Untersuchungen	142
5.9	Zusammenführung in einem Excel-Berechnungs-Tool	149
6	Zusammenfassung.....	152
7	Literaturverzeichnis.....	154

Abkürzungsverzeichnis

A	Nullviskosität
A_{Boden}	Projizierte Fläche des schmelzebedeckten Kanalbodens
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
A_{Kanal}	Projizierte Fläche des schmelzegefüllten Kanals
AP	Arbeitspaket
a_{th}	Theoretischer Achsabstand
A_{Wand}	Projizierte Fläche der Stege
B	Reziproke Übergangviskosität
b_{max}	Maximale Kanalbreite
C	Fließexponent
DAQ	Datenerfassung (<i>engl. data acquisition</i>)
DMS	Dehnungsmessstreifen
D_s	Schneckenaußendurchmesser
DSE	Doppelschneckenextruder
e_{max}	Stegbreite
f	Messfrequenz
f_{Grad}	Füllgrad
F	Kraft
FE	Förderelement
f_{Steg}	Frequenz des Passierens eines Schneckenstegs
G	Schubmodul
$h(x)$	Kanaltiefe am Ort x
$\bar{h}(x)$	Mittlere Höhe des Kanals im Bereich der Teilfüllung
HKR	Hochdruckkapillarrheometer
h_{max}	Maximale Kanaltiefe

i	Steganzahl eines Schneckenelements
I_P	Polares Flächenträgheitsmoment
KBE	Knetblockelement
kmU	Kleine und mittlere Unternehmen
l	Länge bzw. Abstand
l_M	Längenabstand von Welleneinspannung bis Drehmomentangriffspunkt M
L/D	Längen- zu Durchmesser Verhältnis einer Extruderschnecke
$l_{Element}$	Elementlänge
$\dot{m}$	Massenstrom
M_d	Schneckendrehmoment
M_T	Torsionsdrehmoment
n	(Schnecken-)Drehzahl
OPC	Softwareschnittstelle zum Datenaustausch (<i>engl. Open Platform Communications</i>)
pbA	Projektbegleitender Ausschuss
P_{Diss}	Dissipative Arbeit
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
R	Radius
r_{si}	Innerer Schneckenradius
$r_{si}(x)$	Schneckenradius am Ort x
r_z	Zylinderradius
s_r	Tiefe des Spalts zwischen Zylinder und Schnecke
T	Periodendauer

t	Gangsteigung
TiO_2	Titandioxid
t_z	Zeit
w_{rew}	Reversible Arbeit
$y(t)$	Simulierter Signalverlauf über die Zeit t_z
ZME	Zahnmischelement
Δt	Phasenversatz/Phasendifferenz
Δh	Enthalpiedifferenz
ΔT	Temperaturdifferenz
φ	Verdrehwinkel (Torsion)
φ_{l_M}	Tatsächlicher Verdrehwinkel an der Stelle l_M
φ_s	Gangsteigungswinkel
$\pi_{\dot{m}}$	Dimensionsloser Massedurchsatz
ω	Kreisfrequenz

Projektsteckbrief

Der modulare Aufbau von Doppelschneckenextrudern ermöglicht eine Vielzahl an Schneckenkonfigurationen. Eine zentrale Aufgabe für Maschinenhersteller und Compoundeure ist die Auswahl von geeigneten Anlagenaufbauten und Prozessparameter. Simulationen werden heutzutage als wesentlicher Bestandteil der Entwicklungsprozesse eingesetzt, um die Auslegung der Prozesse zu vereinfachen. Allerdings sind die bisherigen Berechnungen des Energieeintrags fehlerbehaftet: Bei der Leistungsberechnung sind in wissenschaftlichen Untersuchungen Abweichungen zum Experiment von 10-20 % zu verzeichnen, bei komplexeren Schnecken und Rezepturen können Abweichungen von bis zu 50 % auftreten. Daher müssen berechnete Ergebnisse in zeit- und kostenintensiven Verfahren überprüft werden. Produktionsverzögerungen und ein höherer Einsatz von Energie, Material und Zeit sind die Folge.

Problematisch ist weiterhin, dass nur eine integrale Betrachtung des Energieeintrags über die Gesamtschneckenlänge möglich ist, wodurch die Energieeinträge innerhalb der einzelnen Schneckenzonen nicht bekannt sind. Die Kenntnis über die Energieeinträge pro Schneckenelement/-zone würde die Auslegung der Anlagenkonfiguration um ein Vielfaches vereinfachen (d. h. Kosten und Zeit einsparen), da gezielt Elemente/Zonen mit zu hohem oder zu niedrigem Energieeintrag ausgetauscht/modifiziert werden könnten.

Das Forschungsprojekt hatte zum Ziel das Verständnis des axial-ortsaufgelösten Energieeintrags entlang der Schneckenwelle zu erweitern, indem eine Kombination von Messtechnikentwicklung und Prozessmodellierung die Vorhersagegenauigkeit der Berechnungen des Energieeintrages verbessert. Somit sollen sich viele Vorteile für KMU durch den Einsatz geeigneter Simulationsmethoden ergeben: beschleunigte Prozessoptimierung, Reduzierung der Entwicklungszeiten, Voraussage von bisher unberücksichtigten Drehmomentspitzen an den Wellen sowie eine höhere Anlagenverfügbarkeit.

AiF/IGF-Projekt: 21056 N

„Verbesserte Betriebspunktauslegung durch Simulation des axial-ortsaufgelösten Energieeintrags bei der Verarbeitung von Kunststoffen auf gleichläufigen Doppelschneckenmaschinen“

Dauer: 01.08.2020 - 31.01.2023

Unterstützt durch den projektbegleitenden Ausschuss:

- | | |
|------------------------------------|--|
| ▪ ALBIS PLASTIC GmbH | ▪ ALLOD Werkstoff GmbH & Co. KG |
| ▪ ARGUS Additive Plastics GmbH | ▪ ARLANXEO Deutschland GmbH |
| ▪ Avient Colorants Germany GmbH | ▪ C4PP - Consulting for Polymer Processing |
| ▪ Carl Aug. Picard GmbH | ▪ COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH |
| ▪ ColVisTec AG | ▪ Coperion GmbH |
| ▪ Covestro Deutschland AG | ▪ emendo-tec GmbH |
| ▪ Extricom Extrusion GmbH | ▪ FEDDEM GmbH & Co. KG |
| ▪ FOS Messtechnik GmbH | ▪ Gefran Deutschland GmbH |
| ▪ IANUS Simulation GmbH | ▪ KraussMaffei Extrusion GmbH |
| ▪ Leistritz Extrusionstechnik GmbH | ▪ Polymaterials AG |
| ▪ tesa SE | ▪ X-Compound GmbH |

1 Einleitung

1.1 Anlass für Forschungsvorhaben

Fast jedes in der Kunststoffverarbeitung eingesetzte Material durchläuft mindestens einmal eine Schneckenmaschine. Bei der Aufbereitung von Polymeren mit Zusatzstoffen zu Kunststoffcompounds mit definierten Eigenschaften werden meistens Doppelschneckenextruder (DSE) eingesetzt [Bon16]. Die Aufbereitung kann das Füllen von Polymeren, Verstärken, Verteilen von anderen Zusatzstoffen sowie das Blenden umfassen. Die wesentliche Anforderung an einen DSE bei der Kunststoffaufbereitung ist das Erreichen einer optimalen Mischwirkung bei maximalem Durchsatz und minimalem Energieeintrag. Aufgrund des modularen Aufbaus von DSE gibt es eine Vielzahl an möglichen Schneckenkonfigurationen, um diese Anforderungen zu erfüllen. Eine zentrale Herausforderung für Maschinenhersteller und Compoundeure ist deshalb die Auswahl einer geeigneten Schneckenkonfiguration und der Prozessparameter. Diese stehen in Wechselwirkung mit Materialparametern wie der Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Aufschmelzenthalpie, welche die nicht direkt einstellbaren Prozessgrößen wie Massetemperatur, Massedruck, Verweilzeit und Schergeschwindigkeit beeinflussen. Aufgrund dieser komplexen Abhängigkeiten ist die Auslegung von Kunststoffverarbeitungsprozessen mit einem großen Aufwand verbunden. Für die Vielzahl mittelständischer Compoundeure wird es zunehmend schwieriger, bei steigender Rezepturvielfalt den optimalen Prozess bzw. optimale Produktqualität zu erreichen und die zugehörigen Prozessparameter zu identifizieren. Die Prozessentwicklung bei den kleinen und mittleren Unternehmen (kmU) wird durch immer höhere Qualitätsanforderungen in Kombination mit hohen Durchsätzen erschwert, wobei vor allem die Minimierung von Restflüchteanteilen und Polymerschädigungen bei parallel hohen Dispergiergüten unter wirtschaftlichen Aspekten im Vordergrund steht. Bisher erfolgt die Prozessoptimierung in kmU i. d. R. durch zeit- und kostenintensive Trial-and-Error-Versuche, deren Prozessparameter und Anlagenkonfigurationen an Erfahrungswissen angelehnt sind. Alternativ entfällt eine Prozessoptimierung und ein nicht-optimaler Prozess wird beibehalten (hoher Energie- und Ressourcenverbrauch). Um eine rasche und zuverlässige Prozessoptimierung zu ermöglichen und die Auslegung der Prozesse zu vereinfachen, werden heutzutage zunehmend computerunterstützte Verfahren als wesentlicher Bestandteil der Entwicklungsprozesse eingesetzt.

1.2 Problemstellung

Viele Prozessgrößen können durch Softwareprogramme mit guter Übereinstimmung vorhergesagt werden. Allerdings sind die bisherigen Berechnungen des Energieeintrags, welcher Auskunft gibt, ob die eingesetzte Schneckenkonfiguration für die Anwendung geeignet ist, fehlerbehaftet: Bei der Leistungsberechnung sind für übliche Schnecken-geometrien und Materialsysteme Abweichungen zum Experiment von 10-20 % zu verzeichnen [Ans93, Kre04, Alt19]. Bei komplexeren Schnecken und Rezepturen können Abweichungen von bis zu 50 % zwischen Leistungsberechnung und -messung auftreten. Dies führt dazu, dass berechnete Ergebnisse in zeit- und kostenintensiven Verfahren überprüft werden müssen. Verzögerungen in der Produktion und ein höherer Einsatz von Energie, Material und Zeit sind die Folge. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich durch das ungleiche Lastverhältnis zwischen den beiden Schnecken, welches im Worstcase-Szenario einen Schaden am Schneckenbesatz aufgrund von unerkannter dauerhafter Überlast einer der beiden Schneckenwellen verursacht.

Erschwert wird die Überprüfung dadurch, dass der mechanische Energieeintrag, welcher sich über die Drehmomentbelastung der Extruderschnecken und die Scherbelastung auf die Verarbeitungsmaterialien errechnen lässt, bislang ungenau ermittelt werden kann. Die an der Anlage erfasste Drehmomentauslastung wird zumeist nur über die Stromaufnahme aus dem Frequenzumrichter gemittelt bzw. durch die Sicherheitskupplung mechanisch abgeschätzt. In beiden Fällen werden Drehmomentspitzen, welche meistens nur auf einer Schnecke auftreten, nicht identifiziert. Genauere Messungen (d. h. orts aufgelöst) der Drehmomente bzw. des mechanischen Energieeintrages sind derzeit nur mit einem großen experimentellen Aufwand (Umbaumaßnahme an gängigen Extruderaufbauten zur Integration eines Drehmomentmesssystems) realisierbar. Dabei ist bislang nur eine integrale Betrachtung des Energieeintrags über der Gesamtschneckenlänge möglich, sodass die Energieeinträge innerhalb der einzelnen Schneckenzone nicht bekannt sind. Außerdem bleibt das Phänomen der Drehmomentdifferenzen zwischen linker und rechter Schneckenwelle unbeachtet. Eine der beiden Wellen nimmt dabei kontinuierlich mehr Drehmoment auf als ihr Gegenstück. Abgesicherte Kenntnisse über die Energieeinträge pro Schneckenelement/-zone jeder Schnecke würden die Auslegung der Maschinenkonfiguration deutlich vereinfachen (d. h. Kosten und Zeit einsparen), da gezielt Elemente/Zonen mit zu hohem oder zu niedrigem Energieeintrag ausgetauscht/modifiziert

werden könnten (entscheidend für Energie- und Materialeinsparung sowie materialschonendes Compoundieren für empfindliche Materialsysteme).

1.3 Zielsetzung

Das Forschungsprojekt hat zum Ziel das Verständnis des axial-ortsaufgelösten mechanischen Energieeintrags entlang der beiden Schneckenwellen zu erweitern, indem eine Kombination von Messtechnikentwicklung und Prozessmodellierung die Vorhersagegenauigkeit der Berechnungen des Energieeintrages verbessert. Innerhalb der Untersuchungen und Berechnung sollen die Drehmomentdifferenzen zwischen den Schneckenwellen berücksichtigt werden.

Der Zugewinn an Informationen zum mechanischen Energieeintrag verschiedener Schneckenelemente in voll- und teilgefüllten Bereichen und den Drehmomentdifferenzen zwischen den beiden Schneckenwellen soll anwenderfreundlich in einem Excel-Tool der Zielgruppe bereitgestellt werden. Eine Abschätzung der Energieeinträge ist hierdurch ohne umfangreiches Vorwissen möglich. Darüber hinaus stehen die Kunststofftechnik Paderborn und das SKZ als Ansprechpartner für Simulationsdurchführungen komplexer Prozesse mit dem neuen Prozesswissen zur Verfügung.

Folgende Arbeitshypothesen sollten betrachtet werden:

- Die Torsion der Schnecke kann durch geeignete Sensoren an verschiedenen Punkten des Extruders bzw. der beiden Schneckenwellen kontinuierlich erfasst werden.
- Der mechanische Energieeintrag zwischen zwei Sensoren und die Drehmomentdifferenz zwischen den Schneckenwellen kann anhand der Torsion ermittelt werden.
- Eine Unterscheidung zwischen Energieeintrag in der Aufschmelzzone und Energieeintrag in schmelzedominierten Zonen des Extruders ist ein großer Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik. Ob eine feinere Einteilung möglich ist, sollte im Laufe des Projekts geklärt werden.
- Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen können genutzt werden, um die Modellierung des Energieeintrags bei DSE zu verbessern.
- Ein Berechnungsmodell der Drehmomentdifferenzen zwischen den Schneckenwellen wird entwickelt.
- Ein direkter Nutzen für die Wirtschaft und die Industrie wird erzielt.

2 Stand der Technik

2.1 Leistungsberechnungsmodelle

Bislang existieren verschiedene Berechnungsmodelle zur Abschätzung des Leistungseintrags in das auf DSE zu verarbeitende Material. Von Werner wurden sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen zur Leistungsaufnahme von gleichläufigen DSE bei der Verarbeitung von Newtonischen und nicht-Newtonischen Fluiden durchgeführt [Wer76]. Die Analyse beschränkt sich jedoch auf teilgefüllte Förderelemente, die ein praktisches Dichtprofil ausbilden, und auf die Leistungsaufnahme der Kanalströmung. Die dissipierte Leistung der Strömung im Zwickelbereich der Schnecken oder die der Leckströmung über dem Schneckensteg werden vernachlässigt [Lap85]. Von Rauwendaal wird eine andere Methode aufgezeigt, um die Leistungsaufnahme bei teilgefüllten Förderelementen zu berechnen [Rau86]. Es werden Schneckenelemente betrachtet, die miteinander ein praktisches Dichtprofil ausbilden. Nicht nur die Leistungsaufnahme der Kanalströmung, sondern auch der Leistungsverbrauch der Leckströmung über die Schneckenstege wird betrachtet. Das von Rauwendaal genannte Modell gilt allerdings nur für Newtonische Fluide [Rau86, Lap85]. Von Meijer et al. wurden zur Berechnung der Leistungsaufnahme eines DSE Gleichungen für Förderelemente und Rückförderelemente mit rechteckigem Kanalquerschnitt bei der Verarbeitung von Newtonischen Fluiden hergeleitet [MEL86]. Identisch zu den Arbeiten von Rauwendaal werden in diesen Gleichungen sowohl der Leistungsverbrauch der Kanalströmung in z-Richtung als auch die Leistungsaufnahme der Leckströmung über die Schneckenstege berücksichtigt. Vernachlässigt wird auch, wie in den beiden vorab genannten Modellen, die im Zwickelbereich dissipierte Leistung [Lap85]. In Arbeiten von Schuler setzt sich die dissipierte Antriebsleistung für Aufschmelzextruder aus der Energiebilanz des Extruders und des Werkzeugs zusammen [Sch96]. Die Antriebsleistung hängt in erster Linie von der Änderung der spezifischen Energie und in zweiter Linie von dem für den Schmelzeaustrag aufzubauenden Druck ab. Auf Grund der Tatsache, dass die Antriebsleistung gegenüber der Heiz-/Kühlleistung deutlich überwiegt und sich Heiz- und Kühleffekt nahezu aufheben, wird die Annahme getroffen, dass die Antriebsleistung im Wesentlichen durch die Multiplikation von Massestrom und der spezifischen Enthalpieänderung des Materials bestimmt werden kann. Da bei reinen Schmelzeextrudern der hohe Energiebedarf fürs Aufschmelzen entfällt, wird die benötigte Antriebsleistung nur durch die in die Schmelze eingebrachte Scherenergie beeinflusst. Sind die Temperaturen der Schmelze am Extrudereintritt und -

austritt bekannt, kann auch hier die Leistung auf der Grundlage der Energiebilanz bestimmt werden. Für die genaue Berechnung der Antriebsleistung wird die aufgenommene Leistung im Radialspalt und im Schneckenkanal unterschieden. Nach Schuler wird die Antriebsleistung der Schneckenkanäle durch eine Veränderung des Durchsatzes aufgrund einer Teilfüllung kaum beeinflusst [Sch96]. Die Antriebsleistung des Radialspalts ist unabhängig vom Durchsatz. Daraus folgt, dass der Durchsatz generell nur einen geringen Einfluss auf die Antriebsleistung hat. Bei vollgefüllten Schneckenabschnitten kann aufgrund des 100 %-Füllgrads von derselben Annahme ausgegangen werden.

Die Autoren White und Chen sowie Bawiskar unterteilen ihre Betrachtungen in Feststoffförderung, Aufschmelzen, voll- und teilgefüllte Bereiche der Doppelschnecke [WC94, BW97]. Die Leistung wird über das gefüllte Elementvolumen multipliziert mit einer repräsentativen Viskosität und einer quadrierten repräsentativen Schergeschwindigkeit berechnet. Auch bei Vergnes et al. findet die elementweise Betrachtung des Leistungseintrages statt [VVD98]. Beide vormals genannten Berechnungen stellen sich als lückenhaft heraus, da sowohl die Viskosität als auch die Schergeschwindigkeit für viele Elemente nicht bekannt sind. Auch die Berechnung des Elementvolumens ist für Sonderelemente nicht verfügbar. Validiert werden die Berechnungsergebnisse nur für den Gesamtexttruder. In den meisten Forschungsarbeiten wird zum Auswerten des Energieeintrages das Drehmoment des Antriebsmotors verwendet [LHH02, DPV13]. Eine eingehende Berechnung des Leistungseintrages ist in den ersten Jahrzehnten der 2000 Jahre nicht durchgeführt worden, da in diesen Jahren eher die Analyse und Berechnung des Aufschmelzverhaltens auf gleichläufigen DSEs von Interesse war [EBB02, QGT02, GJQ03, ZN06, JW08, Thü08].

Alle bestehenden Berechnungen/Betrachtungen des Leistungseintrages von DSE haben gemeinsam, dass sie nur für das Gesamtsystem validiert worden sind. Ihre Genauigkeit für einzelne Bereiche und die einzelnen Schneckenwellen konnte nicht herausgestellt werden, da ein geeignetes Messsystem fehlte. Ebenso unberücksichtigt bleiben häufig angewendete Sonderelemente.

Die Kunststofftechnik Paderborn entwickelt innerhalb des Gemeinschaftsforschungsprojektes SIGMA (est. 1992) ein Simulationsprogramm für gleichlaufende Doppelschneckenmaschinen. Die Modellierung von Berechnungen verschiedenster Prozessparameter (z. B. Temperatur-, Druck-, Aufschmelzgrad- und Leistungsverlauf) und die Modeller-

weiterung bestehender Ansätze ist gängige Praxis. Dabei werden zumeist analytische Berechnungsansätze aufgestellt und durch Ergebnisse, erzielt in experimentellen Untersuchungen innerhalb der Arbeitsgruppe oder in den beteiligten Industrieunternehmen, validiert.

Die ersten Arbeiten innerhalb der Arbeitsgruppe zum Thema „Energieeintrag Extruderschnecke“ wurden bereits 1983 durchgeführt (theoretische Betrachtungen zum Durchsatz und Leistungsverhalten eines Schmelzeextruders [Net83]). Sowohl die Plastifizieraggregate der Spritzgussmaschinen als auch die Ein- und Doppelschneckenextruder waren seit dieser Zeit Gegenstand der Leistungsuntersuchungen. Ein fundiertes Prozessverständnis wurde aufgebaut, welches für DSE im Programm SIGMA implementiert ist. Die Leistungsberechnung der Doppelschneckenkanalgeometrie geht davon aus, dass die Leistungsaufnahme in der Feststoffförderzone im Vergleich zu den anderen Zonen des DSEs vernachlässigbar gering ist. Dieser Annahme liegt zugrunde, dass nach Melisch und Kretschmer der Feststoff im DSE nicht durch Schleppmechanismen, sondern von der Zwangs- und Archimedes-Förderung dominiert ist [Mel98, Kre04]. Die Berechnung der Leistung beginnt demzufolge erst mit dem Ort des ersten Schmelzewirbels [Mel98]. Die Annahme, dass die Leistungsaufnahme im Feststoffförderbereich vernachlässigbar gering ist, vertreten auch andere Autoren, wie z. B. Rauwendaal [Rau86]. Unumstritten ist allerdings, dass in der Feststoffförderzone ein Leistungseintrag ins Material stattfindet. Eigene Voruntersuchungen, in welchen eine DSE-Feststoffförderung gemessen wurden, ergaben einen Leistungseintrag, der zwischen 2 % und 5 % vom zugehörigen Gesamt-Leistungseintrag lag [Alt19]. Eine Modellierung der dissipierten Leistung in der Einzugszone von Einschneckenextrudern (vergleichbar mit der Feststoffförderzone der Doppelschneckenextruder) wurde in von KTP untersucht und umgesetzt [Dör17, Tri18].

Erste Untersuchungen zu den Drehmomentdifferenzen zwischen den Extruderschnecken zeigten die unterschiedlichen Füllgrade beider Schneckenwellen, visuell und messtechnisch erfasst [Que16]. Zur Bestimmung der Drehmomente der Schnecken des Doppelschneckenextruders wurden Dehnungsmesstreifen triebeseitig an beiden Schnecken appliziert. Darüber konnten die Drehmomente separat ausgelesen und abgeglichen werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurden unterschiedliche Aufschmelzzonen (Knetblöcke mit und ohne abstauendes Rückförderelement) sowie Drehzahl und Durchsatzvariationen durchgeführt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus der Drehmo-

mentmessung bei einem Durchsatz von 15 kg/h Polystyrol (PS 108N von Fa. INEOS Styrolution Europe GmbH) und einer Drehzahl von 200 min^{-1} . In Abbildung 2 wird die entsprechende prozentuale Abweichung der beiden Schneckendrehmomente angegeben.

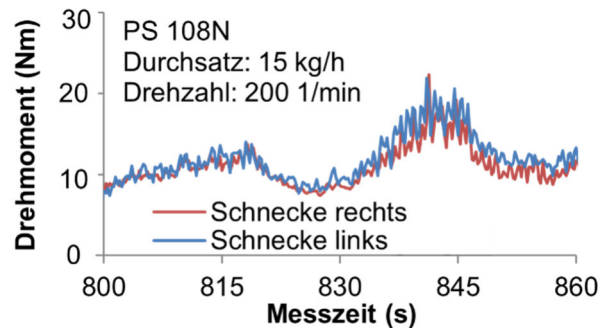


Abbildung 1: Messung der Schneckendrehmomente

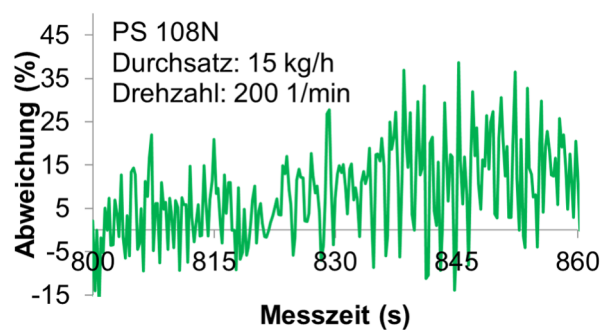


Abbildung 2: Abweichung der Drehmomente von linker zu rechter Schnecke

Es wird deutlich, dass trotz eines stationär eingefahrenen Prozesses die Drehmomentbelastungen auf beiden Schneckenwellen voneinander abweichen. Zudem konnten im Rahmen der Voruntersuchungen die unterschiedlichen Füllgrade je Schneckenwelle in den teilgefüllten Schneckenzone nachgewiesen werden. Abbildung 3 zeigt die Feststoffförder- und Entgasungszone des verwendeten Extruders ZE 25 AX22DUTX mit Ultraglide von Fa. Krauss Maffei Extrusion GmbH.

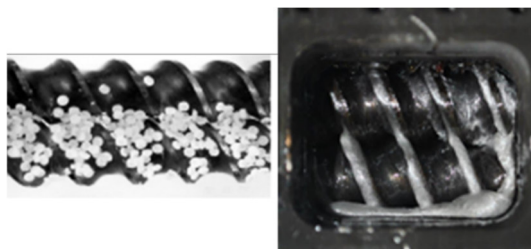


Abbildung 3: Füllgraddifferenzen (links: Feststoffförderzone, rechts: Entgasungszone) Durchsatz: 10 kg/h, Drehzahl: 200 min^{-1}

Im unterschiedlichen Füllgrad der beiden Schneckenwellen ist eine mögliche Ursache der Drehmomentdifferenzen zu sehen. Die genaue Zusammensetzung der Differenzen soll im vorliegenden Forschungsvorhaben untersucht und erörtert werden.

Für die zu erarbeitende Berechnung des Leistungseintrages sollen die Drehmomentdifferenzen der beiden unterschiedlichen Schneckenwellen analysiert und modelliert werden, sodass sie in der Auslegung der Schneckenkonfiguration berücksichtigt werden können. Für das spätere Modell sollte geprüft werden, ob die Feststoffförderzone weiterhin vernachlässigt werden kann, um die Komplexität der Berechnung möglichst gering zu halten oder ob eine zusätzliche Berücksichtigung in Betracht gezogen werden sollte. Für die eigentliche Leistungsberechnung wird eine im Stand der Technik von Melisch aufgeführte Fallunterscheidung zwischen den Elementen durchgeführt. Bei jedem wird entschieden, ob es sich um ein teilgefülltes oder vollgefülltes Element handelt. Entsprechende funktionale Beziehungen liegen vor und werden zu einer gesamten Antriebsleistung kumuliert [Ans93, Mel98]. Die Ergebnisse der Berechnungen sind über Drehmomentmessungen an Laboranlagen validiert worden. Da eine orts aufgelöste Messung der Energieeinträge nicht möglich war, konnte nur die insgesamt berechnete Leistung validiert werden. Auf Basis dieses Forschungsprojekts soll durch die Entwicklung der neuen Messtechnik ermöglicht werden, die einzelnen Berechnungsvorschriften zu überprüfen und zu überarbeiten.

2.2 Drehmomentmessung

Zur Validierung von simulativen Betrachtungen des axial-orts aufgelösten mechanischen Energieeintrags durch die Extruderschnecke ist eine messtechnische Bestimmung der tatsächlich axial-orts aufgelösten Drehmomentbelastung notwendig. Das Drehmoment beschreibt den Widerstand des zu fördernden Materials gegen die Drehbewegung der Schnecke, welches über die Antriebseinheit aufgebracht wird.

Derzeit gängige Drehmomentbestimmungen am Kunststoffextruder finden i. d. R. mittels Berechnung anhand von Daten des Frequenzumrichters der Antriebseinheit statt. Dabei wird die benötigte elektrische Leistung am Frequenzumrichter gemessen und diese in Abhängigkeit der Drehzahl entsprechend der Motorkennlinie zum Drehmoment verrechnet. Im Nenndrehzahlbereich kann dabei eine Genauigkeit von 2,5 %, bezogen auf das Nennmoment erreicht werden, wohingegen ohne Drehgeberrückführung Genauigkeiten von 20-30 % berücksichtigt werden müssen [Koh07].

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Drehmomentbelastung der Schneckenwelle bietet der Einsatz von Dehnungsmessstreifen (DMS). Diese werden in Form von Metalldrähten oder Halbleiterkristallen auf der Welle aufgebracht und verändern entsprechend der Belastung ihre Geometrie und somit ihren elektrischen Widerstand. Zur Erfassung der Torsion an einer Welle kommen dabei i. d. R. vier DMS in einer Wheatstoneschen Brückenschaltung zum Einsatz. Dabei befinden sich die DMS an gegenüberliegenden Seiten der Welle unter $\pm 45^\circ$ zur Schubebene [Hof87]. Bei Torsion der Welle werden die DMS gestreckt bzw. gestaucht, während Biegebelastungen keinen Einfluss auf die Messauswertung aufweisen. Der Messort auf der Extruderschnecke befindet sich z. B. auf dem Kopplungsstück zwischen dem Antriebszapfen des Getriebes und den Nutstellen für die Schneckenelemente. Die Signalübertragung von DMS und Messverstärker auf der rotierenden Welle zur externen Auswerteeinheit findet dabei mittels Telemetrie statt. Dies kann z. B. über ein reibungsbehaftetes Bürstensystem oder ein kontaktloses induktives Hochfrequenzantennensystem realisiert werden. Die Prozessüberwachung mittel DMS-Drehmomentmessung wurde bereits für DSE-Prozesse mit hohem Feuchtigkeitsgehalt im Pharmabereich untersucht [KT10]. Daneben befasste sich das SKZ in einem abgeschlossenen Forschungsvorhaben mit der Energieoptimierung einer Extrusionsanlage. Dabei wurde u. a. erfolgreich ein Messsystem mittels DMS zur Drehmomenterfassung an einer Rohrextrusionsanlage angewendet [LWS16].

Die inverse Magnetostriktion ermöglicht ebenfalls eine kontaktlose Erfassung des Drehmoments an einer rotierenden Welle. Dabei findet eine magnetische Kodierung der Welle durch das Einbringen von mehreren radialen Magnetfeldern statt. Mechanische Spannungen wie z. B. Torsion führen dabei zur Richtungsänderung der eingebrachten Magnetfelder. Die Abhängigkeitsbeziehung zwischen Torsion bzw. Drehmoment und Richtungsänderung der Magnetfelder ist dabei proportional und kann mittels Magnetfeldsensoren erfasst werden [Hec13]. Anwendungsbeispiele für dieses Messverfahren sind u. a. Automobil- und Landwirtschaftsmaschinen sowie E-Bikes, wobei das Verfahren auch an Extrudern möglich ist [FLF14, Fie14, Hec13, NCT18].

Bei Extruderanlagen findet zum derzeitigen Stand die Drehmomentüberwachung hauptsächlich über den Leistungsbedarf der Antriebseinheit statt. Alternativ werden Messungen mittels DMS, Telemetrie oder inverser Magnetostriktion zwischen Motor und Extruderschnecke durchgeführt. Diese Messverfahren ermöglichen lediglich eine Aussage über

das Drehmoment, welches ganzheitlich an der Welle anliegt. Dies ist notwendig und sinnvoll, um einen Überlastschutz für die Antriebseinheit bzw. Extruderschnecke zu ermöglichen, jedoch ist damit keine axial orts aufgelöste Betrachtung des Drehmoments entlang der Welle möglich, siehe Abbildung 4. Diese fehlenden Informationen sind für ein tiefergehendes Verständnis des Compoundierprozesses notwendig, um z. B. Extruderbauteile effektiver auslegen zu können, die Ausstoßleistung und Produktivität des Prozesses zu steigern oder Verschleißerscheinungen genauer prognostizieren zu können.

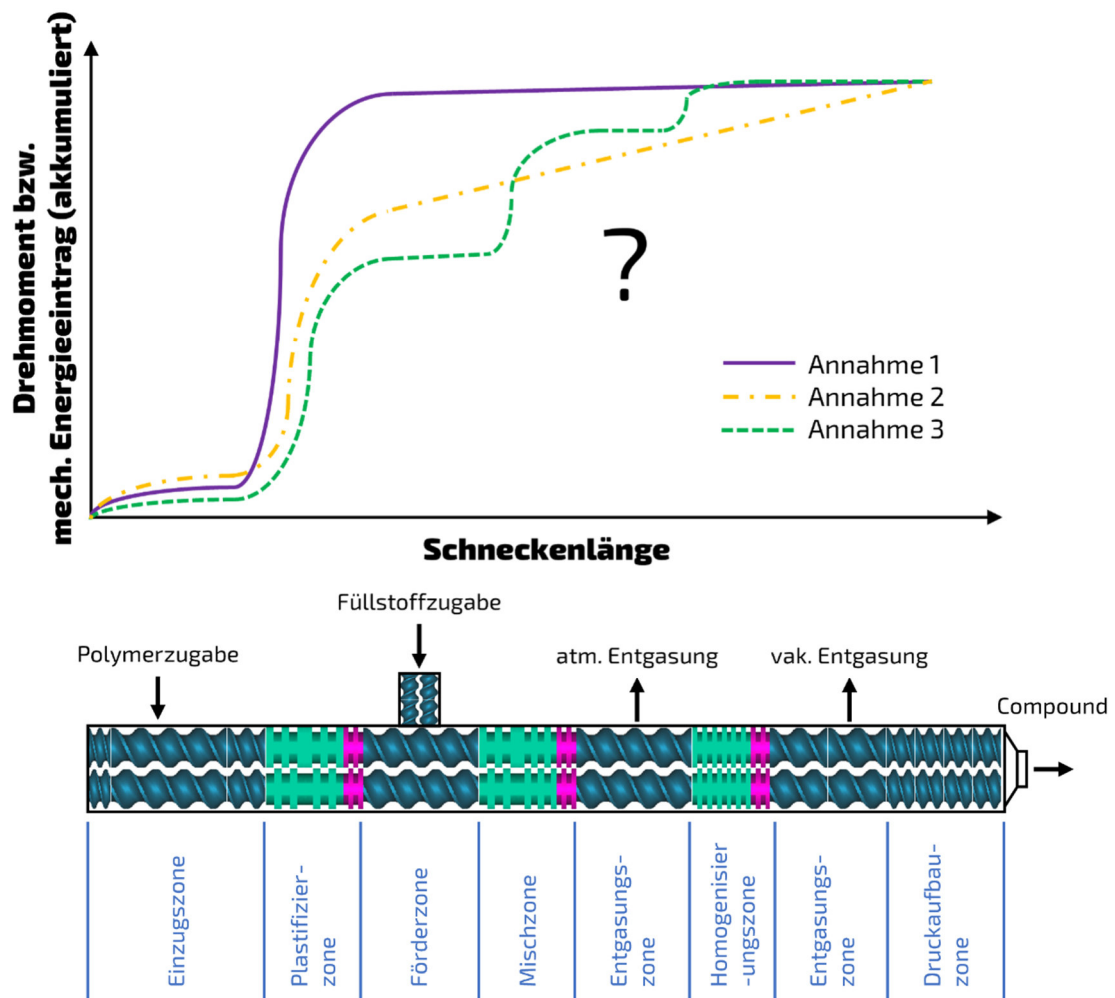


Abbildung 4: Schemadarstellung von möglichen Drehmomentverläufen entlang der Extruderschnecken. Die bisherigen Messverfahren würden nur den integralen Endwert bestimmen. Eine Aussage über das Verfahren entlang der Schnecke wäre nicht möglich. [Schneckenzeichnung nach Koh07]

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Das Ziel des Forschungsprojekts sieht vor, eine neue Messtechnik zu entwickeln, die die Drehmomente zonenweise und für jede Schneckenwelle erfasst. Hierzu soll ein Ansatz zur Bestimmung des angreifenden Drehmoments auf Basis der Beziehung zwischen Torsion bzw. Verdrehwinkel und Drehmoment dienen. Dabei tritt infolge einer Schubspannung oder Scherkraft eine linear-elastische Verformung am Bauteil auf. Diese Abhängigkeit wird bei gleichbleibendem Wellenquerschnitt und dem Schubmodul als Materialkonstante ausgedrückt. Daher kann bei bekannter Torsion der Welle auf das vorherrschende Drehmoment rückgeschlossen werden (siehe Abbildung 5). Zur Ermittlung der Torsion wird zwischen zwei axial unterschiedlichen Stellen an der Welle die Verdrehung bestimmt. Die Verdrehung der Welle bewirkt, dass bei gleicher Drehgeschwindigkeit ein Verdrehwinkel zwischen den beiden Messstellen entsteht. Mit Bestimmung des Verdrehwinkels φ kann auf die Torsion und somit linear auf das Drehmoment M_T geschlossen werden.

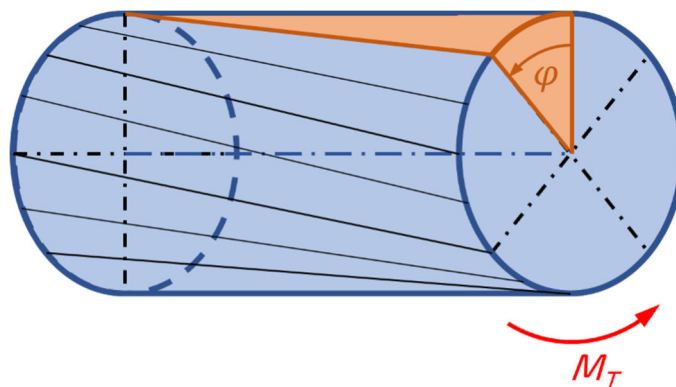


Abbildung 5: Darstellung einer Welle mit angreifendem Drehmoment M_T . Das Drehmoment führt zu einer Torsion der Welle um den Verdrehwinkel φ .

Zur Ermittlung des Verdrehwinkels werden Triggersignale an zwei Messstellen erfasst. Diese geben periodisch, entsprechend der Drehzahl (und somit gleicher Periodendauer), eine Art Messimpuls ab. Sofern zwischen den beiden Messstellen ein Verdrehwinkel auftritt, ergibt sich somit ein zeitlicher Phasenversatz zwischen den Impulsen, wobei die Periodendauer bei beiden Signalen gleichbleibt (siehe Abbildung 6). Infolgedessen kann mittels des zeitlich gemessenen Phasenversatzes (Abbildung 6) auf den Verdrehwinkel bzw. die Torsion und somit das Drehmoment (Abbildung 5) bestimmt werden. Sofern das Drehmoment innerhalb des linear-elastischen Bereichs liegt, kann (unter der Annahme von konstantem Wellenquerschnitt und Materialeigenschaften) von einer linearen Beziehung zwischen Phasenversatz und Drehmoment ausgegangen werden.

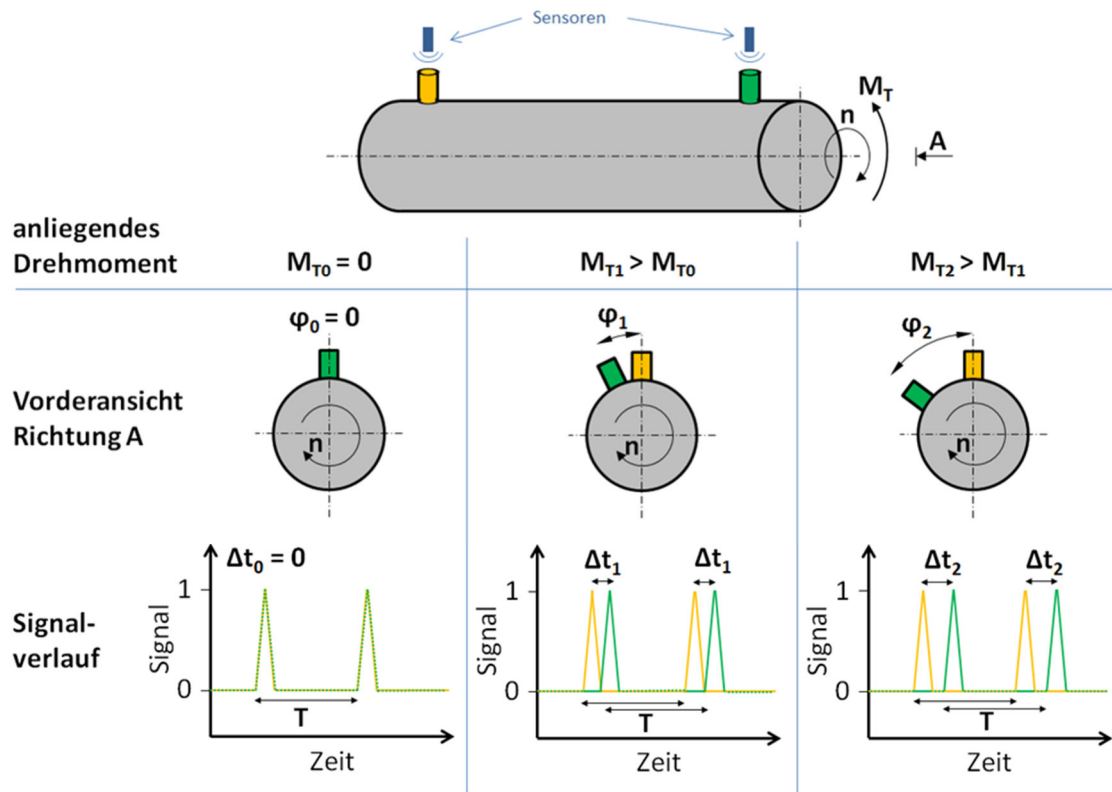


Abbildung 6: Drehmomentbestimmung anhand der Wellentorsion: Auf der Welle sind die beiden Impulsgeber aufgebracht (orange und grün). Diese werden pro Umdrehung jeweils einmal von den Sensoren erfasst. Im unbelasteten Fall M_{T0} werden beide Triggersignale zeitgleich erfasst. Sobald ein Drehmoment M_T am rechten Ende der Welle entgegen der Drehrichtung (Drehzahl n) vorliegt, tritt eine Torsion der Welle auf, sodass der rechte grüne Impulsgeber dem vorderen orangenen um den Verdrehwinkel φ nachfolgt. Die Torsion kann im Signalverlauf der beiden Sensoren mittels des Phasenversatzes Δt erfasst werden. Bei steigendem Drehmoment M_{T2} steigt damit linear auch der Verdrehwinkel φ_2 und somit der Phasenversatz Δt_2 . Die Periodendauer T bleibt dabei entsprechend der Drehzahl n immer konstant.

Die Triggersignale auf einer Welle können dabei auf unterschiedliche Arten erfasst werden. So befinden sich z. B. an den beiden Messstellen auf der Welle Messscheiben mit Lochmustern oder Magnetelementen. Diese werden z. B. mittels Lichtquelle und Photodetektor optoelektronisch [HS79, IW95, RJJ85, RMV89] oder mit magnetischen Sensoren erfasst und ausgewertet [HGS00, PB96, UMJ98]. Weitere Ansätze nutzen eine Codespur, wie z. B. Reflektoren oder Zahnflankenprofile, welche direkt auf der Welle aufgebracht sind. Die Impulserfassung findet dabei ebenfalls mittels optischer [HKH15, HB61, MU15] oder magnetischer Sensoren statt [Duk99, Ger90, Gle01, Lea83, TON93]. Der Einsatz dieser Sensoren im DSE ist aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit nicht möglich. Stattdessen sollen für die Triggersignale die Stege der Schneckenelemente als

Impulsgeber dienen. Entsprechend der Schneckenumfangskontur bestehend aus Schneckenrund und -steg, kann somit in Abhängigkeit der Drehzahl ein periodisches Triggersignal generiert werden. Die Erfassung der Schneckenumfangskontur kann dabei z. B. mittels Druckaufnehmer erfolgen. Beim Passieren des Schneckenstegs unterhalb des Drucksensors steigt aufgrund des geringeren Volumens zwischen Schnecke und Zylinderwand der Massedruck, während beim Passieren des Schneckenrunds die Kunststoffschmelze entspannen kann und der Druck sinkt [MLS95]. Der Nachteil von Druckaufnehmern ist, dass sie nur in den vollständig mit Schmelze gefüllten Schneckenabschnitten die Umfangskontur der Schnecke erfassen können. Alternativ kann z. B. auf kapazitive Näherungssensoren zurückgegriffen werden, welche aufgrund des ferromagnetischen Materials der Schneckenelemente das Passieren der Stege detektieren können. Da die zwei (oder mehr) Sensoren beliebig über der Extruderschnecke positioniert werden können, könnte mit dieser Methode für unterschiedliche Schneckenabschnitte das örtlich einwirkende Drehmoment erfasst werden.

Anschließend sollen bestehende Modellierungen des Leistungseintrages überprüft, erweitert und dabei eine Berechnung der Drehmomentdifferenzen beider Schneckenwellen entwickelt werden.

Zur Erreichung des Forschungsziels werden durch die beiden Kooperationspartner insgesamt 10 Arbeitspakete (AP) bearbeitet. Das SKZ befasst sich mit der Messtechnikentwicklung sowie die KTP mit den Modellierungsarbeiten, siehe Abbildung 7.

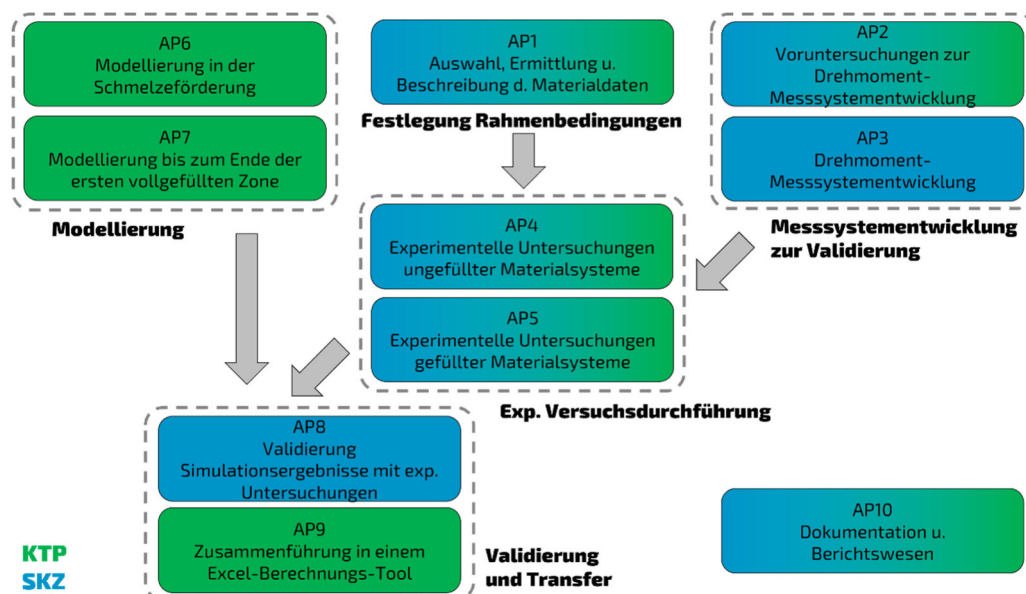


Abbildung 7: Schematische Darstellung der geplanten AP im Forschungsprojekt

4 Durchgeführte Arbeiten

4.1 Auswahl, Ermittlung und Beschreibung der Materialien

In enger Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern und dem projektbegleitenden Ausschuss (pbA) fand die Auswahl der Materialsysteme für die experimentellen Untersuchungen zur Validierung der Simulationsarbeiten statt. Anschließend erfolgten die Materialbeschaffung und -charakterisierung für die Simulationsarbeiten. Um mögliche Chargenschwankungen im gelieferten Material zu berücksichtigen, fanden an beiden Forschungseinrichtungen Viskositätsmessungen an den Materialien statt. Am SKZ kam dabei ein Hochdruckkapillarrheometer (HKR) vom Typ RG20 der Firma GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH (mit Rundkapillaren) sowie am KTP ein HKR vom Typ Rheograph 2002 (mit Schlitzkapillaren) vom selben Hersteller zum Einsatz. Das Polypropylen (PP) wurde in Temperaturbereichen von 200 bis 260 °C bei Scherraten von 1 bis 5.000 s⁻¹ und das Polystyrol (PS) bei Temperaturen von 200 bis 260 °C bei Scherraten von 1 bis 2.000 s⁻¹ charakterisiert. Weiterhin wurde am KTP die spezifische Wärmekapazität beider Materialien bei Temperaturen von 0 bis 320 °C mittels STARE System DSC 3+ von Fa. Mettler Toledo GmbH bestimmt.

4.2 Voruntersuchungen zur Drehmoment-Messsystementwicklung

BLA BLA

Zuerst fand eine Abschätzung der Torsion-Drehmoment-Korrelation der Extruderschnecke mittels theoretischer Herleitung und experimenteller Untersuchung für einen DSE ZSK 26 Mc18 der Fa. Coperion GmbH statt.

Die rechnerische Bestimmung, beruht dabei auf Gleichung 4.1. Hierbei ergibt sich das Drehmoment M_T in Abhängigkeit des Verdrehwinkels φ , dem Schubmodul G (Material-einfluss), polarem Flächenträgheitsmoment I_P (Einfluss durch Geometriequerschnitt) und dem Längenabstand l zwischen den Angriffspunkten.

$$M_T = \varphi \cdot \frac{G \cdot I_P}{l} \quad (4.1)$$

Für das Schubmodul kann als Materialkennwert nach Rücksprache mit Anlagenherstellern aus dem pbA ein Richtwert von 81 GPa angenommen werden. Der Längenabstand konnte bei der Berechnung entsprechend dem zu betrachtenden Wellenabschnitt gewählt werden. Für die komplette Schneckenwelle kann dabei in Annäherung eine Länge von

1,144 m angenommen werden. Dies entspricht einem Längen- zu Durchmesser Verhältnis (L/D) der Extruderschnecke von 44 und somit der Standardlänge der ZSK 26 Extruderschnecke. Beim Flächenträgheitsmodell wurde zur Vereinfachung von einem runden Vollstab ausgegangen, womit sich das polare Flächenträgheitsmoment, wie in Gleichung 4.2, entsprechend dem Radius R , aufgeführt ergibt.

$$I_p = \frac{1}{2} \cdot R^4 \cdot \pi \quad (4.2)$$

Als Radius wurde dabei der Kernwellenradius ohne Verzahnung gewählt. Die Vereinfachung hierbei beruht auf der Annahme, dass aufgrund der üblicherweise geringen Verspannung der Schneckenspitze (ca. 5 Nm) keine erhebliche Kraft- bzw. Spannungsübertrag zwischen den Schneckenelementen stattfindet, sondern die Belastung über die jeweiligen Schneckenelemente auf die Kernwelle übertragen werden und von dieser die Torsionsbelastung aufgenommen wird. Für die Kernwelle einer ZSK 26 Mc18 (Fa. Coperion GmbH) ergab sich somit ein Radius von 6 mm.

Im Zuge der vereinfachten Annahmen (axial betrachtete konstante, runde Querschnittsfläche sowie Materialeigenschaften, Vernachlässigung der Schneckenelemente/Elementtypen), kann von einem linearen Zusammenhang zwischen Verdrehwinkel und Drehmoment ausgegangen werden. Darauf aufbauend konnte für unterschiedliche Längenabständen die Korrelation zwischen Verdrehwinkel und Drehmoment berechnet werden.

Diese Betrachtungen sind jedoch nur im linear-elastischen Belastungsbereich des Materials möglich (vgl. Hookesches Gesetz). Bei einer höheren Belastung, über die Streckgrenze hinaus, erfolgt eine irreversible Verformung der Extruderschnecke, welche einen sofortigen Maschinenschaden verursachen würde bzw. i. d. R. durch Sicherheitsvorkehrungen am Extruder vorzeitig verhindert wird und deswegen an dieser Stelle nicht berücksichtigt wird.

Neben der theoretischen Herleitung fanden auch experimentelle Untersuchungen statt. Dafür wurde ein entsprechender Versuchsaufbau umgesetzt, der die Einspannung und manuelle Belastung der Extruderschnecke einer ZSK 26 ermöglicht (vgl. Abbildung 8). Ein Schneckenelement wurde dafür so abgefräst, dass mittels eines Drehmomentschlüssels ein definiert vorgegebenes Drehmoment auf die Schneckenwelle aufgebracht werden kann. Um ein ungewolltes Biegemoment auf die Schnecke zu verhindern, wurden die Extrudergehäuse zur Führung der Welle genutzt. Zur Vermeidung von Schäden, insbe-

sondere an der empfindlichen Wellenverzahnung, wurde eine entsprechende Klemmvorrichtung aus Aluminiumplatten konstruiert und gefertigt. Zur Erfassung des Verdrehwinkels wurden ein Zeigerelement sowie eine Messscheibe gefertigt. Die Messscheibe wurde hinsichtlich des Mittelpunkts der Skalenanzeige (in $2,5^\circ$ -Schritten) sowie der Positionierung der Passstifte genau auf die Klemmvorrichtung und Extrudergehäuse abgestimmt. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen, fand der Zuschnitt der Platten mittels einer Wasserstrahlschneidanlage statt.

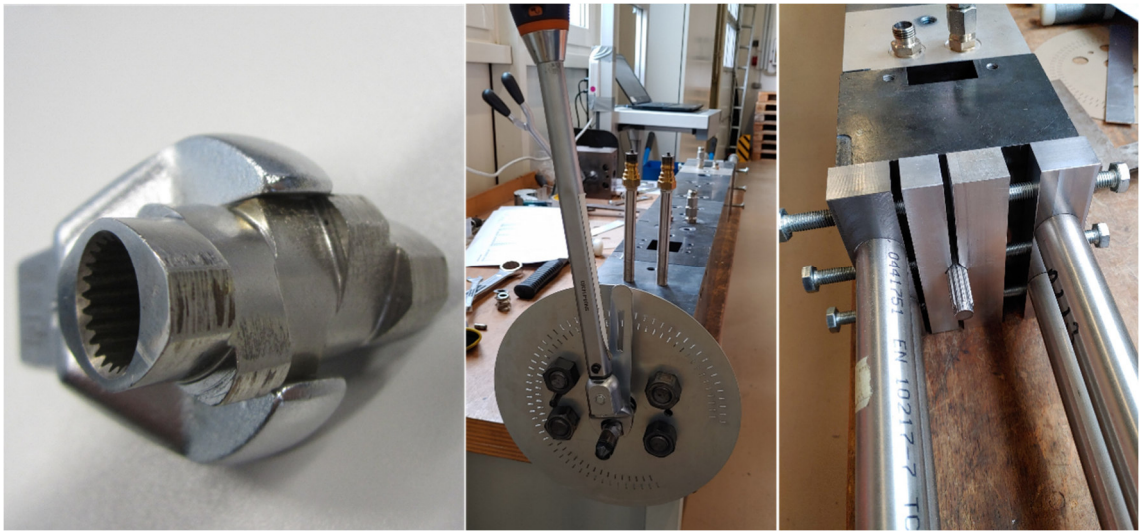


Abbildung 8: Angepasstes Schneckenelement zum Ansetzen des Drehmomentschlüssels (links), Messzeiger und -scheibe zum Ablesen des Verdrehwinkels (Mitte) und Einspannvorrichtung zur schadensfreien Fixierung der Kernwelle (rechts)

Zur Versuchsdurchführung wurde die Kernwelle mit unterschiedlichen Schneckenkonfigurationen bestückt. Dabei wurden verschiedene Schneckenelementtypen wie (ein und zweigängige) Förderelemente (FE, mit und ohne Schubkante) mit unterschiedlicher Steigung und Länge, Zahnmischelemente (ZME) und verschiedene Knetblöcke (KBE) genutzt (siehe Abbildung 9). Es kamen sowohl Schneckenelemente mit und ohne modifizierter Verschleißschuttoberfläche zum Einsatz. Hierbei soll die Annahme geprüft werden, ob die verschiedenen Schneckenelemente (trotz unterschiedlicher Außengeometrie) keinen nennenswerten Einfluss auf die Drehmoment-Torsions-Beziehung aufweisen.

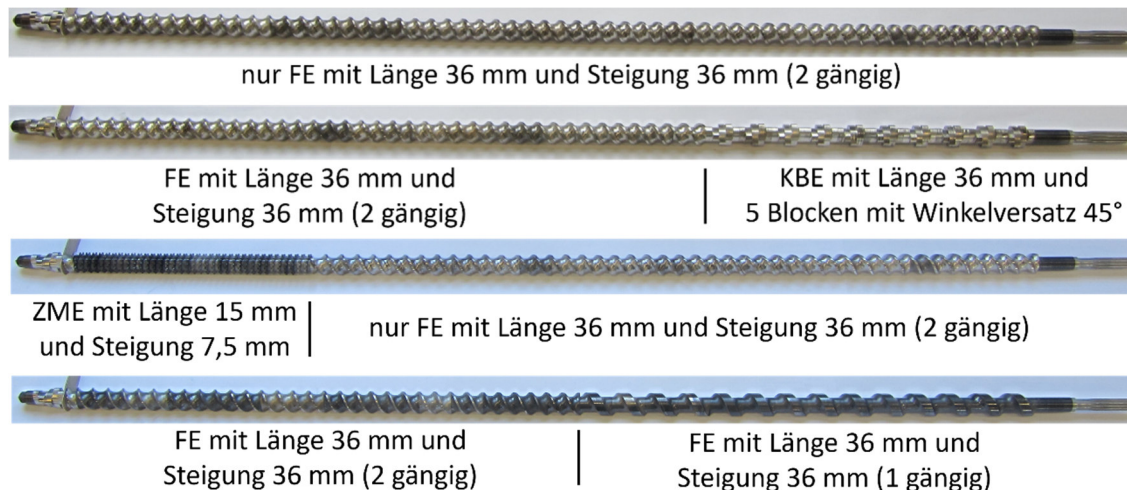


Abbildung 9: Beispiele von untersuchten Schneckenkonfigurationen mit Fördererelementen (FE), Knetblocken (KME) und Zahnmischelementen (ZME)

Bei den Versuchen wurde sowohl das aufgebrachte Drehmoment (20 - 60 Nm) sowie der Längenabstand zwischen der Drehmomenteinleitung und Klemmvorrichtung (nahezu komplette Schneckenlänge sowie Abstand bis zur Aufschmelzzone) variiert und der sich ergebende Verdrehwinkel protokolliert. Um eine Messverfälschung infolge vom Durchrutschen der eingespannten Kernwelle zu verhindern, wurde die Position vor der Belastung markiert und die Position nach der Belastung kontrolliert. Nach Rücksprache mit Mitgliedern des pbA wurde auf die Untersuchung mit Kernwellen von anderen Anlagentypen der gleichen Baugröße verzichtet, da seitens des Materialeinflusses (Schubmodul) keine nennenswerten Änderungen zu erwarten sind (vgl. Erläuterung zu Gleichung 4.1). Nach Abschluss der theoretischen Betrachtung und Abgleich mit den manuellen experimentellen Versuchen, konnte die grobe Korrelation zwischen Drehmoment und Verdrehwinkel für die Extruderschnecke der ZSK 26 abgeschätzt werden. Hierauf aufbauend, war es möglich die erforderliche zeitliche Messauflösung theoretisch zu ermitteln, welche zur messtechnischen Erfassung des Verdrehwinkels infolge des auftretenden Drehmoments notwendig ist.

Wie bereits in Abschnitt 3 vorgestellt, soll die Bestimmung des Drehmoments bzw. Verdrehwinkels anhand der Bestimmung der Phasenverschiebung zwischen zwei gemessenen Schneckenumfangskonturfunktionen erfolgen. Als Triggergeber sollen dabei markante Änderungen im Signalverlauf dienen. Hierzu soll die Signaländerung infolge des Passierens vom Schneckensteg genutzt werden. Für die zeitliche Messauflösung reicht es dabei aber nicht aus, nur das Passieren des Stags zu erkennen, sondern es muss die Phasenverschiebung zwischen den zwei Signalen, infolge der Verdrehung, erfasst werden.

Die erforderliche zeitliche Messauflösung (Abtastrate bzw. Messfrequenz) kann mittels Gleichung 4.3 bestimmt werden. Hierbei ergibt sich die Messfrequenz f als Kehrwert der Phasendifferenz Δt unter Berücksichtigung von Verdrehwinkel φ und Schneckendrehzahl n .

$$f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{\varphi \cdot \frac{1}{n}} \quad (4.3)$$

Somit kann mittels Gleichung 4.1 und 4.3 die sich ergebende Phasendifferenz bzw. Messfrequenz entsprechend des angreifenden Drehmoments und der vorliegenden Schneckendrehzahl berechnet werden. Dies ermöglicht die erforderliche Abtastrate abzuschätzen und so die zu nutzenden Messkomponenten genauer auszulegen.

Da parallel die Arbeiten von AP3, mit dem Aufbau des Messsystems, stattfanden, erfolgten weiterhin Untersuchungen zu den unterschiedlichen Sensorkonzepten zur Erfassung der Schneckenumfangskonturfunktion. Hierzu wurden Messungen mit den verschiedenen Sensorkonzepten im schmelzegefüllten Bereich direkt über einem FE im Extruder durchgeführt. Als Sensorkonzepte wurden nach Rücksprache mit dem pbA der Massedruck, die Massetemperatur sowie die elektrische Kapazität (Erkennen des metallischen Schneckenstegs) gewählt. Für den Massedruck (IMPACT-Sensoren der Fa. Gefran Deutschland GmbH) sowie Massetemperatur (IR-THERM der Fa. FOS Messtechnik GmbH) konnte bereits auf vorhandene Sensoren zurückgegriffen werden. Da bisher kein standardmäßiger kapazitiver Messsensor für den Einsatz im Extruder am Markt vorhanden war, fand hier eine enge Zusammenarbeit mit dem Hersteller der Fa. WayCon GmbH hinsichtlich der genauen Sensorausgestaltung zur Adaption des Sensors in den Extruder statt. Dies betraf hauptsächlich die Fixierung des Sensors im Gehäuse und die dabei erforderliche Gewährleistung der Dichtheit gegenüber den hohen Schmelzedrücken (Mindestanforderung von 250 °C und 250 bar, höhere Bedingungen konnten aus technischen Gründen am Sensor nicht realisiert werden). In Abbildung 10 sind alle Sensoren abgebildet.



Abbildung 10: Abbildung der genutzten Sensortypen, sowie deren Sensortspitze (rechts): Masse-drucksensor (oben), Massetemperatursensor (Mitte), kapazitiver Sensor (unten)

Abschließend fand eine Auswertung der aufgezeichneten Sensormesssignale statt. Hierbei wurde insbesondere die Signalform betrachtet. Um die Signalverläufe der Schneckenbewegung zuordnen zu können fand dabei auch eine Betrachtung des Frequenzspektrums mittels Fast Fourier Transformation (FFT) sowie eine Bandpassfilterung statt. Die Filterung ist entsprechend der Frequenzanteile f_{Steg} , welche sich aus der Schneckendrehzahl n und der Steganzahl i des Schneckenelements ergeben (vgl. Gleichung 4.4).

$$f_{Steg} = n \cdot i \quad (4.4)$$

Hieraus ableitend, wurde eine Wahl der zu verwendenden Sensorkonzepte für die Drehmoment-Messsystementwicklung getroffen.

Weiterhin fand die Inbetriebnahme des am KTP vorhandene Magnetostriktion-Messsystem des Typs 600376-ATS001 der Fa. NCTE AG für die Drehmomentmessung statt. Ebenso erfolgte im engen Austausch der beiden Forschungseinrichtungen und auf Basis der Ergebnisse der parallelen Arbeiten aus Abschnitt 4.3, eine Auslegung und Fertigung von Einsätzen für die Entgasungsöffnung des am KTP zu verwendenden Extruders ZE 28 Blue Power von KraussMaffei Extrusion GmbH, mit deren Hilfe die Sensorsysteme am Extruder über der Schnecke eindeutig positioniert werden können.

4.3 Drehmoment-Messsystementwicklung

Auf Basis der vorherigen Ergebnisse (Abtastrate, Sensorkonzept etc.) fanden experimentelle Untersuchungen zur Drehmoment-Messsystementwicklung statt. Hierzu erfolgte zuerst der Verfahrensaufbau inklusive Messsysteme (hardware- und softwareseitig). Da die Evaluierung der Sensorkonzepte (vgl. Abschnitt 4.2) erst nach dem Versuchsaufbau erfolgen konnte, wurden beim Aufbau auf eine größtmögliche Flexibilität hinsichtlich der

nutzbaren Sensortypen geachtet. Hardwareseitig fand beim Messsystemaufbau die Verknüpfung aller Sensoren, Messverstärker, DAQ-Einheit (*engl. data acquisition*, Datenerfassung) und Rechner statt. Hierfür wurden Anschlussboxen, inklusive Spannungsversorgung, ausgelegt und gefertigt, um mehrere unterschiedliche Sensoren plug and play-mäßig direkt an der DAQ-Einheit anschließen zu können. Als DAQ-Einheit wurde das Modell cRIO-9040 mit der Steckkarte NI 9215 sowie das OPC-Softwaremodul (*engl. Open Platform Communications*, Softwareschnittstelle zum Datenaustausch) von der Fa. National Instruments Germany GmbH beschafft und genutzt. Die DAQ-Einheit ermöglicht, dass die Messdaten direkt auf der Einheit zwischengespeichert werden und anschließend als Datenpakete an den Rechner übergeben werden. Dieses Vorgehen garantiert die Realisierung der erforderlichen hohen Abtastrate von 1 kHz und die Datenarchivierung mit einem korrekten Zeitstempel sowie der konstanten Zeitdifferenz zwischen den Messpunkten (andernfalls ist eine nachfolgende zeitliche Zuordnung des Signalverlaufs fehlerbehaftet und für eine Auswertung unbrauchbar). Softwareseitig erfolgte die Umsetzung eines Programms, auf Basis von LabVIEW (Fa. National Instruments Corp.) zur Datenaufbereitung und -aufzeichnung. Hier wurde das Programm so ausgelegt, dass alle Sensortypen genutzt werden konnten.

Um eine größtmögliche Übereinstimmung mit den vorherigen Abschätzungen aus Abschnitt 4.2 zu gewährleisten, wurde für den Versuchsaufbau am SKZ als gleichläufiger DSE die ZSK 26 Mc18 (Fa. Coperion GmbH) genutzt, siehe Abbildung 11.

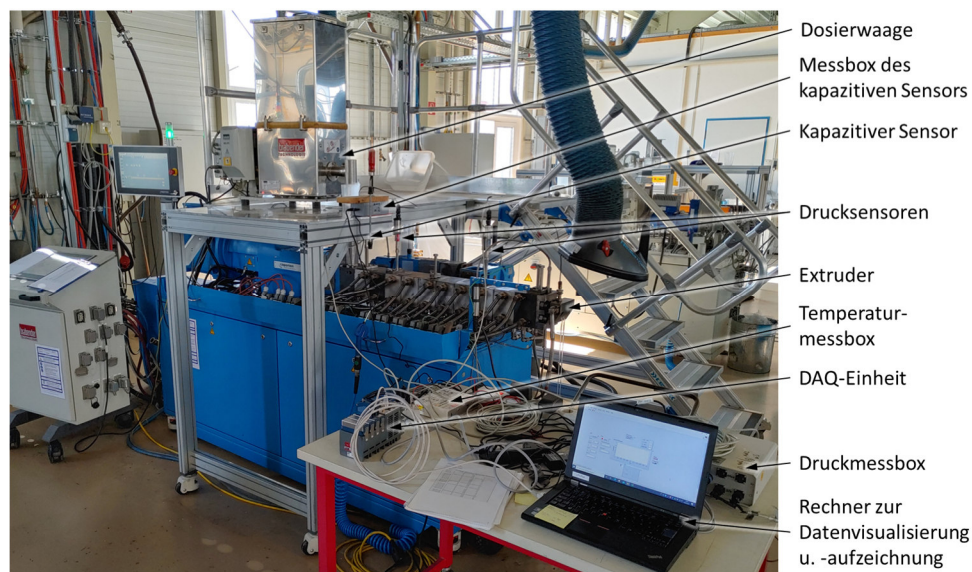


Abbildung 11: Versuchsaufbau bestehend aus Messsystem und Verfahrensaufbau (DSE: ZSK 26 Mc18 von Fa. Coperion GmbH)

Für die Sensorintegration direkt über den Schneckenelementen wurden Sensoreinsätze ausgelegt und gefertigt. Die Modellierung und Erstellung der fertigungstechnischen Zeichnung erfolgte mittels der CAD-Software SolidWorks (Fa. Dassault Systèmes SE). Die Einsätze können in die Entgasungsöffnung von den Extrudergehäusen platziert werden (siehe Abbildung 12). Diese wurden zudem ausgelegt, dass diese auch gedreht eingelegt werden können, um so auch über der anderen Schnecke platziert werden zu können. Da alle Sensoren wandbündig ausgelegt sind (um eine Kollision mit dem rotierenden Schneckensteg zu vermeiden), jedoch der kapazitive Sensor nur einen sehr geringen Messbereich aufweist ($< 0,5$ mm), wurden die Sensoreinsätze mit einem M16 Gewinde versehen. In dieses können Einschraubbuchsen mit dem passenden $\frac{1}{2}$ "-20 UNF-Gewinde eingeschraubt werden. Somit kann für jeden Sensor individuell eine Einschraubbuchse nachträglich spanend bearbeitet werden, um den Abstand von Sensorspitze zu Schneckensteg in den Messbereich von max. 0,5 mm anzupassen. Durch die individuelle Längenanpassung kann zum einen verhindert werden, dass der Sensor zu tief eingeschraubt wird und damit die Schnecke berühren würde, zum anderen wird verhindert, dass er zu weit vom Schneckensteg entfernt ist und damit kein Messeffekt von der Schneckenoberfläche erfährt.

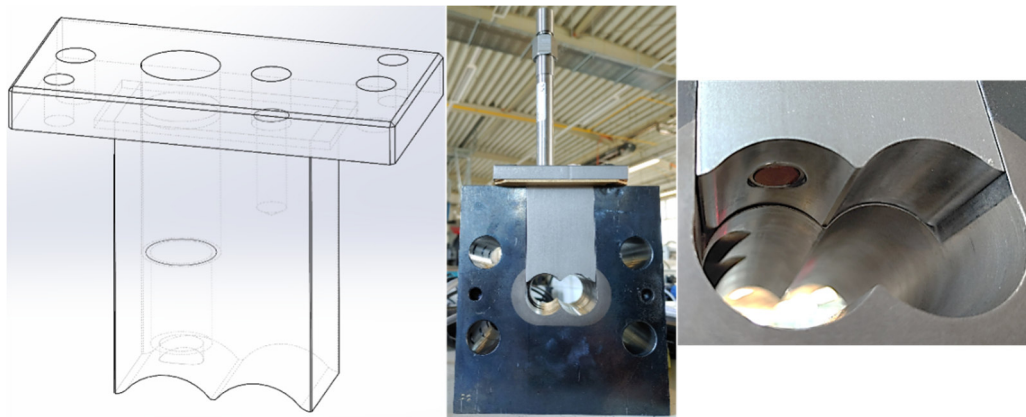


Abbildung 12: Messeinsatz zur Integration der Sensoren direkt über der Schneckenwelle in einem Entgasungsgehäuse: als 3D-Modell (links), im Extrudergehäuse mit eingeschraubtem Sensor (Mitte) und Ansicht auf die Sensorspitze (rechts).

Neben den Versuchen am SKZ an der ZSK 26 Mc18 von Coperion GmbH fanden auch weitere Versuche am KTP auf einem ZE 28 BLUE POWER von KraussMaffei Extrusion GmbH statt, siehe Abbildung 13.

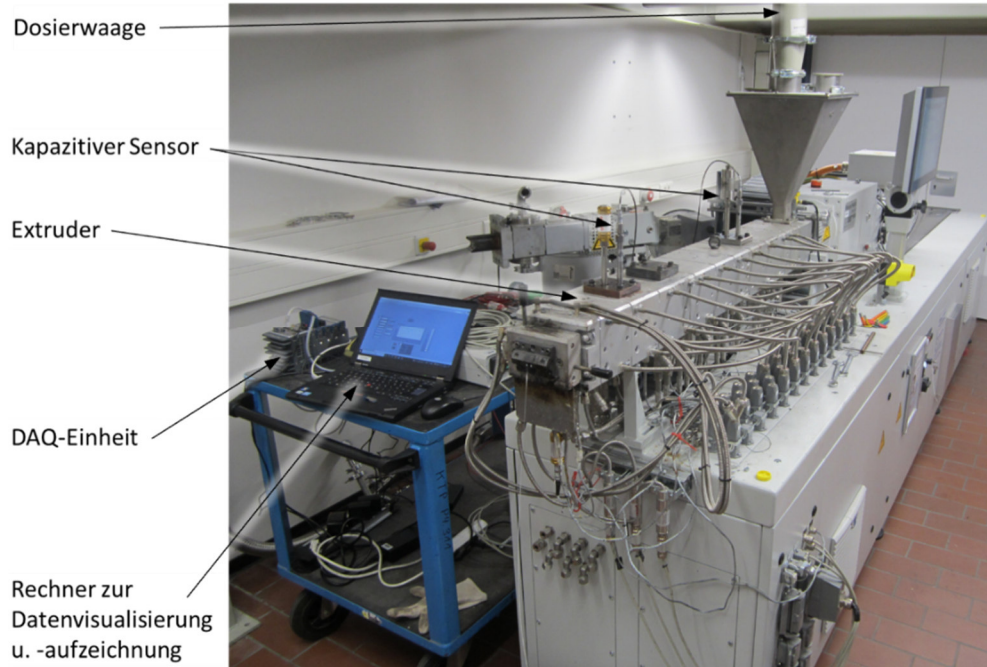


Abbildung 13: Versuchsaufbau am KTP an einem ZE 28 BLUE POWER von Fa. KraussMaffei Extrusion GmbH

Auch für den ZE 28 BLUE POWER wurden, wie in Abschnitt 4.2 aufgeführt, entsprechende Einsätze für die Entgasungsöffnungen gefertigt, mit deren Hilfe an vier Positionen entlang der Extruderschnecken Sensoren platziert und Messungen ermöglicht werden konnten.

Nach Abschluss des Versuchsaufbaus erfolgten die experimentellen Untersuchungen zur Evaluierung des Messansatzes zur axial-ortsaufgelösten Drehmomentmessung. Dabei fand, wie in Abbildung 14 zusammengefasst, eine Variation der verschiedenen Versuchsparameter statt.

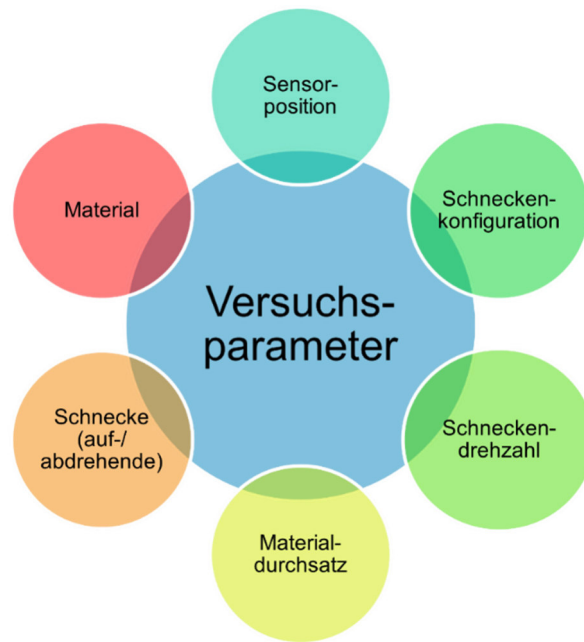


Abbildung 14: Variierte Versuchsparameter im Zuge der Entwicklung des Messverfahrens

Als Messpositionen für die Sensoren wurden u. a. folgende genutzt:

- direkt nach dem Haupteinzug
- direkt nach der Aufschmelzzone, vor dem rückstauenden Linkselement
- nach Ende der Mischzone, vor dem Rückstauenelement für die Entgasungszone
- direkt vor der Austrittsdüse an der Schneckenspitze

Die unterschiedlichen Sensorpositionen sollten einen Rückschluss auf die verschiedenen Schnecken-zonen zulassen sowie eine Aussage über das Sensorverhalten bei unterschiedlichen Schmelzefüllgraden ermöglichen. Die unterschiedlichen Schneckenkonfigurationen (z. B. nur Aufschmelzzone und Förder-elemente oder Aufschmelzzone und weitere Knetblöcke und Zahn-mischelemente) sowie Schneckendrehzahlen ($250 - 450 \text{ min}^{-1}$) und Materialdurchsätze ($15-60 \text{ kg/h}$) sollten verschiedene Drehmomentbelastungen erzeugen. Weiterhin wurde die auf- und abdrehende Schnecke des Extruders bei gleichen Rahmenbindungen betrachtet, um mögliche unterschiedliche Belastungen erfassen zu können. Bei den Materialsystemen wurde, wie bereits in Abschnitt 4.1 festgelegt, als PP-Material Moplen HP 500 N (Fa. Basell Polyolefine GmbH) und als PS-Material 454 N (Fa. INEOS Styrolution Group GmbH) genutzt.

Die Messaufzeichnungen, als tdms-Datentyp (aufgrund der schnelleren Datenverarbeitung), fanden sowohl beim stationären Versuchspunkt (nachdem der Extruder sich eingefahren und die Prozessparameter konstant waren) als auch bei den Übergängen zwischen den Versuchspunkten statt. Während der stationären Versuchspunkte wurde i. d. R. für eine Messdauer von 5 min gemessen. Vereinzelt fanden auch Messungen über eine Dauer

von 30 min statt. Aufgrund der hohen Abtastraten führte dies zu sehr hohen Datengrößen (im GB-Bereich), weswegen dies nur im reduzierten Umfang stattfand. Neben den Sensordaten wurden zusätzlich auch die Prozessdaten der Anlagensteuerung (Massetemperatur, Massedruck, Gesamtdrehmoment etc.) protokolliert.

Den experimentellen Arbeiten folgten die Auswertungen der Daten. Dabei wurden die Auswertungen nur innerhalb der gleichen Schneckendrehzahlen durchgeführt, da sich bei unterschiedlichen Drehzahlen die Periodendauer zwischen dem Passieren des Stegs verändert (siehe Gleichung 4) und somit sich das Verhältnis der Phasendifferenz und des Verdrehwinkels ändert. Ein Abgleich bei unterschiedlichen Schneckendrehzahlen wäre so nicht eindeutig möglich. Die manuelle Signalauswertung erfolgte unter Nutzung von der Software OriginPro (Fa. OriginLab Corporation). Im Zuge der Auswertung wurden für jeden Versuchspunkt (bei bekanntem Gesamtdrehmoment des Extruders) die Phasendifferenz zwischen den gemessenen Signalverläufen ermittelt. Hierzu dienten beim kapazitiven Sensor die negativen Signalpeaks (Spannungssignal fällt bei Annäherung des Schneckenstegs ab). Aufgrund der sehr impulsartigen Signalform war eine Signalverarbeitung (z. B. mittels FFT-Bandpassfilterung) nicht notwendig, siehe Abschnitt 5.2. Auf Basis der ermittelten Phasendifferenz für die verschiedenen konstanten Versuchspunkte, konnten diese entsprechend des über die Anlage gemessenen Drehmoments (als Richtwert) aufgetragen werden. Darauf basierend konnte eine Evaluierung des Messansatzes erfolgen.

Da, wie in Abschnitt 5.3 aufgeführt, die Auswertungen zum Messansatz zu keinem plausiblen Ergebnis führten, fand als weiterer Ansatz der Abgleich eines einzelnen Sensorsignals zu einem simulierten Signal statt. Hierbei wurden die Datensätze von den Messungen genutzt, die parallel zum Prozesswechsel, in der Übergangsphase aufgezeichnet wurden. Die Funktion des simulierten Signals y über die Zeit t_Z entspricht dabei einem einfachen Sinusverlauf, wie in Gleichung 4.5 aufgeführt, entsprechend der Kreisfrequenz ω in Abhängigkeit dem Frequenzanteil f_{Steg} des Passierens eines Schneckenstegs aus Gleichung 4.4.

$$y(t_Z) = \sin(\omega \cdot t_Z) = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{\text{Steg}} \cdot t_Z) \quad (4.5)$$

Für die Auswertung wurde hierbei die Phasendifferenz zwischen dem gemessenen Sensorsignal und dem simulierten Signal vom Anfang der Übergangsphase (alter konstanter Versuchspunkt) sowie am Ende der Übergangsphase (neuer konstanter Versuchspunkt)

ermittelt. Anschließend konnte die Drehmomentänderung (der Anlagensteuerung) und die ermittelte Phasendifferenzänderung zugeordnet und ausgewertet werden.

Neben den, in Abschnitt 5.3 erläuterten, Problemen des Messansatzes bei der Auswertung traten im Zuge der experimentellen Untersuchungen auch Schwierigkeiten mit dem kapazitiven Sensor aufgrund des sehr geringen Messbereichs auf. Zwischen Schneckensteg und Sensorspitze durfte der Abstand maximal 0,5 mm betragen, da sonst kein Signalausschlag als Trigger genutzt werden konnte. Der Abstand zwischen Sensorspitze des kapazitiven Sensors und der Extruderschnecke wurde über die Schrauben des Messeinsatzes in das Extrudergehäuse und das Gewinde des Sensors eingestellt. Die Einstellung erfolgte dabei anhand des visualisierten Messverlaufs in der LabVIEW-Software. Dabei musste auch auf die Dichtheit gegen Schmelzeaustritt Rücksicht genommen werden. Während der Versuche änderte sich infolge von Schneckendrehzahländerungen die Unwucht der Schnecke. Weiterhin musste der Unterschied zwischen leerem Extrudergehäuse ohne Granulat/Schmelze (nur einseitig gelagerte Welle) und im gefüllten Zustand (Welle im „Schmelzebett“ gelagert) berücksichtigt werden. Da diese Einflüsse am Anfang unterschätzt wurden und abrupte, große Drehzahländerungen vorgenommen wurden, kam es zu einem Kontakt zwischen Sensorspitze und Schneckensteg. Hierbei trat eine Beschädigung an der Sensorspitze auf, siehe Abbildung 15. Die Beschädigung der Sensorspitze führte zu einem Kurzschluss innerhalb der Messkette, der die angeschlossene Messelektronik des kapazitiven Messsystems ebenfalls beschädigte.



Abbildung 15: Die Abschürfungen durch den Schneckensteg an der Sensorspitze (gegenüber Abbildung 10, unten rechts) sind deutlich zu erkennen. Infolgedessen trat ein Kurzschluss auf, der die angeschlossene Messelektronik ebenfalls beschädigte.

Hierbei muss festgehalten werden, dass die Nutzung des kapazitiven Sensors (welcher aufgrund seiner markanten Signalform für die Triggergebung notwendig ist, siehe Abschnitt 5.2) aufgrund des geringen Messbereichs noch keine Praxistauglichkeit im Compoundierbereich aufweist.

Aufgrund der Probleme bei der Anwendung des kapazitiven Sensors und insbesondere der nicht eindeutigen Zuordenbarkeit von gemessener Phasendifferenz zu Verdrehwinkel bzw. Drehmoment, ist wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, der derzeitige Entwicklungsstand des Messansatzes nicht zur Simulationsvalidierung geeignet. Aufgrund dessen beschlossen beide Forschungseinrichtungen, auch in Rücksprache mit dem pbA, alternative Validierungsverfahren zu nutzen. Dabei sollen die Funktionsbereiche der Schnecke zonenweise aufgebaut und als Validierungsgröße das Gesamtdrehmoment der Extruderschnecke (mittels Anlagensteuerung und teilweise magnetostriktivem Messsystems) genutzt werden.

4.4 Experimentelle Untersuchungen ungefüllter Materialsysteme

Zur Betrachtung der reinen Feststoffförderung erfolgten an der ZSK 26 Mc18 (Fa. Coperion GmbH) experimentelle Versuche mit einer Schneckenkonfiguration nur mit FE und ohne Düsenwerkzeug. Um ein Aufschmelzen der Granulate zu vermeiden, wurden die Gehäuse auf 30 °C temperiert. Wie in Abbildung 16 zu sehen, erfolgten die Untersuchungen bei einem Standardaufbau von 44 L/D sowie einem verlängertem Schnecken Aufbau von 60 L/D . Neben unterschiedlichen Zugabeorten (Gehäuse 1 und Gehäuse 7) wurde auch die Schneckendrehzahl (50-650 min^{-1}) und der Materialdurchsatz (5-60 kg/h) variiert. Als Granulatformen kamen dabei Linsenform (PP) und Zylinderform (PS) zum Einsatz. Als Validierungsgröße wurde das Gesamtdrehmoment laut Anlagensteuerung kontinuierlich aufgezeichnet. Weiterhin erfolgte eine optische Begutachtung der Granulate nach der Verarbeitung.

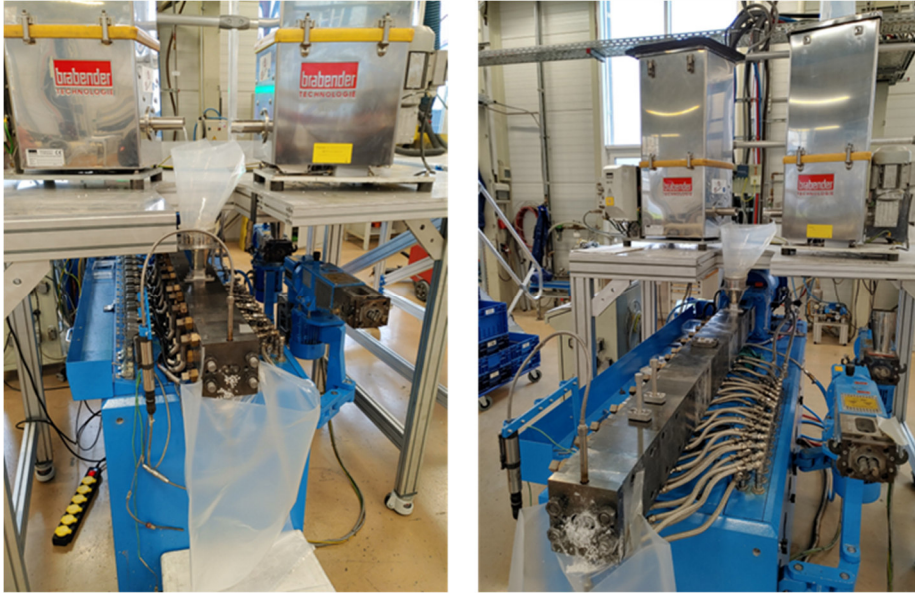


Abbildung 16: Versuchsaufbau zur Betrachtung der reinen Granlatförderung an einer ZSK 26 Mc18 (Fa. Coperion GmbH) mit Zugabe in Gehäuse 7 bei einer Standardschneckenlänge (44 L/D , links) und Zugabe in Gehäuse 1 bei einem verlängertem Schneckenaufbau (60 L/D , rechts).

Die Prozessparameter wurden protokolliert und dienen als Validierungsmöglichkeit für die Simulationsarbeiten in Abschnitt 4.6 und 5.6.

Untersuchung des axial orts aufgelösten Drehmoments mittels Magnetostriktion

Um den spezifischen mechanischen Energieeintrag (SME) bei einem Doppelschneckenextruder messen zu können müssen verschiedene Parameter betrachtet werden. Bei Liang in [LHH02] haben erste Versuche ergeben, dass die Drehzahl n sowie der Massenstrom $\dot{m}$ einen Einfluss auf den SME haben. Dazu wurden beide Parameter wie in Gleichung 4.6 gezeigt dividiert, um den spezifischen Massenstrom (SFL) pro Schneckenumdrehung zu erhalten.

$$SFL = \frac{\dot{m}}{n} \quad (4.6)$$

In diesen Forschungsarbeiten wird deutlich, dass für verschiedenen Drehzahlen und Massenströmen, die aber denselben SFL besitzen der Energieeintrag nahezu konstant bleibt [LHH02]. Dieser Zusammenhang lässt sich auch mathematisch beobachten, indem der SME in Abhängigkeit des SFL sowie des Drehmoments M_d und der Länge l formuliert wird. Daraus ergibt sich die Gleichung 4.7, die die beiden Größen verknüpft.

$$SME = \frac{(2 \cdot \pi \cdot M_d \cdot l)}{SFL} \quad (4.7)$$

Auf Basis dieser Erkenntnisse sind für diese Arbeit auch die Drehzahl und der Massenstrom als zu variierende Parameter festgelegt worden. Diese sollen hier jedoch einzeln betrachtet werden und nicht im *SFL* zusammengefasst sein. Dadurch können für beide Parameter Effekte festgestellt und klassifiziert werden. Zudem wird die Massetemperatur als weiterer Stellwert genutzt. Dieser Parameter wird zusätzlich betrachtet, da die Viskosität η des Kunststoffes exponentiell von der Temperatur T_M abhängt. Zur Beschreibung dieses Zusammenhangs eignet sich Gleichung 4.8 die sich aus dem Carreau-Ansatz ergibt [MHM11]. Bei diesem wird die Viskosität in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit für strukturviskose und newtonsche Fluide bestimmt. Zudem ist anzunehmen, dass eine veränderte Viskosität einen Einfluss auf den *SME* hat, weil eine niederviskosere Schmelze auch weniger Energie benötigt, um gefördert zu werden.

$$\eta(T_M) = \eta_{(0,S)} \cdot e^{\left(\frac{B}{T_M}\right)} \quad (4.8)$$

T_M : Massetemperatur

B : Reziproke Übergangsviskosität

$\eta_{(0,S)}$: Nullviskosität

Neben den zu variierenden Parametern sind auch, wie in Abschnitt 4.1 erläutert, zwei verschiedene Materialien für die Versuche eingeplant worden.

Die Variation der Parameter erfolgte dabei nach einem vollfaktoriellen Versuchsplan. Die Schneckendrehzahl wurde in drei Stufen variiert. Diese betrugen 200 min^{-1} , 500 min^{-1} und 800 min^{-1} . Für jede Drehzahl wurde zudem auch der Massenstrom in drei Stufen (16 kg/h , 24 kg/h und 31 kg/h) eingestellt. Die Durchsätze wurden anhand der Erkenntnisse aus den Vorversuchen gewählt.

Der maximale Materialdurchsatz wurde anschließend so gewählt, dass sich bei der niedrigsten Schneckendrehzahl und Zylindertemperatur eine Extruderauslastung von 80 % ergab, womit die maximale Drehmomentgrenze des Extruders ausgenutzt werden konnte. Zusätzlich erfolgten die Versuche bei drei verschiedenen Temperaturen (180°C , 200°C und 220°C). Zur besseren Übersicht ist in Tabelle 1 der Versuchsplan noch einmal graphisch dargestellt. Unter Berücksichtigung der zwei Materialien ergeben sich pro Schneckenkonfiguration 54 Versuche.

Tabelle 1: Tabellarisch dargestellter Versuchsplan, der in den experimentellen Untersuchungen als Grundlage dient und für beide Materialien durchgeführt wurde

Versuchsnummer	Drehzahl	Durchsatz	Temperatur
1	-	-	-
2	-	O	-
3	-	+	-
4	O	-	-
5	O	O	-
6	O	+	-
7	+	-	-
8	+	O	-
9	+	+	-
10	-	-	O
11	-	O	O
12	-	+	O
13	O	-	O
14	O	O	O
15	O	+	O
16	+	-	O
17	+	O	O
18	+	+	O
19	-	-	+
20	-	O	+
21	-	+	+
22	O	-	+
23	O	O	+
24	O	+	+
25	+	-	+
26	+	O	+
27	+	+	+

Drehzahl:+: 800 min⁻¹O: 500 min⁻¹-: 200 min⁻¹**Durchsatz:**

+: 31 kg/h

O: 24 kg/h

-: 16 kg/h

Temperatur:

+: 220 °C

O: 200 °C

-: 180 °C

Dabei wird das Drehmoment von der aufdrehenden sowie der abdrehenden Schnecke gemessen (vgl. Abbildung 17 für die Schneckenbezeichnung) und daraus nach Gleichung 4.7 der *SME* bestimmt.

Im Folgenden werden zur Unterscheidung der Schnecken die Begriffe aufdrehend/abdrehend verwendet, um unabhängig von der Drehrichtung der Schnecken eine einheitliche Namensgebung zu definieren, wie im folgenden Bild dargestellt:

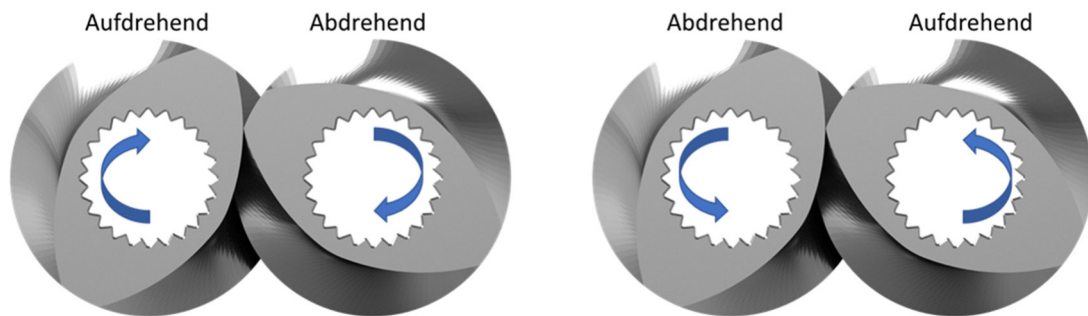


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Schnecken im Querschnitt zur Definition der Benennung "auf-/abdrehend"

Da der Fokus der Arbeit auf der Betrachtung des orts aufgelösten spezifischen Energieeintrags eines Doppelschneckenextruders lag, musste zudem eine Möglichkeit geschaffen werden den mechanischen Energieeintrag über die axiale Länge des Extruders in verschiedenen Bereichen zu ermitteln, da es mit dem Messansatz aus Abschnitt 4.3 nicht möglich war, belastbare Messwerte zu generieren. Dazu wurde ein Schnecken Aufbau als Grundlage genutzt und anschließend in mehreren Schritten sowohl die Trichterposition für die Materialzufuhr als auch die Schneckenkonfiguration variiert. In Abbildung 18 ist sowohl der Grundaufbau sowie die einzelnen zu betrachtenden Schneckenkonfigurationen aufgeführt. Zuerst wurde der *SME* für die gesamte Schnecke gemessen, dann im zweiten Versuch für den Bereich der Schnecke bis zur Homogenisierungszone. Im dritten Versuch wurde der *SME* für den Bereich bis zur Plastifizierungszone gemessen und zum Schluss der Bereich der reinen Feststoffförderung.

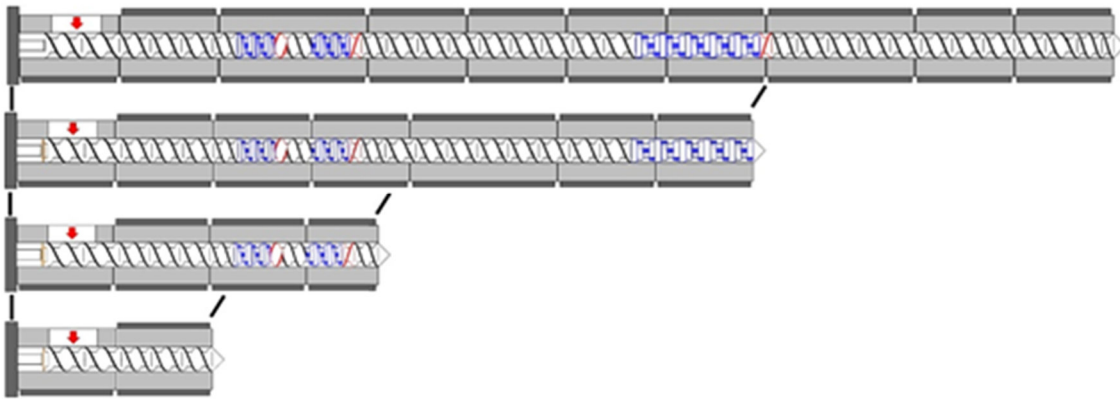


Abbildung 18: Darstellung der verschiedenen Schneckenkonfigurationen zur Bestimmung des *SME*

Da der Extruderzylinder sowie die Schneckenkernwelle eine unveränderliche Länge besitzen, können die oben gezeigten Konfigurationen nur über eine Verschiebung des Einfülltrichters (Materialzugabe) und ein Umstecken der Schneckenelemente realisiert werden. In Abbildung 19 ist die reale Umsetzung der verschiedenen Konfigurationen gezeigt. Dabei wurde die Materialzugabe, in der Abbildung als roter Pfeil im Zylinder gekennzeichnet, sowie die Schneckenelemente zonenweise in Richtung der Schneckenspitze verschoben. Die vor der Materialzugabe befindlichen Schneckenelemente haben dabei keinen Einfluss auf das Polymer und dienen hier lediglich als Platzhalter. Durch Subtraktion der einzelnen Schnecken voneinander können dann die Drehmomente und Energieeinträge der einzelnen Zonen betrachtet werden.

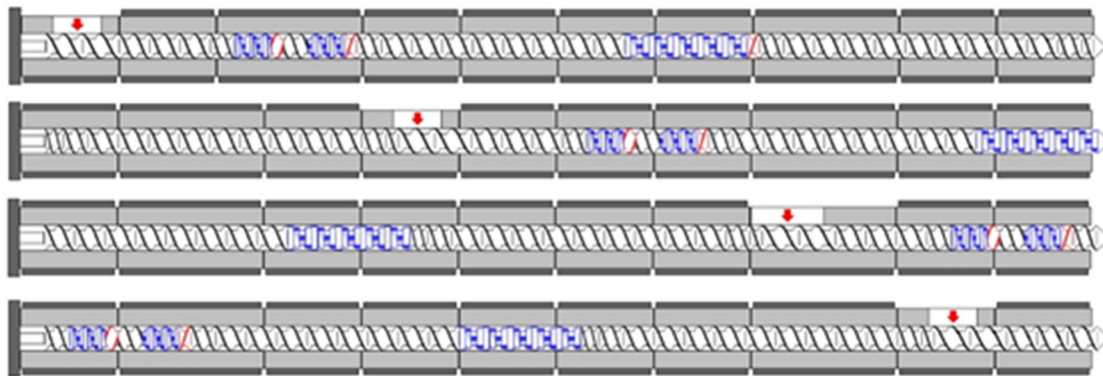


Abbildung 19: Realer Schneckenbau der vier Schneckenkonfigurationen, mit unterschiedlicher Position der Materialzugabe, für die das Drehmoment und der *SME* bestimmt werden soll

Schneckenkonfiguration-1 entspricht dem kompletten Schneckenbau und ist in Abbildung 19 oben aufgeführt. Die einzelnen Abstufungen werden dann jeweils als Schneckenkonfiguration-2 (ohne Druckaufbauzone), Schneckenkonfiguration-3 (nur Feststoffför-

der- und Aufschmelzzone) und Schneckenkonfiguration-4 (nur Feststoffförderzone) bezeichnet, siehe Abbildung 19 von oben nach unten. Insgesamt wird somit der Extruder in vier axiale Abschnitte unterteilt. Dadurch kann für die jeweiligen Zonen eine Messung des Gesamtdrehmoments erfolgen und der zonenspezifische mechanische Energieeintrag bestimmt werden.

Zudem wird ab dem zweiten Aufbau das Düsenwerkzeug geöffnet, damit es nicht durch unaufgeschmolzenes Material zu Verstopfungen kommen kann. Weiterhin kann so ein Druckaufbau durch die Düse verhindert werden, der in der Feststoffförder- und Aufschmelzzone nicht auftreten würde. Standardmäßig tritt auf die Schneckenelemente in diesen Zonen durch die Teilfüllung kein Extrusionsdruck auf. Wenn die KBE nun mit dem Rückstau vor der Düse beaufschlagt werden, würde die Verweilzeit des Polymers und somit Belastung durch die Elemente deutlich länger als tatsächlich ausfallen. Demzufolge würde der ermittelte Energieeintrag nicht dem tatsächlichen Energieeintrag im realen Betrieb entsprechen.

Abbildung 20 zeigt schematisch den gesamten Versuchsaufbau. Dieser besteht aus einem Doppelschneckenextruder sowie einer zugehörigen Dosieranlage. Beide sind an eine Steuerung angeschlossen, welche die Steuersignale und Stellgrößen an die Dosieranlage sowie die Antriebs- und Verfahreseinheit des DSE weiterleitet. Des Weiteren ist ein Messsystem von NCTE zur Bestimmung der Drehmomente der einzelnen Schnecken, zwischen der Antriebseinheit und der Verfahreseinheit integriert.

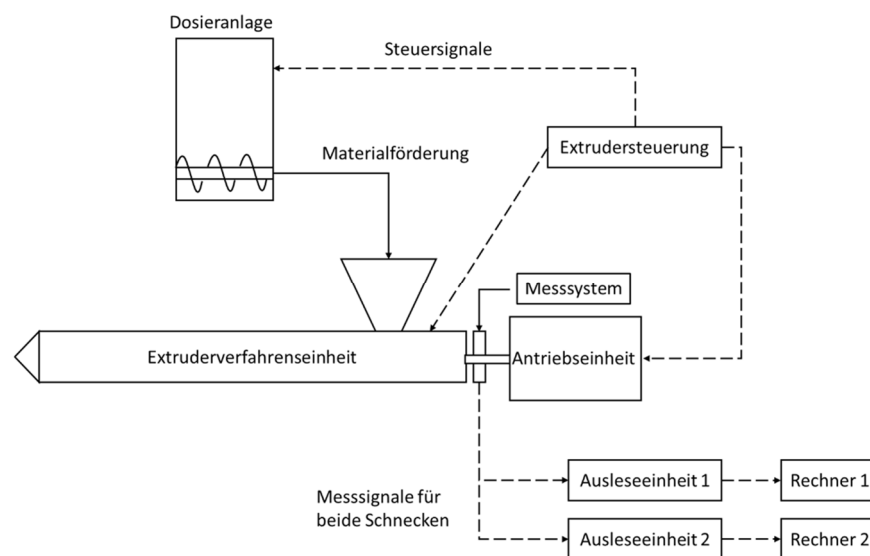


Abbildung 20: Schematisch dargestellter Versuchsaufbau mit Kennzeichnung vom Materialfluss sowie den Steuerungs- und Messsignalen

Als DSE wurde der ZE 28 Blue Power der Fa. KraussMaffei Extrusion GmbH, mit einem Schneckendurchmesser von 28 mm und einem Durchmesser Verhältnis von 1,65 [Kra23], verwendet. Das L/D -Verhältnis beträgt 44, woraus sich eine wirksame Schneckenlänge von 1.232 mm ergibt. Die maximale Schneckendrehzahl liegt bei 1.200 min^{-1} . Zudem gibt es für beide Schnecken eine Drehzahlbegrenzung von je 165 Nm.

Zudem ist durch die UltraGlide Funktion die Möglichkeit der automatisierten Dead-Stopp Probenentnahme gegeben. Die Verfahrenseinheit inklusive des Einfülltrichters sind auf Abbildung 21 dargestellt. Dort sind auch die vier Anbaumöglichkeiten für den Einfülltrichter gekennzeichnet, die für den Versuchsablauf genutzt wurden.

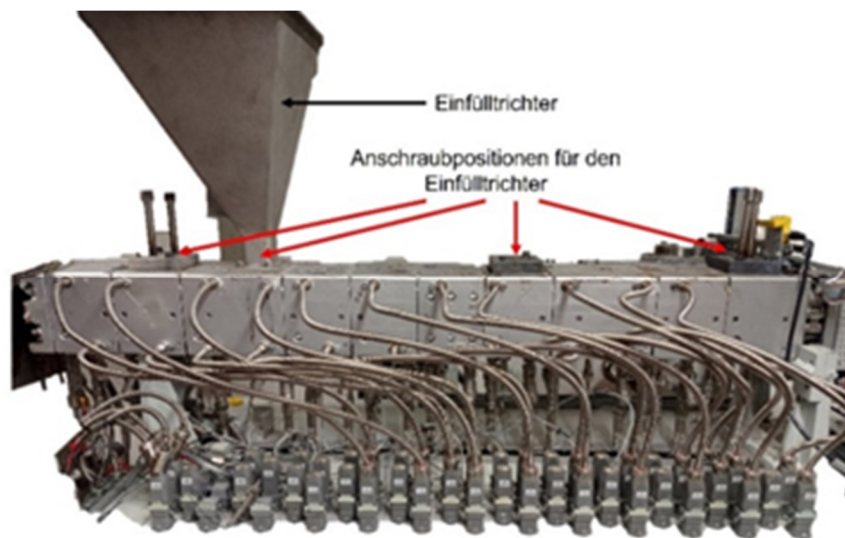


Abbildung 21: Verfahrenseinheit des genutzten Doppelschneckenextruders in der Anordnung für die Untersuchung der Aufschmelzzone mit gekennzeichneten weiteren Anschraubpositionen für den Einfülltrichter (Materialfluss v. r. n. l.)

Die Dosierung des Kunststoffgranulates erfolgte mit einer Dosieranlagen der Firma Brabender vom Typ DDW-M-FW40, welche einen Materialdurchsatz von 5 - 90 kg/h ermöglicht.

Die Messung des Gesamtdrehmomentes der einzelnen Schnecken erfolgte in den Versuchen mittels des Messsystems der Firma NCTE AG. Dieses arbeitet mit dem Magnetostruktion-Messprinzip. Dabei ist die Schneckenkernwelle vor dem Koppelungsstück magnetisiert. Tritt nun im Prozess an der Welle eine Torsion auf, kann, wie in Abschnitt 2.2 erläutert, mittels des geänderten Magnetfelds daraus das Drehmoment ermittelt werden. Auf Abbildung 22 ist die Messeinheit für die beiden Schnecken dargestellt. Diese übermittelt die Daten über zwei angeschlossene Ausleseeinheiten an jeweils einen Rechner weiter.



Abbildung 22: Aufgebautes Magnetostruktionsmesssystem zwischen der Antriebs- und der Verfahrenseinheit mit den beiden Extruderschnecken

Die einkommenden Signale können dann mittels der MGME1 Software von NCTE ausgewertet werden. Das User Interface ist auf Abbildung 23 dargestellt.

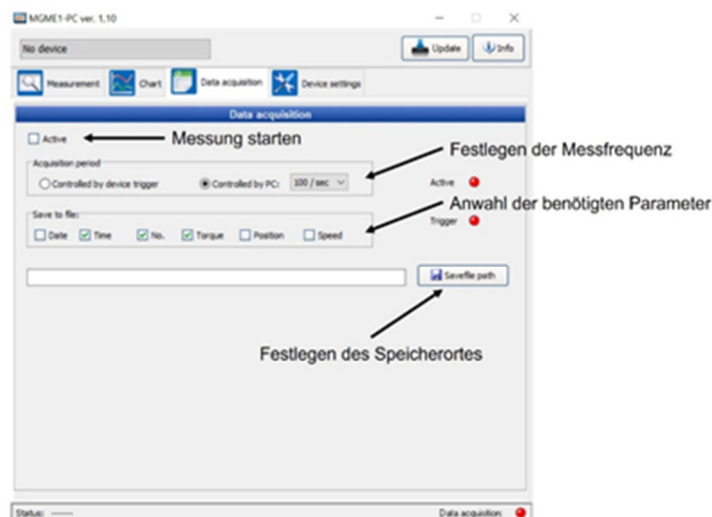


Abbildung 23: Übersicht über die User-Interface der MGME1 Software zur Messung des Drehmomentes

Es wurde bei allen Schneckenkonfigurationen das Extrudergehäuse mit dem Einfülltrichter auf 25 °C temperiert sowie das jeweils folgende Gehäuse auf 70 °C temperiert. Bei allen weiteren Extrudergehäusen wurden dann die benötigten Prozesstemperaturen in den drei zu untersuchenden Stufen eingestellt. Damit wurde im Bereich des Materialeinzugs ein anschmelzen und eine Brückenbildung vom Granulat verhindert.

Im Zuge der Versuchsdurchführung erfolgte die Datenaufzeichnung sobald der stationäre Prozesszustand erreicht wurde. Hierzu wurde auf beiden Rechnern jeweils gleichzeitig

die Messung des Gesamtdrehmoments mittels des Magnetostruktionsmesssystem gestartet. Die Messdauer betrug 10 s. Bei einer voreingestellten Abtastrate von 100 Hz ergaben sich in diesem Zeitfenster somit etwa 1.000 Drehmomentmesswerte. Daraus wurde das arithmetische Mittel bestimmt und als Drehmoment für den gefahrenen Prozesspunkt festgesetzt. Im Zuge der Versuchsdurchführung wurde die Schneckendrehzahl (200 - 800 min^{-1}) stufenweise erhöht. Innerhalb einer Drehzahlstufe wurde wiederum für jeden Versuchspunkt der Materialdurchsatz (16 - 31 kg/h) abschnittsweise erhöht. Dies erfolgte jeweils für beide Materialien. Anschließend wurde der Extruder entsprechend dem nächsten Schneckenkonzept umgebaut und die Gehäusetemperaturen angepasst.

Untersuchungen an einer zweiten Anlagengröße

Laut Antrag sollte an Forschungseinrichtung 2 zusätzlich zum ZE 28 BLUE POWER eine BTSK45 von der Fa. Barmag Saurer für die experimentellen Untersuchungen zum Einsatz kommen. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der ursprünglich vorgesehen Messsystementwicklung zur ortsaufgelösten Drehmomentbestimmung, sollte stattdessen auch hier als Alternative das Magnetostruktionsmesssystem von der Fa. NCTE AG verwendet werden. Diese muss exakt auf die Maschine angepasst sein, um berührungslose Messungen zu ermöglichen und benötigt eine Welle mit definiertem vollprofiligem Querschnitt und aufgeprägtem Magnetfeld. Eine passende Welle oder eine Getriebeübergangshülse konnte für die BTSK45 nicht gefertigt werden, da die verzahnte Getriebewelle und der verzahnte Schneckendorn sich im Betrieb berühren. Zudem wäre die Messtechnik für den Extruder neu zu beschaffen gewesen. Für die an der Forschungseinrichtung 2 vorhandene ZSK25 (Fa. Coperion GmbH) waren sowohl die Messtechnik von NCTE als auch die magnetisierten Hülzen vorhanden, sodass dieser DSE als weitere Maschinengröße eingesetzt wurde.

An dem Extruder wurden einige Schneckenelemente aufgrund von Verschleiß ersetzt, um möglichst genaue Ergebnisse erzielen zu können.

An dem Extruder standen zwei mögliche Positionen zur Dosierung der Hauptkomponente zur Verfügung, wie nachfolgend abgebildet.

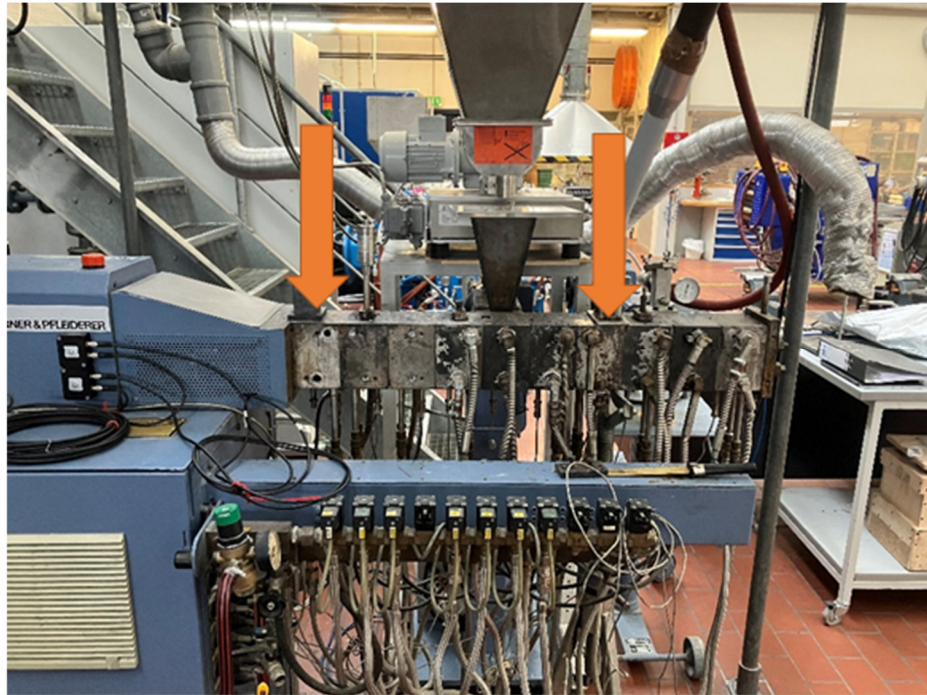


Abbildung 24: ZSK25 mit Markierung der beiden möglichen Materialzufuhren

Aus diesen beiden Zugabemöglichkeiten ergab sich angelehnt an die Untersuchungen auf dem ZE 28 BLUE POWER die Möglichkeit die Schmelzeförderung getrennt vom Aufschmelzverhalten zu untersuchen, die zugehörigen Schneckenaufbauten sind nachfolgend in Abbildung 25 dargestellt.

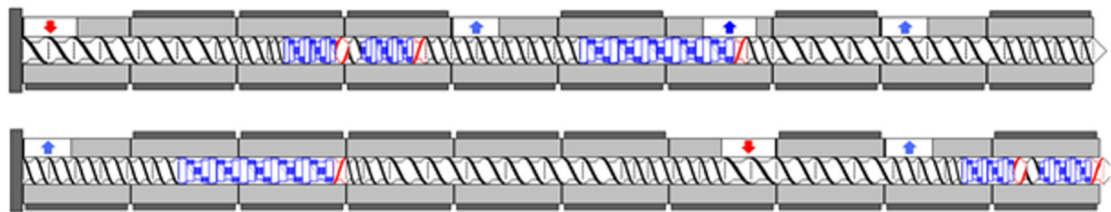


Abbildung 25: Zwei Schneckenaufbauten der ZSK25 mit eingezeichneter Materialzugabe (roter Pfeil)

Zusätzlich wurden Untersuchungen an einer verlängerten Feststoffförderzone durchgeführt, da es aufgrund einer fehlenden Dosiermöglichkeit nicht möglich war, diese Zone in der ursprünglichen Länge allein zu betrachten.

Die Untersuchungen wurden bei den Drehzahlen 200, 500 und 800 min^{-1} durchgeführt. Zusätzlich wurden auch hier die Zylindertemperaturen zwischen 180 °C und 220 °C in drei Stufen variiert. Die Durchsätze wurden so eingestellt, dass der höchste Durchsatz bei der geringsten Drehzahl und Temperatur zu einer Anlagenauslastung von 80 % führte,

um eine Überlastung der Anlage zu vermeiden. Der maximale Durchsatz in dieser Untersuchung lag bei 12 kg/h. Zusätzlich wurde als Minimalwert die Hälfte des maximalen Massenstroms gewählt und ein dritter Wert zwischen den beiden Extrema.

Untersuchungen an unterschiedlichen Schneckenelementen

Zusätzlich wurden die in Abbildung 26 aufgeführten weiteren Schneckenaufbauten untersucht, zum Vergleich ist der erste Aufbau (Konfiguration 1.0), welcher zuvor ausführlich beschrieben wurde, mitabgebildet:

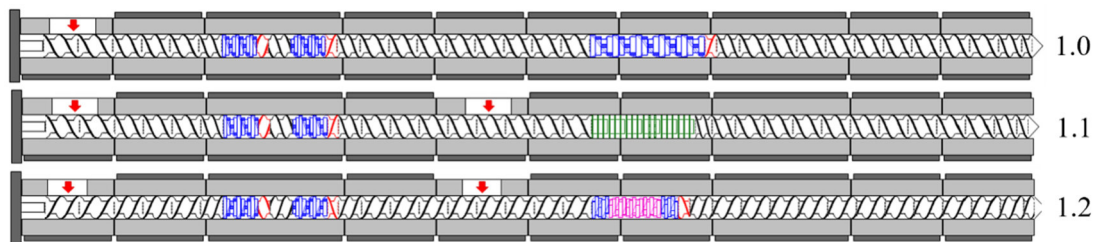


Abbildung 26: Schematische Abbildung der Schneckenaufbauten die innerhalb des AP verglichen werden S1.0: 2-gängige Knetblöcke, S1.1: Zahnmischelemente, S1.2: 3-gängige Knetblöcke

Gegenüber dem ersten Schneckenaufbau kamen hier in der Homogenisierungszone statt der breiten zweigängigen Knetblöcke in Konfiguration 1.1 Zahnmischelemente zum Einsatz. In Konfiguration 1.2 wurden hier dreigängige Knetblöcke sowie Übergangselemente von zwei- auf dreigänger und umgekehrt verwendet.

Untersuchung des Füllgradverhältnisses zwischen den Schnecken

Zur Klärung der Frage, inwiefern ein möglicher unterschiedlicher Füllgrad der Schnecken im schmelze-flüssigen Bereich einen Einfluss auf die Lastverteilung der beiden Schnecken hat, wurden Schneckenziehversuche durchgeführt. Der verwendete DSE ZE 28 BLUE POWER von KraussMaffei verfügt über eine Ultra-Glide Funktion, welche das abrupte Stoppen der Schneckenrotation mit anschließendem automatischem Herausziehen der Schnecken aus dem Verfahrensteil ermöglicht, wie nachfolgend abgebildet.

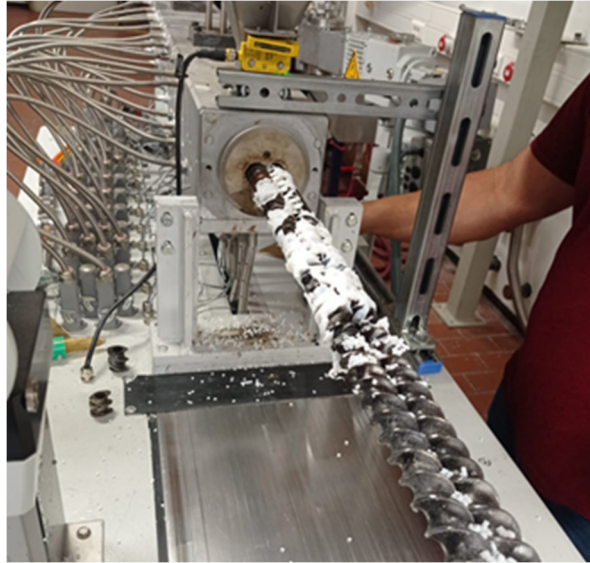


Abbildung 27: Aufnahme aus einem Schneckenziehversuch zur Bestimmung der Füllgrade entlang der Schnecken an dem ZE 28 BLUE POWER

Die Funktion ermöglicht die Probenentnahme im Versuchsablauf ohne aufwändiges Handling der Schnecken, welches die Ergebnisse verfälschen könnte, da bei geringer Viskosität die Schmelze abtropfen könnte.

Nach Stoppen der Extruderrotation wurden die Schnecken gezogen und an vier festgelegten Orten entlang des Extruders Proben an den Schnecken entnommen. Die Orte zur Probenentnahme sind nachfolgend abgebildet.

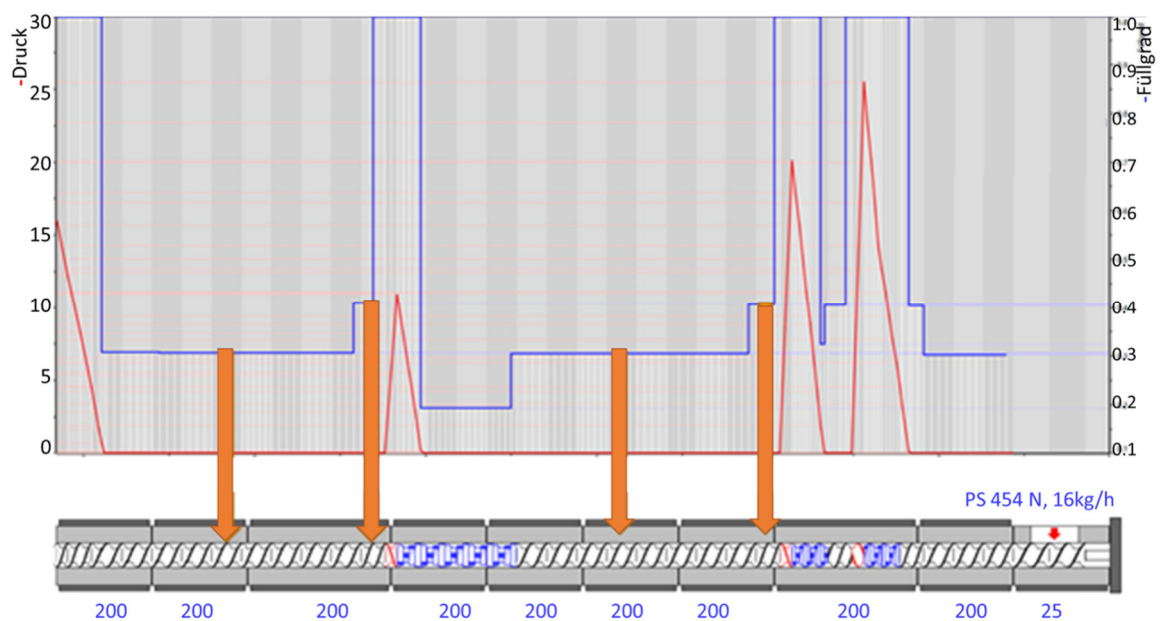


Abbildung 28: Simulationsergebnis mit SIGMA von dem Schnecken Aufbau (Förderrichtung von rechts nach links), welche hinsichtlich der Füllgrade der Schnecken untersucht wurde mit Markierung der vier Probeentnahmestellen (orangene Pfeile)

Die Proben wurden sowohl kurz nach einer Vollfüllung sowie an einem Element mit geringerem Füllgrad entnommen, um die Entwicklung der Füllgradverteilung im Extruder beim Abstauen der Schmelze bewerten zu können. Hierzu wurde eine Simulation mittels SIGMA herangezogen, mit deren Hilfe der Füllgradverlauf im Extruder visualisiert wurde (blaue Kurve in Abbildung 28).

Die Proben wurden jeweils definiert für ein einzelnes Schneckenelement entnommen, um vergleichbare Ergebnisse zwischen den Versuchspunkten zu gewährleisten. Hierzu wurde die Schmelze mit Hilfe eines Messingwerkzeugs von der Schneckenoberfläche abgeschabt und mittels Feinwaage auf ihre Masse untersucht, wie in Abbildung 29 gezeigt.



Abbildung 29: Aufnahme einer Probenentnahme an dem ZE 28 BLUE POWER

Untersuchung der Granulatverteilung in der Feststoffförderzone

Da sich in den Ergebnissen der ersten Untersuchungsreihen bereits zeigte, dass der Drehmomentunterschied zwischen den Schnecken schon in der Feststoffförderzone und der Aufschmelzzone vorhanden ist, wurden hierzu weiterführende Untersuchungen durchgeführt.

Zuerst erfolgten die Untersuchungen zur Feststoffförderung, bei denen das dosierte Material nach der Förderung im Feststoffbereich des Extruders getrennt für beide Schnecken aufgefangen wurde, um die Massenströme je Schnecke zu ermitteln. Hierzu wurde der kürzeste Aufbau aus den Untersuchungen zuvor gewählt. An der Spitze des Extruders wurde das in Abbildung 30. dargestellte Werkzeug befestigt, welches die Kanäle an der Schneckenspitze aufteilt und die Materialströme getrennt leitet.

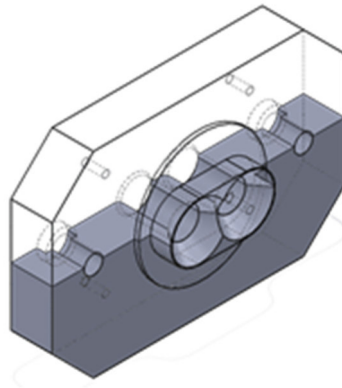


Abbildung 30: Schematische Abbildung der Schnittdarstellung durch das konstruierte Werkzeug zur Probenentnahme von Granulat an den Schneckenspitzen

Die Versuche für beide Materialien erfolgten bei den gleichen Durchsätzen und Drehzahlen wie bei den vorherigen Untersuchungen. Dabei wurde im laufenden Prozess für einen definierten Zeitraum Probematerial aufgefangen und anschließend hinsichtlich der Masse untersucht.

Zusätzlich zur detaillierteren Betrachtung der Feststoffförderung wurden Untersuchungen zum Anstauverhalten vor der Aufschmelzzone durchgeführt, wobei hier unterschiedliche Knetblockbreiten sowie Versatzwinkel variiert wurden und auf ihren Einfluss bezüglich des Drehmomentunterschieds betrachtet wurden.

4.5 Experimentelle Untersuchungen gefüllter Materialsysteme

Zur Untersuchung gefüllter Materialsysteme wurde am ZE 28 BLUE POWER zusätzlich zum Aufbau aus den ungefüllten Systemen die Seitendosierung montiert, welche die Zugabe von Zusatzstoffen wie Fasern oder Flammschutzmitteln nach der Aufschmelzzone ermöglicht. Es erfolgten Drehmomentmessungen mit dem magnetostriktiven Messsystem am PS-Basispolymer mit zwei Füllstoffanteilen von Titandioxid (TiO_2) bei jeweils zwei Schneckenkonfigurationen, Durchsätzen sowie Drehzahlen, äquivalent zu den Versuchen am ungefüllten Materialsystemen. Die genutzten Schneckenaufbauten sind in Abbildung 31 aufgeführt. Diese unterscheiden sich in der Wahl der Schneckenelemente durch den Einsatz von Zahnmischelementen und 3-gängigen Knetblöcken, welche nach Zugabe des Füllstoffs die homogene Einarbeitung verbessern.

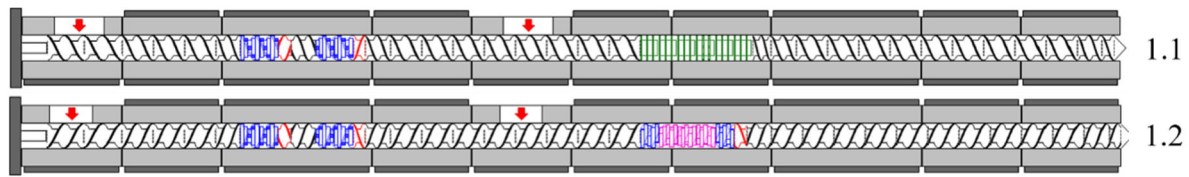


Abbildung 31: Schematische Abbildung der beiden Schneckenbauten S1.1 (ZME) und S1.2 (3-gängige KBE) zur Untersuchung gefüllter Materialsysteme an dem ZE 28 BLUE POWER

Die genauen Prozessvariationen lassen sich Tabelle 2 entnehmen.

Tabelle 2: Auflistung der Variationen bei den experimentellen Untersuchungen von gefüllten Materialsystemen

Basispolymer		PP (HP500N)	PS (454N)
Schneckenkonfiguration		ZME	3-gängige KBE
Durchsatz	(kg/h)	16	24
Füllstoffanteil	(Gew.-%)	18,75	25
Drehzahl	(min ⁻¹)	200	500

Die Versuchsdurchführung (stufenweise Änderung der Schneckendrehzahl und des Materialdurchsatz etc.) in den Untersuchungen zum gefüllten Materialsystem erfolgte analog zu den Untersuchungen mit den ungefüllten Materialsysteme.

4.6 Modellierung in der Schmelzeförderung

Zur Modellierung des mechanischen Energieeintrags in der Schmelzeförderung wurden zunächst bestehende Konzepte aus der Literatur betrachtet und verglichen.

Hierbei zeigte sich, dass häufig vereinfachende Annahmen getroffen werden, diese umfassen eine Vernachlässigung des Zwickels oder der Leckströme über die Flanken, beziehen sich ausschließlich auf newtonische Fluide oder gelten nur für vollgefüllte Schneckenelemente und rechteckige Kanalquerschnitte.

Da in den experimentellen Untersuchungen der Zusammenhang aus Drehmoment der Schnecken und Energieeintrag als Grundlage gewählt wurde, sollte darauf auch das neu zu entwickelnde Model beruhen. Aus dem Zusammenhang in Gleichung 4.9 kann durch Berechnung des Drehmoments M_d auf den SME geschlossen werden, da Schneckendrehzahl n und Materialdurchsatz $\dot{m}$ Einstellgrößen sind, die dem Prozess vorgegeben werden.

$$SME = \frac{M_d \cdot n}{\dot{m}} \quad (4.9)$$

Aus Gleichung 4.10 ergibt sich, dass zur Berechnung des Drehmoments M_d eine Kraft F und ein Hebelarm l nötig werden, welche es in Abhängigkeit der Prozessparameter zu modellieren gilt.

$$M_d = F \cdot l \quad (4.10)$$

In Abbildung 32 sind die Größen aus Gleichung 4.10 beispielhaft an einem FE aufgetragen.

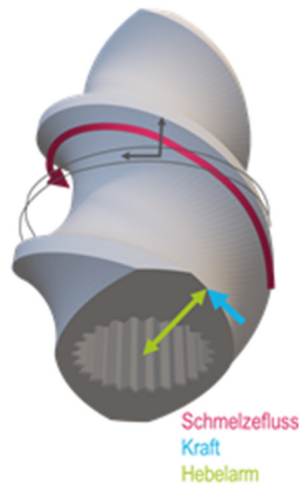


Abbildung 32: Schematische Abbildung eines FE mit Kennzeichnung von Kraft, Hebelarm und Schmelzfluss

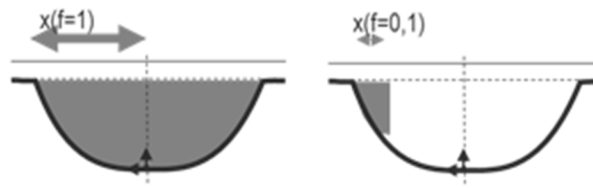


Abbildung 34: Abbildung unterschiedlicher Füllgrade und der Position der Krafteinleitung
An der berechneten Stelle des Schwerpunkts der Füllung kann durch folgende Gleichung 4.11 die Kanaltiefe bestimmt werden:

$$h(x) = \frac{D_s}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi \cdot \left(|x| - \frac{e_{max}}{2} \right)}{t \cdot \cos(\varphi_s)} \right) \right] - \sqrt{a_{th}^2 - \frac{D_s^2}{2} \cdot \sin^2 \left(\frac{2\pi \cdot \left(|x| - \frac{e_{max}}{2} \right)}{t \cdot \cos(\varphi_s)} \right)} \quad (4.11)$$

D_s Schneckenaußendurchmesser

t Gangsteigung

φ_s Gangsteigungswinkel

a_{th} Theoretischer Achsabstand

Durch Subtraktion der Kanaltiefe vom Schneckenaußenradius ergibt sich der wirkende Hebelarm (l_{Hebel}) zu:

$$l_{Hebel} = \frac{D_s}{2} - h(x) \quad (4.12)$$

Modellierung der Kraft

Bei der Kraft, welche aus der Schmelze auf die Schnecke wirkt, handelt es sich um eine Schubkraft an der Oberfläche des Schneckenelements. Diese wird hervorgerufen durch Schubspannungen, welche auf die Oberflächen im Schneckenelement einwirken. Diese ergeben sich aus den lokalen Schergeschwindigkeiten im Kanal und der örtlich vorliegenden Viskosität. Zur Berechnung der Kraft werden demnach zuerst die Schergeschwindigkeiten und Viskositäten im Kanal berechnet.

Zur Berechnung der lokalen Viskosität wird der Carreau-Arrhenius-Ansatz nach Gleichung 4.13 verwendet.

$$\eta = \frac{A}{(1 + B \cdot \dot{\gamma})^c} \quad (4.13)$$

η	Viskosität
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
A	Nullviskosität
B	Reziproke Übergangsgeschwindigkeit
C	Steigung der Viskositätskurve

Die Parameter A , B , und C wurden hierzu in Abschnitt 4.1 an einem HKR für die beiden Polymere bestimmt. Im Verlauf des Projekts wurde zur Berechnung der Kenngrößen Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$, Viskosität η und Füllgrad die Simulationssoftware SIGMA der Kunststofftechnik Paderborn genutzt. Die Schubspannungen τ an der Elementoberfläche kann hierbei aus dem Zusammenhang von Gleichung 4.14 ermittelt werden.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4.14)$$

Wird ein infinitesimal kleines Partikel im Kanal betrachtet, treten wie nachfolgend abgebildet Normal- und Schubspannungen in Abhängigkeit des Füllgrads und der Schergeschwindigkeiten auf.

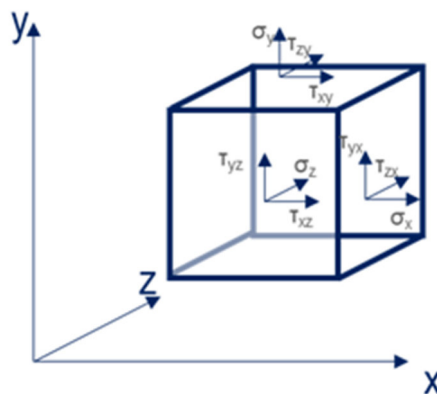


Abbildung 35: Schematische Abbildung eines infinitesimal kleinen Partikels im Schneckenkanal und der darauf wirkenden Spannungen

Die auftretenden Schergeschwindigkeiten können als Matrix dargestellt werden. Multipliziert mit der Viskosität ergeben sich die Spannungen an der Elementoberfläche wie in Gleichung 4.15.

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_x}{dx} & \frac{dv_x}{dy} & \frac{dv_x}{dz} \\ \frac{dv_y}{dx} & \frac{dv_y}{dy} & \frac{dv_y}{dz} \\ \frac{dv_z}{dx} & \frac{dv_z}{dy} & \frac{dv_z}{dz} \end{bmatrix} \cdot \eta = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Zur Vereinfachung wird eine laminare Strömung angenommen, wodurch sich keine Fließgeschwindigkeit in y-Richtung (von der Schnecke zum Zylinder) ergibt, folglich gibt es auch keine Schergeschwindigkeit in y-Richtung über der x- oder z-Komponente. Zudem wird davon ausgegangen, dass der Prozess sich in dem Element einem stationären Zustand befindet, wodurch eine zeitliche Abhängigkeit vernachlässigbar wird. Zur Modellierung der Kräfte am Schneckenelement werden somit $\frac{dv_x}{dy}$, $\frac{dv_z}{dy}$, $\frac{dv_x}{dz}$ und $\frac{dv_z}{dx}$ benötigt.

Die Schubspannungen werden im Anschluss auf die projizierten Flächen bezogen, auf die sie wirken. Es ergibt sich:

$$A_{Wand} = \bar{h}(x) \cdot l_{Element} \quad (4.16)$$

$$A_{Boden} = b_{max} \cdot l_{Element} \cdot f_{Grad} \quad (4.17)$$

$$A_{Kanal} = b_{max} \cdot \bar{h}(x) \cdot f_{Grad} \quad (4.18)$$

A_{Wand}	Projizierte Fläche der Stege
A_{Boden}	Projizierte Fläche des schmelzebedeckten Kanalbodens
A_{Kanal}	Projizierte Fläche des schmelzegefüllten Kanals
$l_{Element}$	Elementlänge
$\bar{h}(x)$	Mittlere Höhe des Kanals im Bereich der Teilfüllung
b_{max}	Kanalbreite
f_{Grad}	Füllgrad

Die Kräfte im Kanal lassen sich nachfolgender Gleichung berechnen:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{Wand} \\ A_{Boden} \\ A_{Kanal} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Hierbei handelt es sich um die Kräfte im Koordinatensystem in Kanalrichtung. Durch Transformation des Koordinatensystems in globale Ausrichtung zur Schnecke um den Steigungswinkel φ_s ergibt sich die Kraft F_z^* , welche zum Drehmoment beiträgt:

$$F_x \cdot \sin(\varphi_s) + F_z \cdot \cos(\varphi_s) = F_z^* \quad (4.20)$$

Die Transformation des Koordinatensystems des Kanals kann schematisch der nachfolgenden Abbildung 36 entnommen werden:

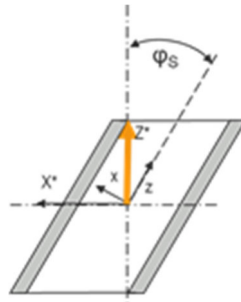


Abbildung 36: Abbildung eines Schneckenkanals und der Koordinatensystem-Transformation

4.7 Modellierung bis zum Ende der ersten vollgefüllten Zone

Zur Modellierung des Energieeintrags bis zum Ende der ersten vollgefüllten Zone wurden zunächst die vorliegenden Modelle von Westhues und Knieper mit den experimentellen Untersuchungen der ungefüllten Systeme bis zum Aufschmelzen verglichen. Dazu wurden die Versuchspunkte mit Hilfe der Software SIGMA simuliert und hinsichtlich des Drehmoments ausgewertet.

Die Ergebnisse wurden mit einem Mittelwert aus den beiden Schneckendrehmomenten in den experimentellen Untersuchungen gegenübergestellt.

Da die Ergebnisse, wie den nachfolgenden Kapiteln zu entnehmen, für die Aufschmelzzone bereits sehr gute Übereinstimmung zeigten, wurde hier keine Anpassung der Modelle vorgenommen.

Für die Feststoffförderzone wurden experimentell Drehmomente ermittelt. Hier wurde überprüft, ob diese nur in einem so geringen Maß zum Energieeintrag beitragen, dass diese weiterhin begründet vernachlässigt bleiben können.

In den Ergebnissen zeigte sich bereits im Bereich der Feststoffförderung und des Aufschmelzens ein Unterschied zwischen den beiden Schnecken, weshalb diese Bereiche dahingehend näher betrachtet wurden.

Um den Unterschied zwischen den beiden Schnecken näher zu untersuchen, wurden zusätzliche experimentelle Untersuchungen nötig, da vermutet wird, dass der Unterschied zwischen den Schnecken aus einer asymmetrischen Förderung des Kunststoffes resultiert, diese wurden in Kapitel 4.4 durchgeführt und für die Modellierung ausgewertet. Hierbei handelt es sich um die Untersuchungen mit dem speziell gefertigten Werkzeug, mit dessen Hilfe die Granulatströme getrennt aufgefangen werden können.

Zudem wurden unterschiedliche Faktoren hinsichtlich des Einflusses auf den Drehmomentunterschied zwischen den Schnecken analysiert. Dazu wurde ein Quotient aus den beiden Drehmomentmessungen der Schnecken gebildet. Je größer dabei die Lastendifferenz zwischen den beiden Extruderschnecken ist, desto größer ist die Abweichung des Quotienten vom Idealwert von 1 (entspricht einer genau gleichmäßigen Lastverteilung zwischen beiden Schnecken). Betrachtet werden die Einflüsse von Drehzahl, Durchsatz und Schneckenkonfiguration auf die einzelnen Zonen im Extruder. Sollte sich hier ein definiertes Muster zeigen, kann ein Vorhersagemodell für die Lastverteilung abgeleitet werden.

4.8 Validierung Simulationsergebnisse mit experimentellen Untersuchungen

Die in Abschnitt 4.4 und 4.5 durchgeführten experimentellen Untersuchungen und in Abschnitt 4.6 und 4.7 verwendeten Modelle wurden nun miteinander verglichen. Zunächst wurden allgemein auftretende Effekte bei Änderung der Faktoren: Drehzahl und Durchsatz sowie die Abhängigkeit von der Zylindertemperatur verglichen. Anschließend wurden die Absolutwerte von den experimentellen Versuchen und den Simulationen gegenübergestellt. Hierzu wurde der berechnete Simulationswert, von der Gesamtleistung am Ende der zu betrachtenden Schneckenzone, mit dem experimentell aufgezeichneten Gesamtdrehmoment der Schneckenkonfiguration verglichen.

Die simulierten Verläufe zwischen den experimentell ermittelten Messpunkten können nicht überprüft werden, da die Messmethode in den experimentellen Untersuchungen aufgrund der definierten Materialzugabepositionen keine feinere Auflösung des Verlaufs zulässt.

4.9 Zusammenführung in einem Excel-Berechnungs-Tool

Weiterhin fand die Entwicklung einer Berechnungshilfe statt, womit der Energieeintrag einzelner Elemente sowie Schneckenzone abgeschätzt werden kann. Damit können die späteren Anwender eine Handlungsempfehlung ableiten, wie diese ihre Prozesse auslegen bzw. anpassen müssen, um Überlastungen der Anlage zu vermeiden und eine Schädigung des Kunststoffes zu minimieren.

Dazu war es nötig, zuerst eine Möglichkeit der Dateneingabe zu schaffen, in die der Anwender Maschinen-, Material- und Prozessdaten einspeisen kann, welche zur Berechnung nötig sind.

Auf Grundlage der Modellierung für die Schmelzeförderung wurde dann die Berechnung des Drehmoments durch Ermittlung der Kräfte sowie des Hebelarms umgesetzt. Für die Berechnung der am Schneckenelement auftretenden Kraft, wurde das Tool so ausgelegt, dass dieses die Schergeschwindigkeit und die zugehörige lokale Viskosität der Schmelze berechnet, um daraus die Schubkräfte abzuleiten. Mit Hilfe der Kanalgeometrie und des Füllgrads kann das Tool im Anschluss den Hebelarm errechnen, mit dessen Hilfe das Drehmoment berechnet wird.

In einer Übersicht werden dann die lokalen Drehmomente und Energieeinträge sowie deren Verläufe über der Schnecke abgebildet. Der Anwender kann zusätzlich Grenzen für die lokalen Drehmomente hinterlegen. Sobald diese überschritten werden, färben sich entsprechende Bereiche in der Übersicht rot und zeigen somit Handlungsbedarf auf.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Auswahl, Ermittlung und Beschreibung der Materialien

Die Materialsysteme für die nachfolgenden experimentellen Arbeiten wurden festgelegt. Hierbei fiel die Wahl auf PP und PS als Basispolymere sowie ggf. für weiterführende Untersuchungen Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) und Polymethylmethacrylat (PMMA). Als Zusatzstoffe wurden Magnesiumhydroxid sowie optional TiO₂ festgelegt.

Im Hinblick auf die Simulationsarbeiten im Projekt, wurde mit PP und PS somit ein teilkristalliner und amorpher Standardthermoplast ausgewählt. Für PP wurde Moplen HP 500N der Fa. Basell Polyolefine GmbH und für PS 454 N der Fa. INEOS Styrolution Group GmbH ausgesucht, da beide Materialien bereits für Simulationsarbeiten genutzt wurden. Beide Materialien konnten in ausreichender Menge beschafft werden. Die notwendigen Materialdaten (thermodynamische und rheologische Eigenschaften) konnten bereits aus bestehenden Datenbanken entnommen werden oder wurden entsprechend ermittelt (siehe beispielhaft Abbildung 37 und Abbildung 38). Somit standen alle notwendigen Materialdaten (wie Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Dichte, spezifische Wärmekapazität) für die Simulationsarbeiten zur Verfügung.

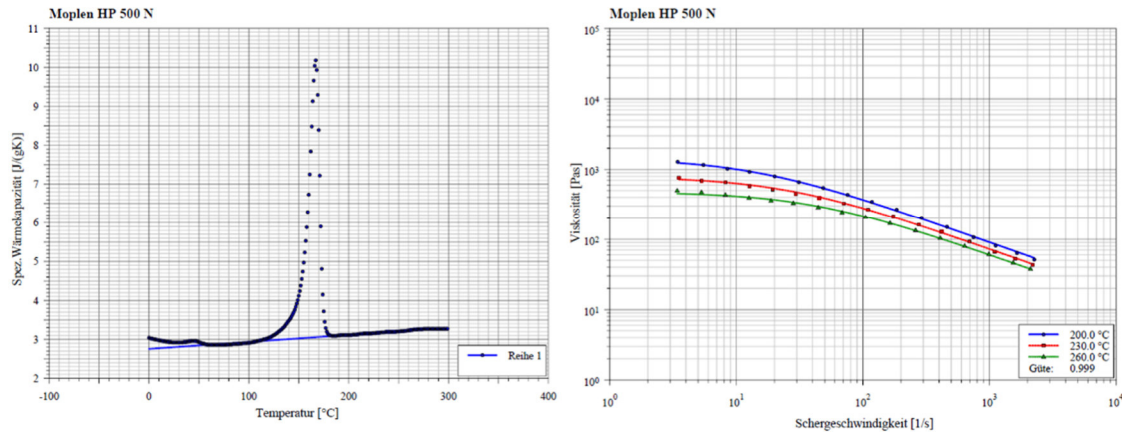


Abbildung 37: Spezifische Wärmekapazität (li.) und Viskosität (re.) vom PP-Material

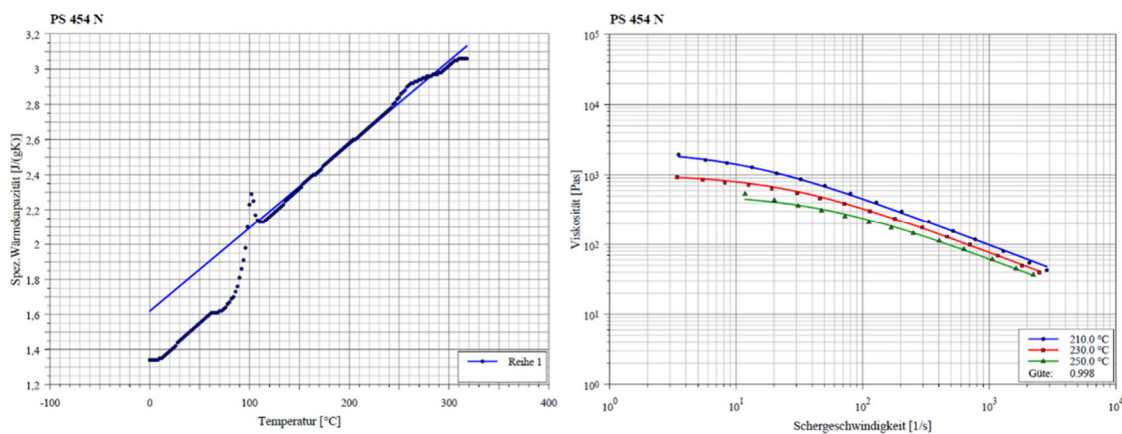


Abbildung 38: Spezifische Wärmekapazität (li.) und Viskosität (re.) vom PS-Material

5.2 Voruntersuchungen zur Drehmoment-Messsystementwicklung

Zum Abschätzen der Messeffektausprägung und daraus ableiten der Spezifizierung der erforderlichen Messhardware fanden, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, theoretische Herleitungen und experimentelle Untersuchungen zur Korrelation von Drehmoment und Verdrehwinkel statt.

Entsprechend der theoretischen Berechnung aus Gleichung 4.1 ergab sich für eine ZSK 26, bei einem Schubmodul von 81 GPa, einem Kernwellenradius (ohne Verzahnung) von 6 mm und vereinfachten Annahmen (axial betrachtete konstante runde Querschnittfläche sowie konstante Materialeigenschaften), entsprechend den jeweiligen Schneckenlängen, ein linearer Zusammenhang zwischen Verdrehwinkel und Drehmoment, siehe Abbildung 39. Die linearen Steigungen stellen dabei ein Maß für die Korrelation zwischen Verdrehwinkel und Drehmoment dar. Somit würde bei der Standard-schneckenlänge von 44 L/D jeder Drehmomentanstieg (1 Nm) zu einer Verdrehung der Welle von $0,4^\circ$ führen.

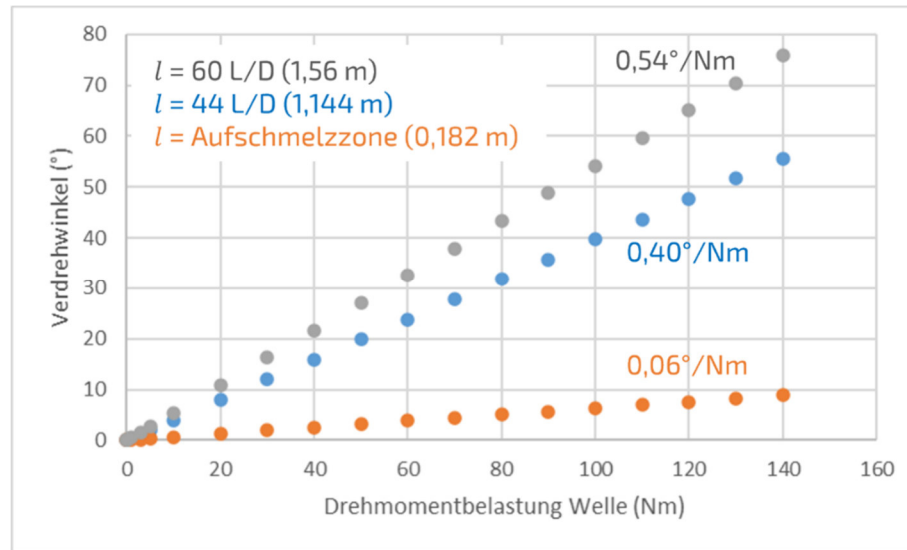


Abbildung 39: Theoretische Berechnung des linearen Zusammenhangs von Verdrehwinkel und Drehmoment für eine ZSK 26 bei unterschiedlicher Schneckenlänge l .

Die Ergebnisse aus den experimentellen Verdrehwinkel-Messungen bei manuell aufgebrachtter Drehmomentbelastung mittels Drehmomentschlüssel (siehe Abbildung 8) zeigten ebenfalls das erwartete linear-elastische Verhalten der Torsion bei Zunahme des Drehmoments auf. Beispielhaft sind in Abbildung 40 die gemessenen Verdrehwinkel für die unterschiedlichen Drehmomentbelastungen (20 – 60 Nm) für einen Schnekenaufbau bestehend nur aus FE bei einer Länge von $44 L/D$ (siehe Abbildung 9). Die Steigung mit $0,415^\circ/\text{Nm}$ hieraus kann als Korrelationsverhältnis zwischen Drehmoment und Verdrehwinkel herangezogen werden.

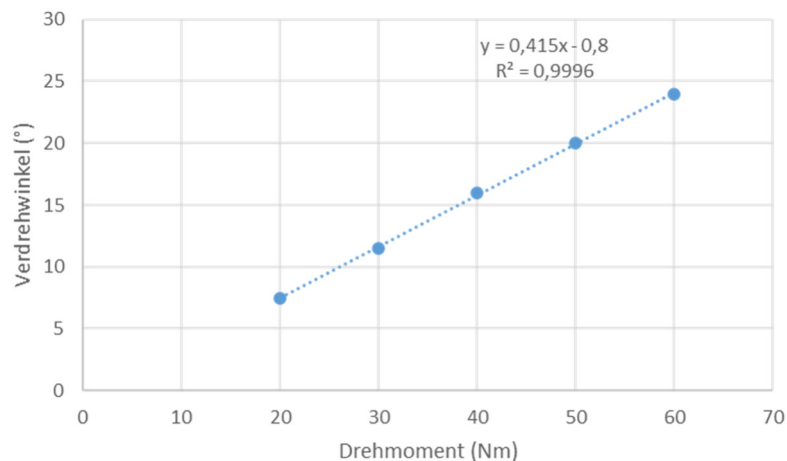


Abbildung 40: Gemessene Verdrehwinkel bei, mittels Drehmomentschlüssel, manuell aufgetragenen Drehmomenten auf einer Schnecke mit reinen FE (Länge 36 mm, Steigung 36 mm) bei einer Länge von $44 L/D$. Die Steigung von $0,415^\circ/\text{Nm}$, stellt die Korrelation zwischen Torsion und Drehmoment dar.

Abbildung 41 zeigt exemplarisch die ermittelte Drehmoment-Torsion-Korrelation für verschiedene Schneckenkonfigurationen mit unterschiedlichen Schneckenelementen und Längen.

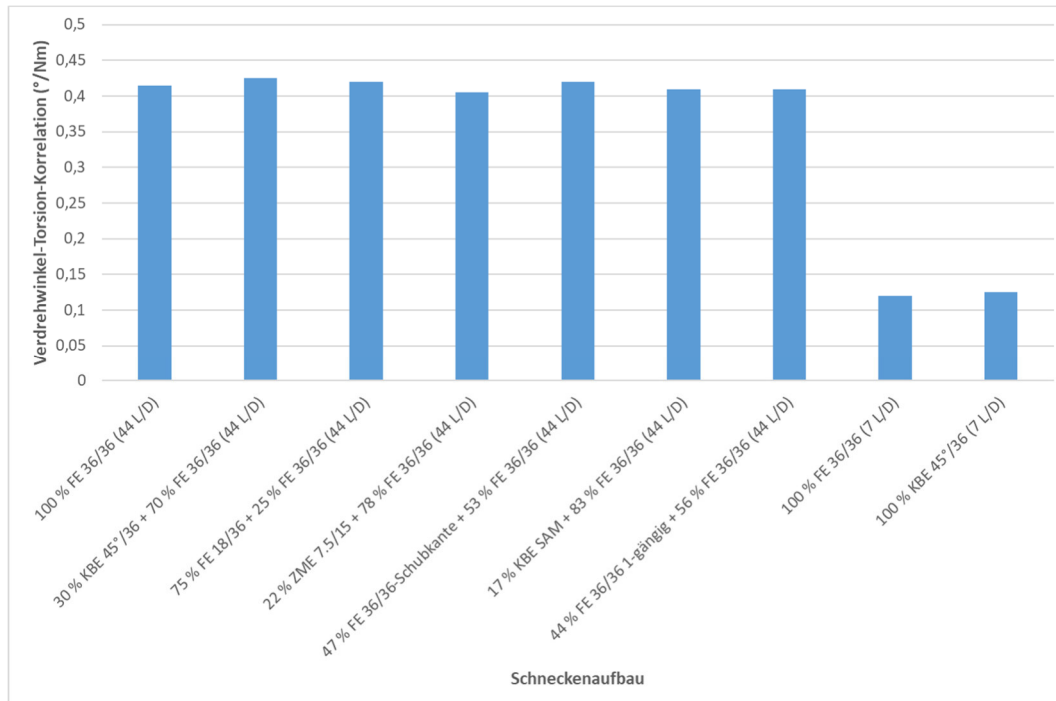


Abbildung 41: Experimentell ermittelte Drehmoment-Verdrehwinkel-Korrelation von verschiedenen Schneckenkonfigurationen. Die Prozentangaben beziehen sich auf den Längenanteil der Schneckenelemente. Dabei kamen, bei einer Schneckenlänge von 44 L/D (1.144 mm) und 7 L/D (Aufschmelzbereich, 182 mm), ein- und zweigängige Fördererlemente (FE) sowie Schubkanten-FE mit einer Steigung und Länge von 36 mm, Knetblockelemente (KBE) mit 5 Blöcken bei 45° Versatz und einer Länge von 36 mm, Zahnmischelemente (ZME) mit einer Steigung von 7,5° und einer Länge von 15 mm sowie KBE-SAM (halbierter Knetblocksteg) mit einem Winkelversatz von 30 bzw. 45° und einer Länge von 20 bzw. 28 mm zum Einsatz.

Es zeigt sich, dass die unterschiedlichen Schneckenelemente nur einen minimalen Einfluss auf die Drehmoment-Torsion-Korrelation aufweisen. Dies liegt vermutlich daran, wie bereits bei der theoretischen Berechnung berücksichtigt, dass durch die geringe Vorspannkraft der Schneckenspitze, eine geringe Kraftübertragung zwischen den Schneckenelementen stattfindet und somit das Drehmoment hauptsächlich direkt von der Kernwelle aufgenommen wird. Eine Aussage, ob diese Annahme auch im schmelzegefüllten Extruder zutrifft, kann nicht getroffen werden. Dort ist auch eher von einer flächigen statt reinen punktuellen Belastung der Schneckenelemente auszugehen. Für die hier vorgesehene Messabschätzung wird dies jedoch, als Richtwert, als ausreichend angesehen. Der Schne-

ckenbesatz wird auf Grundlage dieser Untersuchungen als vernachlässigbar für den Zusammenhang von aufgebrachtem Drehmoment und Verdrehwinkel der Welle angenommen.

In Abbildung 42 ist der Abgleich zwischen theoretisch berechneter und experimentell gemessener Drehmoment-Torsion-Beziehung aufgetragen. Da beide Ergebnisse eng beieinander liegen, wird die Annahme von $0,4 \text{ }^\circ/\text{Nm}$ für die weiteren Berechnungen genutzt.

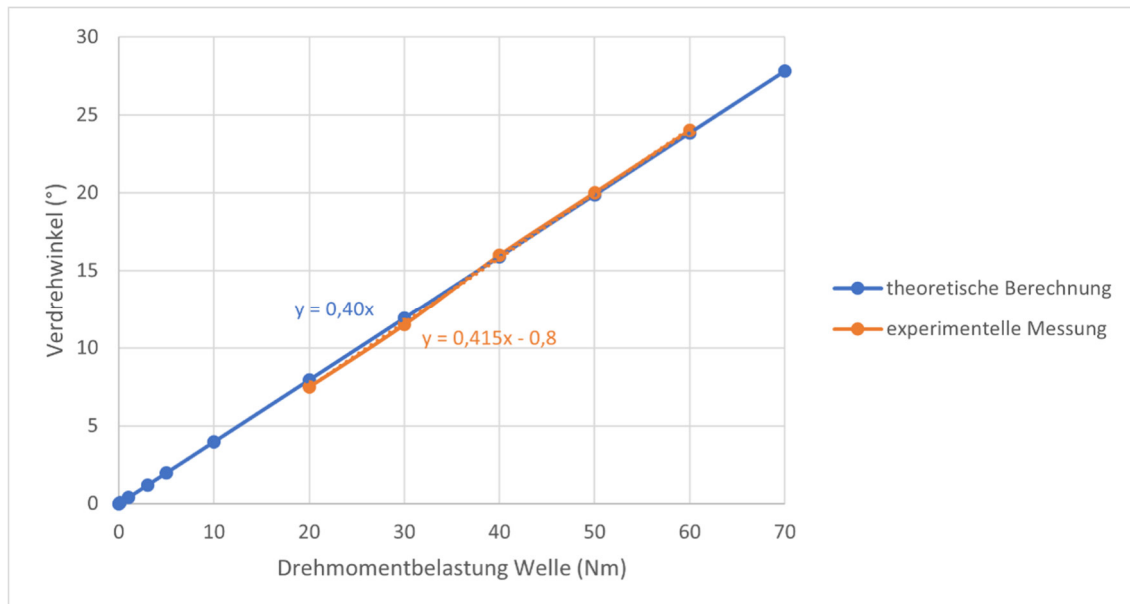


Abbildung 42: Auftragung von theoretischer Berechnung und experimenteller Messung der Drehmoment-Torsions-Korrelation für eine $44 L/D$ -Schnecke. Beide Kurven zeigen ein sehr ähnliches Verhalten auf. Für die experimentelle Messung wurde repräsentativ der Schneckenauflauf mit reinen FE gewählt.

Auf Basis der ermittelten Drehmoment-Torsion-Korrelation und Gleichung 4.3 konnte die Phasendifferenz bzw. die somit erforderliche Abtastrate für die Messkomponenten ermittelt werden. In Abbildung 43 sind die Abtastraten für unterschiedliche Schnecken-drehzahlen ($50 - 1.000 \text{ min}^{-1}$) für die gesamte Schneckenlänge ($44 L/D$) und in Abbildung 44 für einen Längenabstand bis zur Aufschmelzzone ($7 L/D$) aufgetragen. Ableitend aus den Ergebnissen ergibt sich z. B. somit eine theoretisch mindesterforderliche Messfrequenz, für die Erfassung von 10 Nm bei der Gesamtwellenlänge und einer Schnecken-drehzahl von 200 min^{-1} von ca. 300 Hz

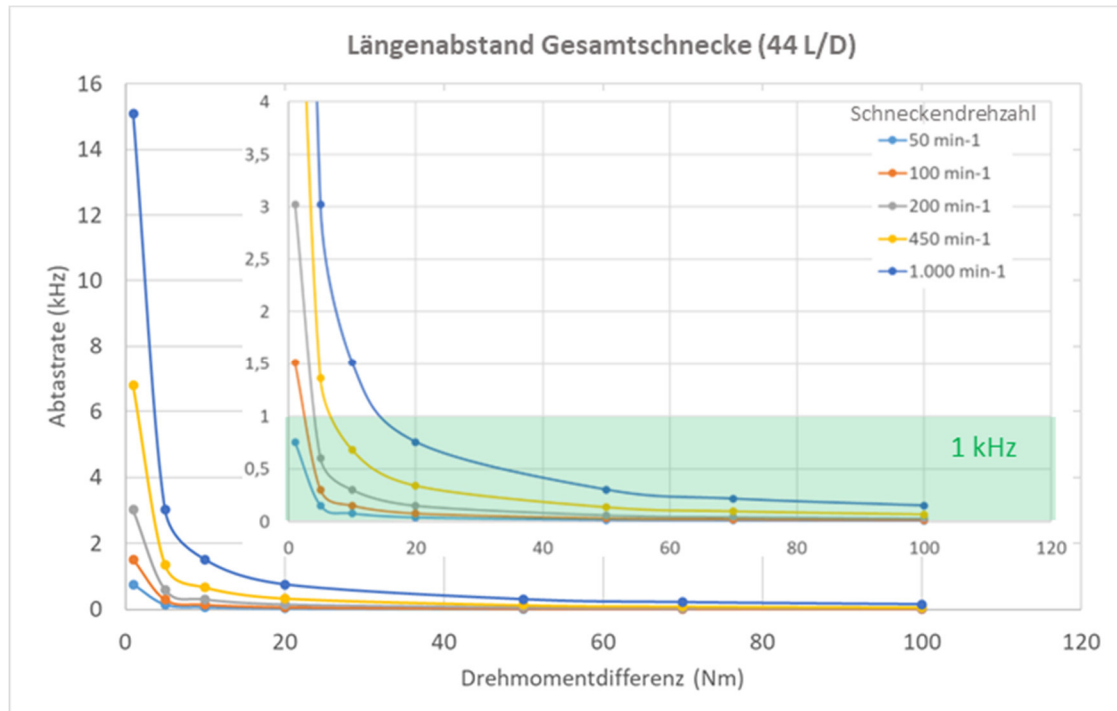


Abbildung 43: Erforderliche Abtastraten für die zeitliche Erfassung der Drehmomentunterschiede bei verschiedenen Schneckendrehzahlen bei der Gesamtschneckenlänge. Alle Punkte, die innerhalb des grünen Bereichs liegen, können bei einer Abtastrate von 1 kHz erfasst werden.

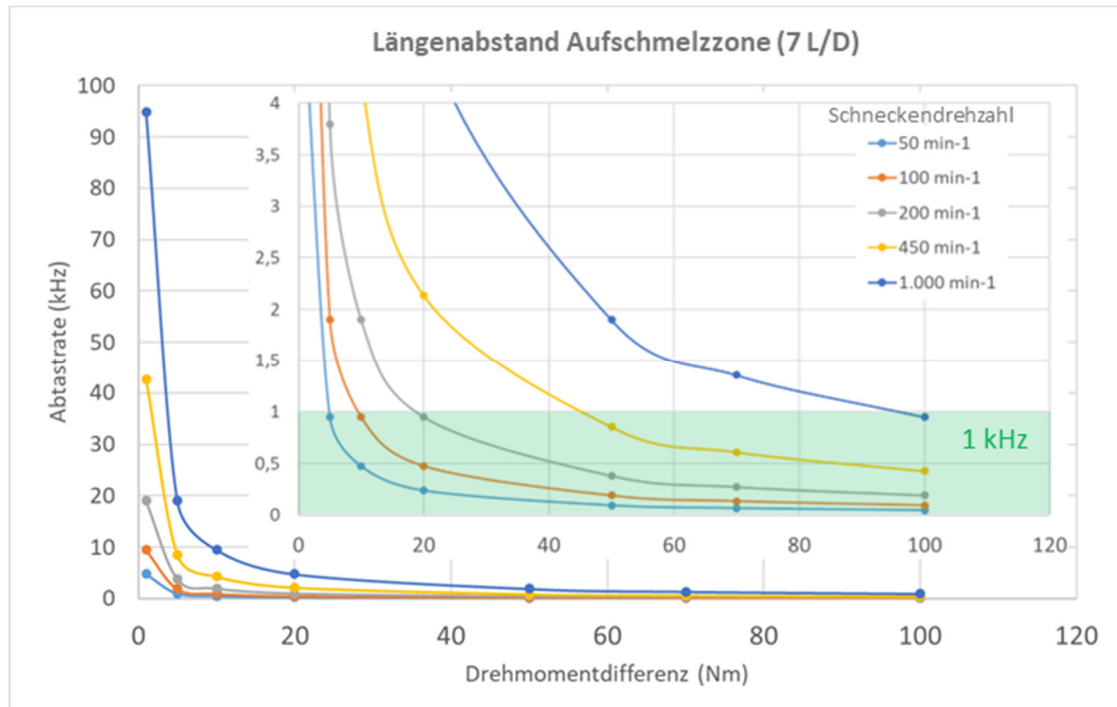


Abbildung 44: Abtastraten, die zur Erfassung der Drehmomentänderungen bei den unterschiedlichen Schneckendrehzahlen erforderlich sind. Der grüne Bereich gibt an, welche Drehmomentänderungen bei welchen Drehzahlen mit 1 kHz detektiert werden können.

Auf Basis der Ergebnisse und unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren (vgl. Nyquist-Shannon-Abtasttheorem) sowie der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wurde eine Abtastrate von 1 kHz gewählt.

Weiterhin fand die Betrachtung der unterschiedlichen Sensorkonzepte zur Eignung der Charakterisierung der Schneckenumfangskonturfunktion statt. Diese sollen als Triggergeber zur Ermittlung der Phasendifferenz dienen. Auf Basis des Versuchs- und Messaufbaus aus Abschnitt 5.2, kamen die Sensoren im vollgefüllten Schmelzebereich über einem FE zum Einsatz. In Abbildung 45 ist Messverlauf vom Massedruck mittels eines IMPACT-Sensor (Fa. Gefran Deutschland GmbH), siehe Abbildung 10, aufgeführt. Der Massedrucksensor wurde gezielt ohne integrierte Signalglättung, eine Art Mittelwertbildung, betrieben, um das Drucksignal möglichst zeitlich hochauflösend erfassen zu können. Die Messkurve zeigt aufgrund des langsameren Druckaufbau (vor dem Steg) und schnelleren Druckabbau (nach dem Steg), dabei einen sägezahnartigen Verlauf auf. Dieser ergibt sich aus dem Druckanstieg an der Sensorspitze infolge der temporären Belastung der Schmelze zwischen Schneckensteg und Gehäusewand. Dabei baut sich der Druck immer mehr auf und fällt nach dem Passieren des Stegs sofort wieder ab. Zur eindeutigen Zuordnung der Signalpeaks zum Passieren des Schneckenstegs erfolgte auch eine Bandpassfilterung des Drucksignals. Dabei wurde, entsprechend Gleichung 4.5, der Signalverlauf nur mit den Frequenzanteilen f_{Steg} zugelassen, welche entsprechend der Schneckendrehzahl und Steganzahl des FE zutreffen.

In Abbildung 45 ist sowohl der Messwertverlauf als auch der bandpass-gefilterte Messwertverlauf von der Druckmessung aufgeführt. Beide Kurven zeigen ein gleiches zeitliches Verhalten auf, sodass die Druckschwankungen eindeutig dem Passieren der Schneckenstege zuzuordnen sind.

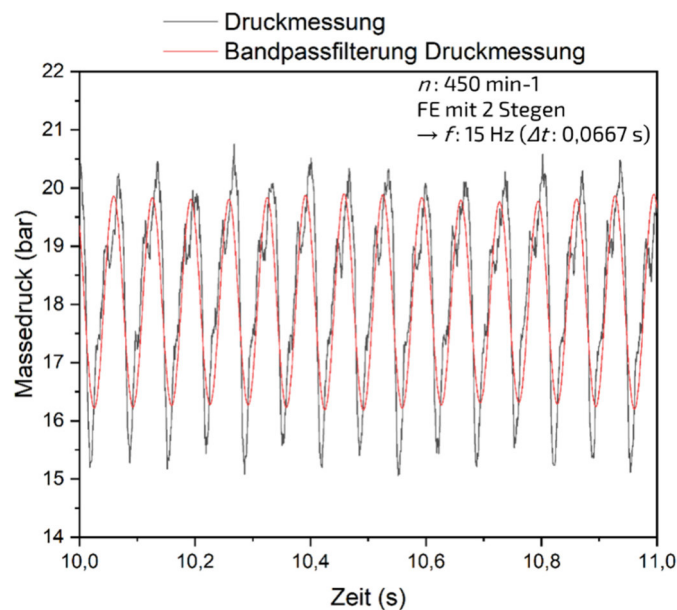


Abbildung 45: Messkurve vom Drucksignal (schwarz) und bandpassgefilterten Drucksignal (rot) bei einem FE. Die Frequenzen des Bandpassfilters (13 – 17 Hz) liegen im Bereich der erwarteten Stegbewegung (15 Hz bzw. alle 0,0667 s). Der Messkurvenverlauf des Drucksignals kann als sägezahnartig beschrieben werden.

Neben dem Massedruck wurde auch die Massetemperatur als Messgröße zur Beschreibung der Schneckenumfangskonturfunktion betrachtet. Hierbei kam ein Infrarot (IR)-Sensor zum Einsatz. Bei diesem Messverfahren kann eine sehr hohe Messdynamik erfolgen, da im Gegensatz zum Thermoelement (Seebeck-Effekt) und Widerstandsthermometer kein eigenes Messvolumen die Schmelztemperatur erst übernehmen muss, sondern durch die Emissionsstrahlung der Messeffekt direkt aus dem Schmelzevolumen kommt. Als Temperatursensor wurde hier ein IR-THERM (Fa. FOS Messtechnik GmbH) genutzt (siehe Abbildung 10). In Abbildung 46 ist der sinusartige Messverlauf des IR-Temperatursensors über einem FE aufgetragen. Aufgrund des sehr geringen Spalts zwischen Schneckensteg und Gehäusewand bzw. Sensorspitze, tritt eine temporäre hohe Scherrate durch das Abstreifen des Stegs auf. Diese hohe Scherrate bewirkt einen örtlichen lokalen kurzzeitigen Massetemperaturanstieg, der messbar ist. Dies wird in Abbildung 46 deutlich, da das zeitliche Messverhalten der Massetemperatur mit dem gefilterten Signalverlauf, entsprechend Steganzahl und Schneckendrehzahl, übereinstimmt. Somit sind die Temperaturänderungen auf das Passieren des Schneckenstegs zurückzuführen.

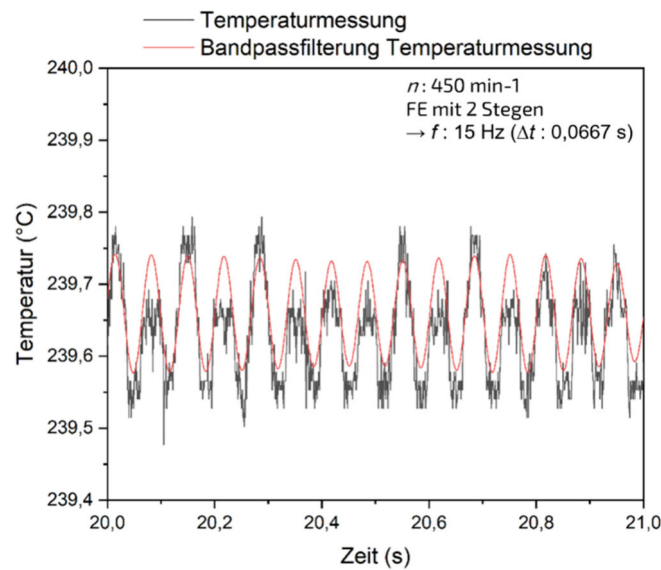


Abbildung 46: IR-Temperaturmessung (schwarz) und gefiltertes Messsignal (13 - 17 Hz, rot) über einem FE. Der Temperaturmessverlauf kann als sinusartig beschrieben werden.

Als weiteres Messkonzept wurde ein kapazitiver Sensor genutzt. Das Messprinzip ist zu vergleichen mit dem eines Kondensators, bei dem sich der Plattenabstand oder die Permittivität ändert. Somit fungiert dieser wie ein Näherungssensor, welcher den Abstand von Messspitze zur metallischen Schneckenoberfläche charakterisiert. Wenn der Schneckensteg in den Messbereich des Sensors eintritt, führt dies zu einer Spannungsänderung im Sensor und zugehörigem Abfall im Messsignal. Kunststoffgranulat bzw. -schmelze oder Luft haben als Dielektrikum keinen nennenswerten Einfluss auf die Messung. Da bisher am Markt kein kapazitiver Sensor für den Einsatz im Extruder verfügbar war, wurde dieser von Fa. WayCon GmbH für die erforderlichen Anforderungen ausgelegt. Aufgrund der Standardeinbausituation von Sensoren in der Extrusion mit dem $\frac{1}{2}$ “-20 UNF-Gewinde musste der Schneckenstegdurchmesser < 8 mm betragen. Aufgrund der geringen Größe der Messspitze betrug der Messbereich des Sensors $< 0,5$ mm. In Abbildung 47 ist der Messverlauf des kapazitiven Sensors über einem FE zu sehen. Da der Großteil der Schneckenoberfläche (Tal und Flanke) sich außerhalb des Messbereichs befand, lag hier keine Signaländerung vor. Erst bei Eintritt des Schneckenstegs in den Messbereich des Sensors konnte ein Spannungsabfall des Messsignals beobachtet werden. Eine Filterung des Messsignals entsprechend der Schneckendrehzahl und Steganzahl zeigt auf, dass die impulsartigen Signaländerungen auf das Passieren der Schneckenstege zurückzuführen sind.

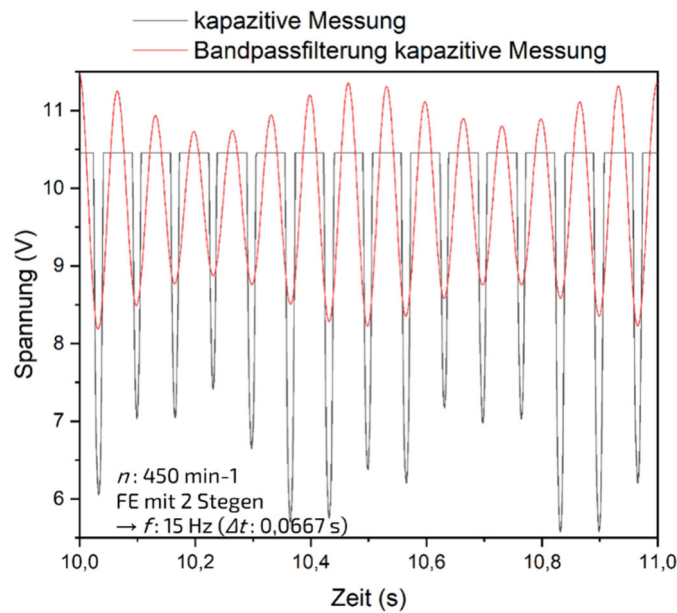


Abbildung 47: Gemessenes (schwarz) und gefiltertes (13 – 17 Hz, rot) Messsignal des kapazitiven Sensors. Der Messkurvenverlauf kann als impulsartig beschrieben werden.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass alle Sensorkonzepte die Schneckenumfangskonturfunktion erfassen können, bzw. im Fall vom kapazitiven Sensor nur die Schneckenstege. Somit wiesen alle Sensorkonzepte einen charakteristischen Verlauf auf, welche eine Triggermöglichkeit (wiederkehrende eindeutige Stelle im Signalverlauf für die Berechnung der Phasendifferenz zwischen zwei Messsignalen) bieten. Auch wäre eine Kombination von verschiedenen Sensoren (da mindestens zwei Messstellen benötigt werden) denkbar. Da jedoch die zu messenden Verdrehwinkel relativ klein sind, ist eine möglichst zeitlich scharfe Triggergebung erforderlich. Hier bietet der kapazitive Sensor mit seinem impulsartigen Messverlauf einen deutlichen Vorteil gegenüber den anderen beiden Sensorkonzepten, deren Messverläufe wesentlich unstetiger sind. Darüber hinaus hat der kapazitive Sensor den Vorteil, dass dieser auch in teilgefüllten Bereichen (z. B. vor der Aufschmelzzone) das Passieren des Schneckenstegs abbilden kann. Massedruck- und -temperatursensoren, können nur die Stegbewegung erfassen, solange die Druck- oder Temperaturänderung von der Schmelze erfolgt. Nachteil des kapazitiven Sensors ist sein sehr geringer Messbereich ($< 0,5$ mm). Da die zeitlich eindeutig zuordnungsbare Ermittlung eines Triggersignal für die Messsystementwicklung zur orts aufgelösten Drehmomentmessung elementar ist, kann nur der kapazitive Sensor verwendet werden.

5.3 Drehmoment-Messsystementwicklung

Im Zuge der Arbeiten konnte der Versuchsaufbau umgesetzt werden. Dies betraf sowohl die Umsetzung des Messsystems, auf Basis der Ergebnisse aus Abschnitt 5.2, sowie den Versuchsaufbau. Softwareseitig wurde ein LabVIEW-Programm erstellt, siehe Abbildung 48, welches die Datenzusammenführung, -visualisierung und -aufzeichnung ermöglicht. Die Steuerung des Programms findet über den Rechner statt, die Datenaufzeichnung erfolgt hierbei jedoch zuerst auf der DAQ-Einheit selbst. Somit sind weniger Arbeitsschritte des Rechners notwendig, womit die erforderliche hohe Abtastrate von 1 kHz gewährleistet werden kann. Die Datenpakete können nachträglich von der DAQ-Einheit transferiert werden.

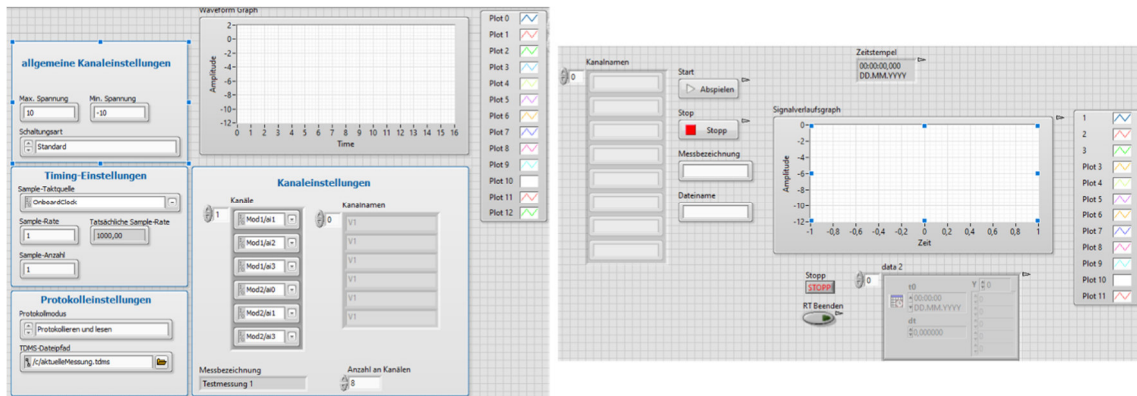


Abbildung 48: Screenshots der zwei Bedienoberflächen, die mittels LabVIEW-Software erstellt wurden, zur Signalzuweisung der DAQ-Einheit und Aufzeichnung (links) sowie Visualisierung (rechts) der Messsignale.

Hardwareseitig wurden alle Schnittstellen der Sensoren, Messverstärker, DAQ-Einheit und Rechner aufeinander abgestimmt. Hierbei wurde auf eine größtmögliche Flexibilität hinsichtlich der verwendbaren Sensoren geachtet, da die Arbeiten aus Abschnitt 4.2 an dieser Stelle noch ausstanden. Für den verfahrenstechnischen Aufbau wurde eine ZSK 26 Mc18 (Fa. Coperion GmbH) genutzt. Zur Integration der Sensoren direkt über den Schneckenelementen wurde die Messeinsätze für die Entgasungsgehäuse des Extruders ausgelegt, gezeichnet und gefertigt (siehe Abbildung 12). Somit war ein vollständiger Versuchsaufbau am SKZ vorhanden (siehe Abbildung 11).

Auf Basis des Versuchsaufbaus fanden, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, die Untersuchungen zur Drehmoment-Messsystementwicklung statt. Dabei wurde der Messansatz evaluiert. Die Messaufzeichnung erfolgte sowohl bei konstantem Prozesszustand (Versuchspunkte) als auch bei der Prozessänderung zwischen den Versuchspunkten (Übergang). Nach Abschluss der experimentellen Untersuchungen lagen eine Vielzahl von

Messdaten (Daten von den Sensoren über den Schneckenelementen) und zugehörigen Prozessdaten (Materialdurchsatz, Schneckendrehzahl, Gesamtdrehmoment der Anlage, Massetemperatur und -druck am Düsenwerkzeug etc.) sowie Versuchsrahmenbedingungen (Messposition, Schneckenkonfiguration, Material etc.) vor. Dies stellte am Ende der experimentellen Untersuchungen eine breite Datenbasis dar. Auf dieser Basis fand nachfolgend die Messdatenauswertung statt. Dabei konnte, nach Ermittlung der Phasendifferenzen der Sensorsignalverläufe bei den Versuchspunkten, diese mit dem Gesamtdrehmoment der Anlagensteuerung abgeglichen werden. Dies wird im Folgenden beispielhaft aufgeführt.

Als Schneckenkonfiguration diene, wie in Abbildung 49 aufgeführt, ein verkürzter Schneckenbereich (ca. $25 L/D$), der neben FE nur aus einer Aufschmelzzone mit KBE bestand. Die Platzierung der kapazitiven Sensoren erfolgte zwischen der Granulatzugabe und der Aufschmelzzone sowie kurz vor der Schnecken spitze. Somit sollte der Einflussbereich des auftretenden Gesamtdrehmoments der Schnecke, durch die Granulatförderung, Plastifizierung und Schmelzeförderung, charakterisiert werden und damit ein Abgleich mit dem Gesamtdrehmoment der Anlagensteuerung möglich sein.

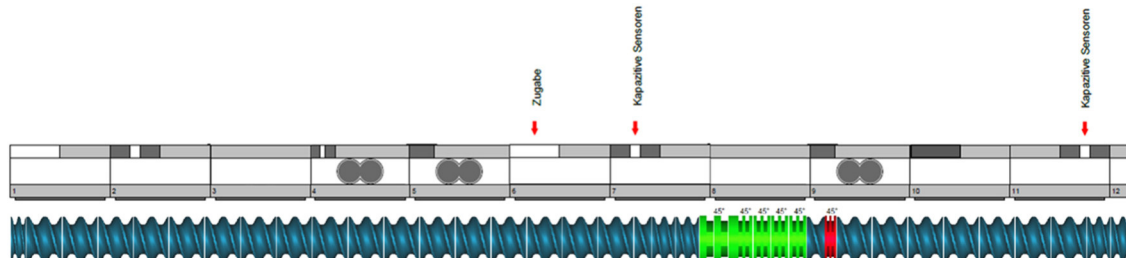


Abbildung 49: Schneckenkonfiguration mit reiner Aufschmelzzone (Förderrichtung von links nach rechts) bei Zugabe in Gehäuse 6 sowie Platzierung der kapazitiven Sensoren in Gehäuse 7 und 11.

Die Versuchsreihe erfolgte mit PP-Material bei einer Schneckendrehzahl von 450 min^{-1} . In Abbildung 50 sind die Signalverläufe der beiden kapazitiven Sensoren bei konstanten Prozesszustand bei einem Materialdurchsatz von 15 kg/h aufgetragen. Der Materialdurchsatz ergab dabei ein Gesamtdrehmoment von $35,7 \text{ Nm}$ laut Anlagensteuerung. Das örtliche Minimum des Signalverlaufs (impulsartige Spannungsabnahme beim Passieren des Schneckenstegs) wurde dabei als Triggergeber genutzt. Somit konnte die Phasendifferenz von $0,029 \text{ s}$ zwischen den beiden Sensorsignalen ermittelt werden.

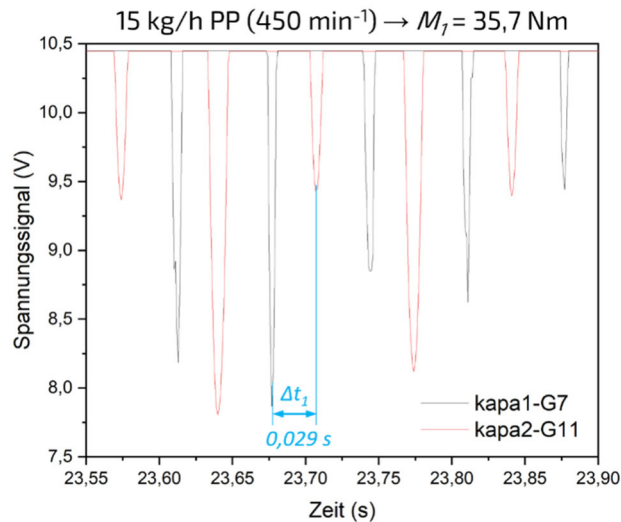


Abbildung 50: Signalverlauf der beiden kapazitiven Sensoren vor der Aufschmelzzone (Extrudergehäuse 7, siehe Abbildung 49, schwarz) und vor der Schneckenspitze (Gehäuse 11, rot) zu einem beliebigen Zeitausschnitt (konstante Prozessparameter). Zwischen den beiden Signalverläufen kann die Phasendifferenz von 0,029 s ermittelt werden.

Die Phasendifferenz kann noch keine alleinige Aussage über den Verdrehwinkel bzw. das Drehmoment liefern, da diese hauptsächlich vom Winkelversatz der Schneckenstege der beiden FE im unbelasteten Zustand der Schnecke, abhängen. Somit ist erst ein Abgleich zu einem weiteren Versuchspunkt notwendig. In Abbildung 51 sind bei gleicher Drehzahl (450 min^{-1}) die Signalverläufe, bei kontantem Prozesszustand, bei einem PP-Materialdurchsatz von 45 kg/h aufgetragen. Hier lag ein Gesamtdrehmoment laut Anlagensteuerung von $87,5 \text{ Nm}$ vor. Die Ermittlung der Phasendifferenz der beiden Signalverläufe ergab dabei $0,031 \text{ s}$. Im Signalverlauf zeigt sich deutlich, dass sich aufgrund der Durchsatzänderung der Abstand von den Schneckenstegen zu den Sensorspitzen vergrößert hat und teilweise außerhalb des Messbereichs der kapazitiven Sensoren von $0,5 \text{ mm}$ lag. Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, wurde unter Berücksichtigung der Dichtheit gegen Schmelzeaustritt, versucht, über die Einschraubtiefe der Sensoren den Abstand zwischen Sensorspitze und Schneckenstege auszugleichen. Die radiale Veränderung der Sensorposition (Einschraubtiefe) hat dabei keinen Einfluss auf die zeitliche Charakterisierung der Stege und verursacht somit keine Verfälschung der Messauswertung, da lediglich die Signalstärke beeinflusst wird.

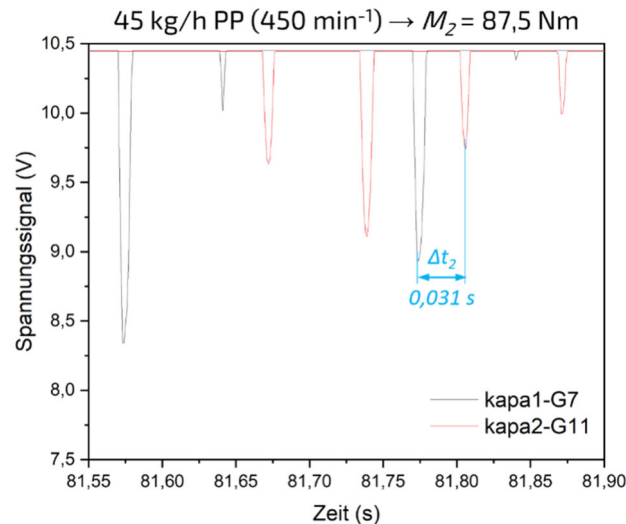


Abbildung 51: Zeitlicher Verlauf der kapazitiven Sensoren vor der Aufschmelzzone (schwarz, Extrudergehäuse 7) und vor der Schneckenspitze (rot, Gehäuse 11). Gegenüber Abbildung 50 hat sich nur der Materialdurchsatz auf 45 kg/h und somit das Gesamtdrehmoment laut Anlagensteuerung auf 87,5 Nm erhöht. Die Phasendifferenz zwischen den beiden Signalverläufen beträgt nun 0,031 s.

Auf Basis der ermittelten Phasendifferenzen und bekannten Drehmomenten, können diese, wie in Abbildung 52 aufgeführt, gegeneinander aufgetragen werden. Hier ist noch ein weiterer Versuchspunkt mit einem Durchsatz von 55 kg/h aufgeführt. Die Bestimmung der Phasendifferenz innerhalb der Versuchspunkte erfolgte bei 10 verschiedenen Zeitpunkten, gleichmäßig über die Messdauer verteilt, und ergab so die Standardabweichung in Abbildung 52. Die Standardabweichung des Drehmoments ergab sich aus den Drehmomentschwankungen der Anlagensteuerung während der Messdauer des Versuchspunkts.

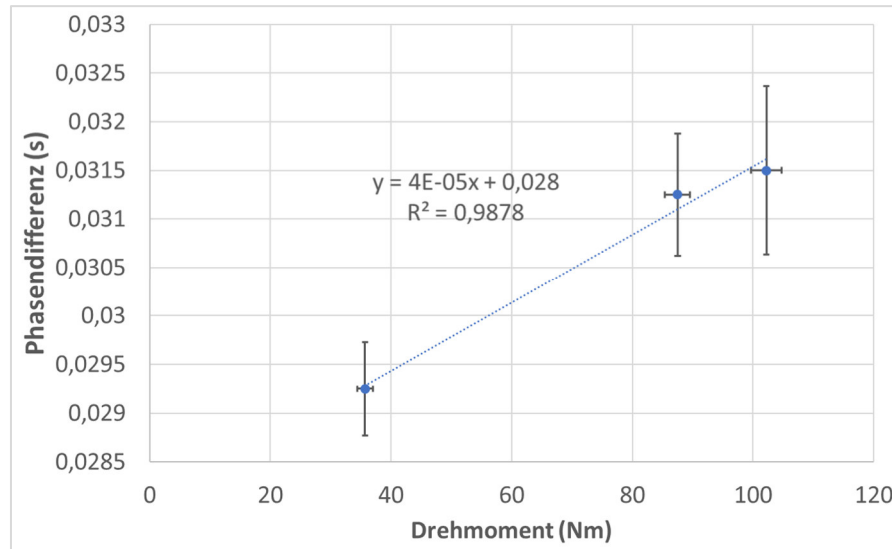


Abbildung 52: Auftragung der ermittelten Phasendifferenzen zwischen den beiden kapazitiven Sensoren bei einer Schneckendrehzahl von 450 min^{-1} und verschiedenen PP-Materialdurchsätzen von 15, 45 und 55 kg/h , was unterschiedliche Drehmomente und somit Verdrehwinkel verursachte.

Da sich, bei konstanter Schneckendrehzahl, die ermittelte Phasendifferenz aus dem Verdrehwinkel zwischen den beiden Sensoren ergibt und der Verdrehwinkel infolge der Drehmomentbelastung durch die Materialverarbeitung auftritt, wurde eine lineare Korrelation erwartet. Diese zeigt sich auch in Abbildung 52 mit einer Steigung von $0,00004 \text{ s/Nm}$. Mittels Gleichung 4.3 kann die Phasendifferenz, bei bekannter Schneckendrehzahl, zum Verdrehwinkel umgerechnet werden. Demnach beträgt die experimentell ermittelte Korrelation zwischen Verdrehwinkel und Drehmoment $0,108^\circ/\text{Nm}$. Die theoretische Berechnung, auf Basis der hier verwendeten Rahmenbedingungen, entsprechend Gleichung 4.1 ergibt jedoch eine Korrelation zwischen Verdrehwinkel und Drehmoment von $0,4^\circ/\text{Nm}$. Somit liegt hier eine deutliche Abweichung zwischen theoretisch und experimentell ermittelten Korrelation vor. Auf Basis dieser Abweichung wurden zwei fehlerhafte Annahmen in der praktischen Umsetzung des Messansatzes vermutet, welche im Folgenden erläutert werden.

Im Messansatz wird davon ausgegangen, dass die Verdrehung der Welle dort auftritt, wo das Drehmoment angreift. Somit wäre eine Messung des Drehmoments bzw. der resultierenden Verdrehung möglich, sofern ein Sensor vor und ein Sensor nach dem Angriffspunkt des Drehmoments platziert ist. Die Verdrehung der Welle erfolgt jedoch nicht direkt am Angriffspunkt, sondern baut sich linear von der Einspannung bis zum Angriffspunkt auf (solange Querschnittsgeometrie und Materialeigenschaften konstant bleiben, siehe Abschnitt 4.2). Am Extruder würde sich somit die Verdrehung vom Antrieb, ggf.

Getriebe und Kupplungsstück bis zur drehmomentangreifenden Stelle der Kernwelle aufbauen. Mit dem Messansatz wird jedoch nur ein Teil dieser Verdrehung erfasst. In Abbildung 53 ist schematisch die Fehlinterpretation aufgezeigt.

Fehlinterpretation - Torsionsverlauf bis zur „Einspannung“

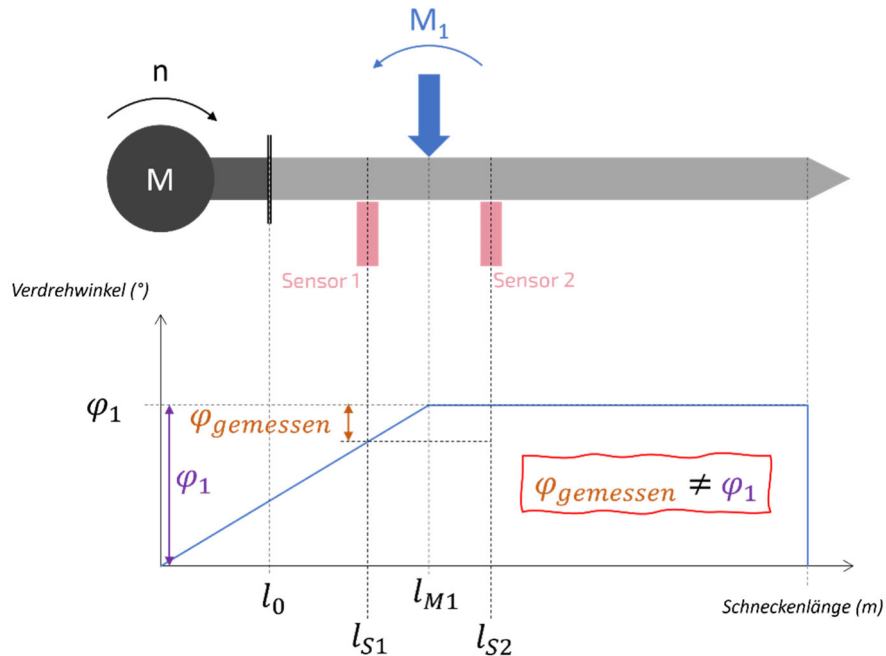


Abbildung 53: Schematische Darstellung der Fehlinterpretation bzgl. des Torsionsverlaufs: An der oben dargestellten Schnecke greift das Drehmoment M_I an der Stelle l_{MI} an. Die Sensoren befinden sich vor (l_{S1}) und hinter (l_{S2}) dem Angriffspunkt und erfassen die Verdrehung $\varphi_{\text{gemessen}}$. Die tatsächliche Verdrehung φ_I der Schnecke baut sich jedoch von der Einspannung (in diesem Fall die Welle des Motorantriebs) bis zum Angriffspunkt auf. Somit stimmt die ermittelte Verdrehung $\varphi_{\text{gemessen}}$ und tatsächliche Verdrehung φ_I nicht überein. Da nach dem Angriffspunkt kein weiteres Drehmoment angreift, bleibt hier die Verdrehung der Welle bis zur Schnecken Spitze gleich.

Einen Lösungsansatz bietet die Möglichkeit, die Position des vorderen Sensors möglichst nahe an die Einspannung zu platzieren. Dies sollte im Antrieb oder Getriebe des Extruders erfolgen, womit die Triggerung nicht durch ein Signal aus dem Schneckenbereich erfolgt, sondern z. B. durch eine Codierung der Antriebswelle. Ein weiterer Lösungsansatz wäre die feste Positionierung des vorderen Sensors auf der Schnecke. Da die Verdrehung im Schneckenbereich als linear angenommen werden kann, wären, sofern die Position des vorderen Sensors gleichbleibt, die Änderungen in der Phasendifferenz auf die unterschiedlichen Verdrehwinkel bzw. Drehmomente zurückzuführen. Dies könnte eine relative Messung ermöglichen.

Eine weitere fehlerhafte Annahme tritt infolge sich überlagernder Torsionsverläufe auf. Da sich die Verdrehung von der Einspannung bis zum Drehmoment-Angriffspunkt aufbaut, bedeutet dies, dass auch Drehmomente, die weiter weg von der Einspannung angreifen, die gemessene Verdrehung an der näher an der Einspannung liegenden Messstelle beeinflussen. Der eigentliche Verdrehwinkel-Verlauf, axial entlang der Schnecke, ergibt sich dabei, entsprechend dem Superpositionsprinzip, aus der Summe aller angreifenden Drehmomente. Womit durch eine örtliche Messung kein direkter Rückschluss auf das dort angreifende Drehmoment möglich ist. Dies wird in Abbildung 54 schematisch erläutert.

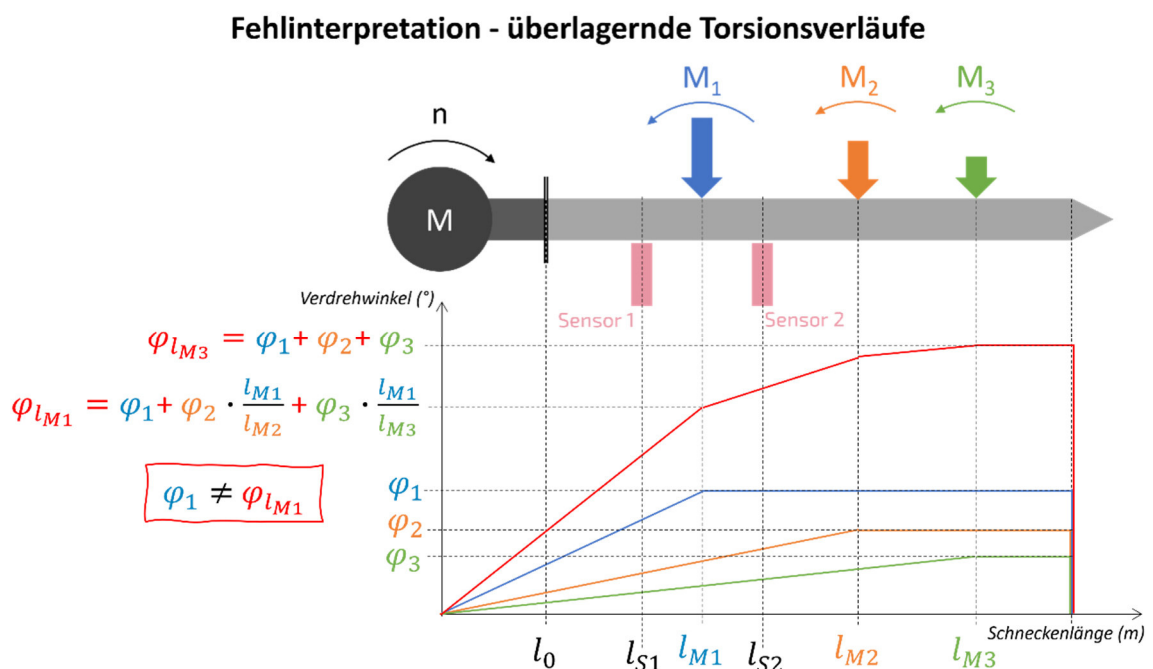


Abbildung 54: Schematische Darstellung der Fehlinterpretation der Messergebnisse aufgrund überlagernder Torsionsverläufe: Die Sensoren sollen das Drehmoment M_I bzw. den Verdrehwinkel φ_I charakterisieren. Der tatsächliche Verdrehwinkel $\varphi_{l_{M1}}$ an der Stelle l_{M1} ergibt sich jedoch nicht nur aus der Verdrehung φ_1 , infolge des Drehmoments M_I , sondern auch aus denen sich bis dahin anteilig aufgebauten Verdrehwinkel von den Drehmomenten M_2 und M_3 (Superpositionsprinzip), die sich weiter weg von der Einspannung befinden. Ebenso liegt bei an der Stelle l_{M2} bereits eine Vorverdrehung der Welle durch das Drehmoment M_I vor.

Als Lösungsansatz bietet sich hier nur die vollständige Charakterisierung aller angreifender Drehmomente an. Dabei wäre ein „zurückrechnen“ auf den gewünschten Messbereich möglich. In dem Beispiel aus Abbildung 54 wäre somit bei Kenntnis von Drehmoment M_3 ein Rückschluss auf Drehmoment M_2 und dann auf M_I theoretisch möglich. Hierbei ist weiterhin zu beachten, dass die Drehmomentbelastung axial betrachtet sowohl punktuell als auch flächig zu erwarten sind.

Neben den zuvor aufgeführten Fehlern in der praktischen Umsetzung des Messansatzes, traten auch bei weiteren experimentellen Messungen Probleme auf, siehe Abbildung 55. Die aufgeführten Ergebnisse entsprechen den gleichen Rahmenbedingungen wie bei Abbildung 52, jedoch fanden hier die Messungen bei einer Schneckendrehzahl von 300 min^{-1} (anstelle von 450 min^{-1}) statt, daher sind die hier ermittelten Phasendifferenzen größer. Entgegen der theoretischen Annahme und dem Ergebnis aus Abbildung 52, zeigt das experimentelle Verhalten in Abbildung 55 keinen linearen Anstieg der Phasendifferenz bei Zunahme des Drehmoments. Um mögliche Messfehler bei der Durchführung auszuschließen, wurde die Versuchsreihe zu einem späteren Zeitpunkt nochmal wiederholt. Jedoch zeigt sich hier das gleiche relative Verhalten, welches ebenfalls der theoretischen Annahme widerspricht. Hierfür kann an dieser Stelle keine plausible Erklärung bzw. Lösungsansatz aufgezeigt werden. Die absoluten Verschiebungen zwischen den beiden Messungen kann als systematische Abweichung aus dem Versuchs- und Messaufbau angesehen werden. Für die Messauswertung war an dieser Stelle nur das relative Verhalten innerhalb der jeweiligen Versuchsreihen relevant.

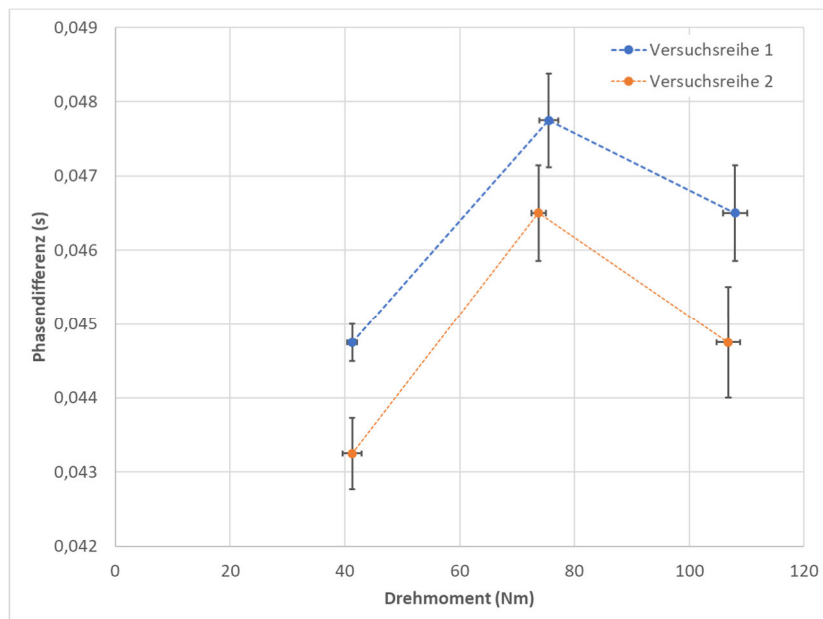


Abbildung 55: Auftragung der gemessenen Phasendifferenzen und dazugehörigen Drehmomente (laut Anlagensteuerung), wie in Abbildung 52, jedoch bei einer Schneckendrehzahl von 300 min^{-1} . Es ist eindeutig ein nicht-lineares Verhalten zu erkennen, was der theoretischen Annahme entgegenspricht. Aus diesem Grund wurde die Versuchsreihe zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt (orange). Hierbei ergab sich jedoch (relativ) das gleiche Ergebnis.

Unter Berücksichtigung der ermittelten Fehler wurde ein weiterer Messansatz zur axial-ortsaufgelösten Drehmomentbestimmung auf Basis der zeitlichen Ermittlung des Verdrehwinkels bei Änderung der Versuchspunkte untersucht. Der weitere Ansatz zur Signalauswertung durch Ermittlung der Phasendifferenz bzw. des Drehmoments, beruht auf dem Abgleich eines einzelnen Sensorsignals gegenüber einem zusätzlich simulierten Signalverlauf. Dabei wird die Änderung zwischen dem gemessenen Signal und dem simulierten Signal infolge einer Drehmomentveränderung betrachtet. Das simulierte Signal entspricht dabei von seiner Frequenz der Steganzahl des Elements unter dem Sensor sowie der Schneckendrehzahl (siehe Gleichung 4.5). Somit tritt innerhalb eines Versuchspunkts, sofern keine Drehmomentänderung stattfindet, keine Änderung der Phasendifferenz zwischen Messsignal und Simulationssignal auf. Sofern sich jedoch eine Änderung des Drehmoments bzw. des Verdrehwinkels ergibt, erfolgt eine Phasenverschiebung zwischen dem gleichgebliebenen simulierten Signalverlauf und dem, entsprechend dem neuen Prozesszustand, angepassten Messsignal. Die Periodendauer bleibt bei beiden Signalen gleich, jedoch verschiebt sich das gemessene Signal gegenüber dem simulierten Signal, was mittels der Phasendifferenz deutlich wird. In Abbildung 56 ist dies schematisch dargestellt.

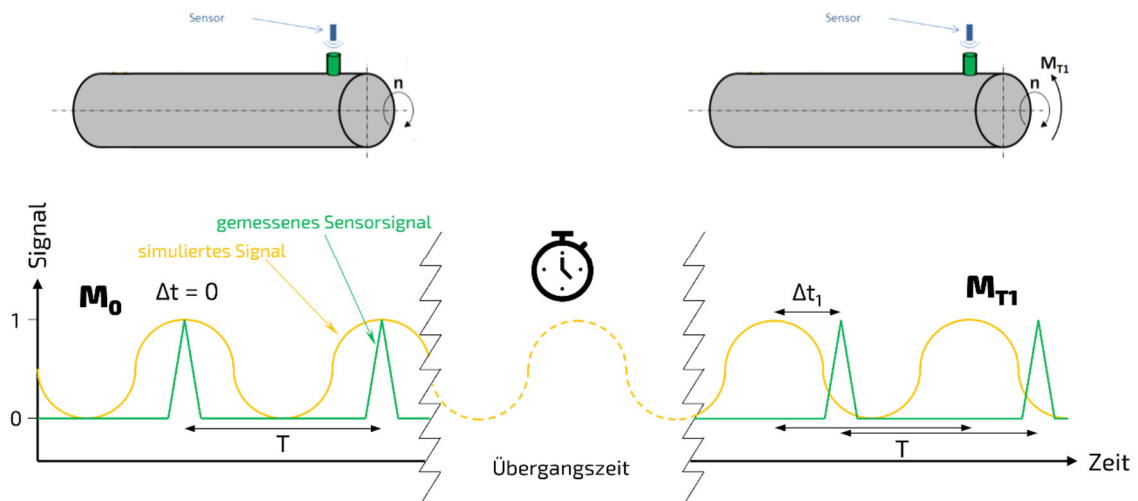


Abbildung 56: Schematische Darstellung des Messprinzips auf Basis eines einzelnen Sensors (grün) und einem simulierten Signalverlaufs (orange). Ohne Drehmomentbelastung M_0 (links) ist das Signalmaximum bei beiden Signalverläufen gleich. Sobald das Drehmoment M_{T1} anliegt (rechts), tritt ein Verdrehwinkel an der Welle auf. Dementsprechend verschiebt sich das gemessene Signal nun gegenüber dem konstant gleichbleibenden simulierten Signal. Die Periodendauer T bei beiden Signalen bleibt gleich, jedoch tritt eine Phasendifferenz Δt_1 entsprechend dem Drehmoment M_{T1} auf.

Bei den experimentellen Untersuchungen, wurden neben den (konstanten) Versuchspunkten auch die Übergangsphasen aufgezeichnet. Dabei erfolgte der Start der Messungen noch während der Prozesszustand konstant war (am Ende des Versuchspunkts) bzw. bevor z. B. der Materialdurchsatz geändert wurde. Die Messaufzeichnungen endeten erst, nachdem der Prozess bei den neuen Prozessbedingungen wieder stationär war (am Anfang des neuen Versuchspunkts). Die innerhalb einer Übergangsphase (zwischen zwei Versuchspunkten) ermittelten Phasenverschiebungen konnten so, den, mittels Anlagensteuerung ausgegebenen, Drehmomentänderungen gegenübergestellt werden. Für die Auswertung der Phasendifferenzänderung wurde somit die Phasendifferenz zwischen dem simulierten Signal und dem gemessenen Signal jeweils am Anfang sowie am Ende der Übergangsphase mehrfach ermittelt. Von den so ermittelten beiden Phasendifferenzen, wurde wiederum die Differenz gebildet, was die Phasendifferenzänderung ergab. In Abbildung 57 sind die Phasendifferenzänderungen der Übergangsphasen von den Versuchen aus Abbildung 52 aufgetragen. Dort wurde bei einer Schneckendrehzahl von 450 min^{-1} der PP-Materialdurchsatz von 15 auf 45 kg/h (entsprach einer Drehmomentänderung von 51,8 Nm) und dann von 45 auf 55 kg/h (entsprach einer Drehmomentänderung von 14,7 Nm) erhöht. Der ausgewertete kapazitive Sensor befand sich in unmittelbarer Nähe zur Schneckenspitze in Gehäuse 11.

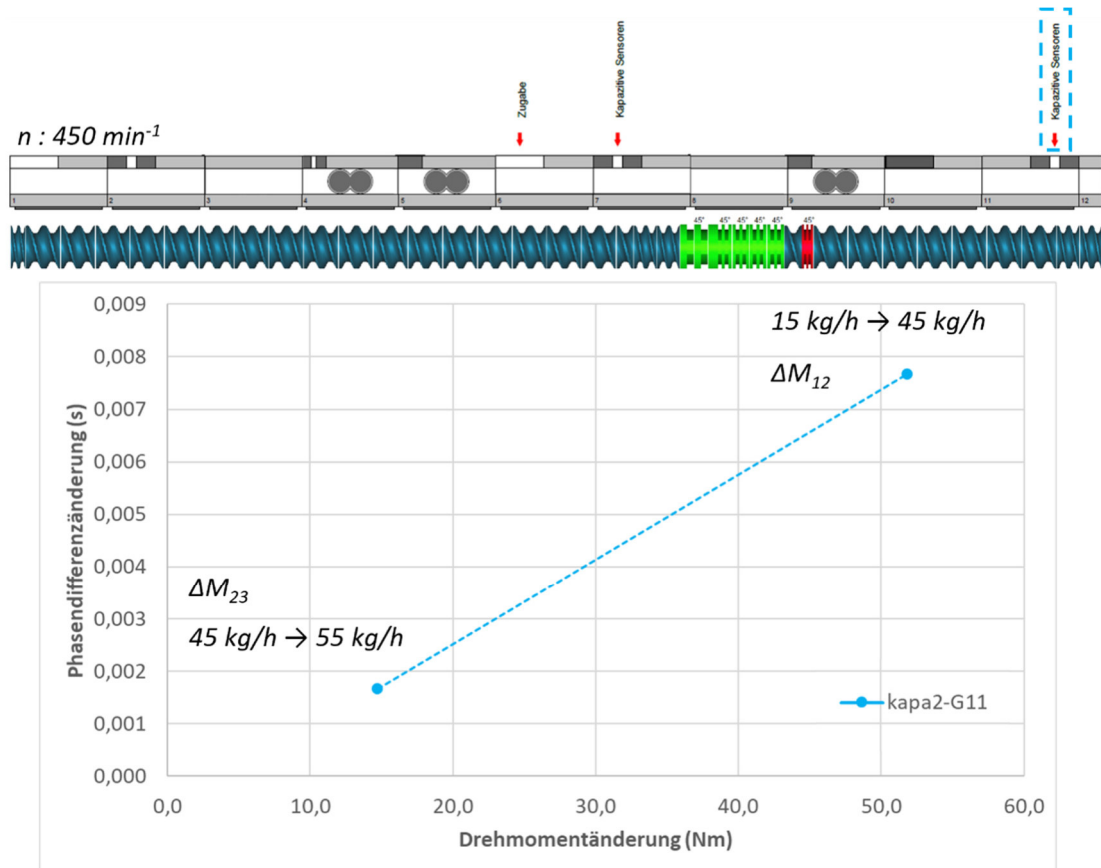


Abbildung 57: Auftragung der Änderung der Phasendifferenz vom gemessenen kapazitiven Signal aus Gehäuse 11 und simulierten Signal gegenüber der laut Anlagensteuerung entstandenen Drehmomentänderung infolge der Durchsatzänderungen von 15 auf 45 kg/h ($\Delta M_{12} = 51,8 \text{ Nm}$) und 45 auf 55 kg/h ($\Delta M_{23} = 14,7 \text{ Nm}$).

Wie in Abbildung 57 aufgeführt, ergab die Materialdurchsatzänderung von 15 auf 45 kg/h eine Drehmomentzunahme von 51,8 Nm. Entsprechend Gleichung 4.1 kann mittels des Betrags der Drehmomentänderung auf eine Verdrehwinkeländerung von $20,7^\circ$ geschlossen werden. Die ermittelte Phasendifferenzänderung zwischen simulierten Signalverlauf und gemessenen kapazitiven Sensorsignal ergab dabei 0,077 s. Die Phasendifferenzänderung kann anhand von Gleichung 4.3 zu einer Verdrehwinkeländerung von $20,8^\circ$ umgerechnet werden. Somit ergibt sich hier zwischen laut Anlagensteuerung aufgezeichneter Drehmomentänderung von 51,8 Nm bzw. einem Verdrehwinkel von $20,7^\circ$ und der gemessenen Phasendifferenz von 0,077 s bzw. einem Verdrehwinkel von $20,8^\circ$ eine sehr hohe Übereinstimmung. Für die Drehmomentänderung von 14,7 Nm, infolge der Durchsatzserhöhung von 45 auf 55 kg/h, ergibt sich, entsprechend Gleichung 4.1, eine Verdrehwinkeländerung von $5,9^\circ$. Die ermittelte Phasendifferenzänderung von 0,0017 s,

führt, entsprechend Gleichung 4.3, zu einer Verdrehwinkeländerung von $4,6^\circ$. Somit kann hier die hohe Übereinstimmung nicht bestätigt werden.

Weiterhin wurde auch die Phasendifferenzänderung vom kapazitiven Sensor in Gehäuse 7 betrachtet. Dieser war zwischen Materialzugabe und Aufschmelzzone platziert. Da für den genutzten Schnekenaufbau hauptsächlich die Aufschmelzzone als Drehmomenterzeuger betrachtet werden kann, sollte die Änderung des Verdrehwinkels etwas geringer als beim Sensor in unmittelbarer Nähe zur Schneckenspitze sein, da sich der Verdrehwinkel von der Einspannung bis zum Angriffspunkt (Aufschmelzzone) linear aufbaut. In Abbildung 58 zeigt sich jedoch nicht das erwartete Verhalten, da gerade bei der hohen Drehmomentänderung (51,8 Nm) sich eine größere Phasendifferenzänderung von 0,008 s ergibt als bei dem Sensor in Gehäuse 11 (0,0077 s). Dies würde bedeuten, dass zwischen den beiden Sensoren (inkl. der Aufschmelzzone) eine Entspannung bzw. Rückverdrehung der Extruderschnecke auftreten würde, wovon nicht auszugehen ist.

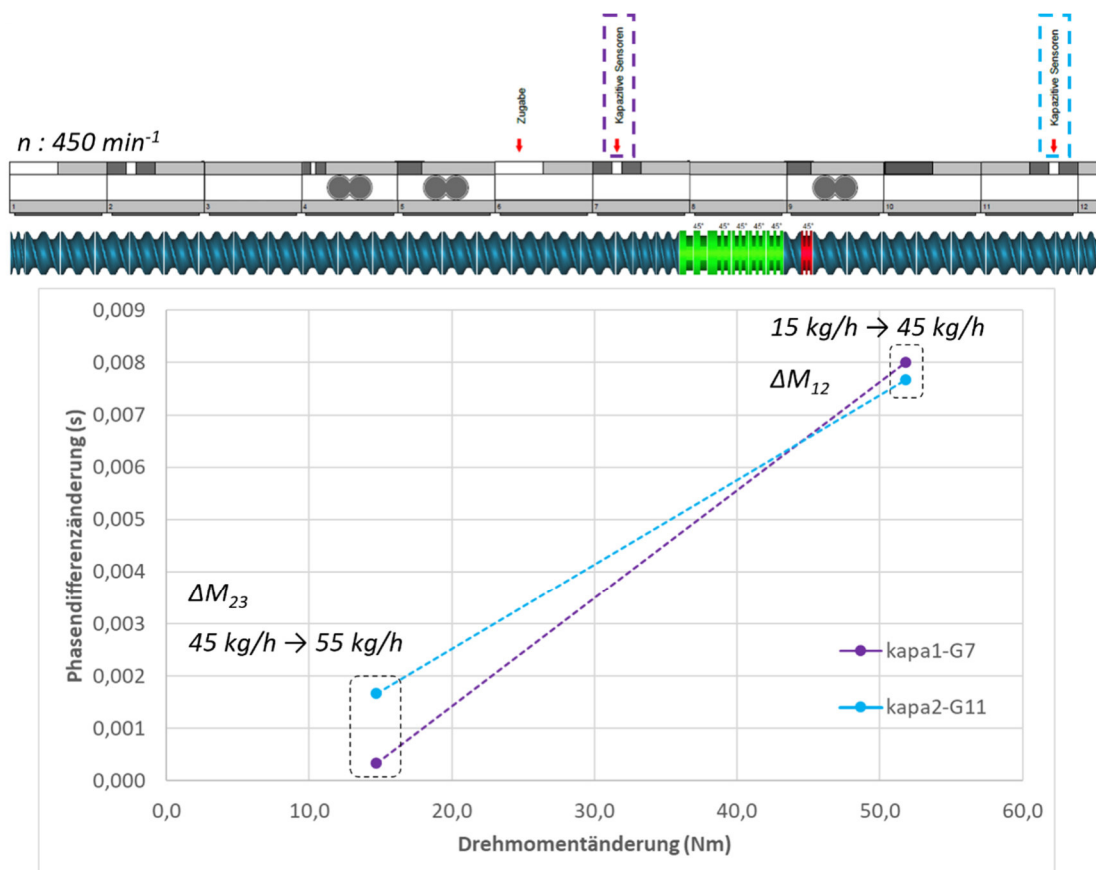


Abbildung 58: Ergänzung der Abbildung 57 um die Ergebnisse des kapazitiven Sensors von Gehäuse 7 (vor der Aufschmelzzone). Entgegen der Erwartung liegt die gemessene Phasendifferenzänderung und somit scheinbar die Verdrehwinkeländerung beim Sensor vor der Aufschmelzzone höher als beim Sensor am Schneckenende.

Grund für die Abweichungen liegt vermutlich in den Schwankungen der Schneckendrehzahl innerhalb der Übergangsphase. Da das simulierte Signal, entsprechend Gleichung 4.4, in Abhängigkeit der Schneckendrehzahl, als konstant angenommen wird, treten bei tatsächlichen Drehzahlschwankungen an der Anlage, wie sie insbesondere bei Prozessänderungen vorkommen, nicht berücksichtigte Differenzen zwischen dem simulierten und gemessenen Signal auf. Diese Differenzen werden dann fälschlicherweise einer Veränderung des Verdrehwinkels zugeordnet. Weiterhin sind mit diesem Messansatz nur Drehmomentveränderungen charakterisierbar. Eine absolute Bestimmung des Drehmoments ist so nicht umsetzbar.

Aus den Untersuchungen zur Messsystementwicklung ergeben sich somit folgende Erkenntnisse:

- Die kapazitiven Sensoren bieten als einzige eine geeignete Signalform zur Triggersignalgebung. Diese sind jedoch aufgrund des sehr geringen Messbereichs von $< 0,5$ mm (bei einer Baugröße von $\frac{1}{2}$ “-20 UNF-Gewinde) derzeit nicht im kunststoffverarbeitenden Bereich praxistauglich einsetzbar.
- Die messtechnische Erfassung der Schneckenverdrehung auf Basis von Triggersignalen über die Schneckenumfangskonturfunktion lassen sich z. Z. experimentell nicht verlässlich umsetzen.
- Eine eindeutige Zuordnung des Verdrehwinkels auf einen definierten Drehmomentangriffspunkt/-bereich, wäre nur mit einem sehr hohen Messaufwand möglich (derzeit nur theoretisch).
- Ein Abgleich von Einzelsignalverläufen mit einem simulierten Signal ermöglicht die Erkennung von (nur) Drehmomentveränderungen und wird stark durch Schneckendrehzahlschwankungen beeinflusst.

Auf Basis dieser Erkenntnisse muss festgehalten werden, dass der derzeitige Entwicklungsstand des Messsystems nicht zur Simulationsvalidierung geeignet ist. Aus diesem Grund hatten die beiden Forschungseinrichtungen, nach Rücksprache mit dem pbA, beschlossen, auf alternative Validierungsmöglichkeiten für die Simulationsarbeiten zurückzugreifen. Dabei sollen die Funktionszonen der Schnecke abschnittsweise aufgebaut werden und das Gesamtdrehmoment der Schnecke als Validierungsgröße genutzt werden. Als Gesamtdrehmoment wird dabei das Drehmoment über die Anlagensteuerung bzw. über ein Messsystem auf Basis der inversen Magnetostriktion genutzt.

5.4 Experimentelle Untersuchungen ungefüllter Materialsysteme

Die Versuche zur reinen Feststoffförderung an der ZSK 26 Mc18 wurden abgeschlossen. Alle Prozessdaten (Granulatform, Materialdurchsatz, Schneckendrehzahl etc.) liegen als Datenbasis vor und können zur Validierung der Simulation bei der Feststoffförderung genutzt werden. In Abbildung 59 bis Abbildung 63 sind die zeitlichen Verläufe der vorgegebenen Prozessgrößen (Materialdurchsatz sowie Schneckendrehzahl) und der sich daraus ergebenden Gesamtdrehmomentbelastung laut Anlagensteuerung für die unterschiedlichen Schneckenlängen von 44 und 60 L/D sowie Materialzugabestellen dargestellt.

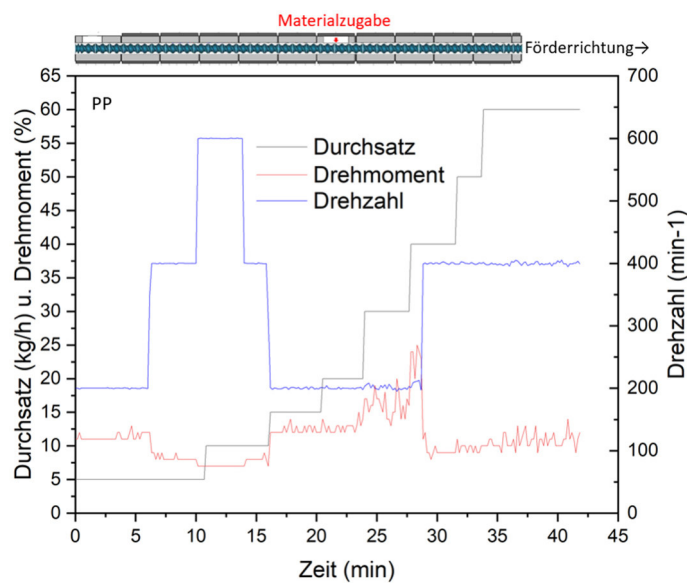


Abbildung 59: Auftragung des gemessenen Gesamtdrehmoments (rot) sowie der gemessene Verlauf der Stellgrößen von Materialdurchsatz (schwarz) und Schneckendrehzahl (blau) bei Zugabe des PP-Granulats bei ca. der Hälfte (Gehäuse 7) des 44 L/D Schneckenaufbaus aus reinen FE

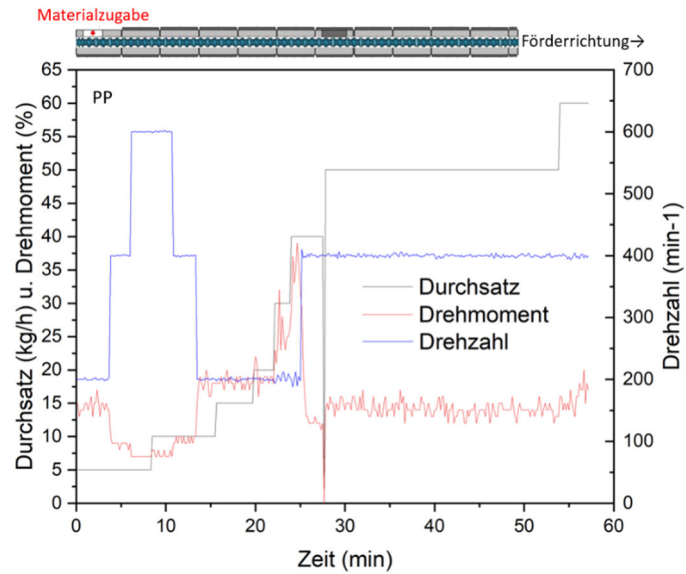


Abbildung 60: Zeitliche Auftragung der Prozessgrößen bei PP-Materialzugabe im ersten Extrudergeräuse bei einer 44 L/D-Schneckenlänge

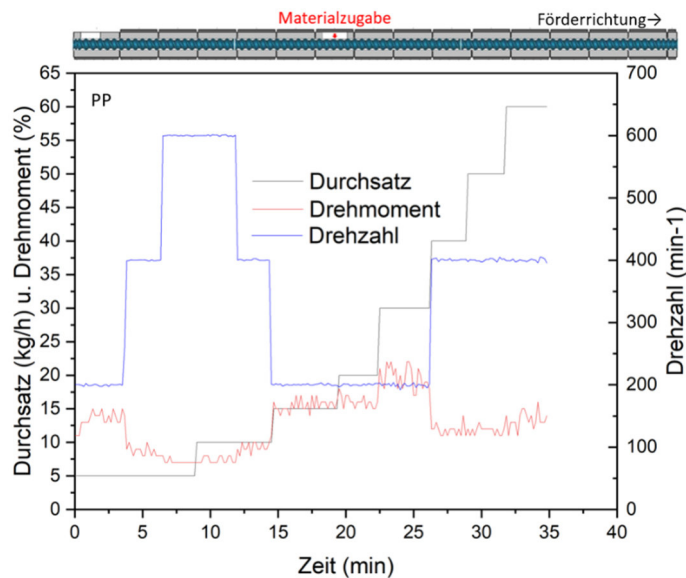


Abbildung 61: Gemessene Prozessgrößen während der Zudosierung von PP-Material über Gehäuse 7 bei einer 60 L/D-Schneckenlänge

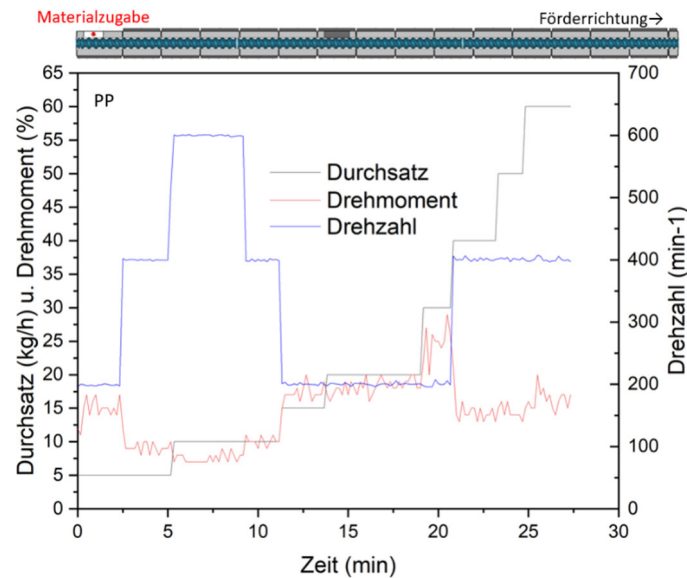


Abbildung 62: Auftragung der Prozessgrößen nach PP-Materialzugabe über das erste Gehäuse bei einer 60 L/D -Schneckenlänge

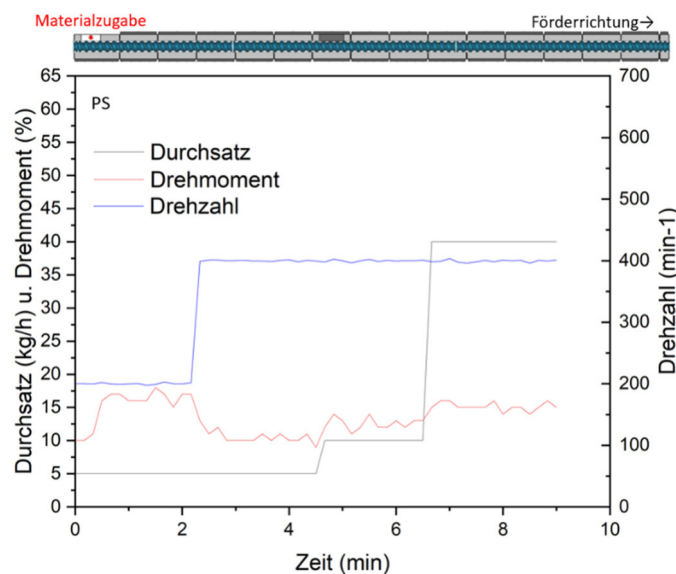


Abbildung 63: Gemessene Prozessdaten bei der Materialzugabe im ersten Extrudergehäuse bei einer Schneckenlänge von 60 L/D , wie Abbildung 62, jedoch mit PS-Material

Werden, wie in Abbildung 64 und Abbildung 65, die gemessenen Drehmomente der einzelnen Versuchspunkte mit PP über dem Durchsatz aufgetragen, so zeigt sich eindeutig, dass bei beiden Schneckendrehzahlen eine längere Feststoffförderzone zu einer Zunahme des Drehmoments führt. Diese Ergebnisse weisen somit darauf hin, dass der geringe Energieeintrag in dieser Zone auch der Kürze der Zone geschuldet ist. Liegt im Anlagenaufbau eine längere Feststoffförderzone als üblich vor, kann also von einem erhöhten Energieeintrag ausgegangen werden, der dann nicht mehr vernachlässigbar wäre. Standardmäßig

liegen jedoch keine Gründe für eine Verlängerung der Zone vor, sodass der Energieeintrag hier gering bleibt, und es sich um eine theoretische Betrachtung handelt, welche praktisch keine Anwendung findet.

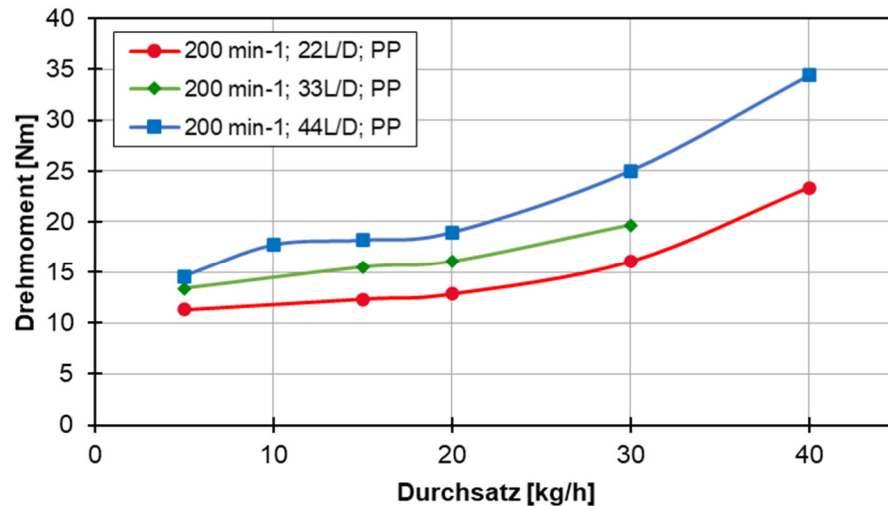


Abbildung 64: Vergleich der Prozessdaten bei unterschiedlich langen Feststoffförderzonen für 200 min^{-1} bei der Förderung von PP

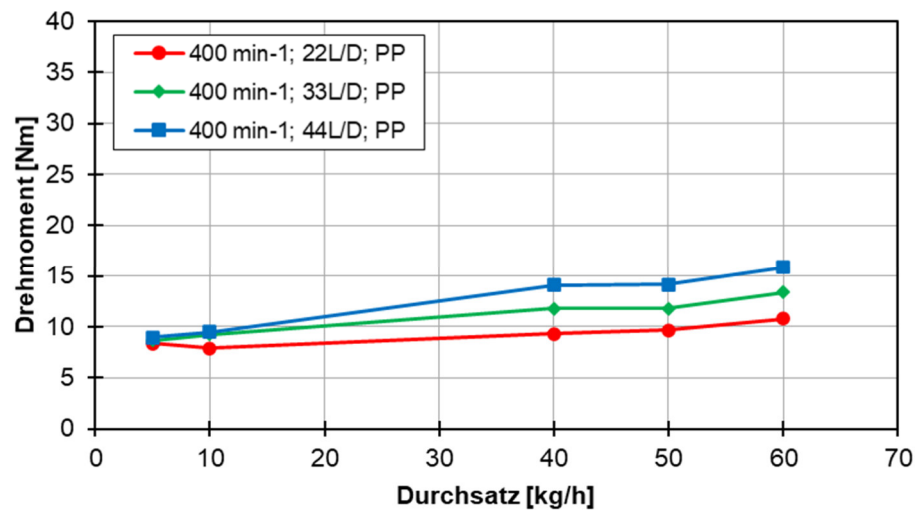


Abbildung 65: Vergleich der Prozessdaten bei unterschiedlich langen Feststoffförderzonen für 400 min^{-1} bei der Förderung von PP

Die optische Begutachtung der Granulate ergab, dass bei der Verarbeitung eine leichte mechanische Belastung jedoch kein Aufschmelzen auftrat, siehe Abbildung 66.

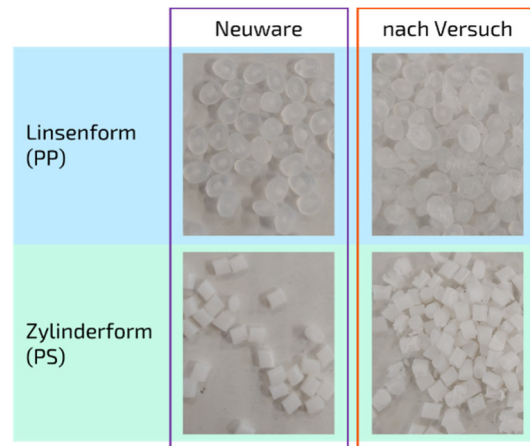


Abbildung 66: Optische Begutachtung der Granulate vor (links) und nach (rechts) den Versuchen zur reinen Feststoffförderung. Als Granulatform wurden linsenförmige (PP, oben) und zylinderförmige (PS, unten) Granulate genutzt. Es sind leichte mechanische Belastungen auf die Granulate zu erkennen.

In den experimentellen Untersuchungen kam bei Forschungseinrichtung 2 das Messsystem von Fa. NCTE AG zum Einsatz, welches mit einer Abtastrate von 100 Hz das Drehmoment im Extruder für die beiden Schnecken aufzeichnet.

Um ausschließen zu können, dass die Unterschiede, welche zwischen den beiden Schnecken gemessen wurden, aus einer gegenseitigen Beeinflussung der beiden Magnetfelder um die Schneckenwellen kommt, wurde hierzu eine Untersuchungsreihe durchgeführt. Es wurde zum Vergleich mit der Messung bei der beide Schnecken zeitgleich aufgezeichnet werden, eine Messung durchgeführt, bei der ein nichtmagnetischer Schneckendorn zum Einsatz kam und das entsprechende Messsystem nicht angeschlossen war, sodass nur eine Schnecke vermessen wurde. Das Ergebnis ist nachfolgend abgebildet.

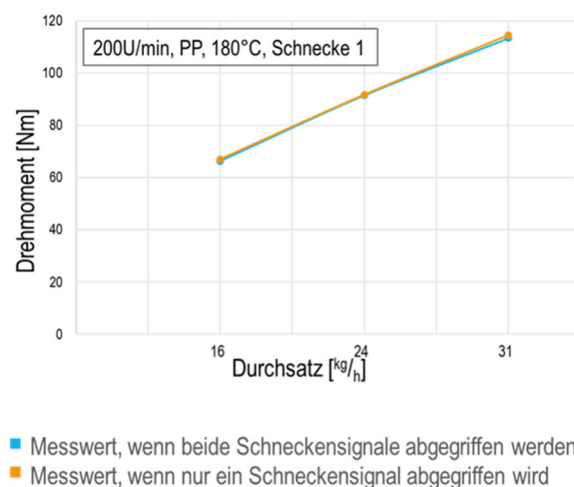


Abbildung 67: Gegenüberstellung der Messergebnisse bei Verwendung von einem Sensor und beiden Sensoren gleichzeitig

Es zeigt sich eine nahezu deckungsgleiche Kurve für beide Messungen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass eine Beeinflussung der Magnetfelder auszuschließen ist. Bei der Auswertung der ersten experimentellen Untersuchungen zeigte sich wie in Abbildung 68, dass die Drehmomentkurven zum einen ein Rauschen aufweisen, zum anderen aber auch eine größere periodische Schwingung, welche ihre Periodenlänge mit dem Durchsatz der Dosierung antiproportional verändert.

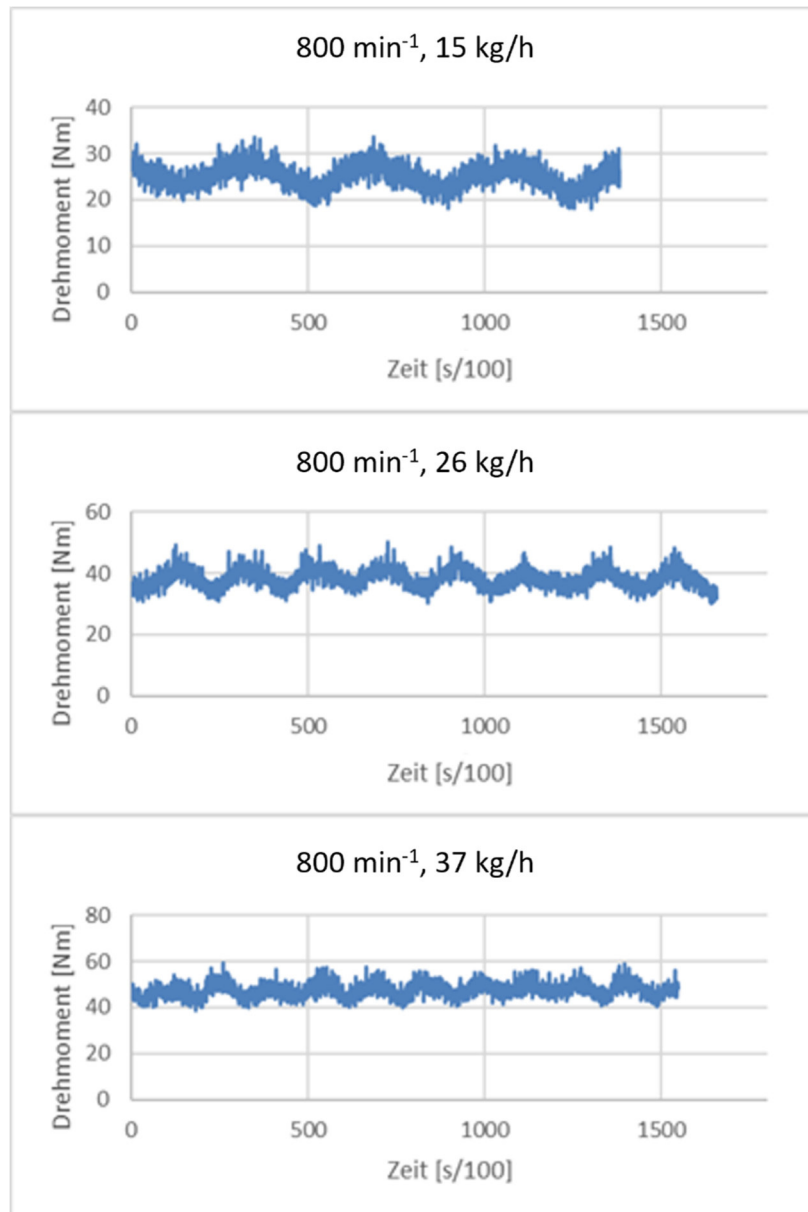


Abbildung 68: Messung von Drehmomenten bei unterschiedlichen Dosierdurchsätzen zur Untersuchung der Signalschwankung

Bei Erhöhung des Materialdurchsatzes konnte eine Verkürzung der Periodendauer beobachtet werden, wie Abbildung 69 zeigt. Der Grund für die Schwingung im Drehmoment-

signal wird darauf zurückgeführt, dass der Dosierer über eine sich drehende Dosierschnecke verfügt, welche bei geringen Mengen so langsam dreht, dass der Volumenstrom diskontinuierlich freigegeben wird.

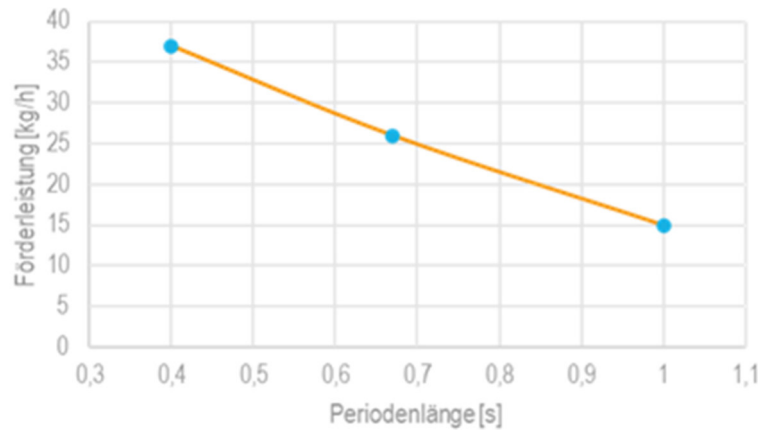


Abbildung 69: Darstellung des Dosierdurchsatzes über der Periodenlänge der Drehmomentsignalschwankung

Aus diesem Grund wurde ein neuer Dosierer beschafft, welche statt der Dosierschnecke über einen Dosierzylinder verfügt, der die Pulsation nahezu verhindert. Nachfolgend ist eine Drehmomentkurve mit dem Dosierer MCBalance der Firma Labotek abgebildet.

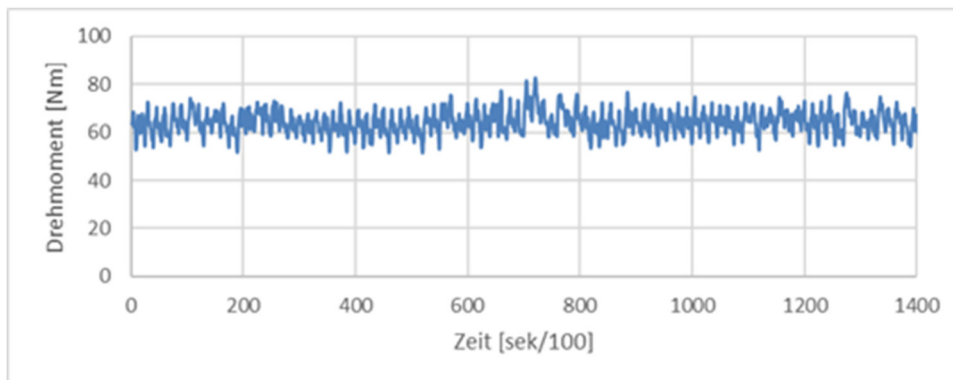


Abbildung 70: Drehmomentmessung am Extruder bei Materialzugabe mittels dem Dosierer MCBalance

Das grundlegende Rauschen in der Kurve ist weiterhin vorhanden, kann aber bei genauer Betrachtung auf die Deformation der Partikel im Bereich der Knetblöcke zurückgeführt werden. Bei 200 min^{-1} treten pro Sekunde 3,3 Schneckenrotationen auf. Unter Verwendung von zweigängigen KBE ergibt sich, dass, aufgrund der Symmetrie des Elements, pro Sekunde 6,6-mal ein Steg in den Zwickelbereich eingreift. Mit einem Scheibenversatzwinkel von 45° stellen Scheibe 1 und Scheibe 5 dieselbe Stellung dar, wodurch sich

vier lokale Maxima in einer halben Schneckenrotation abbilden, welche durch die Verformung von Granulat im Zwickel verursacht werden, wie in Abbildung 71 gezeigt.

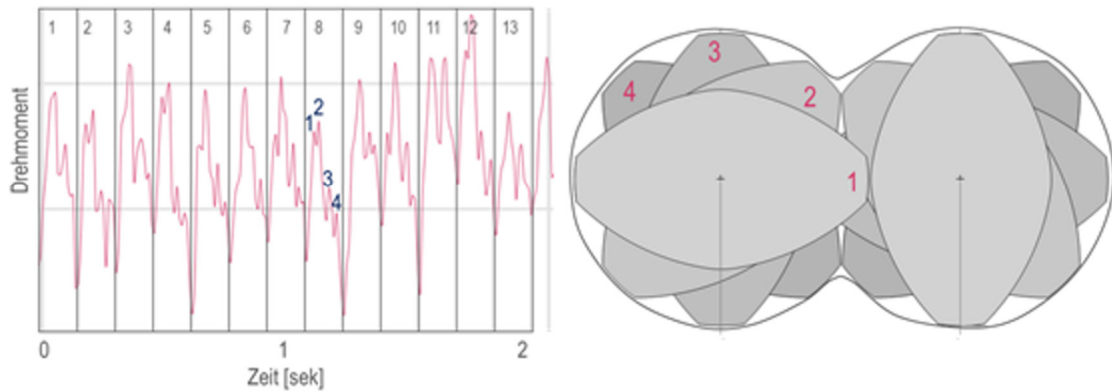


Abbildung 71: Detailaufnahme aus der Drehmomentmessung einer Extruderschnecke bei Materialzugabe mit dem Dosierer MC-Balance (links) und Darstellung des verwendeten Knetblockelements in der Aufschmelzzone (rechts). Die Nummerierungen im Drehmomentverlauf zeigen auf, wenn der entsprechende Steg im Zwickelbereich eingreift (aktuell Steg 2).

Durch den neuen Dosierer wurde es somit möglich, externe Einflüsse auf das gemessene Drehmoment zu minimieren und somit deutlich exakter die Effekte der Elemente bzw. Schnecken auf das Drehmoment aufzuzeichnen und die Qualität der Messergebnisse zu steigern.

Im Anschluss an die Versuchsdurchführung ist aus den Messpunkten eine Datensammlung geschaffen worden, welche im folgenden Kapitel übersichtlich dargestellt ist. Einen Überblick über alle Datenpunkte liefert Abbildung 72. Die Graphen zeigen das Drehmoment für alle betrachteten Temperaturen, beide Materialien, alle gemessenen Massenströme und die drei gewählten Drehzahlen im ersten Schnecken Aufbau mit zweigängigen KBE in der Homogenisierungszone aus Abbildung 19. Dabei sind die gemessenen Drehmomentwerte zur besseren Übersicht mit Linien verbunden. Diese geben eine Näherung für das Drehmoment zwischen den einzelnen Messpunkten, sind aber nicht experimentell bestätigt worden. Zudem sind die Drehmomente von beiden Schnecken separat aufgeführt. Außerdem werden alle Bereiche im Extruder, repräsentiert durch je vier Schneckenkonfigurationen in unterschiedlichen Farben, aufgeführt.

Erkennbar ist bereits, dass das Drehmoment, wie zu erwarten, bei einer höheren Drehzahl sinkt und mit steigendem Durchsatz zunimmt. Diese Beobachtung lässt sich bei jeder getesteten Temperaturstufe darstellen. Ebenso wird bereits deutlich, dass die Drehmo-

mente, für die ab- und aufdrehend Schnecke nicht gleich ist. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die aufdrehende Schnecke in den durchgeführten Versuchen ein höheres Drehmoment aufweist als die abdrehende Schnecke. Dies gilt für alle Schneckenkonfigurationen.

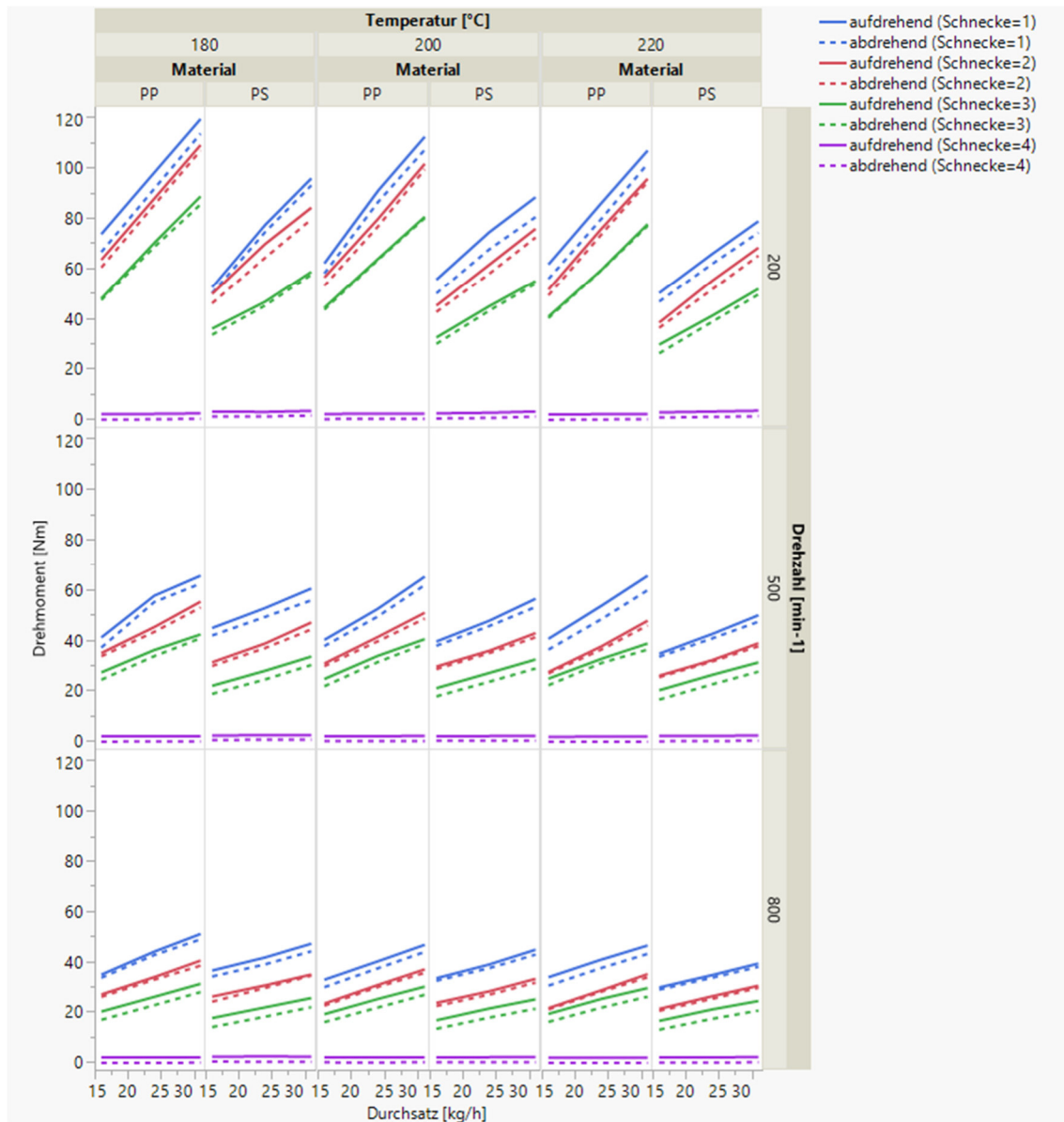


Abbildung 72: Darstellung der Drehmomente für alle getesteten Parameter für beide Schnecken (die Schneckenkonfigurationen können Abbildung 19 entnommen werden)

Werden mit Hilfe der Gleichung 4.7 die Drehmomente in den *SME* umgerechnet ergeben sich die Diagramme in Abbildung 73.

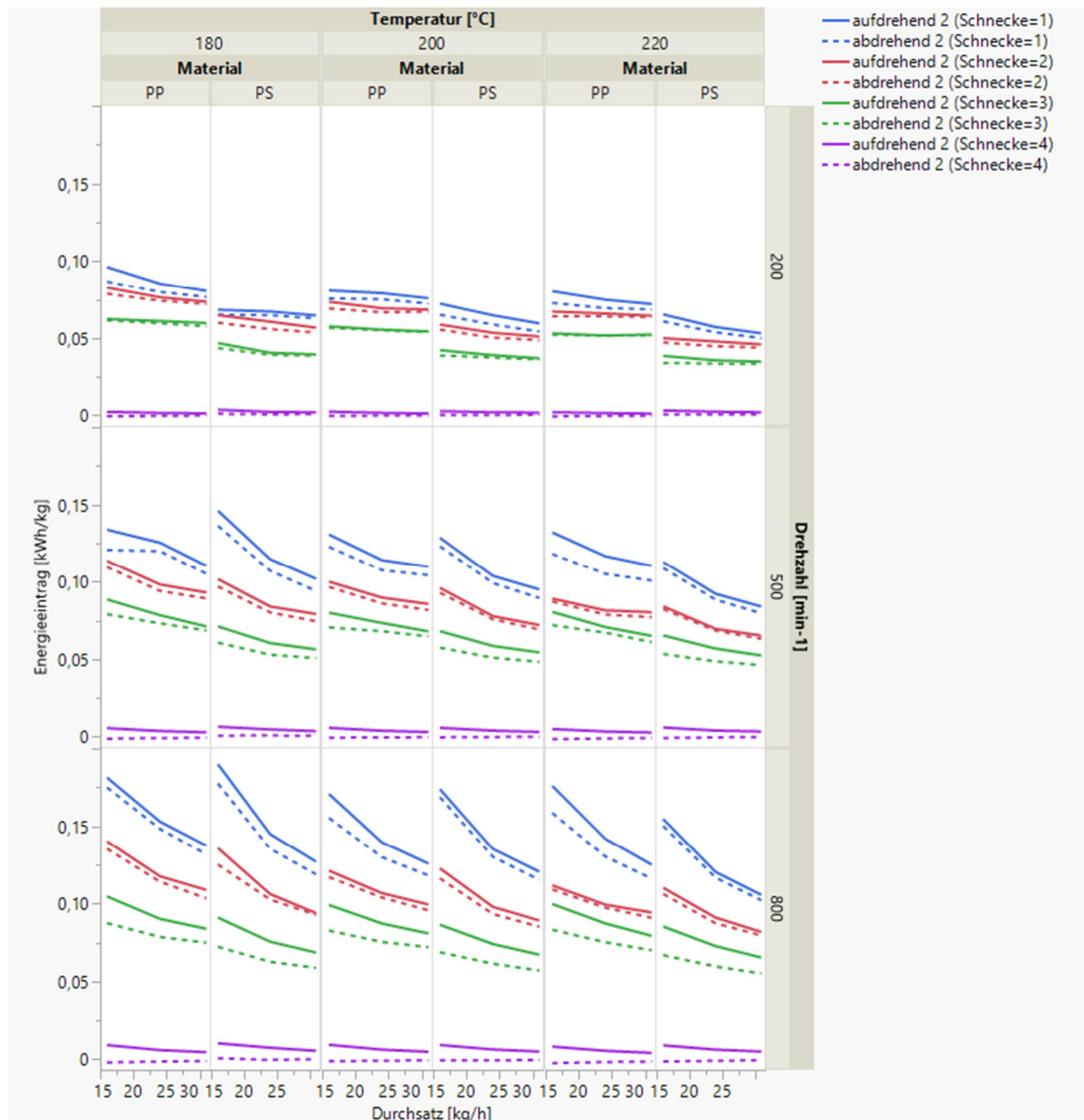


Abbildung 73: Darstellung des SME für alle getesteten Parameter für beide Schnecken

In Abbildung 73 ist zu sehen, dass die aufdrehende Schnecke einen höheren Energieeintrag in das Material liefert als die Abdrehende. Dieses Ergebnis deckt sich mit den ersten Erkenntnissen aus der Betrachtung des Drehmoments aus Abbildung 72. Im Gegensatz zu dem Drehmoment verhält sich der *SME* in Bezug auf die Drehzahl und Durchsatz anders. Dieser verändert sich konträr zu den Beobachtungen aus der Drehmomentauswertung. So steigt der *SME* mit zunehmender Drehzahl und fällt bei steigendem Durchsatz. Die Begründung dafür liegt in der Berechnung des *SME* selbst. Aus Gleichung 4.7 wird ersichtlich, dass sowohl der Massenstrom, der Durchsatz und die Drehzahl in die Berechnung des *SME* einfließen.

Versuchsergebnisse für Polystyrol

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Versuche mit dem Styrolution PS 454 N dargestellt und erklärt. Auf Abbildung 74 sind die Drehmomente für die verschiedenen Parameter für PS dargestellt.

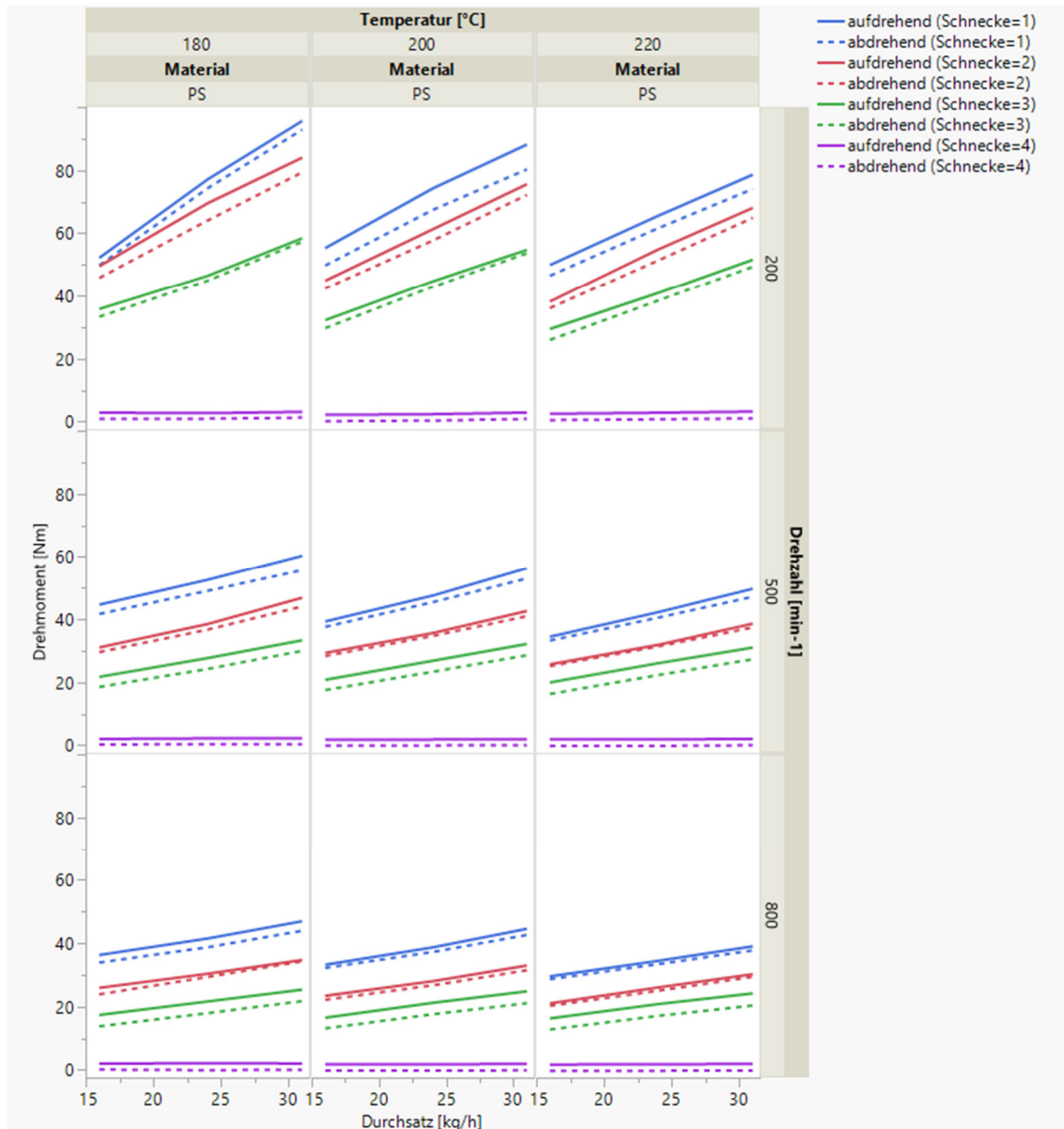


Abbildung 74: Darstellung der Drehmomente für PS in allen Schneckenkonfigurationen bei allen getesteten Parametervariationen

Zu sehen sind die Drehmomente der einzelnen Schneckenkonfigurationen für alle untersuchten Drehzahlen und alle eingestellten Durchsätze. Ebenso wird eine Unterteilung nach den eingestellten Zylindertemperaturen vorgenommen.

Auch hier wird, wie in den Ergebnissen zu PP deutlich, dass das Drehmoment mit steigender Drehzahl sinkt. Ein Interpretationsansatz dafür ergibt sich aus der Gleichung 5.1 in der Kombination mit der Gleichung 4.7.

$$w_{rev} = \Delta h - c_p \cdot \Delta T - \frac{P_{diss}}{\dot{m}} \quad (5.1)$$

Wird hier der *SME* als reversible spezifische mechanische Arbeit angenommen und eingesetzt. So ergibt sich für das Drehmoment der Zusammenhang aus Gleichung 5.2.

$$M_D = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot n} \cdot (\Delta h \cdot \dot{m} - c_p \cdot \Delta T \cdot \dot{m} - P_{diss}) \quad (5.2)$$

Da die Drehzahl im Nenner steht, führt eine Drehzahlerhöhung zu einer Drehmomentabnahme. Ein Effekt, der dem Abfallen des Drehmoments entgegenwirkt, ist die steigende dissipative Leistung. Nach Gleichung 5.3 ist diese von der mittlere Schergeschwindigkeit sowie der Viskosität abhängig.

$$P_{diss} = \int \eta \cdot \dot{\gamma}^2 dV \quad (5.3)$$

Da das Polystyrol sich strukturviskos verhält, also die Viskosität bei steigender Schergeschwindigkeit fällt, wird die dissipative Leistung höher. Die Viskosität wird verringert aber die mittlere Schergeschwindigkeit geht quadratisch in die Gleichung 5.3 ein und somit wird die dissipative Leistung steigen. Da diese eine Verlustleistung darstellt, muss der Wert mit einem negativen Vorzeichen versehen werden, wodurch sich das negative Vorzeichen in Gleichung 5.2 zu einem positiven ändert. Damit lässt sich erklären, warum das Drehmoment bei einer Vervierfachung der Drehzahl von 200 min^{-1} auf 800 min^{-1} nicht auf ein Viertel seines Werts abfällt. Stattdessen wird sich das Drehmoment, da die dissipative Leistung steigt, wie in Abbildung 75 dargestellt, nur etwa halbieren. Daraus folgt, dass es möglich ist aus den experimentellen Ergebnissen die dissipierte Leistung zu bestimmen.

Aus Gleichung 5.2 wird ebenfalls ersichtlich, dass ein steigender Massenstrom zu steigenden Drehmomenten führen sollte. Dies konnte durch die experimentellen Untersuchungen bestätigt werden.

Ebenfalls ist zu erkennen, dass bei höheren Temperaturen und gleichbleibenden Drehzahlen und Durchsätzen das Drehmoment sinkt. Auch hier kann aus Gleichung 5.2 abge-

leitet werden, warum dieses Phänomen auftritt. So steigt der Wert der Temperaturdifferenz zwischen Kunststoff und Zylinderwand an und damit sinkt das Drehmoment. Liegt eine höhere Temperaturdifferenz vor, also bei höheren Temperaturen, wird mehr Energie zum Aufschmelzen des Kunststoffes aus der Beheizung der Zylinderwände genutzt. Daher fällt der Betrag der mechanisch eingebrachten Energie und somit das Drehmoment ab. Dieser Effekt wird durch die Temperaturabhängigkeit der isobaren Wärmekapazität des PS verstärkt. Diese nimmt bei steigender Temperatur zu. Dadurch wird das Drehmoment bei gleichbleibender Drehzahl und Massenstrom verkleinert. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Viskosität eines Kunststoffes mit steigender Temperatur abnimmt. Dadurch sinkt die dissipative Leistung und somit auch der *SME* sowie das Drehmoment. In Abbildung 75 wird der Energieeintrag beider Schnecken für die Versuche mit PS dargestellt. Dabei ist der Energieeintrag bei allen untersuchten Parametern jeweils auf der Ordinate aufgetragen. Da der Energieeintrag vom Drehmoment abhängt, zeigen die Ergebnisse das bereits vorgestellte Verhalten, dass der Energieeintrag mit zunehmender Drehzahl zunimmt und bei steigendem Massenstrom bzw. Durchsatz abfällt.

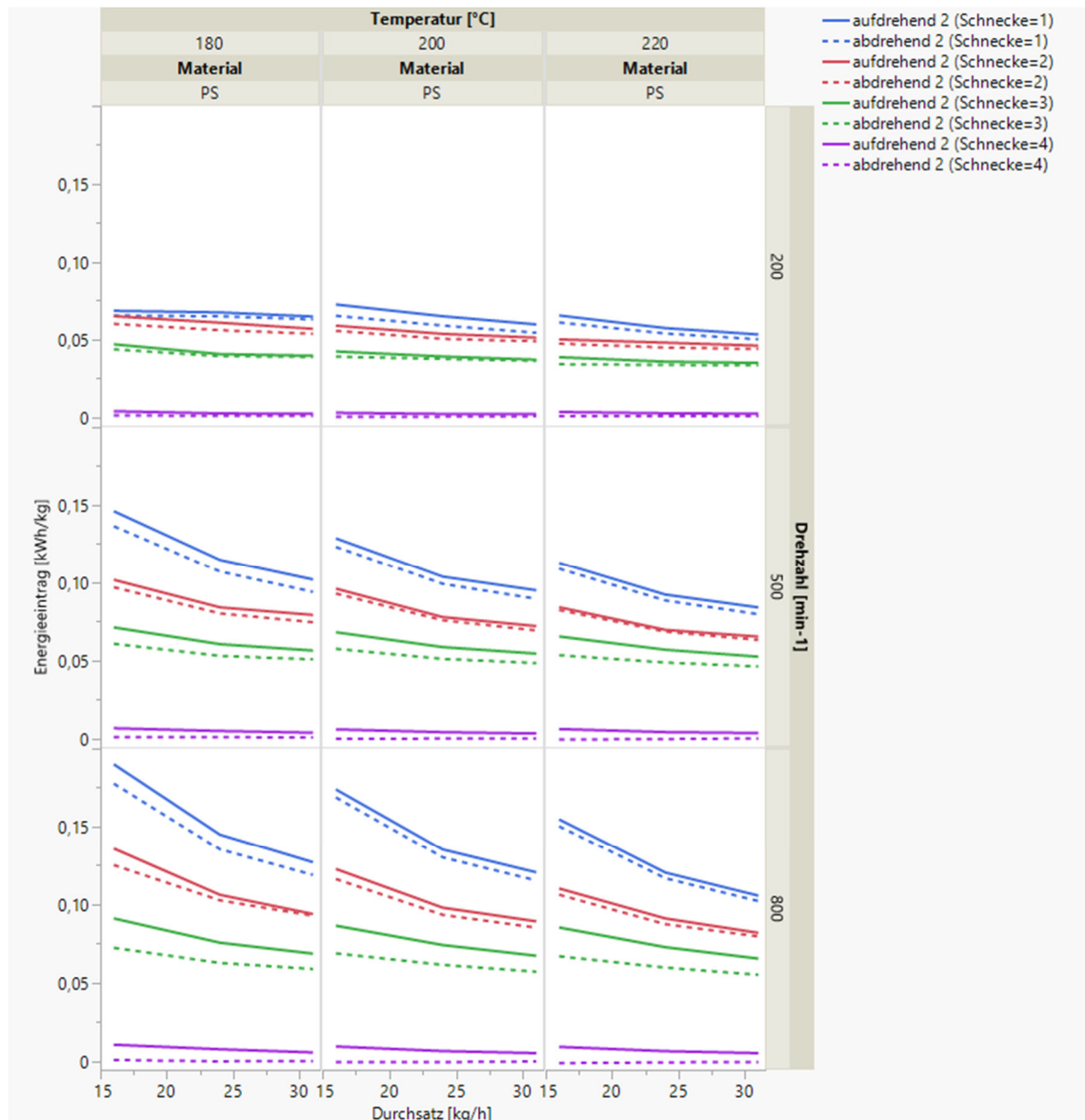


Abbildung 75: Darstellung des Energieeintrages für das PS in allen Schneckenkonfigurationen bei allen getesteten Parametervariationen

Im Folgenden werden nun die gemessenen Drehmomente sowie die berechneten Energieeinträge aus den Experimenten mit PS für alle Schneckenkonfigurationen einzeln gezeigt und in detaillierterer Form erläutert.

Ergebnisse der Schneckenkonfiguration 1

Auf Abbildung 76 und Abbildung 77 sind bereits die Ergebnisse für die Drehmomente und Energieeinträge der ersten Schneckenkonfiguration dargestellt. Im Folgenden soll für diese Werte noch eine genauere Betrachtung hinsichtlich der Effekte der Prozessparameter und deren Wechselwirkung sowie dem Unterschied der Schnecken erfolgen.

Dazu werden im ersten Schritt die Effekte der Parameter auf das Drehmoment bzw. den Energieeintrag festgestellt. Hierfür wird aus einer Versuchsreihe für die jeweilige Schnecke der Mittelwert der Zielgröße, also des Drehmoments oder des Energieeintrages, aus den Einzelwerten für die drei Parameterstufen errechnet. So ergeben sich für das Drehmoment die in Abbildung 76 dargestellten Diagramme. Dort sind die Einflüsse der Parameterstufen für alle variierten Parameter bei den Versuchen mit PS dargestellt. Die Parameterstufen sind dabei nach -/0/+ unterteilt. Diese Unterteilung ist bereits auf Tabelle 1 eingeführt worden. Zudem werden die auf- und abdrehende Schnecke einzeln betrachtet.

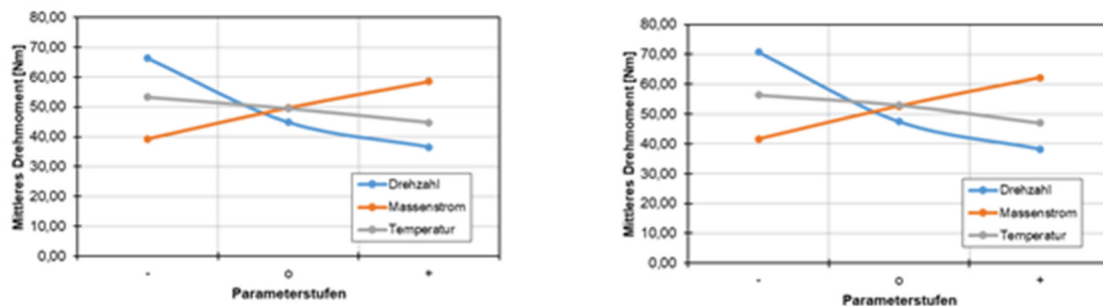


Abbildung 76: Darstellung des Drehmomentes über die Parameterstufen der Drehzahl (200, 500, 800 min^{-1}), des Massenstroms (16, 24, 31 kg/h) und der Temperatur (180, 200, 220 $^{\circ}\text{C}$) für die abdrehende Schnecke (links) und die aufdrehende Schnecke (rechts)

Diese Diagramme bestätigen erneut die aufgestellten Hypothesen, dass das Drehmoment bei steigender Drehzahl sowie steigender Temperatur abnimmt und bei steigendem Massenstrom zunimmt.

Auffällig hierbei ist der Einfluss der Drehzahl, da deren Verlauf über die Parameterstufen nicht linear ist. Eine Erhöhung der Drehzahl von 200 min^{-1} auf 500 min^{-1} führt z. B. zu einer stärkeren Abnahme des Drehmoments als eine Änderung der Drehzahl von 500 min^{-1} zu 800 min^{-1} . Zudem wird ersichtlich, dass die Drehzahl den größten Einfluss auf das Drehmoment hat, gefolgt vom Massenstrom und zuletzt der Temperatur. Bei den letzten beiden Parametern ist der Effekt einer Variation zudem linear. Auch bei der Effektbetrachtung liegen sowohl die absoluten Werte des Drehmoments als auch die Differenz zwischen den Parameterstufen bei der aufdrehenden Schnecke über den der Abdrehenden.

Im Anschluss können die Wechselwirkungen der einzelnen Parameter zueinander betrachtet werden. Dazu werden die Mittelwerte der Zielgrößen aus einem Versuch bei einer Parameterstufe von Parameter A für alle Parameterstufen des Parameters B aufgetragen. Beispielsweise werden die Mittelwerte der Drehmomente von allen Versuchen mit

200 min⁻¹ bei einem Massenstrom von 16 kg/h, 24 kg/h und 31 kg/h aufgetragen. So lassen sich Wechselwirkungen der Parameter zueinander erkennen.

Die Auswertung der Wechselwirkung für das Drehmoment zeigt nur bei den Parametern Drehzahl und Massenstrom eine eindeutige Abhängigkeit. Die Diagramme dafür sind in Abbildung 77 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Differenz der mittleren Drehmomente bei der niedrigen und bei der hohen Drehzahl abhängig von der Parameterstufe des Massenstroms ist. So führt eine Erhöhung der Drehzahl bei einem geringen Massenstrom zu einer kleineren Änderung des Drehmomentes als bei einem hohen Massenstrom. Zudem ist auch hier erkennbar, dass die Werte für das mittlere Drehmoment bei der aufdrehenden Schnecke höher sind als die der abdrehenden Schnecke. Dies liegt im Grundsatz an den generell höheren Drehmomenten aus den gemessenen Versuchspunkten.

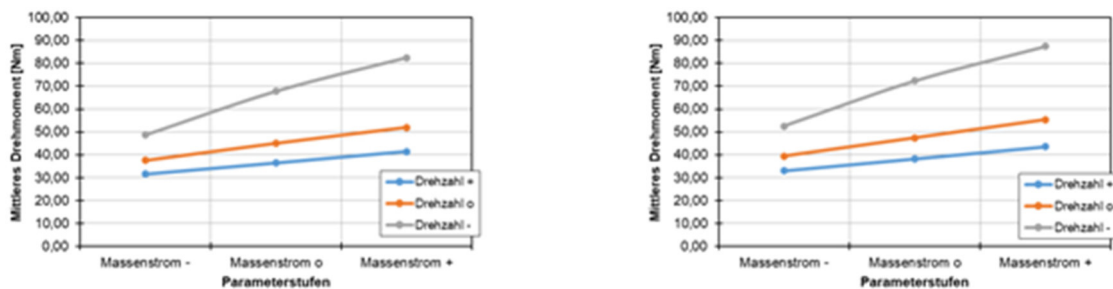


Abbildung 77: Darstellung des Drehmomentes für die abdrehende Schnecke (links) und die aufdrehende Schnecke (rechts) für die Variation der Parameter Drehzahl und Massenstrom

Eine ähnliche Betrachtung der Effekte, wie in Abbildung 76 für das Drehmoment gezeigt, ist für den Energieeintrag in Abbildung 78 dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Drehzahl den größten Einfluss auf den Energieeintrag nimmt. Wird diese erhöht, steigt auch der Energieeintrag. Steigt hingegen die Temperatur bei gleichbleibender Drehzahl und Massenstrom, fällt der mechanische Energieeintrag der Schnecke ab. Gleiches gilt für eine Erhöhung des Massenstroms. Der Einfluss der Drehzahl und des Massenstromes verhält sich, wie in zuvor bereits erläutert, konträr zu dem Verhalten bei der Drehmomentbetrachtung.

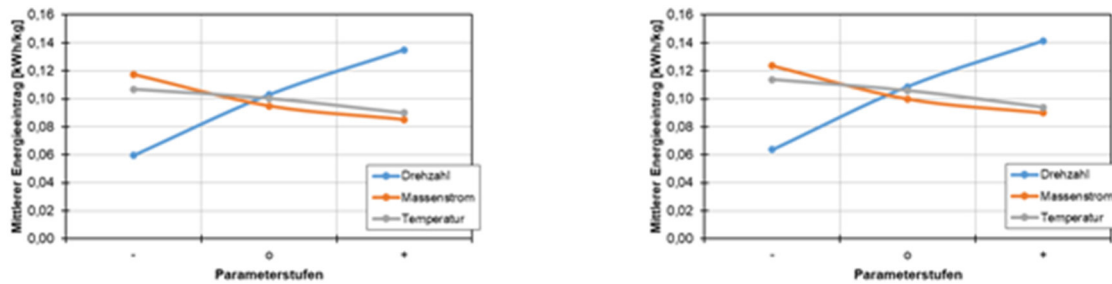


Abbildung 78: Darstellung des mittleren Energieeintrages für die Parameterstufen der Parameter Drehzahl, Massenstrom, Temperatur für die abdrehende Schnecke (links) und die aufdrehende Schnecke (rechts)

Die Wechselwirkungsbetrachtung für den Energieeintrag ergibt das gleiche Ergebnis wie für das Drehmoment. Die größte Wechselwirkung liegt zwischen Drehzahl und Massenstrom vor. Diese ist in Abbildung 79 kenntlich gemacht. Dort ist der mittlere Energieeintrag für alle Parameterstufen der Drehzahl über die Parameterstufen des Massenstroms dargestellt. Hier ist zu sehen, dass eine Erhöhung der Drehzahl bei einem geringen Massenstrom zu einer wesentlich größeren Änderung des *SME* führt als bei einem großen Massenstrom.

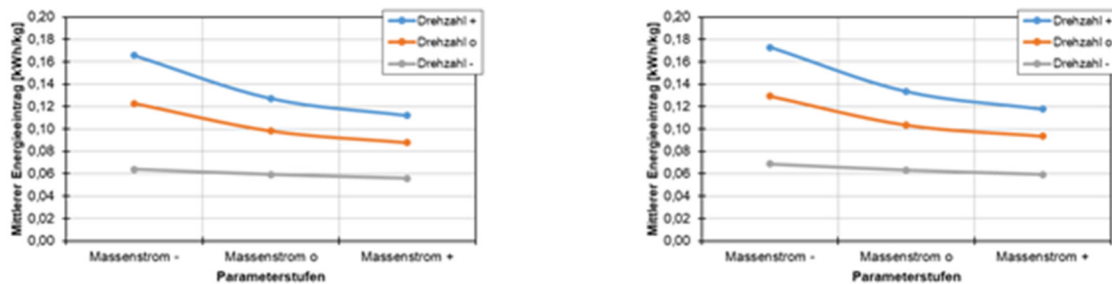


Abbildung 79: Darstellung des mittleren Energieeintrags für die abdrehende Schnecke (links) und die aufdrehende Schnecke (rechts) für die Variation der Parameter Drehzahl und Massenstrom

Zum Abschluss soll auf die Differenz der Drehmomente sowie des Energieeintrags der beiden Schnecken genauer untersucht werden. Auf Abbildung 77 und Abbildung 78 ist bereits zu erkennen gewesen, dass die aufdrehende Schnecke grundsätzlich einen höheren Wert für beide Zielgrößen aufweist. Um herauszufinden, ob die Differenz der Zielgrößen über alle Parameter konstant ist oder ob diese variiert, kann erneut eine Einflussuntersuchung vorgenommen werden.

Auf Abbildung 80 ist diese Untersuchung dargestellt. Es wird deutlich, dass eine Veränderung der Drehzahl auch bei der Differenz der Drehmomente einen Einfluss hat. Wird diese erhöht, sinkt die Differenz. Der Massenstrom hingegen verhält sich konträr dazu. Wird dieser erhöht, steigt der Drehmomentunterschied zwischen den beiden Schnecken.

Bei der Temperatur lässt sich kein eindeutiger Effekt erkennen. Der Verlauf der Kurve könnte auch auf Messfehler zurückzuführen sein und bedarf weiterer Untersuchungen zur Bestätigung. Durch die Effektuntersuchung wird deutlich, dass das Verhalten der Differenz des Drehmomentes dem Verhalten des Drehmomentes der einzelnen Schnecken aus Abbildung 17 ähnelt. Zudem kann eindeutig gezeigt werden, dass die Differenz nicht konstant bleibt und gezielt durch die Parameterwahl beeinflusst wird.

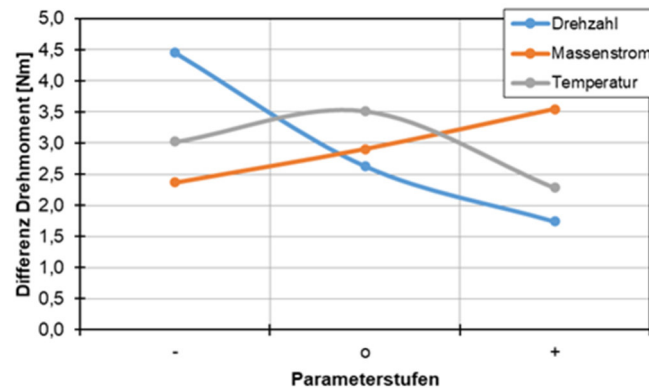


Abbildung 80: Darstellung der Differenz des Drehmomentes der auf- und abdrehenden Schnecke für alle Parameter

Wird die Einflussuntersuchung für die Differenz des Energieeintrages durchgeführt ergibt sich das Diagramm aus Abbildung 81. Daraus werden die gleichen Einflüsse deutlich, die auch bei der einzelnen Betrachtung der Schnecken aufgefallen sind. Eine steigende Drehzahl führt zu einem größeren Unterschied im Energieeintrag der Schnecken. Ein steigender Massenstrom hingegen verkleinert die Differenz. Auffällig ist hier nur der scheinbar starke Einfluss der Temperatur. Hier folgt aus einer steigenden Temperatur ein deutlich verringerter Unterschied im Energieeintrag. Die Betrachtung der weiteren Schneckenkonfigurationen wird Aufschluss darüber geben, ob diese Daten nur ein Messfehler sind oder einem tatsächlichen Effekt widerspiegeln.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl die Differenz des Drehmomentes als auch die des Energieeintrags der beiden Schnecken die gleichen Abhängigkeiten von den getesteten Parametern haben wie die einzeln betrachteten Werte. Dies deutet auf eine unterschiedliche Reaktion der Schnecken auf die Veränderung der Parameter hin. Die Daten zeigen, dass die aufdrehende Schnecke auf eine Veränderung besonders der Drehzahl und des Massenstroms in Hinblick auf das Drehmoment sowie den Energieeintrag übermäßiger reagiert als die abdrehende Schnecke.

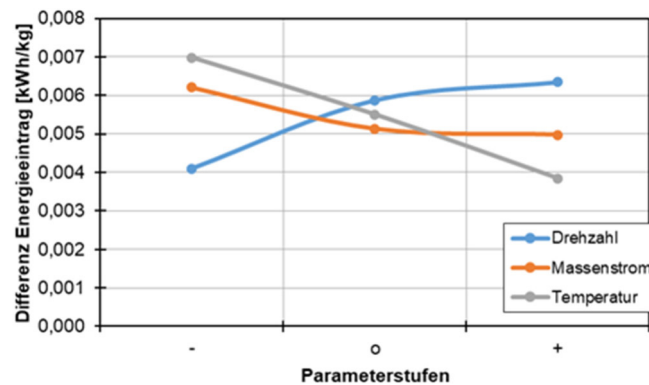


Abbildung 81: Darstellung der Differenz des Energieeintrages der auf- und abdrehenden Schnecke für alle Parameter

Ergebnisse der Schneckenkonfigurationen 2, 3 und 4

Im Folgenden werden die weiteren Schneckenkonfigurationen betrachtet. Zur besseren Übersicht werden die einzelnen Diagramme nicht mehr im Text dargestellt. Die Ergebnisse der Schneckenkonfigurationen bezüglich der Effekte und Wechselwirkungen der Parameter sind identisch zu den bereits betrachteten Ergebnissen. Weiterhin haben die Ergebnisse gezeigt, dass auch hier das Niveau der Zielgrößen der aufdrehenden Schnecke über denen der abdrehenden Schnecke liegen.

Aus den Daten für die weiteren Schneckenkonfigurationen lässt sich der starke Effekt der Temperatur auf den Energieeintrag, der in dem Abschnitt zuvor dargestellt wurde, nicht bestätigen. Damit kann festgelegt werden, dass die Daten für die Energieeintragsdifferenz zwischen den beiden Schnecken in Schneckenkonfiguration 1 einen Ausreißer darstellen. Die weiteren Daten für die Temperaturabhängigkeit der Drehmoment- sowie Energieeintragsdifferenz zeigen, dass kein bzw. nur ein geringer Einfluss der Temperatur vorliegt.

Betrachtung des orts aufgelösten Energieeintrages

In Abschnitt 3 ist bereits über die Aufteilung des Extruders und seiner Zonen in die Schneckenkonfigurationen gesprochen worden. Folgend sollen nun die berechneten Energieeinträge für die jeweiligen Konfigurationen verglichen werden, um daraus Rückschlüsse auf den Energieeintrag in den verschiedenen Verfahrenszonen eines DSE ziehen zu können. Es wurde bereits gezeigt, dass zwischen SK1 und SK2 eine größere Differenz im Energieeintrag vorliegt. Die gleiche Beobachtung kann auch bei dem Wechsel von SK3 auf SK4 gemacht werden. In Abbildung 82 sind deshalb die Unterschiede zwischen den Schneckenkonfigurationen zum besseren Verständnis dargestellt.

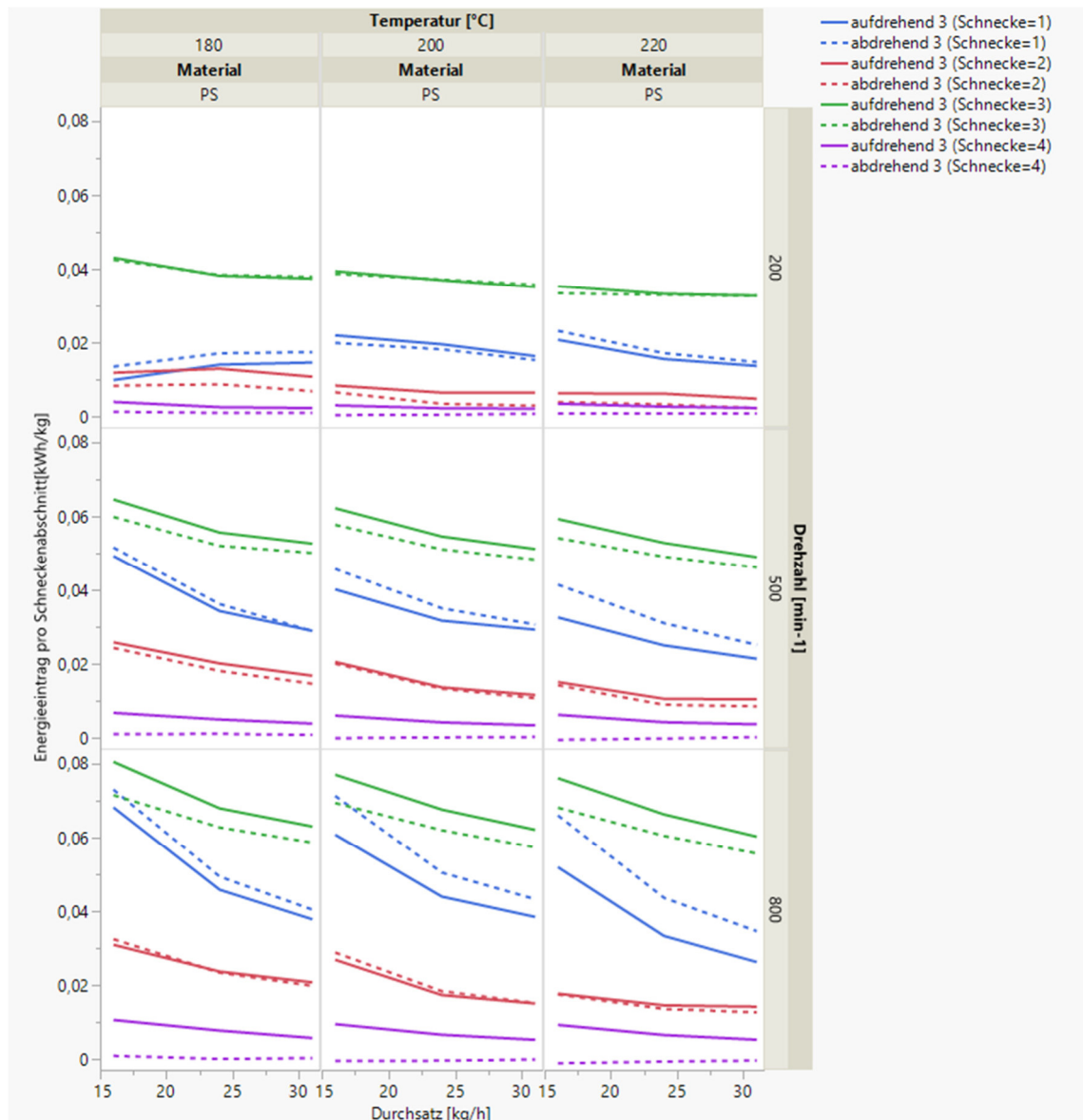


Abbildung 82: Darstellung der Differenz des Energieeintrages zwischen den jeweiligen Schneckenkonfigurationen für beide Schnecken und alle getesteten Parameterwerte für das PS

In Abbildung 82 wird die Differenz des Energieeintrages der jeweiligen Schneckenkonfigurationen dargestellt. Dazu wird bei jedem getesteten Parameter der Energieeintrag der getesteten Schneckenkonfiguration von der davor gemessenen Schneckenkonfiguration subtrahiert (siehe Abbildung 19). Daraus ergeben sich drei verschiedene Differenzen. Die Erste zwischen SK1 und SK2, die Zweite zwischen SK2 und SK3 und die Dritte zwischen SK3 und SK4. Des Weiteren wird in Abbildung 82 auch nach auf- und abdrehender Schnecke unterschieden. Hierbei ist wichtig, dass die einzelnen gemessenen Werte für die Zonen nicht exakt dem reellen Drehmoment in der Zone entsprechen. Ungenauigkeiten ergeben sich durch einen veränderten Füllgrad der Zone, da durch die fehlenden

Folgeelemente beim Weglassen der nächsten Zone kein Abstaufen hervorgerufen wird. Dies wirkt sich auf die vorigen Zonen aus wodurch ein Unterschied zwischen der Betrachtung der einzelnen Zonen und des gesamten Schneckenaufbaus entsteht. Eine weitere Ungenauigkeit ergibt sich durch den geänderten Lastangriffspunkt durch das Verschieben der Zonen. Beispielsweise erfolgt im Vergleich von SK1 und SK3 in etwa bei beiden die gleiche Belastung auf die Schnecke durch das Material in der Aufschmelzzone. Jedoch ist der Angriffspunkt der Belastung in der Aufschmelzzone bei SK3 deutlich weiter weg von der Einspannung als bei SK1. Somit findet hier eine stärkere Verdrehung der Welle bei gleicher Belastung statt, was ggf. zu einer Fehlinterpretation führen kann. Daraus resultierend kann auch eine Differenz zwischen zwei Schneckenkonfigurationen nicht exakt den Energieeintrag des Verfahrensteils beschreiben, der die beiden Konfigurationen unterscheidet.

Die Darstellung ermöglicht es direkt zu erkennen, in welchen Bereichen des Extruders größere Energieeinträge geschehen. Hier gilt, dass eine große Differenz zwischen den Konfigurationen auf einen hohen Energieeintrag durch die jeweils betrachtete Zone schließen lässt.

So wird direkt ersichtlich, dass zwischen SK4 und SK3 eine hohe Differenz liegt. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Abbildung 75. Der Grund dafür ist, dass die reine Feststoffförderung (SK4) wesentlich weniger mechanische Energie in den Kunststoff bringt als die Plastifizierungszone (SK3). In SK4 werden die Granulatkörner nur axial gefördert, während sie in der Plastifizierungszone gequetscht und plastifiziert werden. Diese Zone ist daher für einen großen Teil des mechanischen Energieeintrages durch die Schnecken in den Kunststoff verantwortlich, welches sich auch mit den Erkenntnissen aus dem Stand der Technik deckt.

Auffällig ist, dass zwischen SK3 und SK2 der geringste Unterschied im Energieeintrag vorliegt. Dies kann darauf hindeuten, dass die Homogenisierungszone, die in SK2 mit eingebracht ist, aber in SK3 fehlt, einen geringen Energieeintrag liefert. Ebenfalls muss aber beachtet werden, dass aufgrund der experimentellen Gegebenheiten der Extruder ab SK2 geöffnet wurde, um einen Materialstau in den Knetelementen zu verhindern. Dieses Vorgehen wurde bereits ausführlich in Abschnitt 3 erläutert. Durch den fehlenden Extrusionsdruck, der auch als Gegendruck auf die Schmelze wirkt, kann es also zu Verzerrungen in den Messungen gekommen sein.

Auffällig ist zudem, dass die reine Schmelzeförderung, die in SK1 gegenüber SK2 vorliegt, bei hohen Drehzahlen und niedrigen Massenströmen einen ähnlich hohen Energieeintrag in das Material liefert wie die Plastifizierung. Der Grund dafür könnte in eventuellen Leckströmungen liegen. Es ist auch möglich, dass die Verdichtung bei der Übergabe der Schmelze im Zwickelbereich zu dem hohen Energieeintrag in der Schmelzeförderung beiträgt.

Bei der Unterscheidung der Schnecken ist auffällig, dass die aufdrehende Schnecke eine geringere Differenz im Energieeintrag von SK1 nach SK2, also in der Schmelzeförderung, aufweist als die abdrehende. Sollte die Übergabe im Zwickelbereich für den Energieeintrag in der Schmelzeförderung verantwortlich sein, könnte dies darauf hindeuten, dass die aufdrehende Schnecke bei der Übergabe weniger Arbeit leistet als die abdrehende.

Bei der Betrachtung der Unterschiede zwischen SK3 und SK4, also in der Plastifizierungszone, weist die aufdrehende Schnecke eine größere Differenz auf. Dieser Effekt benötigt weitere Untersuchungen, um genau geklärt zu werden. Es ist möglich, dass die unterschiedliche Teilfüllung der Schnecken in den Verfahrensbereichen einen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Versuchsergebnisse Polypropylen

Das im vorherigen Abschnitt beschriebenen PS ist amorph. Das PP hingegen ist ein teilkristalliner Thermoplast. Daraus folgt, dass die Ergebnisse nicht übereinstimmen müssen. Um die kristallinen Bereiche des PP aufzuschmelzen wird mehr Energie benötigt. Die Begründung dafür liegt in den stärkeren Bindungskräften der teilkristallinen Bereiche im Kunststoff. Um diese durch Brown'sche Molekularbewegung zu trennen, wird deshalb eine größere Menge Energie benötigt. Dadurch ist die Enthalpiedifferenz die in Gleichung 5.1 und Gleichung 5.3 benötigt wird höher. Für das PP ist diese bei 200°C um Faktor zwei größer als bei dem PS [BBO13]. Deshalb ist zu erwarten, dass die gemessenen Antriebsdrehmomente beim PP höher liegen als beim PS. Daraus resultiert auch ein höherer *SME*, da dieser nach Gleichung 4.7 in einem linearen Zusammenhang zum Drehmoment steht. In Abbildung 83 werden die gemessenen Drehmomente für die Versuche mit PP dargestellt.

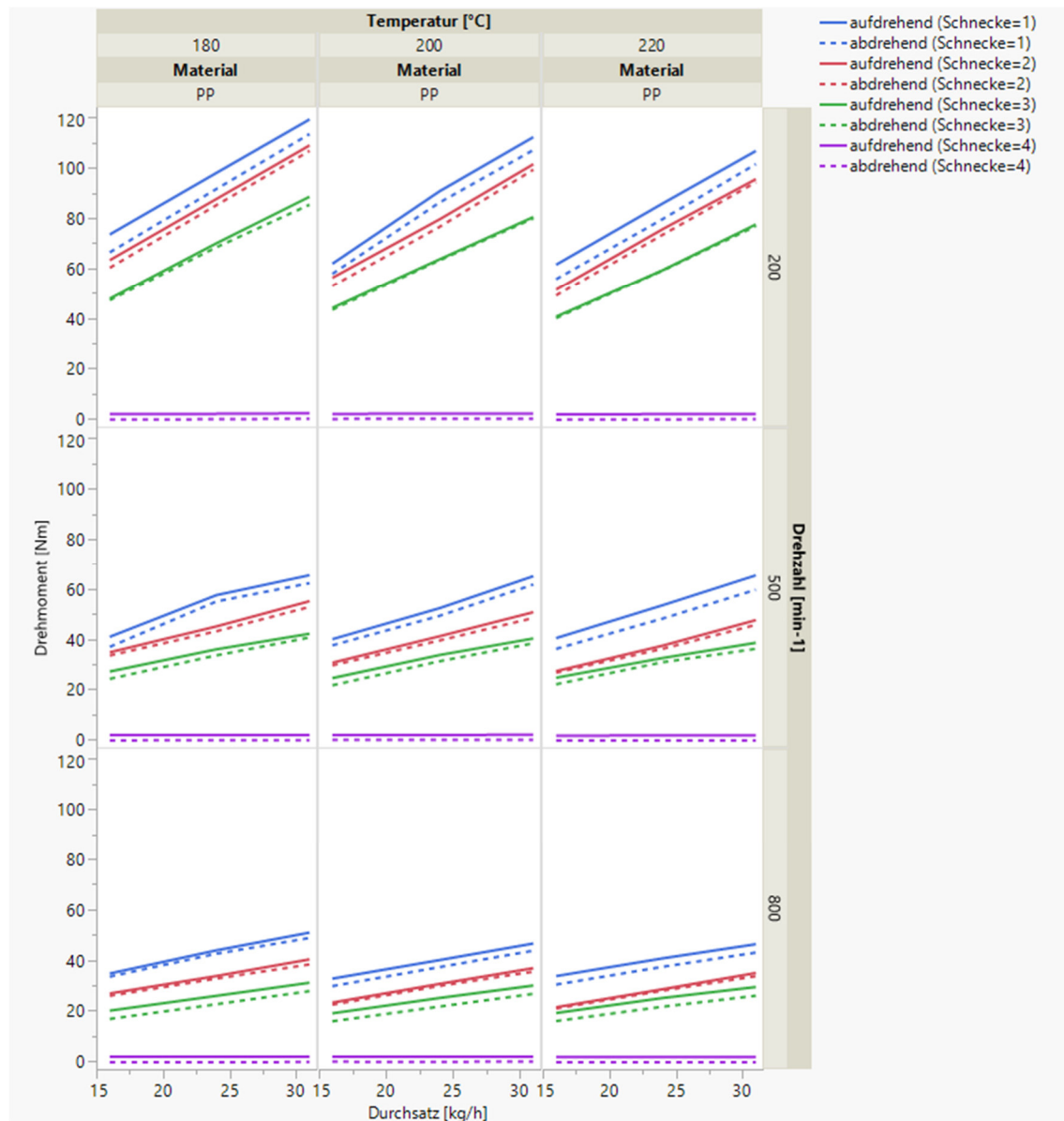


Abbildung 83: Darstellung der Drehmomente für das PP in allen Schneckenkonfigurationen bei allen getesteten Parameterkombinationen

Hier ergeben sich ähnliche Zusammenhänge wie bereits für PS beschrieben. Werden Temperatur und Massenstrom konstant gehalten und die Drehzahl erhöht, so sinkt das Drehmoment. Wird hingegen der Massenstrom bei konstanter Temperatur und Drehzahl erhöht, steigt das Drehmoment. Sind Massenstrom und Drehzahl konstant und die Temperatur wird erhöht, geht das Drehmoment leicht zurück. Auch bei den Versuchen mit PP sind für die aufdrehende Schnecke höhere Drehmomente gemessen worden als für die abdrehende.

Dass die Zusammenhänge zwischen den Parametern und dem Drehmoment sich gegenüber dem amorphen PS nicht verändern, liegt daran, dass die Energiebilanz am DSE immer noch den Zusammenhängen aus Gleichung 5.1 und Gleichung 5.3 folgt.

Zur besseren Übersicht ist der aus den Drehmomenten berechnete Energieeintrag in Abbildung 84 dargestellt. Dort wird ersichtlich, dass das Verhalten des Energieeintrages für verschiedene Parameter sich genauso verhält wie bei dem amorphen PS. Die Effekte wurden bereits beim PS genauer erklärt und liegen hier in der gleichen Form vor. Somit gilt weiterhin, dass der Energieeintrag mit steigender Drehzahl zunimmt und bei steigendem Massenstrom abnimmt. Ebenfalls führt eine Abnahme der Temperatur zu einem Abfall im *SME*.

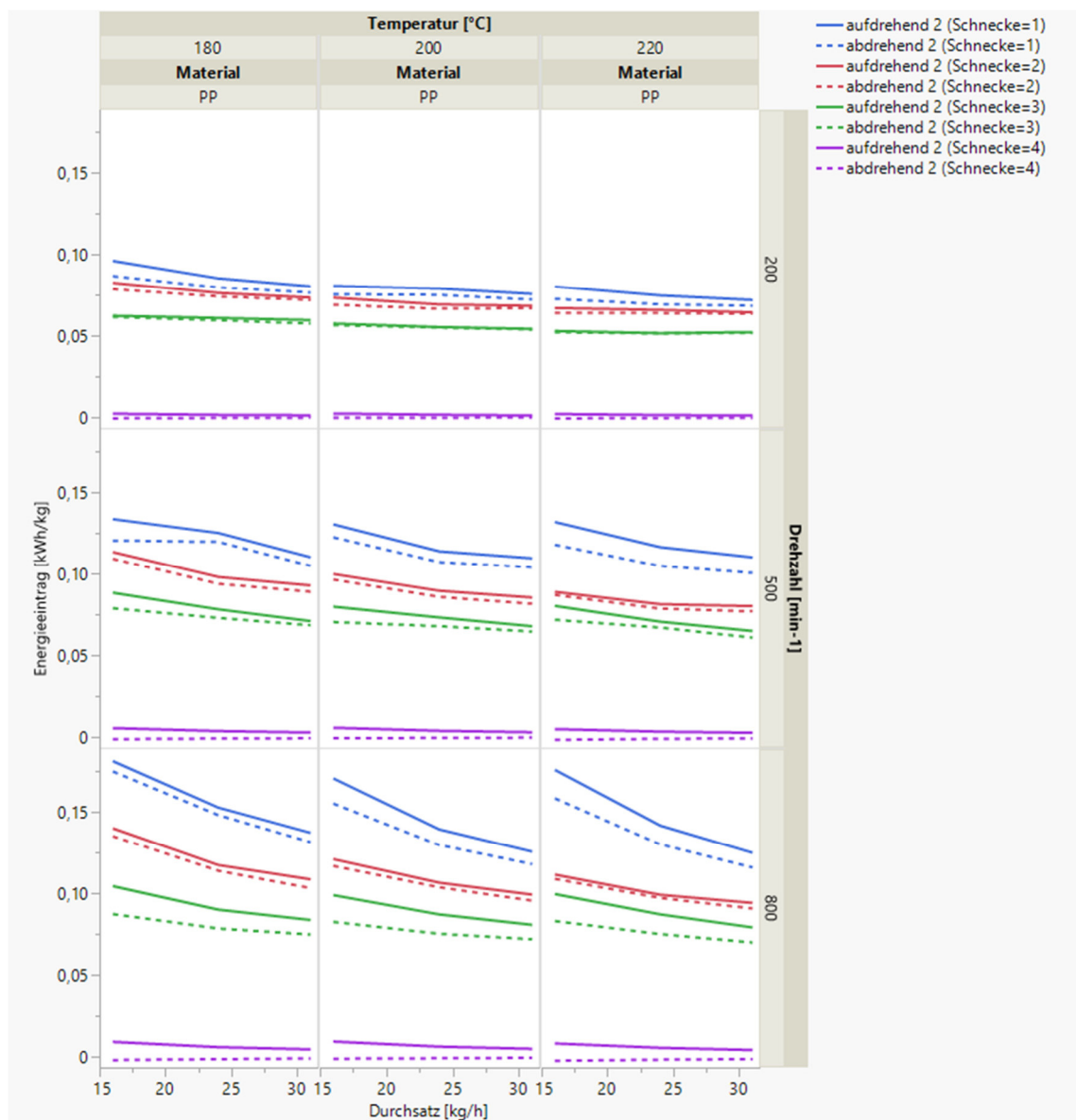


Abbildung 84: Darstellung der Energieeinträge in das PP bei allen Schneckenkonfigurationen für alle Parameterkombinationen

Im Folgenden sollen anhand der Schneckenkonfiguration 1 eine Betrachtung der Effekte und Wechselwirkungen vorgenommen werden. Das Vorgehen stimmt mit dem Vorgehen bei den Versuchen mit PS überein.

Ergebnisse der Schneckenkonfiguration 1

Um die Ergebnisse aus Abbildung 84 weiter zu untersuchen sind in Abbildung 85 die mittleren Drehmomente für alle Parameter in allen Parameterstufen dargestellt.

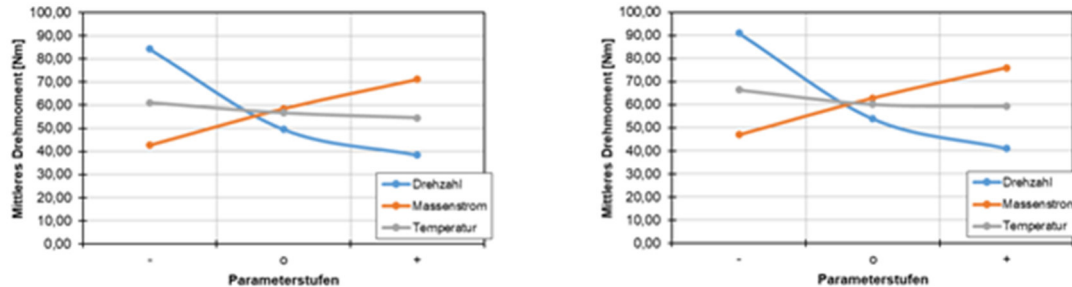


Abbildung 85: Darstellung des Drehmomentes über die Parameterstufen der Drehzahl, des Massenstroms und der Temperatur für die abdrehende Schnecke (links) und die aufdrehende Schnecke (rechts)

In der Grafik sind die Effekte der einzelnen Parameter auf das Drehmoment zu erkennen. Grundsätzlich hat die Drehzahl den größten Einfluss auf das Drehmoment. Wie in den Ergebnissen zu PS dargestellt, handelt es sich dabei nicht um ein lineares Verhalten. Wird die Drehzahl von 200 min^{-1} auf 500 min^{-1} erhöht, sinkt das Drehmoment stärker als bei einer Erhöhung von 500 min^{-1} auf 800 min^{-1} . Die Abhängigkeit des mittleren Drehmomentes vom Massenstrom verläuft dagegen linear. Wird dieser erhöht, steigt auch das Drehmoment an. Die Temperatur hat den geringsten Einfluss auf das Drehmoment. Einer Erhöhung dieser führt zu einer leichten Abnahme des Drehmoments. Auch hier ist zu beobachten, dass das mittlere Drehmoment bei der aufdrehenden Schnecke für alle Parameterstufen höher im Vergleich zur abdrehenden Schnecke ist. Ebenfalls sind die Differenzen für die einzelnen Parameterstufen bei den jeweiligen Parametern größer. Das bedeutet, dass die Effekte der Parameter bei der aufdrehenden Schnecke stärker sind als bei der Abdrehenden.

Auch für das PP konnte eine Wechselwirkung zwischen der Drehzahl und dem Massenstrom festgestellt werden. Zur Verdeutlichung ist dieser Zusammenhang in Abbildung 86 dargestellt. Dort ist das mittlere Drehmoment für alle Parameterstufen der beiden Parameter dargestellt. Zu erkennen ist, dass eine Erhöhung der Drehzahl bei einem hohen Massenstrom zu einer stärkeren Abnahme des Drehmoments führt als bei einem geringen Massenstrom. Dieser Effekt wurde bereits für das PS beobachtet.

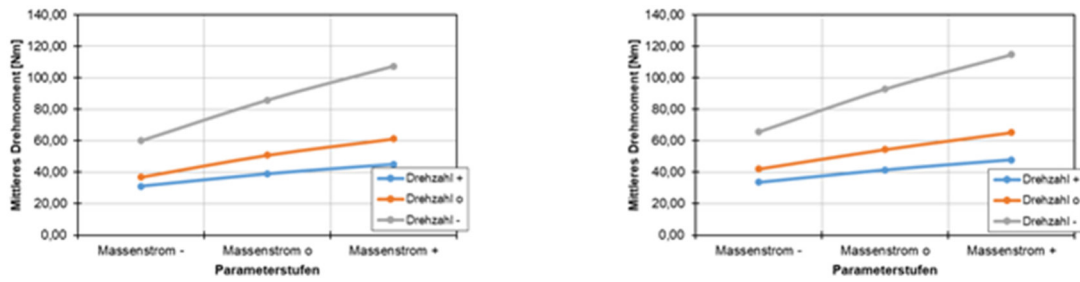


Abbildung 86: Darstellung des Drehmomentes für die abdrehende Schnecke (links) und die aufdrehende Schnecke (rechts) für die Variation der Parameter Drehzahl und Massenstrom

Eine Effektbetrachtung für den berechneten Energieeintrag bietet sich ebenfalls an. Diese ist in Abbildung 87 dargestellt. Dort ist der mittlere Energieeintrag für alle Parameter über alle Parameterstufen dargestellt. Es wird deutlich, dass eine steigende Drehzahl zu einem Anstieg des Energieeintrages führt, da eine schnelle Schneckenrotation zu einer stärkeren Scherbelastung auf das Material führt und somit mehr Energie aus der mechanischen Leistung genutzt wird und dafür weniger aus der thermischen Leistung, also der Materialerwärmung durch die Zylindertemperierung. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass bei höheren Drehzahlen die Schneckenkammer weniger gefüllt ist als bei niedrigeren und somit weniger Wärmeübertragung in die Schmelze durch die Zylindertemperierung erfolgen kann. Rein mathematisch kann dieser Zusammenhang auch in Gleichung 4.7 beobachtet werden. Dort wird erkenntlich, dass der *SME* linear mit der Drehzahl steigt, wenn das Drehmoment konstant bleibt. Da dieses jedoch sinkt, wird auch deutlich, warum eine Vervielfachung der Drehzahl nicht zu einer Vervielfachung des *SME* führt.

Ein höherer Massenstrom sowie eine höhere Temperatur hingegen führen zu einem Abfall des *SME*. Aus einer höheren Temperatur folgt, dass der Kunststoff mehr Aufschmelzenergie durch die Erwärmung durch stärkere Wärmeleitung aufnimmt und somit weniger mechanische Energie eingebracht werden muss.

Zudem ist in Abbildung 87 zu erkennen, dass die aufdrehende Schnecke wieder vom Gesamtniveau des mittleren Energieeintrages über der Abdrehenden liegt. Ebenfalls sind die Effekte der Parametervariation etwas stärker ausgeprägt. Diese Beobachtung kann sowohl bei den Ergebnissen zu PP als auch bereits bei den Ergebnissen zu PS festgestellt werden.

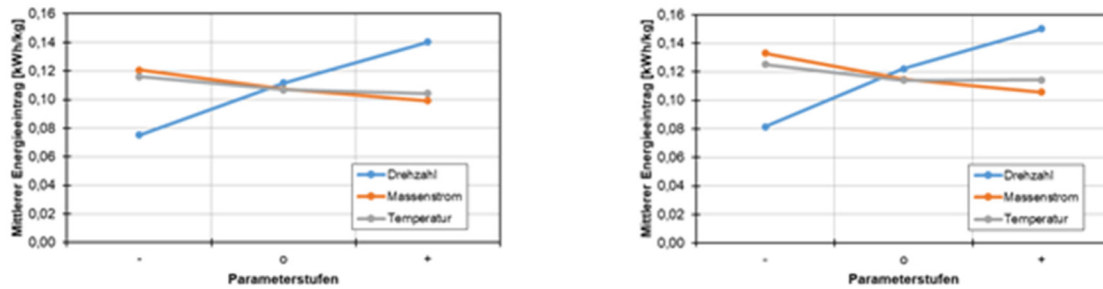


Abbildung 87: Darstellung des mittleren Energieeintrages für die Parameterstufen der Parameter Drehzahl, Massenstrom, Temperatur für die abdrehende Schnecke (links) und die aufdrehende Schnecke (rechts)

Auch für den Energieeintrag kann die Wechselwirkung zwischen Drehzahl und Massenstrom beim PP erneut bestätigt werden. Diese ist auf Abbildung 88 deutlich gezeigt. So führt eine Erhöhung der Drehzahl bei einem geringen Massenstrom zu einer stärkeren Erhöhung des *SME* als bei einem hohen Massenstrom. Diese Ergebnisse decken sich mit den bereits beschriebenen Erkenntnissen für PS.

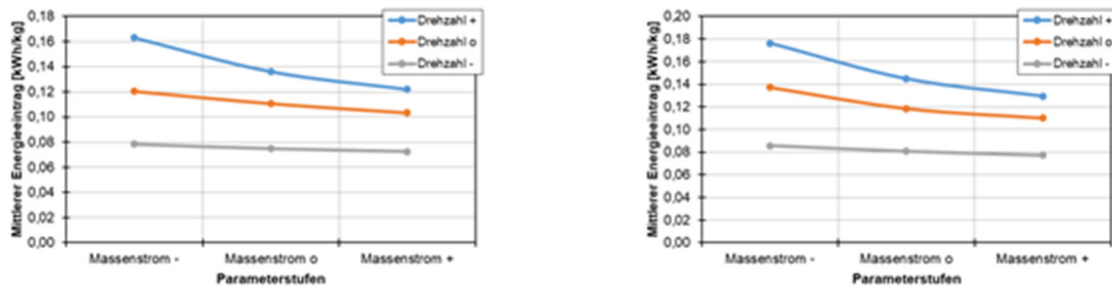


Abbildung 88: Darstellung des mittleren Energieeintrages für die abdrehende Schnecke (links) und die aufdrehende Schnecke (rechts) für die Variation der Parameter Drehzahl und Massenstrom

Zum Abschluss soll, wie bereits beim PS dargestellt, die Differenz des Drehmoments und des Energieeintrags der auf- und abdrehenden Schnecke genauer untersucht werden. Dazu sollen, analog zum bisherigen Vorgehen, Abhängigkeiten der Differenz von verschiedenen Parametern erläutert werden. Grundsätzlich ist auch für das PP das Drehmoment und der *SME* bei der aufdrehenden Schnecke größer als bei der abdrehenden Schnecke. Dies ist bereits deutlich auf den vorherigen Abbildungen zu sehen. Auf Abbildung 89 ist nun die Differenz des Drehmoments zwischen den Schnecken für alle Parameter über alle Parameterstufen dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass eine Erhöhung der Drehzahl die Differenz des Drehmoments zwischen den beiden Schnecken verringert. Für den Massenstrom ist hier kein deutlicher Einfluss zu erkennen. Die Temperatur zeigt kein lineares Verhalten. So führt eine Erhöhung der Temperatur von 180 °C auf 200 °C zu einer Verkleinerung des Drehmomentunterschieds. Wird diese dann weiter auf 220 °C

erhöht, steigt die Differenz erneut an. Dieses Verhalten wurde bei einigen Schneckenkonfigurationen beim PS auch beobachtet. Eine Erklärung dafür ist auf Basis der ermittelten Ergebnisse nicht möglich und erfordert weitere Untersuchungen, die sich speziell auf den Einfluss der Temperatur beschränken.

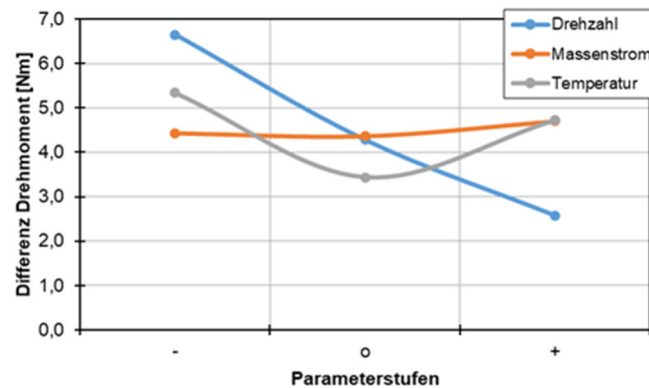


Abbildung 89: Darstellung der Differenz des Drehmomentes der auf- und abdrehenden Schnecke für alle Parameter

Auf Abbildung 90 ist die Differenz des Energieeintrags für beide Schnecken über alle Parameterstufen für alle Parameter dargestellt. Auffällig ist dabei das Verhalten der Drehzahl. So führt eine Erhöhung der Drehzahl von 200 min^{-1} auf 500 min^{-1} zu einer Zunahme der Differenz während bei einer weiteren Erhöhung auf 800 min^{-1} die Differenz zwischen den Schnecken wieder abnimmt. Die Erklärung liegt vermutlich in einem Messfehler für den Messpunkt bei 180°C , 16 kg/h und 500 min^{-1} . Dieser ist bereits in Abbildung 73 als auffällig zu bewerten. Bei diesem Messpunkt ist die Differenz der beiden Schnecken im Energieeintrag wesentlich höher als bei den zum Vergleich vorliegenden Messpunkten. Daher handelt es sich um einen Ausreißer, der hier das Ergebnis beeinflusst. Für den Massenstrom hingegen ist zu erkennen, dass die Differenz im *SME* sinkt, sobald dieser abnimmt. Die Temperatur zeigt hier ebenfalls ein auffälliges Verhalten ähnlich zu den Ergebnissen der Differenz der Drehmomente. Da der *SME* aus dem Drehmoment berechnet wird, wurde dieses Verhalten erwartet. Auch hier ist ohne weitere Versuche nicht zu erklären, ob es sich um Messfehler handelt oder ob der Einfluss der Temperatur ein komplexeres Verhalten aufweist.

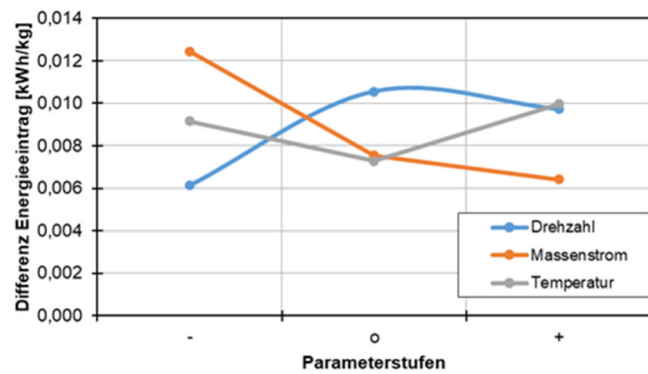


Abbildung 90: Darstellung der Differenz des Energieeintrags der auf- und abdrehenden Schnecke für alle Parameter

Ergebnisse der Schneckenkonfigurationen 2,3 und 4

Diese sind in Bezug auf die Effekte der Parameter auf das Drehmoment und den Energieeintrag sehr ähnlich zu den beschriebenen Effekten für die Schneckenkonfiguration 1.

Daher soll im Folgenden nun eine genauere Betrachtung der orts aufgelösten Energieeinträge erfolgen, um die einzelnen Verfahrenszonen bei einem teilkristallinen Thermoplast besser beurteilen zu können.

Betrachtung des orts aufgelösten Energieeintrages

Für das PP sind ebenfalls Versuche in allen Schneckenkonfigurationen gemacht worden. Daraus soll nun der Energieeintrag der verschiedenen Zonen betrachtet werden. Dazu ist in Abbildung 91 die Differenz des Energieeintrags der jeweiligen Schneckenkonfigurationen dargestellt. So lässt sich rein qualitativ der Energieeintrag in den verschiedenen Verfahrenszonen abschätzen.

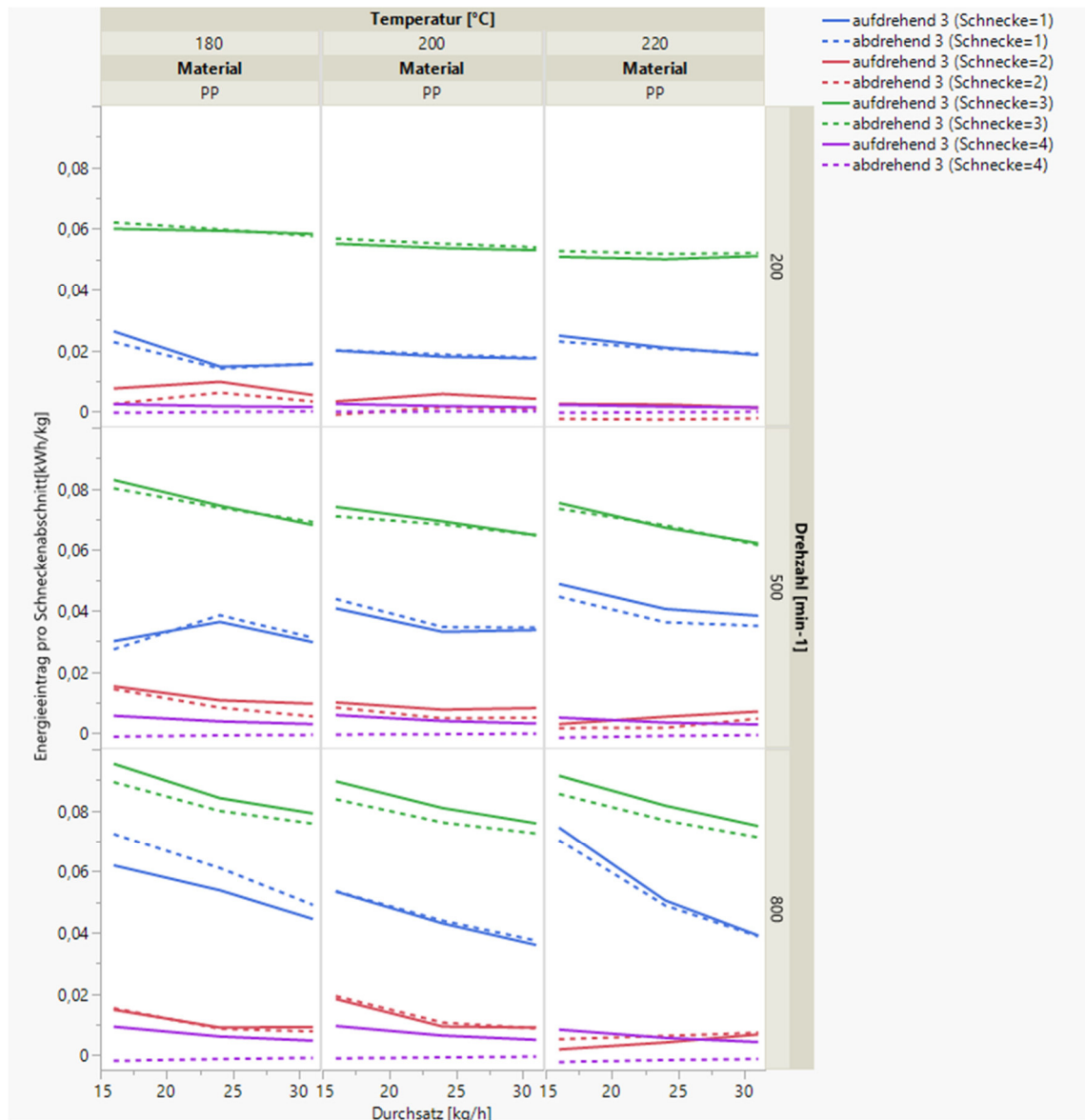


Abbildung 91: Darstellung der Differenz des Energieeintrages zwischen den jeweiligen Schneckenkonfigurationen für beide Schnecken und alle getesteten Parameterwerte für das PP

Die Ergebnisse für das PP decken sich weitestgehend mit denen des PS. Es ist zu sehen, dass die größte Energieeintragsdifferenz zwischen SK3 und SK4 auftritt. Daraus wird klar, dass die Plastifizierungszone einen hohen Energieeintrag liefert. Dies ist insofern logisch, da dort das Material durch Quetschen und Kneten plastifiziert wird. Der geringste Energieeintrag erfolgt nach Abbildung 91 zwischen SK2 und SK3. Die Differenz zwischen diesen Konfigurationen beschreibt die Homogenisierungszone. Auch bei den Versuchen mit PP ist der Extruder ab SK2 offen gefahren worden. Dieser Umstand muss hier berücksichtigt werden.

Die Differenz zwischen SK1 und SK2 beschreibt die Schmelzeförderung. Auch hier ist ein erhöhter Energieeintrag festzustellen. Die Gründe dafür sind bereits beim PS erläutert worden.

Die Schnecken unterscheiden sich jedoch bei den Versuchen mit PP in dieser Betrachtung weniger als bei den Versuchen mit PS. Bei der Differenz von SK1 und SK2 sind die aufdrehende und abdrehende Schnecke nahezu gleich. Nur bei 180 °C und 800 min⁻¹ decken sich die Beobachtungen mit denen beim PS. Dort ist die Differenz zwischen den Konfigurationen für die aufdrehende Schnecke geringer.

Wird die Differenz von SK3 nach SK4, also die Plastifizierungszone, betrachtet fällt auf, dass bei 800 min⁻¹ die aufdrehende Schnecke generell eine höhere Differenz aufweist als die Abdrehende. Bei 500 min⁻¹ liegt für die aufdrehende Schnecke bei geringen Massenströmen eine höhere Differenz vor, diese wird jedoch zunehmend kleiner und bei hohen Massenströmen ist die Differenz zwischen den Konfigurationen für die aufdrehende Schnecke geringer. Ein ähnliches Phänomen ist für die Versuche bei 200 min⁻¹ zu beobachten. Dort liegen bei geringen Massenströmen die Differenzen beider Schnecken auf gleichem Niveau. Bei höheren Massenströmen ist jedoch die Differenz der aufdrehenden Schnecke geringer. Dadurch wird klar, dass in der Plastifizierungszone der Parameter Massenstrom eine unterschiedliche Auswirkung auf die Schnecken haben muss.

Vergleich der Ergebnisse für beide Materialien

In den vorherigen Kapiteln sind die Ergebnisse für das PS sowie das PP dargestellt worden. Weiterhin soll auf die Differenz zwischen den Thermoplasten eingegangen werden. So war zu erwarten, dass die Energieeinträge sowie die Drehmomente für das PP größer sind. Der Grund dafür ist die höhere spezifische Enthalpiedifferenz. Diese müsste nach Gleichung 5.1 das Drehmoment und damit den *SME* erhöhen. Dieser Effekt ist in den Ergebnissen sichtbar. Doch fällt er weniger stark aus als erwartet. So ist die Enthalpiedifferenz zwar um Faktor zwei höher, jedoch steigt das Drehmoment für das PP gegenüber dem PS nicht um Faktor zwei. Ebenso liegt der *SME* für beide Materialien auf nahezu gleichem Niveau. Der Grund dafür könnte in der höheren Wärmekapazität des PP liegen. So führt diese zu einem Anstieg des Terms in Gleichung 5.1. Dadurch wird das Drehmoment bei ansonsten konstant gehaltenen Prozessparametern bei PS geringer. Des Weiteren ist die Viskosität für das Polypropylen geringer (vgl. Abschnitt 4.1), was ebenfalls zu einem verringerten *SME* führt.

Zudem zeigte sich, dass die Effekte aller Parameter auf Drehmoment und Energieeintrag bei beiden Materialien gleich sind. Auf diese hat die Wahl eines teilkristallinen oder amorphen Thermoplastes keine Auswirkungen.

Werden die orts aufgelösten Energieeinträge betrachtet, können unterschiedliche Beobachtungen gemacht werden. Für PS besitzt die aufdrehende Schnecke in der Schmelzeförderung generell einen geringeren Energieeintrag als die Abdrehende. In der Plastifizierungszone hingegen ist der Energieeintrag der aufdrehenden Schnecke generell höher. Für das PP konnte hingegen keine eindeutigen Zuordnungen für den Energieeintrag der beiden Schnecken im Hinblick auf die orts aufgelöste Betrachtung getroffen werden.

Abschließende Betrachtungen der Ergebnisse

Durch die Experimente konnte nachgewiesen werden, dass die Feststoffförderzone aufgrund der Kürze dem verhältnismäßig geringen Energieeintrag weiterhin zu vernachlässigen ist. Die Plastifizierungszone und die Schmelzförderer in einem DSE liefern den größten Energieeintrag in das Material. Dieses Ergebnis gilt sowohl für einen teilkristallinen Thermoplast als auch für einen amorphen Thermoplast. Des Weiteren konnten Abhängigkeiten des Drehmoments und des Energieeintrags von den Parametern Drehzahl, Massenstrom und Temperatur aufgezeigt werden.

Zudem bestätigen die Ergebnisse, dass die auf- und abdrehende Schnecke hinsichtlich des Drehmoments und des Energieeintrags unterschiedlich sind. So waren höhere Werte bei der aufdrehenden Schnecke zu beobachten. Eine weitere Möglichkeit, die zu einem Unterschied der Schnecken bezüglich beider Zielgrößen führen könnte, ist die Antriebsart. Sollte sich herausstellen, dass die aufdrehende Schnecke angetrieben wird und die abdrehende mit antreibt, kann dadurch das höhere Drehmoment erklärt werden. Dagegen spricht, dass in dieser Arbeit bereits gezeigt wurde, dass die Differenz des Drehmoments zwischen den beiden Schnecken bei steigender Drehzahl geringer wird (vgl. Abbildung 75 und Abbildung 84). Würde die aufdrehende Schnecke die Abdrehende mit antreiben, so wäre bei steigender Drehzahl eine größere Differenz der Drehmomente zu erwarten, weil die aufdrehende Schnecke mehr Antriebsdrehmoment benötigt, um die abdrehende Schnecke zusätzlich anzutreiben.

Aus diesen Gründen sind weitere Experimente nötig, um den Unterschied der Schnecken final begründen zu können. Es bietet sich an eine Untersuchung der Teilfüllungen der einzelnen Schnecken bei den in dieser Arbeit getesteten Parametern durchzuführen, um

den Effekt dieser auf das Drehmoment und den Energieeintrag genauer definieren zu können.

Zusätzlich zu den Untersuchungen an dem ZE 28 BLUE POWER wurden äquivalente Untersuchungen an der ZSK25 an Forschungseinrichtung 2 durchgeführt, um die Effekte einer weiteren Anlagengröße zu betrachten. Da sich bei den Untersuchungen die gleichen Effekte nur verändert in den Absolutwerten zeigt, werden die Ergebnisse hier nicht erneut diskutiert. Nachfolgend ist eine Übersicht dargestellt.

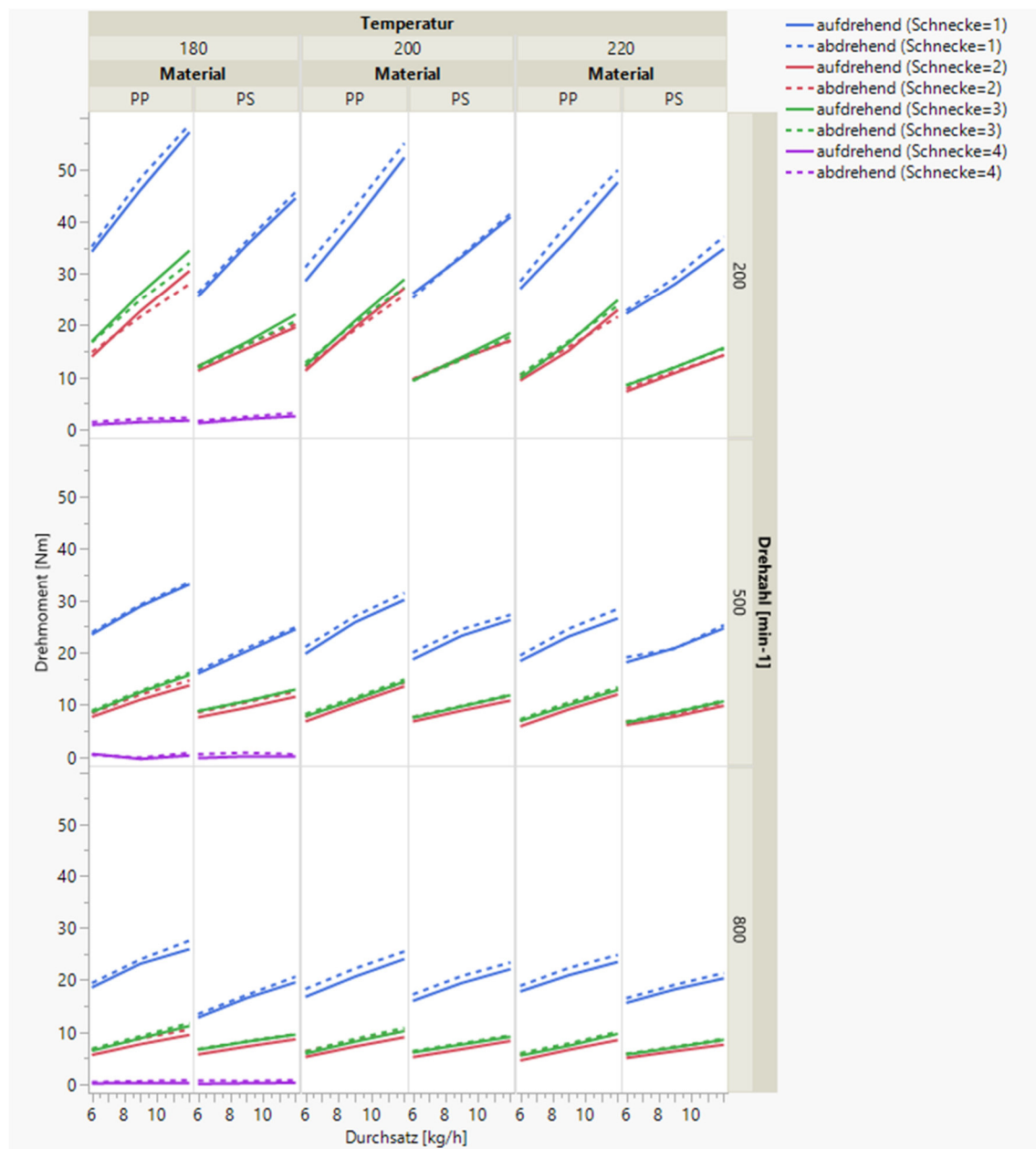


Abbildung 92: Übersicht über die Messergebnisse an der ZSK25 mit Variation des Polymers, der Drehzahl, des Durchsatzes und der Zylindertemperatur sowie der unterschiedlichen Dosierpositionen

Auswertung weiterer Schneckenaufbauten

Untersucht wurde zusätzlich der Einfluss unterschiedlicher Schneckenaufbauten auf den Energieeintrag. Hierzu wurde im Bereich der Schmelzeförderung bzw. in der Mischzone der Unterschied zwischen einem breiten 2-gängigen Knetblock (blau), einem schmalen 3-gängigen Knetblock (grün) und den Zahnmischelementen (rot) betrachtet. In Abbildung 93 ist das insgesamt auftretende Drehmoment der vollständigen Schneckenaufbauten dargestellt, wobei nach Polymer und Drehzahl unterschieden und über dem Durchsatz aufgetragen wurde.

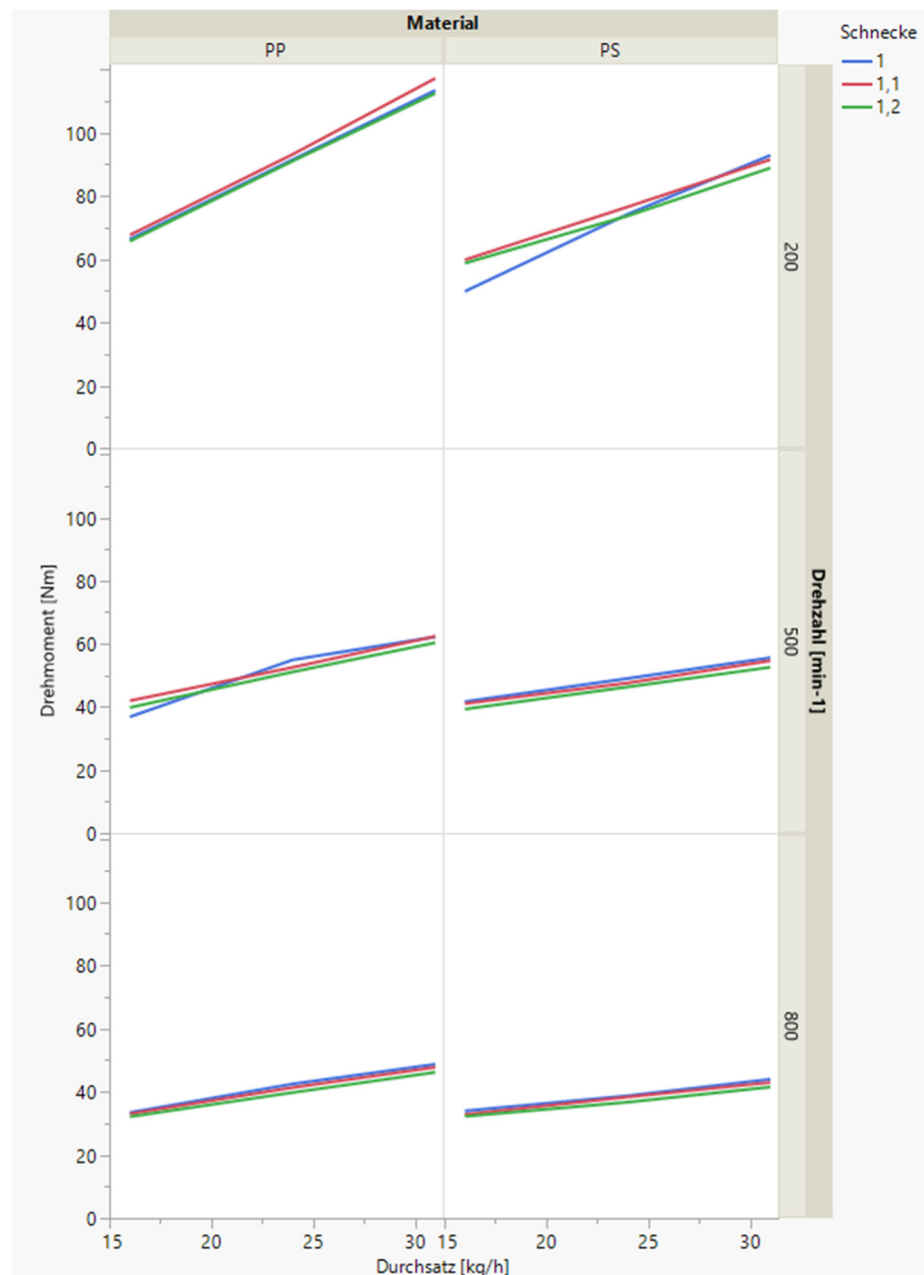


Abbildung 93: Übersicht über die Untersuchungsergebnisse für unterschiedliche Schneckenelemente an dem ZE 28 BLUE POWER am Ende der Schnecken

Es lassen sich nur geringfügige Unterschiede zwischen den drei Konfigurationen feststellen, lediglich bei genauer Betrachtung zeigt sich ein leichter Trend, dass die 2-gängigen KBE am meisten Energie eintragen und die 3-gängigen KBE am wenigsten, wie nachfolgende Detailaufnahme zeigt.

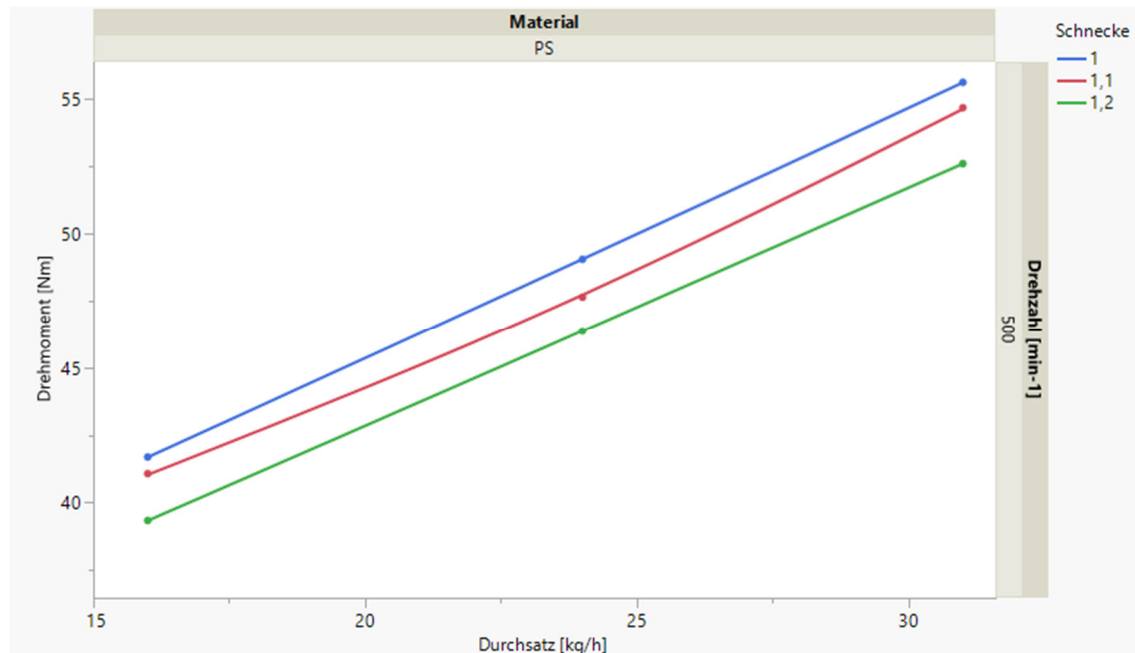


Abbildung 94: Drehmomentmessung an dem ZE 28 BLUE POWER bei Variation des Durchsatzes für 3 Schneckenbauten S1.0(blau) S1.1(rot) und S1.2(grün) bei Verwendung von PS bei 500 min⁻¹ und 180 °C Zylindertemperatur

Auch bei Betrachtung der vorangehenden Zone (ohne Druckaufbau vor dem Werkzeug) lässt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Schneckenkonfigurationen feststellen, wie nachfolgend abgebildet.

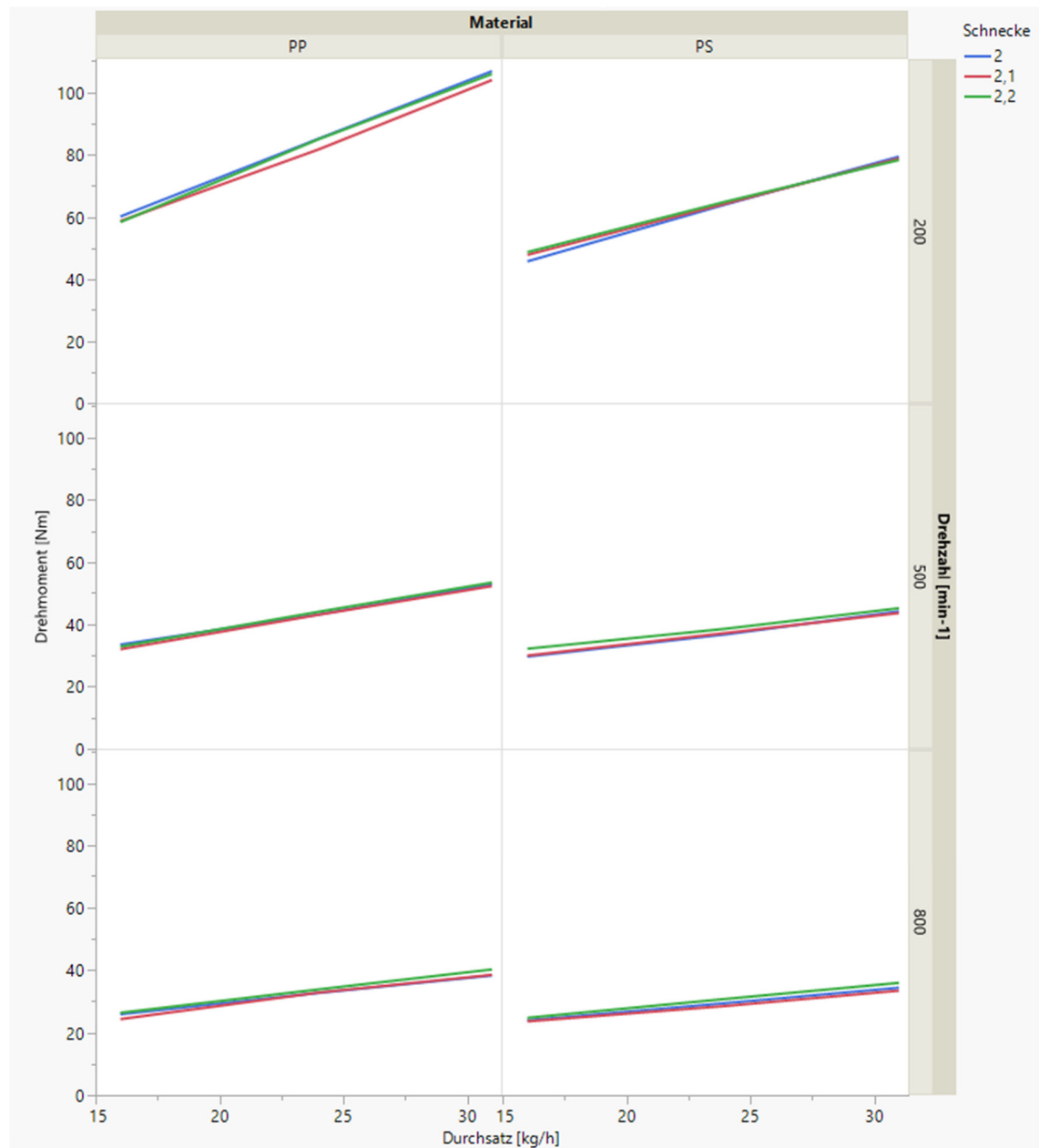


Abbildung 95: Übersicht über die Drehmomentmessungen der drei Schneckenaufbauten bei Vernachlässigung des Druckaufbaus vor der Düse

Auch hier zeigt sich bei genauer Betrachtung eine leichte Tendenz hinsichtlich der Unterscheidung der Elemente, welche sich jedoch von der vorangegangenen Messung unterscheidet, wie nachfolgend abgebildet.

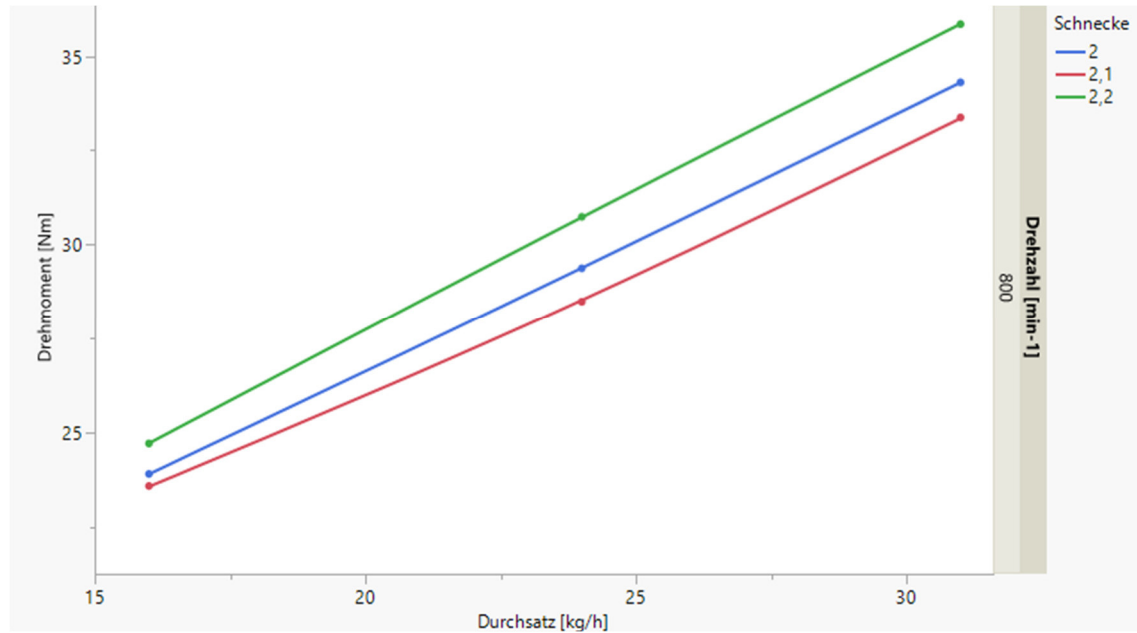


Abbildung 96: Drehmomentmessung an dem ZE 28 BLUE POWER bei Variation des Durchsatzes für 3 Schneckenbauten S1.0 (blau) S1.1 (rot) und S1.2 (grün) bei Verwendung von PS bei 800 min⁻¹ und 180 °C Zylindertemperatur bei Vernachlässigung des Druckaufbaus an der Schneckenspitze

Bei Vernachlässigung der Druckaufbauzone zeigt sich, dass der 3-gängige Knetblock mehr Energie in das Material einbringt als die anderen Elemente. Die gegensätzliche Erkenntnis aus der anderen Untersuchungsreihe könnte dadurch erklärt werden, dass durch diesen Elementtyp eine stärkere Scherverdünnung des Materials stattfindet als bei den anderen Elementen, wodurch in der nachfolgenden Zone nur wenig Energie in das niedrigviskosere Material eingetragen wird.

Betrachtung der Aufschmelzzone mit Fokus auf Drehmomentunterschied

Zusätzlich wurde der Einfluss unterschiedlicher Knetblöcke in der Aufschmelzzone untersucht. Nachfolgend sind drei Drehmomentkurven abgebildet, welche über unterschiedlichen dimensionslosen Durchsätzen, aus Gleichung 5.4, bei schmalen Knetblöcken mit Versatzwinkeln von -45° / 90° / 45° aufgezeichnet wurden.

$$\pi_{\dot{m}} = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot n \cdot D_s^3} \quad (5.4)$$

Durch den Vergleich der dimensionslosen Durchsätze ergibt sich eine Unabhängigkeit von der Anlagengröße und dem Füllgrad. Hier zeigt sich, dass durch die Variation der Elemente in der Aufschmelzzone ein deutlicher Einfluss auf den Energieeintrag genommen werden kann.

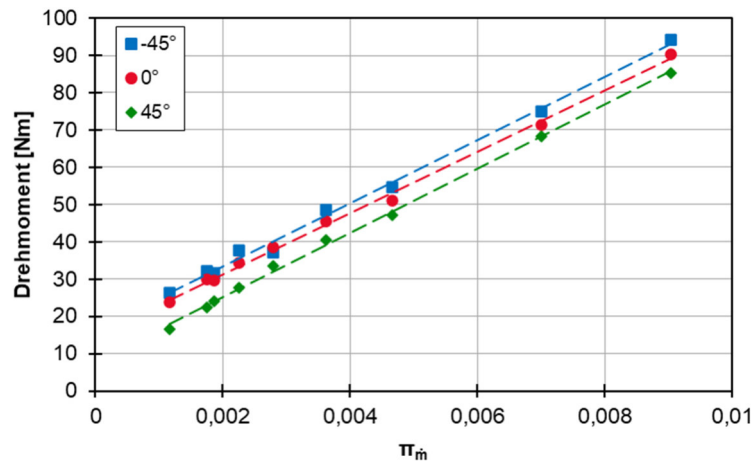


Abbildung 97: Drehmomentmessung an dem ZE 28 BLUE POWER bei Variation von Drehzahl und Durchsatz bei Verwendung unterschiedlicher Versatzwinkel bei schmalen Knetblöcken. Drehmoment aufgetragen über dimensionslosem Durchsatz

Durch das Anstauen vor der Aufschmelzzzone, bewirkt durch den negativen Versatzwinkel der Knetblockscheiben, bzw. in geringerem Maß durch den neutralen Winkel kann ein höherer Energieeintrag bewirkt werden.

Eine vergleichende Untersuchungsreihe wurde an breiten Knetblockscheiben durchgeführt, deren Ergebnisse nachfolgend abgebildet sind. Für diese Untersuchungen standen zusätzlich die Versatzwinkel 30° und 60° zur Verfügung.

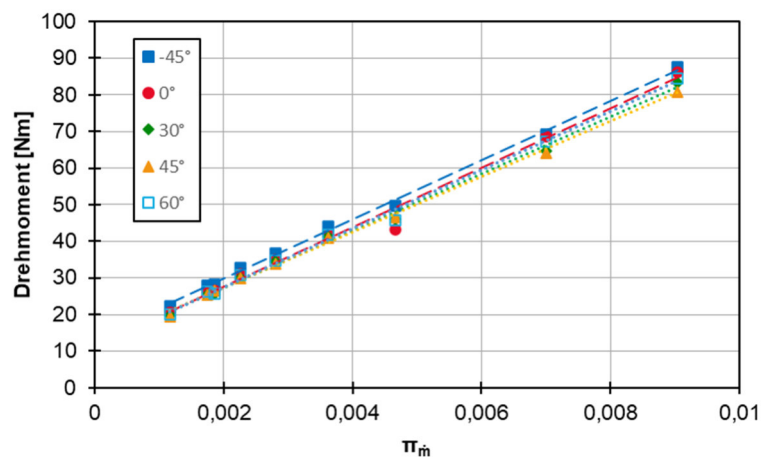


Abbildung 98: Drehmomentmessung an dem ZE 28 BLUE POWER bei Variation von Drehzahl und Durchsatz bei Verwendung unterschiedlicher Versatzwinkel bei breiten Knetblöcken. Drehmoment aufgetragen über dimensionslosem Durchsatz

Auch für die breiteren Knetblockscheiben zeigt sich, dass negative Versatzwinkel zu einem höheren Energieeintrag führen. Zwischen 90° und 30° Versatzwinkel zeigt sich nur ein marginaler Unterschied, während die fördernd wirkenden Knetblöcke mit 60° Versatzwinkel zwischen den Scheiben zum geringsten Energieeintrag führten.

Zudem konnte beim Vergleich der beiden Schnecken festgestellt werden, dass der unterschiedliche Versatzwinkel der schmalen Knetblöcke auch Einfluss auf die Lastverteilung

im Extruder hat. Wie in Abbildung 99 dargestellt, kann durch einen positiven bzw. negativen Versatzwinkel der Knetblockscheiben der Drehmomentunterschied zwischen den beiden Schnecken verschoben werden.

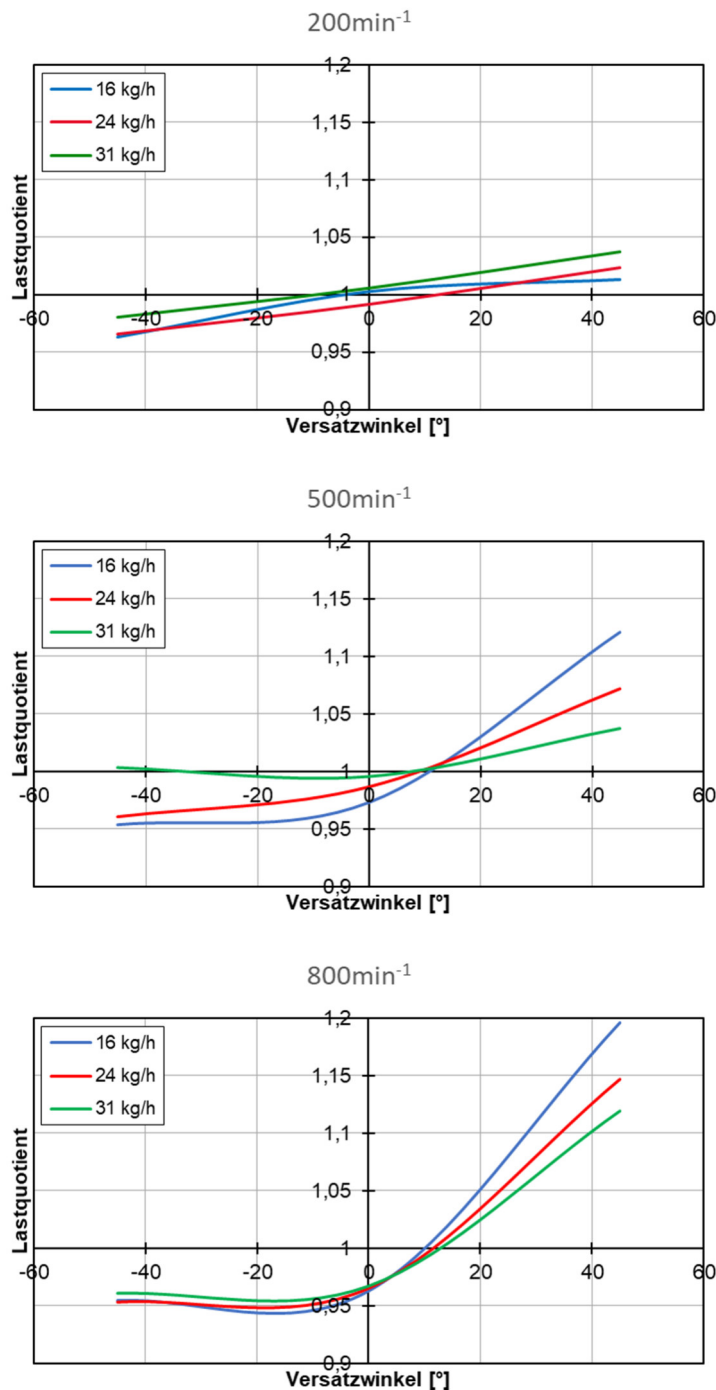


Abbildung 99: Quotient aus dem gemessenen Drehmoment der beiden Schnecken in den Untersuchungen zur Aufschmelzzone, anhand von drei unterschiedlichen Versatzwinkeln in den verwendeten Knetblöcken, bei drei Durchsätzen und drei Drehzahlen

Hierzu wurde ein Quotient aus den beiden einzeln gemessenen Schneckendrehmomenten gebildet, der die Lastverteilung beschreibt. Bei dem Wert 1 liegt die Last symmetrisch an den beiden Schnecken vor, bei einem Wert $x < 1$ liegt an der abdrehenden Schnecke das höhere Drehmoment vor, bei einem Wert $x > 1$ liegt an der aufdrehenden Schnecke das höhere Drehmoment vor.

Hier konnte gezeigt werden, dass durch die Änderung der ursprünglich in der Aufschmelzzone verwendeten Knetblöcke mit einem Versatzwinkel von $+45^\circ$ und somit einer Förderwirkung, durch Knetblöcke mit einem Versatzwinkel von -45° und einer entstehenden Rückförderwirkung die Lastverteilung unabhängig von den weiteren Prozessparametern umgekehrt werden kann.

Durch die Steigerung der Drehzahl kann in den Untersuchungen der Lastunterschied verstärkt werden. Eine Steigerung des Durchsatzes führt hingegen zu einer Verringerung des Lastunterschieds.

Es wird vermutet, dass dieser Effekt durch unterschiedliches Anstauen vor und in der Aufschmelzzone verursacht wird, welches maßgeblich von Versatzwinkel der Scheiben und der Förderwirkung der Elemente abhängt.

Für die breiten Knetblöcke konnte der Effekt nicht im selben Ausmaß gezeigt werden, was darauf zurückgeführt wird, dass durch die breiteren Knetscheiben ein geringerer Materialtransport verursacht wird und somit ein weniger ausgeprägtes Anstauverhalten entsteht.

Auswertung Schneckenziehversuche

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Schneckenziehversuche zur Untersuchung der Füllgradunterschiede dargestellt. An den in der Schneckenkonfiguration markierten vier Punkten wurde die Schmelze von den beiden Schnecken für das gewählte Element abgeschabt und gewogen.

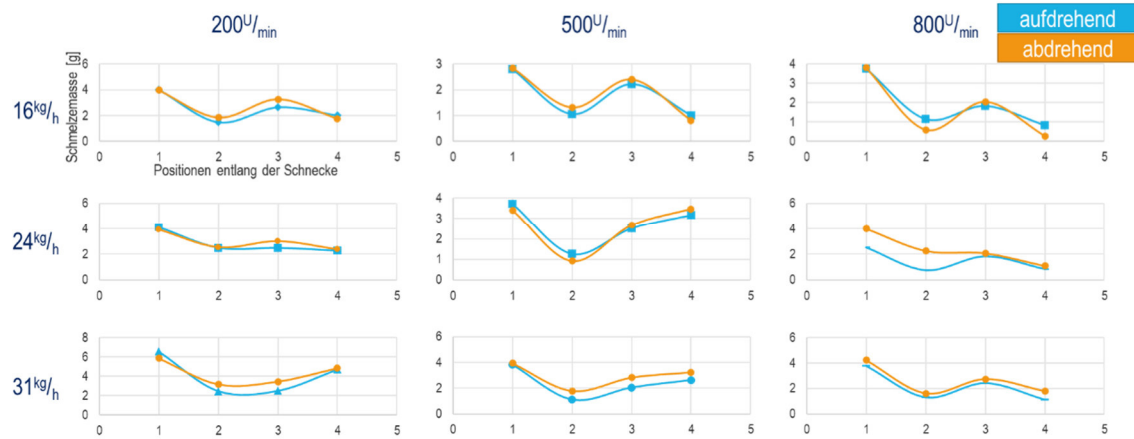


Abbildung 100: Übersicht über die Ergebnisse der Gewichtsmessung der Materialproben von den Probeentnahmepositionen aus Abbildung 101 der experimentellen Untersuchungen zum Füllgrad in den beiden Schnecken des DSE



Abbildung 101: Schematische Abbildung des verwendeten Schneckenbaus mit Kennzeichnung der Probeentnahmepositionen

Es zeigt sich, dass Füllgradunterschiede zwischen den Schnecken an einigen Punkten vorhanden sind, die Werte liegen jedoch im Allgemeinen sehr nah aneinander. Es lässt sich weder durch Erhöhung des Durchsatzes noch durch Erhöhung der Drehzahl eine eindeutige Verschiebung des Füllgrads hin zu einer der beiden Schnecke erzielen. Dies deckt sich mit der Erkenntnis, dass der Drehmomentunterschied zwischen den Schnecken in der Schmelzeförder- und Druckaufbauzone eher gering ist, wie nachfolgend dargestellt.

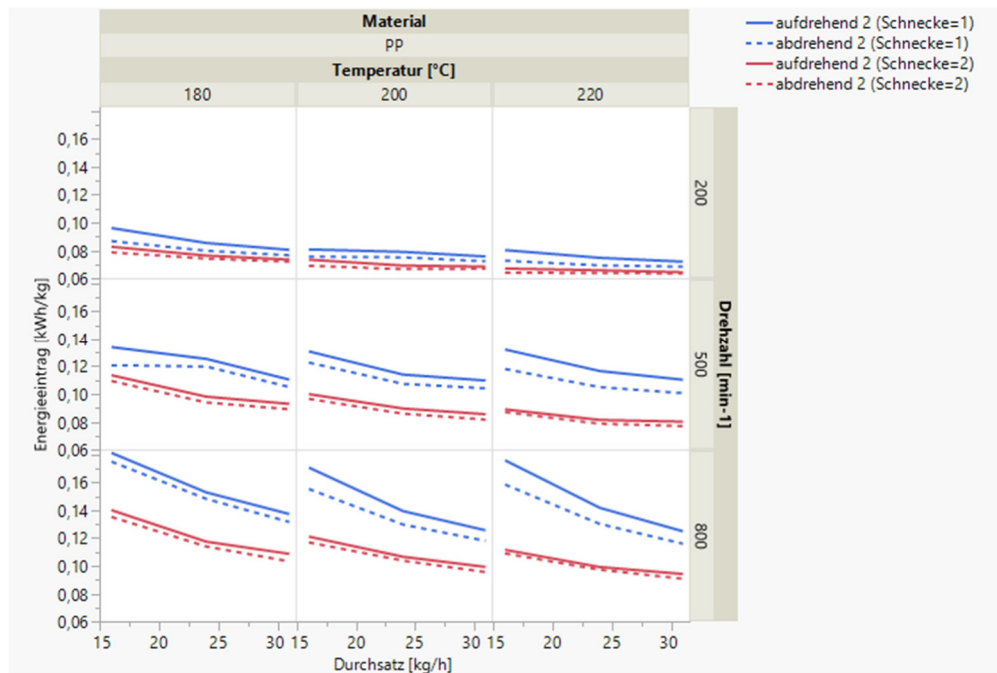


Abbildung 102: Messergebnisse des Energieeintrags der hinsichtlich des Füllgrades untersuchten Versuchspunkte

Es lässt sich eine leichte Tendenz erkennen, dass hier an der abdrehenden Schnecke mehr Material vorhanden war, wobei die aufdrehende Schnecke insgesamt einen höheren Energieeintrag aufweist. Auf Grund des sehr geringen Unterschieds in der Füllmenge der Schnecken wurde aus den gewonnenen Erkenntnissen kein separates Modell für die Teilfüllung entwickelt. Stattdessen wurde die Feststoffförderung weiter auf Unterschiede zwischen den Schnecken untersucht.

Auswertung der Drehmomentunterschiede in der Feststoffförderzone

Im Folgenden ist Übersicht über die unterschiedlichen gemessenen Energieeinträge der Feststoffförderzone abgebildet.

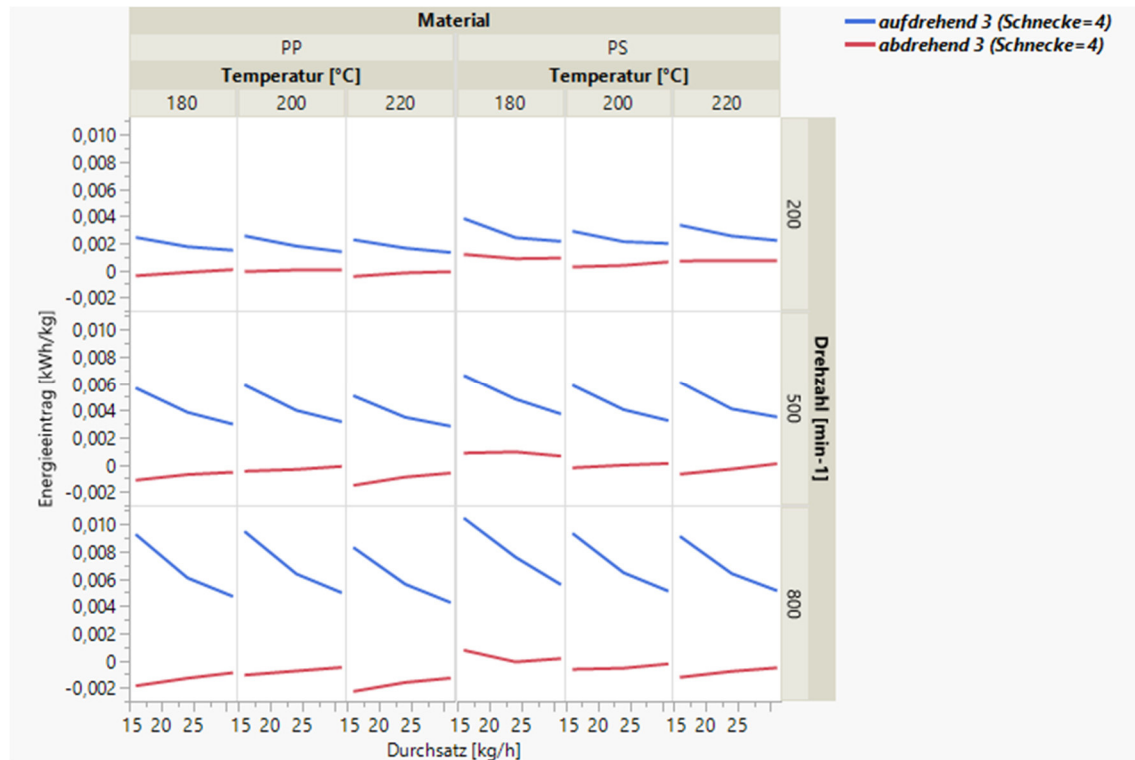


Abbildung 103: Übersicht über die spezifischen Energieeinträge in der Feststoffförderung für die aufdrehende Schnecke (blau) und abdrehende Schnecke (rot)

Aus dieser Übersicht lässt sich ableiten, dass der Energieeintrag in der Feststoffförderzone zwar gering ist, hier jedoch deutliche Unterschiede zwischen den beiden Extruderschnecken erkennbar sind und diese auch eine Parameterabhängigkeit von Drehzahl, Durchsatz und Zylindertemperatur zeigen.

Im Anschluss an die Hauptuntersuchungen zum axial orts aufgelösten Energieeintrag wurden deshalb Untersuchungen zum Förderverhalten der Granulate in den beiden Schnecken durchgeführt. Nachfolgend die gemessenen Massenströme je Schnecke bei unterschiedlichen Drehzahlen und Gesamtdurchsätzen für die beiden Basispolymere dargestellt.

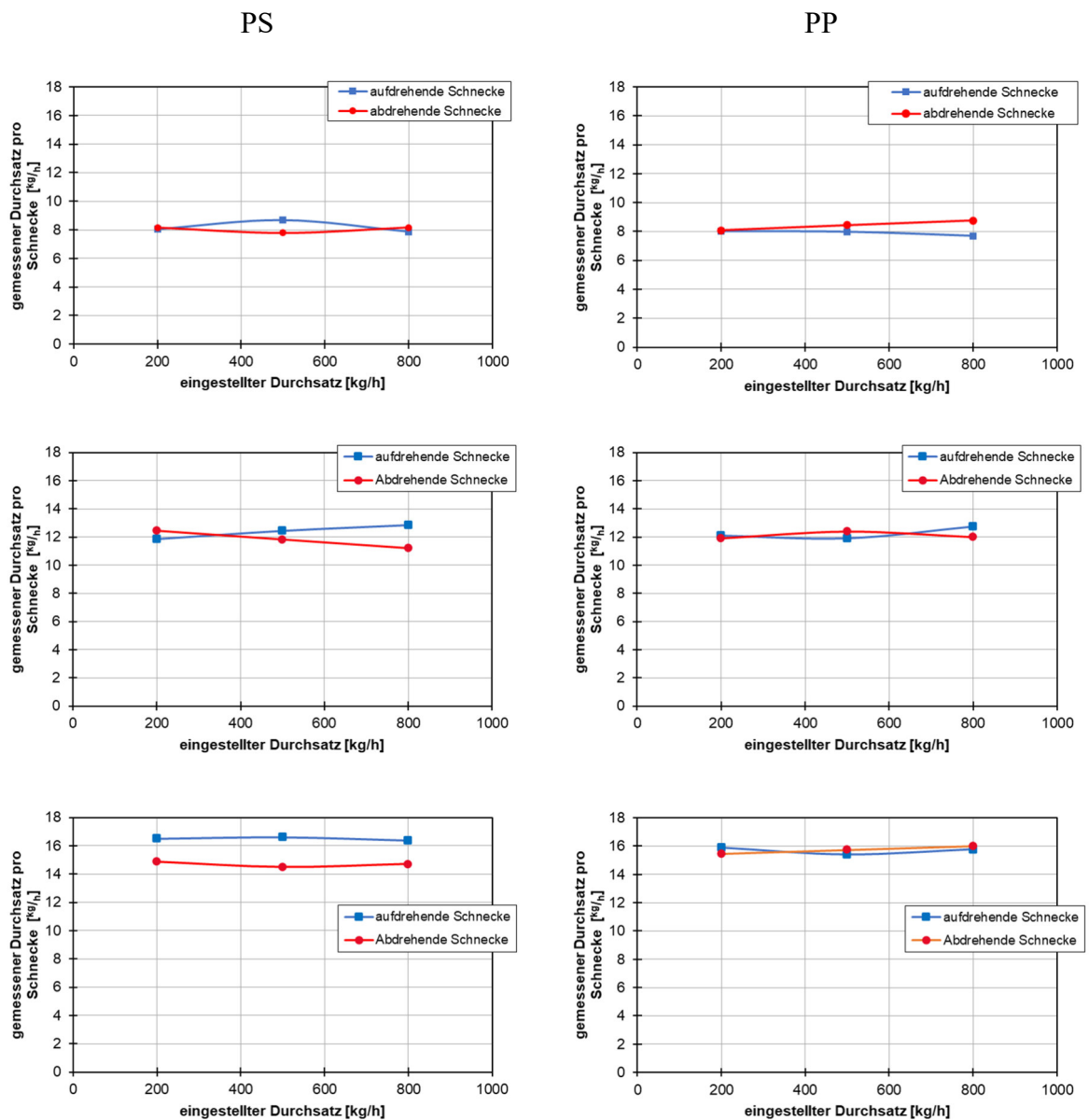


Abbildung 104: Übersicht über die Messergebnisse der Durchsatzmessung pro Schnecke an dem ZE 28 BLUE POWER im Bereich der Feststoffförderung

Für das PP ließ sich kein eindeutiger Trend hinsichtlich eines Unterschieds des Füllgrads in der Feststoffförderung erkennen. Weder in Abhängigkeit der Drehzahl noch durch eine erhöhte Dosiermenge an Granulat ließ sich ein Unterschied eindeutig erkennen.

Beim PS hingegen lässt sich bei steigender Drehzahl und steigendem Durchsatz eine klare Tendenz erkennen, dass mehr Granulat in der aufdrehenden Schnecke vorhanden ist. Dies lässt sich zum einen mit der Schwerkraft erklären, da das Granulat im aufdrehenden Schneckenkanal zunächst durch einen steigenden Füllgrad anstaut, bevor es an die abdrehende Schnecke übergeben wird, wo es mit Hilfe der Schwerkraft schneller zurück in den

Kanal der aufdrehenden Schnecke gerät. Durch die Steigerung der Drehzahl wird die Anstaulänge erhöht, durch die Steigerung des Durchsatzes erhöht sich der Füllgrad, sodass beide Effekte zu einer Änderung des Füllgradverhältnisses beitragen und der Unterschied im Drehmoment auf dies zurückgeführt werden sowie eine Modellierung des Drehmomentunterschieds in Abhängigkeit der Drehzahl und der Massestroms erfolgen kann.

5.5 Experimentelle Untersuchungen gefüllter Materialsysteme

Füllstoffuntersuchungen mit TiO_2

Durch den projektbegleitenden Ausschuss wurde TiO_2 (CR470 von Fa. Tronox Inc.) als Füllstoff für das gefüllte PS-Materialsystem gewählt. Es wurden experimentelle Untersuchungen bei 16 und 24 kg/h Gesamtdurchsatz mit 18,75 Gew.-% und 25 Gew.-% Füllstoffanteil sowie einer Schneckendrehzahl von 200 und 500 min^{-1} durchgeführt. Hierbei kam zwei verschiedene Schneckenkonfigurationen zum Einsatz. Im Mischbereich der ersten Konfiguration kamen dabei ZME und in der zweiten Schneckenkonfiguration 3-gängige KBE zum Einsatz (siehe Abbildung 31). Nachfolgend sind die gemessenen Drehmomente der beiden Schneckenkonfigurationen für die Besätze mit ZME (rot) und 3-gängigen KBE (grün) über dem Gesamtdurchsatz für beide Füllstoffanteile und Drehzahlen getrennt voneinander abgebildet.

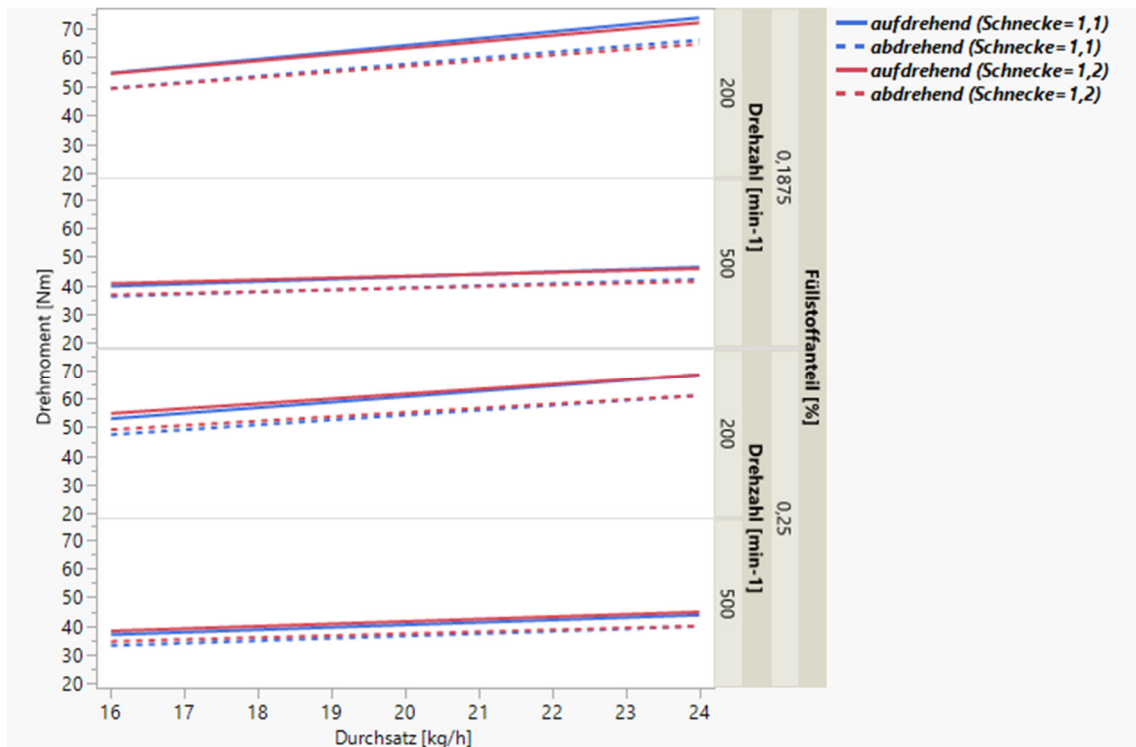


Abbildung 105: Übersicht über die Drehmomentmessungen an dem ZE 28 BLUE POWER für S1.1 (blau, siehe Abbildung 31) und S1.2 (rot) bei Unterscheidung der Drehzahl und Füllstoffanteile aufgetragen über dem Durchsatz

Es zeigt sich kein erkennbarer Unterschied zwischen den Schneckenkonfigurationen. Beide weisen Drehmomente in ähnlicher Höhe auf und bringen somit eine etwa gleiche Menge an Energie in das Material ein. In allen Fällen hatte die aufdrehende Schnecke ein höheres Drehmoment als die abdrehende Schnecke.

Bei steigendem Füllstoffanteil nimmt das Drehmoment ab, wie nachfolgender Grafik entnommen werden kann.

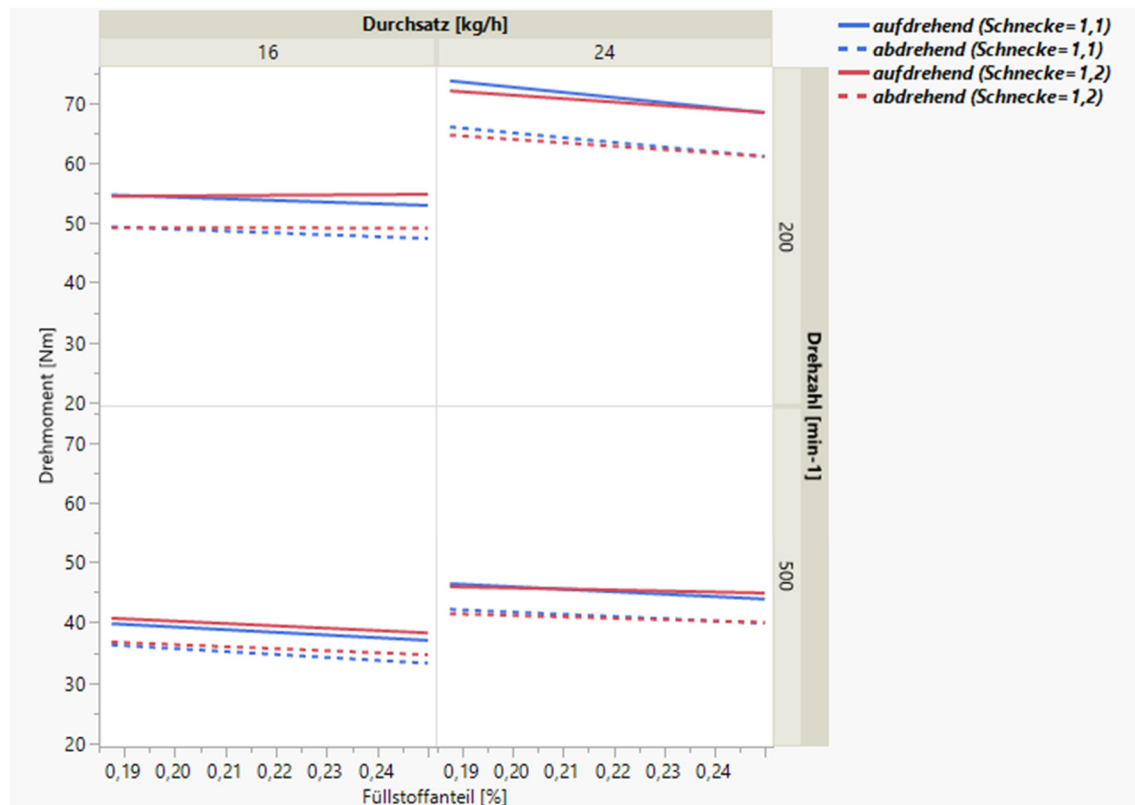


Abbildung 106: Übersicht über die Drehmomentmessungen an dem ZE 28 BLUE POWER für S1.1 (blau, siehe Abbildung 31) und S1.2 (rot) bei Unterscheidung der Drehzahl und Durchsätze aufgetragen über dem Füllstoffanteil

Dies kann zum einen damit begründet werden, dass bis zur Füllstoffzugabe ein geringerer Massenstrom im Extruder vorhanden ist, da der Gesamtmassenstrom konstant gehalten wurde. Zum anderen könnte es jedoch auch dadurch erklärt werden, dass durch den höheren Anteil an Feststoff die Viskosität der Schmelze gesenkt wird, da diese in Interaktion treten. Durch den erhöhten Füllstoffanteil steht der Schmelze weniger Kanalfäche zur Verfügung, wodurch die Schergeschwindigkeit erhöht wird.

Füllstoffuntersuchungen mit Carbonfasern

Da in den Untersuchungen am ersten Polymer nur geringfügige Unterschiede erkennbar waren, wurden statt der Untersuchungen an einem weiteren Polymer zusätzlich zu den ausführlichen Untersuchungen mit TiO_2 als Füllstoff Untersuchungen an carbonfaserverstärktem PP durchgeführt. Hierzu wurde der in Abbildung 107 dargestellte Schnecken-
aufbau gewählt.

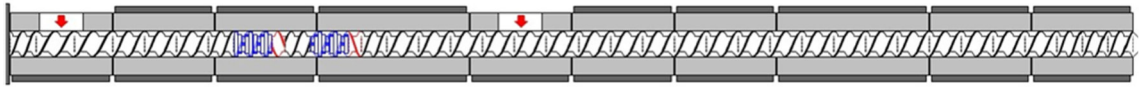


Abbildung 107: Schnekenaufbau zur beabsichtigt inhomogenen Einarbeitung von Carbonfasern auf dem ZE 28 BLUE POWER

Dabei wurden die Fasern (IM-OX-05/12 von Fa. C.A.R. FiberTec GmbH, 4 mm Faserlänge) in dem ZE 28 BLUE POWER über die Seitendosierung zugeführt (siehe Abbildung 31), wobei sich die der Tabelle 3 zu entnehmenden Variationen ergaben.

Tabelle 3: Fasergehalte und Schneckendrehzahl der Seitenbeschickung bei den Untersuchungen mit Carbonfasern

Drehzahl (min^{-1})	300	600	900
Fasergehalt (%)	0	10	20

Nachfolgend sind die Messungen der Drehmomente für beiden Schnecken dargestellt.

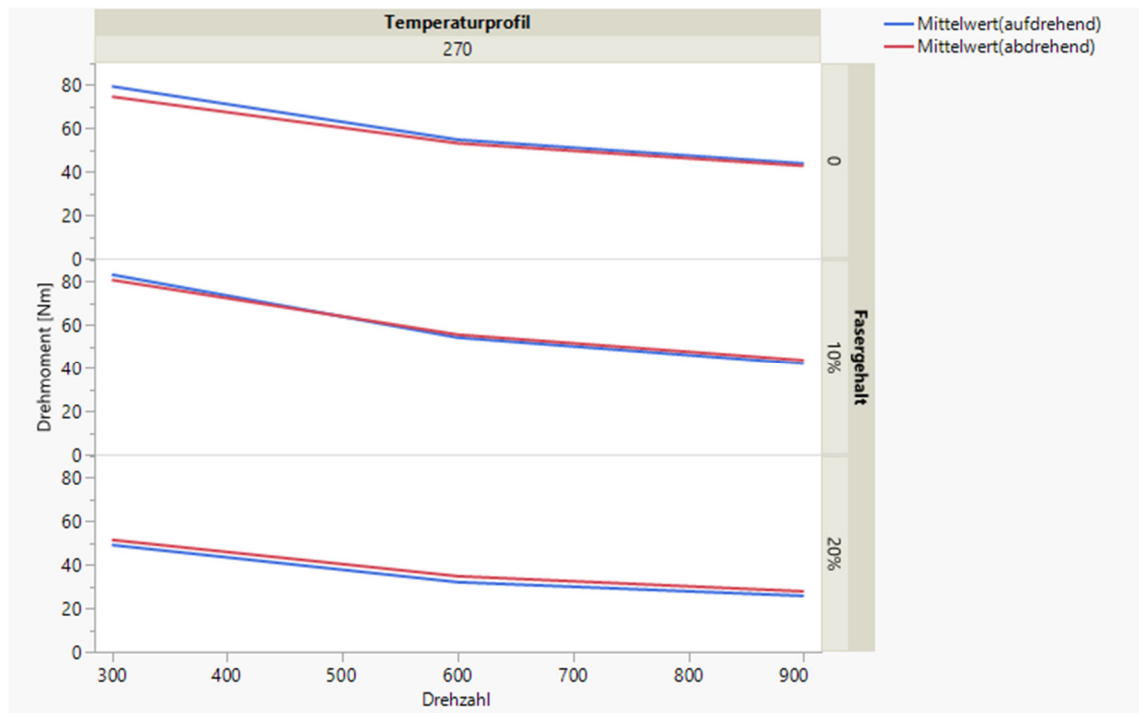


Abbildung 108: Übersicht über die Drehmomentmessung bei der Eincompoundierung von Carbonfasern mit dem ZE 28 BLUE POWER bei Unterscheidung der Füllstoffanteile, aufgetragen über der Drehzahl

Zunächst zeigt sich bei der Untersuchung mit 0 Gew.-% Fasergehalt das aus den vorhergegangenen Untersuchungen bekannte Verhalten, dass die aufdrehende Schnecke ein höheres Drehmoment aufweist als die abdrehende. Durch die steigende Drehzahl zeigt sich eine nichtlineare Minderung des Drehmoments. Bei 20 Gew.-% Fasergehalt wechselt die Lastverteilung hin zur abdrehenden Schnecke, was damit begründet werden kann, dass in diese Schnecke durch die Seitenzufuhr die Fasern zudosiert werden, wodurch sich bis

zum Erreichen eines homogenen Gemischs ein Ungleichgewicht im Füllgrad der Schnecken ergibt. In der Untersuchungsreihe von 10 Gew.-% Fasergehalt lässt sich der Übergang zwischen den Lastverteilungen zeigen, welcher zusätzlich durch die steigende Drehzahl und somit durch den allgemeinen Füllgrad im Extruder beeinflusst wird.

Mikroskopie

Zusätzlich zur Untersuchung der Drehmomente während der Verarbeitung der gefüllten Systeme wurden aus den Strängen Proben entnommen und mikroskopisch untersucht.

Hierzu kam das Digitalmikroskop Keyence VHX-600 mit einer 200-fachen Vergrößerung zum Einsatz. Es entstanden Bilder wie beispielhaft in Abbildung 109 aufgeführt.

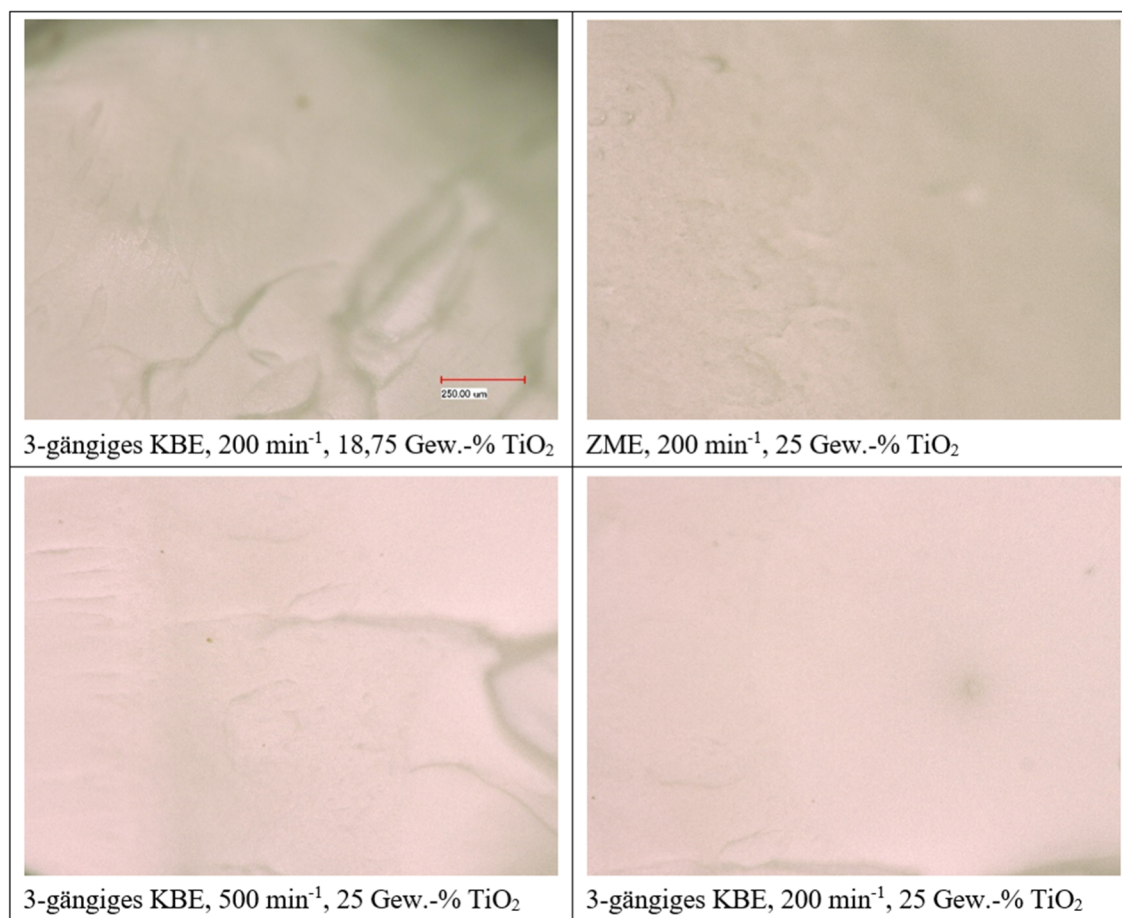


Abbildung 109: Übersicht über unterschiedliche mikroskopische Aufnahmen der gefüllten Materialproben zur Bewertung der Homogenität.

Hierbei konnten keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden, unabhängig von Drehzahl, Füllgradgehalt und Drehzahl zeigte sich eine homogene Einarbeitung. Die erkennbaren Inhomogenitäten sind Risse in der Bruchfläche des Faserstrangs.

In Abbildung 111 sind die Berechnungsergebnisse der Hebelarme für drei unterschiedliche Drehzahlen (200, 500, 800 min^{-1}) dargestellt.

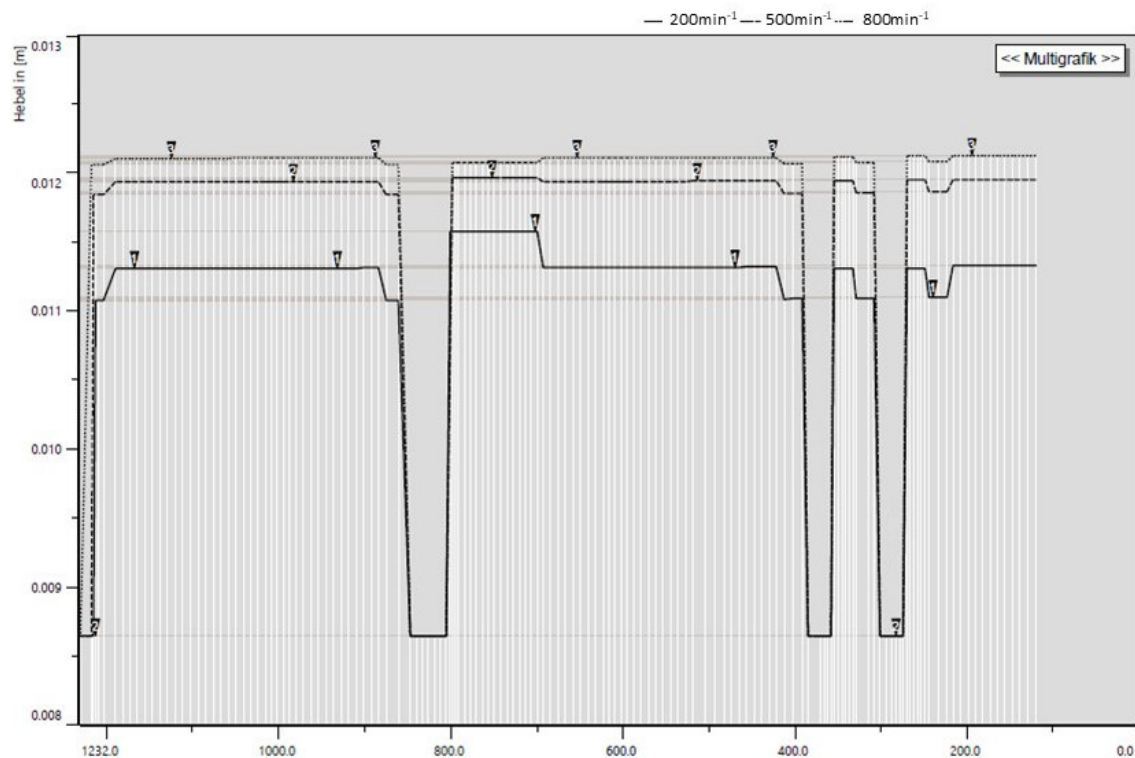


Abbildung 111: Darstellung der Hebelarmberechnung in SIGMA für die einzelnen Schneckenelemente bei unterschiedlichen Drehzahlen (Förderrichtung von rechts nach links)

Der Unterschied in den Kurven ergibt sich aus dem unterschiedlichen Füllgrad, durch den der Hebelarm beeinflusst wird. Das gleiche Verhalten zeigt sich bei Berechnung der Hebelarme in Abhängigkeit von drei unterschiedlichen Materialdurchsätzen wie nachfolgend in Abbildung 112 dargestellt.

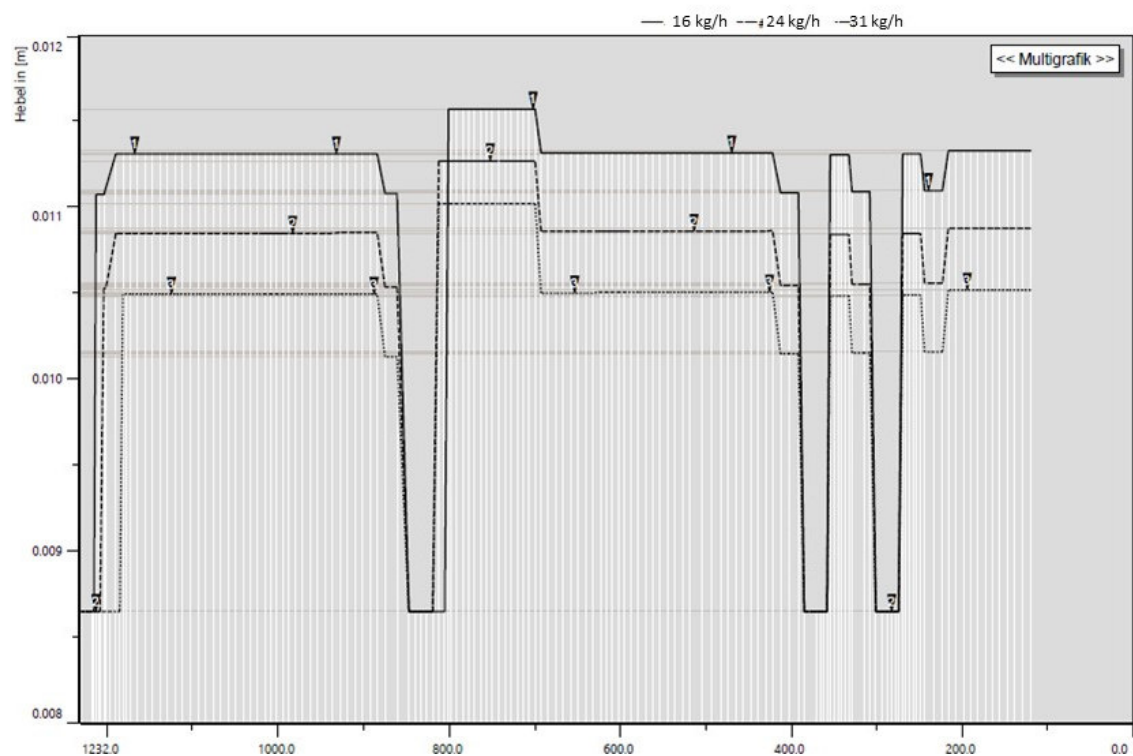


Abbildung 112: Darstellung der Hebelarmberechnung in SIGMA für die einzelnen Schneckenelemente bei unterschiedlichen Durchsätzen (Förderrichtung von rechts nach links)

Gegenüber der Variation der Drehzahlen verändert sich hier die Länge des Hebelarms nicht nur durch den unterschiedlichen Gesamtfüllgrad im Prozess, sondern auch durch die Rückstaulängen vor einer Vollfüllung.

Neben den unterschiedlichen Hebelarmen ergeben sich durch die Änderung der Drehzahl und des Durchsatzes auch Änderungen in der Schergeschwindigkeit und der Viskosität. Nachfolgend sind beispielhaft die Verläufe der Entwicklung des Drehmoments entlang des Extruders abgebildet, welche sich bei der Variation der Drehzahl ergeben.

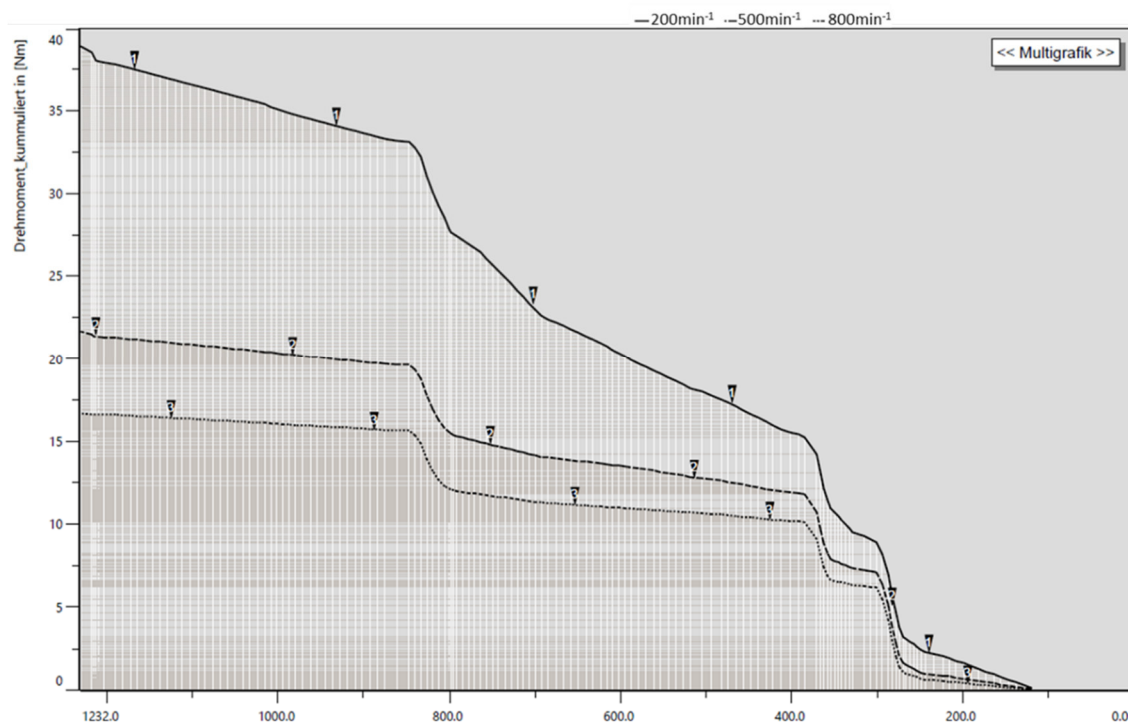


Abbildung 113: Darstellung der Modellierungsergebnisse aus SIGMA für S1.0 bei Unterscheidung der Drehzahl (Förderrichtung von rechts nach links)

In Abbildung 114 sind zusätzlich die Drehmomentverläufe bei drei unterschiedlichen Materialdurchsätzen (16, 24, 31 kg/h) gezeigt.

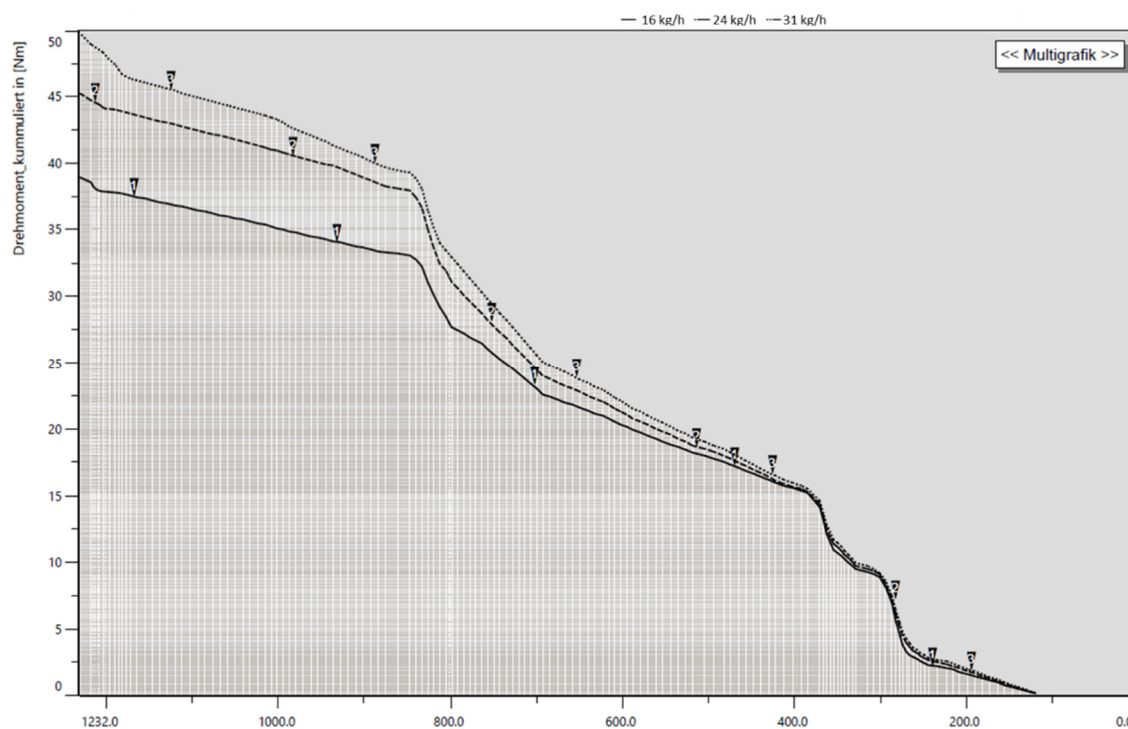


Abbildung 114: Darstellung der Modellierungsergebnisse aus SIGMA für S1.0 bei Unterscheidung des Durchsatzes (Förderrichtung von rechts nach links)

Bei der zweiten Schneckenkonfiguration kamen statt der Knetblockzone im Mischbereich des DSE ZME zum Einsatz (siehe Abbildung 31), um den Einfluss unterschiedlicher Schneckenelemente auf den Energieeintrag zu überprüfen. Schneckenkonfiguration drei verfügt in dieser Zone gegenüber der ersten Konfiguration über dreigängige KBE, da diese Elementtypen vom pbA ausgewählt wurden.

Anhand der Abbildung 115 können für den Versuchspunkt 16 kg/h von PP bei 200 min^{-1} und 180°C die unterschiedlichen Füllgrade der Konfigurationen abgelesen werden.

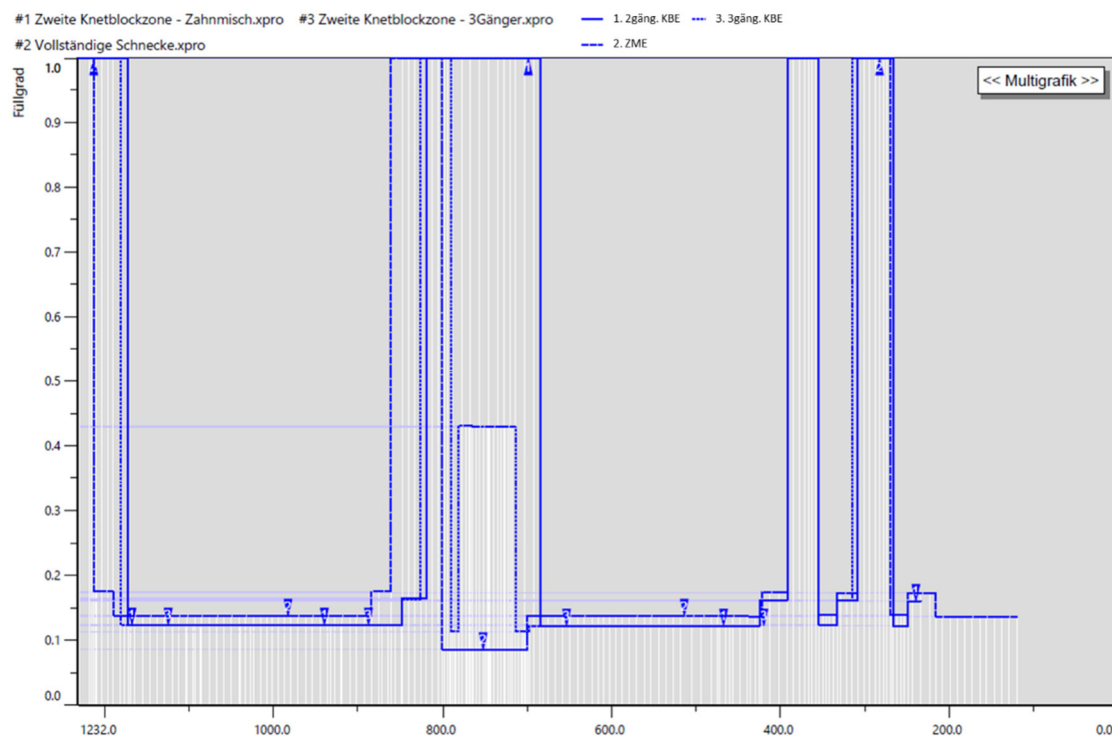


Abbildung 115: Schematische Abbildung der Füllgrade entlang des Extruders für die Schnecken-aufbauten S1.0, S1.1 und S1.2 (Förderrichtung von rechts nach links)

Beim 3-gängigen KBE tritt im betrachteten Bereich ein höherer Füllgrad als bei der ersten Variation mit 2-gängigen KBE auf, hieraus ergibt sich ein geringerer Hebelarm, bei dem die Kraft angreift. Im Vergleich weist der Zahnmischblock einen noch höheren Füllgrad auf, da hier keinerlei fördernde Wirkung durch die Elemente aufgebracht werden kann. Zusätzlich weist der Zahnmischblock keine Erdmenger-Kontur auf, hier liegt der kürzeste Hebelarm für die untersuchten Elemente vor. Aus der Vollfüllung ergibt sich jedoch ein Staudruck, welcher überwunden werden muss, wodurch es zum erhöhten Energieeintrag durch die davorliegenden Elemente kommt.

In der folgenden Abbildung 116 sind die zugehörigen Schergeschwindigkeiten und Viskositäten für die drei Schneckenkonfigurationen aus den Simulationen abgebildet.



Abbildung 116: Schematische Abbildung der Schergeschwindigkeiten der drei Schneckenkonfigurationen entlang des Extruders

Durch die Verwendung von 3-gängigen KBE kommt es zu einer Erhöhung der Schergeschwindigkeit, aus der, wie in Abbildung 117 aufgeführt, sich die geringere Viskosität gegenüber den 2-gängigen KBE ergibt. In den ZME liegt eine noch höhere Schergeschwindigkeit und damit noch niedrigere Viskosität vor, welche sich auch auf die nachfolgenden Elemente auswirkt.

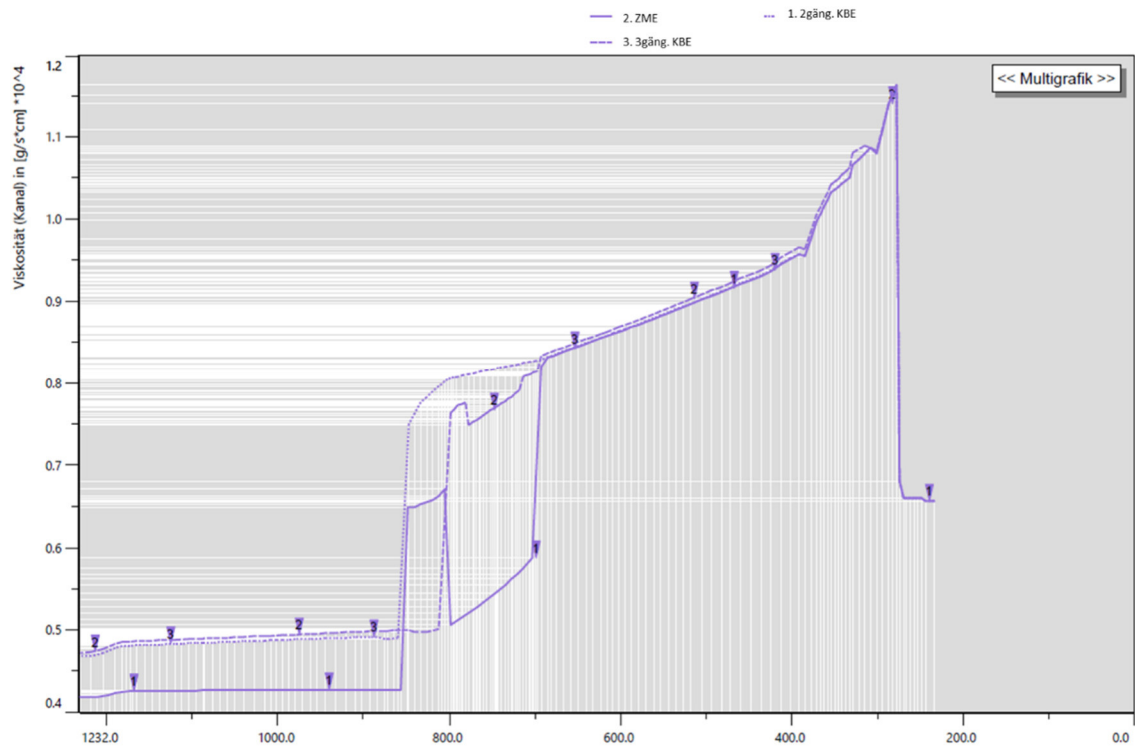
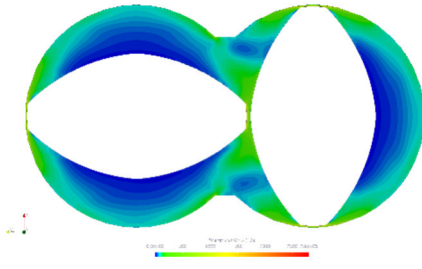
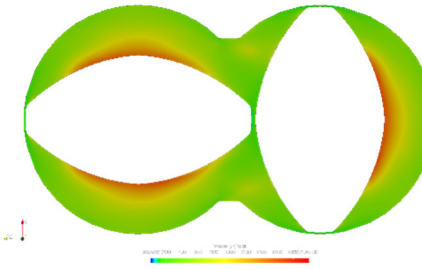
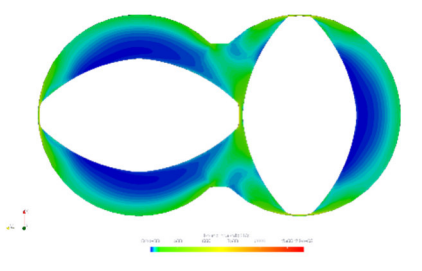
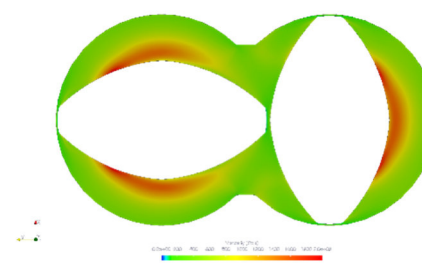
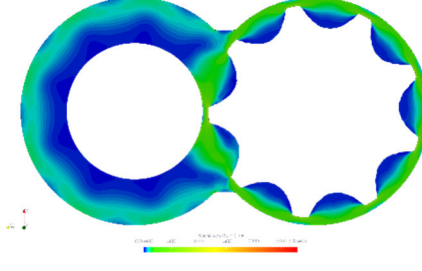
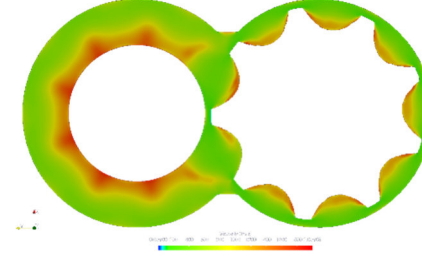
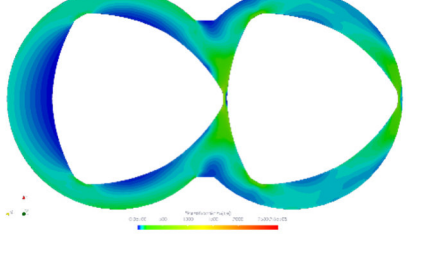
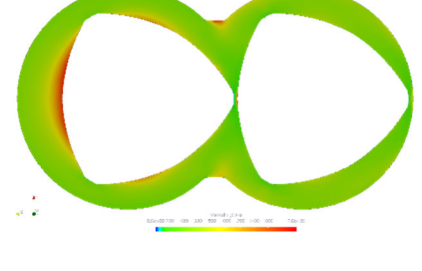


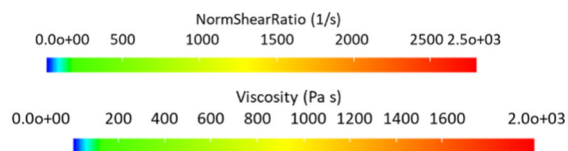
Abbildung 117: Schematische Abbildung der Viskositäten der drei Schneckenkonfigurationen entlang des Extruders

Hieraus lässt sich festhalten, dass der Energieeintrag bei Verwendung von ZME erkennbar steigt und bei Verwendung von dreigängigen Knetblöcken leicht zunimmt.

Mit Hilfe der Simulationsumgebung, welche über die Leistung Dritter von der Fa. IANUS Simulation GmbH beschafft wurde, konnten die unterschiedlichen Schneckenelemente dreidimensional auf ihre Viskositäts- und Schergeschwindigkeitsverteilung im Kanal untersucht werden, nachfolgend in Tabelle 4 werden die Stirnschnitte bei dem Versuchspunkt bei PP mit 200 min^{-1} , 16 kg/h , und 180°C dargestellt.

Tabelle 4: Schergeschwindigkeits- und Viskositätsverteilung für die unterschiedlichen Schneckenelemente

	Schergeschwindigkeitsverteilung	Viskositätsverteilung
Schmaler Knetblock		
Breiter Knetblock		
Zahn-misch-element		
3-gängige KBE		



Aus diesen Stirnschnitten lässt sich ablesen, dass der Unterschied zwischen schmalen und breiten KBE im Hinblick auf Schergeschwindigkeit und Viskosität sehr gering ist. Auch im Vergleich zur Durchströmung eines ZME lässt sich nur ein geringer Unterschied in den Absolutwerten ablesen, sodass sich hier eine höhere Schergeschwindigkeit im Kanal

ergibt. Auch hier kann, wie in den Simulationen zuvor, gezeigt werden, dass durch die 3-gängigen KBE eine höhere Schergeschwindigkeit als durch 2-gängige KBE erzeugt wird. Da in Abschnitt 4 ermittelt werden konnte, dass sich keine eindeutige Korrelation zwischen einem Füllgradunterschied der Schnecken und der Drehmomentdifferenz erkennen lässt, wurde darauf verzichtet das Füllgradmodell nach Melisch zu ergänzen, um die Drehmomentdifferenzen berechenbar zu machen. Stattdessen wurde in den folgenden Untersuchungen weitere möglichen Einflussfaktoren auf die Drehmomentdifferenzen betrachtet, um aus diesen ein Modell entwickeln zu können. Nachfolgend sind in Tabelle 5 die zugehörigen freien Kanalvolumina der Elemente gelistet.

Tabelle 5: Freies Kanalvolumen und Elementlänge für die unterschiedlichen Schnecken-elemente

Element	Freies Kanalvolumen (mm ³)	Elementlänge (mm)
Schmales KBE	13794,68	21
Breites KBE	22991,133	35
ZME	13907,713	21
3-gängiges KBE	13400,625	21

Aus diesen Werten lässt sich erklären, dass die Unterschiede zwischen den Schneckenkonfigurationen eher gering ausfallen, da die freien Volumina zwischen den Elementen sich nur geringfügig unterscheiden. Das erhöhte freie Volumen des breiten Knetblocks lässt sich dabei auf seine Länge zurückführen, Der Querschnitt entspricht den der schmalen Knetblöcke.

5.7 Modellierung bis zum Ende der ersten vollgefüllten Zone

Feststoffförderung

Zunächst wurde untersucht, ob die Feststoffförderung in der Berechnung des Leistungsbedarfs weiterhin berücksichtigt werden muss. Hierzu wurden die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen herangezogen, welche nachfolgend im Überblick in Abbildung 118 dargestellt sind. In der Abbildung sind die Drehmomente für die aufdrehende und die abdrehende Schnecke im Bereich der Feststoffförderung in Gelb dargestellt.

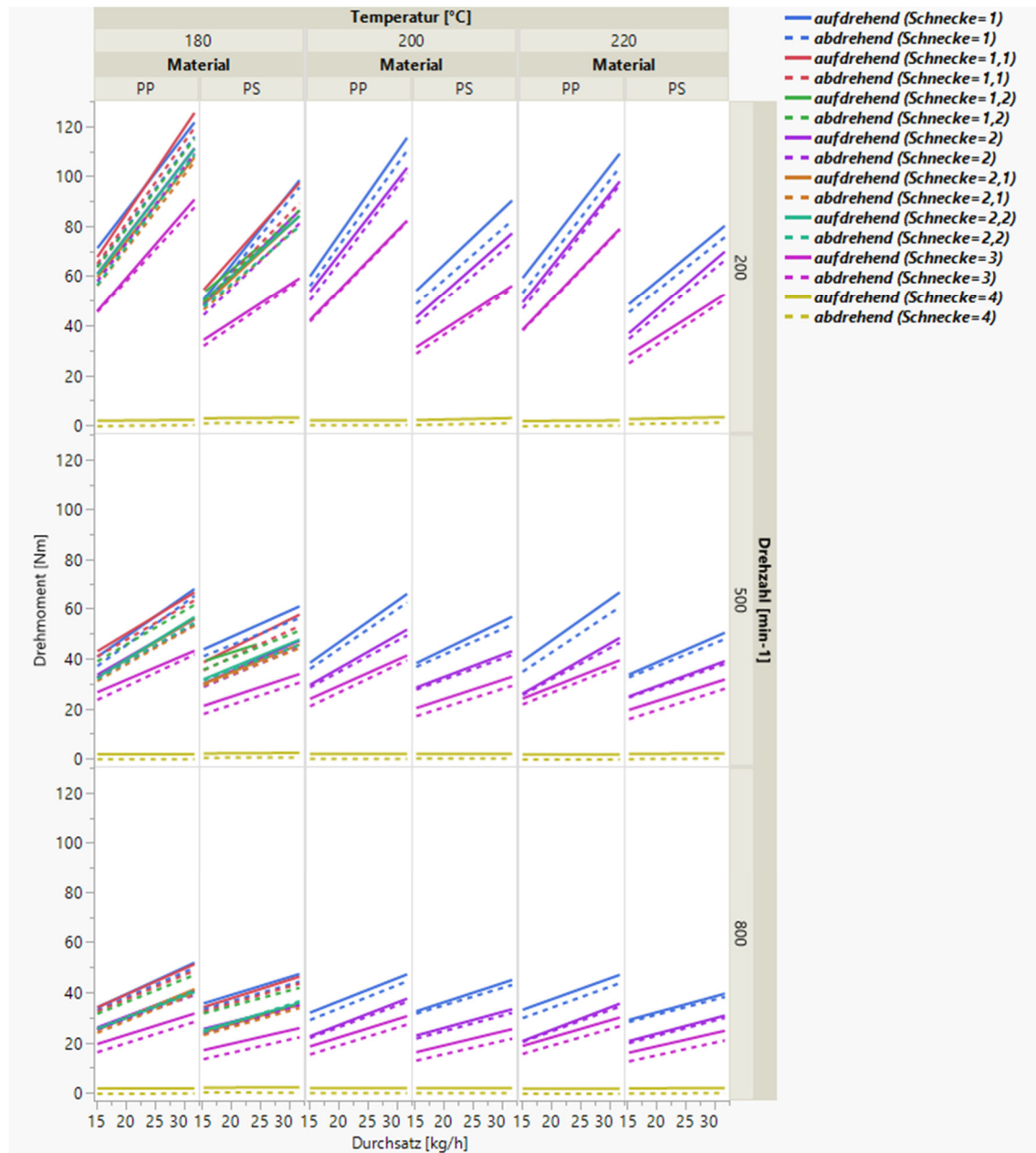


Abbildung 118: Darstellung aller Drehmomentmessungen für die unterschiedlichen experimentellen Untersuchungsreihen

Es zeigt sich, dass unabhängig von Durchsatz, Drehzahl und Polymer nahezu keine Drehmomentbelastung auftrat und somit das Drehmoment keinen nennenswerten Einfluss auf den Energieeintrag hat. Eine grundlegend neue Modellierung dieser Zone wird deshalb nicht vorgenommen.

Aufschmelzzone

Zunächst fand ein Vergleich zwischen den simulativ ermittelten Leistungsdaten und den experimentell gemessenen Drehmomenten am Extruder statt. Hierzu wurde das Modell

nach Westhues [Wes19] verwendet, welches zuvor am KTP entwickelt wurde, um das Aufschmelzen im gleichläufigen DSE zu beschreiben.

Nachfolgend dargestellt sind die Versuchspunkte für PP bei 180 °C Zylindertemperatur bei Verwendung des ZE 28 BLUE POWER von KraussMaffei.

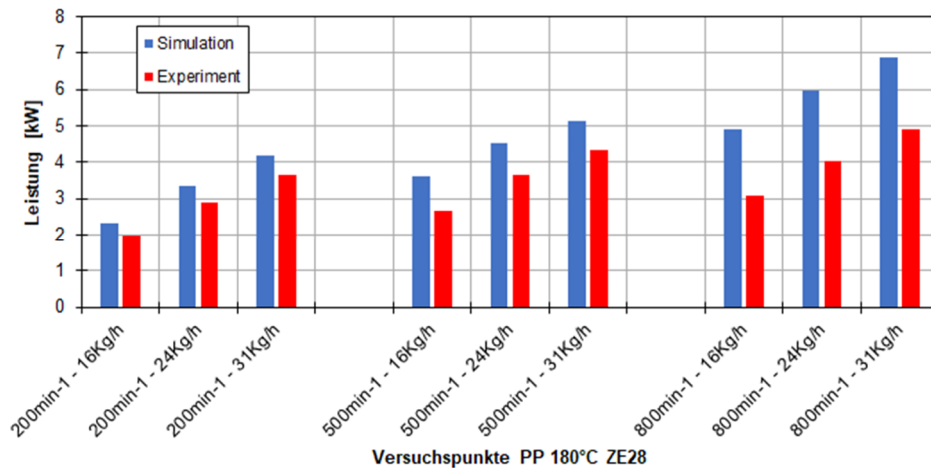


Abbildung 119: Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem Aufschmelzmodell nach Westhues und den experimentell ermittelten Werten an dem ZE 28 BLUE POWER bei Verwendung von PP

Es zeigt sich, dass durch die Simulation eine leichte Überschätzung der Messwerte stattfindet, dies könnte jedoch auch dadurch begründet sein, dass durch weitere Elemente nach der Aufschmelzzone das Anstauen beeinflusst wird und sich somit durch den experimentellen Aufbau nur eine qualitative Aussage treffen lässt, statt die Absolutwerte zu vergleichen. Die Effekte, welche sich durch Drehzahl- und Durchsatzerhöhung darstellen, werden von der Simulation korrekt abgebildet.

Bei Verwendung von PS ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Abweichung zwischen Simulation und Messwert ist hier jedoch geringer.

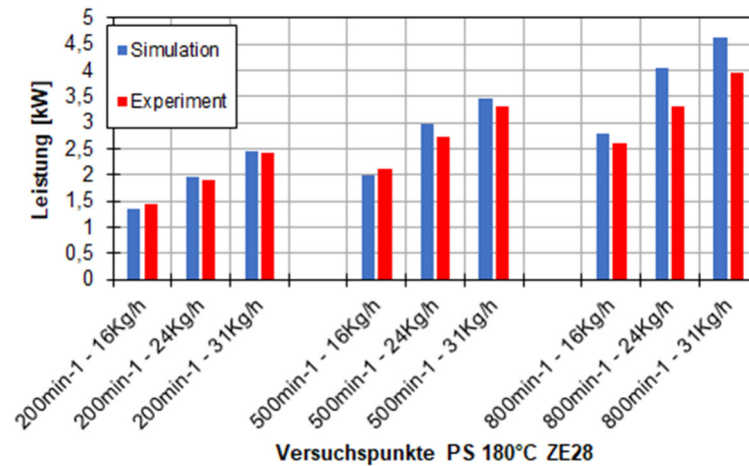


Abbildung 120: Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem Aufschmelzmodell nach WEST-HUES und den experimentell ermittelten Werten an dem ZE 28 BLUE POWER bei Verwendung von PS

Auch für die zweite untersuchte Anlagengröße an der ZSK25 mit 25 mm Schnecken-durchmesser ergeben sich sehr gut übereinstimmende Werte zwischen Simulation und Experiment, wie nachfolgend abgebildet. Auch hier liegt die Simulation in geringem Maß über den Messwert.

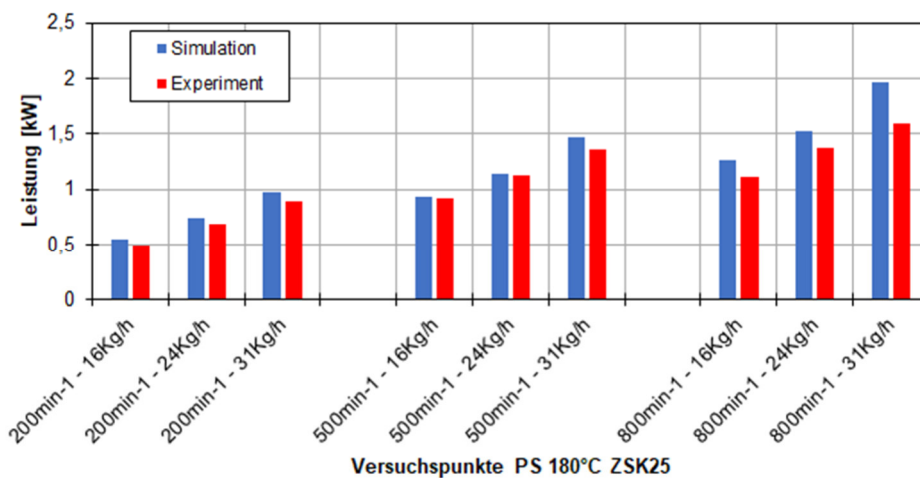


Abbildung 121: Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem Aufschmelzmodell nach WEST-HUES und den experimentell ermittelten Werten an der ZSK25 bei Verwendung von PS

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde entschieden auch für den Bereich der Aufschmelzzone keine grundlegende Neumodellierung der Werte durchzuführen.

Ein weiterer Fokus der Arbeiten lag auf der Unterscheidung der Drehmomentbelastung der beiden Schnecken. Hierzu wurden die umfangreichen experimentellen Untersuchun-

gen herangezogen, welche mit Hilfe des NCTE-Sensorsystems zur Erfassung des Gesamtdrehmoments der jeweils beiden Schnecken an dem ZE 28 BLUE POWER und ZSK25 stattfanden.

Die unterschiedlichen Zonen wurden einzelnen betrachtet und auf Einflüsse auf den Drehmomentunterschied hin untersucht.

Unterscheidung der beiden Schnecken

In den umfangreichen experimentellen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass sowohl die Prozessparameter als auch die Schneckenkonfiguration großen Einfluss auf die Lastverteilung zwischen den Schnecken haben. Zusätzlich kann durch Dosierung unterschiedlicher Zuschlagstoffe mittels Seitendosierung das Lastverhältnis weiter beeinflusst werden. Durch Verwendung unterschiedlicher Versatzwinkel in den KBE der Aufschmelzzone kann die ungleiche Lastverteilung von der einen zur anderen Schnecke verschoben werden. Der vorliegende Effekt wird dann durch die Steigerung von Drehzahl und Durchsatz verstärkt oder abgeschwächt. Das Verhalten zeigt sich jedoch nicht für alle Elemente im gleichen Maß, sodass eine einfache analytische Gleichung zur Beschreibung der Drehmomentdifferenzen aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren hier nicht möglich ist und weitere Untersuchungen zur Beschreibung nötig werden. Es können Anhaltspunkte geliefert werden, wie die Drehmomentunterschiede minimiert werden können, jedoch keine quantitative Vorhersage vorgenommen werden.

Im Bereich des Aufschmelzens werden durch förderneutrale KBE, hohe Durchsätze und geringe Drehzahlen die geringsten Drehmomentunterschiede zwischen den beiden Schnecken erzielt.

Zudem konnte gezeigt werden, dass durch die Dosierung mittels Seitenzugabe nicht immer das Lastverhältnis beeinflusst wird. Bei den Untersuchungen mit Carbonfasern wurde die höhere Last zur Seite der Dosierung verschoben, was durch Drehzahl und Durchsatz jedoch wieder beeinflusst wurde. Dieser Effekt trat bei der Einmischung von TiO_2 nicht auf. Auch bei der Compoundierung von carbonfaserverstärktem PP wirkte sich eine höhere Drehzahl als verstärkend auf den Lastunterschied aus.

Hier zeigte sich somit weiteres Potenzial, auf dessen Grundlage Untersuchungen angestrebt werden können, um die ungleiche Lastverteilung beschreiben zu können.

5.8 Validierung Simulationsergebnisse mit experimentellen Untersuchungen

Validierung des Modells anhand des ZE 28 BLUE POWER

Zur Validierung der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Untersuchungen wurden die Mittelwerte aus den Drehmomentmessungen beider Schnecken nach dem jeweiligen Versuchsaufbau gebildet. Aus den vier Möglichkeiten der Materialzugabe an dem ZE 28 BLUE POWER ergeben sich vier Wertepaare, an denen ein Vergleich aus Experiment und Simulation möglich ist: 1. Feststoffförderung; 2. Aufschmelzzone; 3. Homogenisierung und Schmelzeförderung; 4. Druckaufbau vor dem Werkzeug.

An diesen Versuchspunkten wurde die Leistung im Simulationsprogramm SIGMA genutzt. Innerhalb des Programms werden iterativ Füllgrad, Schergeschwindigkeit und Viskosität berechnet, mit denen das neue Modell weitere Berechnungen durchführt. Zudem kann aus den eingegebenen Geometriedaten und dem Füllgrad automatisiert der zugehörige Hebelarm berechnet werden. Für die Aufschmelzberechnung wurde das Modell nach Westhues [WES19] angewandt.

Zunächst werden die Ergebnisse für Untersuchungen an dem ZE 28 BLUE POWER mit PP dargestellt. Die Abbildung 122 bis Abbildung 124 repräsentieren je eine Drehzahl mit drei Durchsätzen für Experiment und Simulation.

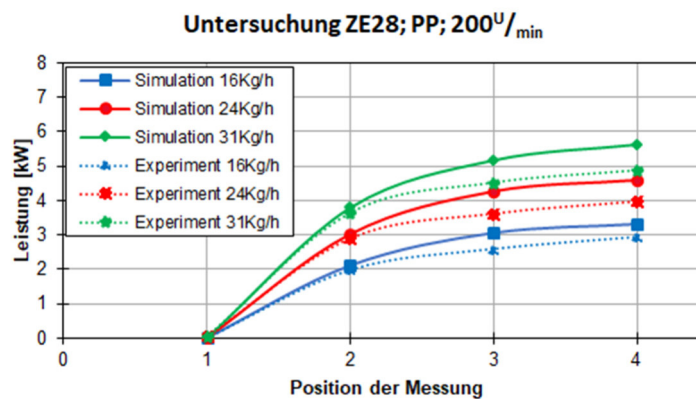


Abbildung 122: Vergleich der Simulationsergebnisse aus SIGMA mit den Messwerten an des ZE 28 BLUE POWER bei Verwendung von PP und 200 min⁻¹

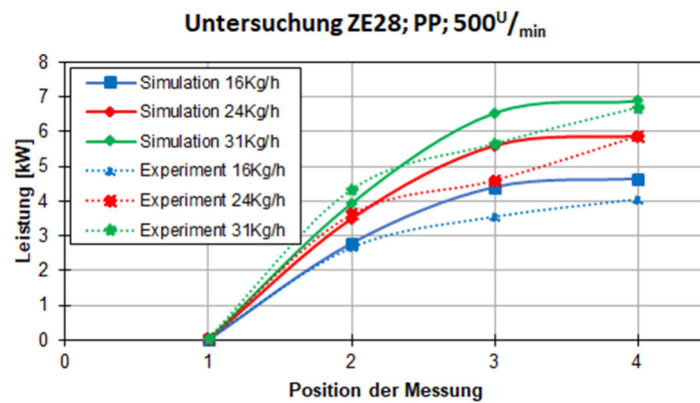


Abbildung 123: Vergleich der Simulationsergebnisse aus SIGMA mit den Messwerten an des ZE 28 BLUE POWER bei Verwendung von PP und 500 min⁻¹

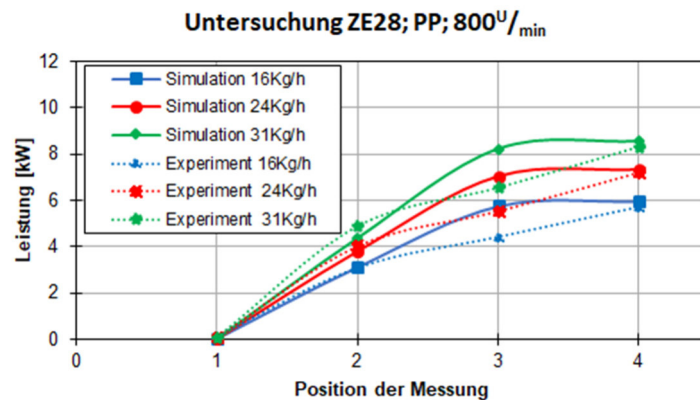


Abbildung 124: Vergleich der Simulationsergebnisse aus SIGMA mit den Messwerten an dem ZE 28 BLUE POWER bei Verwendung von PP und 800 min⁻¹

Werden die Ergebnisse aus Simulation und Experiment direkt gegenübergestellt, so fällt auf, dass bei geringen Drehzahlen eine Steigerung des Durchsatzes zu einer Steigerung der Abweichungen des Modells am Ende der Schnecken führt. Wird die Drehzahl jedoch auf die zweite Stufe erhöht, führt die Steigerung des Durchsatzes zu einer Verbesserung der Ergebnisse. Bei weiterer Steigerung der Drehzahl hat die Änderung des Durchsatzes keinen erkennbaren Einfluss mehr auf die Leistung an der Schneckenspritze. An Position 3 werden die Ergebnisse ohne den Druckaufbau vor dem Werkzeug dargestellt. Hier überschätzt das Modell die benötigte Leistung gegenüber der Messung. Dies könnte darin begründet sein, dass bei den experimentellen Untersuchungen keine online Messung möglich war, wodurch die Alternative mit kürzeren Schneckenbauten gewählt werden musste. Durch die Vernachlässigung der nachfolgenden Zone im Extruder ergibt sich unvermeidbar ein anderes Rückstauverhalten der Zonen und dadurch ein anderer Füllgrad.

Es ist demnach möglich, dass die Messwerte von Punkt 2 in einer Onlinemessung tendenziell näher an der Simulationsdaten liegen könnten.

Nachfolgend sind die Ergebnisse für die Untersuchungen und Simulationen von PP auf dem ZE 28 BLUE POWER in Abbildung 125 bis Abbildung 127 dargestellt. Dort sind, für jede Drehzahl separat, die simulativ berechnete und tatsächlich gemessenen Leistungen bei unterschiedlichen Durchsätzen aufgetragen.

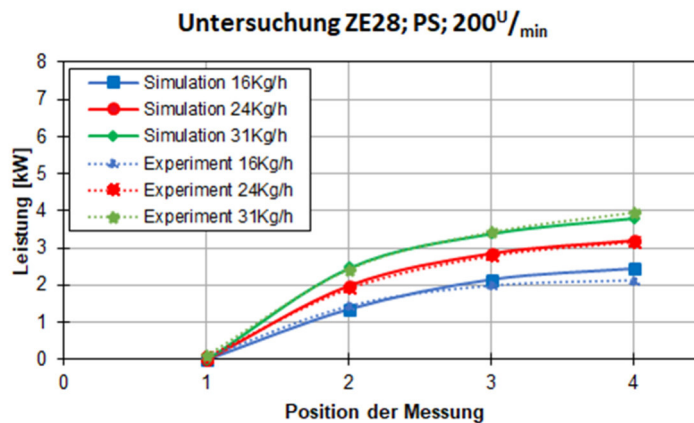


Abbildung 125: Vergleich der Simulationsergebnisse aus SIGMA mit den Messwerten an dem ZE 28 BLUE POWER bei Verwendung von PS und 200 min⁻¹

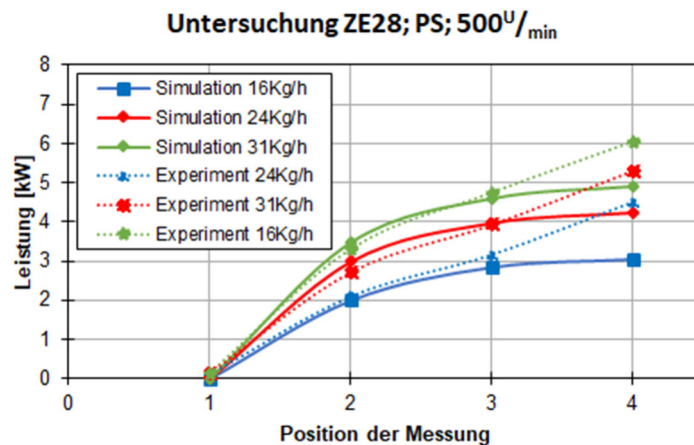


Abbildung 126: Vergleich der Simulationsergebnisse aus SIGMA mit den Messwerten an dem ZE 28 BLUE POWER bei Verwendung von PS und 500 min⁻¹

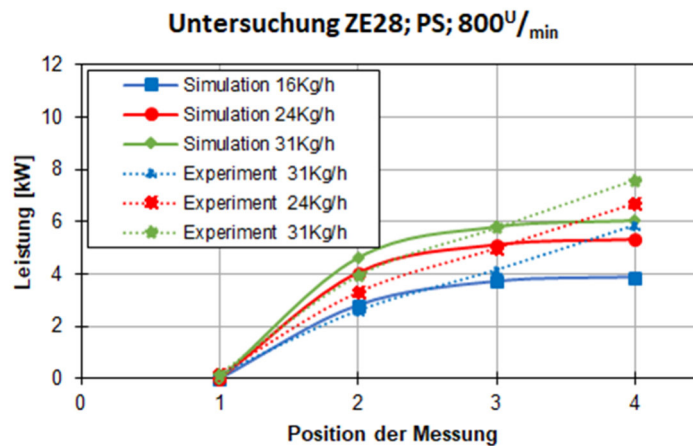


Abbildung 127: Vergleich der Simulationsergebnisse aus SIGMA mit den Messwerten an dem ZE 28 BLUE POWER bei Verwendung von PS und 800 min⁻¹

Bei der Betrachtung der Ergebnisse bei der Untersuchung von PS bei geringen Drehzahlen fällt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation auf.

Im Vergleich zu den zuvor gezeigten Untersuchungen an PP fällt jedoch auf, dass bei der Verwendung von PS bei hohen Drehzahlen eine deutliche Unterschätzung des Energiebedarfs am Ende der Schnecken stattfindet, wohingegen bei Vernachlässigung der Druckaufbauzone eine gute Übereinstimmung vorliegt.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass die Vorgänge entlang des Extruders mit dem entwickelten Modell gut beschreiben werden können, in Abhängigkeit der Materialdaten jedoch unterschiedliche Abweichungen auftreten, welche genauer zu betrachten sind.

Validierung des Modells anhand der ZSK25

Zur Validierung des Modells anhand einer weiteren Anlagengröße wurden Untersuchungen an der ZSK25 durchgeführt, bei denen an zwei unterschiedlichen Punkten entlang der Schnecke das Drehmoment gemessen wurde, sodass dieses mit den simulativen Daten aus der neu entwickelten Modellierung verglichen werden kann. Aufgrund maschinenseitiger Restriktionen war es nicht möglich Punkt 3 vergleichend zum ZE 28 BLUE POWER zu messen, sodass hier eine Interpolation zwischen Punkt 2 und Punkt 4 vorgenommen wurde. Darüber hinaus konnte die Feststoffförderung nicht allein betrachtet werden, da die Zugabemöglichkeit hier nicht gegeben war. Es wurde stattdessen eine verlängerte Feststoffförderung gemessen, wie dem Abschnitt 4 zu den experimentellen Untersuchungen ungefüllter Materialsysteme zu entnehmen ist.

Nachfolgend sind in Abbildung 128 bis Abbildung 130 die Vergleiche zwischen den simulativen und experimentellen Ergebnissen an der ZSK25 für PP bei unterschiedlichen Drehzahlen und Durchsätzen abgebildet.

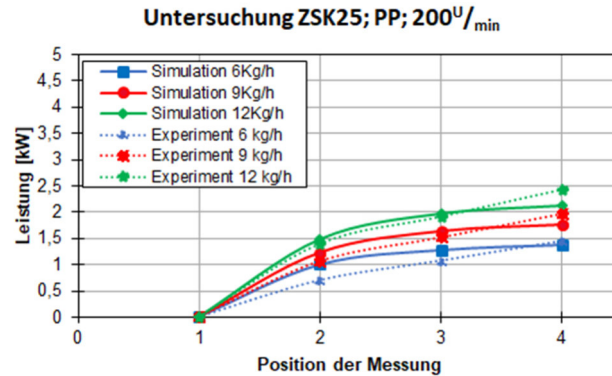


Abbildung 128: Vergleich der Simulationsergebnisse aus SIGMA mit den Messwerten an der ZSK25 bei Verwendung von PP und 200 min⁻¹

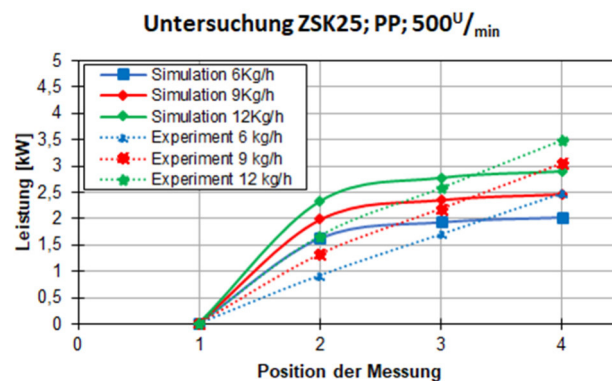


Abbildung 129: Vergleich der Simulationsergebnisse aus SIGMA mit den Messwerten an der ZSK25 bei Verwendung von PP und 500 min⁻¹

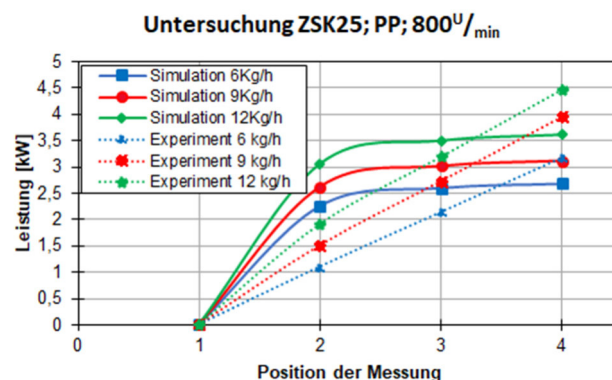


Abbildung 130: Vergleich der Simulationsergebnisse aus SIGMA mit den Messwerten an der ZSK25 bei Verwendung von PP und 800 min⁻¹

Bei geringen Drehzahlen zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Bei Steigerung von Durchsatz und Drehzahl weichen die Ergebnisse jedoch

voneinander ab. Dabei liegt im Bereich der Schmelzeförderung (Punkt 3) eine Überschätzung des Experiments vor. Dies kann jedoch nicht genauer betrachtet werden, da Punkt 3 in den experimentellen Untersuchungen an dieser Anlagengröße nur eine Interpolation der Ergebnisse darstellt. An der Schneckenspitze (Punkt 4) findet durch die Simulation eine Unterschätzung des Energiebedarfs statt. Diese wird durch Steigerung von Drehzahl und Durchsatz verstärkt.

Auch an der ZSK25 wurden Untersuchungen mit dem zweiten Polymer durchgeführt, wie den Abbildung 131 bis Abbildung 133 zu entnehmen ist.

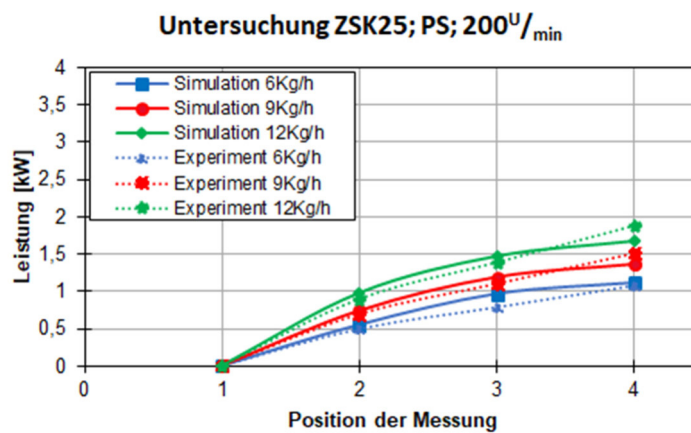


Abbildung 131: Vergleich der Simulationsergebnisse aus SIGMA mit den Messwerten an der ZSK25 bei Verwendung von PS und 200 min⁻¹

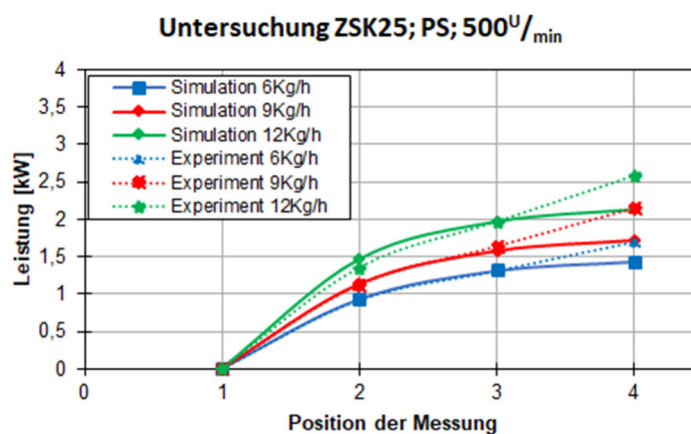


Abbildung 132: Vergleich der Simulationsergebnisse aus SIGMA mit den Messwerten an der ZSK25 bei Verwendung von PS und 500 min⁻¹

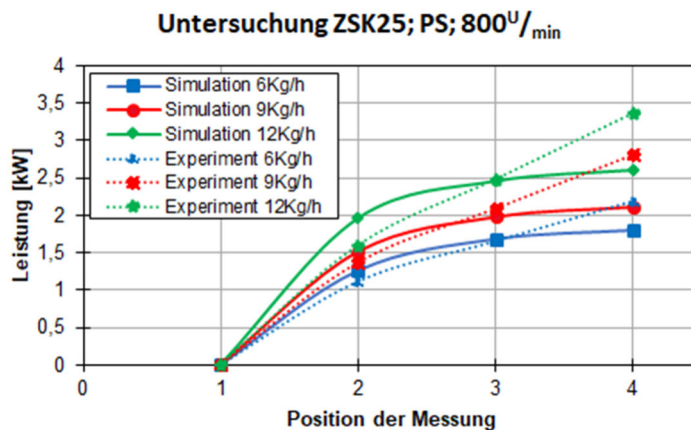


Abbildung 133: Vergleich der Simulationsergebnisse aus SIGMA mit den Messwerten an der ZSK25 bei Verwendung von PS und 800 min⁻¹

Bei der Verwendung von PS fällt auf, dass wie auch bei der Anlagengröße mit einem Schneckendurchmesser von 28 mm, bis zur dritten Messposition eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse vorliegt. Sowohl eine Steigerung der Drehzahl als auch eine Steigerung des Massedurchsatzes führen hier zu sehr exakten Simulationsdaten. Unter Berücksichtigung der Druckaufbauzone vor dem Werkzeug, kommt es jedoch auch hier zu einer Unterschätzung des Energiebedarfs durch die Simulation.

Für die Abweichungen zwischen Simulation und Experiment können unterschiedliche Faktoren als Grund vermutet werden. Zuerst ist die Anlagengröße zu nennen. Da es sich in den experimentellen Untersuchungen vorrangig um Laboranlagen handelt, ist das Verhalten gegenüber typischen Compoundierextrudern im Produktionsmaßstab zwar vergleichbar, es treten jedoch auch anlagengrößenabhängige Phänomene auf. Die Verwendung der TSK45 war, wie mit dem pbA besprochen, leider nicht möglich, da der zu entwickelnde Messansatz nicht umgesetzt werden konnte und das Magnetostriktion-Messsystem aus technischen Gründen nicht an der Anlage realisiert werden konnte. Somit war eine Validierung auf einer größeren Anlage nicht möglich, welche jedoch zu besseren Ergebnissen führen könnte.

Des Weiteren kann festgestellt werden, dass bei dem verwendeten PS vor allem der Bereich des Druckaufbaus durch das Modell unterschätzt wird. Hier gilt es zu prüfen, ob im Bereich von Vollfüllungen das Modell den Energieeintrag unterschätzt, ob Einflussfaktoren fehlen, die im Modell noch nicht berücksichtigt werden oder ob vereinfachende Annahmen in der Berechnung der Rohdaten, die dem Modell zur Verfügung gestellt werden zu dieser Unterschätzung führen.

1 Elementgeometrie												
Geometriegrößen	Symb.	Formel	Größe	Einheit	Größe	Si-Einheit						
Grundwinkel	ϕ	$P/h \cdot \arccos(Ah/Da)$	0,29329404	[rad]	16,84091432	[°]						
Flankenwinkel	ψ	$\arccos(Ah/Da)$	1,278866923	[rad]	73,15908568	[°]						
theoretischer Achsabstand	A_{th}	$0,5(Da+Dz)$	22,48	[mm]	0,022484848	[m]						
Schneckenaußendurchmesser	D_a	-	22,48	[mm]	0,02248	[m]						
Schneckeninnendurchmesser	D_i	-	16,97	[mm]	0,016969697	[m]						
Gangtiefe	h	$Da-Ath$	5,52	[mm]	0,005515152	[m]						
Gangzahl	f	-	2									
Gangsteigung	τ	$\arctan(\tau/(Da \cdot \pi))$	0,30817	[rad]	17,65678715	[°]						
Gangsteigungswinkel	τ	$\arctan(\tau/(Da \cdot \pi))$	0,30817	[rad]	17,65678715	[°]						
Stegbreite	e	$D_i/2 \cdot \alpha \cdot \tan(\tau)$	1,24814	[mm]								
Gangbreite	b	-	12,09232461	[mm]								

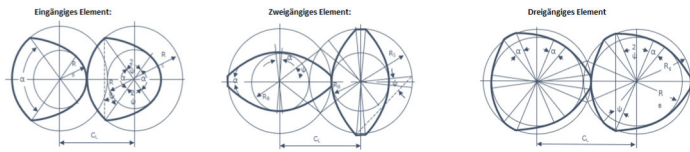


Abbildung 135: Darstellung der Geometriedaten der Schneckenelemente im Excelberechnungstool

Aus den Geometriedaten werden, wie in Abbildung 136, die nötigen Größen zur Berechnung der freien Kanalfäche gebildet.

14 Flächenberechnung						
Geometriegrößen	Symb.	Formel	Größe	Einheit	Größe	Si-Einheit
Zylinderdurchmesser	D_z	-	28,6			
Wahrer Achsabstand	A_{wz}	-	22,65	[mm]		
Zylinderfläche (Stirnschnitt)	A_{Zyl}	$1/4(2\pi \cdot \Omega \cdot Da)$	1168,83252			
Hilfsgröße	R_z	$\arccos(Aw/Dz)$	0,65678709			
Fläche Zylinderstirnschnitt	A_{wz}	-	1213,99814	[mm ²]		
Fläche Schneckenstirnschnitt	A_{S}	-	349,126262	[mm ²]		
Freie Fläche Stirnschnitt	A_{frei}	-	515,745613	[mm ²]		
Füllgrad	f	-	0,497091			
Fläche von Schmelze bedeckt	A_{schl}	-	256,372503	[mm ²]		
Fläche Teilströme	$A_{teilstr}$	-	85,4575009	[mm ²]		
	A1	-	28,8050816	[mm ²]		
	A2	-	10,5803789	[mm ²]		
	A3	-	67,5888353	[mm ²]		
	A4	-	93,7970602	[mm ²]		

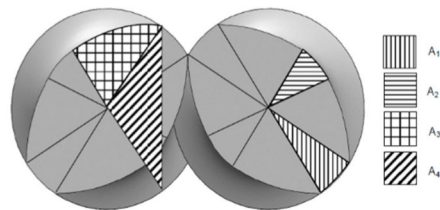
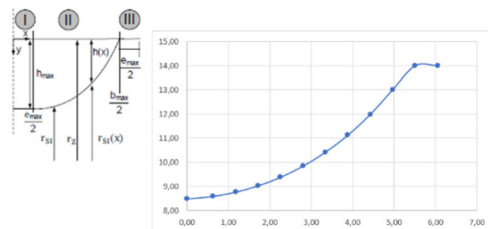


Abbildung 136: Darstellung der Flächenberechnung im Excel-Berechnungstool

Daran angeschlossen kann die Kanaltiefe an jedem Punkt berechnet werden. Die Kanaltiefenberechnung, siehe Abbildung 137, wird zur Überprüfung der Daten als Diagramm über die halbe Kanalbreite ausgegeben.

30 Kanaltiefenberechnung					
Geometriegrößen	Symb.	Formel	Größe	Einheit	Größe
Bereich 1					
Breite			0,624071292	[mm]	
Tiefe			5,52	[mm]	
Bereich 3					
Breite			0,624071292	[mm]	
Tiefe			0	[mm]	
Bereich 2					
Breite			5,42209	[mm]	
Anzahl Kanalabschnitte			10		
delta x			0,54221	[mm]	
kanalbreite a1			1,85801		
kanalbreite a2			1,85801		



Nebenrechnung Hebelarm Flächenanteile												
	-Bereich	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	Bereich1
Tiefe	1,36	-0,870	1,001	2,023	2,980	3,588	4,164	4,623	4,976	5,235	5,408	5,52
Breite	0,624	0,542	0,542	0,542	0,542	0,542	0,542	0,542	0,542	0,542	0,542	1,240
Fläche	0,847	-0,472	0,543	1,097	1,562	1,946	2,258	2,506	2,698	2,839	2,932	6,884
Kummulierte	0,847	0,375	0,917	2,014	3,576	5,521	7,779	10,286	12,984	15,823	18,755	25,639
Füllgrad	0,019	0,008	0,021	0,045	0,081	0,124	0,175	0,232	0,292	0,356	0,422	0,578
Kummulierte	0,62	1,17	1,71	2,25	2,79	3,34	3,88	4,42	4,96	5,50	6,05	7,29
Ort ab Flank	0,208024	0,3888	0,5894965	0,7502	0,931	1,1171	1,2924	1,4732	1,6539	1,8347	2,01539	2,6394587
Ort	5,838139	5,6574	5,4766658	5,2959	5,1152	4,93446	4,7537	4,573	4,3922	4,2115	4,03077	3,4067036
Hebelarm	14,35198	13,924	13,51659	13,13	12,763	12,4155	12,087	11,778	11,486	11,212	10,9543	10,1851045

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Bereich3
Tiefe	5,408	5,235	4,976	4,623	4,164	3,588	2,880	2,023	1,001	-0,870	1,36
Breite	0,542	0,542	0,542	0,542	0,542	0,542	0,542	0,542	0,542	0,542	0,624
Fläche	2,932	2,839	2,698	2,506	2,258	1,946	1,562	1,097	0,543	-0,472	0,847
Kummulierte	28,571	31,409	34,108	36,614	38,872	40,818	42,379	43,476	44,019	43,547	44,393
Füllgrad	0,644	0,708	0,768	0,825	0,876	0,919	0,955	0,979	0,992	0,981	1,000
Kummulierte	7,84	8,38	8,92	9,46	10,01	10,55	11,09	11,63	12,17	12,72	13,34
Ort ab Flank	4,2115	4,3922476	4,573	4,7537	4,93446	5,1152	5,2959	5,4767	5,6574	5,83814	6,0461623
Ort	1,8347	1,6539147	1,4732	1,2924	1,1171	0,931	0,7502	0,5695	0,3888	0,20802	0
Hebelarm	8,9455	8,8572437	8,7789	8,7102	8,65098	8,601	8,5601	8,5281	8,505	8,49061	8,4848495

Hebelarm					
Größen	Symb.	Formel	Größe	Einheit	Größe
Hebelarm Kanalströmung	l_{H1}	Nebenrechnung	10,1851045	[mm]	0,101851045 [m]

Abbildung 138: Darstellung der Hebelarmberechnung im Excel-Berechnungstool

Die Werte werden an die Übersichtsseite zurückgegeben, wo die Drehmomente und Energieeinträge abgelesen werden können.

Durch Definition von anwenderspezifischen Grenzwerten, wie maximale Anlagendrehmomentauslastung, Energieeintrag pro Element oder Drehmoment pro Element, siehe Abbildung 139, werden dann nach dem Schema einer Ampel die Ergebnisse eingefärbt und Handlungsempfehlungen zum Ersetzen einzelner Elemente lassen sich entsprechend ableiten.

Grenzwerte		
Energieeintrag pro Element	[kWh/kg]	0,002
Drehmoment pro Element	[Nm]	2
Drehmoment gesamt	[Nm]	25

Abbildung 139: Darstellung der Grenzwerteingabe im Excel-Berechnungstool

Elemente, die den hier beispielhaft definierten Grenzwert von 2 Nm pro Element überschreiten, werden in Abbildung 140 rot eingefärbt und können vom Anwender durch weniger aggressive Elemente ersetzt werden.

0,4	0,787	0,771	0,565	0,739	0,722	0,588	0,579	0,4610	1,1150	1,111	1,109	2,928	2	0,2	0,439	0,439	0,437	0,545	0,434	0,325	0,539	0,431	0,428	0,52	0
7	7,8359	8,607	9,172	9,911	10,63	11,22	11,8	12,26	13,38	14,49	15,6	18,52	20	20	20,94	21,37	21,81	22,36	22,79	23,12	23,65	24,09	24,51	25	#

Abbildung 140: Abbildung der Rechenergebnisse einzelner Drehmomente am Element sowie kumulierter Ergebnisse und Bewertung im Excel-Berechnungstool

Auch wird deutlich, dass in diesem Fall die definierte Drehmomentgrenze von 25 Nm durch den Versuchspunkt am Ende der Schnecke überschritten würde.

6 Zusammenfassung

Die komplexen Zusammenhänge von Prozessparametern und Materialeigenschaften stellen die Maschinenhersteller und Compoundeure, bei steigender Rezepturvielfalt vor immer neue Herausforderungen. Um hier die zeit- und kostenintensive Trial-and-Error-Versuche zu reduzieren, haben sich zunehmend computerunterstützte Simulationsverfahren etabliert. Der mechanische Energieeintrag, bzw. die Drehmomentbelastung der Extruderschnecken im gleichläufigen DSE wurde dabei aufgrund von bisher nur aufwendigen Validierungsmöglichkeiten kaum betrachtet. Dies betrifft insbesondere die Möglichkeit das Drehmoment nur als integralen Wert über die komplette Extruderschnecke zu bestimmen. Die zahlreichen Variationsmöglichkeiten von Zylinder und modularem Schnecken Aufbau bieten dem Compoundeur viele Vorteile, um sein Verfahren zu verbessern, erschweren jedoch das Prozessverständnis und die Vorhersage des Energieeintrags. Ziel des Forschungsprojekts war es, die Simulationsbetrachtungen hinsichtlich dem Energieeintrag über die verschiedenen Zonenbereich der Schnecke voranzubringen. Hierfür sollte zusätzlich ein Messansatz entwickelt und validiert werden, der axial-ortausgelöst das angreifende Drehmoment online ermittelt und somit zur Simulationsvalidierung genutzt werden kann.

Der Messansatz beruht auf der Nutzung von Sensoren, die direkt über den Extruderschnecken platziert wurden und somit die Schneckenumfangskontur (Schneckensteg und -tal) abbilden konnten. Hier erwiesen sich, aufgrund des sehr scharfkantigen Signalverlaufs, die kapazitiven Sensoren als vielversprechend, welche jedoch wegen des sehr kleinen Messbereichs ($< 0,5$ mm) keine Praxistauglichkeit aufwiesen. Die auftretende Drehmomentbelastung zwischen zwei Sensoren, sollte aufgrund der damit einhergehenden Verdrehung (Torsion) der Welle eine Phasendifferenz zwischen den beiden Sensorsignalverläufen erzeugen. Da sich der Verdrehwinkel infolge der Drehmomentbelastung nicht nur zwischen den beiden Sensorpositionen, sondern von der Einspannung der Schnecke bis zum Angriffspunkt aufbaut sowie die unterschiedlichen Drehmomentbelastungen sich entlang der Schnecke überlagern (Superpositionsprinzip), zeigte sich in den experimentellen Untersuchungen, dass eine eindeutige örtliche Bestimmung des Drehmoments nicht möglich war. Ein weiterer Auswertungsansatz auf Basis der relativen zeitlichen Verschiebung des Signalverlaufs eines einzelnen Sensors gegenüber einem simulierten Signalverlauf, zeigt aufgrund der Schneckendrehzahlschwankungen ebenfalls keine ausreichende

Messgenauigkeit auf. Somit musste im Zuge des Projekts auf alternative Validierungsmöglichkeiten zurückgegriffen werden. Hierzu wurden die Schneckenzone abschnittsweise aufgebaut und das Gesamtdrehmoment als Referenz genutzt.

Im Bereich der experimentellen Untersuchungen war es somit möglich, die einzelnen Zonen des gleichläufigen DSE offline einzeln zu betrachten und hinsichtlich der Einflüsse von Schneckendrehzahl, Materialdurchsatz, Gehäusetemperatur sowie Schneckenkonfiguration auf den Energieeintrag der beiden Schneckenwellen zu untersuchen. Hierbei konnten für jede Zone die Empfindlichkeit der Einflüsse einzeln dargestellt werden. Es war möglich mit dem Vorgehen die Feststoffförderung einzeln zu betrachten und zu beweisen, dass ein Energieeintrag hier zwar messbar und vorhanden ist, jedoch im Vergleich zu den weiteren Zonen vernachlässigbar gering ausfällt. Zudem konnten durch die zahlreichen experimentellen Untersuchungen viele Erkenntnisse über die asymmetrische Lastverteilung der Extruderschnecken gewonnen werden, auf denen nachfolgende Forschungsprojekte eine Vorhersage aufbauen können.

Für die Schmelzeförderung konnte ein Modell entwickelt werden, welches auf Grundlage der Schergeschwindigkeit und Viskosität im Kanal eine Schubkraft an der Elementoberfläche berechnet. Mit Hilfe eines durch geometrische Daten und Füllgradberechnung ermittelten Hebelarms kann diese Kraft zum Drehmoment und unter Zuhilfenahme von Drehzahl und Durchsatz zum spezifischen Energieeintrag weiterberechnet werden. Somit ist es fortan möglich im schmelzeflüssigen Bereich des Doppelschneckenextruders den Energieeintrag axial-orts aufgelöst zu berechnen. Mit Hilfe der experimentell ermittelten Daten konnte die Richtigkeit der Simulationsergebnisse nachgewiesen werden. Ein entwickeltes Excel-Tool kann kmUs als Hilfestellung dienen, um ihre Prozesse künftig materialschonender auszulegen und Drehmomentspitzen entlang der Schnecken zu identifizieren und zu vermeiden.

7 Literaturverzeichnis

- [Alt19] Altepeter, M.: Entwicklung eines mathematischen Modells zur Berechnung der benötigten Antriebsleistung eines gleichläufigen Doppelschnecken-extruders, Kunststofftechnik Paderborn, 2019
- [Ans93] Ansahl, J.: Grundlagen für die Auslegung dichtkämmender Gleichdrall Doppelschneckenextruder. Dissertation, Prof. Dr.-Ing. H. Potente, Kunststofftechnologie Paderborn (KTP), Uni-GH Paderborn, 1993
- [BBO13] Baur, E.; Brinkmann, S.; Osswald, T.; Rudolph, N.; Schmachtenberg: Saechtling Kunststoff Taschenbuch; 31. Auflage; Hanser Verlag; München; 2013
- [Bon16] Bonten, C.: Kunststofftechnik – Einführung und Grundlagen; 2. Auflage; Hanser Verlag; München; 2016; ISBN 978-3-446-44674-8
- [BW97] Bawiskar and J. L. White (1997). A Composite Model for Solid Conveying, Melting, Pressure and Fill Factor Profiles in Modular Co -Rotating Twin Screw Extruders. International Polymer Processing: Vol. 12, No. 4, pp. 331-340
- [Dör17] Dörner, M.: Modellierung der dissipierten Leistung in der Einzugszone von Einschneckenextrudern, unveröffentlichte Studienarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, 2017
- [DPV13] Domenech, T.; Peuvrel-Disdier, E.; Vergnes, B.: The importance of specific mechanical energy during twin screw extrusion of organoclay based polypropylene nanocomposites, Composites Science and Technology 75 (2013) 7-14
- [Duk99] Dukart, A.: Sensor device for detecting a torque and/or angle of rotation; Schutzrecht WO99/53284; Robert Bosch GmbH; 21.10.1999
- [EBB02] P.H.M. Elemans, P. Bleimann, J. Blanchard: "Evaluation of Melting Performance of a Co-Rotating Twin-Screw Extruder", Society of Plastic Engineers, ANTEC Paper, 2002
- [FLF14] Fiedler, G.; Lüddecke, B.; Filsinger, D.: Automobilhersteller setzen bei Abgaseturbolader auf Drehmomentsensoren mit Magnetostriktion; messtec drives Automation; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; Weinheim; 2014
- [Fie14] Fiedler, G.: Ernte ohne Zwischenfälle; messtec drives Automation, Sonder-heft: Traffic – Technik, die bewegt (2014); S. 36-37; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; Weinheim
- [Ger90] Gerrath, K.-H.: Verfahren und Vorrichtung zur fehlerfreien Drehmoment-messung an einer Welle; Schutzrecht DE3907760A1; Battelle-Institut eV; 20.9.1990
- [GJQ03] C.G. Gogos, B.J. Jeong, B. Qian: "Predicting Plastic Energy Dissipation (PED) Using Phenomenological Constitutive Equations for Glassy and Semi-crystalline Polymer Solids", SPE ANTEC Tech. Papers, 47, S.124–128, 2003
- [Gle01] Glehr, M.: Messvorrichtung zur Ermittlung des drehmomentbedingten Torsionswinkels einer Welle; Schutzrecht DE19941683A1; Siemens AG; 22.3.2001

- [Hec13] Heckler, J.: Magnetoelastische Drehmomentsensoren zur Regelung von E-Bike-Antrieben; Sensor Magazin; 3 (2013)
- [HGS00] Heinze, D.; Gertz, B.-H.; Stiller, B.: Vorrichtung zur Messung des Drehmomentes an einem Kurbelantrieb; Schutzrecht DE19853734A1; 25.5.2000
- [HKH15] Heisenberg, D.; Klotzbuecher, T.; Haas, G.; Dorfmueller, L.; Siegle, H.; Wenzler, A.; Jost, F.; Noltemeyer, R.; Freitag, M.: Vorrichtung zur Messung eines Winkels und/oder eines Drehmomentes eines drehbaren Körpers; Schutzrecht DE10041095B4; Robert Bosch GmbH; 12.11.2015
- [HS79] Hiersig, M. H.; Sudhoff, W.: Meßumformer zum Messen von Verdrehwinkeln zwischen zwei Meßstellen eines ein Drehmoment übertragenden Maschinenelements; Schutzrecht DE2811809 B1; Mannesmann AG; 02.08.1979
- [Hof87] Hoffmann, K.: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen; Druckerei Drach; Pfungstadt; 1987
- [HB61] Howard, B. F.; Berrien, S.: Torque measurement apparatus; Schutzrecht US2978902; Clark Equipment Company; 11.4.1961
- [IW95] Ironside, J. M.; Williams, A. J. S.: Enhanced position signals in optical torque sensors; Schutzrecht EP0638789A2; Lucas Industries Public Limited Company; 15.02.1995
- [JW08] H. Jung, J.L. White: "Modeling and Simulation of the Mechanisms of Melting in a Modular Co-Rotating Twin Screw Extruder", Intern. Polymer Processing: Vol. 23, pp. 242-251, 2008
- [Koh07] Kohlgrüber, K.: Der gleichläufige Doppelschneckenextruder; Carl Hanser Verlag; München; 2007
- [KT10] Köster, M.; Thommes, M.: In-line dynamic torque measurement in twin-screw extrusion process; Chemical Engineering Journal; 164 (2010); S. 371-375; Elsevier B. V.
- [Kra23] N.N. KraussMaffei: Zweischneckenextruder ZE 28 Blue Power – Technologievorsprung für F&E Anwendungen und Kleincharakterproduktion: <https://www.kraussmaffei.com/media/dastore/cms/media/ext/downloads/ext-fl-ze28-bluepower-de-view.pdf>, zuletzt abgerufen am 24. Februar 2023
- [Kre04] Kretschmer, K.: Untersuchung und Beschreibung des Prozess- und Misch-verhaltens von Mischelementen für Gleichdrall-Doppelschneckenextruder, Dissertation, Universität Paderborn, 2004
- [LWS16] Langen, P.; Werner, J.; Stübs, O.; Hochrein, T.; Bastian, M.; Zeiler, T.; Heinz, B.: Gemeinsamer Schlussbericht: Energieoptimierte Extrusionslinie - Entwicklung, Herstellung und Bewertung für die Kunststoffverarbeitung; Projektträger Jülich; Förderkennzeichen 03ET1082A; 2016
- [Lap85] Lappe, A.: Zusammenstellung und Vergleich bestehender Berechnungsmodelle zur Ermittlung der Durchsatzcharakteristik und der Leistungsaufnahme von dichtkämmenden, gleichläufigen Zweischneckenknetern, Studienarbeit, Uni Paderborn, 1985
- [Lea83] League, J. S.: Drehmoment-Meßgerät; Schutzrecht DE3235122A1; Koppers Co., Inc.; 28.4.1983
- [LHH02] Liang, M., Huff, H., Hsieh, H.: Evaluating Energy Consumption and Efficiency of a Twin-Screw Extruder. Food Engineering and

- Physical Properties. Vol. 67, Nr. 5, 2002 Journal Of Food Science
- [MEL86] Meijer, H.E.H., Elemans, P.H.M., Lardinoye, H.H.: Zur Modellierung von schmelzegefüllten Zweischnckenextrudern. Wärmeübertragung bei der Kunststoffverarbeitung. VDI-Verlag. Düsseldorf, 1986
- [Mel98] Melisch, U.: Grundlagen zur Simulation des Förder- und Plastifizierprozesses dichtkämmender Gleichdrall-Doppelschnckenextruder. Geometrie dichtkämmender Gleichdrall-Doppelschnckenextruder. Dissertation, Uni Paderborn, 1998
- [MU15] Menke, T.; Unger, C.: Die Welle im Fokus; Computer & Automation; 8 (2015); S.32-35; WEKA Fachmedien GmbH; Haar
- [MHM11] Menges, G.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.; Schmachtenberg, E.: Men-ges Werkstoffkunde Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, 6. Auflage, München, 2011
- [MLS95] Michaeli, W.; Langkamp U.; Schäfer, B.; Kraack, J.: Piezoresistive Drucksensoren; Kunststoffe; 85 (1995); S. 1912-1914; Carl Hanser Verlag; München
- [NCT18] N.N.: NCTE Extruder: <http://www.ncte.de/extruder/>, abgerufen am 29.06.2023
- [Net83] Nettelbreker, J.: Theoretische Betrachtungen zum Durchsatz und Leistungsverhalten eines Schmelzeextruders, Studienarbeit Universität Paderborn, 1983
- [PB96] Peilloud, F.; Blache, C.: Torsion measuring device for a rotating shaft; Schutzrecht US5501110; The Torrington Company; 26.3.1996
- [QGT02] B. Qian, C.G. Gogos, D.B. Todd: "The melting behavior of amorphous polyester in a co-rotating twin screw extruder", SPE ANTEC Tech. Papers, 2002
- [Que16] Quest, J.: Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Entgasungsoberfläche und des Aufschmelzgrades von Prozessen auf Doppelschnckenextrudern, unveröffentlichte Masterarbeit, Kunststofftechnik Paderborn, 2016
- [Rau86] Rauwendaal C.: Polymer Extrusion. Carl Hanser Verlag. München, New York, Wien, 1986
- [RJL85] Richter, W.; Jonack, K.; Lamina, E.; Krüger, R.: Vorrichtung zur kontinuierlichen berührungslosen Drehmoment- und Drehzahlmessung; Schutzrecht DD230078A1; VEB Eilenburger Chemie-Werk; 20.11.1985
- [RMV89] Rohs, U.; Meuter, H.; Voigt, D.: Vorrichtung zur Messung des Drehmomentes einer Arbeitswelle; Schutzrecht EP 0313999A2; 03.05.1989
- [Sch96] Schuler, W.: Process Engineering Design of Co-Rotating twin screw extruders. Dissertation, Prof. Dr.-Ing. H. Potente, Kunststofftechnologie Paderborn (KTP), Uni-GH Paderborn, 1996
- [Thü08] A. Thümen: „Untersuchung und Beschreibung des dispersen Aufschmelzens in Gleichdrall-Doppelschnckenextrudern“, Dissertation, Universität Paderborn, Institut für Kunststofftechnik KTP, 2008

- [Tri18] Trippe, J.: Erweiterung der Modellierung zur Durchsatz- und Leistungsberechnung von Feststoffförderprozessen in der Einschneckenextrusion, Dissertation, Kunststofftechnik Paderborn, 2018
- [TON93] Tsuji, Y.; Okazaki, T.; Nakamura, H.: Drehmomenterfassungssystem; Schutzrecht DE4232040; Mazda Motor Corp.; 8.4.1993
- [UMJ98] Ullmann, T.; Marx, K.; Jost, F.; Herderich, H.-J.: Verfahren und Vorrichtung zur Erfassung von Drehmomenten; Schutzrecht DE19757007A1; Robert Bosch GmbH; 20.8.1998
- [VVD98] Vergnes, B.; Della-Valle, G.; Delamare, L.: A Global Computer Software for Polymer Flows in Corotating Twin Screw Extruders, Polymer Engineering and Science, 38(1998)11, S.1781-1792
- [WC94] James L. White: Ziyun Chen: Simulation of non-isothermal flow in modular co-rotating twin screw extrusion, IPP, Volume34, Issue3, February 1994, Pages 229-237
- [Wer76] Werner, H.: Das Betriebsverhalten der zweiwelligen Knetscheibenpresse vom Typ ZSK bei der Verarbeitung von hochviskosen Flüssigkeiten. Dissertation, Uni München, 1976
- [Wes19] Westhues, K.: Entwicklung eines Modells zur Berechnung der initialen Aufschmelzvorgänge in gleichläufigen Doppelschneckenextrudern, Dissertation, Universität Paderborn, 2019
- [ZN06] L. Zhu, K.A. Narh: "A Simplified Model for the Melting of Polymer Pellets under Compression in a Twin-Screw Extruder", SIMULATION Volume 82, Number 8, 543-548, 2006