



Masterarbeit

**Untersuchung des Temperatur- und
Strömungsverhaltens beim Kautschukspritzgießen
mithilfe eines neu entwickelten
Schneckenprüfstands**

verfasst von

Georg Graninger, BSc

eingereicht am



SPRITZGIESSEN VON
KUNSTSTOFFEN

Leiter: Prof. Dr. Walter Friesenbichler

Montanuniversität Leoben

Leoben, 16.11.16

Eidesstattliche Erklärung

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle allen danken, die mich während meiner Zeit bei der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt haben und mir mit Rat, Tat, kritischen und motivierenden Worten zur Seite gestanden sind.

Mein besonderer Dank gilt Professor Dr. Walter Friesenbichler dafür, dass er die Arbeit beaufsichtigt hat. Ebenfalls möchte ich mich ausdrücklich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Roman Kerschbaumer und meinem Arbeits- und Teamkollegen Bernhard Lechner, die mir viel beigebracht haben und sich oft Zeit für mich genommen haben, bedanken.

Danke an alle Unternehmen, die diese Arbeit ermöglicht haben.

Herzlichen Dank an meine Familie und alle meine Freunde, die mich auf diesem Weg begleitet und unterstützt haben.

Ohne sie alle wäre die Arbeit nicht in dieser Form und Qualität möglich gewesen.



Kurzfassung

Die Kautschukverarbeitung ist weniger erforscht als die Thermoplastverarbeitung und beruht deswegen oftmals auf „trial-and-error“. In dieser Arbeit wird untersucht, ob es möglich ist mithilfe eines Versuchsplans gemäß Design of Experiments (DoE) mathematische Modelle zu erstellen, die Vorgänge in der Kautschukverarbeitung beschreiben und vorhersagen können.

Konkret geht es um die Untersuchung der axialen und der radialen Massetemperaturprofile, welche im Plastifizierzylinder einer Kautschukspritzgießmaschine entstehen. Das Ziel der Untersuchungen ist es ein homogenes Temperaturprofil zu erzeugen, um so in weiterer Folge die Bauteilqualität zu verbessern. Ebenfalls wird die Umlaufströmung, die sich zusätzlich zur Längsströmung ausbildet, untersucht.

Die Versuche werden an einem eigens konstruierten Schneckenprüfstand durchgeführt, wobei als Einflussfaktoren (Maschineneinstellparameter) die Einzugs- und die Plastifizierzylindertemperatur, die Schneckendrehzahl und der Staudruck variiert werden.

Es kann gezeigt werden, dass Modelle erzeugt werden können, welche die Massetemperaturprofile akkurat beschreiben und vorhersagen können, solange sich die zu vorhersagenden Werte innerhalb der Grenzen des Versuchsplans befinden. Das Ziel, ein homogenes Temperaturprofil zu schaffen, wird mithilfe eines Drehzahlprofils erreicht. Eine Beschreibung der Ausbildung der Umlaufströmung mithilfe eines mathematischen Modells ist aufgrund von signifikanten Nichtlinearitäten der Ergebnisse nicht möglich. Als wesentliche Einflussfaktoren können jedoch die Plastifizierzylindertemperatur, die Schneckendrehzahl sowie der Staudruck bestimmt werden.

Abstract

Due to the fact that the processing of rubbers is often based on the principle of "trial-and-error", this thesis is supposed to investigate in the possibility of creating mathematical models to describe certain processes. Using a specifically constructed test stand the following investigations are made according to a Design of Experiments (DoE).

The temperature profiles inside the barrel of the injection unit as well as the cross flow which develops along the screw channel are examined. The goal is to find models which can be used to create a plain temperature profile in order to enhance part quality. Another objective is to predict the way the cross flow develops and to find the responsible factors which influence the cross flow.

The experiments are conducted with the factors feed temperature, barrel temperature, rotation speed and back pressure being varied. Models are found which are able to not only describe but also predict temperature profiles accurately as long as predictions are within the range of the DoE. Furthermore, a plain temperature profile can be created using a rotation speed profile. It is possible to find the different factors (barrel temperature, rotation speed and back pressure) which affect the development of the cross flow.

Inhaltsverzeichnis

1	ZIEL UND VORGEHENSWEISE	1
2	STAND DER TECHNIK.....	3
2.1	UNTERSCHIEDE KAUSCHUK- ZU THERMOPLASTSPRITZGIEßEN	3
2.2	KAUSCHUKVERARBEITUNGSMÖGLICHKEITEN	4
2.3	SPRITZGIEßEN	5
2.3.1	<i>Schneckenspritzaggregat.....</i>	<i>5</i>
2.3.2	<i>Schneckenkolbenaggregate</i>	<i>6</i>
2.3.3	<i>FIFO-Aggregate</i>	<i>7</i>
2.4	VORLAGETEMPERATUR	8
2.5	BETRACHTUNG DER UMLAUFSTRÖMUNG	12
2.5.1	<i>Umlaufströmung und Kanalströmung allgemein</i>	<i>12</i>
2.5.2	<i>Schmelzewirbel- und Umlaufströmungsuntersuchungen</i>	<i>13</i>
2.6	STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG - DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE).....	15
3	VERSUCHSAUFBAU UND –DURCHFÜHRUNG	19
3.1	AUFBAU DES SCHNECKENPRÜFSTANDS.....	19
3.2	DESIGN OF EXPERIMENTS – VERSUCHSPLÄNE	26
3.3	VERSUCHSVORBEREITUNGEN UND -DURCHFÜHRUNG.....	31
3.3.1	<i>Materialcharakterisierung</i>	<i>31</i>
3.3.2	<i>Bestimmung des Staudrucks</i>	<i>33</i>
3.3.3	<i>Ermittlung der Dosierzeiten</i>	<i>34</i>
3.3.4	<i>Messsignalerfassung und Stationarität des Prozesses</i>	<i>37</i>
3.3.5	<i>Versuchsdurchführung.....</i>	<i>39</i>
4	AUSWERTUNG	41
4.1	AUSWERTUNG DES RADIALEN UND AXIALEN TEMPERATURPROFILS.....	41
4.2	AUSWERTUNG DER UMLAUFSTRÖMUNG	46
4.2.1	<i>Methoden zur Bestimmung der Umlaufströmung</i>	<i>48</i>
4.2.2	<i>Gaußsche Trapezformel</i>	<i>49</i>
4.2.3	<i>Verhältnis der Breite zur Gesamtbreite</i>	<i>49</i>
4.2.4	<i>Verhältnis der mittleren Breite zur Gesamtbreite</i>	<i>50</i>
5	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	55
5.1	TEMPERATURPROFILE DER SCHNECKE M1 (L/D ~ 11).....	55
5.1.1	<i>Vergleich der Kurvenverläufe zweier Materialien bei langem Dosieren</i>	<i>56</i>
5.1.2	<i>Vorstellung des Modells – mathematische Repräsentation und Vorhersage von Ergebnissen</i>	<i>58</i>
5.1.3	<i>Erstellung eines homogenen Temperaturprofils</i>	<i>61</i>
5.1.4	<i>Einflüsse der Hauptfaktoren auf das axiale Temperaturprofil</i>	<i>63</i>

Inhaltsverzeichnis

5.2	TEMPERATURPROFILE DER MK-SCHNECKE (L/D ~ 15)	64
5.2.1	<i>Vorstellung des Modells – mathematische Repräsentation und Vorhersage von Ergebnissen</i>	65
5.2.2	<i>Einflüsse der Hauptfaktoren auf das axiale Temperaturprofil</i>	68
5.2.3	<i>Schlussfolgerung Temperaturmessungen</i>	69
5.3	ERGEBNISSE DER UMLAUFSTRÖMUNGSUNTERSUCHUNGEN DER M1-SCHNECKE (L/D ~ 11).	70
5.3.1	<i>Einfluss des Temperaturabfalls bei längerem Dosieren auf die Umlaufströmung</i>	71
5.3.2	<i>Betrachtung der Signifikanz verschiedener Parameter in Bezug auf die Umlaufströmung</i>	72
5.3.3	<i>Untersuchung der Umlaufströmung mithilfe mathematischer Modelle</i>	75
5.4	ERGEBNISSE DER UMLAUFSTRÖMUNGSUNTERSUCHUNGEN DER MK-SCHNECKE (L/D ~ 15).	76
6	ZUSAMMENFASSUNG	78
7	LITERATURANGABE	79
8	VERZEICHNIS DER SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN	81
9	ANHANG	83
9.1	KALIBRIERKURVEN DER DRUCKSENSOREN.....	83
9.2	DICHTEWERTE DES EPDM-MATERIALS.....	86
9.3	STAUDRUCKWERTE GEMESSEN AN RÜCKSTROMSPERRE (RSS) UND DROSSELFLANSCH (DF)	87
9.4	DIAGRAMME FÜR AXIALE TEMPERATURPROFILE (M1 & MK) UND UMLAUFSTRÖMUNGEN (M1)	88
9.5	SCHNITTBILDER DER UMLAUFSTRÖMUNGSUNTERSUCHUNGEN (M1).....	91

1 Ziel und Vorgehensweise

Ziel dieser Masterarbeit ist es, Untersuchungen zum Temperatur- und Strömungsverhalten im Kautschukspritzguss durchzuführen und mithilfe der erhaltenen Ergebnisse mathematische Modelle zu erstellen. Durch Anwendung dieser Modelle soll es möglich sein, eine homogene Temperaturverteilung im Elastomerformteil zu generieren und somit die mechanischen und dynamischen Eigenschaften signifikant zu verbessern.

Die Versuche werden an einem neu konstruierten Prüfstand der Firma Maplan GmbH durchgeführt. Der Prüfstand wird im Rahmen des PCCL-Projektes „RubPart“ als Schneckenprüfstand bezeichnet. Beim Schneckenprüfstand handelt es sich um den Nachbau eines First-In-First-Out- (FIFO) Spritzaggregats, welcher mit Temperatur- und Drucksensoren versehen ist. Er besteht aus einem Plastifizierzylinder und einem Drosselflansch, welcher die Aufbringung eines Staudruckes und die Messung der Massetemperatur ermöglicht. Die Besonderheit des Schneckenprüfstands besteht darin, dass die Schnecke durch eine vertikale hydraulische Bewegung aus dem Plastifizierzylinder gezogen werden kann. Der Inhalt des Schneckenkanals wird dadurch zugänglich.

Es werden jeweils das Massetemperaturprofil während des Dosiervorgangs als auch die Ausbildung der Umlaufströmung im Schneckenkanal untersucht. Im Zuge der Ermittlung der Umlaufströmung wird eine zweifarbige Kautschukmischung, die als Kautschukstreifen eingezogen wird, im Plastifizierzylinder vernetzt. Nach Ziehen der Schnecke kann die Kautschukmischung von der Schnecke gelöst werden. Anschließend wird das vernetzte Material an mehreren Positionen entlang des abgewickelten Schneckenkanals mittels einer speziellen Vorrichtung geschnitten. Die Schnittbilder werden danach in Hinblick auf die Ausbildung der Umlaufströmung untersucht.

Im Zuge mehrerer Faktorenversuchspläne wird unter Verwendung einer statistischen Auswertesoftware untersucht, wie sich die Temperatur des Materialeinzugs (Einzugstemperatur), die Temperatur des Plastifizierzylinders (Plastifizierzylindertemperatur), die Schneckendrehzahl und der Staudruck bei zwei unterschiedlichen Schneckenkonfigurationen auf das Temperaturprofil der dosierten Kautschukmischung sowie auf die Strömungsbildung im Plastifizierzylinder auswirken.

1. Ziel und Vorgehensweise

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen können Prognosemodelle erstellt werden, mit deren Hilfe es möglich ist, den Dosiervorgang vorherzusagen und damit zu optimieren.

2 Stand der Technik

Das folgende Kapitel beschreibt den aktuellen Stand der Technik in Bezug auf das Kautschukspritzgießen, die Umlaufströmung und die statistische Versuchsplanung, auch bekannt als „Design of Experiments (DoE)“.

2.1 Unterschiede Kautschuk- zu Thermoplastspritzgießen

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit Prozessen und Vorgängen beim Kautschukspritzgießen. Die wesentlichen Unterschiede zum Thermoplastspritzgießen sind in Tabelle 1 gegenübergestellt und werden im Folgenden genauer erläutert.

Tabelle 1: Unterschiede der Spritzgießverfahren von Kautschukmischungen und Thermoplasten [8, 13-19]

Eigenschaft	Kautschukmischungen	Thermoplast
Formteile	dickwandig	eher dünnwandig
Massetemperaturen (Spritzeinheit)	80-110 °C	ab ca. 200 °C
Werkzeugtemperaturen	höher als Massetemperatur	niedriger als Massetemperatur
Rohstoff-Lieferform	meist Streifen	Granulat
Zykluszeit	eher lang (Minuten)	kurz (Sekunden)
Schnecke	Förderschnecke	3-Zonen Schnecke
Gratbildung	tritt auf	tritt nicht auf
Formverschmutzung	stark	gering

Der markanteste Unterschied bei der Verarbeitung dieser unterschiedlichen Werkstoffe liegt in der Temperaturführung. Thermoplaste werden in der Plastifiziereinheit mit einer 3-Zonen Schnecke durch Scherung und Wärmeleitung aufgeschmolzen und anschließend in ein gekühltes Werkzeug eingespritzt, in dem das Formteil auskühlt. Die Schwindung wird nach Möglichkeit durch den Nachdruck kompensiert [8, 13-19].

Im Elastomerbereich wird die Mischung durch eine Förderschnecke eingezogen und auf Temperaturen im Bereich 80 °C bis 110 °C vorgewärmt. Anschließend wird in ein heißes Werkzeug eingespritzt, wo das Formteil durch Hitzeeinwirkung vernetzt. Der Nachdruck wird verwendet um zu verhindern, dass Masse, welche infolge der

thermischen Ausdehnung der Mischung aus der Kavität drängt, zurück in die Düse gelangt [8, 13-19].

Formteile aus Elastomeren sind häufig dickwandiger, um eine dämpfende Wirkung zu erzielen. Dies verlängert die auftretenden Zykluszeiten. Verstärkt wird dies durch den Effekt, dass nicht nur die zur Vernetzung notwendige Temperatur zu erreichen ist, sondern auch die Vernetzungsreaktion selbst stattfinden muss. Daraus ergeben sich Zykluszeiten im Minutenbereich [8, 13-19].

Gratfreies Spritzgießen für Elastomere ist möglich. Für manche Formteile wird jedoch ein Grat benötigt, um die thermische Ausdehnung des Materials auszugleichen [8, 13-19].

Ein weiteres Thema ist die Formverschmutzung. Es handelt sich dabei um Mischungsbestandteile, die sich auf dem Werkzeug ablagern. Je nach verarbeiteter Mischung treten diese Ablagerungen unterschiedlich stark auf und können im Extremfall dazu führen, dass die Form nach jeder Produktionsschicht gereinigt werden muss [8, 13-19].

Die aus Thermoplasten hergestellten Formteile sind in der Regel dünnwandig, um Material zu sparen und Schwindung und Verzug gering zu halten. Die Zykluszeit beträgt bei Thermoplasten nur einige Sekunden. Verschmutzung gibt es im Thermoplastbereich zwar auch, jedoch tritt sie hier nicht gravierend auf [8, 13-19].

2.2 Kautschukverarbeitungsmöglichkeiten

In diesem Abschnitt werden die Hauptverarbeitungsmöglichkeiten von Kautschuken behandelt.

Abhängig von der Komplexität des Formteils, dessen Anforderungen und Losgrößen wird eines der folgenden Verfahren gewählt [8, 13-19].

Die Hauptverarbeitungsmöglichkeiten umfassen

- das Pressen (CM = Compression Moulding),
- das Transferpressen (TM = Transfer Moulding) und
- das Spritzgießen (IM = Injection Moulding) von Elastomeren [8, 13-19].

Diese Prozesse ermöglichen die Herstellung von dreidimensionalen Formteilen. Die Prozesse sind diskontinuierlich und die Bauteile werden in einem Werkzeug mit negativer Teilekontur hergestellt [8, 13-19].

Beispiele für Elastomerformteile sind Lagerelemente für Kfz-Motoren, Dichtungs- und Dämpfungselemente, Formschläuche, Vollgummiräder, Faltenbälge und Schuhsohlen [8, 13-19].

Im Folgenden wird nur auf das Spritzgießen genauer eingegangen, da dieser Prozess für die Arbeit und die darin beschriebenen Experimente und Ergebnisse relevant ist.

2.3 Spritzgießen

Nach dem Pressen und Transferpressen ist das Spritzgießen das jüngste und wichtigste Verfahren zur Herstellung von Formartikeln aus Gummi. Der Spritzgießzyklus besteht aus den Phasen Plastifizieren, Erwärmen, Einspritzen, Vulkanisieren und Entformen und wiederholt sich automatisch [8, 13-19].

Das Einspritzen und das Zuhalten können sowohl getrennt eingestellt als auch optimiert werden, weshalb sich für das Spritzgießen viele verschiedene Anwendungsmöglichkeiten ergeben. Aufgrund der hohen Werkzeugkosten rentiert sich die Anwendung des Spritzgießverfahrens erst bei mittelgroßen bis großen Serien bzw. Stückzahlen [8, 13-19].

2.3.1 Schneckenspritzaggregat

Das Spritzgießverfahren mit dem klassischen Schneckenprinzip ist in Abbildung 1 illustriert [8, 13-19].

Der Spritzgießzyklus beginnt mit dem Plastifizieren. Dabei wird das Rohmaterial, das sich bereits bei Raumtemperatur im erweichten Zustand (Materialtemperatur deutlich oberhalb der Glasübergangstemperatur) befindet, in Form von Streifen in den Zylinder eingezogen und gegen einen einstellbaren Staudruck in den vor der Schnecke sich vergrößernden Stauraum befördert. Die Wärmeleitung von den beheizten Zylinderwänden als auch die aufgrund von Reibung erzeugte Dissipation erwärmen und plastifizieren das Material. Die plastifizierte Mischung wird anschließend in das geschlossene Werkzeug eingespritzt und das Formteil darin ausgeheizt [8, 13-19].

Beim Einspritzen wird durch Umsetzung von Druckenergie in Wärme die Mischungstemperatur weiter erhöht. Beim Spritzgießverfahren stehen Hydraulikeinheiten zur Verfügung, wodurch höhere Massedrucke von bis zu 3000 bar ermöglicht werden. Während ein Formteil vulkanisiert, kann bereits die Mischung für den nächsten Zyklus plastifiziert werden [8, 13-19].

Je höher die Masstemperatur ist, desto kürzer ist die Vulkanisationszeit und damit die gesamte Zykluszeit. Es ist jedoch von Vorteil, wenn der Dosiervorgang erst unmittelbar vor dem nächsten Einspritzvorgang beendet ist, da dadurch die höhere thermische Belastung in Hinblick auf die Vernetzung möglichst kurz gehalten werden kann [8, 13-19].

Das Werkzeug wird nach der Vulkanisation geöffnet und das Formteil entweder per Hand oder mechanisch durch Auswerfer entnommen [8, 13-19].

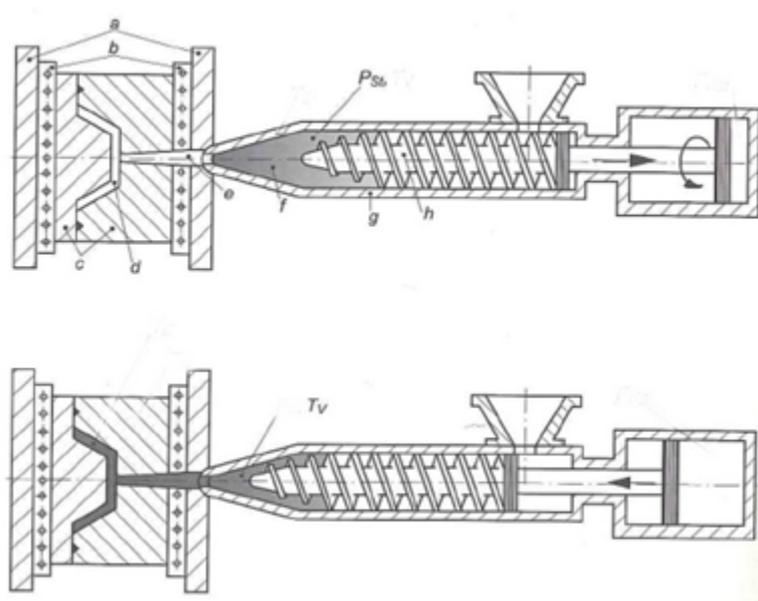


Abbildung 1: Prinzip des Spritzgießverfahrens mit einer klassischen Spritzeinheit: a Werkzeugträgerplatten; b Heizplatten; c Werkzeugplatten; d Formnest; e Angusskanal; f Schussvolumen; g Zylinder; h Schnecke, p_{st} Staudruck, T_v Vorlagetemperatur [8, 13-19]

2.3.2 Schneckenkolbenaggregate

Neben der oben beschriebenen klassischen Schneckenspritzeinheit kommt beim Kautschukspritzgießen auch die Schneckenkolbenspritzeinheit mit Schneckenvorplastifizierung und Einspritzen mittels separaten Kolbens zum Einsatz. Diese besteht aus einem traditionellen Extruder und einem Spritzzylinder, der durch einen Einspritzkolben abgeschlossen ist (Abbildung 2). Dieses Spritzaggregat wird auch als First-In-Last-Out (FILO) -Aggregat bezeichnet [8, 13-19].

Die Mischung wird im Extruder plastifiziert und dann in den Spritzzylinder gefördert. Mithilfe des Kolbens wird die plastifizierte Mischung in die Kavität eingespritzt [8, 13-19].

Die Vorteile dieser Spritzeinheit sind, dass höhere Drücke realisiert werden können und dass der Extruder und der Einspritzkolben entkoppelt sind. Der Nachteil ist die Anwendung des FILO-Prinzips. Dieses besagt, dass jenes Material, welches zuerst plastifiziert wird, zuletzt ausgespritzt wird. Diese Mischung hat eine deutlich niedrigere Temperatur als die zuletzt plastifizierte (längere Verweildauer im Extruder). Beim Einspritzen gelangt die zuletzt dosierte, „wärmere“ Mischung an die heiße Formnestwand, während die zuerst dosierte, „kühlere“ Masse in der Formteilmittle verbleibt. Dadurch werden vorhandene Temperaturinhomogenitäten nochmals verstärkt [8, 13-19].

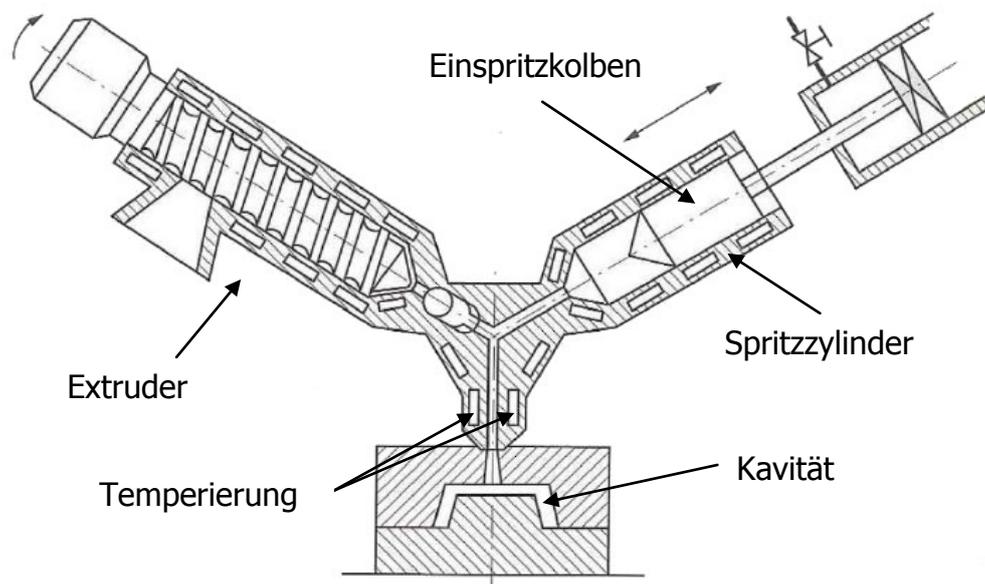


Abbildung 2: Spritzgießverfahren mit Schneckenvorplastifizierung [8, 13-19]

2.3.3 FIFO-Aggregate

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Schneckenkolben-Spritzeinheiten mit Speicher, so genannte First-In-First-Out (FIFO)- Aggregate. Ein vertikal ausgerichtetes FIFO-Aggregat ist in Abbildung 3 gezeigt. Hier ist die Schnecke in den Plastifizierzylinder integriert und übernimmt die Funktion des Einspritzkolbens. Der Einspritzkolben schließt die Einspritzkammer, auch „Pot“ genannt, in Richtung Einzug hin ab. Die Mischung wird vom Plastifizierzylinder in die Einspritzkammer gefördert. Bei konstantem Staudruck wird während des Dosierens der Kautschukmischung der Plastifizierzylinder je nach Bauweise (vertikal / horizontal) mithilfe hydraulischer Motoren nach oben / hinten geschoben. Beim Einspritzen spritzt der als Kolben wirkende Plastifizierzylinder die Masse durch eine Düse in die dahinter liegende

Kavität, wobei ein Zurückfließen des Materials in den Plastifizierzylinder mittels Rückstromsperre verhindert wird [8, 13-19].

Dieses Prinzip bietet den Vorteil, dass das zuerst plastifizierte „kalte“ Material auch zuerst eingespritzt wird. Das „kalte“ Material trifft dabei auf die „heiße“ Werkzeugwand, während das zuletzt plastifizierte „warme“ Material in die Mitte des Formteils gelangt. Dies bewirkt eine „homogenere“ Temperaturverteilung im Formteil. Ein weiterer Vorteil ist, dass beim Einspritzen wenig Material im Pot verbleibt, welches anvulkanisieren könnte. Eventuelle Materialreste können bei einem Materialwechsel durch Zurückfahren der Spritzeinheit zugänglich gemacht werden. Der Nachteil dieser Spritzeinheit ist, dass aufgrund von Wärmeleitungsvorgängen zwischen Plastifizierzylinder und Einspritzkammer nur sehr schwer unterschiedliche Temperaturen an diesen eingestellt werden können [8, 13-19].

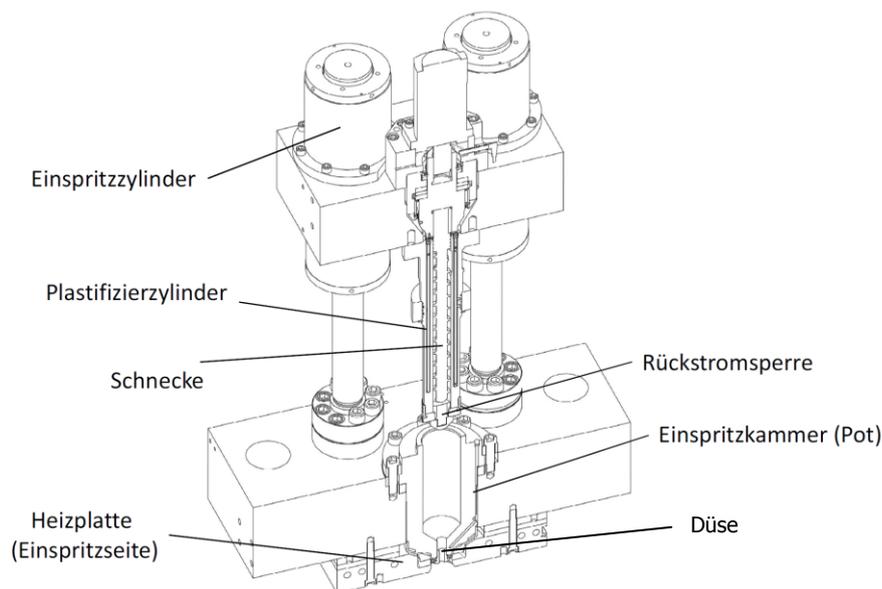


Abbildung 3: FIFO-Aggregat, Plastifizierzylinder in oberster Position, Bauart Firma Maplan, Ternitz [6]

2.4 Vorlagetemperatur

Die Vorlagetemperatur ist die Temperatur der plastifizierten Mischung im Stauraum unmittelbar vor dem Einspritzen. Neben Wärmeleitung und –dissipation hängt die Vorlagetemperatur beim Spritzgießen auch von den Totzeiten zwischen Plastifizieren und Einspritzen sowie von der relativen Dauer des Plastifizierens und dem Schussvolumen ab [8, 13-19].

Es wird eine möglichst „hohe“ Vorlagentemperatur angestrebt, da dadurch die Zeit bis zum Erreichen der für die Vernetzungsreaktion notwendigen Temperatur verringert wird. Ist die Vorlagentemperatur jedoch zu „hoch“, besteht die Gefahr, dass die Mischung im Schneckenorraum anvulkanisiert, wodurch in weiterer Folge auch die Formteilqualität negativ beeinflusst wird. Deshalb gilt: je kürzer die Verweilzeit, desto höher ist die zulässige Vorlagentemperatur. Die Vorlagentemperatur sinkt aber auch mit steigender Verweilzeit im Stauraum. Abbildung 4 zeigt dies anhand der radialen Temperaturverteilung für verschiedene Totzeiten Dt zwischen dem Plastifizieren und dem Einspritzen [8, 13-19].

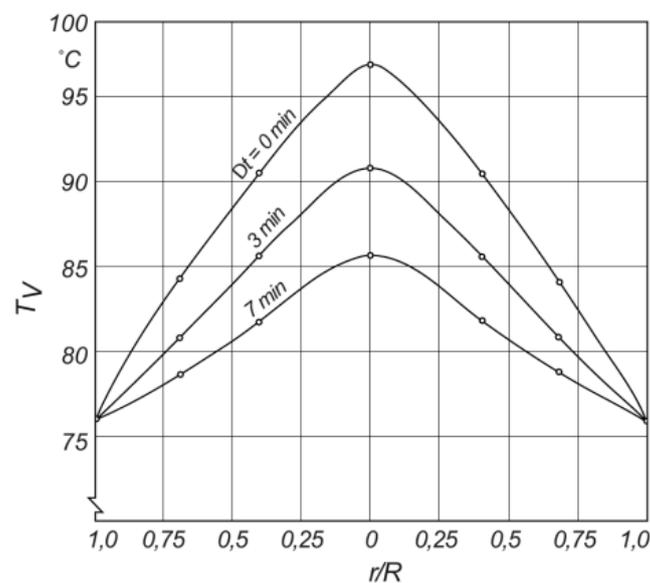


Abbildung 4: Radiale Temperaturverteilung im Plastifizierzylinder einer Schnecken-spritzgießmaschine; Totzeit zwischen Plastifizieren und Einspritzen als Parameter [8, 13-19]

Die aufgetragenen Temperaturen wurden im Stauraum einer Schnecken-spritzgießmaschine mit 58 mm Schneckendurchmesser bei der Verarbeitung einer Nitrilkautschukmischung mittlerer Viskosität gemessen. Es wird festgestellt, dass die Temperatur in der Mitte ein Maximum aufweist und nach beiden Seiten auf Wandtemperatur abfällt. Der Grund für das Maximum ist, dass sich erst ein Gleichgewicht zwischen der Reibungswärme und der Wärme, die axial durch den Schnecken-schaft abgeführt wird, einstellen muss. Bis zum Erreichen des Gleichgewichts steigt die Vorlagentemperatur an. Steht das Material im Schnecken-orraum, wird durch Reibung keine Wärme mehr eingebracht, Wärme jedoch durch Wärmeleitung weiterhin abgeführt. Die mittlere Vorlagentemperatur sinkt also mit zunehmender Totzeit. In der Praxis ist die verfügbare Zeit meist gering,

wodurch der Einspritzvorgang meist unmittelbar auf den Plastifiziervorgang folgt. Dadurch verbleiben Temperaturunterschiede im Profil [8, 13-19].

Sowohl klassische Schneckeneinheiten als auch Kolbenaggregate mit Schneckenvorplastifizierung weisen radiale und axiale Temperaturprofile auf. In Abbildung 5 wird erkannt, dass die Vorlagentemperatur mit höheren Drehzahlen steigt und dabei Unterschiede von über 20 K auftreten können. Andererseits nehmen radiale und axiale Temperaturunterschiede (Abbildung 6) mit abnehmender Drehzahl ab [8, 13-19].

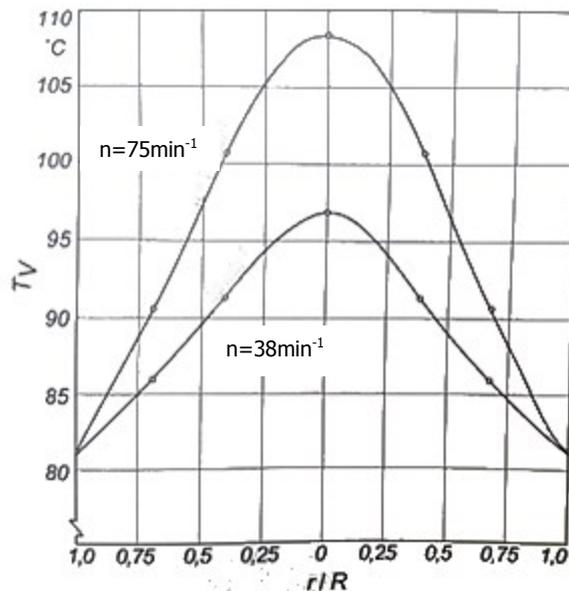


Abbildung 5: Radiale Temperaturverteilung im Plastifizierzylinder einer Schneckenspritzgießmaschine, Parameter Schneckendrehzahl n [8, 13-19]

Beim Einspritzen werden die axialen und radialen Temperaturunterschiede zwar an- aber nicht ganz ausgeglichen [8, 13-19].

Ebenfalls einen Einfluss auf die Vorlagentemperatur hat das Schussvolumen. Wird nicht das gesamte aufdosierte Material für einen Schuss verwendet, erhöht sich die Standzeit der Mischung im Schneckenorraum bzw. in der Einspritzkammer. Dadurch nimmt die Vorlagentemperatur, unter der Voraussetzung, dass die Temperierung der Einspritzkammer gleich hoch ist wie die Plastifizierzylindertemperatur, ab. Wird der Pot höher temperiert, kann ein Temperatenausgleich auf höherem Temperaturniveau geschaffen werden [8, 13-19].

Der Staudruck sollte in dem der Extrusionstechnik entnommenen Wertebereich von bis zu 300 bar (auch 500 bar) liegen. Ist der Staudruck zu niedrig, kann eine stabile,

luftblasenfreie Förderung im Schneckenkanal nicht gewährleistet werden. Wird der Staudruck zu hoch eingestellt, kann es zu Temperaturspitzen und Anvulkanisationen in der Mischung kommen [8, 13-19].

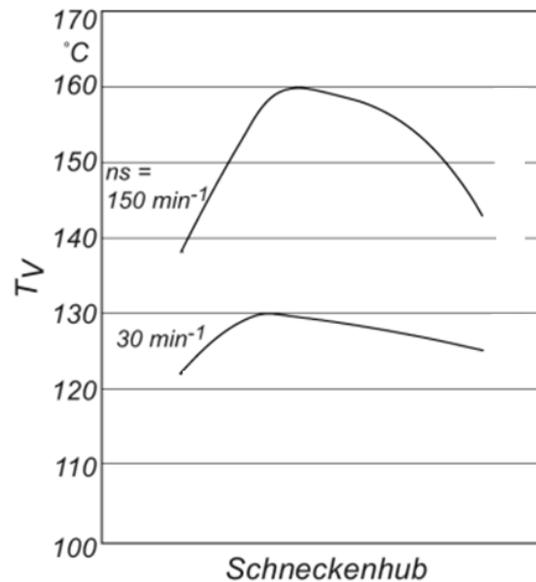


Abbildung 6: Axiale Temperaturverteilung im Plastifizierzylinder einer Schnecken-spritzgießmaschine, 32 mm Durchmesser, hochviskose Mischung mit 70 Shore Härte A auf Basis Chloropren-Kautschuk, Parameter Schneckendrehzahl (ns) [8, 13-19]

2.5 Betrachtung der Umlaufströmung

Die hier beschriebene Betrachtung der Umlaufströmung bezieht sich auf Erkenntnisse im Thermoplastbereich. Diese werden für diese Arbeit als Grundlage herangezogen, da für Elastomere keine vergleichbaren Quellen vorliegen mit Ausnahme jener Quellen, welche auf den im Zuge des „RubPart“ PCCL-Projektes ermittelten Daten basieren [22, 23, 24].

2.5.1 Umlaufströmung und Kanalströmung allgemein

Die Schneckendrehung bewirkt eine Relativbewegung zwischen Schnecke und Zylinder. Dabei entstehen Schubkräfte, die die Förderung der Schmelze im Schneckenkanal bewirken. Die entstehende Strömung im Schneckenkanal setzt sich aus einer Längsströmung und einer Umlaufströmung zusammen. Die Längsströmung wiederum ergibt sich aus der Schleppströmung und der Druckströmung. Die Druckströmung wirkt der Schleppströmung entgegen und bildet sich aus, da die Düse als Drosselement fungiert. Die Strömung hat also nicht nur eine Komponente in Richtung des Schneckenkanals, sondern auch einen Anteil quer zur Kanalrichtung. Aufgrund dessen vollführt die Schmelze im Schneckenkanal eine wendelförmige Bewegung, dargestellt in Abbildung 7 [1].

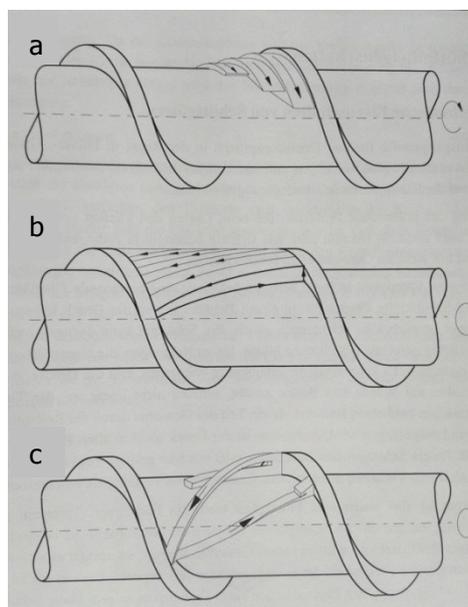


Abbildung 7: Strömung der Schmelze in der Meteringzone einer Schnecke. a Längsströmung; b Umlaufströmung; c resultierende Wendelströmung [1]

Die Geschwindigkeit der Strömung quer zur Kanalrichtung leistet keinen Beitrag zum Ausstoß des Extruders, ist aber aus folgenden Gründen ein wichtiger Parameter [2].

- Die Umlaufströmung verbraucht einen Teil der Inbetriebsleistung, welcher in Form von Wärme dissipiert wird. Falls die Wärme nicht abgeleitet wird, erhöht sich die Schmelztemperatur. Durch die Temperaturerhöhung sinkt auch die Viskosität. Trotzdem kann es zu thermischer Schädigung und Abbau des Materials kommen.
- In Einschneckenextrudern ist primär die zirkulierende Umlaufströmung verantwortlich für das Mischen und Homogenisieren der Schmelze von Thermoplasten.
- Die Umlaufströmung verursacht eine zusätzliche Scherung des Materials, wodurch die Viskosität sinkt. Dadurch verändern sich die Strömung in Kanalrichtung und der Extruderausstoß [2].

2.5.2 Schmelzewirbel- und Umlaufströmungsuntersuchungen

Fischer [4] hat experimentelle Untersuchungen zum Ort, an dem der (thermoplastische) Kunststoff zum ersten Mal aufzuschmelzen beginnt bzw. wo sich im Schneckenkanal ein Schmelzewirbel ausbildet, gemacht.

Die Untersuchungen wurden an einem Versuchsextruder der Firma Rosendahl Maschinenbau, Pischelsdorf, mit einem Schneckendurchmesser von 45 mm durchgeführt. Die untersuchten Materialien waren verschiedene HDPE-Typen der damaligen Firma PCD Polymere, heute Borealis Polyolefine GmbH. Die Materialien wurden aufgrund ihrer guten Abschälbarkeit von der Schnecke ausgewählt [4, 20, 21].

Um den Ort der Schmelzewirbelbildung unter betriebsnahen Bedingungen bestimmen zu können, wird die Schnecke gegen einen vom Drosselspalt abhängigen Druck aufdosiert. Um unterschiedliche Schneckenspitzendrücke erzeugen zu können, wurde die Spalthöhe bei einem stufenlos verstellbaren Drosselwerkzeug verändert [4, 20, 21].

Die komplett gefüllte Schnecke wird nach Abkühlen des Zylinders und der Schnecke unter die Schmelztemperatur aus dem Versuchsextruder herausgedrückt. Durch das Abkühlen werden die Strömungsvorgänge „eingefroren“. Das Material, welches sich im Schneckenkanal befindet, wird an verschiedenen Stellen senkrecht zu den Stegen geschnitten. Die Schnittflächen werden untersucht, wobei Farbschlieren darauf schließen lassen, ob das Material zu schmelzen begonnen hat [4, 20, 21].

Die Ergebnisse zeigen, dass die Ausbildung des Schmelzewirbels durch zwei Faktoren bestimmt wird. Ein Faktor ist die Wärmeleitung von der beheizten Zylinderwand in den Feststoff, der andere Faktor ist die Reibung des Feststoffs am Zylinder (Anmerkung: Bei Kautschuken liegt bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur eine viskoelastische Formmasse und kein Feststoff vor). Bei niedriger Drehzahl (20 min^{-1} und 40 min^{-1}) ist maßgeblich die Wärmeleitung von der Zylinderwand mit einer Temperatur über der Schmelztemperatur für die Bildung des Schmelzewirbels verantwortlich. Diese wird dabei durch die Verweilzeit in den beheizten Zonen bestimmt. Bei hohen Drehzahlen (60 min^{-1} bis 120 min^{-1}) beeinflusst die Reibung des Feststoffs an der Zylinderwand den Ort der Schmelzewirbelbildung. Die Feststoffreibung ist der Größe $p \cdot v_r$ proportional. p steht hierbei für den mittleren Druck des Feststoffs, während v_r die Relativgeschwindigkeit zwischen Feststoff und Zylinderwand bezeichnet. Die zur Schmelzewirbelausbildung benötigte Länge L_{SW} ist proportional dem Kehrwert aus dem Produkt $p \cdot v_r$ ($L_{SW} \sim 1/(p \cdot v_r)$), siehe Abbildung 8. Je geringer die Drehzahl ist, desto größer ist die Länge L_{SW} [4, 20, 21].

Aus den Ergebnissen wurde schlussgefolgert, dass die Korrelation mit dem Schneckenstanzdruck die Schmelzewirbelbildung nicht in geeignetem Maß darstellt, weil die Druckprofile entlang der Schnecke abhängig von der Drehzahl verschieden ausgebildet werden [4, 20, 21].

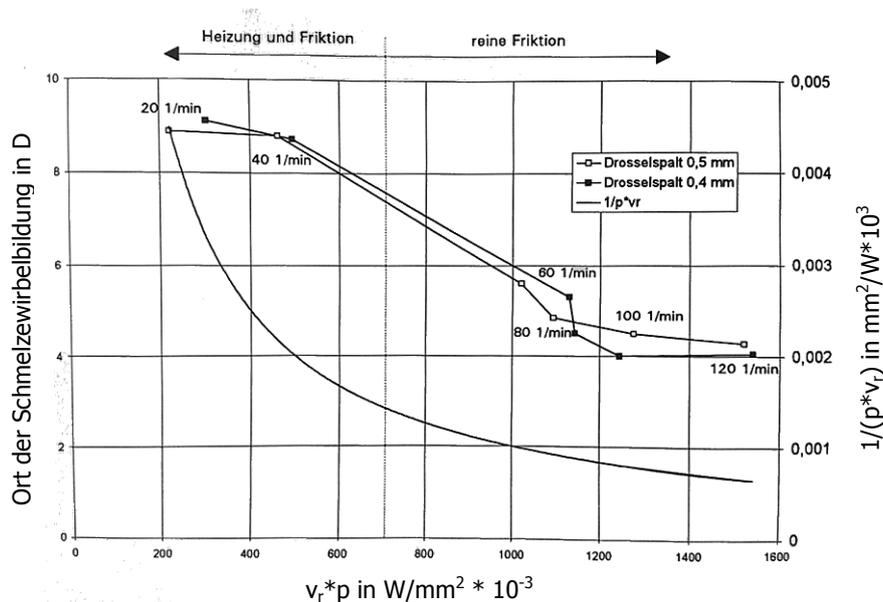


Abbildung 8: Rechte y-Achse: Länge L_{SW} (proportional zu dem Kehrwert von $v_r \cdot p$) in Abhängigkeit von dem Produkt $v_r \cdot p$ an einer Dreizonenschnecke mit HDPE [4, 20, 21]

2.6 Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)

Die experimentelle Versuchsplanung (Design of Experiments – DoE) beschreibt die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsvariablen in einem System mit dem Ziel, dieses System zu verbessern. Ein Experiment ist definiert als ein Test oder eine Serie von Versuchsdurchläufen. Im Laufe dieser Experimente werden die Eingangsvariablen verändert. Mithilfe der Ergebnisse kann ein Modell entwickelt werden, welches für die Verbesserung des Prozesses und des Systems und für andere Entscheidungsfindungen verwendet werden kann [7, 25].

In einem Experiment soll ermittelt werden:

1. Welche Variablen den größten Einfluss auf die Antwort y haben.
2. Wie die einflussreichen Parameter x_i (kontrollierbare Prozessvariablen x_1, x_2, \dots, x_p) eingestellt werden müssen, damit y fast jedes Mal den gewünschten Sollwert annimmt.
3. Wie die einflussreichen Parameter x_i eingestellt werden müssen, damit die Streuung von y klein ist.
4. Wie die einflussreichen Parameter x_i eingestellt werden müssen, damit die Effekte der unkontrollierbaren Variablen z_1, z_2, \dots, z_q minimiert werden [7, 25].

Eingangsvariablen, auch Faktoren genannt, können z.B. Prozessparameter oder Material sein. Diese Faktoren werden über einen bestimmten Wertebereich zwischen verschiedenen Leveln variiert [7, 25].

Eine bessere Herangehensweise beim Umgang mit mehreren Faktoren ist das „factorial experiment“. Dabei werden Faktoren gemeinsam variiert, anstatt nur einzeln. Eine Art des „factorial experiment“ ist das 2^k faktorielle Design. 2 steht hier für die Anzahl der Level, zwischen welchen variiert wird und k für die Anzahl der untersuchten Faktoren. In einem 2^3 faktoriellen Design besitzen drei Faktoren zwei verschiedene Level. Dabei bezeichnet $x = -1$ die niedrige LevelEinstellung und $x = +1$ die hohe LevelEinstellung. Das experimentelle Design kann geometrisch als Würfel dargestellt werden, worin alle möglichen Kombinationen von Leveln und Faktoren vertreten sind. Abbildung 9 zeigt einen solchen Kubus für ein 2^3 faktorielles Design [7, 25].

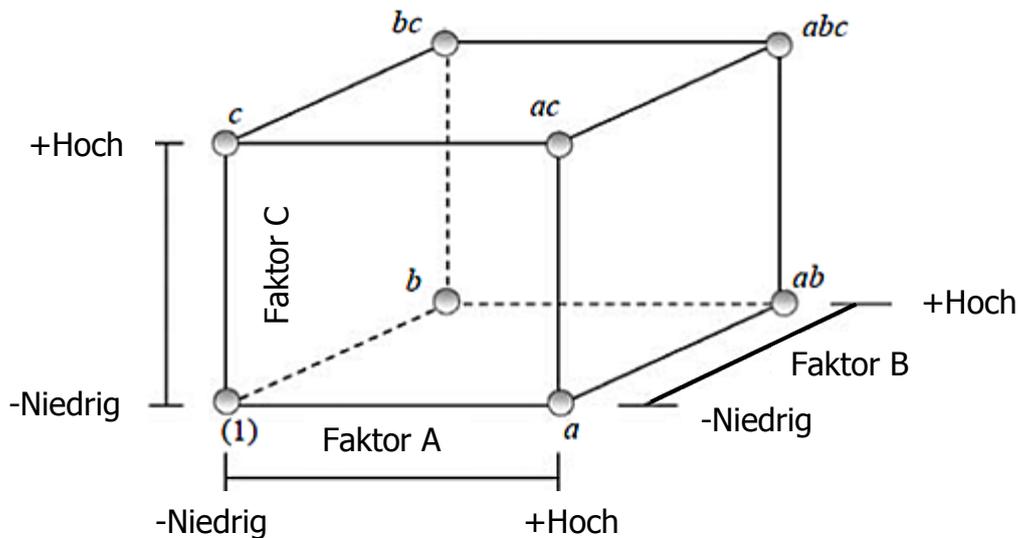


Abbildung 9: Würfeldarstellung eines 2^3 faktoriellen Designs. Die Bezeichnungen der Eckpunkte geben Auskunft über die eingestellten Level der jeweiligen Faktoren [7, 25]

(1) bedeutet, dass alle Faktoren auf den niedrigen Level eingestellt sind. Bei den Eckpunkten a, b und c sind jeweils die Faktoren A, B oder C auf den hohen Level gesetzt, während die beiden anderen Faktoren auf den niedrigen Level eingestellt sind. ab, ac und bc zeigen an, dass zwei Faktoren auf den hohen Level eingestellt sind, während sich der dritte auf dem niedrigen Level befindet. abc bedeutet, dass alle Faktoren auf den hohen Level gesetzt sind. Mit dieser Art des experimentellen Designs können die individuellen Effekte aller Faktoren sowie die Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren erfasst werden [7, 25].

Bei der Durchführung einer experimentellen Versuchsplanung gibt es drei Grundprinzipien.

1. Randomisierung bedeutet, dass die Reihenfolge der individuellen Durchläufe zufällig festgelegt wird. Dadurch können die Effekte von irrelevanten Faktoren ausgemittelt werden.
2. Unter Replikation wird eine unabhängige Wiederholung eines Durchlaufs für jede Faktorenkombination verstanden. Dies erlaubt dem Experimentator den experimentellen Fehler abzuschätzen. Dieser Fehler wird anschließend verwendet, um zu bestimmen, ob die auftretenden Ergebnisse sich statistisch voneinander unterscheiden. Ohne Überprüfung mittels Replikation kann ein Unterschied in den Beobachtungen lediglich aufgrund eines experimentellen Fehlers entstehen.

3. Die Blockbildung ist das dritte Prinzip der experimentellen Versuchsplanung. Ein Block ist eine Zusammenstellung von relativ homogenen Experimentbedingungen. Das bedeutet, dass ein Level eines Faktors gewählt wird. Alle Experimente, bei denen sich dieser Faktor auf diesem Level befindet, werden hintereinander durchgeführt. Danach werden alle Experimente bei dem nächsten Level dieses Faktors durchgeführt und so weiter. Die Blockbildung wird benutzt um systematische Fehler auszumitteln [7, 25].

Der Mittelwert oder die Standardabweichung (oder beide) des gemessenen Merkmals werden sehr oft als Antwortvariablen gewählt. Antwortvariablen sollen nützliche Informationen über den untersuchten Prozess liefern. Es ist wichtig zu entscheiden, wie jede Antwort gemessen, wie das Messsystem kalibriert und wie diese Kalibrierung während des Experiments beibehalten werden kann [7, 25].

Sobald die Designfaktoren festgelegt sind, müssen die Wertebereiche, in denen variiert wird, sowie die genauen Level bestimmt werden [7, 25].

Um die aus den Ergebnissen gewonnenen Ergebnisse zu beschreiben, wird ein empirisches (Effekt-) Modell verwendet. Dieses Modell stellt aber eine quantitative Beziehung (Gleichung) zwischen der Antwort und den wichtigen Designfaktoren sowie deren Wechselwirkungen dar. Ein Modell ersten Grades inklusive Wechselwirkungsterm wird in Gleichung (1) gezeigt [7, 25].

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_{12} * x_1 * x_2 + \varepsilon \quad (1)$$

In der obigen Gleichung ist y die Antwort, x_i sind die Designfaktoren, β_i die unbekannt Parameter, die mit den Daten aus dem Experiment geschätzt werden, und ε ist der zufällige Fehlerterm, der den experimentellen Fehler im System berücksichtigt. $x_1 * x_2$ repräsentiert die Wechselwirkung zwischen zwei Designfaktoren. Wechselwirkungen höherer Ordnung für mehr als zwei Faktoren können in die Experimente inkludiert werden, wenn notwendig [7, 25].

Sind die Werte für y und x_i aus den Daten bekannt, können die β_i berechnet werden. Daraufhin können mit diesen Werten jegliche y für einen bestimmten Satz von x_i berechnet werden [7, 25].

Bei Verwendung eines Faktorendesign mit zwei Leveln wird angenommen, dass die Effekte der Faktoren linear sind. Um die Linearität des Modells zu überprüfen, werden sogenannte Zentralpunkte zu dem 2^k Design hinzugefügt. Diese Methode erlaubt außerdem eine unabhängige Schätzung des Fehlers. Zentralpunkte bestehen

aus wiederholten Durchläufen bei den Punkten $x_i = 0$ (Designzentrum). Dennoch beeinträchtigen sie die gewöhnlichen Effektschätzungen nicht [7, 25].

3 Versuchsaufbau und –durchführung

Sämtliche Versuche, deren Ergebnisse in direktem Zusammenhang mit dem Ziel der Erstellung von statistischen Modellen zusammenhängen, werden am Schneckenprüfstand durchgeführt. Der Schneckenprüfstand wurde von der Firma Maplan GmbH, Ternitz, in Kooperation mit der Firma Erwin Mach Gummitechnik, Hirm, konstruiert und zur Verfügung gestellt. Eine Besonderheit des Prüfstandes, dessen Aufbau und Funktionsweise im diesem Kapitel behandelt werden, ist die Möglichkeit, die sich im Plastifizierzylinder befindliche Schnecke aus diesem vertikal nach oben zu entnehmen.

Die folgenden Kapitel behandeln den Aufbau des Schneckenprüfstandes mit allen zugehörigen Peripheriegeräten sowie Modifikationen im Versuchsaufbau. Im Sinne der Versuchsdurchführung werden anschließend die verwendeten Versuchspläne präsentiert sowie die Motivation für deren Aufbau und Abarbeitung gezeigt.

3.1 Aufbau des Schneckenprüfstands

Der Schneckenprüfstand (Abbildung 10) kann allgemein als Nachbau der Spritzeinheit einer FIFO-Maplan MTF750/160edition Kautschukspritzgussmaschine der Firma Maplan GmbH, Ternitz betrachtet werden. Der Prüfstand wurde insofern auf diese Weise konstruiert, als dass dadurch die Umlegung der Ergebnisse und der Modelle auf die eigentliche Spritzgießmaschine und den damit verbundenen Prozess ermöglicht wird.

Gleich der Spritzeinheit besitzt der Schneckenprüfstand einen vertikal ausgerichteten Plastifizierzylinder mit einer Schnecke im Inneren. Am oberen Ende des Zylinders befindet sich der Einzug, über welchen strangförmiges Material mithilfe der Schnecke in den Plastifizierzylinder eingezogen wird. Die Schnecke wird mit einem hydraulischen Motor bedient. Der Plastifizierzylinder ist oberhalb mit einem Metallblock verbunden, welcher in der Mitte eine trichterförmige Öffnung aufweist und im Gestell des Schneckenprüfstandes verankert ist. Über diese Öffnung kann die Schnecke direkt von oben in den Plastifizierzylinder eingeführt werden. Die Schnecke selbst ist mit dem Motorblock verbunden. Im Dosierzustand liegt der Motorblock auf dem Plastifizierzylinderblock auf und ist durch Schrauben mit diesem verbunden, um dem im Plastifizierzylinder entstehenden Druck beim Dosieren standzuhalten. Soll die Schnecke vertikal nach oben aus dem Plastifizierzylinder entfernt werden, können die

Schrauben entfernt und der Motorblock und damit die Schnecke über Hydraulikzylinder nach oben gedrückt werden.

Die in der Maschinenbezeichnung angegebenen Nummern stehen einerseits für 750 ccm Volumen, welches bei der Spritzgießmaschine maximal in den Pot, die Einspritzkammer, dosiert werden kann. Andererseits stehen die 160 kN für die Schließkraft, die auf das Werkzeug aufgebracht werden kann. Der Schneckenprüfstand besitzt aber weder eine Einspritzkammer noch ein Werkzeug. Stattdessen befindet sich am unteren Ende des Plastifizierzylinders ein Gewinde, auf welches ein Drosselflansch aufgeschraubt werden kann. Dieser ist ein Metallzylinder, in dessen Inneren der Plastifizierzylinderkanal weitergeführt und anschließend verjüngt wird.

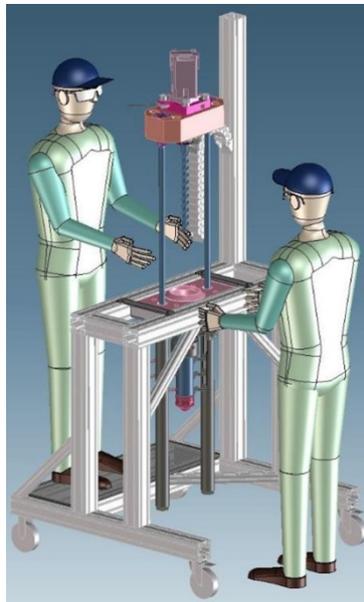


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Schneckenprüfstands im Zustand mit gezogener Schnecke [6]

In dem noch nicht verjüngten Bereich kann ein Messsteg eingebaut werden. Der Messsteg wird im Zuge der Experimente dazu verwendet, das radiale und axiale Temperaturprofil im Inneren des Plastifizierzylinders zu messen. Es ist wichtig, die tatsächlichen Massetemperaturen zu kennen, da diese unter Umständen stark von den eingestellten Zylindertemperaturen abweichen [9]. An fünf symmetrisch über den Messsteg und damit über den Innendurchmesser des Plastifizierzylinders verteilten Positionen sind Thermoleitungen eingebaut, mit denen die Temperatur gemessen werden kann. Die Positionen sind in der Mitte, und zweimal jeweils um einen gewissen Abstand nach außen versetzt symmetrisch um die Stegmitte auf dem Messsteg angeordnet und in Abbildung 11 dargestellt. Mithilfe dieser fünf über den

3. Versuchsaufbau und –durchführung

Durchmesser verteilten Messstellen kann das radiale Temperaturprofil aufgezeichnet werden, während das axiale Temperaturprofil für die einzelnen Thermoleitungen über die Dosierzeit gemessen wird.

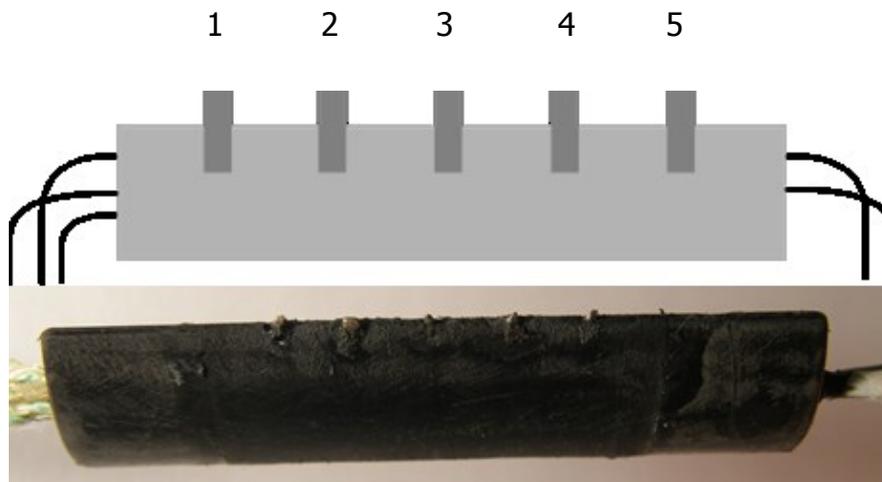


Abbildung 11: Messsteg mit fünf Messstellen symmetrisch um die Stegmitte angeordnet; Darstellung oben: schematisch, unten: real

Auf Basis der in Kapitel Vorlagetemperatur, 2.4 [4], beschriebenen Erkenntnisse werden die radialen und das axiale Temperaturprofile unter Verwendung des Messstegs in folgenden Formen erwartet. Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen ein entsprechendes, schematisches radiales (Temperatur über alle Messpositionen) und ein axiales Temperaturprofil (Temperatur über Dosierzeit für eine Thermoleitung).

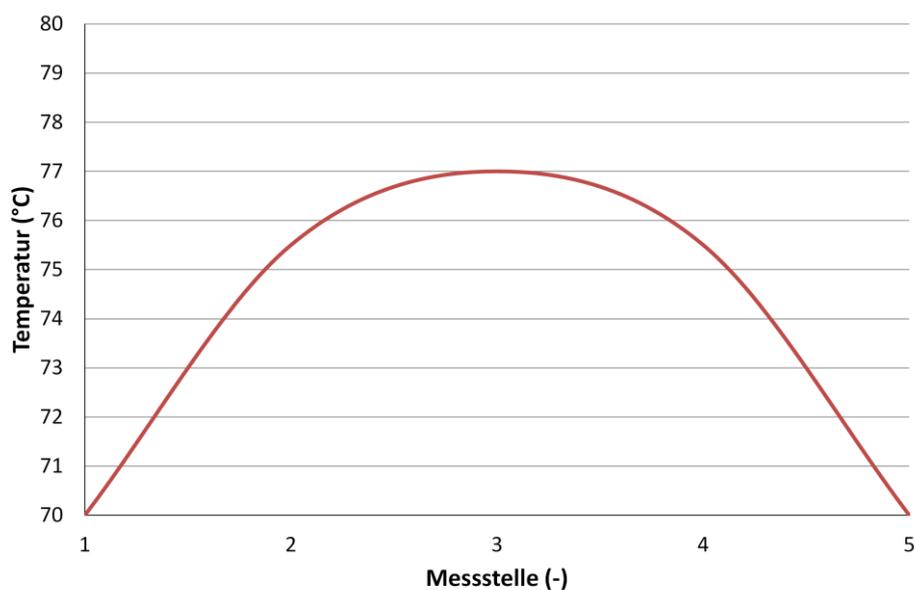


Abbildung 12: Erwartungsgemäße, schematische Darstellung des radialen Temperaturprofils

Das gezeigte radiale Temperaturprofil wird deshalb so erwartet, da die Wärmeübertragung von Kautschuk auf die metallische Zylinderwand größer ist als die Wärmeleitung im Inneren des Kautschuks, weshalb in der Mitte ein Maximum verbleibt. Das radiale Temperaturprofil bildet sich im Laufe des Dosiervorgangs aus. Dieses homogenisiert sich während und nach Ende des Dosierens allerdings. Das axiale Temperaturprofil entspricht der Vorstellung, dass die Temperatur im Zylinder während des Dosierens aufgrund der Schererwärmung linear zunimmt.

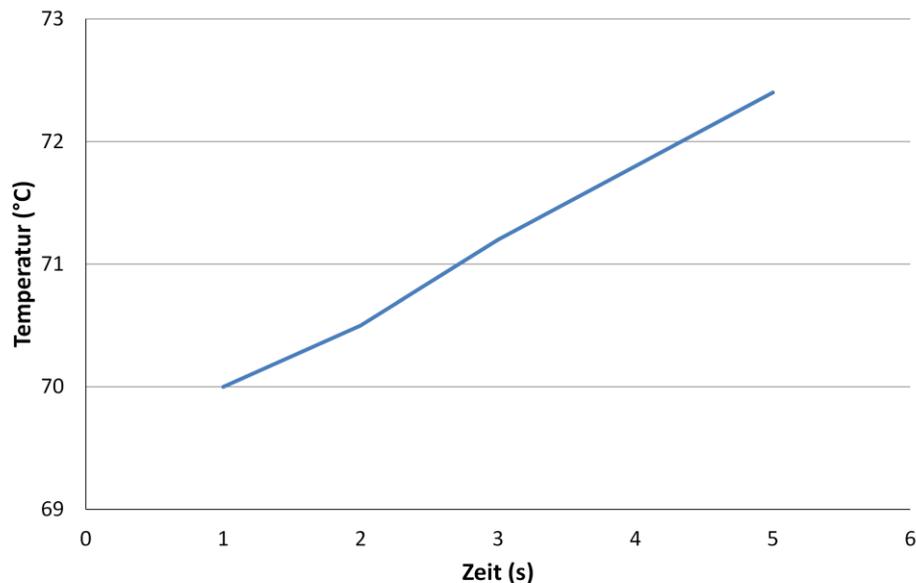


Abbildung 13: Erwartungsgemäße, schematische Darstellung des axialen Temperaturprofils

Im verjüngten Kanal kann mithilfe eines Bolzens, der seitlich von außen hineingeschraubt wird, der Kanalquerschnitt reduziert werden, wodurch ein der Dosierichtung entgegen wirkender Staudruck aufgebracht werden kann. Der Drosselflansch mit dem Staudruckbolzen ist in Abbildung 14 dargestellt.

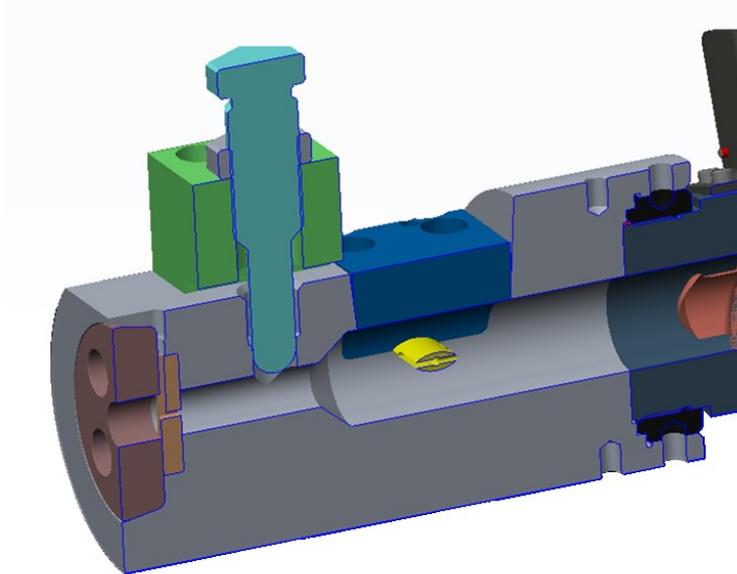


Abbildung 14: Drosselflansch (schematisch) mit Messsteg (gelb) und Staudruckbolzen (türkis) [6]

Der Aufbau des Schneckenprüfstandes, bei dem der Drosselflansch direkt an den Zylinder geschraubt ist, wird in dieser Arbeit dazu verwendet um Experimente mit einer Schnecke von L/D von ungefähr 11 durchzuführen. Diese Schnecke besitzt einen Außendurchmesser von 32 mm und eine Steigung von 30 mm. Diese Schnecke wird in weiterer Folge als M1 (-Schnecke) bezeichnet. Um die Ergebnisse der Versuche mit dieser Schnecke auswerten zu können, werden mathematische und statistische Methoden entwickelt und verwendet.

Zusätzliche Versuche werden mit einer kernprogressiven Schnecke ($L/D \sim 15$) durchgeführt. Diese besitzt ebenfalls einen Außendurchmesser von 32 mm und hat eine Steigung von 44 mm. Diese Schnecke wird als MK (-Schnecke) bezeichnet. Da MK länger ist als M1 muss eine Modifikation des Prüfstandes vorgenommen werden. Zwischen Zylinder und Drosselflansch wird eine Verlängerung mit gleichem Innendurchmesser eingebaut um den Längenunterschied auszugleichen. Abbildung 15 zeigt eine reale Darstellung des Schneckenprüfstandes mit Verlängerung.

Sowohl Zylinder als auch, im Modifikationsfall, die Verlängerung sind mithilfe eines Temperiergeräts öltemperiert. Der obere Bereich des Zylinders, in dem sich der Einzug befindet, wird ebenso wie der Drosselflansch nicht temperiert sondern nur mithilfe eines Heizbandes aufgewärmt. Diese Bereiche können also nur geheizt, jedoch nicht gekühlt werden.



Abbildung 15: Zylinder des Schneckenprüfstands mit Verlängerung für kernprogressive Schnecke

In Bezug auf die Aufnahme von Messsignalen und die Stabilität des Prozesses muss der Zylinder genauer betrachtet werden. Entlang des Zylinders sind an vier Positionen Bohrungen für Wärmestrom- als auch Drucksensoren eingebracht. Für die Wärmestromsensoren sind pro Position jeweils drei bzw. vier Bohrungen vorhanden, wobei jede eine unterschiedliche Tiefe hat. Dies dient dazu, die Temperatur an der Zylinderinnenwand durch Extrapolation zu ermitteln. Wärmeleitpaste wird in die Bohrungen gefüllt, um die Wärmeübertragung zu gewährleisten und die Wärmestromsensoren werden eingesetzt.

Die Bohrungen für die Drucksensoren werden genau gegenüber jenen für die Wärmestromsensoren an der Zylinderaußenwand eingebracht. Die Positionen für die Sensoren sind in Abbildung 16 dargestellt, links für die Drucksensoren, rechts für die Wärmestromsensoren. Abbildung 17 zeigt eine vergrößerte Darstellung der in radialer Richtung versetzten Wärmestromsensoren. Die bei Untersuchungen zur kernprogressiven Schnecke verwendete Verlängerung enthält zwei weitere Positionen für Wärmestrom- und Drucksensoren, um Signale über die gesamte Länge der Schnecke aufnehmen zu können.

Als Wärmestromsensoren werden Typ K Sensoren (K = NiCr-Ni) [3] der Firma Jumo Mess- und Regelgeräte GmbH verwendet, während die Drucksensoren mit einem Messbereich von 0 bar bis 1000 bar von der Firma Dynisco Europe GmbH sind. Die Drucksensoren werden mithilfe einer Druckwaage kalibriert. Die gemessenen Kalibrierkurven sind im Anhang beigefügt (siehe Anhang 9.1).

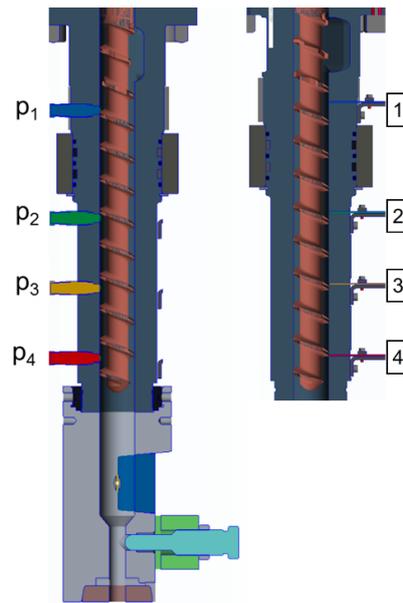


Abbildung 16: Positionen der Druck- (links) und Wärmestromsensoren (rechts) am Zylinder des Schneckenprüfstands [6]

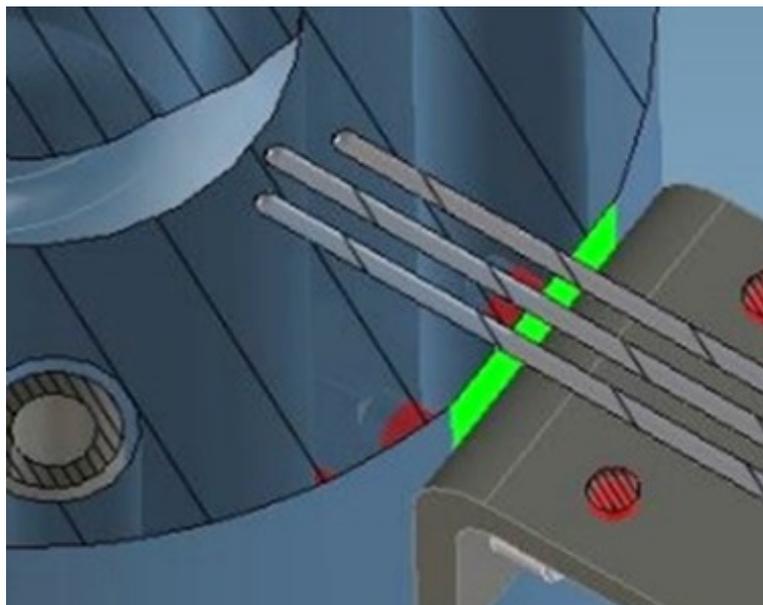


Abbildung 17: Wärmestromsensoren mit unterschiedlichen Tiefen zur Extrapolation der Zylinderwandtemperatur [6]

3.2 Design of Experiments – Versuchspläne

Die Versuche werden gemäß verschiedenen Versuchsplänen abgearbeitet, wie im Folgenden erläutert wird. Die Versuchspläne basieren alle auf Design of Experiments (DoE) (siehe 2.6).

Die ersten Versuche werden mit der M1-Schnecke durchgeführt. Es werden das Temperaturprofil (axial) und die Umlaufströmung jeweils mit einem Versuchsplan untersucht.

Zuerst werden Experimente zum axialen Temperaturprofil durchgeführt. Der dabei verwendete Versuchsplan ist ein vollfaktorieller, voll randomisierter Versuchsplan mit vier Faktoren mit jeweils zwei Stufen bzw. Levels, also ein 2^4 Versuchsplan. Es ergeben sich dadurch 16 mögliche Einstellungen, wobei auch noch eine Zentralpunkt-Messung (CP) durchgeführt wird. Durch das Randomisieren werden diese 17 Versuchseinstellungen in beliebiger Reihenfolge angeordnet und gemäß dieser sich ergebenden Reihenfolge durchgeführt. Für jede Versuchseinstellung werden drei Wiederholmessungen durchgeführt.

Als Faktoren werden die Einzugstemperatur, die Plastifizierzylindertemperatur, die Drehzahl und der Staudruck gewählt, da bei diesen Parametern ein Einfluss auf die Massetemperatur angenommen wird. Die gewählten Einstellungsniveaus für die einzelnen Faktoren orientieren sich an der Praxis und werden dahingehend in Rücksprache mit den beteiligten Unternehmen festgelegt. Die Einzugstemperatur und die Zylindertemperatur werden infolgedessen zwischen 60 °C und 80 °C, die Drehzahl zwischen 70 min^{-1} und 90 min^{-1} und der Staudruck zwischen 20 bar und 50 bar variiert. Der Versuchsplan mit den 17 Versuchseinstellungen ist in Tabelle 2 dargestellt.

Nach Auswertung der Ergebnisse für das Temperaturprofil (siehe 5.2) zeigt sich, dass die Höhe der Einzugstemperatur im Rahmen des Versuchsplans keinen signifikanten Einfluss auf die resultierenden axialen Temperaturprofile hat. Dieser Sachverhalt ist in Form einer Auftragung des axialen Temperaturprofils über die Dosierzeit in Abbildung 18 für eine Plastifizierzylindertemperatur von 60 °C (80_60_90_50 vs. 60_60_90_50), sowie in Abbildung 19 für 80 °C (80_80_90_50 vs. 60_80_90_50) dargestellt. Die Verläufe repräsentieren nur die Messposition 3, da der Einfluss bei den anderen Messpositionen auch nicht signifikant ist. Der Einfluss der Einzugstemperatur wird deshalb als nicht signifikant angenommen, weil die Abweichung der Kurvenverläufe bei einer bestimmten Zylindertemperatur und unterschiedlichen Einzugstemperaturen kleiner als ± 1 °K beträgt.

3. Versuchsaufbau und –durchführung

Bei der Bezeichnung der Messdaten und deren Auswertung sowie bei der Diagrammdarstellung wird eine Nomenklatur gemäß folgenden Musters verwendet. Als Beispiel ist hier die Einstellung mit der Standardreihenfolge 14 und der Durchlaufreihenfolge 1, abgekürzt 14_1 vorgestellt: 80_60_90_50. Die jeweiligen Zahlen stehen in den jeweiligen Einheiten für Einzugstemperatur_Plastifizierzylindertemperatur_Drehzahl_Staudruck.

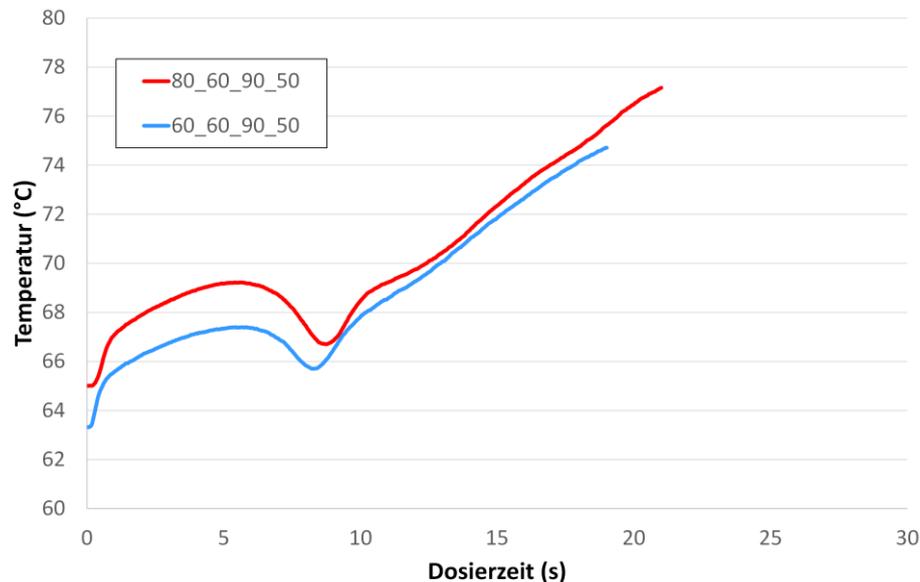


Abbildung 18: (Nicht signifikanter) Einfluss der Einzugstemperatur auf das axiale Temperaturprofil bei 60 °C Plastifizierzylindertemperatur, 80_60_90_50, 60_60_90_50, Messposition 3

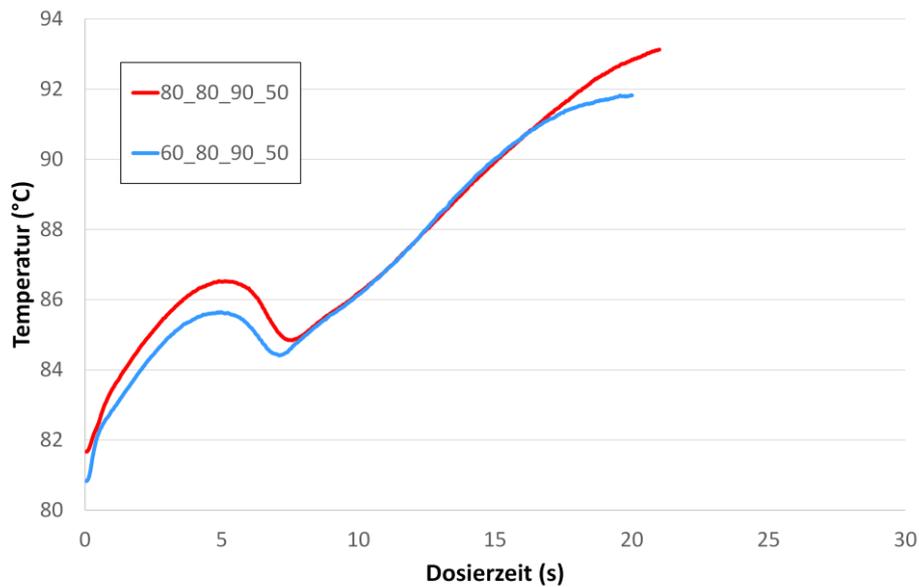


Abbildung 19: (Nicht signifikanter) Einfluss der Einzugstemperatur auf das axiale Temperaturprofil bei 80 °C Plastifizierzylindertemperatur, 80_80_90_50, 60_80_90_50, Messposition 3

Deshalb wird die Einzugstemperatur als Faktor verworfen, wodurch der Versuchsplan für weitere Untersuchungen auf einen 2^3 Versuchsplan inklusive Zentralpunkt-Messung reduziert werden kann. Es ergeben sich also neun Einstellungen. Die Einzugstemperatur wird hier immer auf denselben Wert wie die Plastifizierzylindertemperatur gesetzt. Dieser reduzierte Versuchsplan, dargestellt in Tabelle 3, wird für die Ermittlung der Umlaufströmung für M1 herangezogen.

Tabelle 2: Vollfaktorieller Versuchsplan mit Zentralpunkt für die Untersuchung der Temperaturprofile bei der M1-Schnecke

Standard- reihenfolge	Durchlauf- reihenfolge	Einzugs- Temp. °C	Plast.- Zyl.Temp. °C	Drehzahl min⁻¹	Staudruck bar
14	1	80	60	90	50
13	2	60	60	90	50
15	3	60	80	90	50
9	4	60	60	70	50
10	5	80	60	70	50
1	6	60	60	70	20
17	7	70	70	80	35
11	8	60	80	70	50
12	9	80	80	70	50
8	10	80	80	90	20
5	11	60	60	90	20
2	12	80	60	70	20
4	13	80	80	70	20
7	14	60	80	90	20
6	15	80	60	90	20
16	16	80	80	90	50
3	17	60	80	70	20

Tabelle 3: Reduzierter Versuchsplan inklusive CP zur Untersuchung der Umlaufströmung bei M1

Standard-reihenfolge	Durchlauf-reihenfolge	Plast.- Zyl.Temp. °C	Drehzahl min⁻¹	Staudruck bar
13	2	60	90	50
9	4	60	70	50
1	6	60	70	20
17	7	70	80	35
12	9	80	70	50
5	11	60	90	20
4	13	80	70	20
7	14	80	90	20
16	16	80	90	50

Durch einen Vergleich von Abbildung 18 und Abbildung 19 wird festgestellt, dass die Plastifizierzylindertemperatur einen signifikanten Einfluss auf das axiale Temperaturprofil hat. Um den Einfluss der Drehzahl und des Staudrucks ebenfalls zu untersuchen, wird für die Untersuchung des Temperaturprofils bei der MK-Schnecke der Versuchsplan erneut reduziert und bei konstanter Einzugstemperatur von 60 °C und Zylindertemperatur von 80 °C durchgeführt.

Der reduzierte Versuchsplan für MK ist in Tabelle 4 gezeigt. Für die Untersuchung der Umlaufströmung bei der MK-Schnecke werden aufgrund der zur Verfügung stehenden begrenzten Zeit und der Unvollständigkeit des für die konstante Schnecke gefundenen Umlaufströmungsmodells nur einzelne Einstellungen untersucht und mit denen der M1-Schnecke verglichen.

Tabelle 4: Reduzierter Versuchsplan inklusive CP zur Ermittlung der Temperaturprofile bei der kernprogressiven Schnecke, Einzugs- und Plastifizierzylindertemperatur konstant bei jeweils 60 °C und 80 °C

Standardreihenfolge	Durchlaufreihenfolge	Drehzahl min⁻¹	Staudruck bar
15	3	90	50
17	7	80	35
11	8	70	50
7	14	90	20
3	17	70	20

3.3 Versuchsvorbereitungen und -durchführung

Bevor die eigentlichen Versuche gemäß den Versuchsplänen durchgeführt werden können, müssen gewisse Vorbereitungen getroffen werden. Dieser Abschnitt erläutert diese Vorbereitungen genauer und ist folgendermaßen gegliedert und gilt, wenn nicht anders beschrieben, für beide Schneckenkonfigurationen gleichermaßen:

- Charakterisierung des verwendeten Materials mittels RPA
- Gewährleistung der Stationarität der Messungen
- Bestimmung des Staudrucks
- Ermittlung der Dosierzeiten für die einzelnen Einstellungen

3.3.1 Materialcharakterisierung

Alle Ergebnisse werden, wenn nicht anders angegeben, aus Versuchen mit einem Material generiert. Dieses Material wird von Semperit Technische Produkte GmbH zur Verfügung gestellt und ist ein EPDM-Kautschuk, was für Ethylen-Propylen-Dien Kautschuk steht. Dabei handelt es sich um eine Extrusionstyp mit hellen Füllstoffen. Die chemische Zusammensetzung von EPDM ist in Abbildung 20 visualisiert.

Aussagen über Viskosität werden mithilfe eines RPA-Geräts (Rubber Process Analyzer, auch zur Untersuchung von Vernetzungsvorgängen verwendet) der Firma MonTech Werkstoffprüfmaschinen GmbH (Typ D-RPA 3000) gemacht.

Während mit dem RPA-Messgerät Viskosität im Bereich niedriger Schergeschwindigkeiten gemessen werden, misst das HKR Viskositäten im hohen Schergeschwindigkeitsbereich.

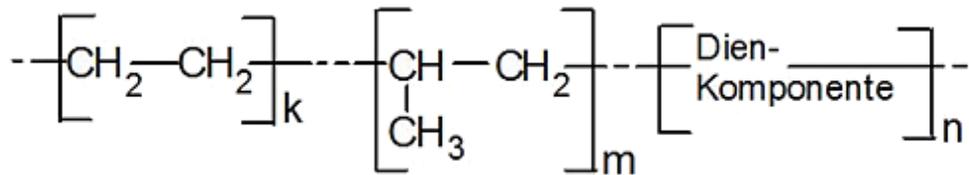


Abbildung 20: Chemische Formel von Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) [10]

Das Material ist ein Coextrudat aus einem blauen und einem roten Streifen im Verhältnis 50 % zu 50 % desselben EPDM. Es wird untersucht, ob Streifen rein blauen Materials dieselbe Viskosität haben wie das Coextrudat. Dabei werden am RPA Proben des coextrudierten Streifens und des rein blauen Streifens (stellvertretend für rein rot, da sich die Streifen nur durch den Farbstoff unterscheiden) bei verschiedenen Temperaturen und einer Vorscherungseinstellung (5 Hz und 3°) untersucht. Während der Untersuchung befindet sich die Probe bei einer bestimmten Temperatur zwischen zwei Platten. Eine dieser Platten ist statisch, während die andere sich mit einer bestimmten Auslenkung in Grad (°) bewegt. Die Frequenz der Auslenkung wird schrittweise erhöht und das Drehmoment gemessen, welches notwendig ist, die Platte bei der jeweiligen Frequenz im Material zu bewegen. Je höher das Drehmoment ist, desto höher ist die Viskosität. Aus den Viskositätswerten bei verschiedenen Frequenzen kann die Viskositätskurve über die Frequenz erstellt werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 dargestellt.

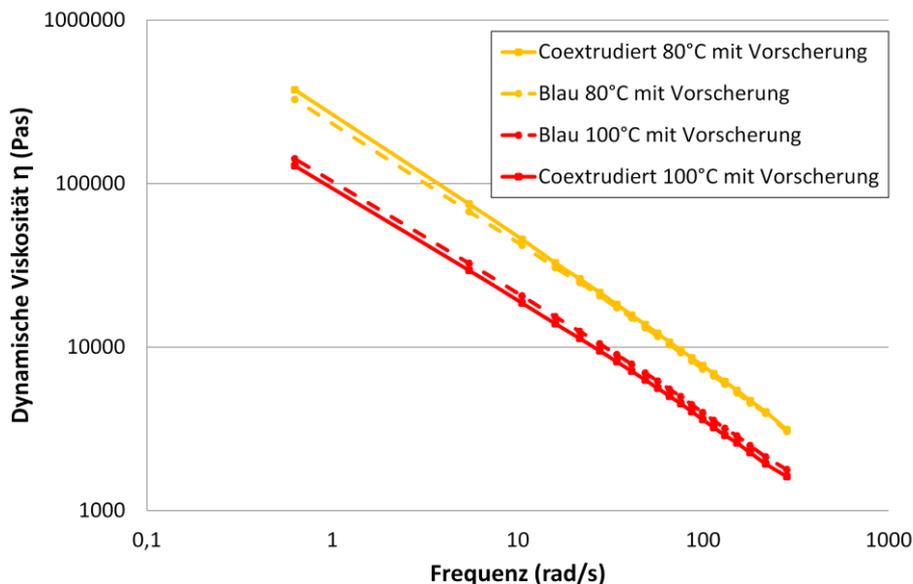


Abbildung 21: Viskositätsvergleich der coextrudierten Mischung (rot-blau) mit der rein blauen Mischung

Diese Messungen am RPA zeigen, dass die Viskositätskurven der coextrudierten Mischung und der rein blauen Mischung mit Vorscherung sowohl bei 80 °C als auch bei 100 °C eine Abweichung, welche innerhalb der Messgenauigkeit (ca. +/- 5 %) liegt, aufweisen. Diese Untersuchung des Coextrudats ist ausreichend (siehe Abbildung 21).

Die Bestimmung der Dichte (notwendig für die Ermittlung der Dosierzeit, siehe 3.3.3) erfolgt mithilfe der Verdrängungsmethode. Zur Bestimmung der Dichte wird eine Waage der Fa. Mettler-Toledo GmbH verwendet. Dabei werden aus einem Streifen EPDM stochastisch Proben entnommen. Das Gewicht dieser Proben wird an der Luft gemessen (A), die Waage tariert und die Proben werden entfernt und auf derselben Waage unter Wasser und damit der Auftrieb (P) gemessen. Der Quotient der beiden Gewichtswerte wird mit der Dichte des Wassers multipliziert, um die Dichte des Materials zu erhalten. Unter Verwendung von Gleichung (2) ergibt sich eine Dichte für EPDM von 1,519 g/cm³.

$$\rho = A/P * \rho_w \quad (2)$$

Die genaue Berechnung sowie die gemessenen Gewichtswerte der Proben sind im Anhang beigefügt (siehe Anhang 9.2).

3.3.2 Bestimmung des Staudrucks

Eine Vorbereitung, die vorgenommen werden muss, ist die Bestimmung des Staudrucks. Dies ist notwendig, da bei Verwendung des Schneckenprüfstandes mit Drosselflansch zwar ein Druck an der Schneckenspitze (bzw. gemessen am Drucksensor p4/p5, siehe 3.3.4) entsteht, aber von vornherein nicht klar ist, wieviel davon dem Staudruck entspricht bzw. welcher Staudruck gerade herrscht.

Da die Information über den Staudruck prozessbestimmend ist und der Staudruck ein gewählter Parameter ist, der im Zuge des Versuchsplans als Faktor gleich der Praxis variiert wird, muss der Staudruck bestimmt werden. Dies ist mithilfe einer Rückstromsperre möglich. Diese befindet sich in der FIFO-Spritzgießmaschine am Ende des Plastifizierzylinders und sorgt beim Einspritzen dafür, dass kein Material zurück in den Plastifizierzylinder gedrückt wird. Während des Dosierens ist die Rückstromsperre offen und Material kann in den Pot dosiert werden.

Am Schneckenprüfstand wird anstatt des Drosselflansches eine Rückstromsperre am Ende des Plastifizierzylinders montiert, die jener der Spritzgießmaschine gleicht. Die austretende Mischung ist hier durch die Geometrie der Rückstromsperre bedingt und

tritt als dreigeteilter Streifen aus. Beim Dosieren am Schneckenprüfstand mit Rückstromsperre wird angenommen, dass in einen Pot mit Umgebungsdruck dosiert wird, weshalb dies einem Dosieren gegen 0 bar Staudrucks gleicht. Für die jeweiligen Einstellungen des Versuchsplans wird der sich am Drucksensor p4 ergebende Druck mit Hilfe der Rückstromsperre gemessen und mittels des Drosselflansches (inklusive Temperaturmesssteg) der Staudruck nachgestellt. Die Dauer des Dosierens wird dabei mit 20 s gewählt.

Die Bestimmung des Staudrucks ist in Abbildung 22 schematisch visualisiert. Zuerst wird jener Druck gemessen, der bei Verwendung der Rückstromsperre entsteht (roter Verlauf). Danach wird der entstehende Druck beim Drosselflansch gemessen (blauer Verlauf). Die Differenz zwischen den Niveaus der beiden Verläufe ist der tatsächliche Staudruck. Die Staudrücke werden entsprechend der jeweiligen Einstellung mithilfe des Staudruckbolzens im Drosselflansch auf 20 bar oder 50 bar erhöht und die Stellung des Bolzens für die späteren Versuche notiert. Die genauen Werte, die bei der Bestimmung des Staudrucks auftreten, sind im Anhang zu finden (siehe Anhang 9.3).

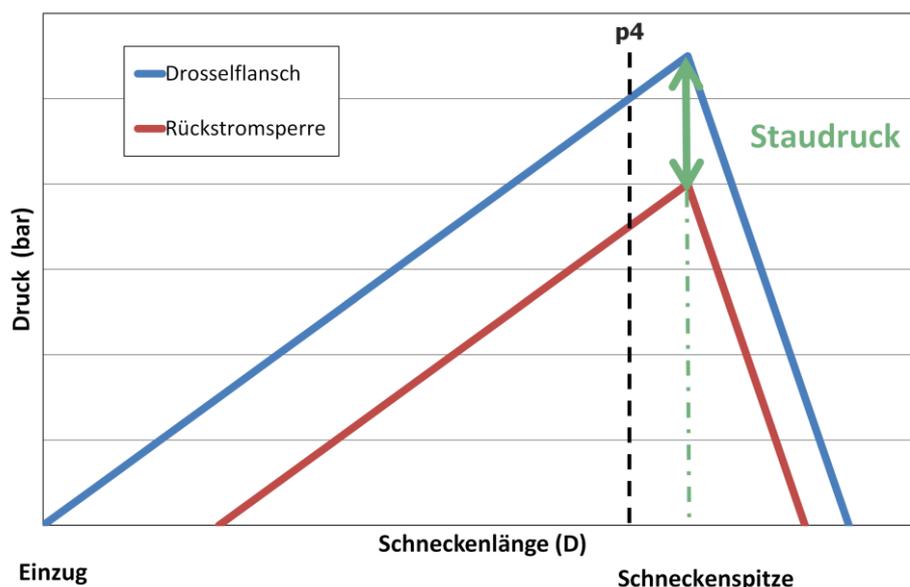


Abbildung 22: Staudruck als Differenz der Drücke von Drosselflansch und Rückstromsperre, schematisch

3.3.3 Ermittlung der Dosierzeiten

Mit der Ermittlung der Staudrücke ist es möglich, alle vier Parameter gemäß dem Versuchsplan an dem Schneckenprüfstand einzustellen. Ein weiterer notwendiger Schritt ist, bevor die eigentlichen Experimente durchgeführt werden können, die

Dosierzeit zu bestimmen. Bei der FIFO-Kautschukspritzgießmaschine wird der Plastifizierzylinder während des Dosierens der Mischung in den Pot stetig nach oben bewegt. Ein Wegmesser bestimmt dabei kontinuierlich die Position des Einspritzzylinders, wodurch direkt auf das Volumen in der Einspritzkammer umgerechnet werden kann. Der Schneckenprüfstand besitzt nur einen stationären Plastifizierzylinder, bei dem eine Wegmessung nicht möglich ist. Die Bestimmung des Volumens, welches aus dem Plastifizierzylinder dosiert wird, muss daher über die Zeit erfolgen. Vorgabe der Firmenpartner ist ein Volumen von 150 cm^3 für jeden Schuss. Die Bestimmung der Dosierzeit für jede Einstellung funktioniert wie folgt.

Nachdem der stationäre Zustand erreicht ist, wird bei der jeweiligen Einstellung dreimal in Folge für 10 s, dann für 20 s und danach für 30 s dosiert. Die dabei aus dem Drosselflansch austretenden Extrudate werden nach dem Dosieren jeweils direkt am Drosselflansch abgetrennt. Im Anschluss werden die Extrudate gewogen und mithilfe der Dichte von $1,519 \text{ g/cm}^3$ (siehe 3.3.1) die entsprechenden Volumina errechnet. Die Volumina werden dann in einem Diagramm über die Dosierzeiten aufgetragen. Die Datenpunkte werden durch eine lineare Trendlinie angenähert und die sich ergebende Geradengleichung genutzt, um die für das Dosieren von 150 cm^3 notwendige Dosierzeit zu berechnen (siehe Abbildung 23).

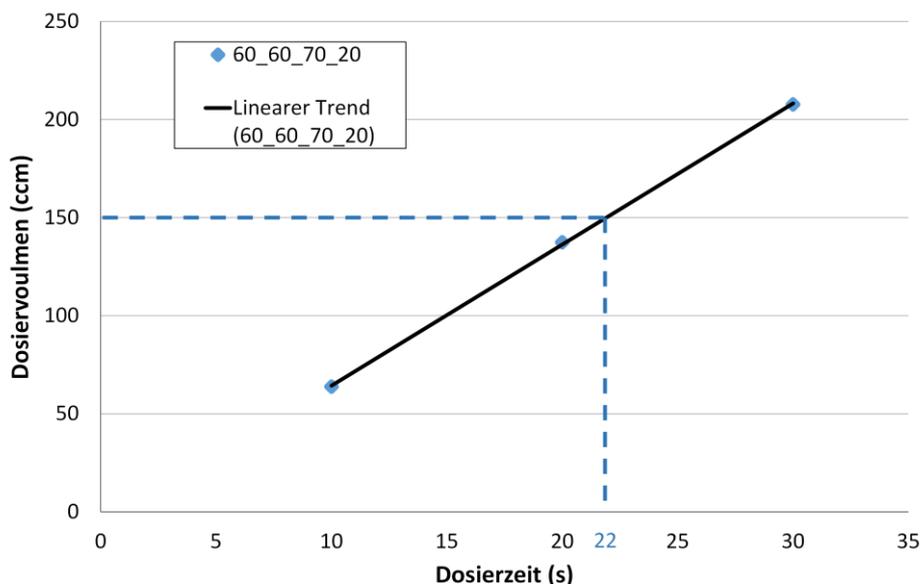


Abbildung 23: Bestimmung der Dosierzeit für die Umrechnung 60_60_70_20

Bei Betrachtung der ermittelten Dosierzeiten (Tabelle 5 für M1-Schnecke, Tabelle 6 für MK-Schnecke) können einige Abhängigkeiten der Dosierzeit von den gewählten Parametern festgestellt werden. Die ermittelte Dosierzeit wird immer auf einen ganzzahligen Wert aufgerundet.

Tabelle 5: Ermittelte Dosierzeiten für die unterschiedlichen Einstellungen; Schnecke M1 (L/D ~11)

Einzugs- temperatur (°C)	Plastifizierzylinder- temperatur (°C)	Drehzahl (min⁻¹)	Staudruck (bar)	Dosierzeit (s)
80	60	90	50	21
60	60	90	50	19
60	80	90	50	20
60	60	70	50	24
80	60	70	50	27
60	60	70	20	22
70	70	80	35	22
60	80	70	50	25
80	80	70	50	26
80	80	90	20	19
60	60	90	20	18
80	60	70	20	25
80	80	70	20	24
60	80	90	20	18
80	60	90	20	19
80	80	90	50	21
60	80	70	20	23

Tabelle 6: Ermittelte Dosierzeiten für die unterschiedlichen Einstellungen; Schnecke MK (L/D ~15)

Einzugs- temperatur (°C)	Plastifizierzylinder- Temperatur (°C)	Drehzahl (min⁻¹)	Staudruck (bar)	Dosierzeit (s)
60	80	90	50	22
60	80	80	35	23
60	80	70	50	27
60	80	90	20	20
60	80	70	20	25

Die Dosierzeit sinkt mit steigender Drehzahl, da in derselben Zeit mehr Material und damit Volumen gefördert werden kann. Einen positiven Effekt hat der Staudruck. Mit sinkendem Staudruck sinkt der Widerstand, gegen den dosiert werden muss, und die Dosierzeit sinkt. Der Einfluss der Einzugs- und Zylindertemperatur kann bei reiner Betrachtung der Messwerte aufgrund von Wechselwirkungen mit den anderen Parametern nicht festgestellt werden.

Hinzu kommt auch noch, dass während der Temperaturmessungen die Masse des austretenden Stranges zu Kontrollzwecken gewogen wird. Das daraus errechnete Volumen entspricht immer dem gewünschten Dosiervolumen (150 cm^3).

3.3.4 Messsignalerfassung und Stationarität des Prozesses

Die Messsignale für (Zylinder-) Temperaturen und Drücke werden mithilfe von Quantum-Messgeräten und der Software CatmanEasy der Firma HBM aufgezeichnet. Die Messsignalerfassung wird während der Messung live am Bildschirm dargestellt und mitverfolgt, um daraus Schlüsse für die zukünftigen Messungen zu ziehen (z.B. Staudruckeinstellung, siehe 3.3.2). Damit die gemessenen Werte und die sich daraus ergebenden Kurven für die jeweiligen Versuchseinstellungen später miteinander verglichen werden können und außerdem eine geringe Messunsicherheit und Streuung aufweisen, muss ein „quasi“-stationärer Prozess erreicht werden.

Dazu wird überprüft, ab welchem Zyklus sich die ergebenden Drücke und Temperaturen nicht mehr signifikant zu den vorherigen Messungen bzw. nur noch in einer gewissen Toleranz ändern. Der Zyklus ist mit einer Zeit von 480 s dem Zyklus eines Spritzgießprozesses zur Herstellung von Prüfplatten an der Elastomerspritzgussmaschine angeglichen. Der Zyklus für den Schneckenprüfstand besteht jedoch nur aus zwei Schritten bzw. Zeiten nämlich der Dosierzeit und einer Wartezeit. Die Dosierzeit variiert abhängig von der Einstellung (siehe 3.3.3) zwischen 18 s und 27 s und die Wartezeit ergibt sich als restliche Zeit zur Vollendung des Zyklus. Die Wartezeit beinhaltet dabei die Zeiten für alle im regulären Spritzgussprozess auftretenden Schritte wie Einspritzen, Nachdruck, Vulkanisation, Öffnen und Schließen des Werkzeugs, reinigen der Form, etc.

Bezüglich der Darstellung der Messdaten sei festgehalten, dass die Daten mit einer Frequenz von 50 Hz, also alle 0,02 s, aufgenommen werden. Dabei werden die Verläufe des Drucksensors p4 (Drucksensor p5 bei der MK-Schnecke aufgrund der Verlängerung) für die Stationarität des Drucks betrachtet, weil dieser am nächsten zur Schneckenspitze ist und der entstehende Druck dabei aufgrund der Verdichtung

zur Schneckenspitze hin aussagekräftiger als in der Nähe des Einzugs ist. Ebenso wird der mittlere der drei Wärmestromsensoren an dieser Position 4 (WS 4_Mitte) (Position 5 bei MK-Schnecke) für die Stationarität des Plastifizierzylinders betrachtet, da er am nächsten zur Plastifizierzylinderinnenwand und damit zur Schmelze liegt.

Es zeigt sich, dass die Messungen für die Drucksensoren ab dem zweiten bzw. dritten Zyklus (je nach Einstellung) stationär sind (Abbildung 24), während selbiges für die Zylindertemperaturen ab dem dritten bzw. vierten Zyklus gilt (Abbildung 25). Zur Sicherheit wird daher festgelegt, pro Versuchseinstellung fünf Zyklen zu fahren, um die Stationarität des Prozesses zu garantieren. Der fünfte Zyklus wird dann zum Vergleich der Temperaturprofile herangezogen.

Die Diagramme mit den Vergleichen der einzelnen Zyklen für die Einstellung 80_80_90_0 (M1) sind in Abbildung 24 und Abbildung 25 gezeigt.

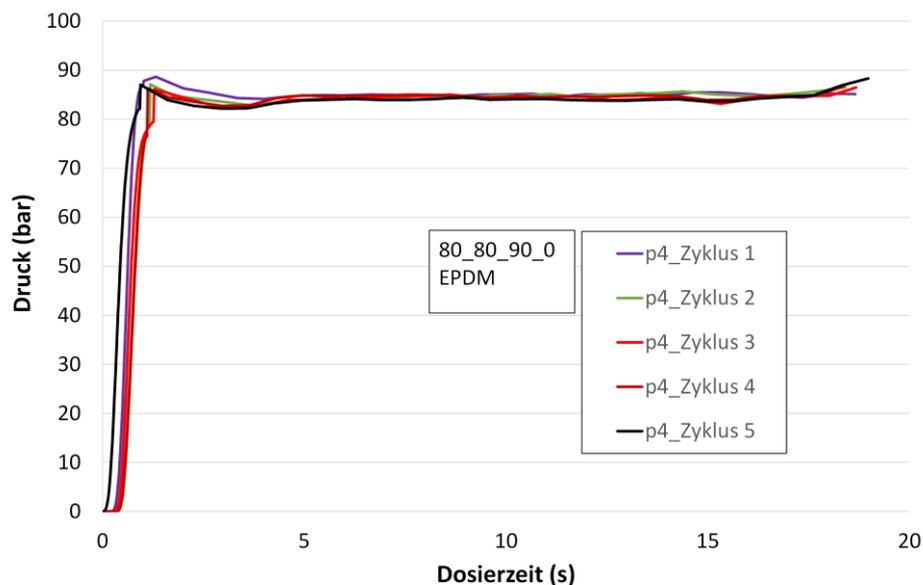


Abbildung 24: Stationaritätsbestimmung für Druck am Sensor p4

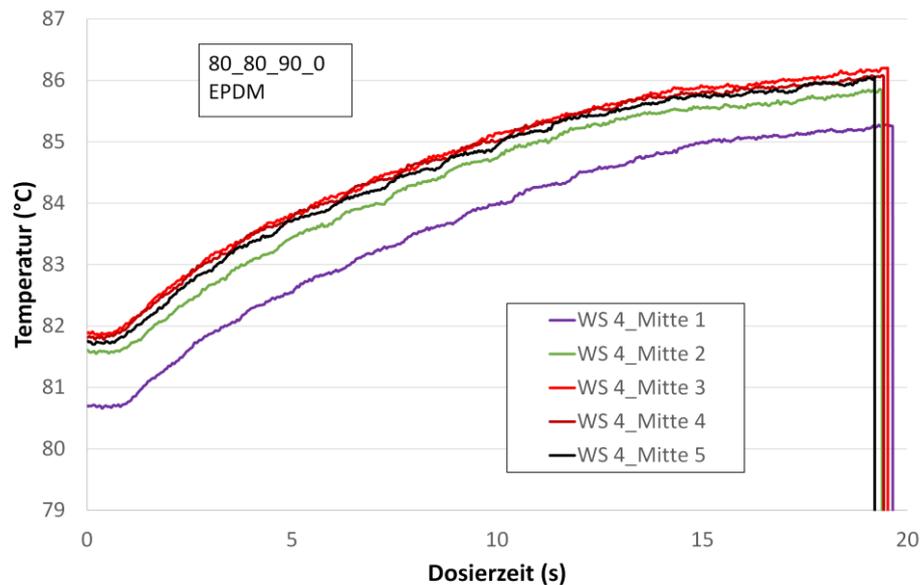


Abbildung 25: Stationaritätsbestimmung für Zylindertemperatur bei Position 4 an Messposition 2

Nachdem alle Vorbereitungen gemäß jeweiligem Versuchsplan abgeschlossen sind, können die entsprechenden Versuche, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, durchgeführt werden.

3.3.5 Versuchsdurchführung

Jeder Versuch mit der jeweiligen Einstellung der Versuchsparameter besteht aus drei Wiederholungsmessungen. Eine Wiederholungsmessung besteht aus fünf Zyklen, wobei nur der fünfte Zyklus für die Auswertung herangezogen wird.

Es werden drei Wiederholungsmessungen durchgeführt, um eine genauere statistische Auswertung zu ermöglichen sowie Störungen im Messprozess auszugleichen. Bei der Umlaufströmung werden einmalig für eine Einstellung drei Wiederholungsmessungen durchgeführt. Hier wird gezeigt, dass die Ergebnisse für die drei Messungen innerhalb einer festgelegten Toleranz liegen (siehe 4.2.4). Es wird angenommen, dass diese Tatsache für alle anderen Einstellungen ebenfalls zutrifft, weshalb für die Umlaufströmungsversuche jeweils nur eine Wiederholungsmessung durchgeführt wird. Dies dient dem Zweck der effizienten Nutzung der begrenzt zur Verfügung stehenden Zeit.

Eine Wiederholungsmessung besteht, wie zuvor erwähnt, aus fünf Zyklen.

Die Versuchsdurchführungen bezüglich der Untersuchung der Temperaturprofile und der Umlaufströmung unterscheiden sich kaum und können in fünf Schritte eingeteilt werden, siehe Abbildung 26.

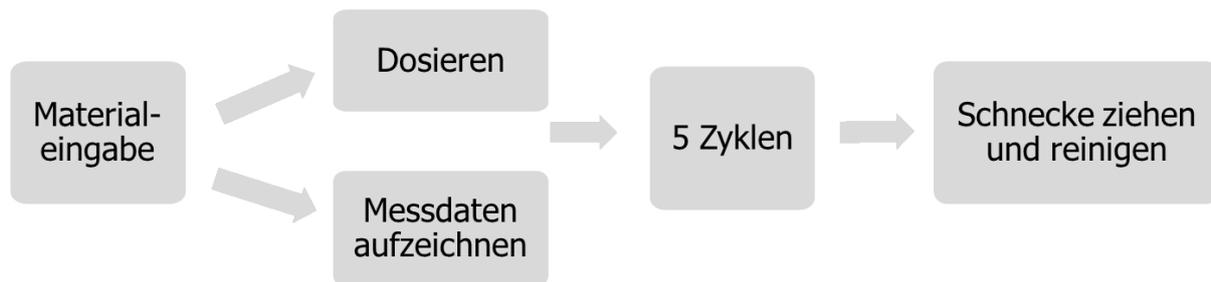


Abbildung 26: Fünf Schritte der Versuchsdurchführung

Zuerst wird das Material über den Einzug in den Plastifizierzylinder gefüttert. Da sich beim Füttern des Materials die Schnecke schon dreht und damit aufgrund von Scherung eine gewisse Erwärmung des Plastifizierzylinders einhergeht, wird danach 15 Minuten gewartet, um bei den Versuchen einheitliche Starttemperaturen zu garantieren.

Danach wird im Sinne der fünf Zyklen das Dosieren gestartet. Die elektrische Spannung, welche beim Starten des Dosierens an der Maschine auftritt, löst den Beginn der Datenerfassung aus. Ebenso wird die Messung mit Ende des Dosierens durch den Abfall der Spannung automatisch beendet. Während des Dosierens werden also die Messsignale für Druck und Temperatur an den verschiedenen Positionen entlang des Zylinders und am Messsteg im Zylinderinneren aufgenommen. Nach Ende des Dosierens beginnt die jeweilige Wartezeit bis zum Ende des Zyklus. Dies wird fünfmal durchgeführt, um die Stationarität zu gewährleisten (siehe 3.3.4).

Nachdem fünf Zyklen aufgezeichnet sind, wird die Schnecke aus dem Zylinder gezogen und gereinigt. Im Falle der Umlaufströmungsuntersuchungen kommt noch ein Schritt nach erfolgten fünf Zyklen hinzu. Dieser ist die Vulkanisation der Mischung im Zylinder bei 150 °C für eine Stunde. Die Dauer von einer Stunde wird aus der Erfahrung abgeleitet. Die Vulkanisation dient dazu, die Strömung, die sich während des Dosierens im Zuge der fünf Zyklen entlang der Schnecke ausgebildet hat, festzuhalten oder „einzufrieren“ um sie für spätere Untersuchungen zugänglich zu machen. Eine gleichzeitige Messung von Temperaturprofilen und Umlaufströmung ist deshalb nicht möglich, da beim Ziehen der Schnecke, wenn sie mit vernetztem Material gefüllt ist, der Temperaturmesssteg aufgrund der erhöhten Steifigkeit des Materials beschädigt werden würde.

4 Auswertung

In den folgenden zwei Abschnitten werden nun zuerst die Auswertung des radialen und axialen Temperaturprofils und anschließend die Auswertung der Umlaufströmung besprochen.

4.1 Auswertung des radialen und axialen Temperaturprofils

Die radialen Temperaturprofile für die Einstellung 60_80_90_50 während der Dosierzeit sind nach 7 s in Abbildung 27 und nach 20 s in Abbildung 28 dargestellt.

Die Mischung im Bereich der Zylinderwand wird stärker geschert als im Inneren, wodurch auch die Temperaturentwicklung an der Wand größer ist als in der Mitte. Zu Beginn des Dosierens zeigt das radiale Temperaturprofil über den Messsteg daher ein Minimum in der Zylindermitte (Abbildung 27). Während des Dosierens verteilt sich die Wärme über den Materialquerschnitt. Die Wärme in der Mitte hält sich aufgrund der schlechten Wärmeübertragung im Material länger als in den Randschichten, die in Kontakt mit dem metallischen Zylinder sind. Dort ist die Temperierung effektiver. Während des Dosierens bildet sich also ein radiales Temperaturprofil, das ein Maximum in der Mitte aufweist und zu den Rändern hin abfällt (Abbildung 28).

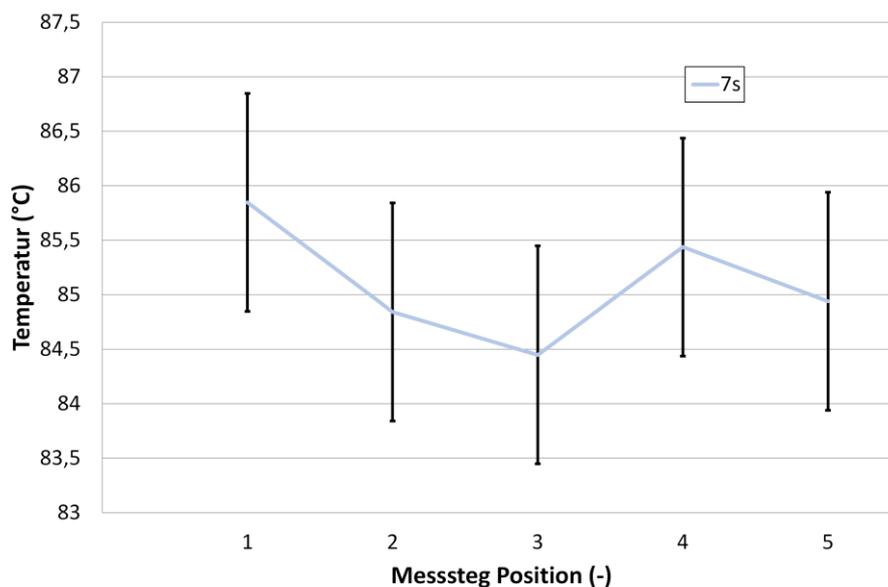


Abbildung 27: Radiales Temperaturprofil während des Dosierens nach 7 s, 60_80_90_50

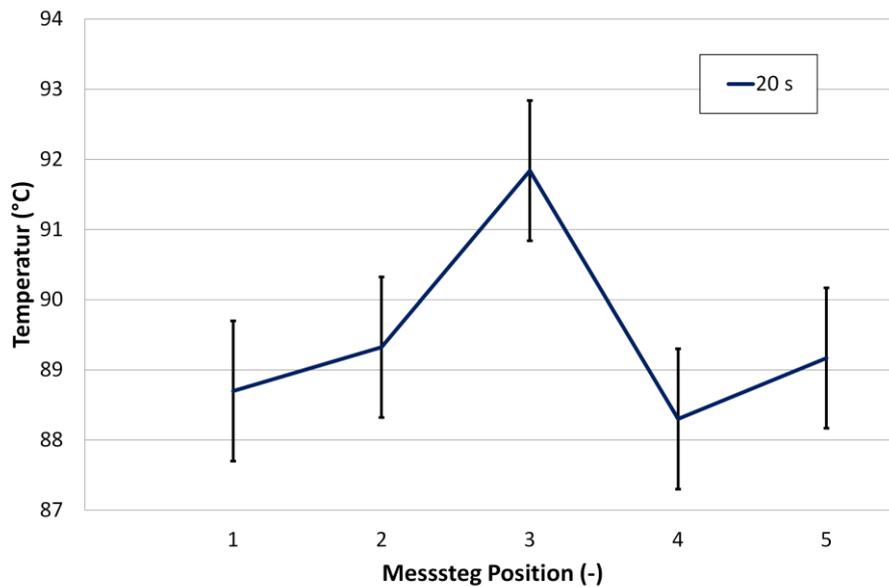


Abbildung 28: Radiales Temperaturprofil während des Dosierens nach 20 s, 60_80_90_50

Die jeweiligen Extrema in den unterschiedlichen Phasen des Dosierens weisen jedoch eine geringe Ausprägung auf, wobei die Abweichung für alle Einstellungen zwischen Mitte und Rand mit ± 3 °K relativ gering ist und das radiale Temperaturprofil als homogen und eben betrachtet werden kann. Das radiale Temperaturprofil ist also nicht signifikant für ein Dosiervolumen von 150 cm^3 . Daraus ergibt sich, dass für die Ergebnisbetrachtung (siehe 5.1 und 5.2) die Darstellung der mittleren Position des Messstegs stellvertretend für die Ergebnisse der anderen Messpositionen bei den axialen Temperaturprofiluntersuchungen ist.

Das axiale Temperaturprofil wird mithilfe des Messstegs über die Dosierzeit gemessen. Die Modellbildung wird für die Messstelle 3 durchgeführt. Abbildung 29 zeigt den axialen Temperaturverlauf der mittleren Messstelle für die ausgewählte Einstellung 60_80_90_50 (15_3). Die Verlaufsform entsteht dadurch, dass die Temperatur mit zunehmender Dosierzeit bei kontinuierlicher Scherung linear ansteigt. Der Anstieg der Temperatur am Anfang bis zum ersten Maximum und der darauffolgende Abfall bis zum erneuten Anstieg bei ca. 7 s kommen daher, dass das Material zwischen den Zyklen (während der Wartezeit) nicht schnell genug abkühlen kann. Dabei handelt es sich um jenes Material, welches sich in dem nicht gekühlten Bereich zwischen Schneckenspitze und Messsteg im Drosselflansch befindet. Erst das nachfolgende Material im neuen Zyklus weist wieder den erwarteten Verlauf auf.

Um die Kurvenverläufe aller Einstellungen akkurat darzustellen und mithilfe eines statistischen Modells vorhersagen zu können, werden zehn Zeitpunkte gewählt, die die Kurvenverläufe repräsentieren sollen.

Die Zeitpunkte werden so gewählt, dass die sich ergebenden Temperaturprofile möglichst gut mit dem statistischen Modell beschrieben werden können.

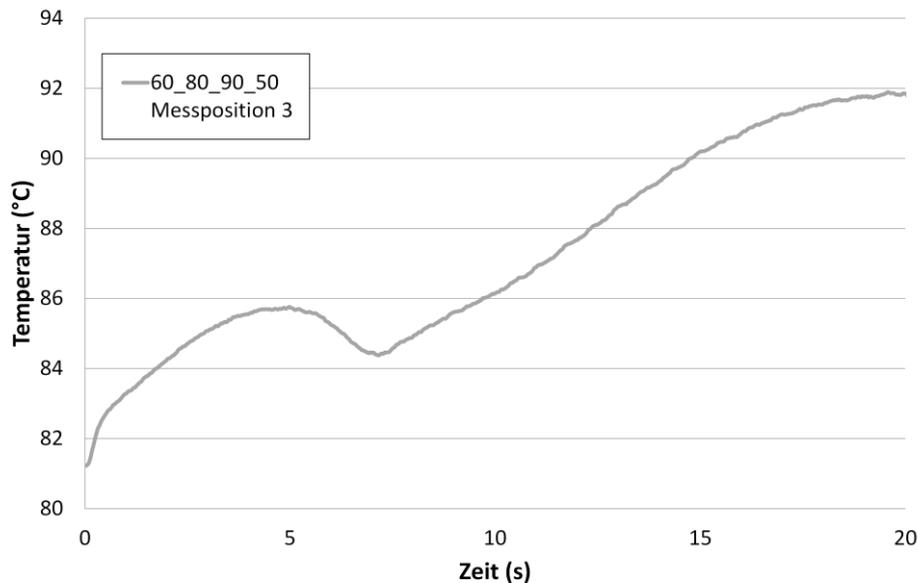


Abbildung 29: Axialer Temperaturverlauf der mittleren Messposition am Steg, 60_80_90_50

Die festgelegten Zeitpunkte sind bei 0 s, 0,8 s, 4,7 s, 5,7 s, 6,4 s, 7,4 s, 8,8 s, 10,4 s, 12,6 s und 17,5 s und sind in Abbildung 30 für ausgewählte Einstellungen eingezeichnet. Die dargestellten Kurvenverläufe sind jene der mittleren Messstelle (Messstelle 3) am Steg für die jeweilige Einstellung.

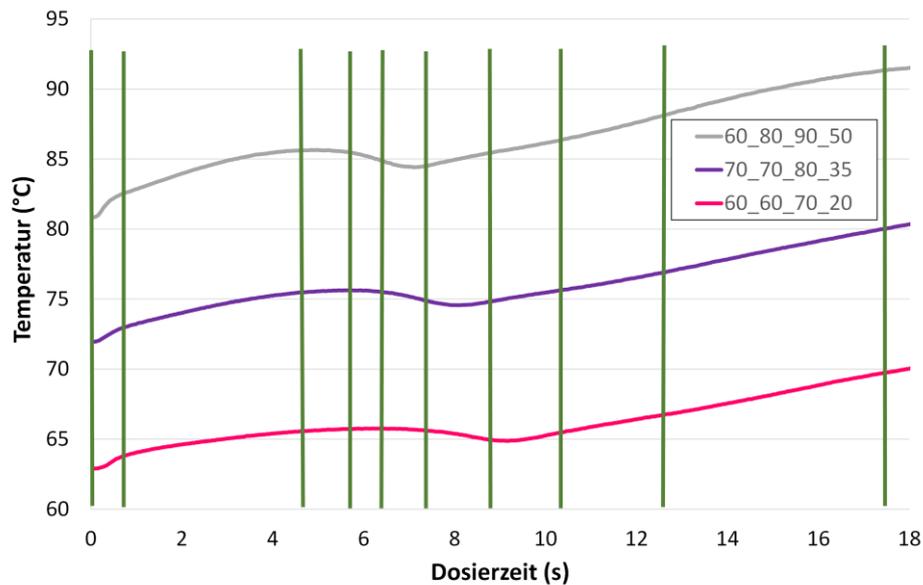


Abbildung 30: Auswertzeitpunkte für das axiale Temperaturprofil, Messposition 3, 60_80_90_50 (grau), 70_70_80_35 (violett) und 60_60_70_20 (rot)

Dabei wird jeweils für jeden Zeitpunkt ein statistisches Modell erstellt.

Die Vorgehensweise bei der Erstellung des Modells für einen Zeitpunkt bei einer Messstelle ist wie im Folgenden beschrieben. Von den drei Wiederholmessungen wird der jeweilige Wert für den Zeitpunkt aus den Messdaten herangezogen und in eine Tabelle eingetragen. Dies wird für jede Einstellung durchgeführt und anschließend in Minitab 17 eingespielt. Die Daten werden mit Minitab mit einem Konfidenzintervall von 95 % ausgewertet. Die Software liefert verschiedene Kennzahlen sowie eine Regressionsgleichung für den betrachteten Zeitpunkt. Zu den Kennzahlen zählen einerseits die Haupt- und Wechselwirkungseffekte der Faktoren, andererseits werden die Signifikanz und Krümmung des Modells berechnet sowie der R^2 -Wert.

Die Haupt- und Wechselwirkungseffekte werden anhand der folgenden Regressionsgleichung, welche sich für die Schnecke mit konstanter Gangtiefe am mittleren Messsteg für den Zeitpunkt 17,5 s ergibt, erklärt. Die Regressionsgleichung ist in Gleichung (3) dargestellt.

$$\begin{aligned}
 (17,5s) = & -20,83 + 0,1087 \cdot T_{\text{Einzug}} + 1,2393 \cdot T_{\text{Plastifizierzylinder}} + 0,3982 \cdot \text{Drehzahl} \quad (3) \\
 & - 0,00378 \cdot \text{Staudruck} - 0,001310 \cdot T_{\text{Einzug}} \cdot T_{\text{Plastifizierzylinder}} - \\
 & 0,003191 \cdot T_{\text{Plastifizierzylinder}} \cdot \text{Drehzahl}
 \end{aligned}$$

In der Regressionsgleichung erscheinen zuerst die Haupteffekte, das sind jene Terme die nur aus dem Faktor multipliziert mit seinem Effektwert bestehen. In Gleichung (3) hat zum Beispiel die Einzugstemperatur einen positiven Effekt von

gerundet 0,11. Das bedeutet im Rahmen des Versuchsplans, dass die Massetemperatur am mittleren Messsteg zum Zeitpunkt 17,5 s bei einer Erhöhung der Einzugstemperatur von 60 °C auf 80 °C ohne Berücksichtigung der anderen Terme der Regressionsgleichung um den Wert $0,11 \cdot 20$ steigen würde. Der Staudruck hat in Gleichung (3) einen negativen Effekt, was zur Folge hat, dass die Temperatur mit höherem Staudruck sinkt. Es wird festgestellt, dass die Plastifizierzylindertemperatur hier mit einem Faktor von 3 zum nächst niedrigeren Effekt (Drehzahl) den größten Effekt hat.

Neben den Haupteffekten werden in der Regressionsgleichung die Wechselwirkungen dargestellt. Eine negative Wechselwirkung wie die von Einzugstemperatur und Plastifizierzylindertemperatur sagt aus, dass bei einer Erhöhung des Wertes beider Terme, also der Temperatur, die sich ergebende Massetemperatur sinkt. Wird jedoch ein Wert erhöht und der andere gesenkt, also die Wertveränderung mit einem negativen Vorzeichen versehen, steigt die Temperatur aufgrund der Wechselwirkung.

Es sei erwähnt, dass alle Terme, die in Gleichung (3) enthalten sind, signifikant sind. Signifikant heißt, dass der Werte des Terms bei der Auswertung innerhalb des Konfidenzintervalls liegen. Dies spiegelt sich im p-Wert wieder, welcher Auskunft über die Signifikanz eines Faktors oder einer Wechselwirkung liefert. Der p-Wert ist immer gleich dem Wert 1 minus des gewählten Konfidenzintervalls und in diesem Fall also 0,05. Alle Terme, die einen p-Wert von unter 0,05 aufweisen sind signifikant und liegen daher im Konfidenzintervall. Der Effekt der Terme variiert stark und sie leisten oft nur einen geringen Beitrag zum Ergebnis. Bei der Ermittlung der Regressionsgleichung durch Auswertung der Messdaten wird so vorgegangen, dass zuerst alle Effekte und Wechselwirkungen untersucht werden, dann aber Schritt für Schritt die nicht signifikanten Terme ausgeschlossen werden, bis die Gleichung in ihrer obigen Form erreicht ist. Um Fehler bei der Auswertung zu vermeiden, sind die Hauptfaktoren immer Teil der Regressionsgleichung, auch wenn zum Beispiel die Einzugstemperatur nicht signifikant wäre.

Ein weiteres Ergebnis der Auswertung ist wie oben erwähnt die Krümmung. Ist der Zentralpunkt signifikant, bedeutet das, dass das Modell nicht linear ist, sondern eine Krümmung aufweist. Die Diagonale in einem Quadrat, dessen Eckpunkte Einstellungen des Versuchsplans sind, kann man sich dann als progressiv oder degressiv ansteigende Kurve vorstellen. In diesem Fall reichen die vorhandenen Daten nicht aus, um das untersuchte System genau genug zu beschreiben und es muss ein anderer Versuchsplan gewählt werden.

Ebenso muss der R^2 -Wert betrachtet werden, der Auskunft über Genauigkeit der Auswertung gibt. Dabei sollten Werte von größer als 90 % angestrebt werden.

Es ergeben sich also für eine Position am Messsteg mehrere Modelle, die den Verlauf der axialen Temperatur nachstellen bzw. ihn bei Eingabe anderer als im Versuchsplan untersuchter Werte vorhersagen sollen. Dies geschieht, indem für jeden Zeitpunkt für die jeweiligen Parameter dieselben Werte eingesetzt werden. Die erzeugten Punkte werden in einem Diagramm „Temperatur über Zeit“ aufgetragen und interpoliert. Eine für die Einstellung 70_70_80_35 erzeugte Repräsentation des Kurvenverlaufs ist in Abbildung 31 dargestellt. Dabei wird das Modell als gültig gewertet, wenn die Prognose die Messkurve mit einer Abweichung kleiner +/- 1 K beschreiben kann.

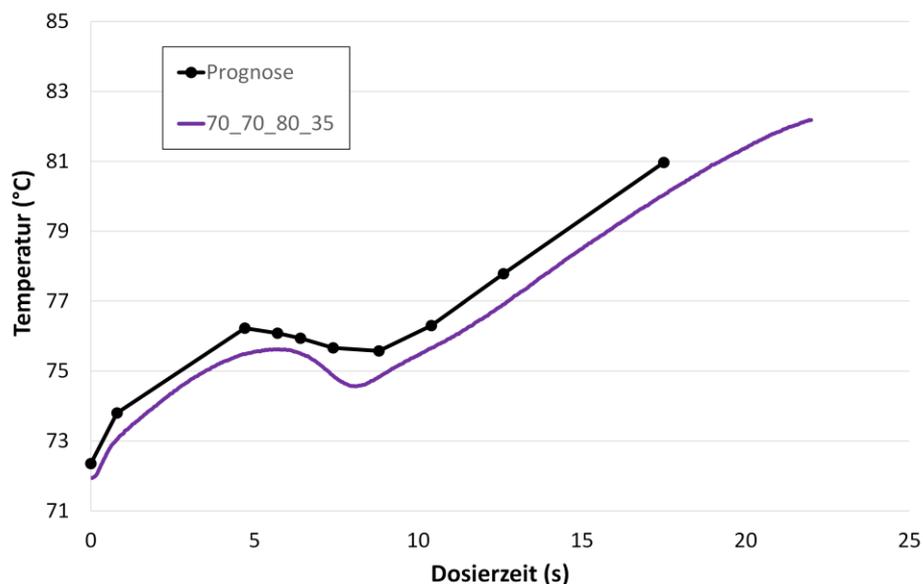


Abbildung 31: Mithilfe von statistischer Auswertung und Modellbildung errechneter Kurvenverlauf für das axiale Temperaturprofil, 70_70_80_35

4.2 Auswertung der Umlaufströmung

Das vernetzte Material wird von der Schnecke genommen und im nächsten Schritt mit einer Schneidvorrichtung (Abbildung 32) bearbeitet.

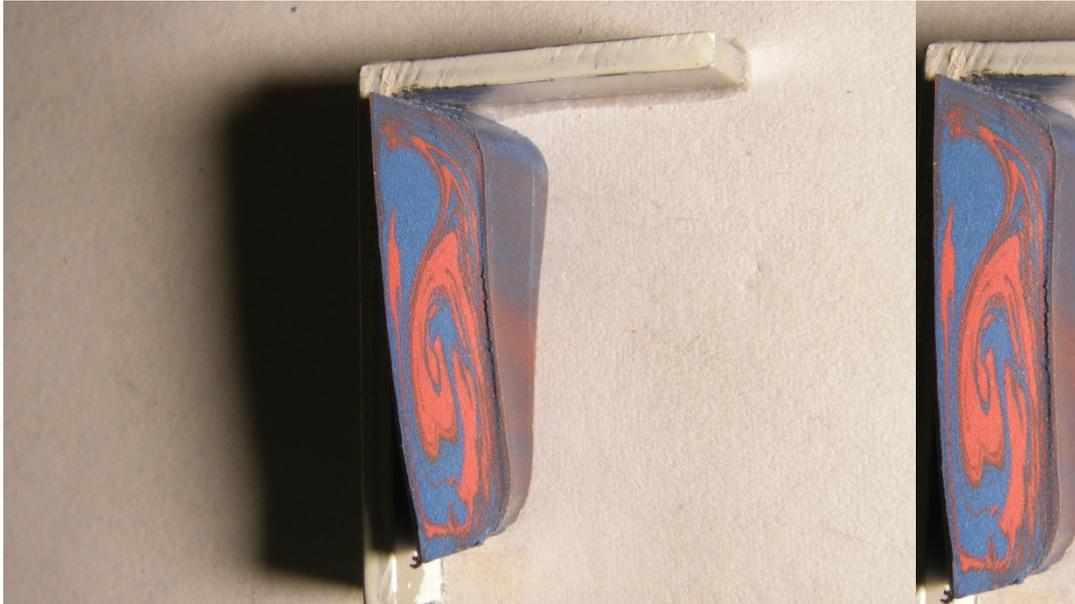


Abbildung 32:Vorrichtung zum Schneiden des abgewickelten Schneckenkanals

Die Schneide wird so ausgerichtet, dass das vulkanisierte Material normal zur Richtung der abgewickelten Schneckenkanallänge geschnitten werden kann. Das Material wird alle acht Millimeter geschnitten, da dieser Abstand einem Viertel des Außendurchmessers der beiden Schnecken entspricht (32 mm). Um die Ergebnisse über die Schneckenlänge in D vergleichen zu können, wird auf der Schnecke eine Markierung eingebracht, an der der erste Schnitt gesetzt wird und die Schnitte Richtung Einzug fortgesetzt werden. Die geschnittenen Teile werden nummeriert.

Die gesammelten Teile werden anschließend nacheinander alle in einer fixen Position senkrecht zur Schnittfläche fotografiert. Zusätzlich zur genauen Positionierung der Teile werden die Bilder mithilfe von Matlab 16a, The MathWorks GmbH, zugeschnitten und durch Erfassung einer Kante entlang einer Ebene ausgerichtet.

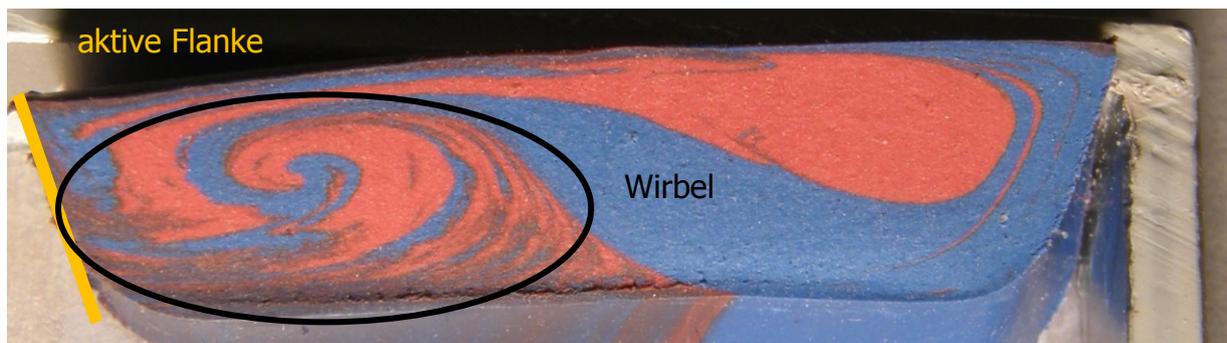
Abbildung 33 zeigt ein Schnittbild (Einstellung 80_80_70_50 bei 28 D, Schnecke mit konstanter Gangtiefe) vor und nach der Bearbeitung mit der Software.



*Abbildung 33: Schnittbilder vor (links) und nach (rechts) der Bearbeitung,
80_80_70_50*

Diese Bearbeitung ist notwendig, da im nächsten Auswerteschritt mit einem Koordinatensystem gearbeitet wird und die y-Achse dabei von großer Bedeutung für die Ergebnisse ist. Eine Verdrehung des Bildes bzw. ein gekrümmter Schnitt kann dabei die Ergebnisse verfälschen.

Die Umlaufströmung wird in den Schnittbildern als jener Wirbel definiert, der an der aktiven Flanke des Schneckenstegs entsteht (siehe Abbildung 34).



*Abbildung 34: Definition der Umlaufströmung als Wirbel mit aktiver Flanke als
Entstehungsort*

4.2.1 Methoden zur Bestimmung der Umlaufströmung

Um die Ausbildung der Umlaufströmung beurteilen zu können und mit Zahlen messbar zu machen wird entschieden, eine charakteristische Größe der

Umlaufströmung, also des Wirbels, in ein Verhältnis zu dem gesamten Querschnitt zu setzen. Die in Frage kommenden Methoden werden im Folgenden erläutert.

4.2.2 Gaußsche Trapezformel

Dabei wird die unbekannte Fläche eines Polygons in Trapeze zerlegt. Die Flächeninhalte der einzelnen Trapeze können durch Bezug auf eine festgelegte Messlinie (z.B. die x-Achse, geodätisches Koordinatensystem) berechnet werden [11]. Somit kann auf die Fläche des Polygons geschlossen werden. Die Fläche der Umlaufströmung als auch des gesamten Querschnitts können mit dieser Methode berechnet werden. Der Nachteil dieser Methode ist, dass viele Punkte angenommen werden müssen, um den Verlauf der Schnittbildelemente ausreichend genau zu beschreiben, wodurch sich viele Polygone und damit ein erheblicher Zeitaufwand ergeben.

4.2.3 Verhältnis der Breite zur Gesamtbreite

Eine weitere untersuchte Methode ist die Breite der Umlaufströmung zu messen und diese ins Verhältnis zur Gesamtbreite zu setzen. Die Auswertung erfolgt mithilfe der Software MB-Ruler von Markus Bader [12] und ist in Abbildung 35 für die Einstellung 80_80_70_50 bei 23 D der M1-Schnecke dargestellt. Dabei wird der ganze Bildschirm des jeweiligen Computers als Koordinatensystem mit Ursprung in der rechten oberen Ecke betrachtet. Die y-Achse zeigt nach rechts, während die x-Achse nach oben zeigt. Der Wirbel weist je nach Ausbildungsgrad mehr oder weniger ausgeprägt in allen Fällen eine schräge Flanke auf. An diese Flanke wird mithilfe der Software eine Tangente gelegt, welche die Außenkanten des Schnittbildes schneidet. Die Differenz zwischen dem y-Wert des Schnittpunktes mit der unteren Kante (y_2) und dem y-Wert des Punktes an der linken oberen Ecke des Schnittbildes (stellvertretend für den Anfangspunkt des Wirbels, y_1) wird als Breite der Umlaufströmung definiert. Diese wird dann ins Verhältnis mit der Gesamtbreite des mittleren Kanals gesetzt und in Prozent dieser Breite gemessen.

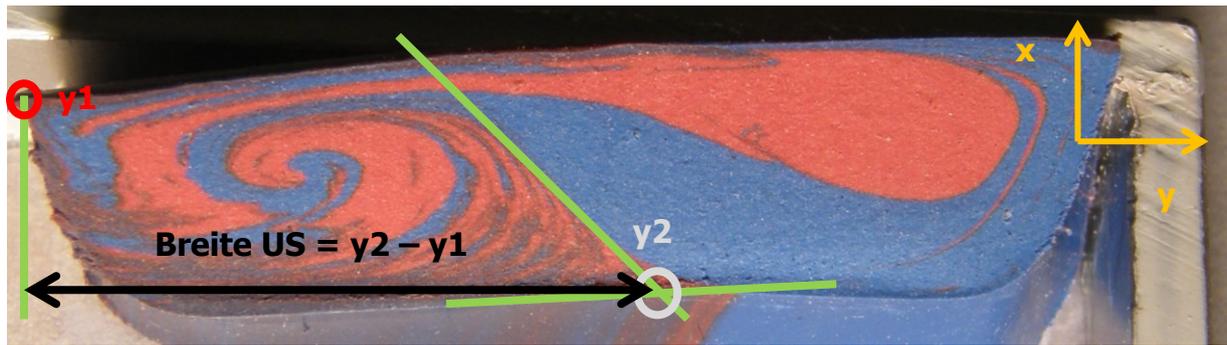


Abbildung 35: Bestimmung der Breite der Umlaufströmung (US) durch Bestimmung der Breite des Wirbels; Hilfslinien grün, Messpunkte rot (Wirbelbeginn) und grau (Schnittpunkt, Wirbelende), Breite schwarz, Koordinatensystem orange, 80_80_70_50

Da bei dieser Methode die Krümmung des Bauteils in den unteren Ecken und damit eine Einfluss auf die gemessene Breite nichtberücksichtigt wird, wird die Methode als ungenau eingestuft.

4.2.4 Verhältnis der mittleren Breite zur Gesamtbreite

Diese Methode ähnelt der Ermittlung der Breite der Umlaufströmung, wird aber durch Berücksichtigung des Schnittpunktes der Tangente mit der oberen Kante ergänzt.

Die y-Koordinaten dieser beiden Schnittpunkte (y_2 , y_3) werden addiert und halbiert, um den Mittelwert zu erhalten. Dieser wird als Endpunkt des Wirbels betrachtet. Die Breite des Wirbels ist der Differenz dieses Mittelwerts und des y-Wertes des Punktes an der linken oberen Ecke des Schnittbilds. Es ergibt sich die mittlere Breite der Umlaufströmung, welche wie zuvor ins Verhältnis mit der Gesamtbreite des mittleren Kanals gesetzt und in Prozent dieser Breite gemessen wird.

Die Auswertung mit Tangente und Subtraktion der y-Werte ist in Abbildung 36 für die Einstellung 80_80_70_50 bei 23 D der M1-Schnecke illustriert. Der Messpunkt, der den Wirbelanfang beschreibt (y_1), ist in der Abbildung links oben zu sehen.

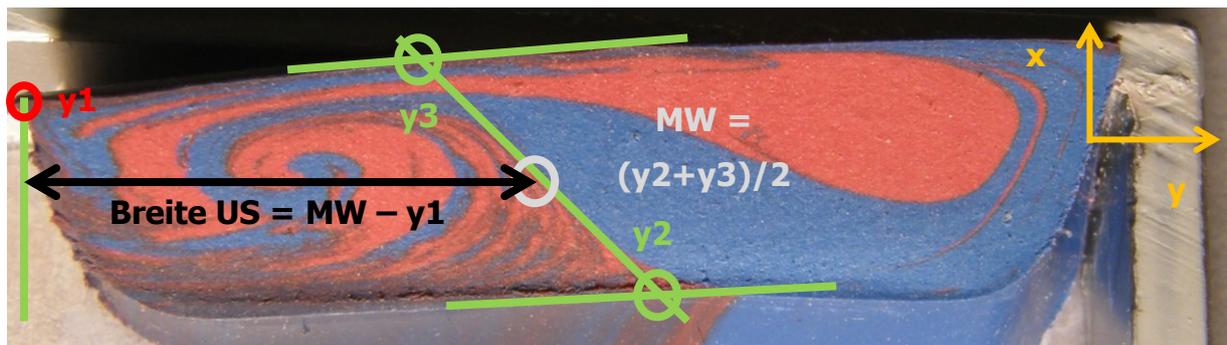


Abbildung 36: Auswertung der Umlaufströmung (US) durch Bestimmung der mittleren Breite des Wirbels; Hilfslinien und -punkte grün, Messpunkte rot (Wirbelbeginn) und grau (Tangentenmittelpunkt, Wirbelende), Breite schwarz, Koordinatensystem orange, 80_80_70_50

Da bei dieser Methode nur eine Koordinate zusätzlich aufgenommen werden muss, ist der Aufwand zur Auswertung wesentlich geringer als mit der Gaußschen Trapezformel. Außerdem wird durch Verwendung der mittleren Breite die Krümmung des Schnittbilds ausgeglichen.

Ein Vergleich der drei Auswertemethoden über die abgewickelte Schneckkanallänge in Abbildung 37 zeigt, dass das Verhältnis der mittleren Breite zur mittleren Gesamtbreite ähnliche Ergebnisse liefert wie das Verhältnis der Wirbelfläche zur Gesamtfläche des Schnittbildes, während die Ergebnisse bei Verwendung der einfachen Breite davon abweichen.

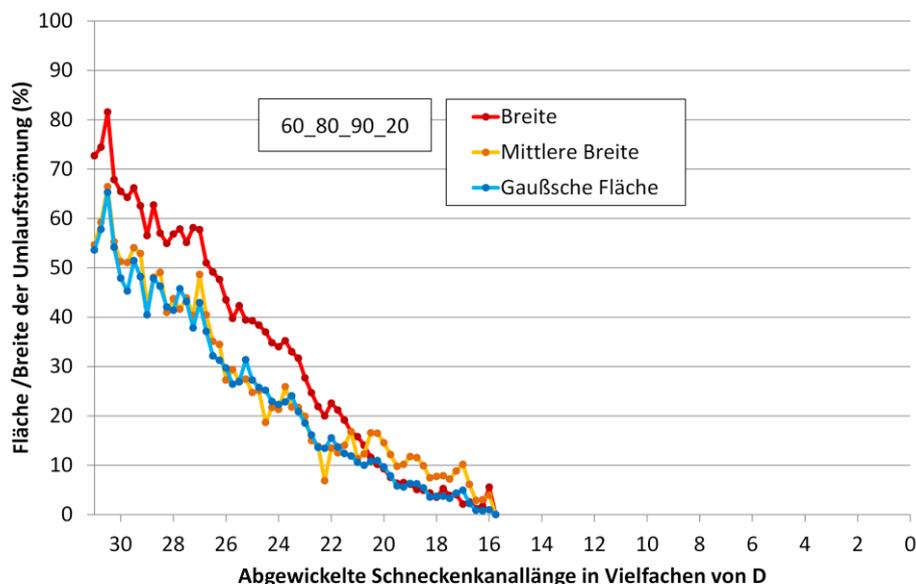


Abbildung 37: Vergleich der Auswertemethoden (Breite, Mittlere Breite, Gauß), 60_80_90_20

Daraus folgt, dass die dritte Auswertemethode verwendet wird, da sie einerseits genau genug ist und andererseits nicht so viel Aufwand zur Auswertung erforderlich ist.

Diese Auswertung wird so für alle untersuchten Einstellungen gemäß Versuchsplan (9 Einstellungen für die Schnecke mit konstanter Gangtiefe und zwei für die kernprogressive Schnecke) durchgeführt. Je nach Einstellung kann es vorkommen, dass der Wirbel die passive Flankenseite erreicht. In diesem Fall gilt die Umlaufströmung als zu 100 % ausgebildet. Der Wirbel pflanzt sich dabei derart durch den Querschnitt fort, dass er zuerst am Kanalgrund entlang wächst (Abbildung 36, y-Richtung) und sich dann zur aktiven Flanke hin über die Kanalhöhe aufbaut (Abbildung 36, x-Richtung). Trifft der Wirbel nun auf die passive Flanke und wandert diese nach „oben“ (x-Richtung), wird ab einem gewissen Zeitpunkt eine vollständig ausgeprägte Umlaufströmung (100 %) angenommen, wodurch ein Sprung im Verlauf zustande kommt. Diese Annahme wird dann getroffen, wenn jene y-Koordinate, welche auf einer Hilfsachse entlang des Kanalgrunds läuft, eine mittlere Breite erzeugt, welche größer ist als die Gesamtbreite des Kanals auf mittlerer Höhe.

Genau so verschwindet der Wirbel irgendwann, je näher die Position des Schnitts dem Einzug ist. Die Umlaufströmung ist dann zu 0 % ausgebildet, also nicht vorhanden. Die sich ergebenden (Verhältnis-) Werte für die Größe bzw. den Ausbildungsgrad der Umlaufströmung wird gegenüber der abgewickelten Schneckenkanallänge in Vielfachen von D aufgetragen. Die Schneckenkanallänge beträgt für die M1-Schnecke 31 D und für die MK-Schnecke 32,5 D.

Der Kurvenverlauf der Umlaufströmungsbildung wird durch eine Trendlinie angenähert. Um die Trendlinie nicht zu verfälschen, werden die Kurven, wenn sie 100 % erreichen, nicht weiter eingezeichnet, auch wenn die Schnittbilder bis zur Schnecke eine vollständige Umlaufströmung zeigen. Es zeigt sich, dass ein Polynom zweiten Grades den Verlauf ausreichend genau beschreiben kann. Ähnlich wie bei der Auswertung der Temperaturprofile werden an verschiedenen Positionen die Werte der verschiedenen Kurvenverläufe gegenübergestellt und zur Modellbildung in Minitab benutzt.

Der Unterschied hierbei ist, dass es sich bei den betrachteten Positionen nicht, wie zuvor, um Zeitpunkte während des Dosierens handelt, sondern um verschiedene Punkte entlang der abgewickelten Schneckenkanallänge in Vielfachen von D oder um Ausbildungsgrade der Umlaufströmung in %. Ein Verlauf der Umlaufströmung mit Gleichung und Bestimmtheitsgrad des Polynoms ist für die Einstellung 80_80_90_50

4. Auswertung

in Abbildung 38 dargestellt, während die entsprechenden Schnittbilder in D Schritten, also alle vier Schnitte, in Abbildung 39 gezeigt sind.

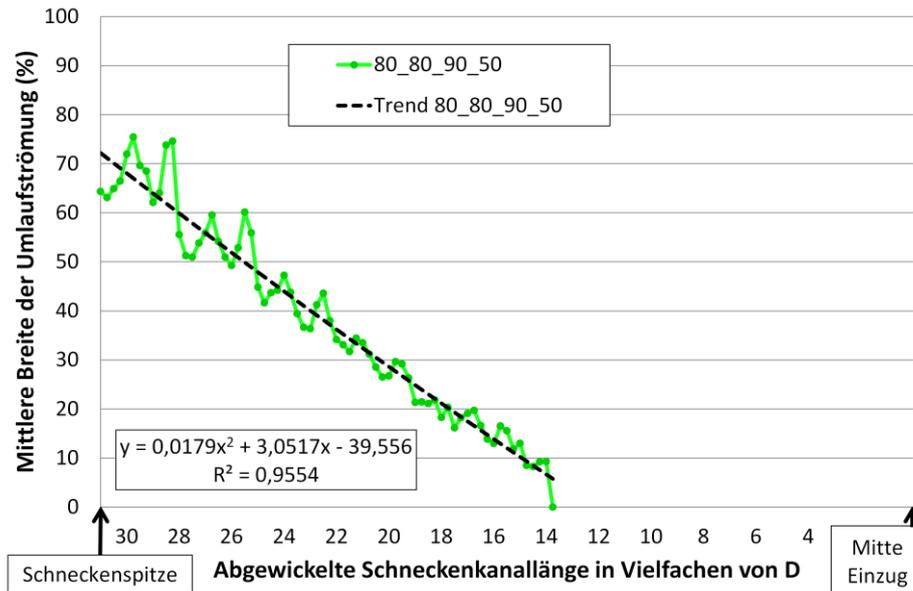


Abbildung 38: Verlauf der Umlaufströmung, 80_80_90_50

Es zeigt sich, dass sich die Umlaufströmung hier bei einer Länge von 13,75 D auszubilden beginnt und bis auf eine Größe von 64,34 % ansteigt. Der Trend (gestrichelte Linie) kann den tatsächlichen Verlauf (durchgängige Linie mit dunkler Markierung der Messpunkte) mit einer Genauigkeit von 95,5 % (R^2 -Wert) abbilden. Der Verlauf an sich weist gewisse Schwankungen im Ausbildungsgrad der Umlaufströmung auf, wodurch dieser nicht kontinuierlich ansteigt. Dieses „Pulsieren“ kann auf viskoelastische Effekte im Material zurückgeführt werden.

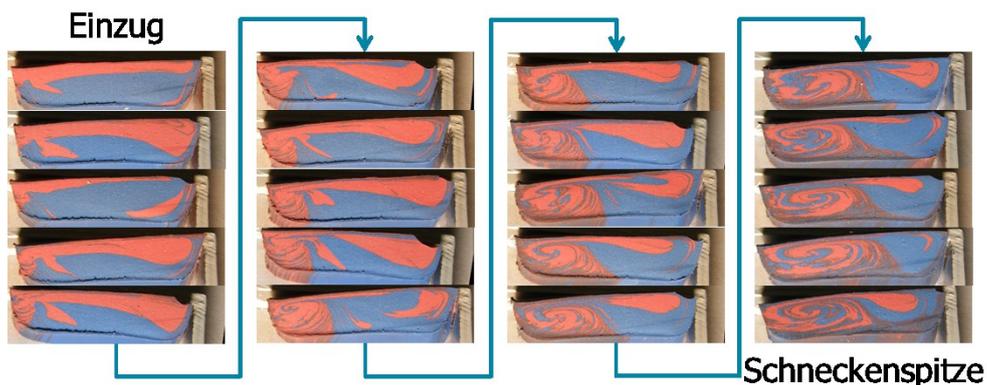


Abbildung 39: Schnittbilder; Einzugsbereich links oben, Schnecken Spitze rechts unten, alle D, 80_80_90_50

Da der Aufwand zur Auswertung der Umlaufströmungen erheblich größer ist, als bei der Auswertung der Temperaturprofilergebnisse, wird überprüft, ob der Aufwand

reduziert werden kann. Dazu werden bei der Center-Point Einstellung 70_70_80_35 drei Wiederholmessungen durchgeführt. Die drei vernetzten Schneckenkanalinhalt werden ausgewertet und sind in Abbildung 40 einander gegenübergestellt. Die Verläufe nehmen für alle drei Verläufe eine ähnliche Form an, wobei jener der zweiten Wiederholmessung (70_70_80_35-2) ein tieferes Niveau aufweist. Die Kurven liegen dennoch innerhalb weniger Prozent beieinander. Grund dafür, dass der Beginn der Umlaufströmungsausbildung bei derselben Einstellung jeweils Teile von D zu den anderen versetzt ist, liegt darin, dass die Schnecke nach dem Dosieren nicht immer an derselben Stelle gestoppt werden kann. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in dieser Abbildung die Trendlinien weggelassen. Es sei jedoch vermerkt, dass auch die Trendlinien beinahe zusammenfallen, insbesondere 70_70_80_35-1 und 70_70_80_35-3. Daraus folgt die Annahme, dass die Ergebnisse von drei Wiederholmessungen einander so sehr gleichen, dass eine Messung für die restlichen Einstellungen ausreichend ist, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

Des Weiteren ist zu erwarten, dass es sich bei der Umlaufströmung nur um eine Momentaufnahme am Ende des Dosiervorgangs handelt.

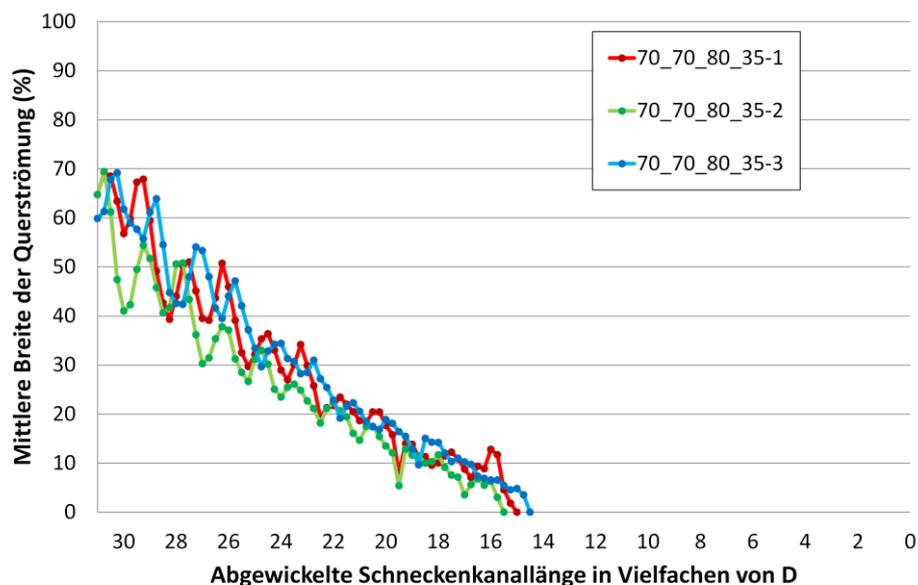


Abbildung 40: Ergebnisvergleich dreier Wiederholmessungen bei einer Einstellung, Folge: eine Wiederholmessung ausreichend, 70_70_80_35

5 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die mithilfe der verschiedenen Auswertemethoden gewonnenen Ergebnisse gezeigt und diskutiert. Zuerst werden für beide verwendeten Schneckentypen die Temperaturprofile behandelt und dann die Ergebnisse der Untersuchung der Umlaufströmungen. Die Ergebnisse einzelner Einstellungen werden miteinander verglichen, um Aussagen bezüglich beeinflussender Faktoren zu treffen.

5.1 Temperaturprofile der Schnecke M1 (L/D ~ 11)

Abbildung 41 zeigt noch einmal den Temperaturverlauf für die Einstellung 60_80_90_50, wobei hier schon die Vereinfachung aufgrund der nicht signifikanten radialen Temperaturprofile berücksichtigt ist. Daher ist nur die Kurve für die Messstelle 3 abgebildet.

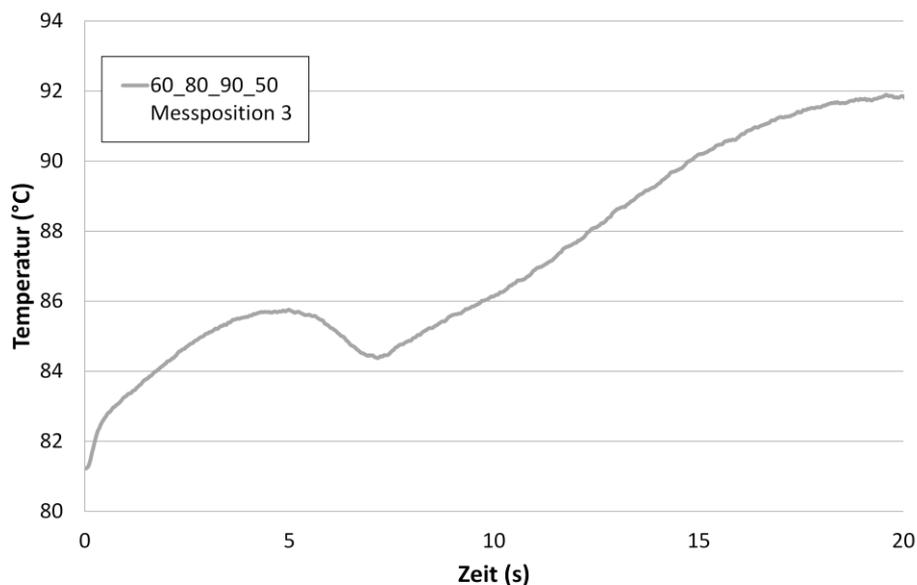


Abbildung 41: Axialer Kurvenverlauf der M1-Schnecke, mittlere Position am Messsteg, 60_80_90_50

Wie schon erwähnt, kommt die Abweichung von der Geradenform dadurch zustande, dass das Material zwischen den Zyklen nicht genug Zeit hat, um auf die eingestellten Werte abzukühlen. Bei der dargestellten Einstellung befindet sich das Ende der Dosierzeit bei 20 s.

5.1.1 Vergleich der Kurvenverläufe zweier Materialien bei langem Dosieren

Gemäß der Theorie würden die Kurven bei ununterbrochenem Dosieren stetig ansteigen, bis sich nach einiger Zeit ein Plateau bei einem gewissen Temperaturniveau aufgrund eines Gleichgewichts zwischen Wärmezufuhr durch Scherung und Wärmeabfuhr über die Zylinderwand bilden würden [8, 13-19]. Um dieses Verhalten zu untersuchen, wurde das EPDM-Material für 90 s bei der Einstellung 60_60_70_20 dosiert. Entgegen der erwähnten Annahme fällt die Kurve bei ca. 29 s jedoch ab und bildet ein Plateau aus. Danach steigt die Temperatur bis zum Dosierende wieder an. Der beschriebene Kurvenverlauf für den mittleren Messsensor am Temperatursteg ist in Abbildung 42 dargestellt.

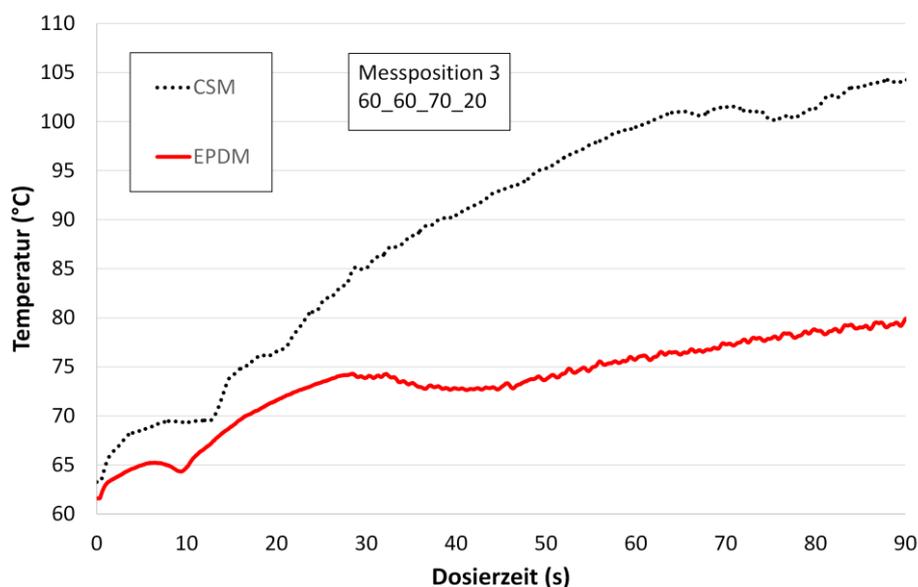


Abbildung 42: Vergleich zweier Materialien CSM und EPDM mit unterschiedlichem Temperaturverhalten bei kontinuierlicher Scherung, 60_60_70_20

Dem gegenüber ist der Kurvenverlauf eines CSM (chlorsulfoniertes Polyethylen)-Kautschuks gezeigt. Dieses Material wird im Zuge des Aufbaus des Schneckenprüfstands für Vorversuche verwendet und wird ebenfalls von der Semperit Technische Produkte GmbH zur Verfügung gestellt. Es besitzt eine Dichte von $1,383 \text{ g/cm}^3$ und besitzt Ruß als Füllstoff. Das von CSM gezeigte Verhalten entspricht der Theorie (siehe oben, [8, 13-19]), indem die Temperatur kontinuierlich bis zum Gleichgewicht ansteigt. Das Temperaturverhalten ist demnach materialabhängig.

Das von EPDM gezeigte Materialverhalten tritt jedoch nicht nur am mittleren Temperatursensor auf sondern auch an den äußeren. Hier ist der Temperaturabfall bei ca. 48 s bei kontinuierlichem Dosieren laut Einstellung mit ungefähr 10 °C größer

als bei Messposition 3. Anders als das hier der Fall ist, übersteigt auch der darauffolgende Temperaturanstieg nicht das Maximum vor Beginn des Abfalls. Abbildung 43 zeigt den Kurvenverlauf der äußeren beiden Sensoren am Temperaturmesssteg stellvertretend für die Einstellung 60_60_70_20. Die Dosierzeit beträgt hier 90 s.

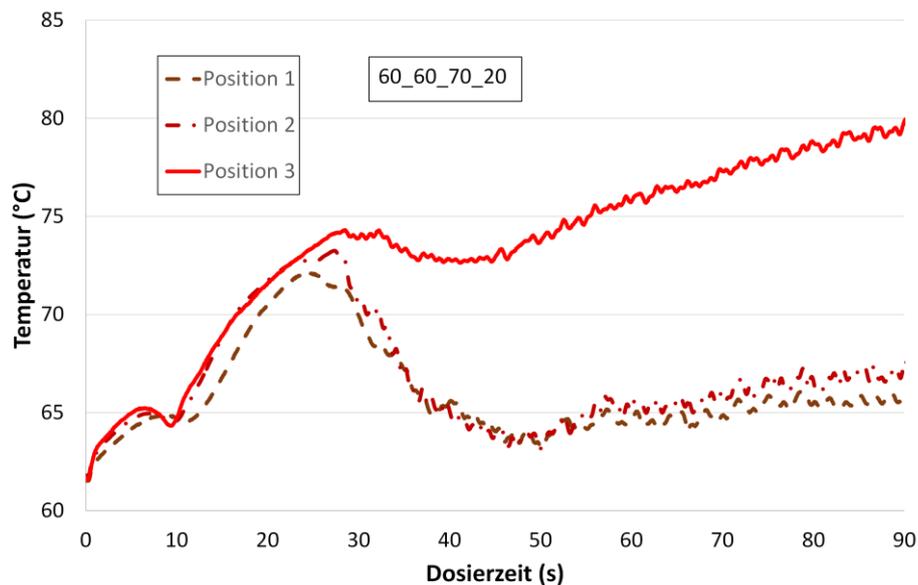


Abbildung 43: Temperaturabfall während des Dosierens als unerwartetes Temperaturverhalten für alle Messsensoren bei EPDM, 60_60_70_20

Zu den möglichen Gründen dieses Verhaltens zählt das Auftreten von Wandgleiteneffekten, welche dadurch entstehen könnten, dass während des Scherens Weichmacher, Additive und andere Stoffe austreten. Dies könnte zur Bildung eines Schmierfilms führen, welcher ein Wandgleiten auslöst. Als weitere Gründe werden eine Schädigung des Materials oder der Einfluss der Temperierzyklen angedacht. Der Grund für die Abweichung der EPDM-Kurven von der Theorie kann im Zuge dieser Untersuchungen nicht bestimmt werden und wird in dieser Arbeit auch nicht weiter verfolgt, da die Temperaturabfälle immer erst mit Ende der Dosierzeit auftreten und die relevanten Ergebnisse somit nicht beeinflussen.

5.1.2 Vorstellung des Modells – mathematische Repräsentation und Vorhersage von Ergebnissen

Um das Ziel der Untersuchungen, axiale Temperaturprofile für beliebige Einstellungen vorhersagen zu können, erreichen zu können, muss die Bedingung erfüllt sein, dass die erstellten Modelle die erhaltenen Messkurven akkurat darstellen können.

Wie in 4.1 beschrieben, werden für die verschiedenen Zeitpunkte während des Dosierens mathematische Modelle mithilfe der Software Minitab erzeugt. Bei der Berechnung der Modelle tritt in einigen Fällen eine signifikante Krümmung auf. Diese Signifikanz wird widerlegt, indem das jeweilige Modell berechnet wird und dabei eine Abweichung von nicht mehr als ± 1 K zu den Messdaten auftritt. Stellvertretend für die Einstellungen des Versuchsplans in Tabelle 2 werden die mithilfe der Modelle erstellten Prognosen zur Darstellung der Zentralpunkt-Messung (70_70_80_35) den tatsächlich gemessenen axialen Temperaturprofilen während des Dosierens gegenübergestellt. Abbildung 44 zeigt hierbei die Messkurve und die Repräsentation durch die Modelle für den mittleren Messsensor (Messposition 3).

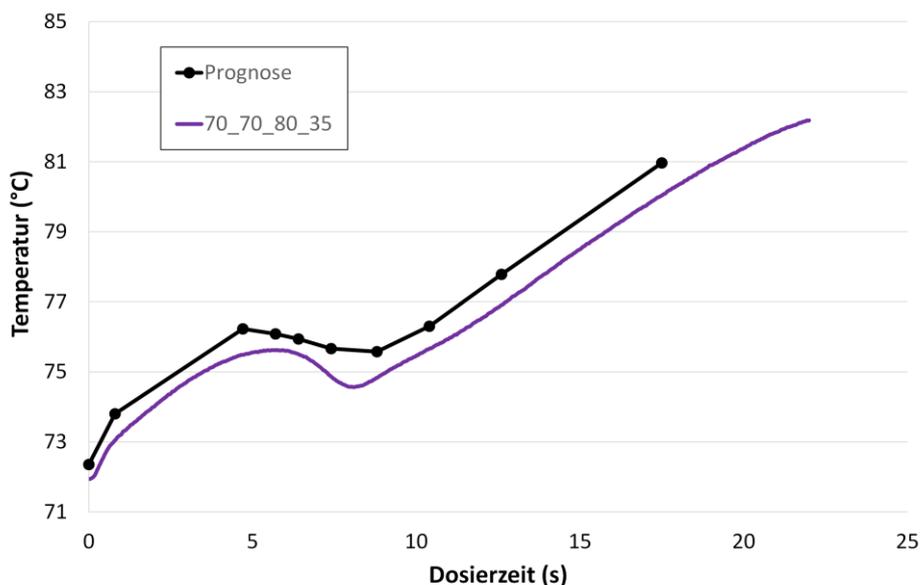


Abbildung 44: Darstellung des gemessenen Kurvenverlaufs mithilfe mathematischer Modelle, nichtsignifikante Abweichung, 70_70_80_35, Messposition 3

Die Diskussion der Ergebnisse wird anhand der Darstellung der Zentralpunkt Messung gewählt, da eine ungenaue Repräsentation aufgrund gekrümmter Modelle hier am deutlichsten sichtbar wäre. Tabelle 7 und Tabelle 8 zeigen das zur Erstellung der Prognose verwendete Modell anhand der Regressionsgleichungen für die einzelnen Positionen.

Tabelle 7: Modell (Position 0 bis 7) zur Repräsentation des axialen Temperaturprofils, dargestellt anhand von Regressionsgleichungen, nichtsignifikante Abweichung zwischen Prognose und gemessenem Wert, 70_70_80_35, M1-Schnecke

Regressionsgleichung	Prognose für 70_70_80_35	Gemess. Wert	Abw.
Faktoren und Koeffizienten (/)	(°C)	(°C)	(°K)
0 (0s) = 2,81 + 0,11*T _{Einzug} + 0,98*T _{Plastifizierzylinder} + 0,01*Drehzahl - 0,06*Staudruck	72,36	72,06	0,30
1 (0,8s) = -4,29 + 0,20*T _{Einzug} + 1,04*T _{Plastifizierzylinder} + 0,03*Drehzahl + 0,02*Staudruck	73,80	73,24	0,56
2 (4,7s) = -27,9 + 0,46*T _{Einzug} + 1,19*T _{Plastifizierzylinder} + 0,34*Drehzahl + 0,43*Staudruck - 0,01*T _{Einzug} *Staudruck - 0,01*Drehzahl*Staudruck	76,23	75,63	0,60
3 (5,7s) = -29,5 + 0,47*T _{Einzug} + 1,22*T _{Plastifizierzylinder} + 0,38*Drehzahl + 0,44*Staudruck - 0,01*T _{Einzug} *T _{Plastifizierzylinder} - 0,01*T _{Einzug} *Staudruck - 0,01*Drehzahl*Staudruck	76,09	75,70	0,39
4 (6,4s) = -30,5 + 0,49*T _{Einzug} + 1,22*T _{Plastifizierzylinder} + 0,40*Drehzahl + 0,48*Staudruck - 0,01*T _{Einzug} *Staudruck - 0,01*Drehzahl*Staudruck	75,94	75,59	0,35
5 (7,4s) = -2,57 + 0,16*T _{Einzug} + 1,13*T _{Plastifizierzylinder} - 0,02*Drehzahl + 0,08*Staudruck	75,66	74,93	0,73
6 (8,8s) = -67,1 + 0,84*T _{Einzug} + 1,75*T _{Plastifizierzylinder} + 0,84*Drehzahl + 0,78*Staudruck - 0,01*T _{Einzug} *T _{Plastifizierzylinder} - 0,01*T _{Einzug} *Drehzahl - 0,01*T _{Plastifizierzylinder} *Drehzahl - 0,01*T _{Plastifizierzylinder} *Staudruck - 0,01*Drehzahl*Staudruck	75,58	75,14	0,44
7 (10,4s) = -15,11 + 0,07*T _{Einzug} + 1,20*T _{Plastifizierzylinder} + 0,23*Drehzahl + 0,03*Staudruck	76,30	75,94	0,36

Tabelle 8: *Modell (Position 8 bis 9) zur Repräsentation des axialen Temperaturprofils, dargestellt anhand von Regressionsgleichungen, nichtsignifikante Abweichung zwischen Prognose und gemessenem Wert, 70_70_80_35, M1-Schnecke*

Regressionsgleichung	Prognose für 70_70_80_35	Gemess. Wert	Abw.
Faktoren und Koeffizienten (/)	(°C)	(°C)	(°K)
8 (12,6s) = -12,18 + 0,17*T _{Einzug} + 1,05*T _{Plastifizierzylinder} + 0,20*Drehzahl + 0,09*Staudruck	77,78	77,18	0,60
9 (17,5s) = -20,83 + 0,11*T _{Einzug} + 1,24*T _{Plastifizierzylinder} + 0,40*Drehzahl - 0,00*Staudruck	80,97	80,25	0,72

Es zeigt sich, dass das jeweilige errechnete Modell den gemessenen Kurvenverlauf mit einer Genauigkeit von +/- 1 °K annähern kann, weshalb es als gültiges Modell gewertet wird.

Nachdem die Gültigkeit der Modelle in Bezug auf die Repräsentation im vorigen Schritt bewiesen wurde, werden Messungen bei einer nicht im Zuge des Versuchsplans untersuchten Einstellung (Referenz) durchgeführt. Diese Einstellung hat die Faktorenlevels von 60_80_85_30.

Es wird eine Wiederholmessung mit fünf Zyklen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messung sind als Temperaturverlauf der vorhergesagten Prognose gegenübergestellt. Abbildung 45 zeigt die Gegenüberstellung für den mittleren Messsensor (Messposition 3).

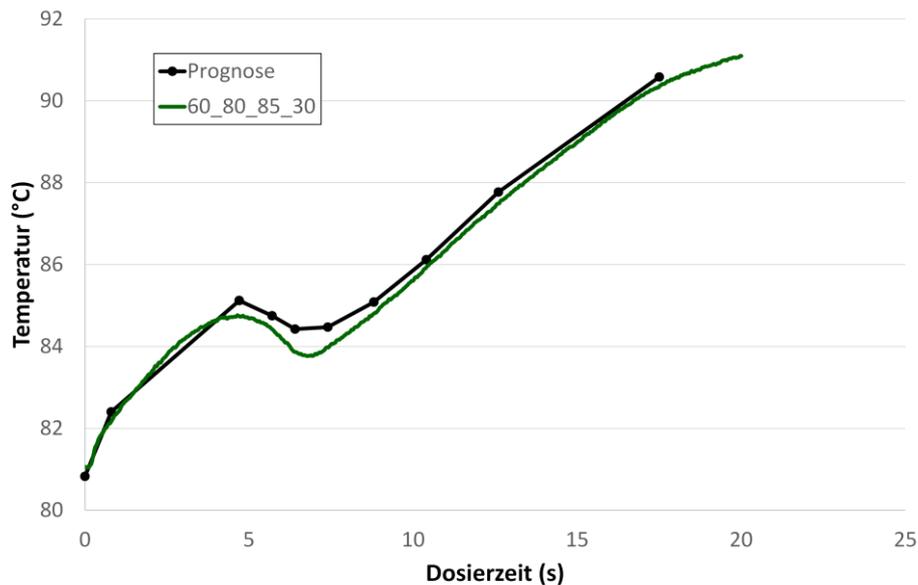


Abbildung 45: Darstellung des nicht im DoE enthaltenen, untersuchten Kurvenverlaufs mithilfe mathematischer Modelle, nichtsignifikante Abweichung, 60_80_85_30 (Referenz), Messposition 3

Es zeigt sich, dass die Vorhersage einer nicht im DoE enthaltenen Einstellung den tatsächlichen Kurvenverlauf sehr genau vorhersagen werden kann (± 1 °K). Deshalb wird das Modell für die Erfüllung der Funktion der Vorhersage als gültig übernommen.

5.1.3 Erstellung eines homogenen Temperaturprofils

Die gewonnenen Modelle sollen in weiterer Folge dazu benutzt werden, um während des Dosierens ein ebenes axiales Temperaturprofil zu erzeugen. Erreicht werden soll dies, indem die Drehzahl über ein Stufenprofil eingestellt wird. Da das Temperaturprofil im Inneren des Plastifizierzylinders bei gegebener Einzugs- und Zylindertemperatur beeinflusst werden soll, bleiben als veränderbare Faktoren nur Drehzahl und Staudruck übrig. Es wird die Drehzahl als einzige Größe zur Beeinflussung des Temperaturprofils gewählt, da sich an der Maschine ein Drehzahlprofil einstellen lässt. Diese Umschaltung funktioniert schneller als es manuell über ein Drehen des Staubolzens zur Beeinflussung des Staudrucks möglich wäre.

Bei der Einstellung 60_80_90_20 wird der Einfluss verschiedener Drehzahlprofile auf die sich ergebenden Temperaturverläufe an den unterschiedlichen Messstegpositionen untersucht. Die Einstellung kann also folgendermaßen bezeichnet werden: 60_80_Profil_20. Die Dosierzeit von 18 s wird so aufgeteilt, dass sich bei

bestimmten Zeitpunkten, ausgewählt aus den 10 Zeitpunkten für die Modellerstellung, die Drehzahl ändert. Das Drehzahlprofil gibt an, dass für 4,7 s mit 50 U/min, dann für 2,7 s mit 80 U/min, danach für 5,2 s mit 40 U/min und abschließend für 5,4 s mit 30 U/min dosiert werden muss. Dieses Drehzahlprofil, nach mehreren Versuchen mit anderen Profilen gefunden, liefert die akkuratesten Ergebnisse. Die Vorhersage des Temperaturprofils und der tatsächliche Kurvenverlauf bei dem erwähnten Drehzahlprofil sind in Abbildung 46 für Messposition 3 dargestellt.

Dass der sich ergebende Kurvenverlauf im Allgemeinen von den Vorhersagen abweichen, kann dadurch begründet werden, dass alle Drehzahlen unter 70 U/min außerhalb des Rahmens des Versuchsplans liegen (Variation der Drehzahl zwischen 70 U/min und 90 U/min) und dadurch nicht ausreichend durch die Modelle beschrieben werden können.

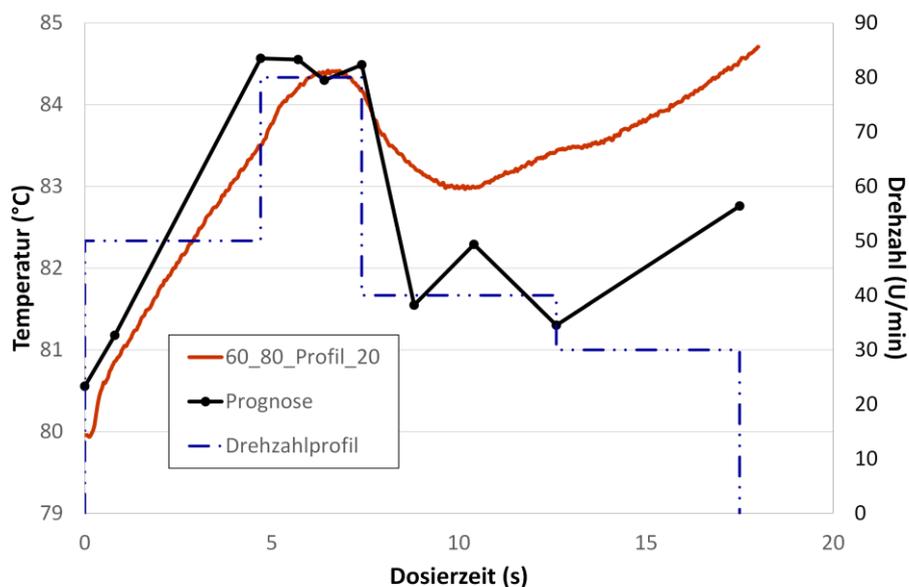


Abbildung 46: Einfluss der Drehzahl auf den Kurvenverlauf, Versuch ebenes Temperaturprofil zu erzeugen, 60_80_Profil_20, Position 3

Als homogen wird hier ein Profil bezeichnet, welches keinen Temperaturunterschied größer als 2 °K zwischen dem ersten Maximum und dem Dosierende bei 18 s aufweist. Der Anstieg bis zum ersten Maximum entsteht aufgrund des vom vorigen Zyklus „zu warmen“ Materials (siehe 4.1) und kann durch Veränderung der Drehzahl nicht auf ein „ebenes“ Maß verringert werden. Es ist also folglich nicht möglich, ein ebenes Temperaturprofil ausgehend von der Starttemperatur, in diesem Fall 80 °C, zu erzeugen.

Die in Abbildung 46 gezeigte Prognose kann das Temperaturprofil mit einer Abweichung von kleiner 2 °K vorhersagen, obwohl Teile des Drehzahlprofils außerhalb der Grenzen des Versuchsplans liegen. Mithilfe der erstellten Modelle kann folglich ein homogenes Temperaturprofil erzeugt werden.

5.1.4 Einflüsse der Hauptfaktoren auf das axiale Temperaturprofil

Abbildung 47 stellt axiale Temperaturverläufe einzelner Einstellungen einander gegenüber mit dem Ziel, wesentliche Einflüsse der Hauptfaktoren aufzuzeigen. Dabei werden zwei Einstellungen mit 60 °C Einzugs- und Plastifizierzylindertemperatur und zwei Einstellungen mit 80 °C derselben Faktoren gewählt. Nachdem die Einzugstemperatur in einem früheren Schritt (3.2) als nicht signifikanter Einfluss identifiziert worden ist, wird sie hier nicht variiert.

Von allen Einstellungen, die diese Kombination der Temperaturfaktoren haben, werden jene zwei gewählt, bei denen einerseits Drehzahl und Staudruck niedrig sind (70 U/min und 20 bar) und andererseits Drehzahl und Staudruck auf das hohe Niveau gesetzt sind (90 U/min und 50 bar). Diese Einstellungen werden gewählt, um die Einflüsse besser erkennen zu können. Zusätzlich wird noch die Zentralpunkt-Einstellung (70_70_80_35) dargestellt.

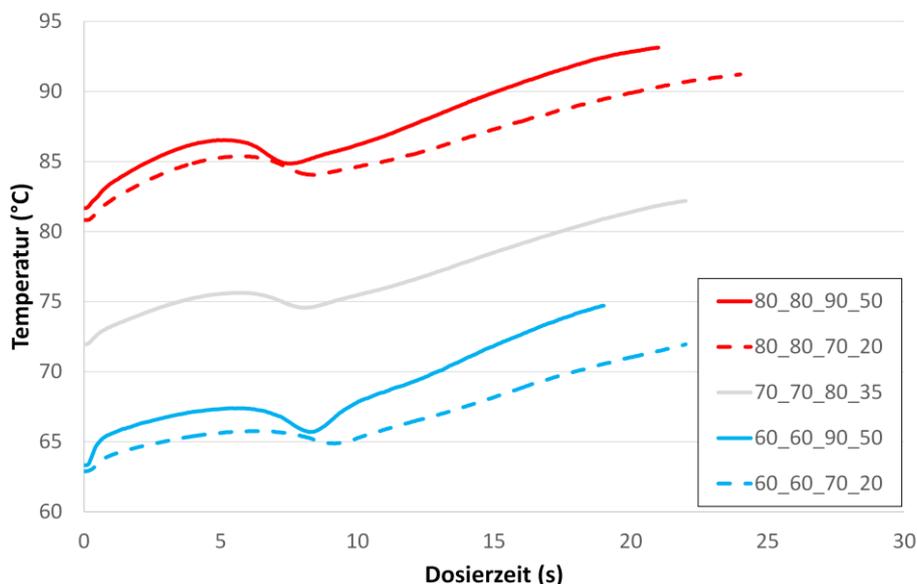


Abbildung 47: Einfluss der Hauptfaktoren auf das Massetemperaturprofil, verschiedene Einstellungen 80_80_70/90_20/50, 70_70_80_35, 60_60_70/90_20/50, Schnecke M1

Es zeigt sich, dass die Plastifizierzylindertemperatur einen signifikanten Einfluss hat, da eine Veränderung dieser das Temperaturniveau des ganzen Verlaufs beeinflusst. Ebenso haben Drehzahl und Staudruck einen Einfluss, da eine Erhöhung der beiden Faktoren eine Erhöhung der Massetemperatur zur Folge hat. Der Verlauf der Zentralpunkt-Messung liegt mit einem ähnlichen Anstiegsverhalten genau zwischen den Einstellungen bei niedriger und hoher Plastifizierzylindertemperatur.

Bei Betrachtung des Modells in 5.1.2 können die mittleren Einflusswerte der jeweiligen Hauptfaktoren berechnet werden. So ergeben sich gereiht nach der Höhe des Wertes beginnend mit dem Höchsten ein Einfluss (Koeffizient) der Plastifizierzylindertemperatur von 1,09, ein Einfluss von 0,31 für die Einzugstemperatur, ein Einfluss von 0,29 für die Drehzahl und ein Einfluss für den Staudruck von 0,24. Die Plastifizierzylindertemperatur kann eindeutig als größter Einflussfaktor auf die Massetemperatur bestimmt werden. Der Einfluss ist bei allen Einstellungen positiv, was bedeutet, dass eine Erhöhung dieser zu einer Erhöhung der Massetemperatur führt. Die Einzugstemperatur ist als nicht signifikant bestimmt worden. Es wird daher beschlossen bei der MK-Schnecke nur mehr die Drehzahl und den Staudruck zu variieren, während die Einzugstemperatur bei 60 °C und die Plastifizierzylindertemperatur bei 80 °C konstant gehalten werden.

5.2 Temperaturprofile der MK-Schnecke (L/D ~ 15)

Die Ergebnisse für die Temperaturprofile der kernprogressiven Schnecke werden auf Basis der Messungen gemäß reduziertem Versuchsplan ausgewertet. Der verwendete Versuchsplan ist reduziert (Tabelle 4).

Im Folgenden werden die Temperaturprofile der MK-Schnecke verwendet, um weitere mathematische Modelle zu generieren, welche auf Repräsentations- und Vorhersagefähigkeit untersucht werden. Die axialen Temperaturprofile entsprechen in ihrer Verlaufsform jenen der M1-Schnecke. Abbildung 48 zeigt den Kurvenverlauf für die MK-Schnecke anhand der Center-Point Einstellung 60_80_80_35 für Messposition 3.

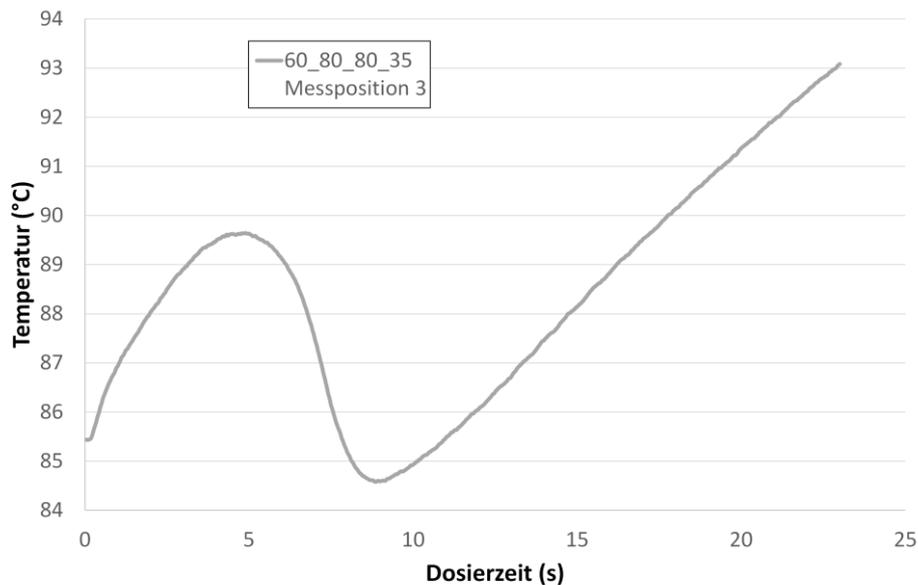


Abbildung 48: Axialer Kurvenverlauf der MK-Schnecke, 60_80_80_35

5.2.1 Vorstellung des Modells – mathematische Repräsentation und Vorhersage von Ergebnissen

Im Folgenden wird daher nur beurteilt, inwieweit die Vorhersagen die Verläufe annähern können, sondern auch ob die gewählten Punkte eine ausreichende Aussagekraft darstellen. Wie zuvor (5.1.2), wird zuerst die Repräsentationsfähigkeit der mathematischen Modelle bei der Darstellung der gemessenen Kurvenverläufe betrachtet. Da auch bei der Erstellung der Modelle für die MK-Schnecke hin und wieder signifikante Werte für die Krümmung berechnet werden, wird abermals die Center-Point Messung (60_80_80_35) zur Darstellung herangezogen um deren Einfluss zu überprüfen. Abbildung 49 zeigt den Kurvenverlauf und die Repräsentation dieses durch die mathematischen Modelle für die Messposition 3 am Temperaturmesssteg.

Es zeigt sich, dass die Modelle die Kurvenverläufe mit einer Abweichung von kleiner als ± 1 °K repräsentieren können, weshalb die Modelle zur weiteren Untersuchung unbekannter Einstellungen herangezogen werden können.

Ebenfalls wird festgestellt, dass die Kurvenverläufe der MK-Schnecke mit Wendepunkten und Extrema den vorher untersuchten Verläufen ähneln. Das kann darauf begründet werden, dass auch hier das Material nicht genug Zeit hat um abzukühlen, was sich in der Temperaturüberhöhung, die hier stärker ausgebildet ist, zu Anfang der Messung äußert (siehe 4.1).

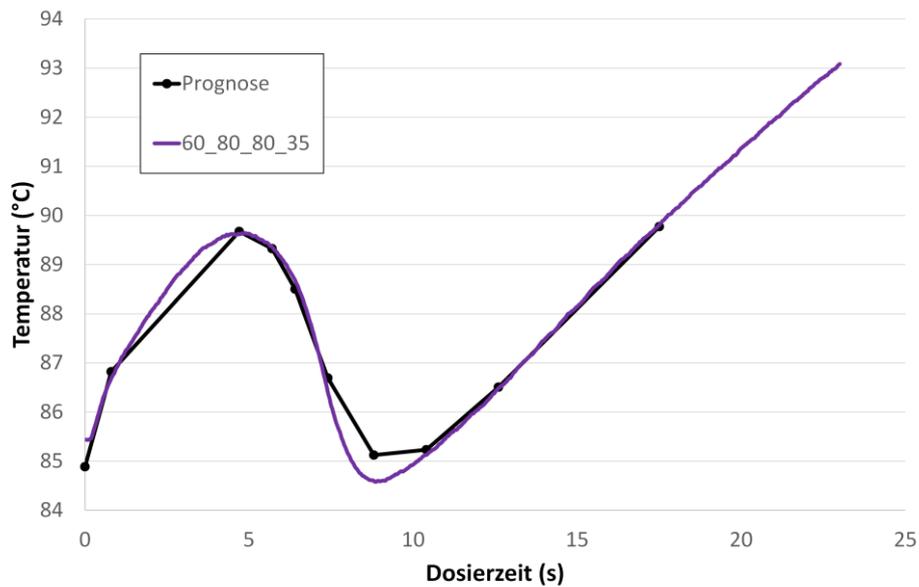


Abbildung 49: Darstellung des bekannten Kurvenverlaufs mithilfe mathematischer Modelle, nichtsignifikante Abweichung, 60_80_80_35, Messposition 3, MK-Schnecke

Das für die Erstellung dieser Prognose verwendete Modell ist in Tabelle 9 anhand der Regressionsgleichungen für die einzelnen Zeitpunkte für die Zentralpunkt-Messung 60_80_80_35 gezeigt.

Tabelle 9: Modell zur Repräsentation des axialen Temperaturprofils, dargestellt anhand von Regressionsgleichungen, nichtsignifikante Abweichung zwischen Prognose und gemessenem Wert, 60_80_80_35, MK-Schnecke

Regressionsgleichung	Prognose für 60_80_80_35	Gemessener Wert	Abweichung
Faktoren und Koeffizienten (/)	(°C)	(°C)	(°C)
0 (0 s) = 82,94 + 0,02*Drehzahl + 0,03*Staudruck	84,88	85,43	0,55
1 (0,8 s) = 83,52 + 0,03*Drehzahl + 0,03*Staudruck	86,82	86,69	0,13
2 (4,7 s) = 86,04 + 0,03*Drehzahl + 0,04*Staudruck	89,67	89,62	0,05
3 (5,7 s) = 88,31 - 0,01*Drehzahl + 0,05*Staudruck	89,32	89,36	0,04
4 (6,4 s) = 97,77 - 0,15*Drehzahl - 0,11*Staudruck	88,50	88,68	0,18
5 (7,4 s) = 95,11 - 0,13*Drehzahl + 0,07*Staudruck	86,69	86,40	0,29
6 (8,8 s) = 76,36 + 0,09*Drehzahl + 0,30*Staudruck	85,12	84,60	0,53
7 (10,4 s) = 76,85 + 0,10*Drehzahl + 0,07*Staudruck	85,23	85,13	0,11
8 (12,6 s) = 77,32 + 0,12*Drehzahl - 0,01*Staudruck	86,50	86,49	0,02
9 (17,5 s) = 77,27 + 0,16*Drehzahl - 0,01*Staudruck	89,77	89,81	0,03

In einem weiteren Schritt werden die erstellten Modelle überprüft, indem sie benutzt werden, um eine nicht im Rahmen des Versuchsplans enthaltene Einstellung vorherzusagen. Um einen Vergleich zur konstanten Schnecke zu ermöglichen, wird die Einstellung 60_80_85_30 gewählt. Abbildung 50 zeigt die Vorhersage der Einstellung für Messposition 3. Die Abweichungen bei Messposition 3 sind kleiner als +/- 1 °K.

Das Modell kann als gültig übernommen werden, da ebenjener Verlauf ausreichend genau vorhergesagt werden kann.

Es ist also auch für die MK-Schnecke trotz reduzierten Versuchsplans möglich, ein mathematisches Modell zu generieren, welches das axiale Temperaturprofil während des Dosierens sowohl für gemessene als auch nicht gemessene Einstellungen im Rahmen des Versuchsplans darstellen kann. Demnach ist auch die Annahme, die Einzugstemperatur nicht zu berücksichtigen, als richtig anzusehen.

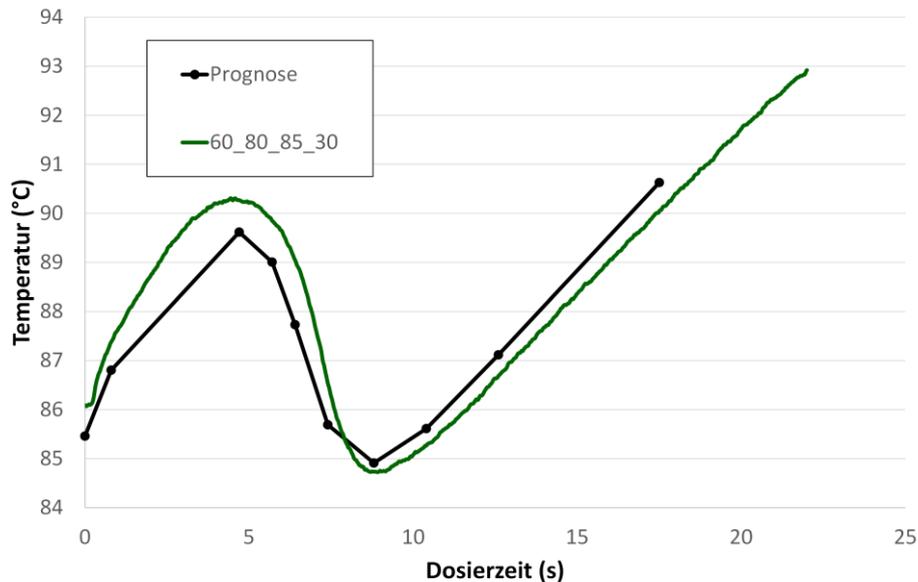


Abbildung 50: Darstellung des nicht im Versuchsplan enthaltenen Kurvenverlaufs mithilfe mathematischer Modelle, nichtsignifikante Abweichung, 60_80_85_30 (Referenz), Messposition 3, MK-Schnecke

5.2.2 Einflüsse der Hauptfaktoren auf das axiale Temperaturprofil

Bei den untersuchten Hauptfaktoren handelt es sich hier um die Drehzahl und den Staudruck. Die entsprechenden Einstellungen (70/90 U/min und 20/50 bar) sowie die Zentralpunkt-Einstellung sind in Abbildung 51 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Drehzahl einen Einfluss auf das Niveau des Temperaturprofils hat. Mit höherer Drehzahl können höhere Massetemperaturen erreicht werden. Der Staudruck hat einen geringen Effekt. Mit steigendem Staudruck steigt die Dosierzeit, der Kurvenverlauf ändert sich jedoch kaum. Die Zentralpunkt-Messung liegt mit 80 U/min abermals genau zwischen den Kurven. Die mittleren Einflusswerte ergeben für die Drehzahl einen Einfluss von 0,08 und für den Staudruck einen Einfluss von 0,07.

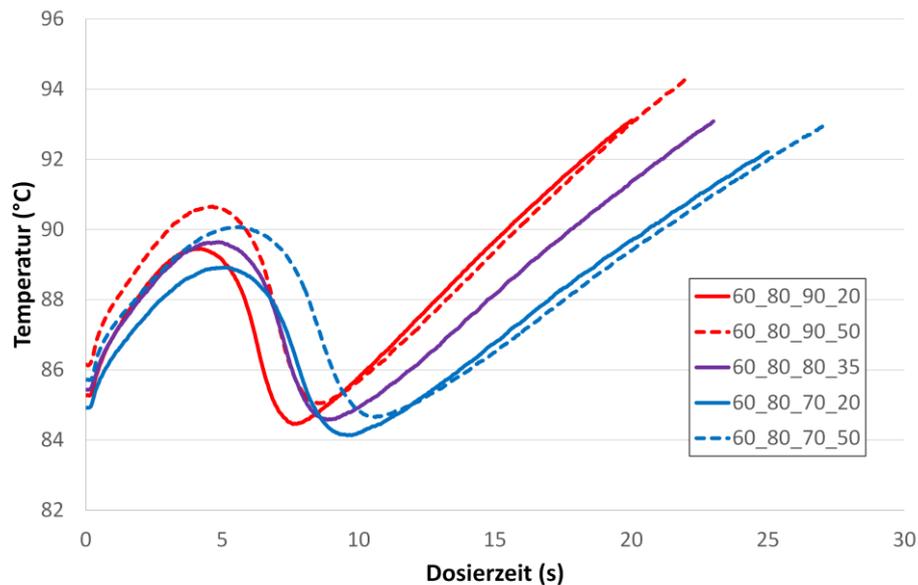


Abbildung 51: Einfluss der Hauptfaktoren auf das Massetemperaturprofil, verschiedene Einstellungen 60_80_70/80/90_20/35/50, MK-Schnecke

5.2.3 Schlussfolgerung Temperaturmessungen

Bis auf die Einzugstemperatur hat jeder Hauptfaktor einen signifikanten Einfluss auf das axiale Massetemperaturprofil bei beiden Schneckenkonfigurationen. Die Plastifizierzylindertemperatur wird als größter Einflussfaktor identifiziert. Sein Einflusswert ist um einen Faktor 10 höher als die der anderen Faktoren. Eine Erhöhung der Drehzahl und des Staudrucks bewirkt ebenfalls eine Erhöhung der Massetemperatur. Die gefundenen Abhängigkeiten gelten nur im Rahmen des Versuchsplans für die untersuchte EPDM-Mischung und für ein Dosiervolumen von 150 cm^3 .

Außerdem ist es möglich, mithilfe mathematischer Modelle ein Drehzahlprofil zu erstellen, welches ein homogenes Massetemperaturprofil erzeugt.

5.3 Ergebnisse der Umlaufströmungsuntersuchungen der M1-Schnecke (L/D ~ 11)

Die Ergebnisse der Umlaufströmungsuntersuchungen bei der M1-Schnecke basieren auf der Auswertung der Messungen gemäß reduziertem Versuchsplan (Einzugstemperatur gleich Zylindertemperatur, siehe Tabelle 3). Am Ende des fünften Messzyklus jeder Wiederholmessung wird das Material im Schneckenkanal vernetzt und die Umlaufströmung gemäß des beschriebenen Verfahrens (4.2) ausgewertet.

In Abbildung 52 ist der Verlauf der Ausbildung der Umlaufströmung gegenüber der abgewickelten Schneckenkanallänge beispielhaft für zwei Einstellungen (60_60_90_20 und 60_60_90_50) aufgetragen. Die Einstellungen werden deshalb zur Illustration gewählt, da sie im Folgenden beschriebene charakteristische Verläufe aufweisen.

Die eine Verlaufsform (hellblau) beschreibt eine Umlaufströmung, die sich bis zur Schneckenspitze noch nicht vollständig ausgebildet, also noch nicht 100 % erreicht hat. Die andere Verlaufsform (orange) erreicht schon vor der Schneckenspitze 100 % und ist damit vollständig ausgeprägt. Es wird festgestellt, dass in allen Fällen, in denen die zu einer vollständigen Ausprägung führende Verlaufsform auftritt, der Übergang auf die komplette Verwirbelung des Querschnitts ein sprunghafter ist (siehe 4.2.4).

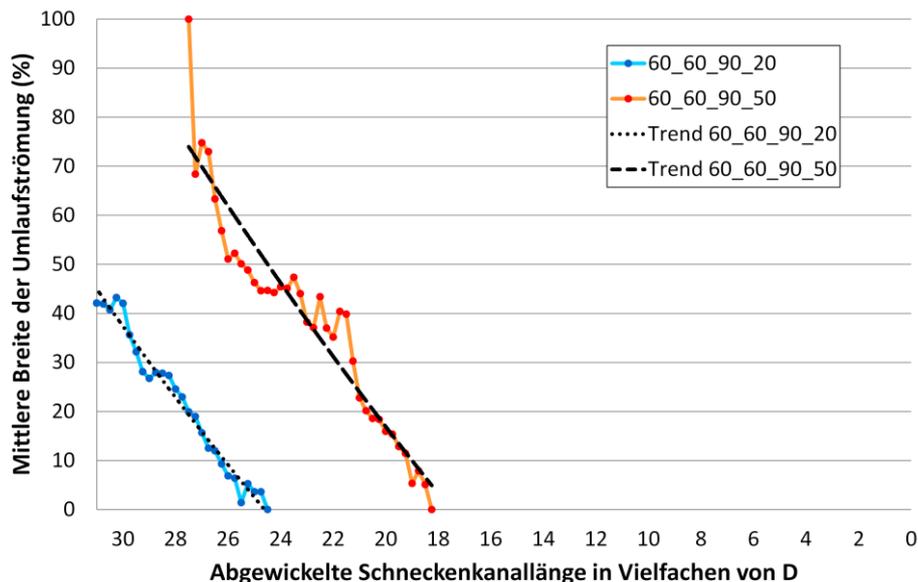


Abbildung 52: Darstellung der auftretenden Verlaufsformen der Umlaufströmung, 60_60_90_20 (hellblau), 60_60_90_50 (orange)

Des Weiteren fällt auf, dass der Beginn der Umlaufströmung jeweils an einer anderen Position entlang der abgewickelten Schneckenkanallänge in einem Vielfachen von D stattfindet. Dies wird auf die unterschiedlichen Einstellungen zurückgeführt.

Für alle untersuchten Einstellungen weisen die Ergebnisse ähnliche Verläufe und die oben genannten Eigenschaften auf. Im Folgenden werden daher nur die wichtigsten Erkenntnisse der Umlaufströmungsuntersuchungen beschrieben. Die Strömungsbilder der gezeigten Einstellungen sind im Anhang (siehe Anhang 9.5) beigefügt und werden weiter nicht im Detail besprochen.

5.3.1 Einfluss des Temperaturabfalls bei längerem Dosieren auf die Umlaufströmung

In diesem Abschnitt wird diskutiert, ob der Temperaturabfall, wie er bei den Temperaturprofiluntersuchungen beobachtet wird (siehe 5.1.1), einen Einfluss auf die Ausbildung der Umlaufströmung hat. Dazu werden bei der Einstellung 60_80_90_20 im Zuge jeweils einer Messung einmal 125 cm^3 und einmal 500 cm^3 dosiert und vernetzt. Bei 125 cm^3 wird für eine Dauer von 15 s dosiert, um einen sicheren Zeitpolster bis zum Auftreten des Temperaturabfalls zu haben. Um 500 cm^3 zu erzielen, wird für eine Dauer von 58 s dosiert, wobei sichergestellt wird, dass der Temperaturabfall auftritt. Die ausgewerteten Umlaufströmungen sind in Abbildung 53 dargestellt. Es wird festgestellt, dass der Temperaturabfall während des Dosierens tatsächlich einen Einfluss auf die Ausbildung der Umlaufströmung hat. Der Einfluss zeigt sich erst ab $25 D$, wo die Verläufe auseinander gehen, da der Temperaturabfall davor nicht auftritt. Während sich beim Dosieren von 125 cm^3 dem Trend folgend eine Umlaufströmung zu ungefähr 60 % ausbildet, erreicht die Umlaufströmung bei 500 cm^3 nur ein Niveau von ungefähr 45 %. Es wird vermutet, dass die Temperatur aufgrund von Wandgleiteteffekten abfällt, welche auch eine geringere Ausbildung der Umlaufströmung bewirkt. Die Wandgleiteteffekte haben also sowohl auf das Massetemperaturprofil als auch auf die sich bildende Umlaufströmung einen Einfluss. Eine Erforschung dieses Sachverhalts in Zukunft wäre interessant.

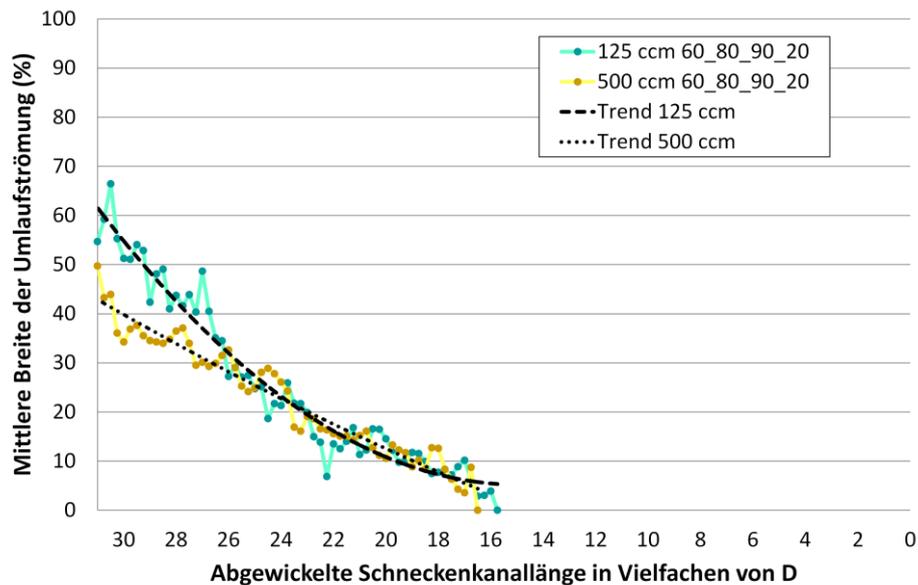


Abbildung 53: Vergleich Umlaufströmung bei unterschiedlichen Dosiervolumina, 125 ccm/500 ccm ohne/mit Temperaturabfall, 60_80_90_20

5.3.2 Betrachtung der Signifikanz verschiedener Parameter in Bezug auf die Umlaufströmung

Durch graphische Gegenüberstellung aller Ergebnisse lassen sich folgende Trends und Einflüsse der Parameter erahnen.

Abbildung 54 zeigt den Einfluss des Staudrucks auf die Umlaufströmung bei 60 °C Plastifizierzylindertemperatur. Es sind die Einstellungen 60_60_70_20 und 60_60_70_50 einander gegenübergestellt. Eine Erhöhung des Staudrucks um 30 bar bewirkt eine Verbesserung des Ausbildungsgrades der Umlaufströmung so weit, dass eine vollständige Ausprägung erzielt werden kann. Der Staudruck hat also einen positiven Einfluss auf die Umlaufströmung.

Dies kann erwartet werden, da bei höherem Staudruck, der Widerstand in Fließrichtung und damit die Verweilzeit höher ist, wodurch sich die Umlaufströmung früher (nach einer geringeren Anzahl von D der abgewickelten Schneckenlänge) auszubilden beginnt und dadurch höhere Niveaus erreichen kann.

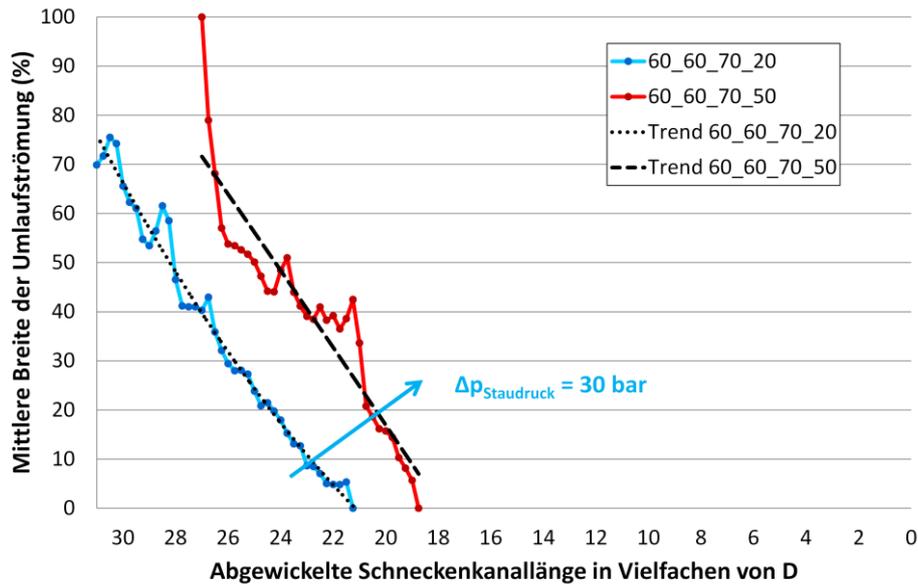


Abbildung 54: Positiver Einfluss des Staudrucks auf die Umlaufströmung, 60_60_70_20, 60_60_70_50

Ein ähnlicher Effekt des Staudrucks kann bei hoher Plastifizierzylindertemperatur beobachtet werden. Abbildung 55 stellt hierzu die Einstellungen 80_80_90_50 und 60_80_90_20 gegenüber. Eine Erhöhung des Staudrucks um 30 bar bewirkt auch hier eine Verbesserung des Ausbildungsgrades der Umlaufströmung, jedoch kann keine vollständige Ausbildung erreicht werden.

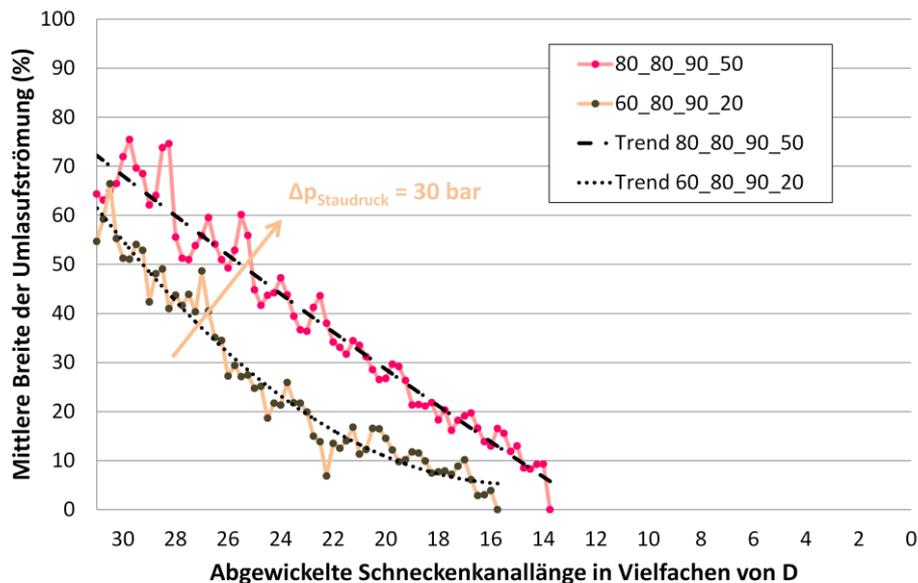


Abbildung 55: Positiver Einfluss des Staudrucks auf die Umlaufströmung, 80_80_90_50, 60_80_90_20

Der Staudruck hat also in jedem Fall einen positiven Effekt. Dieser wirkt sich in Abbildung 54 und Abbildung 55 in Form einer „Parallelverschiebung“ der Verläufe zu höheren Ausbildungsgraden aus. Eine 100 %-ige Umlaufströmung kann auch bei 60 °C Plastifizierzylindertemperatur erreicht werden. Bei dieser Plastifizierzylindertemperatur wird die vollständige Umlaufströmung schneller erreicht als bei 80 °C. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 56 anhand der Einstellungen 60_60_90_50, 80_80_90_50 und 60_80_90_20 visualisiert.

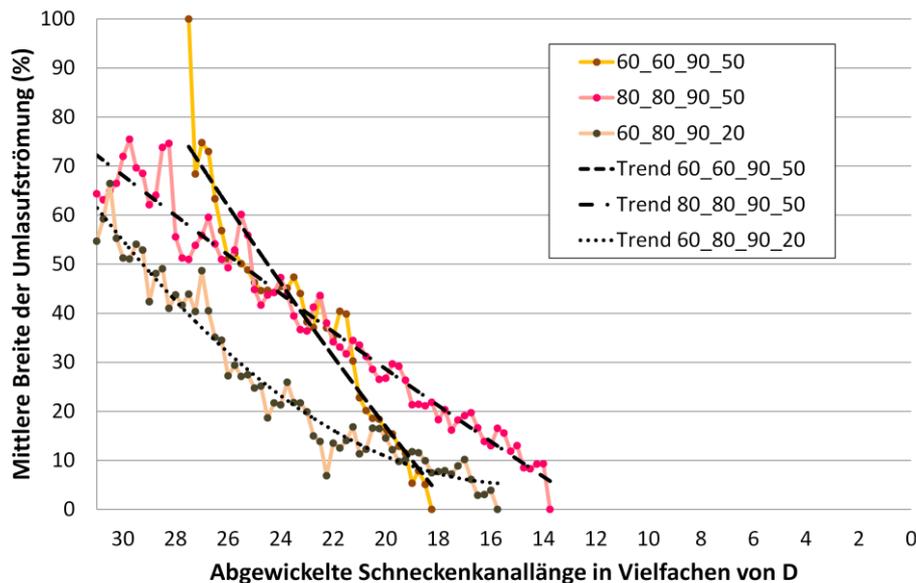


Abbildung 56: Erreichen einer vollständig ausgebildeten Umlaufströmung nur bei 60 °C Plastifizierzylindertemperatur möglich, 60_60_90_50, 80_80_90_50, 60_80_90_20

In Abbildung 57 wird der Einfluss der Drehzahl auf die Umlaufströmung untersucht. Die dargestellten Einstellungen sind 60_60_70_50, 60_60_90_50 und 60_60_70_20. Es zeigt sich, dass sich bei einer Erhöhung der Drehzahl um 20 min^{-1} die Verlaufsform nicht ändert, sondern nur um $0,5 D$ in Richtung Schneckenspitze verschoben wird. Bei einer Genauigkeit von $\pm 1 D$ kann geschlossen werden, dass die Drehzahl die Ausbildung der Umlaufströmung nicht beeinflusst.

Die Drehzahl kann auf zwei Arten wirken. Einerseits wird Material mit hohem Reibkoeffizienten mit höherer Drehzahl schneller Richtung Schneckenspitze gefördert, weshalb die Umlaufströmung weniger Zeit zur Ausbildung hat. Andererseits wird angenommen, dass durch die höhere Reibung bei erhöhter Drehzahl die Temperatur ansteigt. Dadurch wird das Material fließfähiger und die Umlaufströmung kann sich besser ausbilden. Möglicherweise überlagern sich die beschriebenen Effekte, was den nicht vorhandenen Einfluss auf die Umlaufströmung

erklärt. Der Einfluss der Drehzahl kann also im Zuge dieser Untersuchungen nicht ganz eindeutig definiert werden.

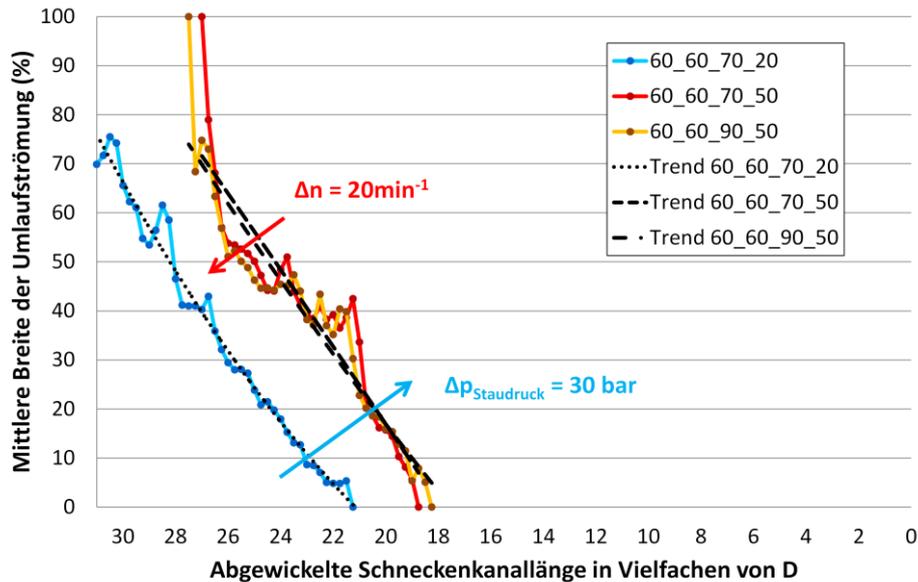


Abbildung 57: Kein Einfluss der Drehzahl auf die Umlaufströmung, 60_60_70_20, 60_60_70_50, 60_60_90_50

5.3.3 Untersuchung der Umlaufströmung mithilfe mathematischer Modelle

Ziel der Umlaufströmungsuntersuchungen ist es, den Umlaufströmungsverlauf mithilfe mathematischer Modelle darzustellen und vorhersagen zu können.

Abbildung 58 zeigt einen Vergleich der höchsten (80_80_90_50, HIGH) mit der niedrigsten (60_60_70_20, LOW) Einstellung gemäß reduziertem Versuchsplan (Tabelle 3) und der Zentralpunkt-Einstellung (70_70_80_35).

Dabei wird festgestellt, dass der Verlauf der Zentralpunkt-Einstellung nicht in der Mitte zwischen der HOCH- und der NIEDRIG-Einstellung, sondern näher an der HOCH-Einstellung liegt. Dies gilt besonders im Bereich der Entstehung der Umlaufströmung entlang der abgewickelten Schneckenkanallänge (80_80_90_50 bei 13,75 D, 70_70_80_35 bei 14,5 D, 60_60_70_20 bei 21,25 D). Dabei wird auch ersichtlich, dass die Maschineneinstellgrößen den Beginn der Umlaufströmung signifikant beeinflussen, aber nicht zwingend die resultierende Breite.

Daraus folgt, dass signifikante Nichtlinearitäten angenommen werden, wodurch ein erheblicher weiterer Versuchsaufwand nötig wäre, um aussagekräftige Modelle zu erstellen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es sich bei den gemessenen Ergebnissen um Momentaufnahmen der Umlaufströmung handelt.

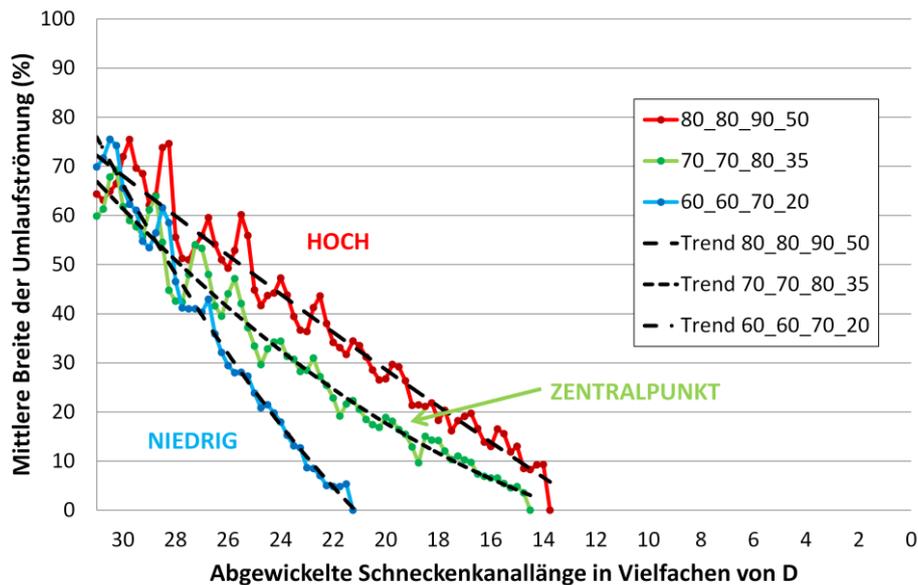


Abbildung 58: Signifikante Nichtlinearität der Ergebnisse, Vergleich der Einstellungen HOCH (80_80_90_50), ZENTRALPUNKT (70_70_80_35), NIEDRIG (60_60_70_20)

Die Erstellung von Modellen zur Vorhersage des Verlaufs kann nicht durchgeführt werden, da die Menge an Positionen, an denen für alle Einstellungen Daten existieren, zu klein ist um aussagekräftige Modelle zu liefern.

5.4 Ergebnisse der Umlaufströmungsuntersuchungen der MK-Schnecke (L/D ~ 15)

Unter Berücksichtigung der bei der Schnecke mit konstanter Gangtiefe erzielten Ergebnisse bezüglich Einflüsse der Faktoren wird festgestellt, dass der Staudruck den größten Einfluss auf die Umlaufströmung hat. Infolgedessen werden an der kernprogressiven Schnecke zwei Einstellungen untersucht, die sich allein durch den eingestellten Staudruck unterscheiden, nämlich 60_80_90_20 und 80_80_90_50.

Das vernetzte Material kann bei diesen Versuchen nicht von der Schnecke gelöst werden, ohne dass Teile des Schneckenkanals abreißen, siehe Abbildung 59. Die im Vergleich zur M1-Schnecke unterschiedliche Steigung und der Durchmesser erschweren das Schneiden mittels der Schneidvorrichtung, welche auf die M1-Schnecke ausgelegt ist. Eine Auswertung ist in diesem Fall nicht möglich beziehungsweise können die Ergebnisse nicht als aussagekräftig gewertet werden.

Es wird erwartet, dass sich aufgrund der Zwangsförderung und der mit der Kernprogressivität verbundenen längeren Verweilzeit die Umlaufströmung bei der MK-Schnecke schneller vollständig ausbildet als bei der M1-Schnecke (Abbildung 60).

Weitere Untersuchungen zur Umlaufströmung bei der kernprogressiven Schnecke mithilfe von Modellen oder anderen Methoden und Instrumenten werden im Zuge dieser Arbeit nicht vorgenommen.

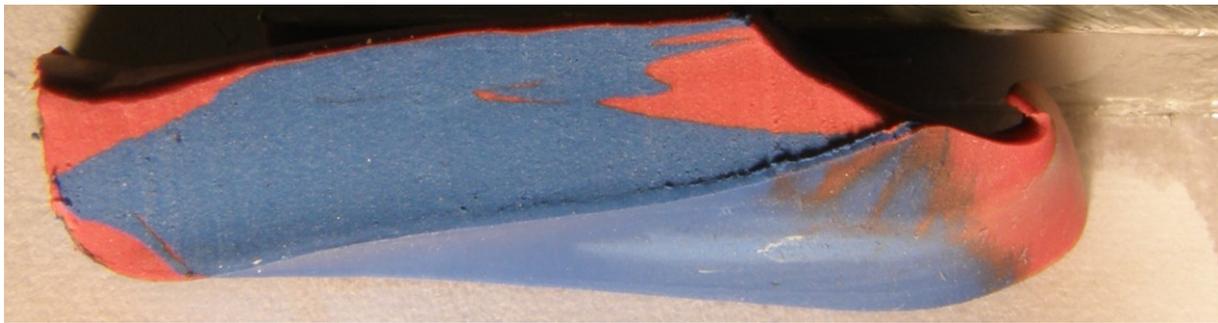


Abbildung 59: Schnittbild, Materialabriss im rechten oberen Bereich, aufgetreten bei Entnahme des Materials aus dem Schneckenkanal, 60_80_90_20, MK



Abbildung 60: Vergleich der Schnittbilder der MK-Schnecke (links) mit jenen der M1-Schnecke (rechts) an den Positionen 22,75 D (oben) und 27,25 D (unten), Tendenz der MK-Schnecke zu einer schnelleren vollständigen Ausbildung der Umlaufströmung, 60_80_90_20

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden für die Kautschuktype EPDM Versuche an einem neuentwickelten Schneckenprüfstand durchgeführt. Dieser Schneckenprüfstand, welcher der Nachbau der Spritzeinheit einer Kautschukspritzgießmaschine ist, bietet den Vorteil, dass die Schnecke im Inneren des Zylinders leicht zugänglich und austauschbar ist. Dadurch können Vernetzungsreaktionen im Schneckenkanal durchgeführt werden, welche Auskunft über die Ausbildung der Umlaufströmung geben sollen. Es werden also am Schneckenprüfstand Versuche gemäß einem Design of Experiments zu den Temperaturprofilen (axial und radial) im Inneren des Zylinders und zur Umlaufströmung mit zwei verschiedenen Schnecken durchgeführt. Das Ziel der Untersuchungen ist es, beide Temperaturprofile mithilfe mathematischer Modelle in Abhängigkeit der Dosierbedingungen vorausberechnen zu können. Daraus abgeleitet soll ein homogenes Temperaturprofil erzeugt und das Ausbildungsverhalten der Umlaufströmung beschrieben werden.

Die Ergebnisse für die Temperaturprofile zeigen, dass Modelle sowohl zur Repräsentation untersuchter axialer Temperaturprofile als auch zur Vorhersage unbekannter axialer Profile für beide Schneckentypen gefunden werden können. Dabei muss beachtet werden, dass die Vorhersage nur im Rahmen des untersuchten Versuchsplans gilt. Es gelingt mit einem Drehzahlprofil, ein homogeneres axiales Temperaturprofil zu erzeugen. Ebenfalls kann festgestellt werden, dass die Abweichungen im radialen Temperaturprofil so gering sind ($\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$), dass es als homogen angenommen werden kann. Im Zuge der Untersuchungen stellt sich auch heraus, dass die Faktoren Plastifizierzylindertemperatur, Drehzahl und Staudruck in dieser Reihenfolge einen signifikanten Einfluss auf den Verlauf des axialen Temperaturprofils haben.

Die Auswertung der Umlaufströmung erfolgt mit einer Geometrie-Software, wobei die mittlere Breite der Umlaufströmung, welche als Verwirbelung im Querschnitt auftritt, ins Verhältnis zur Gesamtbreite gesetzt wird und gegenüber der abgewickelten Schneckenkanallänge aufgetragen wird. Als signifikante Einflussfaktoren können hier die Plastifizierzylindertemperatur, die Drehzahl und der Staudruck bestimmt werden. Es wird festgestellt, dass für EPDM eine vollständige Ausbildung der Umlaufströmung bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ Plastifizierzylindertemperatur erzielt werden kann. Für die kernprogressive Schnecke können aufgrund von Problemen beim Ziehen der Schnecke nur Annahmen bezüglich der Umlaufströmung getroffen werden. Es wird erwartet, dass die Zwangsförderung eine verbesserte Ausbildung der Umlaufströmung bewirkt.

7 Literaturangabe

- [1] *Binder, W.*: Modellierung der Transportvorgänge in Einschneckenextrudern, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 1999
- [2] *Dealy, J. M.; Wissbrun, K. F.*: Melt rheology and its role in plastics processing, USA, Kanada, 1990
- [3] *DIN EN 60584-1:2014-07*: Thermoelemente – Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen, IEC 60584-1, 2013
- [4] *Fischer, M.*: Untersuchungen zum Anschmelzen und Ort der Schmelzewirbelbildung in Einschneckenextrudern, Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 1995
- [5] *Limper, A.; Barth, P.; Grajewski, F.*: Technologie der Kautschukverarbeitung, Hanser Verlag, 1989
- [6] *Maplan GmbH*: Maplan Elastomermaschinen, Ternitz, Austria
- [7] *Montgomery D.C.*: Design and Analysis of Experiments, International Student Version, Eighth Edition, 2013
- [8] *Röthemeyer, F.; Sommer, F.*: Kautschuktechnologie, Hanser Verlag, 2001
- [9] *Van Leeuwen, J.*: Stock Temperature Measurement in Plastifying Equipment, Plastics Research Institute TNO, Polymer Engineering and Science, Delft (Netherlands), April, 1967
- [10] *Reichelt Chemietechnik GmbH + Co.*:
<http://www.rct-online.de/media/image/chem-Formel-EPDM-1.jpg>, 21:15, 25.09.16
- [11] *Wikipedia*: https://de.wikipedia.org/wiki/Gau%C3%9Fsche_Trapezformel, 21:54, 25.09.2016
- [12] *Bader, M.*: MB-Ruler - das digitale Geometrie-Dreieck 5.3, <http://www.markusbader.de/MB-Ruler/download.d.php>, 22:01, 25.09.2016
- [13] *Röthemeyer, F.*: Rheologische und thermodynamische Probleme bei der Verarbeitung von Kautschukmischungen, Kautschuk + Gummi Kunststoffe, 28, 1975

- [14] *Egli, E.*: Der Spritzgießprozess unter besonderer Berücksichtigung verschiedener Elastomere, Spritzgießen Technischer Gummiformteile, VDI-Verlag, 1981
- [15] *Jennet, J.*: Thermic aspects of rubber injection molding, Rubber World, 190, 1984
- [16] *Hoffmann, W.*: Kautschuk-Technologie, Genter Verlag, Stuttgart, 1980
- [17] *Gernot, T., Harms, R., Kretschmar, G., Sunder, J.*: Qualitätsorientierte Herstellung von Gummiformteilen: Material-Werkzeug-Prozess, Kautschuk + Gummi Kunststoffe, 45, 1992
- [18] *Bowers, S.*: Prediction of elastomer flow in multi-cavity injection moulding, Plastics and Rubber Processing and Applications , 7, 1987
- [19] *Hohl, G, Kallien, L. H.*:Simulation beim Spritzgießen von EPDM, Kunststoffe, 90, 2000
- [20] *Fischer, M.*: Vergleich von Aufschmelzmodellen und Berechnung der Aufschmelzlänge, Studienarbeit Montanuniversität Leoben, 1995
- [21] *Tadmor, Z., Gogos, C.*: Principles of Polymer Processing, John Wiley&Sons, 1979
- [22] *Kerschbaumer, R., Lechner, B., Graninger, G., Haselmann, M., Friesenbichler, W.*: “A First Approach to Visualize the Flow Behavior in the Screw Channel for a CSM - Rubber Compound“, 25. Leobener Kunststoff-Kolloquium: Kunststoffgerechte Bauteilentwicklung - vom Werkstoff zum Produkt, Leoben, Austria, 2016.
- [23] *Kerschbaumer, R., Lechner, B., Graninger, G., Haselmann, M., Friesenbichler, W.*: “A First Approach to Visualize the Flow Behavior in the Screw Channel for a CSM - Rubber Compound“, International Rubber Conference, Kitakyushu, Japan, 2016.
- [24] *Kerschbaumer, R., Lechner, B., Graninger, G., Friesenbichler, W.*: “Characterization of the Temperature Profile during Dosing under Steady State Conditions by Means of a Specially Designed Test Stand“, Conference Proceedings of 32nd Annual Conference of Polymer Processing Society, Lyon, France, 2016.
- [25] *Graninger, G.*: Dependence of the filling behaviour of microstructures on their orientation on macro-scaled parts produced with injection moulding, Bachelor thesis, Montanuniversität Leoben, 2015

8 Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

a, b, c	Eckpunkte der Würfeldarstellung eines 2^3 faktoriellen Designs
A	Gewicht der Probe an der Luft (g)
A, B, C	Faktoren des faktoriellen Designs (allgemein)
CM	Compression Moulding
CSM	Chlorsulfonierter Polyethylen-Kautschuk
D	Durchmesser (mm)
DF	Drosselflansch
DoE	Design of Experiments
D_t	Totzeit (min)
Einzugs-Temp.	Einzugstemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
FIFO	First-In-First-Out
FILO	First-In-Last-Out
IM	Injection Moulding
L/D	Länge zu Durchmesser-Verhältnis
L_{sw}	Zur Schmelzewirbelbildung benötigte Länge
M1	Schnecke mit konstanter Gangtiefe
MK	Kernprogressive Schnecke
MW	Mittelwert
n, ns	Drehzahl (min^{-1})
p	mittlerer Druck des Feststoffes
P	Auftrieb (g)

8. Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

PCCL	Polymer Competence Center Leoben GmbH
Plast.-Zyl.Temp.	Plastifizierzylindertemperatur (°C)
Probennr.	Probennummer
p_{st}	Staudruck (bar)
RPA	Rubber Process Analyzer
RSS	Rückstromsperre
T_{Einzug}	Einzugstemperatur (°C)
TM	Transfer Moulding
$T_{Plastifizierzylinder}$	Plastifizierzylindertemperatur (°C)
T_v	Vorlagetemperatur (°C)
US	Umlaufströmung
v_r	Relativgeschwindigkeit zwischen Feststoff und Zylinderwand
vs.	Versus
x	Leveleinstellung
x_1, x_2, \dots, x_p	Kontrollierbare Prozessvariablen
x_i	Einflussreiche Parameter / Designfaktoren
y	Antwortwert des mathematischen Modells
y_1, y_2, y_3	Positionen zur Vermessung der Umlaufströmung
z_1, z_2, \dots, z_q	unkontrollierbare Variablen
ρ	Dichte des Materials (g/cm ³)
ρ_{korr}	Korrigierte Dichte (g/cm ³)
ρ_L	Luftauftrieb (g/cm ³)
ρ_w	Dichte des Wassers (g/cm ³)

9 Anhang

Im Anhang inkludiert sind die Kalibrierkurven für die Drucksensoren, die Dichtewerte des EPDM-Materials, die an Rückstromsperre und Drosselflansch gemessenen Staudruckwerte für die M1-Schnecke und die MK-Schnecke, die Kurvenverläufe für die axialen Temperaturprofile und die Umlaufströmung für alle Einstellungen für beide Schneckenkonfigurationen sowie die Schnittbilder der Umlaufströmungsuntersuchungen.

9.1 Kalibrierkurven der Drucksensoren

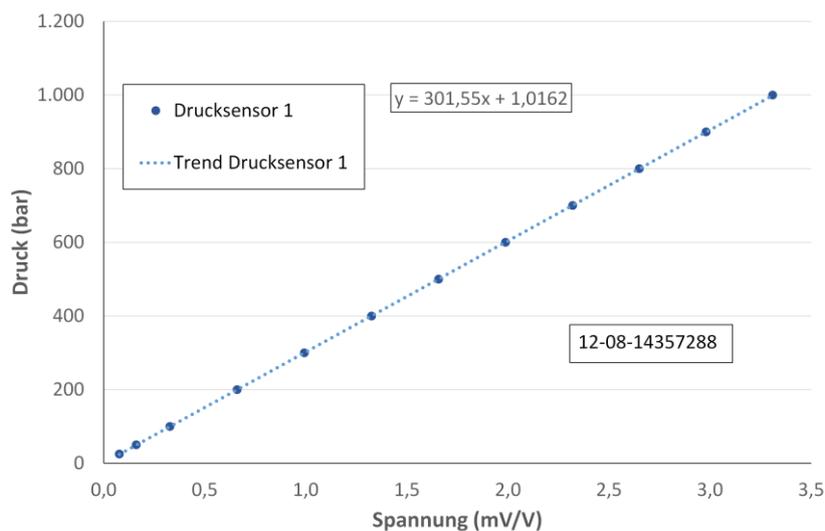


Abbildung 61: Kalibrierkurve für Drucksensor 1, Bezeichnung 12-08-14357288

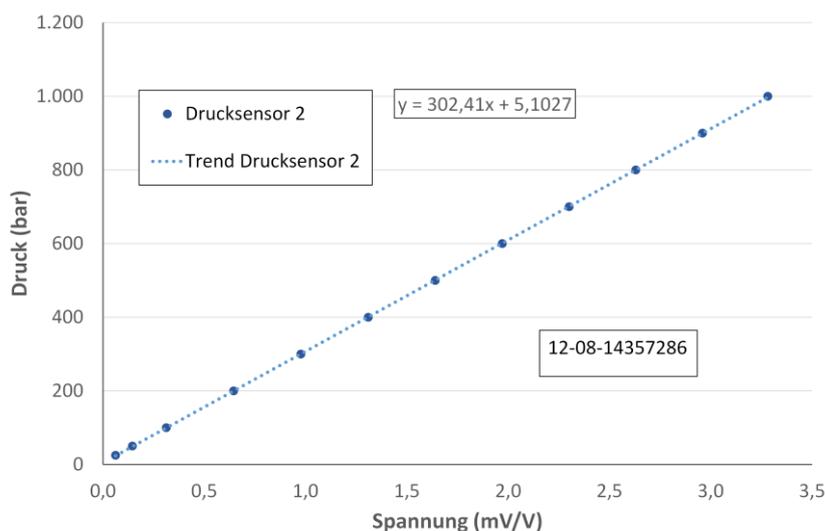


Abbildung 62: Kalibrierkurve für Drucksensor 2, Bezeichnung 12-08-14357286

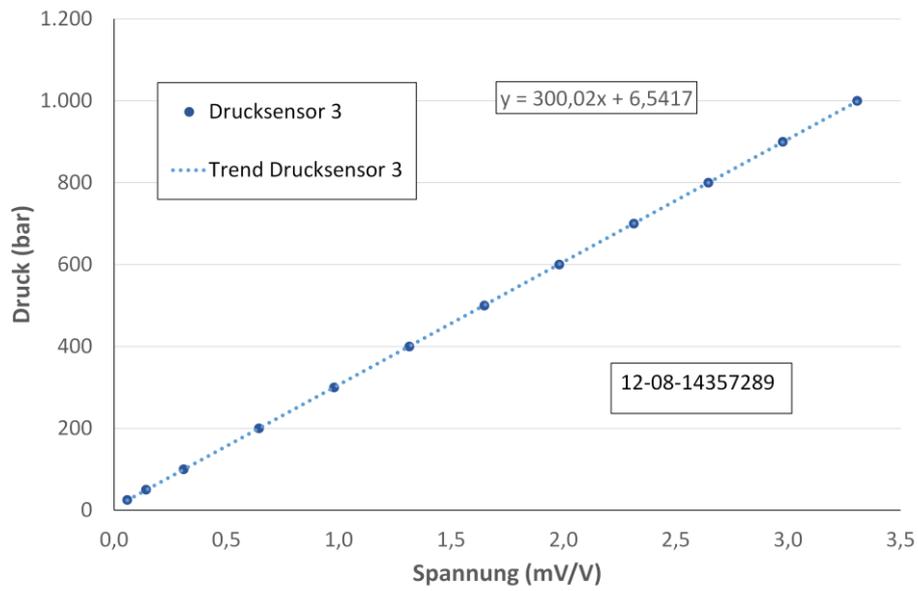


Abbildung 63: Kalibrierkurve für Drucksensor 3, Bezeichnung 12-08-14357289

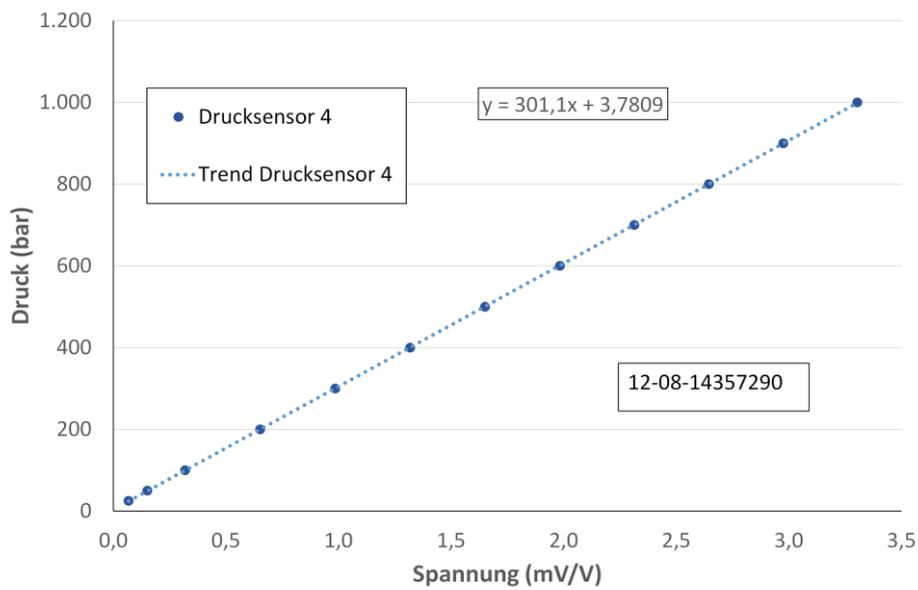


Abbildung 64: Kalibrierkurve für Drucksensor 4, Bezeichnung 12-08-14357290

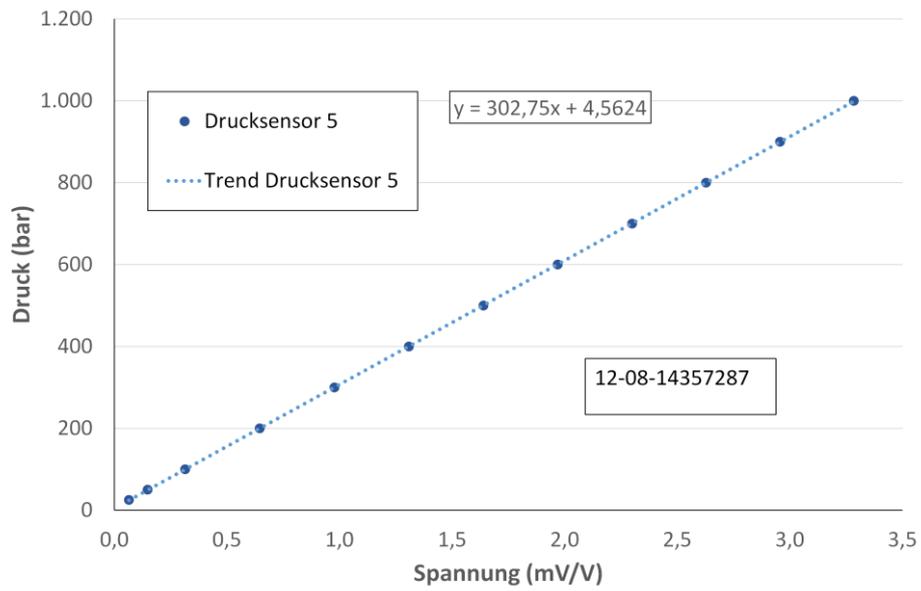


Abbildung 65: Kalibrierkurve für Drucksensor 5, Bezeichnung 12-08-14357287

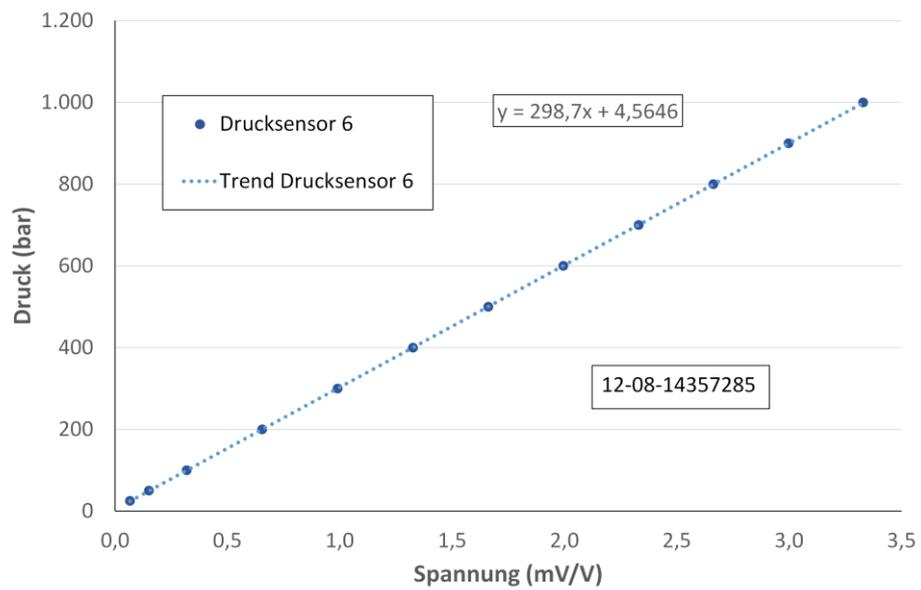


Abbildung 66: Kalibrierkurve für Drucksensor 6, Bezeichnung 12-08-14357285

9.2 Dichtewerte des EPDM-Materials

Tabelle 10: Gemessene Werte für Probenmasse (A) und Auftrieb (P), Dichte des Wassers bei 24,5 °C (ρ_W), Errechnung der Dichte des EPDM (ρ) und Korrektur um Luftauftrieb zu (ρ_{korr}), Verwendung der mittleren Dichte bei der Bestimmung der Dosierzeit

Probennr. (/)	A (g)	P (g)	ρ_W (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_{korr} (g/cm ³)	mittlere Dichte (g/cm ³)
1	2,0286	1,3334	0,99715	1,517	1,518	
2	2,1367	1,4002	0,99715	1,522	1,523	
3	1,5639	1,0312	0,99715	1,512	1,513	1,519
4	1,6789	1,1031	0,99715	1,518	1,519	
5	2,0694	1,3580	0,99715	1,520	1,521	

Dichte
$$\rho = \frac{A}{A-B} \times \rho_W = \frac{A}{P} \times \rho_W$$

Dichte korr.
$$\rho_{korr} = \rho + \rho_L$$

$$\rho_W = 0,99715 \text{ g/cm}^3 \text{ bei } 24,5 \text{ °C Wassertemperatur (destilliert)}$$

$$\rho_L = 0,0012 \text{ g/cm}^3$$

Proben wurden stochastisch aus einem Streifen Material (von einer Rolle) mit einer Länge von 1 m entnommen.

A Masse an der Luft

B Masse im Wasser

P Auftrieb

ρ Dichte EPDM

ρ_W Dichte Wasser

ρ_{korr} Korrigierte Dichte (inkl. Luftauftrieb)

ρ_L Luftauftrieb

9.3 Staudruckwerte gemessen an Rückstromsperre (RSS) und Drosselflansch (DF)

Tabelle 11: Staudruckwerte als Differenz aus Druck DF und Druck RSS, M1-Schnecke

Einzugs- Temp. (°C)	Plast.Zyl.- Temp. (°C)	Drehzahl (min⁻¹)	Staudruck (bar)	Druck RSS (bar)	Druck DF (bar)	Staudruck (bar)
80	60	90	50	99,03	149,16	50,13
60	60	90	50	107,68	154,86	47,18
60	80	90	50	84,97	136,27	51,30
60	60	70	50	109,47	158,58	49,11
80	60	70	50	104,61	156,67	52,06
60	60	70	20	109,47	129,35	19,88
70	70	80	35	89,47	125,06	35,59
60	80	70	50	85,35	135,59	50,24
80	80	70	50	83,30	134,61	51,31
80	80	90	20	84,49	104,84	20,35
60	60	90	20	107,68	127,13	19,45
80	60	70	20	104,61	125,35	20,74
80	80	70	20	83,30	104,34	21,04
60	80	90	20	84,97	104,76	19,79
80	60	90	20	99,03	119,02	19,99
80	80	90	50	84,49	134,42	49,93
60	80	70	20	85,35	106,29	20,94

Tabelle 12: Staudruckwerte als Differenz aus Druck DF und Druck RSS, MK-Schnecke

Einzugs- Temp. (°C)	Plast.Zyl.- Temp. (°C)	Drehzahl (min⁻¹)	Staudruck (bar)	Druck RSS (bar)	Druck DF (bar)	Staudruck (bar)
60	80	90	50	94,40	143,73	49,33
60	80	80	35	96,77	130,18	33,40
60	80	70	50	94,38	146,22	51,85
60	80	90	20	94,40	115,20	20,80
60	80	70	20	94,38	114,54	20,16

9.4 Diagramme für axiale Temperaturprofile (M1 & MK) und Umlaufströmungen (M1)

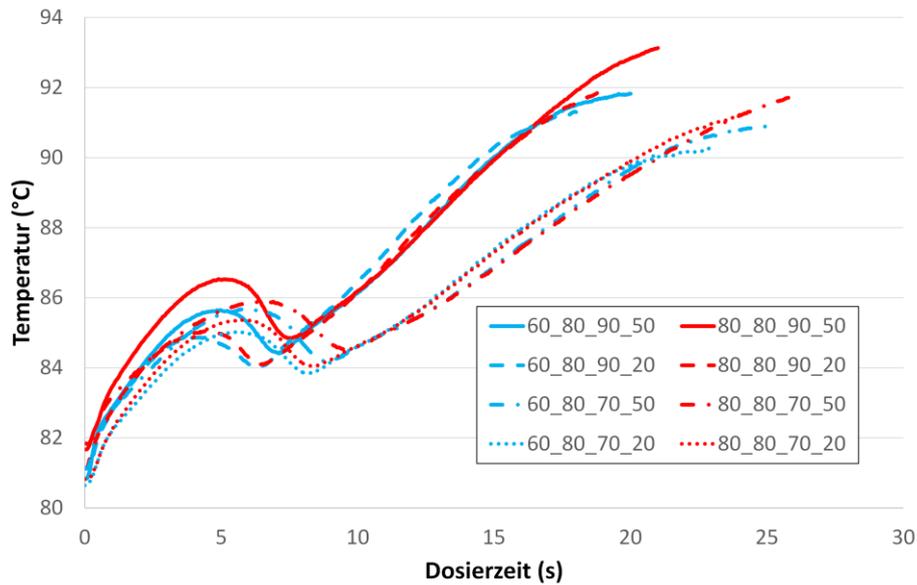


Abbildung 67: Axiale Temperaturprofile für alle Einstellungen mit 80 °C Plastifizierzylindertemperatur gemäß Tabelle 2, gemessen an Position 3 des Messstegs, M1-Schnecke

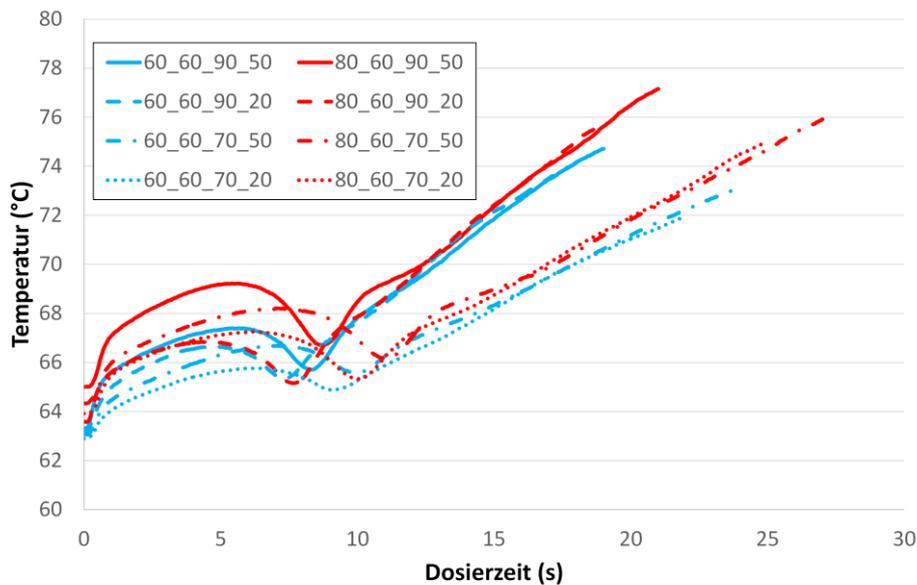


Abbildung 68: Axiale Temperaturprofile für alle Einstellungen mit 60 °C Plastifizierzylindertemperatur gemäß Tabelle 2, gemessen an Position 3 des Messstegs, M1-Schnecke

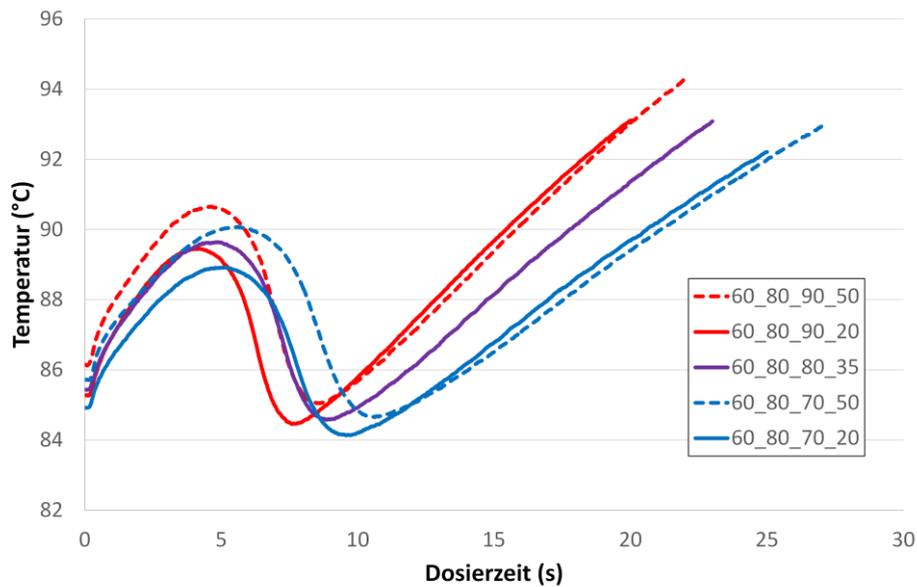


Abbildung 69: Axiale Temperaturprofile für alle Einstellungen gemäß Tabelle 4, gemessen an Position 3 des Messstegs, MK-Schnecke

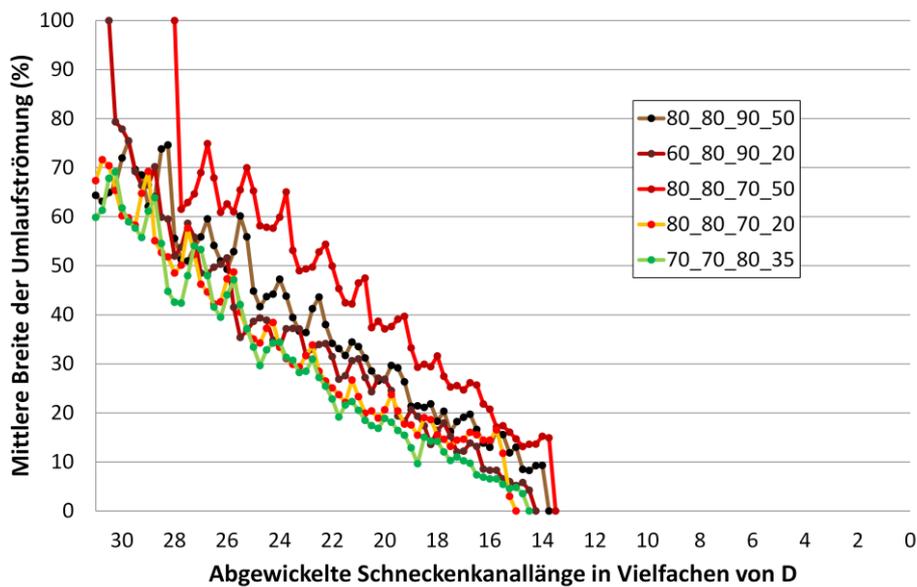


Abbildung 70: Ausbildung der Umlaufströmung für alle Einstellungen bei 80 °C Plastifizierzylindertemperatur sowie für die Zentralpunkt Messung 70_70_80_35 gemäß Tabelle 3, M1-Schnecke

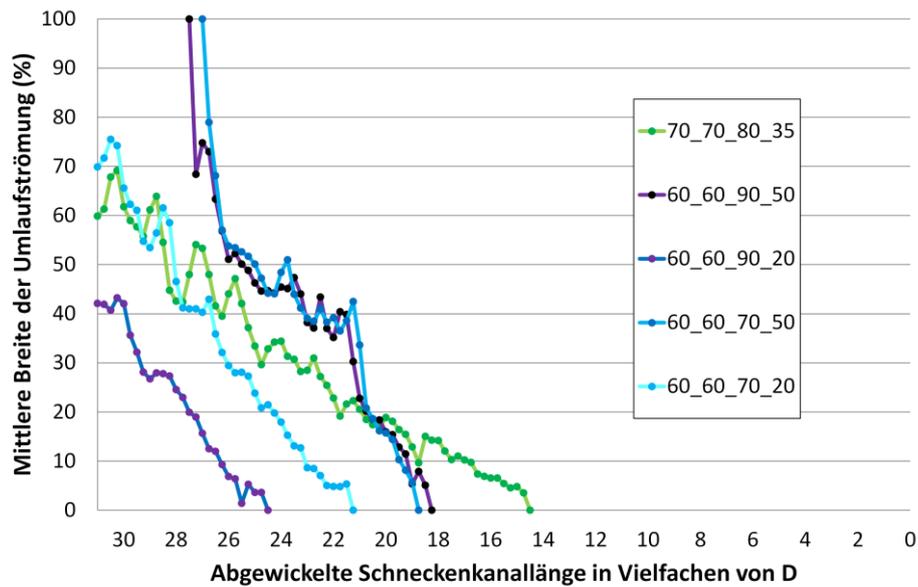


Abbildung 71: Ausbildung der Umlaufströmung für alle Einstellungen bei 60 °C Plastifizierzylindertemperatur sowie für die Zentralpunkt Messung 70_70_80_35 gemäß Tabelle 3, M1-Schnecke

9.5 Schnittbilder der Umlaufströmungsuntersuchungen (M1)

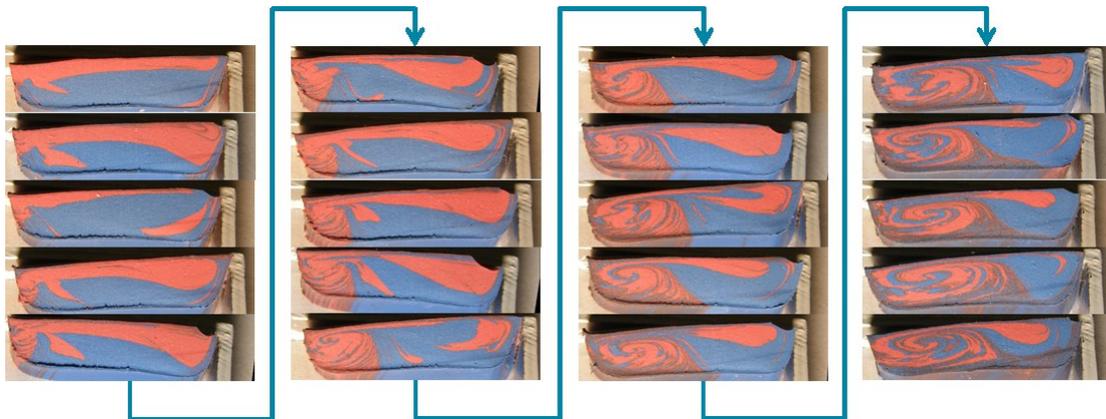


Abbildung 72: Schnittbilder; Einzugsbereich links oben, Schneckenspitze rechts unten, alle D, 80_80_90_50

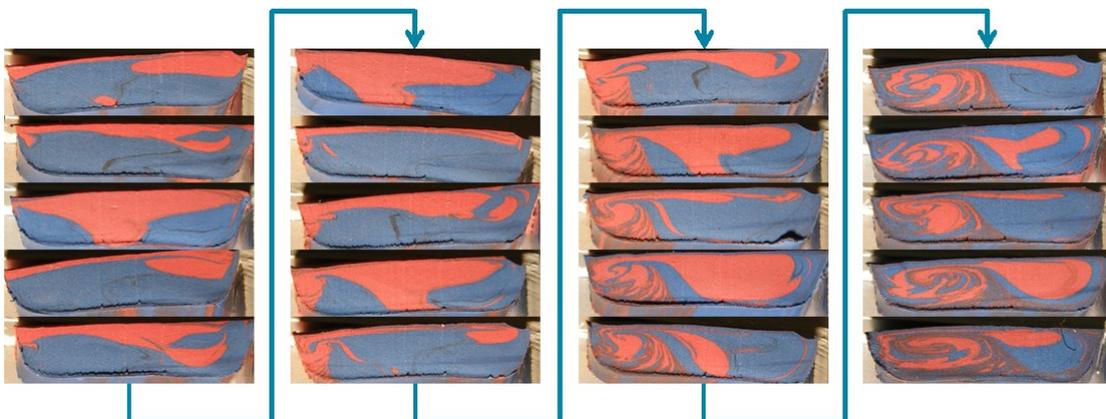


Abbildung 73: Schnittbilder; Einzugsbereich links oben, Schneckenspitze rechts unten, alle D, 80_80_90_20

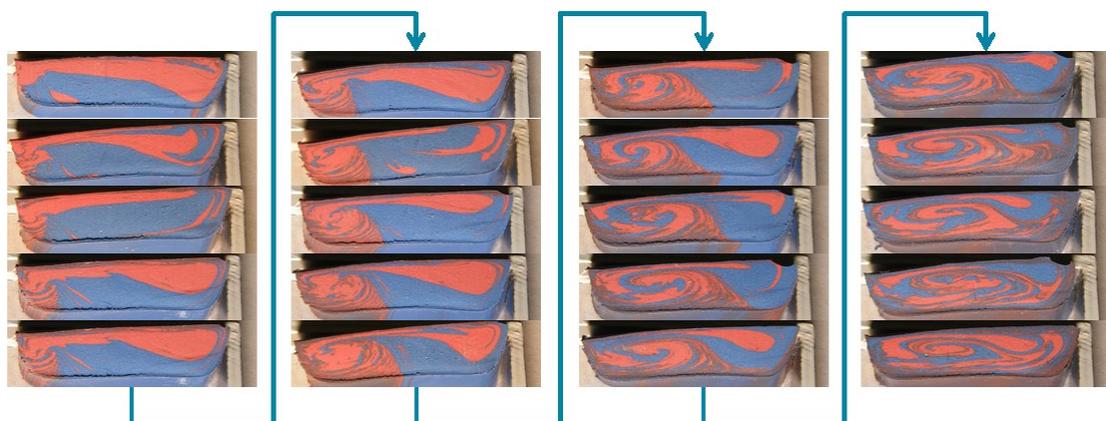


Abbildung 74: Schnittbilder; Einzugsbereich links oben, Schneckenspitze rechts unten, alle D, 80_80_70_50

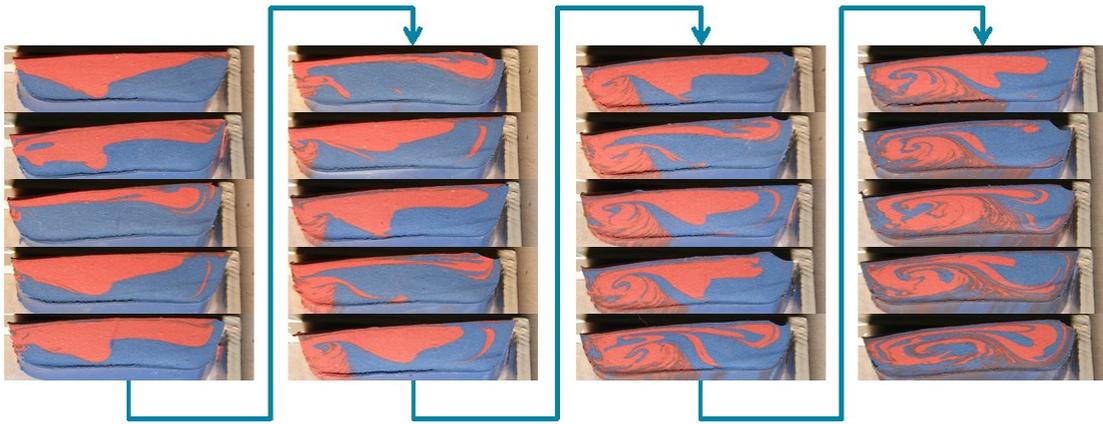


Abbildung 75: Schnittbilder; Einzugsbereich links oben, Schneckenspitze rechts unten, alle D, 80_80_70_20

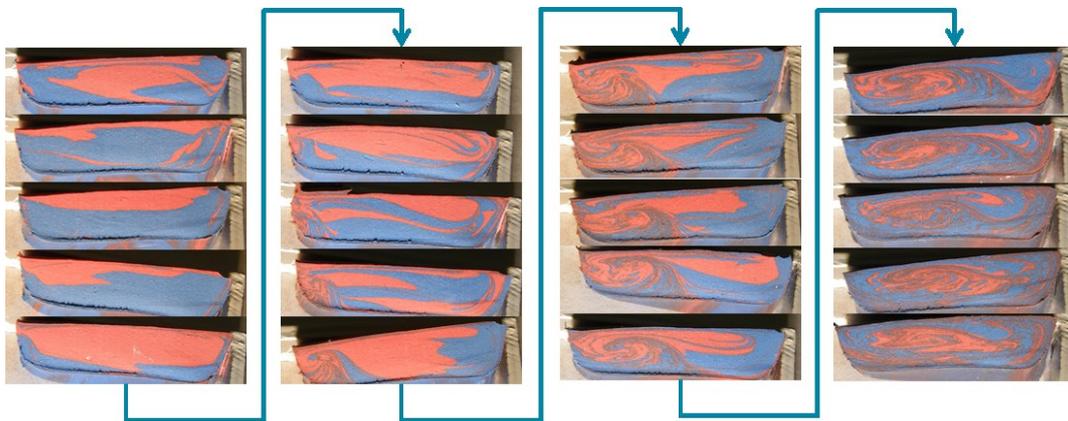


Abbildung 76: Schnittbilder; Einzugsbereich links oben, Schneckenspitze rechts unten, alle D, 60_60_90_50

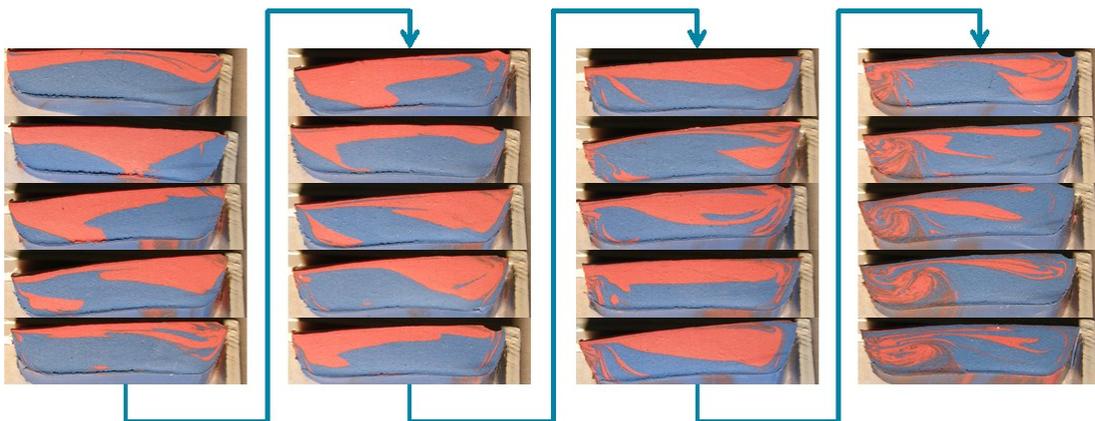


Abbildung 77: Schnittbilder; Einzugsbereich links oben, Schneckenspitze rechts unten, alle D, 60_60_90_20

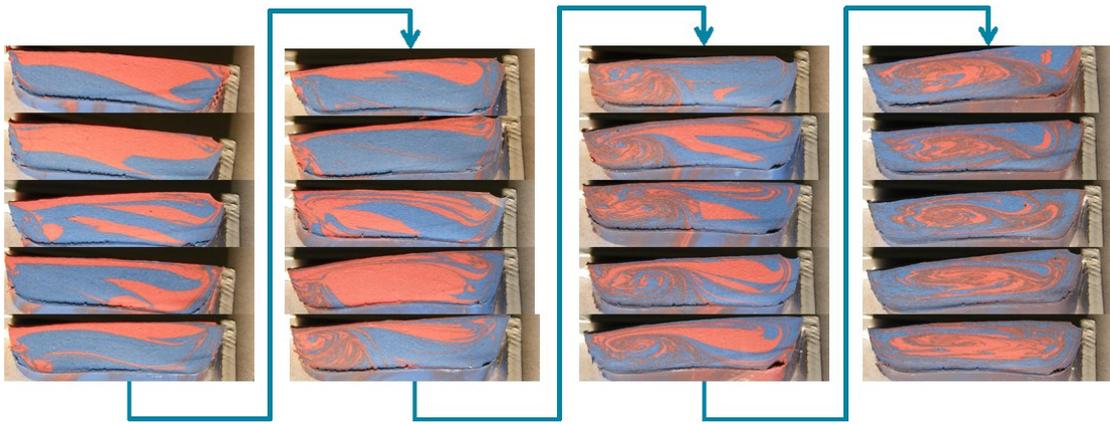


Abbildung 78: Schnittbilder; Einzugsbereich links oben, Schneckenspitze rechts unten, alle D, 60_60_70_50

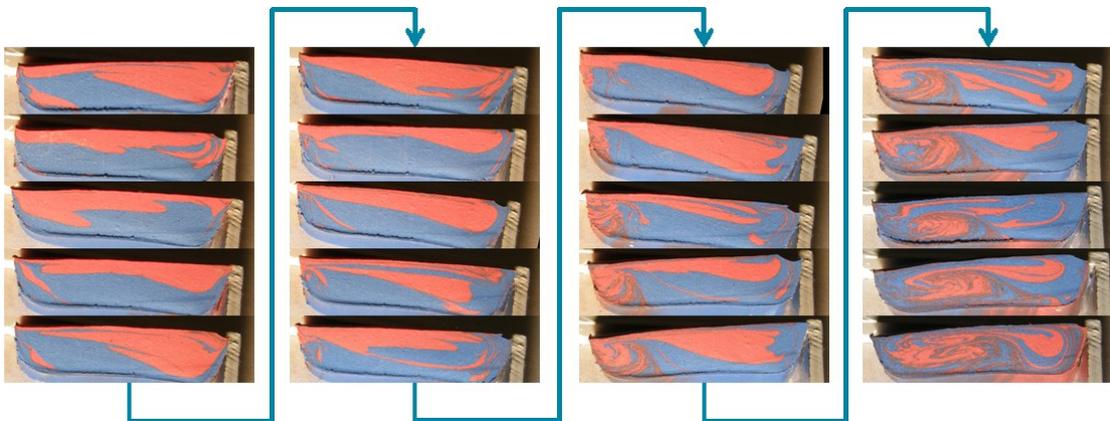


Abbildung 79: Schnittbilder; Einzugsbereich links oben, Schneckenspitze rechts unten, alle D, 60_60_70_20

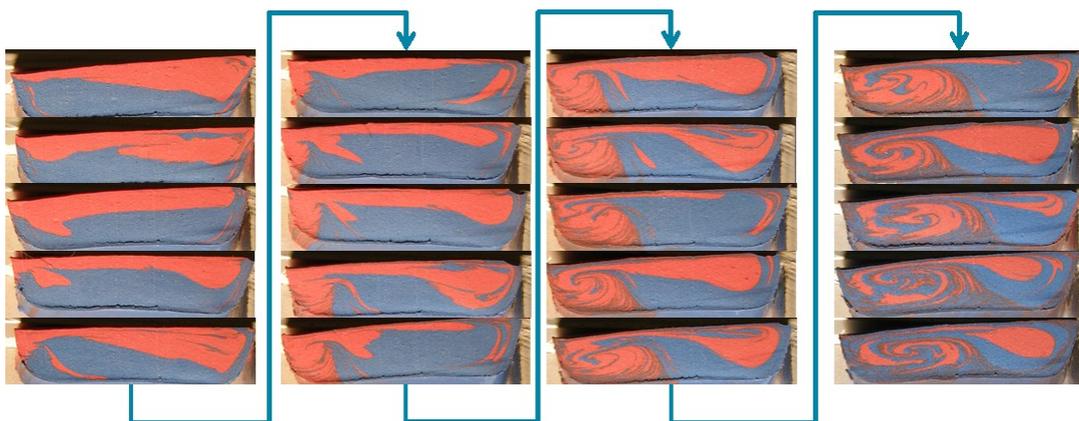


Abbildung 80: Schnittbilder; Einzugsbereich links oben, Schneckenspitze rechts unten, alle D, 70_70_80_35