

Abschlussbericht

zum Thema

Bestimmung der lokalen thermischen Belastung der Schmelze bei der Extrusion in einem Zweischneckenextruder

MBFSt-Kennziffer: 3324

Wibke Schmitt*, Tobias Teumer#, M. Azad Emin*

* Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik, Bereich I: Lebensmittelverfahrenstechnik,
Karlsruher Institut für Technologie

#Institut für Prozessmesstechnik und innovative Energiesysteme, Hochschule Mannheim

Antragsteller und Kontaktperson: Dr.-Ing. M. Azad Emin, Email: azad.emin@kit.edu,
Tel: +49 (0)721 608-48311, Fax: +49 (0)721 608-45967,
Postanschrift: Kaiserstr. 12, D-76131 Karlsruhe.

1. Einleitung

Extrusion ist ein weit verbreiteter thermo-mechanischer Verarbeitungsprozess, der in vielen verschiedenen Industriezweigen eingesetzt wird. Insbesondere in der Lebensmittelindustrie existiert eine Vielfalt an extrudierten Produkten. Es können Zerealien, texturierte Sojaproteine als Fleischersatz, Snacks auf Stärkebasis, Flachbrote u.v.m. produziert werden. Um den gesundheitlichen Nutzen der Produkte für den Endverbraucher zu erhöhen, wird in der aktuellen Forschung u.a. das Einbringen von sekundären Pflanzenstoffen untersucht. So können die beim Verbraucher akzeptierten Produkte genutzt werden, um ein „gesünderes Snacken“ zu ermöglichen. Sekundäre Pflanzenstoffe reagieren häufig empfindlich auf thermische Belastungen. Daher ist eine definierte Prozessführung wichtig. Die verschiedenen Anwendungen unterscheiden sich hinsichtlich des Durchsatzes und der Prozessparameter. So können Durchsätze von wenigen hundert Gramm bis mehrere Tonnen pro Stunde bei Drehzahlen von 30 bis 1800 min⁻¹ erreicht werden. Aufgrund unterschiedlicher Drehzahlen und einer guten Durchmischung im Extruder variieren die thermo-mechanischen Belastungen des Produktes entlang der Schnecke. Energiedissipation durch Reibung und der Temperatureinfluss des Gehäuses führen zu einem inhomogenen radialen und axialen Temperaturprofil. Um physikalische Umwandlungsprozesse oder chemische Reaktionen kontrollieren und regeln zu können, muss demzufolge betrachtet werden, wie lange die verschiedenen Volumenelemente höheren Temperaturen ausgesetzt sind. Hier sind insbesondere auftretende Temperaturspitzen, denen das Produkt im Extruder ausgesetzt ist, von Interesse. Das Wissen um lokale Temperaturverteilungen kann somit bei der Entwicklung neuer Produkte und Rezepturen helfen. Hierbei können frühzeitig kritische Positionen im Prozess identifiziert werden, an denen es zu unkontrollierten Reaktionen kommen kann. Auch in der permanenten Prozessüberwachung sind diese Informationen hilfreich. So weist eine Änderung von Temperaturspitzen frühzeitig auf eine Änderung im Prozess hin. Bisher gibt es verschiedene Methoden, lokale Temperaturen im Extruder zu bestimmen. Intensiv untersucht wurde insbesondere der Temperaturverlauf in der Düse oder im Bereich zwischen dem Ende der Schnecken und der Düse. Diese Methoden sind ausreichend, um einen groben Eindruck von der Temperatur der Schmelze zu erhalten. Es ist jedoch nicht möglich, genaue Temperaturschwankungen oder radiale Temperaturverläufe zu quantifizieren [1]. Um Temperaturprofile messen zu können, gibt es verschiedene Ansätze, bei denen mehrere Thermoelemente im Düsenkanal angeordnet wurden [2], [3]. Hier konnten radiale Temperaturverteilungen aufgezeichnet werden. Allerdings beeinflussen die Sensoren den Fluss in der Düse stark und haben eine langsame Reaktionszeit (unter 1 Hz). Um eine höhere örtliche Auflösung der Temperaturmessungen bei geringerer Beeinflussung der Strömung zu erzielen, haben Rasid et al. 2003 [4] und Kelly et al. 2006 [5] Netze aus Thermoelementen eingesetzt. Mit diesen konnte der Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die radiale Temperaturverteilung am Ende des Extruders ermittelt werden. Nur wenige Arbeiten beschäftigen sich jedoch mit der Bestimmung der radialen Temperaturverteilungen im Bereich der sich drehenden Schnecken. Bur et al. 2004 [6] benutzten eine nicht-invasive Fluoreszenzmethode, um das radiale Temperaturprofil im Schneckenbereich zu bestimmen. So konnten sie bei niedrigen Schneckendrehzahlen für einen Einschneckenextruder zeigen, dass die höchsten Temperaturen im Bereich der höchsten Scherkräften vorkommen [7]. Insgesamt lässt sich aber sagen, dass es noch keine Methode gibt, die es erlaubt, ein radiales Temperaturprofil entlang der Schnecken zu bestimmen [8]. Deshalb soll im Rahmen dieser Arbeit, in Kooperation mit dem Institut für Prozessmesstechnik und innovative Energiesysteme der Hochschule Mannheim unter Leitung von Prof. Dr. Matthias Rädle, eine Messmethode entwickelt und aufgebaut werden. Anschließend soll diese neue Methode im Verfahren eingesetzt und getestet

und im weiteren Verlauf des Projektes verbessert werden. Da Infrarot-Sensoren eine nicht-invasive, schnelle Temperaturmessmethode bilden, welche die Strömung im Extruder aufgrund der optischen Messweise nicht beeinträchtigen, wird sich diese Arbeit auf die Infrarottechnik konzentrieren. IR-Sensoren besitzen eine hohe Frequenzrate (bis mind. 100 Hz), daher sind schnelle Messungen möglich. Bei 100 Hz kann jede 10 ms eine Messung durchgeführt werden. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit ein Infrarot-Sensor entwickelt und verwendet, um die lokale Temperaturverteilung im Schneckenenteil des Extruders aufzuzeigen.

2. Material und Methoden

Als Rohmaterialien wurden Weizenmehl und Maisstärke eingesetzt. Weizenmehl Typ 405 wurde bezogen von der Getreidemühle Decker & Mönch. Maisstärke C*Gel 03401 wurde bezogen von Cargill, Deutschland; im Weiteren nur noch als Maisstärke bzw. Stärke bezeichnet. Bei den herkömmlichen Temperaturmessgeräten handelt es sich um zwei NiCr-Ni(K) Pt-100 Widerstands-Temperaturfühler des Herstellers Almemo Messgeräte von Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, Deutschland. Der Temperatursensor des Extruders ist auch ein Pt-100. Der verwendete NIR-Sensor wurde mit Hilfe der Hochschule Mannheim geplant, entworfen und aufgebaut.

Zur Normung des NIR-Sensors sind konstante Extrusionsbedingungen, vor allem eine gleichbleibende Temperatur und stationäre Bedingungen nötig. Um den Emissionsgrad untersuchen zu können, wird eine konstante Temperatur benötigt. Zur Gewährleistung einer konstanten Temperatur wird eine konstante Strömung gebraucht. Hierfür sind Pt-100s geeignet und geben genaue Temperaturmesswerte aus. Aus diesem Grund wird ein Messkanal, auch Messkanal genannt, aufgebaut. Außerdem ist im Messkanal der Vergleich zwischen den Pt-100 und dem NIR-Sensor möglich und somit die Temperaturabhängigkeit bestimmbar. Er besteht aus Edelstahl mit einem innenliegenden 10 mm hohen Kanal. Zum Konstanthalten der Temperatur wird ein Heizmantel benutzt. Dieser wird um den Messkanal herum gelegt und befestigt. Zum Heizmantel gehört ein weiterer Pt-100, welcher die Messkanalwandtemperatur misst und so den Heizvorgang kontrolliert. Der Messkanal wird mittels eines Adapters an das Ende des Extruders geschraubt.

Die Experimente werden in einem Doppelschneckenextruder Modell ZSK 26 Mc des Herstellers Coperion GmbH, Stuttgart, durchgeführt. Hierbei handelt es sich um einen gleichläufigen Doppelschneckenextruder mit einem Schneckendurchmesser von 25,5 mm und einem Verhältnis von Gesamtlänge zu Schneckendurchmesser von 29. Das Gehäuse ist unterteilt in sieben Zonen, jedes einzelne Gehäuse-teil separat beheiz- bzw. kühlbar. Der Extruder ist, wie erwähnt, aufgebaut aus sieben Gehäuseteilen, danach folgt die Düse bzw. eine Düse als Verbindungsstück und der Messkanal. Während der Experimente wird die Drehzahl zwischen $180-1100 \text{ min}^{-1}$ variiert, sowie der Wassergehalt zwischen etwa 16-27 % und die Temperatur zwischen $60-180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ verändert. Im ersten Teil des Extruders wird das Mehl bzw. die Stärke mit Wasser vermischt und dann im weiteren Verlauf durch die thermische und mechanische Beanspruchung, hervorgerufen durch die Rotation der Schnecken, plastifiziert.

3. Ergebnisse und Diskussion

Der Emissionsgrad der Stärkeschmelzen ist unbekannt; es ist nur bekannt, dass das Material als realer Körper einen Emissionsgrad $E < 1$ besitzt. Jedoch variiert das Material durch Stärkedegradation und bei verschiedenen Drehzahlen, Wassergehalten und Temperaturen. Es gilt zu untersuchen, ob der Emissionsgrad der Stärkeschmelzen immer gleich ist oder mit verschiedenen

Extrusionsbedingungen variiert. Sind Informationen über den Emissionsgrad vorhanden, so sind Temperaturmessungen möglich. Um den Emissionsgrad untersuchen zu können, wird, wie schon aufgeführt eine konstante Temperatur benötigt und zum Gewährleisten einer konstanten Temperatur ist eine stationäre Strömung erforderlich. Diese Bedingungen werden alle im Messkanal erfüllt; darin herrschen eine stationäre Strömung und konstante Extrusionsbedingungen. Zur Emissionsgraduntersuchung wurde der NIR-Sensor in der Mitte des Messkanals eingeschraubt und zwei Pt-100 rechts, sowie links davon. Der NIR-Sensor als optisches Messverfahren schließt mit der Gehäusewand ab, die beiden Pt-100 wurden 5 mm tief in den Kanal gesetzt. Mittels der beiden Pt-100 war es möglich zu überprüfen, dass die Materialtemperatur an dieser Stelle konstant ist und wie hoch die Materialtemperatur aktuell ist. Die Extrusionsbedingungen wurden nun so eingestellt, dass die zwei Pt-100 eine sehr ähnliche Temperatur anzeigten (max ± 3 °C Unterschied). Der Mittelwert der beiden Pt-100 wurde genommen um die Temperatur am Ort der IR-Messung zu kennen. So ist ein Vergleich von NIR-Sensor und Pt-100 möglich. Das wurde bei unterschiedlichen Temperaturen und unterschiedlichen Extrusionsbedingungen durchgeführt, um herauszufinden, ob die Emissionsgrade der Stärkeschmelzen unterschiedlich sind. In Abb. 1 sind alle Ergebnisse der Emissionsgraduntersuchung graphisch aufgetragen. Aufgetragen auf der y-Achse ist die Emission E in Counts, die, wie schon erwähnt, proportional zum Photonenstrom ist, über der Temperatur T in °C auf der x-Achse. Es ist die gemittelte Temperatur der beiden Pt-100. Die Graphik zeigt die Ergebnisse aller durchgeführten Experimente. Prinzipiell verändert sich das Material bei der Extrusion schon bei Änderung auch nur eines Systemparameters und damit auch die Produktqualität. Meist ist der Wassergehalt kritisch. Hier stellte sich hingegen heraus, dass der Emissionsgrad der Stärkeschmelzen bei Veränderung des Wassergehaltes konstant bleibt. Dasselbe Ergebnis wurde für die Veränderung der Drehzahlen, des Massenstromes und auch unter Verwendung eines anderen Ausgangsstoffes (Maisstärke) ermittelt. Alle Messungen wurden wiederholt, die Ergebnisse sind verifizierbar. Die Temperaturabhängigkeit der Messungen ist mittels einer Potenzfunktion beschreibbar. Die Potenzfunktion lautet: $T = 63,93 \cdot E^{0,148}$ mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,993.

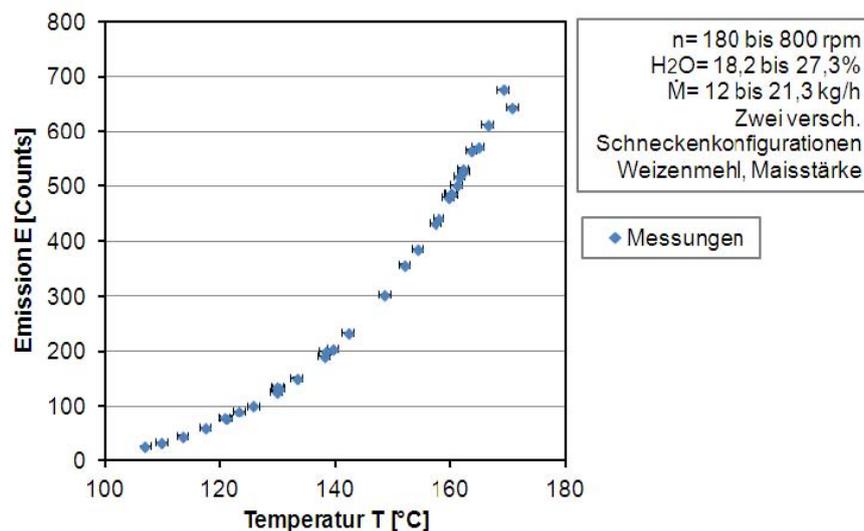


Abbildung 1: Messungen der Experimente zur Emissionsgraduntersuchung; der Emissionsgrad

Nachdem nun die Formel der Temperaturabhängigkeit bestimmt ist, ist es möglich den NIR-Sensor im Extruder im Bereich der sich drehenden Schnecken einzusetzen um Temperaturmessungen durchzuführen. In Abb. 2 ist der Experimentalaufbau gezeigt. Es wurden unterschiedliche Experimente

durchgeführt. Der NIR-Sensor wurde in Gehäuse 5 und Gehäuse 7 eingesetzt, der Pt-100 des Extruders zum Vergleich bei den Experimenten jeweils im anderen Gehäuse, also erst in Gehäuse 7, dann in Gehäuse 5. So war es auch bei diesen Experimenten möglich den IR-Sensor mit der Stand der Technik-Messmethode (Pt-100) zu vergleichen und die Messergebnisse gegenüberzustellen. Dies ist in Abb. 3 aufgetragen. Auf der y-Achse ist nun die Temperatur T gezeigt, auf der x-Achse die Zeit t. Zusätzlich ist in grün die gemessene Temperatur des Pt-100 aufgetragen und (in rot) der Mittelwert der Temperaturwerte des NIR-Sensors.

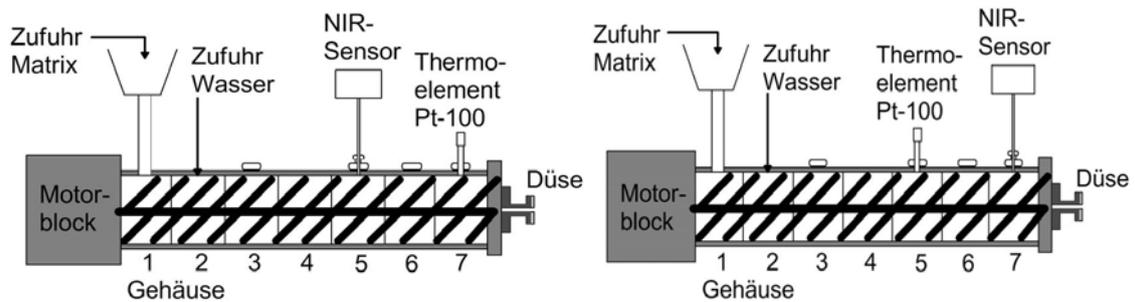


Abbildung 2: Extruder mit NIR-Sensor und Pt-100. Abb. links: NIR-Sensor in Gehäuse 5 und Pt-100 in Gehäuse 7; Abb. rechts: NIR-Sensor in Gehäuse 7 und Pt-100 in Gehäuse 5.

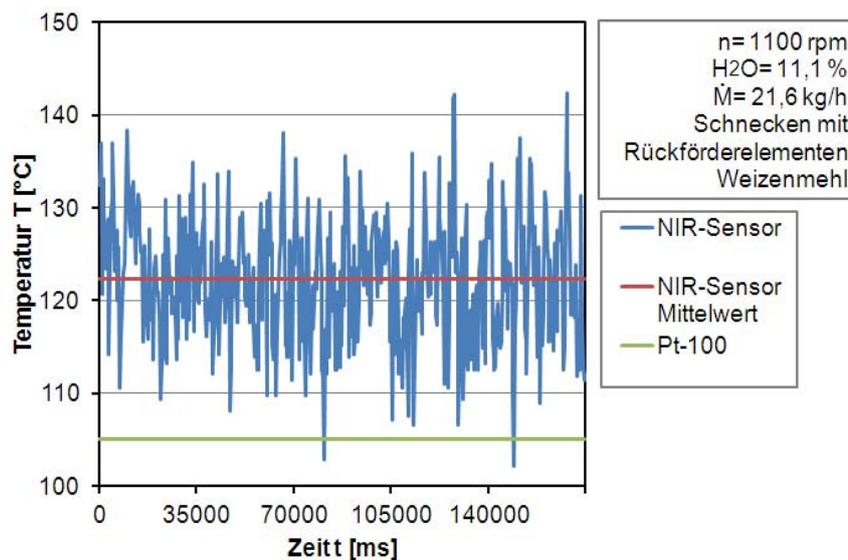


Abbildung 3: Beispielmessung des NIR-Sensors und des Pt-100 im Extruder, mit Mittelwert des NIR-Sensors.

Der Messwert des Pt-100 ist konstant, es muss sich um eine Mischungstemperatur handeln, der NIR-Sensor gibt den Temperaturverlauf im Extruder wieder, mit Temperaturmaximas, sogenannten "hot spots". Die konstante Mischungstemperatur des Pt-100 setzt sich zusammen aus erstens der Temperatur des Extrudergehäuses, dies misst der Pt-100 unweigerlich mit, da Extrudergehäuse wie auch die Halterung des Pt-100 aus Metall sind und diese gute Wärmeleitfähigkeiten aufweisen und zweitens der Materialtemperatur, aber auch die Materialtemperatur ist wieder nur ein Mischwert. Denn der Pt-100 benötigt mindestens 1 s um einen neuen Temperaturmesswert zu erfassen. In dieser Sekunde drehen aber die Schnecken weiter und haben mindestens schon drei Umdrehungen gemacht; es sind sechsmal Flügelspitzen am Messpunkt vorbeigestreift, die Temperatur war also schon sechsmal bei

ihrem Maximalwert. Der Pt-100 aber misst nur einen Mischwert aller dieser Temperaturen, die sich innerhalb dieser Sekunde eingestellt hatten. Die optische Messung ist demnach besser als die Widerstandsmessung aufgrund dessen, dass schnellere (höherfrequent) Messungen möglich sind. In der Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Experimente im Schneckenbereich des Extruders, einmal für Gehäuse 5 und einmal für Gehäuse 7 graphisch dargestellt. Es wird in den Graphiken jeweils die Temperaturmessung des NIR-Sensors im entsprechenden Gehäuse mit der Temperaturmessung des Pt-100 im selben Gehäuse verglichen. Aufgetragen ist die Temperatur des NIR-Sensors (y-Achse) über der Temperatur des Pt-100 (x-Achse), jeweils in °C.

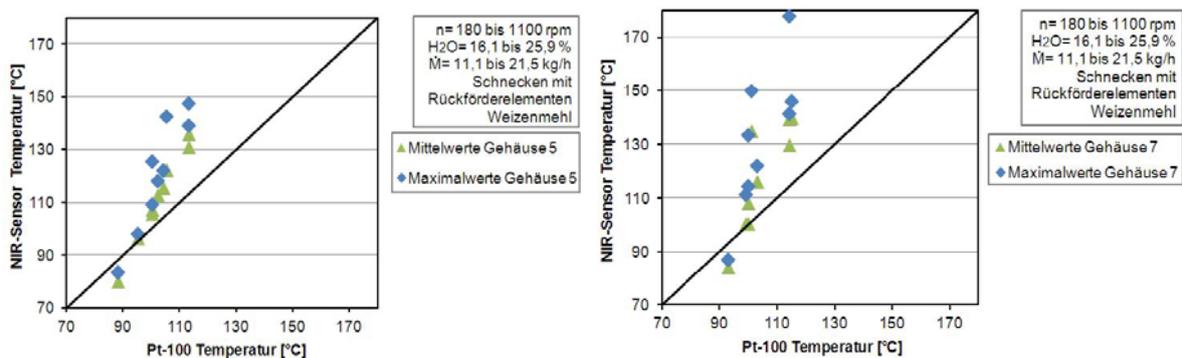


Abbildung 4: Temperaturunterschied NIR-Sensor zu Pt-100 in Gehäuse 5 bis zu 35°C (Abb. links) und in Gehäuse 7 bis zu mehr als 50°C (Abb. rechts).

Die schwarze Linie zeigt jeweils dieselbe Temperatur für NIR-Sensor und Pt-100. Würden beide Temperaturmessmethoden übereinstimmen, würden die Messwerte auf der Geraden liegen. Vergleicht man nun die Ergebnisse des NIR-Sensors mit denen des Pt-100 ist auffällig, dass die Temperatur des Pt-100 jeweils (mit einer Ausnahme bei Gehäuse 5 und Ausnahmen bei Gehäuse 7) unterhalb der des NIR-Sensor liegt und die Messpunkte oberhalb der schwarzen Geraden liegen. Dies unterstützt die aufgestellte Hypothese, dass die Temperaturmessung des Pt-100 stark von der Gehäusetemperatur abhängig ist. Die einzige Ausnahme in Gehäuse 5 und die Ausnahmen bei Gehäuse 7 bestätigen die Hypothese, denn bei diesen Messpunkten liegt die Gehäusetemperatur näher an bzw. über der Materialtemperatur als bei den anderen Experimenten. Zusätzlich sind in den Graphiken noch die Maximaltemperaturen des NIR-Sensors eingezeichnet. Der Temperaturunterschied in Gehäuse 5 vom Pt-100 zur Maximaltemperatur des NIR-Sensors beträgt bis zu 35 °C (siehe Abb. 4, links), in Gehäuse 7 liegt der Maximaltemperaturwert sogar bis zu mehr als 50 °C oberhalb des Pt-100 Messwerts (siehe Abb. 4, rechts). Es wurde immer im Zwickelbereich gemessen, hier treten Maximaltemperaturen auf. Das Vorbestreifen der Flügelspitzen ist dort messbar, wo die Schnecken nicht ineinandergreifen. Um dies messen zu können, ist es notwendig ein neues Gehäuse mit seitlicher Bohrung aufzubauen. Dort wäre es dann möglich, das Temperaturprofil mit Maximalwerten und Minimalwerten (im Extruder eher nur weniger hohe Temperaturwerte) aufzuzeichnen. Anhand der Ergebnisse ist schlusszufolgern, dass der NIR-Sensor sowohl das im Extruder auftretende Temperaturprofil, als auch die auftretenden Temperaturspitzen messen und anzeigen kann und damit bestens für Temperaturbestimmungen im Extruder geeignet ist.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Prozessmesstechnik und innovative Energiesysteme der Hochschule Mannheim unter Leitung von Prof. Dr. Matthias Rädle eine neuartige Messmethode entwickelt und aufgebaut, mit der lokale Temperaturverteilungen und Temperaturspitzen in einem Doppelschneckenextruder gemessen werden zu können. Es wurde ein optischer Nahinfrarot(NIR)-Sensor entworfen, aufgebaut und im Extruder eingesetzt. Um Emissionsgraduntersuchungen durchzuführen, wurde ein Messkanal aufgebaut und an das Ende des Extruders gesetzt.

Darüber hinaus konnte die Temperaturabhängigkeit bestimmt werden; mittels der Potenzfunktion $T=63,93 \cdot E^{0,148}$ kann die Materialtemperatur, aus der vom Sensor ausgegebenen Emission bei der verwendeten Verstärkung berechnet werden. Nach Ermittlung der Temperaturabhängigkeit wurde der Sensor im Extruder im Bereich der sich drehenden Schnecken und unter den dort herrschenden instationären Bedingungen verwendet. Die Temperaturwerte des NIR-Sensors wurden mit den Temperaturmesswerten eines Pt-100 verglichen. Der Temperaturunterschied zwischen den Maximaltemperaturen, gemessen vom NIR-Sensor zum Pt-100-Messwert, betrug bis zu 50 °C. Anhand des entwickelten NIR-Sensors war es somit möglich Messungen der lokalen Temperaturverteilung durchzuführen. Diese Arbeit hat gezeigt, dass im Doppelschneckenextruder Temperaturverteilungen auftreten. Die gewonnenen Ergebnisse ließen sich nochmals verbessern, indem an einer anderen Gehäusestelle Messungen vorgenommen würden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde im Zwickelbereich der beiden Extruderwellen gemessen, also an der Stelle, an der die Schnecken ineinandergreifen. Dort treten durch die Scherkräfte Maximaltemperaturen auf. Ein Vorteil des Aufbaus eines neuen Gehäuses mit seitlicher Bohrung ist, dass dann Messungen der Temperaturspitzen beim Vorbeistreichen der Schneckenflügel möglich sind. Zusätzlich sind mit dem neuen Gehäuse mit Bohrungen oben sowie seitlich gleichzeitig Messungen zusammen mit dem Pt-100 im selben Gehäuse ausführbar. Um noch genauere Temperaturmesswerte zu erhalten, wäre es sinnvoll anstelle des Nahinfrarot-Sensors einen Mittelinfrarot-Sensor zu nutzen. Dieser ist in der Lage die Temperatur noch genauer aufzuschlüsseln. Allerdings reagiert er weitaus sensibler auf Störungen und Fehler. Daher müssten weitere Vorkehrungen getroffen werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht auch bei der Weiterentwicklung des verwendeten Sensors bzw. bei der Neuentwicklung folgender Sensoren. Mit der Weiterentwicklung der Sensoren soll die vollständige Bilanzierung der Reaktionen im Produktmaterial im Extruder möglich sein. Hierzu sollen mehrere Qualitätsgrößen, wie die Temperatur, die lokale Geschwindigkeit und die Farbintensität, also die Verweilzeit gleichzeitig gemessen und erfasst werden [9]. Zusammenfassend lässt sich die folgende Kernaussage treffen: Der NIR-Sensor ist gut geeignet, um im Extruder im Bereich der sich drehenden Schnecken inline Temperaturmessungen vorzunehmen. Er kann die lokale Temperaturverteilung bestimmen.

Literatur

- [1] C. Rauwendaal, *Polymer extrusion*. Hanser Verlag, 2001, p. 777.
- [2] G. Menges and M. Meissner, "Improvement in extruder melt temperature control," *J. Macromol. Sci.*, no. October 2013, pp. 37–41, 1972.
- [3] I. Bruker and C. Miaw, "Numerical analysis of the temperature profile in the melt conveying section of a single screw extruder: comparison with experimental data," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 27, no. 7, 1987.
- [4] R. Rasid and A. K. Wood, "Effect of process variables on melt temperature profiles in extrusion process using single screw plastics extruder," *Plast. Rubber Compos.*, vol. 32, no. 5, pp. 187–192, May 2003.
- [5] A. Kelly, E. Brown, and P. Coates, "The effect of screw geometry on melt temperature profile in single screw extrusion," *Polym. Eng. Sci.*, 2006.
- [6] A. J. Bur, S. C. Roth, M. a. Spalding, D. W. Baugh, K. A. Koppi, and W. C. Buzanowski, "Temperature gradients in the channels of a single-screw extruder," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 44, no. 11, pp. 2148–2157, Nov. 2004.
- [7] K. Kohlgrüber, *Der gleichläufige Doppelschneckenextruder: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Hanser Verlag, 2007, p. 367.
- [8] C. Abeykoon, P. J. Martin, A. L. Kelly, and E. C. Brown, "A review and evaluation of melt temperature sensors for polymer extrusion," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 182, pp. 16–27, Aug. 2012.
- [9] AiF-Antrag zum Forschungsthema "Entwicklung eines Sensors zur inline Bestimmung von Zeit-Temperatur-Geschwindigkeit-Profil in einem Zweischnellenextruder", 2014.