



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften
Studiengang Lebensmitteltechnologie

Bachelor-Thesis

Charakterisierung eines schnelllaufenden Hochleistungsextruders am Beispiel von Snackprodukten

vorgelegt von: Rudolf Führer
Matr.-Nr. 440807

Am: 21. Februar 2011

Betreuender Professor: Herr Prof. Dr. Peter Meurer
Korreferent: Herr Dr.-Ing. Achim Knoch

Institut: Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e.V.

URN: [urn:nbn:de:gbv:519-thesis2010-0631-4](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:519-thesis2010-0631-4)

Abstract

This bachelor thesis describes the characterization of a high-speed extruder at the example of cereal snacks. Physico-chemical reactions of the cooking extrusion process at molecular level are not yet fully understood. Thus, predictions about the effects of high screw speeds on temperature, pressure and resulting product characteristics are difficult. For this reason wheat flour is extruded at different screw speeds with the Coperion ZSK 43 MEGA volume. Temperature, pressure and specific mechanical energy will be measured. The extrudates will be analyzed for density, specific surface area, expansion index and color values.

Abstract	2
1. Einleitung	4
2. Stand von Wissenschaft und Technik	5
2.1 Doppelschneckenextruder	5
2.2 Der Hochleistungsextruder	6
2.2 Einfluss der Hauptinhaltsstoffe während der Extrusion	7
2.2.1 Stärke	7
2.2.2 Proteine	8
2.2.5 NaCl	9
3. Versuchsstand, Material und Methoden	9
3.1 Herstellung von Weizenflips mittels ZE25	10
3.2 Herstellung von Weizenflips mittels ZSK 43 MEGAvolume	11
3.2.1 Vorversuche	13
3.2.2 Hauptversuche	13
3.3 Bestimmung der Dichte	15
3.4 Farbmessung	16
3.5 Bestimmung der Spezifischen Oberfläche	16
3.5.1 Probenvorbereitung	16
3.5.2 Bildauswertung	17
3.6 Bestimmung Expansionsindex	18
3.7 Berechnung der Spezifischen mechanischen Energieeinleitung	19
4. Auswertung und Diskussion	20
4.1 Auswertung der Vorversuche des ZSK 43 Mv	20
4.2 Auswertung der Hauptversuche	21
5. Schlussfolgerung und Ausblick	31
6. Zusammenfassung	33
Quellenverzeichnis	35
Abbildungsverzeichnis	36
Tabellenverzeichnis	37
Selbstständigkeitserklärung	38
Anhang	39

1. Einleitung

Die Extrusion stellt in der Lebensmittelherstellung ein produktives und kontinuierliches Verfahren zur Herstellung von direkt expandierten Getreidemahlerzeugnissen dar. Die Strukturbildung der Produkte erfolgt durch Einwirkung von Scherung und Temperatur und anschließendem Pressen bei erhöhtem Druck durch eine formgebende Düse (Riaz, 2000).

Extruder können in der Lebensmittel- und Futtermittelindustrie für die Kochextrusion genutzt werden, um zerealienbasierte Produkte, wie z.B. Frühstückszerealien, Knabberartikel, Pasta, und Tiertrockennahrung, herzustellen.

Hochgeschwindigkeitsextruder sollen bei Drehzahlen bis 1800 min^{-1} und einem größerem freiem Volumen eine Durchsatzerhöhung und Produktivitätssteigerung bei gleicher Produktcharakteristik gegenüber konventionellen Extrudern ermöglichen. Diese Extruder sind vergleichsweise neu und werden für Lebensmittel bislang kaum eingesetzt.

Da die bei der Kochextrusion ablaufenden chemisch-physikalischen Reaktionen auf molekularer Ebene noch nicht vollständig verstanden werden, sind Vorhersagen über die Auswirkungen der hohen Drehzahlen auf Temperatur, Druck und daraus resultierenden Produkteigenschaften nur bedingt möglich (Leeb et al, 2008).

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Herstellung und Analyse von Weizenflips mit einem schnelllaufenden Hochleistungsextruder und die Auswirkungen der verschiedenen Drehzahlen, da die Drehzahl einen großen Einfluss auf viele Parameter hat. Als Grundlage wird die Arbeit „Charakterisierung eines gleichläufigen Doppelschneckenextruder im Technikumsmaßstab“ (Führer, 2010) herangezogen. Es werden Teile der Arbeit, die Theorie, Material und Methoden betreffen, übernommen. Außerdem werden Dichte, spez. Oberfläche, Farbe und Expansionsindex gemessen und der SME berechnet.

Die Versuche und Analysen werden im Deutschen Institut für Lebensmitteltechnik e.V. durchgeführt.

2. Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Doppelschneckenextruder

Doppelschneckenextruder bestehen aus zwei Wellen in einem Gehäuse und lassen sich in drei verschiedene Zonen einteilen: Einzugs-, Kompressions- und Druckaufbauzone. Diese drei Zonen werden anhand Abb. 1 einer kernprogressiven Schneckenwelle erklärt.

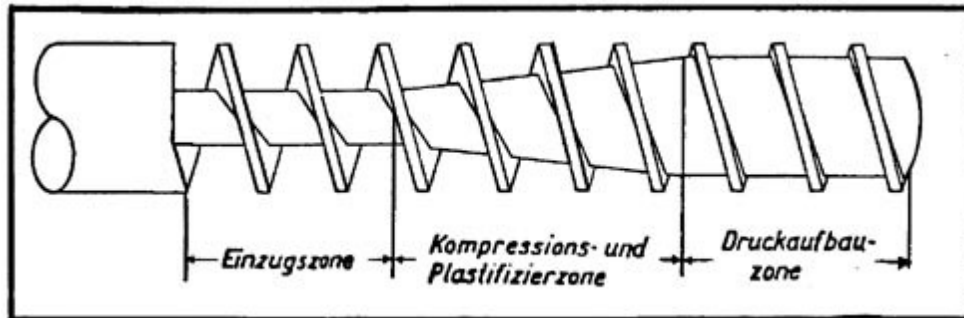


Abb. 1: Kernprogressive Schneckenwelle (www.schorch.ch, 2010)

In der Einzugszone werden die meist vorkonditionierten, pulverförmigen Rohstoffe eingezogen und leicht verdichtet. Wasser kann typischerweise in dieser Zone hinzugegeben werden, um die Textur und Viskosität zu beeinflussen, und um den Wärmeübergang zu verbessern. In der Kompressionszone werden die Rohstoffe durch das kleiner werdende Volumen und damit steigenden Druck weiter verdichtet. Außerdem werden hohe Scherkräfte erzeugt, die zu einer Dissipation der mechanischen Energie in Wärme führen. Wasserdampf kann hier genutzt werden um thermische Energie und Wasser in das Extrudat einzuführen. Aufgrund der steigenden Temperatur und des erhöhten Druckes plastifiziert die Masse. Die Druckaufbauzone ist gekennzeichnet durch höchste Werte von Temperatur, Druck und Scherung. Hier treten wesentliche Aufschluss- und Vernetzungsreaktionen auf. Durch die Druckdifferenz vor und nach der Düse und durch eine hohe Temperatur erfolgt bei dem Produktaustritt eine schlagartige Expansion des Produktes, da das Wasser in den gasförmigen Zustand übergeht. Ein rotierendes Messer schneidet den Strang anschließend in die gewünschte Länge. Die Schneckenwelle kann modular durch Schneckenelemente aufgebaut werden. Dies hat zu einem den Vorteil, dass die Schneckenwelle den Produkthanforderungen angepasst werden kann, und es senkt die Kosten bei Abnutzung der Elemente, da diese einzeln ausgetauscht werden können. Neben typischen

Transportelementen, sind rückfördernde Elemente, sowie Knet- und Mischelemente mit unterschiedlicher Förderrichtung oder ohne Förderrichtung erhältlich (Führer, 2010).

Weiterhin sind auch Bauarten mit einer oder mehreren Schneckenwelle erhältlich. Die Mischfähigkeit von Einschneckenextruder ist im Vergleich zu Doppelschneckenextruder geringer, während Mehrschneckenextruder entwickelt worden sind, die die Geometrie der Doppelschneckenextruder nachahmen (Kohlgrüber, 2008)

In Abb. 2 ist die Skizze eines Doppelschneckenextruders aufgezeigt.

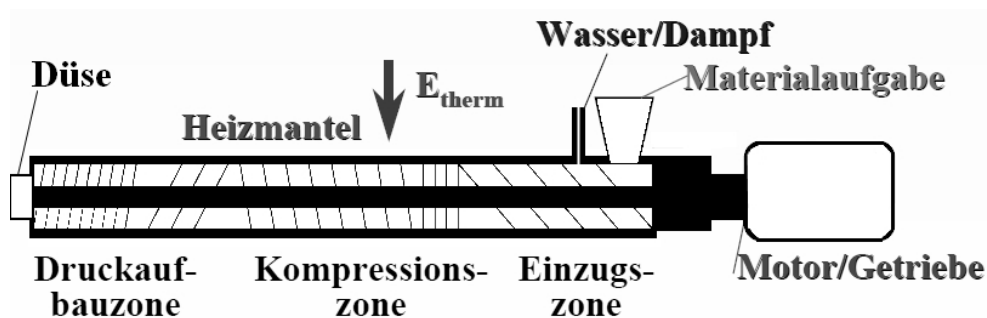


Abb. 2: Skizze eines Doppelschneckenextruders (Führer, 2010)

2.2 Der Hochleistungsextruder

Coperion erhielten 1953 die Lizenz zur Nutzung der Patente von Erdmenger für gleichlaufende, dichtkämmende Mehrschneckensysteme von der Bayer AG. Seit 1957 ist es ihnen gelungen, bei gleicher Schneckenlänge den Durchsatz um jährlich 7 % zu steigern.



Abb. 3: ZSK 125 MEGAvolume PLUS (www.coperion.com, 2011)

Der ZSK MEGAvolume von Coperion, in Abb. 3 zu sehen, ist für Drehzahlen bis 1800 min^{-1} ausgelegt und besitzt ein D_a / D_i -Verhältnis von 1,8 während die meisten anderen Extruder ein D_a / D_i -Verhältnis von 1,5 – 1,6 aufweisen. Das daraus resultierende erhöhte freie Volumen führt zu einer geringeren Scherung des Produktes, falls dies nicht durch eine höhere Drehzahl kompensiert wird. Dies erlaubt eine starke Erhöhung der Drehzahl bei gleichbleibendem Eintrag

von Scherenergie. Hierdurch verkürzt sich allerdings die Verweilzeit des Produktes im Extruder und der Durchsatz steigt an. Scherempfindliche Rohstoffe können so schonend bei höheren Drehzahlen extrudiert werden (Kohlgrüber, 2008).

Der ZSK MEGAvolume ist nach dem „Baukastenprinzip“ aufgebaut. Es können je nach Bedarf abwechselnd verschiedene Verfahrenszonen zum Fördern, Plastifizieren, Mischen und Scheren, Homogenisieren, Entgasen und Druckaufbauen aufgebaut werden. Das Verfahrensteil besteht aus mehreren Gehäusen, in denen sich die Schnecken gleichsinnig drehen. Jedes Gehäuse ist separat temperierbar. Die Temperierung erfolgt elektrisch mit Heizschalen bzw. Heizpatronen und die Kühlung mit Wasser. Für Spezialanwendungen können Gehäuse auch mit flüssigen oder dampfförmigen Wärmeträgern temperiert werden. Weiter ist eine seitliche Zugabe von pulver- oder granulatformigen Stoffen mit der Zweiwelligen Seitenbeschickung (ZS-B 58) möglich. Ein Anbau kann in Verbindung mit einem Anschlussgehäuse an jeder Stelle erfolgen (www.coperion.com, 2010).

2.2 Einfluss der Hauptinhaltsstoffe während der Extrusion

2.2.1 Stärke

Stärke besteht aus Amylose und Amylopektin, die in unterschiedlichen Mengen, ausgehend von der Ausgangspflanze, vorhanden sind. Stärkekörner liegen teilweise amorph und teilweise kristallin vor. Der amorphe Teil des Kornes besteht hauptsächlich aus Amylose und der kristalline aus Amylopektin. Stärkekörner quellen in Wasser, und es kommt hauptsächlich zum Aufbrechen der Wasserstoffbrückenbindungen. Wenn die Temperatur die Verkleisterungstemperatur überschreitet, kommt es zur Verkleisterung der Stärke, es bildet sich ein Polymernetzwerk aus. Der Verlauf der Verkleisterung hängt maßgeblich vom Wassergehalt, der Temperatur, Herkunft der Stärke und dem Verhältnis von Amylose zu Amylopektin ab. Je geringer der Wassergehalt ist, desto höher liegt die Verkleisterungstemperatur (Führer, 2010).

Ein hoher Amyloseanteil beim Extrudieren erhöht die Dichte, während durch einen hohen Amylopektinanteil die Extrudate mehr expandieren. Bei Austrittstemperaturen von 170 – 200 °C wird die höchste Expansion bei Getreidestärke beobachtet. Durch Erhöhung der Drehzahl sinkt der Anteil an verkleisterter Stärke aufgrund der geringeren Verweilzeit im Extruder. Eine Reduzierung des Düsendurchmessers erhöht die Verweilzeit und Scherrate und somit die Verkleisterung und Expansion (Harper, 1981).

Stärke ist anfällig gegenüber Scherung, und es kann bei der Extrusion durch mechanische Einwirkungen zu Reduzierung der Kettenlänge kommen. Dieser Abbau der Kettenlänge führt zu einer geringeren Expansion des Produktes. Während der Extrusion kann es außerdem zu Lipid-Stärke-Inklusionskomplexen kommen. Monoglyceride und freie Fettsäuren lagern sich dabei in die Helices der Amylose und teilweise des Amylopektins ein. Die so gebundene Stärke steht der Verkleisterung nicht mehr zur Verfügung, und es kann zu einer unzureichenden Plastifizierung kommen. Es kommt zu einer Viskositätssteigerung und einem Druckanstieg an der Düse. Doch trotz des höheren Druckgradienten kommt es zu einer geringeren Expansion (Führer, 2010).

2.2.2 Proteine

Während der Extrusion treten bei Weizenproteinen mehrere Veränderungen auf, wobei die Denaturierung die wichtigste ist. Bei der Behandlung von Proteinen im Extruder wirken Scherkräfte auf die Moleküle so ein, dass diese „entrollt und gestreckt“ werden, Bindungen aufgebrochen werden, und es anschließend wieder zu neuen Brückenbildungen zwischen den Molekülsträngen kommt. Die Löslichkeit in Wasser und Salzlösungen sinkt. Langkettige Proteine können in kleinere Einheiten zerfallen. Aminosäuren können mit reduzierenden Zuckern die Maillard-Reaktion hervorrufen. Die Maillard-Reaktion wird durch hohe Temperaturen und geringe Wassergehalte gefördert (Führer, 2010).

2.2.3 Öle und Fette

Generell gilt die Aussage, dass ein Zusatz von 0,5 % Pflanzenöl zu einer Rezeptur, basierend auf Getreidestärke, die spezifische mechanische Energieeinleitung in Extrusionsprozessen mit geringem Wassergehalt signifikant senkt. Die geringere spezifische mechanische Energieeinleitung führt zu einer geringeren Masstemperatur und erhöhtem Massedruck an der Düse. Stärke mit geringem Wasser- und Fettgehalt neigt dazu, an metallischen Oberflächen zu überhitzen, und dies kann zu Blockaden und somit schlechteren Fließverhalten führen. Deshalb kann eine Zugabe von 0,5% - 1 % Öl den Extrusionsprozess stabilisieren und die Expansion, Textur und andere Eigenschaften positiv beeinflussen (Führer, 2010).

Öle und Fette verringern außerdem die Härte und erhöhen die Plastizität der Extrudate beim Austritt aus der Düse (Harper, 1981).

2.2.4 Wasser

Wasser hat einen großen Einfluss bei der Extrusion. Es ist in Form von Restfeuchte im Rohstoff vorhanden, kann aber auch durch Konditionieren der Rohstoffe, Wassereinspritzung oder durch Einbringen von Wasserdampf in den Extruder gelangen, wobei Wasserdampf zusätzlich thermische Energie in das Produkt einbringt. Wasser wird zur Stärkeverkleisterung und Proteindenaturierung benötigt und senkt die spezifische mechanische Energieeinleitung, da Wasser die Partikel „aufweicht“ und dies zu weniger Reibung führt. Ein positiver Nebeneffekt davon ist, dass dies zu weniger Abnutzung der Extruderbauteile und somit geringeren Kosten führt. Außerdem nimmt die Produktdichte zu und Massetemperatur und –druck nehmen ab. Im Bereich von 0-40 % zeigt das Endprodukt mit abnehmendem Wassergehalt in der Regel eine größere Porosität und Weichheit (Führer, 2010).

Je geringer der Wassergehalt, desto höher muss die Temperatur zur Verkleisterung der Stärke sein (Harper, 1981).

2.2.5 NaCl

NaCl wirkt bei der Extrusion viskositätssenkend. Es erhöht den Dampfdruck der Masse und senkt damit auch die Expansion. Salzzugaben von bis zu 2,5 % können zu einer besseren Expansion und einer verringerten Härte der Produkte führen. Außerdem kann NaCl den Abbau der Kettenlänge von Stärkemolekülen erhöhen (Führer, 2010).

3. Versuchsstand, Material und Methoden

Es werden Weizenflips mit den Extrudern ZE25 der Firma KraussMaffei Berstorff GmbH und ZSK 43 MEGAvolume der Firma Coperion hergestellt. Dabei werden bei beiden Extrudern die gleichen Rohstoffe genutzt. Zum einen wurden Flips ausschließlich aus Weizenmehl des Typs 405 mit einer Restfeuchte von 14,51 % hergestellt. Zum anderen wird eine Mischung aus den Rohstoffen in Tab. 1 genutzt.

Tab. 1: Rezeptur der Mischung

Rohstoff	Menge [%]	Bezeichnung
Weizenmehl Typ 405	98	Mirella Weizenmehl Typ 405
Sonnenblumenöl	1	Gut & Günstig Sonnenblumenöl - EUACO GmbH
Kochsalz	1	Speisesalz Feinkörnig - JOZO [®] SALT

Im Anhang sind die Mittelwerte der Messungen und relevante Einstellungen des Extruders, inklusive der Temperaturführungen, zu finden.

In den folgenden Punkten werden die beiden Extruder und die Herstellung von Weizenflips beschrieben.

3.1 Herstellung von Weizenflips mittels ZE25

Bei dem gleichläufigen Doppelschneckenextruder ZE25 der Firma KraussMaffei Berstorff GmbH werden die Rohstoffe mit einer Dosierschnecke in einen Einlauftrichter volumetrisch dosiert. Das Extrudergehäuse ist in zehn Segmente aufgeteilt, welche einzeln erhitzt bzw. durch Frischluft gekühlt werden können. Die Schneckenwelle kann modular aufgebaut werden. Die Wasserzugabe kann mittels Frischwasser im dritten Segment erfolgen.

Die Rohstoffe werden in einer Universalmischmaschine der Firma Stephan 1 Minute lang vermischt.

Zu Beginn wird der Extruder auf die gewünschten Temperatur in den einzelnen Gehäusen erhitzt und um ein Anbrennen des Rohstoffs zu vermeiden, wird zum Anfahren mit anfangs hoher und anschließend sinkender Wasserzugabe extrudiert, bis schließlich die gewünschte Wasserdosierung eingestellt ist. Sobald Temperatur, Druck und Leistungsaufnahme konstant bleiben, erfolgt eine Probennahme. Das Extrudat wird nach der Düse mittels der Schneidvorrichtung (Granulator mit rotierendem Messerkopf) in Stücke gewünschter Länge geschnitten.








Für die Schneckenkonfiguration werden sieben verschiedene Schneckenelemente genutzt, die in Tab. 3 aufgeführt sind. Die Schneckenwelle wird in dieser Konfiguration mit 43 Schneckenelementen bestückt.

Tab. 2: Schneckenkonfiguration des ZE25

Anzahl	Element
4	Förderelement 37,5/1/2
1	Distanzscheibe
1	Mischelement ZB 37,5/5/5/10/RE
1	Distanzscheibe
3	Förderelement 37,5/1/2
3	Förderelement E 37,5/1/2
1	Distanzscheibe
1	Mischelement ZB 37,5/5/5/10/RE
1	Distanzscheibe

1	Förderelement 37,5/1/2
3	Förderelement E 37,5/1/2
1	Distanzscheibe
1	Knetelement E-KB 37,5/5/22,5/RE
1	Distanzscheibe
1	Förderelement 37,5/1/2
3	Förderelement E 37,5/1/2
1	Distanzscheibe
1	Knetelement E-KB 37,5/5/22,5/RE
1	Distanzscheibe
1	Förderelement 37,5/1/2
2	Förderelement E 37,5/1/2
10	Förderelement E 25/1/2

Tab. 3: Übersicht der verwendeten Schneckenelemente

Symbol	Element
	Förderelement 37,5/1/2
	Förderelement E 37,5/1/2
	Förderelement 25/1/2
	Mischelement ZB 37,5/5/5/10/RE
	Knetelement E-KB 37,5/5/45/RE
	Knetelement E-KB 37,5/5/22,5/RE
	Distanzscheibe

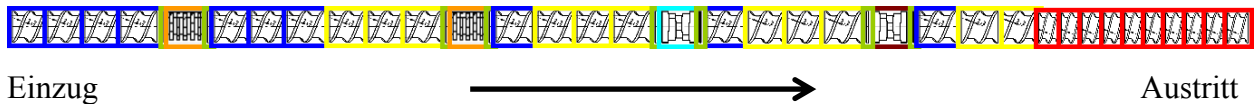


Abb. 4: Grafische Darstellung der Schneckenkonfiguration des ZE25

3.2 Herstellung von Weizenflips mittels ZSK 43 MEGAvolume

Das Verfahrensteil des ZSK 43 MEGAvolume ist aus 10 Gehäusemodulen aufgebaut, welche eine individuelle Bauweise ermöglichen. Die Segmente werden durch außenliegende Zuganker verspannt und lassen sich separat mittels Heizpatrone heizen. Die Feststoffdosierung, mit einem

maximalem Durchsatz von 300 kg/h, wird im ersten und die Flüssigdosierung im zweiten Gehäuse zudosiert. Durch ein innenliegendes Bohrungssystem lässt sich das Gehäuse mit Wasser kühlen. In jeweils einem Segment sind Vorrichtungen zur Entgasung, Entlüftung und zum Einsprühen von Flüssigkeiten vorhanden. Das Gehäuse und die Schneckenwelle haben einen Durchmesser von 42,6 mm bzw. 42,3 mm. Die Spezifikationen des Extruders sind Tab. 4 zu entnehmen.

Tab. 4: Spezifikationen des ZSK 43 Mv

Max. Motorleistung[kW]	123
Gangtiefe [mm]	9,4
Schneckendurchmesser [mm]	42,3
Kerndurchmesser [mm]	23,5
Da / Di:	1,8
L/d:	40
Max. Umdrehungen [min ⁻¹]	1800
Umfangsgeschwindigkeit [m/s]	4,053
Max. Drehmoment je Welle [Nm]	325
Spez. Drehmoment [Nm/cm ³]	8,7

Die Schneckenwellen lassen sich modular aufbauen. Eine Verteilerbatterie dient zur Kühlung des Gehäuses. Dazu wird Kühlwasser vom Kühlgerät auf die einzelnen Kühlzonen verteilt. Der dabei entstehende Wasserdampf gelangt in den Rücklauf und kondensiert dort, um als Heißwasser wieder zur Rückkühlung zum Kühlgerät zu gelangen.

Das durch einen Spritzkopf austretende Produkt wird mit der Messergranulierung (ZGF 70) mittels 4-flügeligem Messerhalter in Stränge gewünschter Länge geschnitten. Der Spritzkopf besitzt 12 Bohrungen, die als Düsen fungieren. Die Steuerung der gesamten Anlage erfolgt über eine Schaltanlage.

Die Schneckenkonfiguration ist der Tab. 5 zu entnehmen. Sie besitzt in der Einzugszone Fördererlemente und eine Mischzone, worauf in der Plastifizierzone einige Mischelemente und mehr Fördererlemente mit höherer Steigung folgen. Zu Beginn der Druckaufbauzone sind rückfördernde Elemente platziert und anschließend folgen Knetelemente. Direkt vor dem Spritzkopf sind noch 2 Fördererlemente mit hoher Steigung verbaut. Im Vergleich mit der Schneckenkonfiguration des ZE25 sind hier mehr scherintensive Knetelemente verbaut.

Tab. 5: Schneckenkonfiguration des ZSK 43 Mv

Anzahl	Element
10	SCHEIBE/1
6	Förderelement 36/18
6	Förderelement 52/27
4	Förderelement 90/45
5	Förderelement 72/36
4	Förderelement 54/54 EG
4	ZME 8.5/17
4	Förderelement 8.5/17 EG
10	Förderelement 36/36
6	Förderelement 54/54
8	Förderelement 36/18 LI
1	Förderelement 36/54 SPITZE
4	SCHEIBE/1 EG-N
4	KB45/5/18
3	KB45/5/36
3	KB45/5/54
4	KB90/5/18
3	KB90/5/36
4	KB45/5/18 LI
2	SME 36/36

3.2.1 Vorversuche

Zu Beginn werden insgesamt vier Versuche durchgeführt, um erste Erfahrungen mit dem ZSK 43 MEGAvolume zu sammeln. Es wird ein fester Durchsatz von 110 kg/h Mehl (Typ 405) gewählt und die Drehzahlen schrittweise von 400 min⁻¹ auf bis zu 900 min⁻¹ erhöht. Der Spritzkopf wird so präpariert, dass 4 Düsen geöffnet sind.

3.2.2 Hauptversuche

Es werden insgesamt 35 Hauptversuche durchgeführt. Diese sind in sechs verschiedene Versuchsreihen unterteilt. Die ersten vier werden mit dem ZSK MEGAvolume durchgeführt, während bei den letzten beiden der ZE25 verwendet wird. In den Versuchsreihen mit dem ZSK MEGAvolume wird die Extrusion mit niedrigem Durchsatz und Drehzahl gestartet und dann abwechselnd erhöht, während bei dem ZE25 versucht wird mit der maximalen Drehzahl von 400

min⁻¹ und mit einem gleichmäßigen Durchsatz zu extrudieren. Eine Auflistung der Versuche und Versuchsreihen ist der Tab. 6 zu entnehmen.

Tab. 6: Übersicht der Versuchsreihen

Versuchsreihe	Versuch	Extruder	Durchsatz gesamt [kg/h]	Durchsatz Wasser [kg/h]	Drehzahl [min]	Düse	Rezeptur
VR1	V1	ZSK 43Mv	100	-	400	4x5mm	Mehl (Typ 405)
	V2	ZSK 43Mv	100	-	500	4x5mm	Mehl (Typ 405)
	V3	ZSK 43Mv	125	-	500	4x5mm	Mehl (Typ 405)
	V4	ZSK 43Mv	125	-	600	4x5mm	Mehl (Typ 405)
	V5	ZSK 43Mv	150	-	600	4x5mm	Mehl (Typ 405)
	V6	ZSK 43Mv	150	-	700	4x5mm	Mehl (Typ 405)
	V7	ZSK 43Mv	175	-	700	4x5mm	Mehl (Typ 405)
	V8	ZSK 43Mv	175	-	800	4x5mm	Mehl (Typ 405)
	V9	ZSK 43Mv	200	-	800	4x5mm	Mehl (Typ 405)
	V10	ZSK 43Mv	200	-	900	4x5mm	Mehl (Typ 405)
VR2	V11	ZSK 43Mv	100	-	500	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V12	ZSK 43Mv	150	-	600	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V13	ZSK 43Mv	200	-	800	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V14	ZSK 43Mv	250	-	1000	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V15	ZSK 43Mv	300	-	1000	6x5mm	Mehl (Typ 405)
VR3	V16	ZSK 43Mv	100	5	500	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V17	ZSK 43Mv	100	5	600	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V18	ZSK 43Mv	150	7,5	600	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V19	ZSK 43Mv	150	7,5	800	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V20	ZSK 43Mv	200	10	800	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V21	ZSK 43Mv	200	10	1000	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V22	ZSK 43Mv	250	12,5	1000	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V23	ZSK 43Mv	250	12,5	1200	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V24	ZSK 43Mv	300	15	1200	6x5mm	Mehl (Typ 405)
	V25	ZSK 43Mv	300	15	1400	6x5mm	Mehl (Typ 405)
VR4	V26	ZSK 43Mv	100	-	500	6x5mm	siehe Tab. 1
	V27	ZSK 43Mv	150	-	600	6x5mm	siehe Tab. 1
	V28	ZSK 43Mv	200	-	800	6x5mm	siehe Tab. 1
	V29	ZSK 43Mv	200	10	800	6x5mm	siehe Tab. 1
	V30	ZSK 43Mv	250	12,5	1000	6x5mm	siehe Tab. 1
	V31	ZSK 43Mv	250	12,5	1200	6x5mm	siehe Tab. 1
VR5	V32	ZE25	13,9	-	400	5mm	Mehl (Typ 405)
	V33	ZE25	15	0,76	400	5mm	Mehl (Typ 405)
VR6	V34	ZE25	13,6	-	400	5mm	siehe Tab. 1
	V35	ZE25	14,5	0,76	400	5mm	siehe Tab. 1

In der ersten Versuchsreihe wird mit vier offenen Düsen und Mehl (Typ 405) als Rohstoff extrudiert. Dies wird erreicht, indem passende Schraubenköpfe mit reichlich lebensmitteltauglichem Schmierfett von innen in die zu verschließenden Düsenöffnungen gesetzt werden. Die zweite und dritte Versuchsreihe wird mit sechs offenen Düsen und Mehl (Typ 405)

als Rohstoff durchgeführt. Während die zweite Versuchsreihe ohne Wasserzugabe extrudiert wird, wird der dritten Versuchsreihe 5 % des Gesamtdurchsatzes an Wasser hinzugegeben. Bei der vierten Versuchsreihe werden 6 Düsen geöffnet und eine Mischung aus 98 % Mehl (Typ 405) 1 % Öl und 1 % Kochsalz verwendet und ab 800 min^{-1} 5 % Wasser hinzugegeben. Es wird versucht alle Versuche bei gleicher Temperatur durchzuführen. In den letzten beiden Versuchsreihen wird mit dem ZE25 extrudiert und dabei wird Mehl mit und ohne Wasserzugabe und die Rohstoffmischung mit und ohne Wasserzugabe extrudiert.

3.3 Bestimmung der Dichte

Für die Dichtebestimmung wird das Einlaufgerät nach Böhme DIN 1060 verwendet. Ein Einlaufgerät mit Verschlusskappe wird per Renkverschluss auf einen Zylinder mit einem Volumen von exakt 1000 ml gesetzt. Das Einlaufgerät wird nun mit Raps gefüllt und danach die Verschlusskappe geöffnet. Nach dem Einlaufen wird das Gerät 20 Sekunden unberührt stehen gelassen. Das Einlaufgerät wird nun entfernt und mit einem Lineal der überstehende Raps vorsichtig abgestrichen. Jede Probe wird einer Fünffachbestimmung unterzogen. Am Anfang jeden Messtages wird die Dichte von Raps bestimmt. Die Formel dafür lautet:

$$\rho_{(\text{Raps})} = \frac{m_{(\text{ZR})} - m_{(\text{Z})}}{V_{(\text{Z})}} \quad (\text{Führer, 2010})$$

$m_{(\text{Z})}$ = Masse des Zylinders

$m_{(\text{ZR})}$ = Masse des Zylinders mit Raps

$V_{(\text{Z})}$ = Volumen des Zylinders

Anschließend werden vier Flips gewogen und gemeinsam mit dem Raps gleichmäßig in dem Einlaufgerät verteilt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Flips mittig platziert und in dem Einlaufgerät nicht aneinander liegen, da es sonst zu Brückenbildungen und somit zu Messfehlern kommen kann. Die weitere Vorgehensweise entspricht der ohne Flips. Je Versuch wird eine Dreifachbestimmung mit vier Flips durchgeführt und dasselbe mit vier anderen Flips wiederholt. Die Formel zur Berechnung der Dichte der Flips lautet wie folgt (Führer, 2010):

$$\rho_{(\text{Extrudat})} = \frac{m_{(E)}}{\left[\frac{m_{(ZR)} - (m_{(ZRE)} - m_{(E)})}{\rho_{(\text{Raps})}} \right]} \quad (\text{Führer, 2010})$$

$m_{(E)}$ = Masse des Extrudats

$m_{(Z)}$ = Masse des Zylinders

$m_{(ZR)}$ = Masse des Zylinders mit Raps

$m_{(ZRE)}$ = Masse des Zylinders mit Raps und Extrudat

3.4 Farbmessung

Die Farbmessung wird mit dem Konica Minolta Spektrophotometer CM-600d durchgeführt. Da die Flips keine ebene Fläche bilden, und ein einzelner Flip zu klein für die Sensorfläche ist, werden pro Messung jeweils zwei Flips so nebeneinander gelegt, dass die Sensorfläche komplett bedeckt ist. Dabei wird darauf geachtet, dass kein Zwischenraum zwischen den beiden Flips vorhanden ist. Die Flips werden anschließend auf weißes Papier gelegt und die Farbe von oben gemessen. Pro Versuch werden 10 Messungen getätigt (Führer, 2010).

3.5 Bestimmung der Spezifischen Oberfläche

Mit Hilfe der spezifischen Oberfläche lassen sich Aussagen über die Porengröße und Anzahl der Poren treffen. Dabei sagt ein hoher Wert aus, dass viele bzw. kleine Poren vorhanden sind (Führer, 2010).

3.5.1 Probenvorbereitung

Zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche ist eine gute Probenvorbereitung erforderlich. Bei jedem Versuch werden bevorzugt gerade Flips ausgesucht, die runden Kuppen werden entfernt und anschließend auf die Kolben von 20 bzw. 40 ml Kunststoffspritzen mit ausreichend handelsüblichem Alleskleber fixiert. Dabei ist darauf zu achten, dass der Flip auf dem Kolben so fixiert ist, dass er den Zylinder möglichst nicht berührt. Der Kleber muss danach mehrere Stunden trocknen. Vorzugsweise sollte der Kleber nicht vollständig aushärten, da sich der Flip bei den folgenden Schritten leicht von dem Kolben lösen kann. Der Kolben wird wieder in den

Zylinder hineingesteckt. Währenddessen wird das Paraffin in einem Wärmeschrank auf ca. 100 °C erwärmt. Die Spritze mit fixiertem Flip wird nun mit so viel flüssigem Paraffin aufgezogen, sodass bei aufrechtem Halten der Spritze der Paraffinspiegel ca. 2 cm oberhalb des fixierten Flips liegt. Die gesamte Spritze wird nun in einem Exsikkator mit angeschlossener Vakuumpumpe aufrecht in einem Behälter gestellt und anschließend evakuiert. Durch das Vakuum entweicht die Gasphase aus den Poren des Flips und Paraffin dringt ein. Hier ist darauf zu achten, dass durch den starken Druckabfall, das Paraffin anfangs aufschäumt. Wenn der Druck unter 100 mbar konstant bleibt und kein Schäumen mehr auftritt, verdampft nur noch das enthaltene Wasser und der Druck kann wieder auf Normaldruck erhöht werden. Die präparierten Proben werden nun bei Umgebungstemperatur oder in einem Kühlschrank abgekühlt. Nach der Abkühlung der Proben wird der Kolben entfernt und die Probe vorsichtig mit Druckluft aus dem Zylinder befördert. Die Probe wird nun mit einem Skalpell auf der dem Kolben abgewandten Seite eben geschnitten und vorsichtig in ein Mikrotom eingespannt, sodass die andere Seite angeschnitten werden kann. Die Schnittweite beträgt 25 µm. Anfangs wird so viel abgeschnitten, bis kein Kleber mehr zu erkennen ist. Die Schnittfläche wird nun in eine 1:50 Iod-Kaliumiodid-Lösung getaucht, angefärbt und vorsichtig abgetupft. Daraufhin werden mit dem Stereoskop der Firma WILD Heerbrugg mit der Vergrößerung 6 x 2,5 und einer aufgesetzten digitalen Spiegelreflexkamera mehrere Bilder aufgenommen. Dabei wird mit einer externen Lichtquelle die Schnittfläche gleichmäßig ausgeleuchtet. Die Probe wird wieder in das Mikrotom eingespannt und 40 Schnitte á 25 µm werden vorgenommen. Pro Versuch werden 4 - 11 Schnitte aufgenommen. Außerdem wird noch ein Bild von Millimeterpapier als Maßstab aufgenommen (Führer, 2010).

3.5.2 Bildauswertung

Mit der DIL-Software zur Bildauswertung werden die Bilder ausgewertet. Mit Hilfe eines Bildes von Millimeterpapier wird dazu die Länge einer Linie bestimmt, um den Maßstab der Probenbilder zu erhalten. Bei der Bildauswertung wird ein Bild erst in Grauwerte, dann in ein Schwarz/Weiß Bild überführt und füllt die weiße Fläche mit Rot aus. Auf dieses Bild werden dann 70 Linien gelegt und die Schwarz/Rot- bzw. Rot/Schwarz-Übergänge gezählt und anschließend in die spezifische Oberfläche umgerechnet. Anhand Abb. 5 lässt sich der Verlauf der Bildauswertung mit den einzelnen Schritten nachvollziehen. Die Bilder der Flips werden mit z.B. Windows Paint geöffnet, in die Zwischenablage kopiert und anschließend in die Bildauswertungssoftware eingefügt (1.). Darauf erfolgt eine Umwandlung in Grauwerte, bei der

die Einstellung „Grün als Farbe“ gewählt wird (2.). Anschließend wird das Bild einer Schwarz/Weiß-Umwandlung unterzogen (3.). Hier ist die Schwelle so zu wählen, dass möglichst alle Porenwände als schwarze Linien zu erkennen sind. Aufgrund der Belichtung der Bilder kann es zu Schwarzfärbung einer oder mehrerer Seiten kommen, diese sollte das Bild allerdings nicht beeinflussen. Mit dem Zeichenmodus lässt sich eine Linie entlang der äußersten Porenwand des Flips zeichnen, um das Bild so von der ungewünschten Schwarzfärbung abzugrenzen. Gegebenenfalls lassen sich auch große Flächen der Porenwände, sollten diese aufgrund der Beleuchtung nicht vollständig schwarz sein, nachzeichnen, um einen erhöhten Linienübergang und damit eine Fehlmessung zu vermeiden. Dazu sollte das Bild mit dem Originalbild verglichen werden. Die weißen Flächen innerhalb des Flips werden durch einen Doppelklick rot eingefärbt (4.) und die restlichen weißen Flächen werden in schwarz umgewandelt (5.). Daraufhin werden 70 Linien gleichmäßig über das Bild gelegt (6.) und die Software errechnet durch einen Klick auf „Linienauswertung“ die spezifische Oberfläche (Führer, 2010).

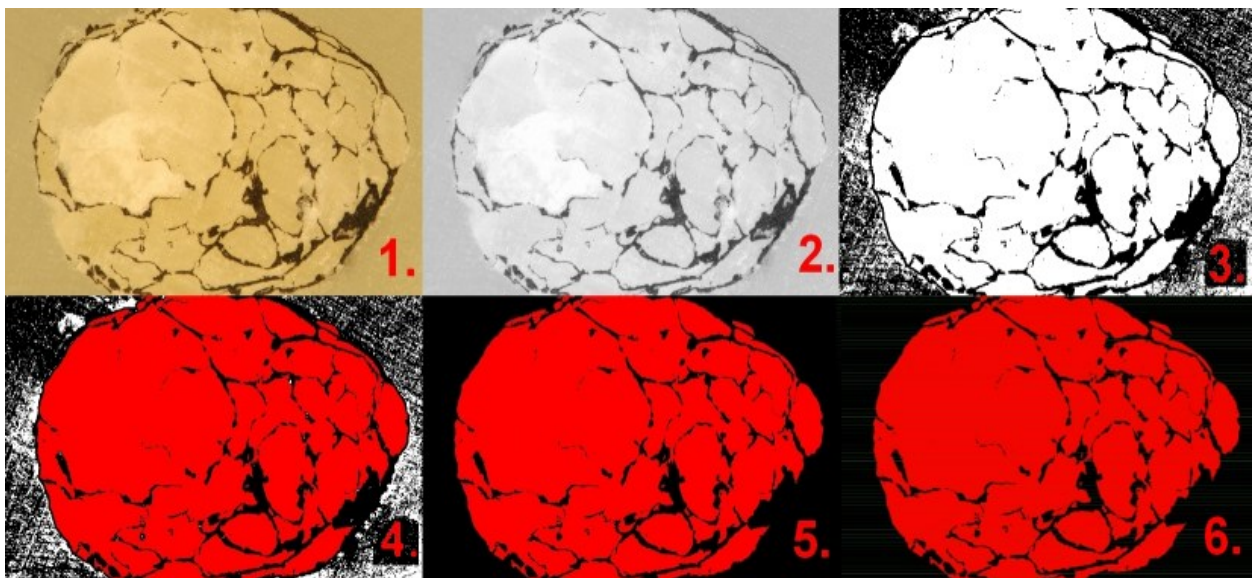


Abb. 5: Exemplarischer Verlauf der Bildauswertung (Führer, 2010)

3.6 Bestimmung Expansionsindex

Der Expansionsindex ist abhängig von der Dichte und der spez. Oberfläche. Extrudate mit einer geringen Dichte besitzen viele Poren, in denen Luft eingeschlossen ist. Je mehr Poren vorhanden sind, desto größer wird die spez. Oberfläche. Durch das große Volumen, das die Poren einnehmen, besitzen die Flips einen großen Durchmesser und somit auch einen hohen Expansionsindex. Zur Bestimmung des Expansionsindex werden pro Versuch die Außenmaße

von 20 möglichst gleichmäßigen Flips mit einem Messschieber mit digitaler Anzeige ermittelt. Anschließend wird der Mittelwert der 20 Messungen durch den genutzten Düsendurchmesser dividiert (Führer, 2010).

3.7 Berechnung der Spezifischen mechanischen Energieeinleitung

Die spezifische mechanische Energieeinleitung (SME) ist ein Rechenwert, der aussagt wie viel mechanische Energie in das Produkt eingetragen wird und somit die Produktcharakteristik beeinflusst (Coperion, 2010).

Da an dem ZSK 43 nur das Drehmoment in Prozent ermittelt werden konnte, wird folgende Formel zur Berechnung der Leistung verwendet:

$$P_{\max} = \frac{2 \cdot M_{\max} \cdot a \cdot n}{9550} \quad [\text{kW}] \quad (\text{Coperion, 2010})$$

M_{\max} = maximales Drehmoment je Welle (325 Nm)

a = Drehmoment in Prozent

n = Drehzahl in min^{-1}

9550 = Umrechnungsfaktor

Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des Getriebes (95 %) errechnet sich daraus die maximale zulässige Leistung des Hauptantriebes (Coperion, 2010):

$$P = P_{\max} \cdot 1,05 \quad [\text{kW}] \quad (\text{Coperion, 2010})$$

Mit der Leistung lässt sich nun der SME berechnen:

$$\text{SME} = \frac{P}{\dot{m}} \quad [\text{kWh/kg}] \quad (\text{Führer, 2010})$$

P = Leistung [kW]

\dot{m} = Massestrom [kg/h]

4. Auswertung und Diskussion

4.1 Auswertung der Vorversuche des ZSK 43 Mv

In Tab. 7 ist zu sehen, dass bei gleichem Durchsatz aber steigender Drehzahl der Druck und das Drehmoment bei allen Versuchen fallen, während die Massetemperatur bei den ersten drei Versuchen konstant bleibt. Die Versuche VV3 und VV4 wurden nicht analysiert, da es hier zu einer Aufspaltung, siehe Abb. 6: Aufgespaltene Flips, der austretenden Flips kommt. Vermutlich ist der Füllgrad bei diesen Versuchen zu gering, wodurch bei der Expansion einige Porenwände zu schwach sind und hierdurch Risse entstehen, die sich entgegen der Extrusionsrichtung nach dem Düsenaustritt ausbreiten.



Abb. 6: Aufgespaltene Flips

Weiter ist zu sehen, dass VV2 im Vergleich zu VV1 eine geringere Dichte aufweist, während die spez. Oberfläche um 16,3 % ansteigt. Auch die SME steigt bei gleichem Durchsatz aber höherer Drehzahl. Der Expansionsindex und die Farbwerte liegen bei beiden Versuchen im selben Bereich. Da der Expansionsindex gleich bleibt, die spez. Oberfläche jedoch ansteigt während die Dichte sinkt, sind die Poren nun kleiner und es sind mehr vorhanden. Im Vergleich dazu liegt die spez. Oberfläche bei handelsüblichen Erdnussflips bei $15,43 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ und die Dichte bei $0,2 \text{ g/ml}$. Jedoch ist zu beachten, dass diese mit anderen Rohstoffen hergestellt werden und gewürzt sind.

Tab. 7: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen VV1 – VV4

Versuch	VV1	VV2	VV3	VV4
Durchsatz [kg/h]	110	110	110	110
Drehzahl [min^{-1}]	500	600	800	900
Austrittsdüse	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm
Druck [bar]	80	58	40	34
Massetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	166	167	166	160
Gesamtfeuchte Rohstoff [%]	14,51	14,51	14,51	14,51
Dichte [g/ml]	0,067	0,059	n.a.	n.a.
Expansionsindex	3,87	3,90	n.a.	n.a.
spez. Oberfläche [cm^2/cm^3]	32,83	38,19	n.a.	n.a.
SME [kWh/kg]	0,166	0,175	n.a.	n.a.
L*(D65)	77,53	78,12	n.a.	n.a.
a*(D65)	0,13	0,35	n.a.	n.a.
b*(D65)	9,96	10,26	n.a.	n.a.

n.a. = nicht ausgewertet

4.2 Auswertung der Hauptversuche

In Tab. 8 und Tab. 9 sind die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe zu sehen. Hier werden abwechselnd die Drehzahl um 100 min^{-1} und der Durchsatz um 25 kg/h erhöht.

Der Druck und die Dichte sinken jeweils nach einer Drehzahlerhöhung und steigen anschließend bei gleicher Drehzahl und erhöhtem Durchsatz, während die SME sich gegenteilig verhält. Die Massetemperatur verändert sich bis V5 nur geringfügig, steigt ab dann kontinuierlich an. Der Expansionsindex bleibt bei allen Versuchen annähernd gleich. Bei V1 und V3 liegen die Temperaturen höher als bei V2 und V4 und dort sind die spez. Oberflächen auch leicht größer.

Tab. 8: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V1 - V5

Versuch	V1	V2	V3	V4	V5
Durchsatz [kg/h]	100	100	125	125	150
Drehzahl [min^{-1}]	400	500	500	600	600
Austrittsdüse	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm
Druck [bar]	76	70	78	67	92
Massetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	176	165	180	170	178
Gesamtfeuchte Rohstoff [%]	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51
Dichte [g/ml]	0,091	0,074	0,077	0,071	0,075
Expansionsindex	3,89	3,89	3,94	3,91	3,87
spez. Oberfläche [cm^2/cm^3]	34,78	31,11	34,33	33,03	43,86
SME [kWh/kg]	0,149	0,150	0,152	0,178	0,160
L*(D65)	78,76	77,51	77,35	77,32	79,28
a*(D65)	0,33	0,69	-0,05	0,36	0,00
b*(D65)	11,70	11,64	10,43	10,70	10,80

Tab. 9: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V6 - V10

Versuch	V6	V7	V8	V9	V10
Durchsatz [kg/h]	150	175	175	200	200
Drehzahl [min^{-1}]	700	700	800	800	900
Austrittsdüse	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm
Druck [bar]	64	80	62	81	71
Massetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	178	181	184	187	189
Gesamtfeuchte Rohstoff [%]	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51
Dichte [g/ml]	0,065	0,071	0,066	0,070	0,065
Expansionsindex	3,95	3,87	3,98	3,95	4,02
spez. Oberfläche [cm^2/cm^3]	40,60	41,60	41,74	44,59	43,02
SME [kWh/kg]	0,167	0,152	0,173	0,166	0,180
L*(D65)	80,06	80,95	79,96	80,41	80,87
a*(D65)	0,21	0,16	0,44	0,08	0,12
b*(D65)	11,38	10,77	10,98	10,66	9,69

Bei einer Drehzahl von 600 min^{-1} und Durchsatz von 150 kg/h steigt die spez. Oberfläche deutlich an und bleibt bei höheren Drehzahlen und einem Durchsätzen relativ konstant. Der Expansionsindex und die Farbwerte bewegen sich bei allen Versuchen im selben Bereich. Bei gleichem Expansionsindex und etwas geringerer Dichte werden bei erhöhter spez. Oberfläche die Poren kleiner und zahlreicher.

Da Durchsätze über 200 kg/h mit 4 offenen Düsen zu einem ungleichmäßigem Extrusionsverhalten, hohen Drücken und Temperaturen führen, werden die folgenden Versuche mit sechs offenen Düsen im Spritzkopf gefahren.

In Tab. 10 ist zu sehen, wie bei jedem Versuch der Durchsatz um 50 kg/h und auch die Drehzahl erhöht wird. Dabei kam es zu einigen Komplikationen. Die Extrusion von V14 ermöglicht mit der gleichen Temperaturführung wie bei V11 – V13 keinen stabilen Lauf. Die Erniedrigung der Temperatur in den letzten Segmenten des Extruders ermöglicht eine gleichmäßige Extrusion. Bei V15 erfolgte wiederum, wie in den Vorversuchen beschrieben, eine Aufspaltung der Extrudate. Eine Verringerung der Temperaturen in den letzten Segmenten des Extruders bei V15 ergab keine Verbesserung. Zu erkennen ist, dass Druck, Temperatur und spez. Oberfläche relativ gleichmäßig bei Erhöhung von Drehzahl und Durchsatz steigen, während die Dichte leicht sinkt. Die SME sinkt zuerst aufgrund der starken Durchsatzerhöhung und der relativ geringen Drehzahlerhöhung, steigt jedoch bei V 14 wieder an. Während die a*-Werte im gleichen Bereich liegen, steigen die L*-Werte mit steigender spez. Oberfläche und daraus kann man schließen, dass eine feinporige Struktur heller ist. Die b*-Werte steigen jedoch mit steigender Massetemperatur an und deuten auf eine erhöhte Maillard-Reaktion.

Tab. 10: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V11- V15

Versuch	V11	V12	V13	V14	V15
Durchsatz [kg/h]	100	150	200	250	300
Drehzahl [min^{-1}]	500	600	800	1000	1000
Austrittsdüse	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm
Druck [bar]	65	67	71	78	86
Massetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	151	166	178	186	197
Gesamtfeuchte Rohstoff [%]	14,51	14,51	14,51	14,51	14,51
Dichte [g/ml]	0,081	0,080	0,078	0,075	n.a.
Expansionsindex	3,75	3,76	3,83	3,82	n.a.
spez. Oberfläche [cm^2/cm^3]	30,57	39,17	42,20	52,09	n.a.
SME [kWh/kg]	0,150	0,157	0,166	0,172	n.a.
L*(D65)	75,98	78,54	79,14	81,19	n.a.
a*(D65)	0,27	0,10	0,12	-0,12	n.a.
b*(D65)	7,90	8,42	9,51	10,46	n.a.

n.a. = nicht ausgewertet

Bei den Versuchen 16 – 25 wird der Rohstofffeuchte von 14,51 %, mittels Wasserzugabe, auf 18,78 % erhöht. Es wird versucht, höhere Drehzahlen bei gleichem Durchsatz zu erreichen.

In

Tab. 11 und Tab. 12 sind die Ergebnisse dieser Versuche zu sehen. Bei Versuch 17 kommt es zu einer Aufspaltung der Extrudate. Offensichtlich ist ein Durchsatz von 100 kg/h bei einer Drehzahl von 600 min^{-1} zu gering. Mit gleicher Temperaturführung wie bei den anderen Versuchen, ist es nicht möglich bei Versuch 19 eine gleichmäßige Extrusion durchzuführen. Durch eine starke Erhöhung der Temperatur der Extrudersegmente verlief die Extrusion gleichmäßig. Versuch 21, 23, 24 und 25 liefern wiederum aufgespaltenes Extrudat, wie in Abb. 6 zu sehen ist. Der Füllgrad ist bei einer Drehzahl von 1000 min^{-1} mit 200 kg/h zu gering, während bei 1200 min^{-1} und 1400 min^{-1} der der Füllgrad mit dem maximalen Durchsatz von 300 kg/h zu gering ist.

Bei den analysierten Versuchen, ausgenommen Versuch 19, steigen Druck, spez. Oberfläche und Massetemperatur gleichmäßig an, wobei der Druck bei V 22 wieder etwas niedriger liegt. Die SME steigt in der Regel wiederum bei gleichem Durchsatz und steigender Drehzahl und sinkt bei steigendem Durchsatz und gleicher Drehzahl. Auch die L*-Werte steigen leicht an, was mit der starken Erhöhung der spez. Oberfläche zusammenhängen kann. Die Dichte und der Expansionsindex sind bei den Versuchen sehr ähnlich. Versuch 19 besitzt durch Erhöhung der Temperaturen eine höhere Massetemperatur, wodurch auch beim Austritt mehr Wasser verdampft ist und somit die Dichte auch deutlich geringer ist als bei den anderen Versuchen. Außerdem ist der b*-Wert bei Versuch 19 durch die höhere Massetemperatur höher.

Tab. 11: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V16- V20

Versuch	16	17	18	19	20
Durchsatz [kg/h]	100	100	150	150	200
davon Wasser [kg/h]	5	5	7,5	7,5	10
Drehzahl [min^{-1}]	500	600	600	800	800
Austrittsdüse	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm
Druck [bar]	41	44	49	41	55
Massetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	145	145	154	176	160
Gesamtfeuchte Rohstoff [%]	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78
Dichte [g/ml]	0,117	n.a.	0,121	0,084	0,120
Expansionsindex	2,74	n.a.	2,73	2,74	2,73
spez. Oberfläche [cm^2/cm^3]	39,68	n.a.	51,35	52,90	58,36
SME [kWh/kg]	0,136	n.a.	0,131	0,160	0,134
L*(D65)	69,04	n.a.	71,76	74,30	74,70
a*(D65)	-0,03	n.a.	-0,07	0,19	-0,09
b*(D65)	10,02	n.a.	10,32	12,30	10,32

n.a. = nicht ausgewertet

Tab. 12: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V21- V25

Versuch	21	22	23	24	25
Durchsatz [kg/h]	200	250	250	300	300
davon Wasser [kg/h]	10	12,5	12,5	15	15
Drehzahl [min^{-1}]	1000	1000	1200	1200	1400
Austrittsdüse	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm
Druck [bar]	38	50	38	53	41
Massetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	162	168	170	174	176
Gesamtfeuchte Rohstoff [%]	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78
Dichte [g/ml]	n.a.	0,118	n.a.	n.a.	n.a.
Expansionsindex	n.a.	2,70	n.a.	n.a.	n.a.
spez. Oberfläche [cm^2/cm^3]	n.a.	62,77	n.a.	n.a.	n.a.
SME [kWh/kg]	n.a.	0,143	n.a.	n.a.	n.a.
L*(D65)	n.a.	76,51	n.a.	n.a.	n.a.
a*(D65)	n.a.	-0,09	n.a.	n.a.	n.a.
b*(D65)	n.a.	10,03	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = nicht ausgewertet

Für die Versuche 26 – 31, welche in Tab. 13 aufgelistet sind, wird die Rohstoffmischung aus Tab. 1 verwendet. Die Mischung hat eine Restfeuchte von 14,22 % und wird bei einer Drehzahl von 800 min^{-1} und Durchsatz von 200 kg/h auf 18,49 % erhöht.

Bei den Versuchen 26 – 28 steigen die Temperatur und die spez. Oberfläche gleichmäßig an, während der Druck zuerst steigt und bei der Erhöhung von 600 min^{-1} auf 800 min^{-1} annähernd gleich bleibt. Die Dichte steigt zuerst leicht an, sinkt dann jedoch bei einer Drehzahl von 800

min⁻¹. Der L*- bzw. b* Wert steigt mit steigender Temperatur bzw. spez. Oberfläche, während der Expansionsindex annähernd gleich bleibt.

Die Versuche 29 – 31 weisen ebenfalls eine Temperatursteigerung auf. Der Druck steigt leicht an, fällt bei V 31 dann jedoch stark ab. Dies hängt mit der Drehzahlerhöhung ohne Durchsatzsteigerung zusammen. Ähnlich verhält es sich mit der Dichte. Die spez. Oberfläche und der L*-Wert sinken bei V29 im Vergleich zu V 28 aufgrund des höheren Wassergehaltes, steigen bei höherer Drehzahl jedoch wieder. Der b*-Wert ist durchgehend höher als mit geringerem Wassergehalt, da höhere Wassergehalte auf die Maillard-Reaktion fördernd wirken. Die SME steigt leicht bei steigendem Durchsatz und Drehzahlerhöhung. Bei Wasserzugabe sinkt die SME bei V 29 deutlich und steigt zwischen V30 und V31 wieder leicht. Der Expansionsindex liegt bei geringerem Wassergehalt höher.

Mit der Mischung aus Mehl, Öl und Kochsalz ist es möglich mit gleicher Temperaturführung bei Drehzahlen von 1200 min⁻¹ zu extrudieren, was zuvor nicht gelungen ist.

Tab. 13: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V26- V31

Versuch	26	27	28	29	30	31
Durchsatz [kg/h]	100	150	200	200	250	250
davon Wasser [kg/h]	-	-	-	10	12,5	12,5
Drehzahl [min ⁻¹]	500	600	800	800	1000	1200
Austrittsdüse	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm
Druck [bar]	69	84	85	74	76	61
Massetemperatur [°C]	173	179	186	175	178	183
Gesamtfeuchte Rohstoff [%]	14,22	14,22	14,22	18,49	18,49	18,49
Dichte [g/ml]	0,118	0,124	0,101	0,139	0,130	0,096
Expansionsindex	3,81	3,79	3,80	3,44	3,43	3,38
spez. Oberfläche [cm ² /cm ³]	34,54	45,22	48,89	38,16	41,49	49,57
SME [kWh/kg]	0,136	0,140	0,146	0,123	0,123	0,130
L*(D65)	74,99	78,13	80,47	76,63	78,19	80,91
a*(D65)	0,46	0,50	0,25	-0,41	-0,41	-0,40
b*(D65)	8,54	9,12	9,57	10,26	10,74	10,98

In Tab. 14 sind die Ergebnisse der Versuche 32 – 35 aufgeführt. Diese Versuche werden mit dem ZE25 der Firma Berstorff durchgeführt. Für die Versuche 32 und 33 wird Mehl (Typ 405) als Rohstoff genutzt, während für die Versuche 34 und 35 die Rohstoffmischung aus Tab. 1 genutzt wird. Beide Rohstoffe werden sowohl mit, als auch ohne Wasserzugabe extrudiert. Durch die volumetrische Dosierung kommt es zu Schwankungen bei den Durchsätzen.

Gut zu erkennen ist, dass bei beiden Rohstoffen Druck, Massetemperatur, Expansionsindex, spez. Oberfläche und SME mit Wasserzugabe sinken, während die Dichte sehr stark ansteigt.

Der Expansionsindex bei der Rohstoffmischung ist ohne Wasserzugabe etwas höher als mit Mehl als Rohstoff. Auch die spez. Oberfläche ist bei der Rohstoffmischung mit und ohne Wasserzugabe deutlich höher, während der SME durch Zugabe von Öl und Kochsalz geringer ist. Die L*-Werte sind ebenfalls etwas geringer, während die a*- und b*-Werte bei allen Versuchen im selben Bereich liegen.

Tab. 14: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V32- V35

Versuch	32	33	34	35
Durchsatz [kg/h]	13,9	15	13,6	14,5
davon Wasser [kg/h]	-	0,76	-	0,76
Drehzahl [min^{-1}]	400	400	400	400
Austrittsdüse	5mm	5mm	5mm	5mm
Druck [bar]	56	38	53	40
Massetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	192	173	188	172
Gesamtfeuchte Rohstoff [%]	14,51	18,55	14,51	18,70
Dichte [g/ml]	0,11	0,31	0,10	0,38
Expansionsindex	4,28	3,45	4,49	3,46
spez. Oberfläche [cm^2/cm^3]	21,09	17,74	27,14	22,24
SME [kWh/kg]	0,247	0,203	0,218	0,191
L*(D65)	67,34	65,20	64,08	63,27
a*(D65)	0,01	-0,29	0,05	0,05
b*(D65)	10,99	11,62	10,74	11,07

Vergleich der Versuchsreihen

Im folgenden Abschnitt werden die vier verschiedenen Versuchsreihen des ZSK 43 Mv mit Hilfe der aufgenommenen Prozessparametern und Analysenwerten miteinander verglichen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden aus den vier Versuchsreihen des ZSK 43 Mv die Versuche miteinander verglichen, die mit gleicher Drehzahl und Durchsatz hergestellt worden sind. Eine Auflistung der im Diagramm aufgetragenen Versuche ist in Tab. 15 zu sehen.

Tab. 15: Übersicht der grafisch dargestellten Versuche

Versuche	Durchsatz [kg/h]	Drehzahl [min^{-1}]
2, 11, 16, 26	100	500
5, 12, 18, 27	150	600
9, 13, 20, 28, 29	200	800
14, 22, 30	250	1000
31	250	1200

Die Daten werden in Abhängigkeit von der Drehzahl aufgetragen. Für eine bessere Übersicht werden die geänderten Parameter anstatt der Versuchsreihen in der Legende aufgeführt. Eine kurze Übersicht der geänderten Parameter in den aufgezeigten Versuchsreihen ist Tab. 16 zu entnehmen. Da bei Versuchsreihe 4 zuerst bis 800 min^{-1} ohne Wasserzugabe extrudiert und anschließend die Wasserzugabe auf 5 % des Gesamtdurchsatzes gestellt worden ist, besteht diese Versuchsreihe aus zwei Datenreihen, da die Wasserzugabe die die Analysenwerte beeinflusst.

Tab. 16: Übersicht der geänderten Parameter der Versuchsreihen

Versuchsreihe	Geänderte Parameter
VR1	4x5mm Düse + Mehl
VR2	6x5mm Düse + Mehl
VR3	6x5mm Düse + Mehl + 5 % Wasser
VR4	6x5mm Düse + Mischung
	6x5mm Düse + Mischung + 5 % Wasser

In Abb. 7 ist der Druck in Abhängigkeit von der Drehzahl dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass der Druck, aufgrund der geringeren Anzahl von geöffneten Düsenbohrungen, bei VR1 im Vergleich mit VR2 deutlich höher liegt. Durch Wasserzugabe sinkt der Druck bei VR3 deutlich ab, während bei VR4 der Druck deutlich oberhalb der anderen Versuche mit 6 geöffneten Düsenbohrungen liegt. Dies hängt, wie bereits in 2.2.3 beschrieben, an dem zugegebenen Öl in der Rezepturmischung. Durch Wasserzugabe bei 800 min^{-1} sinkt der Druck jedoch mit steigender Drehzahl, während der Druck bei den anderen Versuchsreihen mit steigender Drehzahl steigt. Dies liegt jedoch daran, dass bei 1200 min^{-1} derselbe Durchsatz gewählt wurde, wie bei 1000 min^{-1} . Durch den geringeren Füllgrad sinkt der Druck.

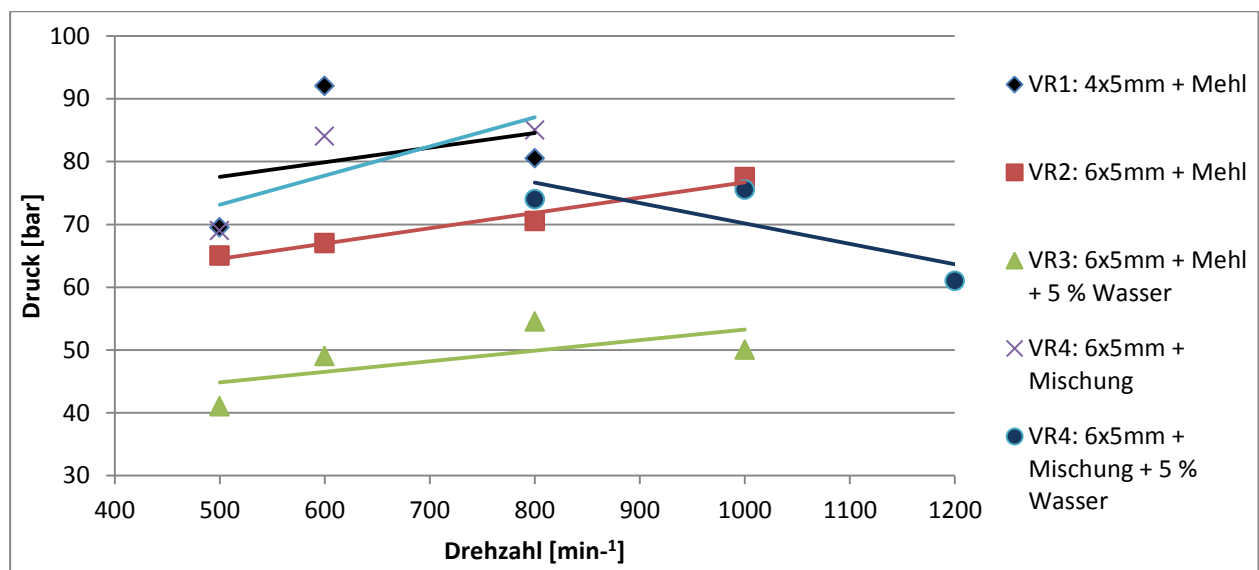


Abb. 7: Druck in Abhängigkeit von der Drehzahl

In Abb. 8 ist die Massetemperatur in Abhängigkeit von der Drehzahl abgebildet. Die Temperatur verhält sich bei VR 1 – 3 typisch. Durch den hohen Druck bei VR 1 ist hier auch die Temperatur sehr hoch, während durch die erhöhte Anzahl an geöffneten Düsenbohrungen bei VR2 der Druck und damit die Temperatur sinken. Durch Wasserzugabe bei VR 3 ist die Temperatur hier geringer.

Die Temperaturen bei der Versuchsreihe 4 mit und ohne Wasser liegen im Vergleich mit Versuchsreihe 2 und 3 höher. Durch Zugabe von Öl sollte laut Literatur die Massetemperatur allerdings niedriger liegen.

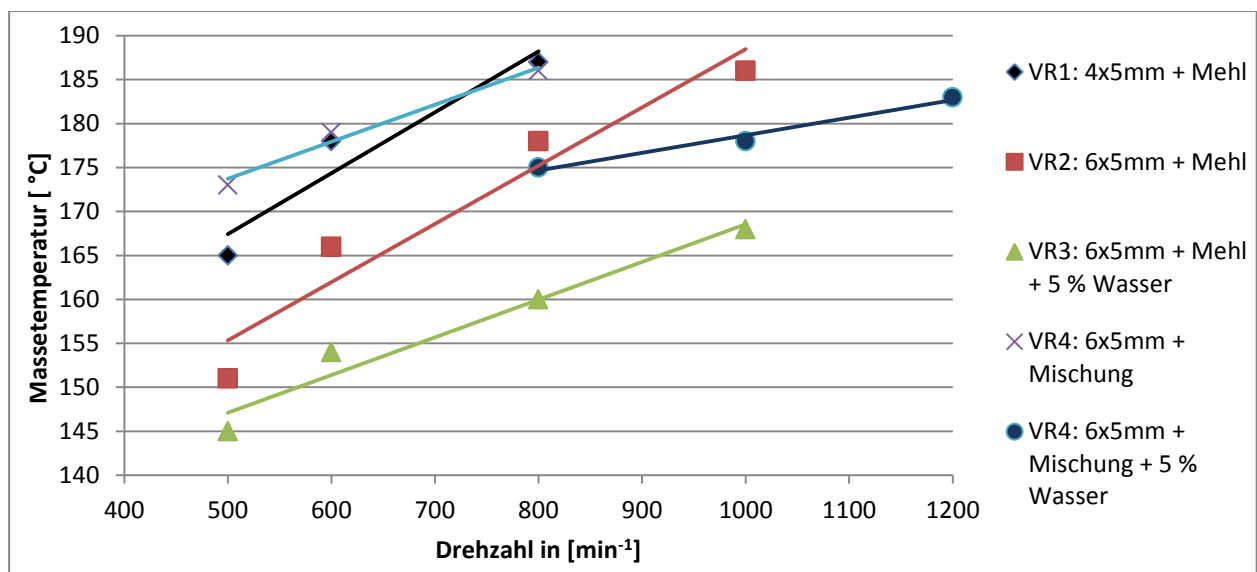


Abb. 8: Massetemperatur in Abhängigkeit von der Drehzahl

Abb. 9 zeigt die Massetemperatur in Abhängigkeit von der Drehzahl. Zu erkennen ist, dass VR 1 und 2 sehr geringe Dichten aufweisen. Durch hohen Druck und Temperatur liegen diese Werte entsprechend niedrig und sinken leicht mit steigender Drehzahl. Die Dichte von VR 3 bleibt auf demselben Niveau, liegt durch das zusätzliche Wasser jedoch deutlich höher als bei VR 1 und 2. VR 4 weist vergleichsweise hohe Dichten auf, diese sinken allerdings bei höheren Drehzahlen deutlich.

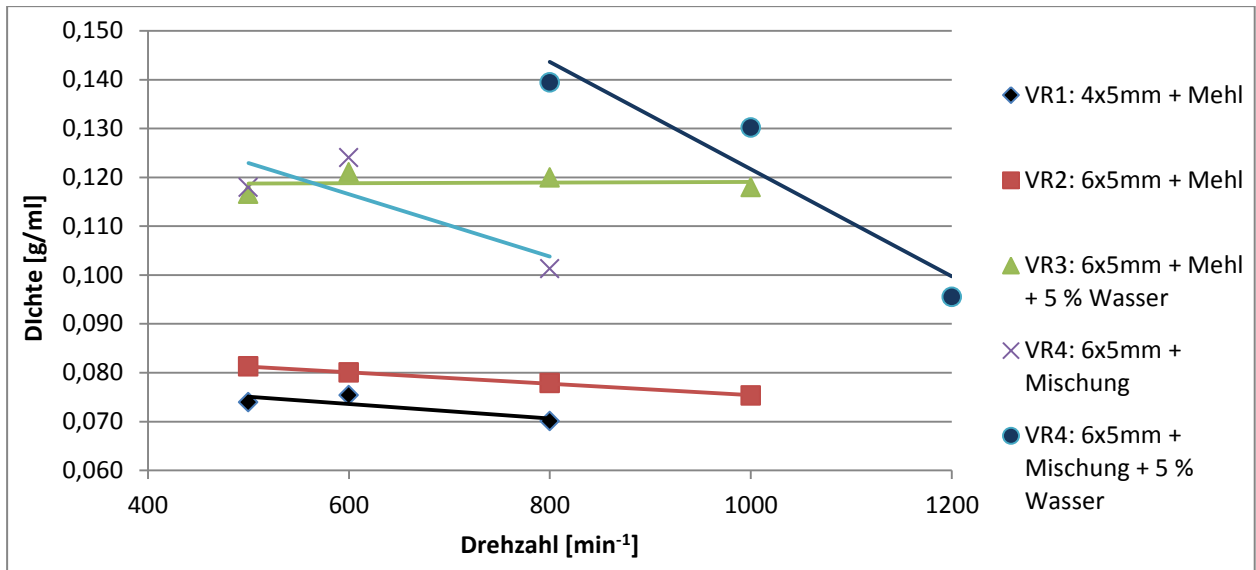


Abb. 9: Dichte in Abhängigkeit von der Drehzahl

In Abb. 10 ist der Expansionsindex in Abhängigkeit von der Drehzahl abgebildet. Die Versuchsreihen 1, 2 und VR 4 ohne Wasserzugabe liegen im selben Bereich, jedoch sind die Expansionsindices der VR 1 leicht höher. VR 4 mit Wasserzugabe besitzt geringere Expansionsindices, während im Vergleich zu VR 3 diese deutlich höher liegen. Durch Kochsalz und Öl lässt sich bei Wasserzugabe der Expansionsindex deutlich steigern. Eine Drehzahlerhöhung führt hier nicht zur Steigerung des Expansionsindex.

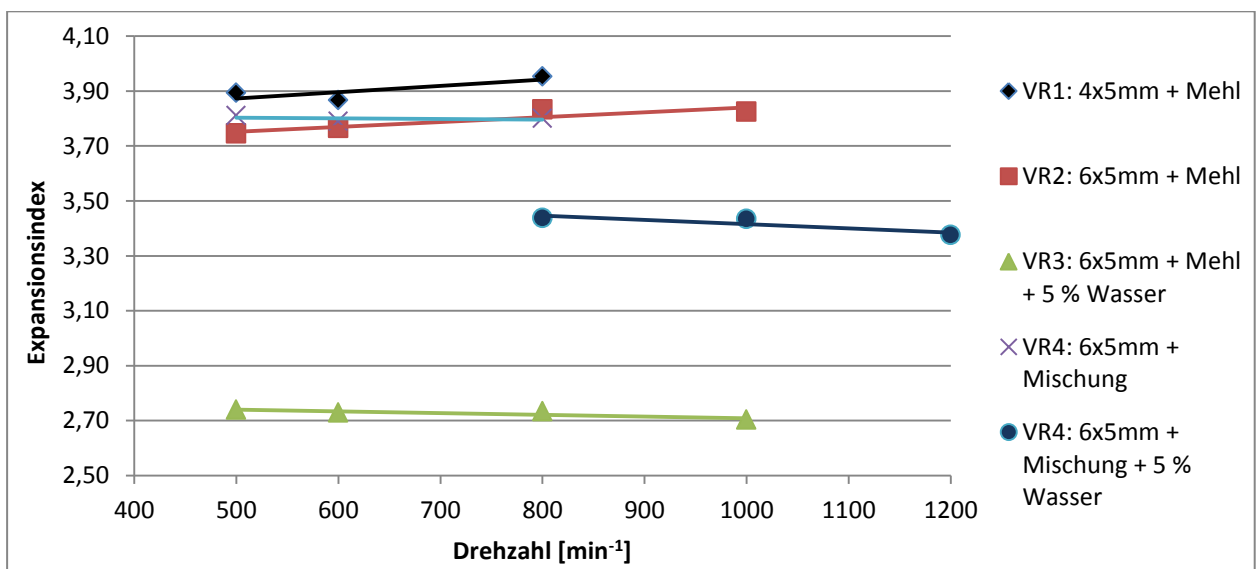


Abb. 10: Expansionsindex in Abhängigkeit von der Drehzahl

Abb. 11 zeigt die spez. Oberfläche in Abhängigkeit von der Drehzahl. Die spez. Oberflächen steigen bei allen Versuchsreihen relativ gleichmäßig an. Bei den Versuchsreihen ohne Wasserzugabe sind die spez. Oberflächen bei VR 4 am größten. Bei geringem Wassergehalt wirken Kochsalz und Öl fördernd auf die spez. Oberfläche. In der Regel weisen Extrudate mit geringerem Wassergehalt, wie in 2.24 beschrieben, eine höhere Porosität auf. VR3 weist jedoch bei diesen Drehzahlen die höchsten spez. Oberflächen auf, während der Expansionsindex am geringsten ist. Dies bedeutet das dort sehr viele Poren mit geringem Durchmesser vorhanden sind. Die Wasserzugabe führt hier zu einer besseren Verkleisterung der Stärke und somit zu einer höheren spez. Oberfläche. VR 4 mit Wasserzugabe verhält sich jedoch wie erwartet. Die Flips, die mit dem ZE25 hergestellt worden sind, besitzen spez. Oberflächen im Größenbereich von 21 – 27 cm²/cm³. Eine Drehzahl oberhalb von 400 min⁻¹ führt vermutlich zu einer deutlichen Steigerung der spez. Oberfläche. Allerdings lässt sich darüber keine genaue Aussage treffen, da die Schneckenwellen nicht vergleichbar sind.

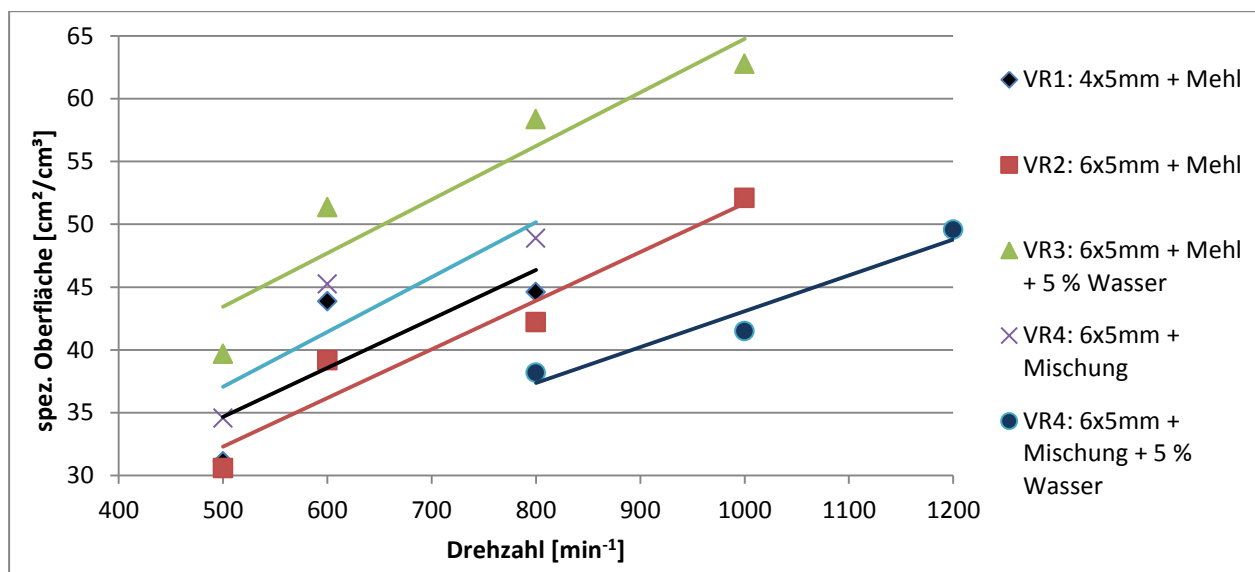


Abb. 11: spez. Oberfläche in Abhängigkeit von der Drehzahl

In Abb. 12 ist die SME in Abhängigkeit von der Drehzahl abgebildet. Zu erkennen ist, dass die SME bei Drehzahlerhöhung bei allen Versuchsreihen steigt. Die SME von VR1 ist nur unwesentlich höher als die von VR2. Durch Wasserzugabe verringert sich die SME, wie bei VR3 deutlich zu erkennen ist. Durch Zugabe von 1 % Öl bei VR 4 verringert sich die SME auch deutlich, bleibt jedoch höher als bei VR 3. Durch Wasser- und Ölzugabe verringert sich die SME noch weiter. Die SME liegt bei den Versuchen mit dem ZE25 in Größenbereichen von 0,19 – 0,3 kWh/kg und ist somit deutlich höher.

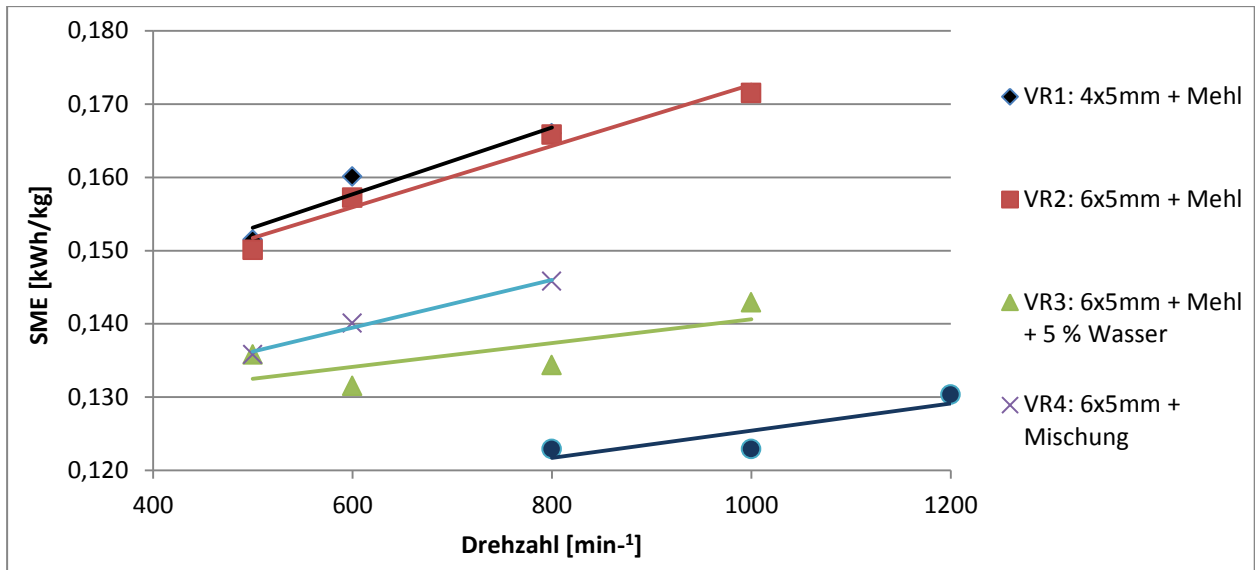


Abb. 12: SME in Abhängigkeit von der Drehzahl

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Die Versuche haben gezeigt, dass ein Herstellen von Weizenflips mit Hilfe des ZSK 43 Mv mit beiden Rohstoffen und den verschiedenen Einstellungen begrenzt möglich ist. Viele Parameter beeinflussen sich gegenseitig mehr oder weniger stark und somit auch die Produkteigenschaften, wodurch sich eine genaue Aussage nur schwer treffen lässt. Gut zu beobachten ist allerdings, dass Drehzahlen über 1000 min^{-1} bereits zu Aufspaltung der Flips führen. Mit der Mischung in der Kochsalz und Öl vorhanden sind, lässt sich bei Wasserzugabe die Drehzahl auf bis zu 1200 min^{-1} erhöhen. Kochsalz und Öl wirken bei der Extrusion unterstützend und durch eine bessere Verkleisterung der Stärke kommt es bei dieser Drehzahl und Einstellungen zu keiner Aufspaltung. Zu überprüfen ist, ob sich durch weitere Wasser-, Kochsalz- oder Ölzugabe die Drehzahl weiter erhöhen lässt. Dafür ist aber sicherlich eine Dosiereinrichtung nötig, die mehr als 300 kg/h Rohstoff fördern kann, da der Füllgrad bei höheren Drehzahlen sehr gering sein wird. Weiterhin müssten noch andere Schneckenkonfigurationen mit z.B. geringerem Schereintrag überprüft werden, denn in der Regel führt ein hoher Schereintrag zu einer hohen spez. Oberfläche. Es sollte auch mit verschiedenen Düsendurchmessern und Wasserzugaben extrudiert werden. Durch weitere Wasserzugabe könnte die erhöhte Verkleisterung der Stärke bei höheren Drehzahlen unterstützend wirken.

Die spez. Oberfläche liegt weit über den Flips, die mit dem ZE25 hergestellt worden sind. Auch liegt sie deutlich über der spez. Oberfläche von handelsüblichen Erdnussflips. Es stellt sich die

Frage, wie sich die hohe spez. Oberfläche auf Knusprigkeit, Härte und andere sensorische Eigenschaften auswirkt.

Für weitere Arbeiten an diesem Thema könnte auch die Analyse des Wasserabsorptionsindex aufschlussreich sein, da dieser Hinweise über die Veränderung der Stärke bei der Extrusion gibt.

6. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden am Deutschen Institut für Lebensmitteltechnik e.V. mit dem ZSK 43 MEGAvolume der Firma Coperion Weizenflips mit zwei verschiedenen Rohstoffen hergestellt und analysiert. Zum Vergleich wurden auch Weizenflips mit dem ZE25 der Firma Berstorff hergestellt. Die Rohstoffe waren zum einen Weizenmehl (Typ 405) und zum anderen eine Rohstoffmischung aus diesem Mehl und 1 % Sonnenblumenöl und 1 % Kochsalz. Die beiden Rohstoffe wurden ohne, sowie mit Wasserzugabe extrudiert. Es wurden Vorversuche durchgeführt, um eine Vorstellung davon zu haben, mit welchem Durchsatz und Drehzahl begonnen werden muss, um einen stabilen Lauf zu gewährleisten. Ein Durchsatz von 110 kg/h und eine Drehzahl von 500 min⁻¹ wurden gewählt. Der Durchsatz wurde nicht verändert, während die Drehzahl schrittweise auf 600 min⁻¹, 800 min⁻¹ und schließlich 900 min⁻¹ erhöht wurde. Ab einer Drehzahl von 800 min⁻¹ kam es zu einer Aufspaltung der Flips, da vermutlich der Füllgrad zu gering war. Anschließend wurden vier Versuchsreihen mit dem ZSK 43 Mv hergestellt. Begonnen wurde mit vier offenen Düsenbohrungen im Spritzkopf, einer Drehzahl von 400 min⁻¹ und einem Durchsatz von 100 kg/h. Es wurden im Wechsel die Drehzahl und der Durchsatz um 100 min⁻¹ bzw. 25 kg/h erhöht. Dabei stellte sich heraus, dass Drehzahlen oberhalb 900 min⁻¹ und Durchsätze oberhalb 200 kg/h zu keinem stabilen Lauf führten. Aus diesem Grund wurden im Spritzkopf sechs Düsenbohrungen freigelassen und für die restlichen Versuchsreihen genutzt. Bei der zweiten Versuchsreihe wurde mit einer Drehzahl von 500 min⁻¹ bei einem Durchsatz von 100 kg/g begonnen und die Drehzahl auf 600 min⁻¹, 800 min⁻¹ und schließlich auf 1000 min⁻¹ erhöht. Die Durchsätze wurden bei jeder Drehzahlerhöhung um 50 kg/h erhöht. Hier zeigte sich, dass Drehzahlen oberhalb von 1000 min⁻¹ zu keinem stabilen Lauf führen. Die dritte Versuchsreihe ähnelt der zweiten, wurde jedoch mit 5 % Wasserzugabe am Gesamtdurchsatz durchgeführt und führte ebenfalls oberhalb von 1000 min⁻¹ zu keinem stabilen Lauf. In der vierten Versuchsreihe wurden dieselben Durchsätze und Drehzahlen wie bei der zweiten Versuchsreihe durchgeführt, jedoch mit der Rohstoffmischung. Bei einer Drehzahl von 800 min⁻¹ und einem Durchsatz von 200 kg/h wurde 5 % Wasser hinzugegeben. Durch Öl, Kochsalz und Wasserzugabe war selbst ein stabiler Lauf bei 1200 min⁻¹ und 250 kg/h möglich. Die Extrudate wurden anschließend bezüglich ihrer Dichte, spez. Oberfläche, Expansionsindex, SME und Farbwerte analysiert. Hier zeigte sich, dass durch höhere Drehzahlen die Dichte in der Regel sinkt und der Expansionsindex nicht beeinflusst wird. Die spez. Oberfläche steigt an, liegt jedoch deutlich höher als bei Extrudaten, die mit dem ZE25 hergestellt wurden, und handelsüblichen

Flips. Die SME des ZSK 43 Mv liegt deutlich unterhalb den Werten des ZE 25, steigt jedoch mit höheren Drehzahlen an. Durch Öl und Wasserzugabe sinkt die SME.

Quellenverzeichnis

- Coperion; Betriebsanleitung der ZSK Reihe; 2010
- Führer, R.; Charakterisierung eines gleichläufigen Doppelschneckenextruder im Technikumsmaßstab; Praxissemesterarbeit; Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e.V.; Hochschule Neubrandenburg; nicht veröffentlicht; 2010
- Harper, J. M.; Extrusion of Foods, Volume II, CRC Press; 1981
- Kohlgrüber, K.; Co-Rotating Twin-Screw Extruders: Fundamentals, Technology, and Applications; Hanser Gardner; 2008
- Leeb, C. V; Schuchmann, H. P.; Lebensmittelextrusion bei extrem hohen Drehzahlen: Charakterisierung des Prozessverhaltens und Einfluss der Prozessparameter auf die Eigenschaften von extrudiertem Maisgrieß; Chemie Ingenieur Technik; 2008
- Riaz, M. N.; Extruders in Food Applications; CRC Press; 2000
- www.coperion.com/typo3temp/pics/ZSK_Mv_PLUS_68b177e4d7.gif
(Abruf: 14.02.2010)
- www.coperion.com/compounding-extrusion/maschinen-anlagen/zsk-baureihe
(Abruf: 22.12.2010)
- www.schorch.ch/theme/getreide/pics/schnecke.jpg (Abruf: 25.5.2010)

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Kernprogressive Schneckenwelle (www.schorch.ch, 2010).....	5
Abb. 2: Skizze eines Doppelschneckenextruders (Führer, 2010)	6
Abb. 3: ZSK 125 MEGAvolume PLUS (www.coperion.com, 2011).....	6
Abb. 4: Grafische Darstellung der Schneckenkonfiguration des ZE25	11
Abb. 5: Exemplarischer Verlauf der Bildauswertung (Führer, 2010).....	18
Abb. 6: Aufgespaltene Flips.....	20
Abb. 7: Druck in Abhängigkeit von der Drehzahl	27
Abb. 8: Massetemperatur in Abhängigkeit von der Drehzahl.....	28
Abb. 9: Dichte in Abhängigkeit von der Drehzahl.....	29
Abb. 10: Expansionsindex in Abhängigkeit von der Drehzahl	29
Abb. 11: spez. Oberfläche in Abhängigkeit von der Drehzahl	30
Abb. 12: SME in Abhängigkeit von der Drehzahl	31

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Rezeptur der Mischung	9
Tab. 2: Schneckenkonfiguration des ZE25	10
Tab. 3: Übersicht der verwendeten Schneckenelemente	11
Tab. 4: Spezifikationen des ZSK 43 Mv	12
Tab. 5: Schneckenkonfiguration des ZSK 43 Mv	13
Tab. 6: Übersicht der Versuchsreihen	14
Tab. 7: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen VV1 – VV4	21
Tab. 8: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V1 - V5	21
Tab. 9: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V6 - V10	22
Tab. 10: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V11- V15	23
Tab. 11: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V16- V20	24
Tab. 12: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V21- V25	24
Tab. 13: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V26- V31	25
Tab. 14: Ergebnisse der Weizenflip-Herstellung und Analysen V32- V35	26
Tab. 15: Übersicht der grafisch dargestellten Versuche	26
Tab. 16: Übersicht der geänderten Parameter der Versuchsreihen	27
Tab. 17: Mittelwerte und Standardabweichungen der Dichtemessungen	39
Tab. 18: Mittelwerte und Standardabweichungen der Expansionsindex-Messungen	40
Tab. 19: Mittelwerte und Standardabweichungen der Bildanalysen	41
Tab. 20: Protokollblatt des ZSK 43 Mv der VV1 – 4 und Versuche 1 - 8	42
Tab. 21: Protokollblatt des ZSK 43 Mv der Versuche 9 - 20	43
Tab. 22: Protokollblatt des ZSK 43 Mv der Versuche 21 - 31	44
Tab. 23: Protokollblatt des ZE25 der Versuche 32 - 35	45

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Anhang

Tab. 17: Mittelwerte und Standardabweichungen der Dichtemessungen

Versuch	Dichte [g/ml]	STABW
VV1	0,067	0,006
VV2	0,059	0,002
VV3	n.a.	n.a.
VV4	n.a.	n.a.
1	0,091	0,000
2	0,074	0,000
3	0,077	0,003
4	0,071	0,004
5	0,075	0,002
6	0,065	0,001
7	0,071	0,001
8	0,066	0,001
9	0,070	0,006
10	0,065	0,004
11	0,081	0,001
12	0,080	0,001
13	0,078	0,002
14	0,075	0,000
15	n.a.	n.a.
16	0,117	0,002
17	n.a.	n.a.
18	0,121	0,013
19	0,084	0,012
20	0,120	0,007
21	n.a.	n.a.
22	0,118	0,007
23	n.a.	n.a.
24	n.a.	n.a.
25	n.a.	n.a.
26	0,118	0,019
27	0,124	0,002
28	0,101	0,001
29	0,139	0,002
30	0,130	0,004
31	0,096	0,004
32	0,110	0,008
33	0,308	0,017
34	0,097	0,001
35	0,379	0,031

Tab. 18: Mittelwerte und Standardabweichungen der Expansionsindex-Messungen

Versuch	Expansionsindex	STABW
VV1	3,87	0,18
VV2	3,90	0,20
VV3	n.a.	n.a.
VV4	n.a.	n.a.
1	3,89	0,14
2	3,89	0,17
3	3,94	0,14
4	3,91	0,28
5	3,87	0,16
6	3,95	0,14
7	3,87	0,13
8	3,98	0,22
9	3,95	0,18
10	4,02	0,15
11	3,75	0,22
12	3,76	0,16
13	3,83	0,17
14	3,82	0,21
15	n.a.	n.a.
16	2,74	0,30
17	n.a.	n.a.
18	2,73	0,13
19	2,74	0,13
20	2,73	0,15
21	n.a.	n.a.
22	2,70	0,11
23	n.a.	n.a.
24	n.a.	n.a.
25	n.a.	n.a.
26	3,81	0,12
27	3,79	0,24
28	3,80	0,26
29	3,44	0,18
30	3,43	0,18
31	3,38	0,14
32	4,28	0,32
33	3,45	0,19
34	4,49	0,17
35	3,46	0,19

Tab. 19: Mittelwerte und Standardabweichungen der Bildanalysen

Versuch	spez. Oberfläche [cm ² /cm ³]	STABW
VV1	32,41	1,80
VV2	38,75	1,91
VV3	n.a.	n.a.
VV4	n.a.	n.a.
1	34,78	2,42
2	31,11	2,47
3	34,33	2,28
4	33,03	3,08
5	43,86	3,54
6	40,60	3,09
7	41,60	2,35
8	41,74	2,68
9	44,59	3,44
10	43,02	1,84
11	30,57	1,90
12	39,17	1,98
13	42,20	3,04
14	52,09	3,26
15	n.a.	n.a.
16	39,68	3,35
17	n.a.	n.a.
18	51,35	2,49
19	52,90	1,84
20	58,36	3,53
21	n.a.	n.a.
22	62,77	2,38
23	n.a.	n.a.
24	n.a.	n.a.
25	n.a.	n.a.
26	34,54	3,98
27	45,22	2,65
28	48,89	2,89
29	38,16	2,13
30	41,49	2,07
31	49,57	3,13
32	21,09	1,70
33	17,74	1,72
34	27,14	2,62
35	22,24	2,04

Tab. 20: Protokollblatt des ZSK 43 Mv der VV1 – 4 und Versuche 1 - 8

Versuch		VV1	VV2	VV3	VV4	1	2	3	4	5	6	7	8
Temperatur 1[°C]	Soll	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ist	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Temperatur 2[°C]	Soll	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	Ist	23	23	23	23	24	25	24	25	25	25	24	25
Temperatur 3[°C]	Soll	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	Ist	26	26	26	26	27	28	27	28	27	27	27	27
Temperatur 4[°C]	Soll	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	Ist	29	29	29	29	30	31	30	31	30	30	30	30
Temperatur 5[°C]	Soll	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Sidefeeder	Ist	40	40	40	40	40	41	40	41	40	40	40	40
Temperatur 6[°C]	Soll	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	Ist	48	47	47	47	50	54	50	53	52	51	51	50
Temperatur 7[°C]	Soll	120	120	120	120	140	140	140	140	140	140	140	140
	Ist	120	120	120	122	140	140	140	139	140	140	140	140
Temperatur 8[°C]	Soll	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	Ist	140	141	141	141	139	140	140	140	140	141	140	140
Temperatur 9[°C]	Soll	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	Ist	140	140	140	140	140	140	139	140	140	140	140	140
Temperatur 10[°C]	Soll	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	Ist	140	140	140	142	139	140	140	140	140	140	140	140
Temperatur Austritt [°C]		166	167	166	160	176	165	180	170	178	178	181	184
Druck Mittelwert [bar]		80	58	40	34	76	70	78	67	92	64	80	62
Drehmoment Wellen [Nm]		51	45	37	20	52	43	53	52	56	50	53	53
Drehzahl Wellen [min ⁻¹]		500	600	800	900	400	500	500	600	600	700	700	800
Hauptdosierung [kg/h]		110	110	110	110	100	100	125	125	150	150	175	175
Flüssigdosierung [kg/h]		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durchsatz gesamt [kg/h]		110	110	110	110	100	100	125	125	150	150	175	175
Austrittsdüse		4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm	4x5mm

Tab. 21: Protokollblatt des ZSK 43 Mv der Versuce 9 - 20

Versuch		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Temperatur 1[°C]	Soll	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ist	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Temperatur 2[°C]	Soll	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	Ist	24	24	24	24	24	24	24	25	25	24	24	24
Temperatur 3[°C]	Soll	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	Ist	27	27	27	27	27	27	27	28	28	28	29	28
Temperatur 4[°C]	Soll	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	Ist	30	30	30	30	30	29	29	31	31	31	33	31
Temperatur 5[°C]	Soll	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	50	40
Sidefeeder	Ist	40	40	41	40	40	40	40	41	40	40	51	40
Temperatur 6[°C]	Soll	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	100	40
	Ist	50	50	55	52	50	48	48	55	54	52	100	51
Temperatur 7[°C]	Soll	140	140	140	140	140	120	140	140	140	140	180	140
	Ist	140	140	140	140	140	122	141	140	140	140	180	140
Temperatur 8[°C]	Soll	140	140	140	140	140	120	140	140	140	140	180	140
	Ist	140	140	141	140	140	133	144	141	140	140	180	140
Temperatur 9[°C]	Soll	140	140	140	140	140	120	140	140	140	140	180	140
	Ist	140	140	141	140	140	129	141	139	141	138	179	140
Temperatur 10[°C]	Soll	140	140	140	140	140	120	140	140	140	140	180	140
	Ist	140	140	140	140	140	124	141	140	140	139	179	140
Temperatur Austritt [°C]		187	189	151	166	178	186	197	145	145	154	176	160
Druck Mittelwert [bar]		81	71	65	67	71	78	86	41	44	49	31	55
Drehmoment Wellen [Nm]		58	56	42	55	58	60	74	38	34	46	42	47
Drehzahl Wellen [min ⁻¹]		800	900	500	600	800	1000	1000	500	600	600	800	800
Hauptdosierung [kg/h]		200	200	100	150	200	250	300	95	95	142,5	142,5	190
Flüssigdosierung [kg/h]		-	-	-	-	-	-	-	5	5	7,5	7,5	10
Durchsatz gesamt[kg/h]		200	200	100	150	200	250	300	100	100	150	150	200
Austrittsdüse		4x5mm	4x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm

Tab. 22: Protokollblatt des ZSK 43 Mv der Versuche 21 - 31

Versuch		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Temperatur 1[°C]	Soll	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ist	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Temperatur 2[°C]	Soll	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	Ist	24	24	24	24	24	25	25	25	25	25	25
Temperatur 3[°C]	Soll	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	Ist	28	28	28	28	29	30	31	31	32	32	33
Temperatur 4[°C]	Soll	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	Ist	31	31	31	31	31	34	35	35	36	38	38
Temperatur 5[°C]	Soll	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	Ist	40	40	40	40	40	43	42	41	40	40	40
Temperatur 6[°C]	Soll	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	Ist	50	50	49	49	49	55	53	51	51	51	51
Temperatur 7[°C]	Soll	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	Ist	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	141
Temperatur 8[°C]	Soll	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	Ist	140	141	140	140	140	141	140	141	138	140	141
Temperatur 9[°C]	Soll	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	Ist	140	140	140	141	140	140	140	140	139	139	141
Temperatur 10[°C]	Soll	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	Ist	140	140	140	140	141	140	140	140	141	140	141
Temperatur Austritt [°C]		162	168	170	174	176	173	179	186	175	178	183
Druck Mittelwert [bar]		38	50	38	53	41	69	84	85	74	76	61
Drehmoment Wellen [Nm]		39	50	42	46	44	38	49	51	43	43	38
Drehzahl Wellen [min ⁻¹]		1000	1000	1200	1200	1400	500	600	800	800	1000	1200
Hauptdosierung [kg/h]		190	237,5	237,5	285	285	100	150	200	190	237,5	237,5
Flüssigdosierung [kg/h]		10	12,5	12,5	15	15	-	-	-	10	12,5	12,5
Durchsatz gesamt[kg/h]		200	250	250	300	300	100	150	200	200	250	250
Austrittsdüse		6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm	6x5mm

Tab. 23: Protokollblatt des ZE25 der Versuche 32 - 35

Versuch		32	33	34	35
Temperatur 1[°C]	Soll	20	20	20	20
	Ist	32	34	35	34
Temperatur 2[°C]	Soll	40	40	40	40
	Ist	36	40	38	40
Temperatur 3[°C]	Soll	60	60	60	60
	Ist	58	63	69	64
Temperatur 4[°C]	Soll	80	80	80	80
	Ist	77	83	85	83
Temperatur 5[°C]	Soll	100	100	100	100
Sidefeeder	Ist	103	102	97	97
Temperatur 6[°C]	Soll	100	100	100	100
	Ist	117	110	115	110
Temperatur 7[°C]	Soll	120	120	120	120
	Ist	122	122	122	121
Temperatur 8[°C]	Soll	120	120	120	120
	Ist	121	120	121	121
Temperatur 9[°C]	Soll	120	120	120	120
	Ist	120	120	121	121
Temperatur 10[°C]	Soll	120	120	120	120
	Ist	121	124	121	119
Temperatur[°C] Austritt		192	173	188	172
Druck Mittelwert [bar]		56	38	53	40
Leistung [kW]		3,44	3,05	4,03	2,77
Drehzahl Wellen [min-1]		400	400	400	400
Einstellung Dosierung		1,75	1,75	2,1	2,1
Durchsatz Flüssigdosierung [kg/h]		0	0,76	0	0,76
Durchsatz gesamt[kg/h]		13,9	15	13,6	14,5
Austrittsdüse		5 mm	5 mm	5 mm	5 mm