



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften
Studiengang Lebensmitteltechnologie
WS 2013/2014

Adaption des „coarse conching“ – Verfahrens zur Herstellung von Milchschokolade im Technikumsmaßstab

Bachelor Arbeit

Verfasserin: Franziska Müller

Betreuer: Prof. Dr. Siegfried Bolenz
Prof. Dr.-Ing. Thomas John

Neubrandenburg, 05.02.2014

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis 2013 – 0722 - 8

Inhaltsverzeichnis

	Abkürzungsverzeichnis	2
	Symbolverzeichnis	3
1	Einleitung	4
2	Stand von Wissenschaft & Technik	5
2.1	Technologie des Conchierens	5
2.2	Bauarten der Conche	6
3	Material und Methoden	8
3.1	Material und Rezeptur	8
3.2	Versuchsplanung	8
3.3	Versuchsablauf	12
3.4	Instrumentelle Analyse	16
3.4.1	Partikelgrößenverteilung	16
3.4.2	Messung der rheologischen Eigenschaften	18
3.4.3	TS-Bestimmung mittels Seesandmethode	19
3.5	Statistische Analyse	20
3.6	Ergebnisse der statistischen Auswertung	20
4	Ergebnisse	23
4.1	Messergebnisse Partikelgrößenverteilung	23
4.2	Messergebnisse Rheologie	28
4.3	Energiebilanzen	33
4.4	Abschlussdiskussion und weitere Schritte	35
5	Zusammenfassung	37
6	Abstract	38
7	Literaturverzeichnis	39
8	Verzeichnis der Abbildungen	41
9	Verzeichnis der Tabellen	42
10	Anlagen	43
	Eidesstaatliche Erklärung	45

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
6o1	Zerkleinerung mit 6 mm Kugeln ohne Nachscherung; 1. Versuchsdurchführung
6o2	Zerkleinerung mit 6 mm Kugeln ohne Nachscherung; 2. Versuchsdurchführung
6C1	Zerkleinerung mit 6 mm Kugeln mit Nachscherung in Conche; 1. Versuchsdurchführung
6C2	Zerkleinerung mit 6 mm Kugeln mit Nachscherung in Conche; 2. Versuchsdurchführung
6R1	Zerkleinerung mit 6 mm Kugeln mit Nachscherung im Inline – Mischer; 1. Versuchsdurchführung
6R2	Zerkleinerung mit 6 mm Kugeln mit Nachscherung im Inline – Mischer; 2. Versuchsdurchführung
2+6o1	Zerkleinerung mit 2 mm + 6 mm Kugeln ohne Nachscherung; 1. Versuchsdurchführung
2+6o2	Zerkleinerung mit 2 mm + 6 mm Kugeln ohne Nachscherung; 2. Versuchsdurchführung
2+6C1	Zerkleinerung mit 2 mm + 6 mm Kugeln mit Nachscherung in Conche; 1. Versuchsdurchführung
2+6C2	Zerkleinerung mit 2 mm + 6 mm Kugeln mit Nachscherung in Conche; 2. Versuchsdurchführung
2+6R1	Zerkleinerung mit 2 mm + 6 mm Kugeln mit Nachscherung im Inline – Mischer, 1. Versuchsdurchführung
2+6R2	Zerkleinerung mit 2 mm + 6 mm Kugeln mit Nachscherung im Inline – Mischer, 2. Versuchsdurchführung
Rp	Referenzprobe
ANOVA	Analysis of Variance
FU	Frequenzumrichter
IOCCC	International Office of Cocoa, Chocolate and Confectionery

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
α	Irrtumswahrscheinlichkeit	
η	Grenzviskosität	[Pas]
η_{Ca}	Grenzviskosität nach Casson	[Pas]
η_{∞}	Grenzviskosität nach Windhab	[Pas]
τ	Schubspannung	[Pa]
τ_{Ca}	Fließgrenze nach Casson	[Pa]
τ_0	Fließgrenze nach Windhab	[Pa]
d	Partikelgröße	[μm]
d_i	mittlerer Durchmesser	[cm]
m	Masse	[g] bzw. [kg]
$\dot{\gamma}$	Scherrate	[s ⁻¹]
Q_p	Partikeldichte	[g/cm ³]
P	mechanische Leistung	[kW]
p	Prozentsatz	[%]
t	Zeit	[h]
W	verrichtete Arbeit	[kWh]
\bar{x}	Mittelwert	
V	Volumen	[cm ³]
V_i	relatives Volumen	[cm ³]
\dot{V}	Volumenstrom	[cm ³ /min]
	spezifische Oberfläche	[m ² /g]
	Umdrehungen	[U/min]

1 Einleitung

Seit Mitte des 17. Jahrhunderts erfreut sich die Schokolade in Deutschland einer großen Beliebtheit (Kleinert, 1997; S. 2). So betrug der pro – Kopf – Verbrauch 2011 in Deutschland 9,61 Kilogramm (de.statista.com; 19.09.2013, 13:30 Uhr). Was viele Verbraucher allerdings nicht wissen ist, dass der Herstellung der verschiedenen Schokoladensorten ein sehr zeit – und kostenaufwändiger Prozess zugrunde liegt (Boede, 2013; S. 3). So können verschiedene Verfahren z.B. zum Zerkleinern der Rohstoffe, wie das Mahlen mit Mühlen oder Walzen, zum Einsatz kommen.

Die Hochschule Neubrandenburg hat bisher konventionelle Verfahren zur Schokoladenherstellung angewandt. Das bedeutet, dass sowohl die Vor – als auch die Feinzerkleinerung der Rohstoffe mittels eines 3 – Walzwerkes vorgenommen wurden. Die anschließende Veredelung der Schokolade erfolgte in einer Conche. Im Jahr 2013 wurde die Conche durch eine Wirbelkammer – Conche ersetzt. Durch diese neue Form können die Rohstoffe innerhalb der Conche vor- und anschließend in einer Kugelmühle feinzerkleinert werden. Damit entfällt der zeitaufwändige Zerkleinerungsprozess mit den Walzen. Dieser alternative Fertigungsprozess wird Grobconchieren genannt.

In dieser Bachelor Arbeit wird Milkschokolade mit Hilfe des Grobconchier – Prozesses hergestellt. Hierzu soll untersucht werden, ob der Einsatz einer Kugelmischung, bestehend aus 2 + 6 mm Kugeln, einen anderen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften aufweist als die Zerkleinerung mit 6 mm Kugeln. Außerdem wird untersucht, ob sich die Nachscherungen in der Conche und einem Inline – Mischer nach dem Zerkleinerungsprozess positiv auf die Eigenschaften der Schokolade auswirken. Die Eigenschaften, z.B. Partikelgrößenverteilung und Fließeigenschaften, werden mit verschiedenen Analysemethoden untersucht. Die Ergebnisse werden anschließend mit Referenzwerten aus früheren Projekten verglichen.

2 Stand von Wissenschaft & Technik

2.1 Technologie des Conchierens

Das Conchieren der Schokoladenmasse ist ein wesentlicher Verfahrensschritt während der Herstellung von Schokoladen und dient der Endveredelung der Schokolade (Kleinert, 1997; S. 168). Laut Beckett (2009; S. 198) lässt sich dieser Prozess in 3 Phasen gliedern:

- 1) Trockenphase
- 2) Pastöse Phase
- 3) Flüssige Phase

Auf Grund des pulverförmigen Materials, Zucker und Magermilchpulver, zu Beginn des Conchieren erfolgt während der 1. Phase ein hoher Energieeintrag durch Scherung in die Kakaomasse. Daraus resultiert ein Temperaturanstieg. Dies hat zur Folge, dass Wasser und unerwünschte flüchtige Aromastoffe aus der Masse ausgetragen werden (Beckett, 2009; S. 199). Ein weiterer Vorteil der Scherung ist die Förderung der einheitlichen Verteilung der Kakaobutter, die in einer geringen Menge zu Beginn der 1. Phase dazugegeben wird. Diese umhüllt die Nichtfettstoffe mit Fett und beeinflusst somit die spätere Fließfähigkeit positiv (Beckett, 2009; S 199).

Während der 2. Phase wird durch nochmalige Zugabe von Kakaobutter erreicht, dass die Masse verflüssigt wird. Des Weiteren erhöht sich auch in diesem Schritt die Temperatur der Masse, da sie weiterhin durch Scherung beansprucht wird (Beckett, 2009; S. 201). Während des gesamten Conchierprozesses werden die in der Schokolade befindlichen freien Aminosäuren abgebaut. Zusammen mit den vorhandenen reduzierenden Zuckern bilden sich über chemische Reaktionen die Aromavorstufen der Schokolade. Aus diesen Vorstufen entwickeln sich während des weiteren Prozesses neue spezifische Aromen. (Kleinert, 1997; S. 165)

In der letzten Phase werden der Masse die restliche Kakaobutter und Lecithin zugegeben. Durch weitere Scherung werden alle Rohstoffe gründlich durchmischt. Das Lecithin wirkt als Emulgator, so dass sich keine Agglomerate bilden und die rheologischen Eigenschaften positiv beeinflusst werden (Beckett, 2009; S. 201 f.).

2.2 Bauarten der Conche

Die Geschichte der Conche geht bis in das Jahr 1879 zurück. Damals erfand der Schweizer Rodolphe Lindt den sogenannten Lindt – Längsreiber (siehe Abbildung 1). In dieser Conche wurden die Hauptrohstoffe Kakaomasse, Milchpulver und Zucker unter Zugabe von Kakaobutter in muschelförmigen Trögen sehr lange gerieben und geknetet. Die Durchmischung der Schokoladenmasse erfolgte erst nach der Verflüssigung der Masse durch das Übereinanderschlagen über dem Knetelement. (Kleinert, 1997; S. 6)

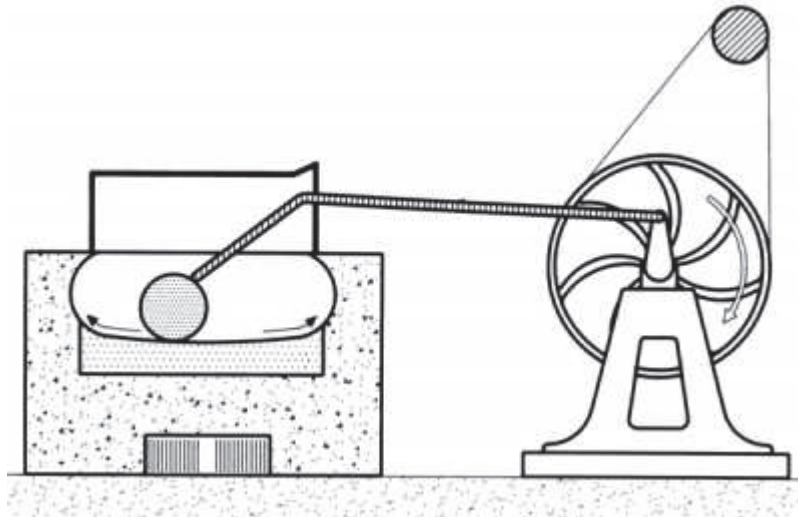


Abbildung 1: Arbeitsweise des Lindt-Längsreibers (www.cacaochocolade.nl)

Da diese Art der Endveredelung ein großer Erfolg war, fand sie anschließend den Weg in viele Produktionsbetriebe in verschiedenen Ländern. Auch wurde versucht, den Lindt-Längsreiber nachzubauen, was allerdings lange zu keinem nennenswerten Erfolg führte (Kleinert, 1997; S. 158). Da das Fassungsvermögen der Lindt Conche auf ca. 113 Kilogramm beschränkt war und die Nachfrage nach Schokolade immer weiter stieg, entwickelten sich die Conchen im Laufe der Zeit immer weiter (Kleinert, 1997; S. 158). So entstanden z.B. die Clover Conche der Firma Carle & Montanari SpA oder aber auch die Conche der Firma Richard Frisse GmbH (siehe Abbildung 2) (Beckett, 2009; S. 205 f).

Die Frisse Conche wird auch als Doppel – Überschlag – Conche bezeichnet. Sie besteht aus drei doppelwandigen Kammern, wobei die beiden äußeren einen kleineren Durchmesser besitzen als die mittlere Kammer. Zudem beinhaltet die Frisse Conche drei gegenläufige Bearbeitungselemente, durch welche die Kakaomasse entweder verdichtet bzw. gut durchmischt werden kann. Weiterhin befinden sich in den Kammern sehr große Wand- und Schabeflächen, so dass sehr hohe Scherkräfte auf das Produkt wirken können. Zudem sind „die Schaber und Bearbeitungsorgane so auf den Wellen angeordnet, dass sie sich

überschneiden. Damit entstehen Zonen mit hohem Schereffekt in der Masse und an den Wandungen“. Des Weiteren besitzt die Frisse Conche eine große Fläche zum Ausdampfen der nicht erwünschten flüchtigen Aromen, was sich positiv auf den Geschmack der Schokolade auswirkt. (Beckett, 2009; S. 204 ff)

Mit der Conche der Firma Frisse können zwischen fünf und zehn Tonnen Schokolade innerhalb von weniger als 12 Stunden hergestellt werden (Beckett, 2008; S. 75).

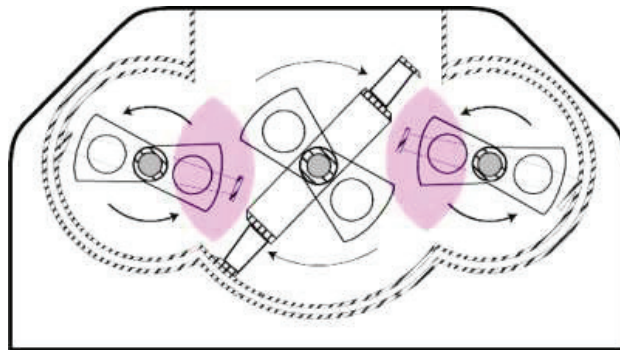


Abbildung 2: Arbeitsweise der Frisse – Conche (www.dallasfood.org)

Der Unterschied der Wirbelkammer – Conche zur letztgenannten Conche besteht zum einen in dem Mischelement (Einwellen – Mischer) und zum anderen in der Wirbelkammer (siehe Abbildung 3). „Durch die Drehbewegung des Rotors in der Wirbelkammer werden hohe Scherkräfte auf kleinstem Raum erzeugt. Das Produkt wird dabei axial in der Mitte der Kammer angesaugt, passiert den Rotor-Stator- Bereich, in dem sich die Scherververzahnung befindet, und wird an der Peripherie der Kammer in das Mischgut zurückgeschleudert“. Somit findet eine Zerkleinerung der Rohstoffe statt. Durch einen ständigen Produktaustausch wird zudem eine Zerkleinerung der gesamten Masse gewährleistet. Ein Vorteil dieser Kammer ist, dass sie im Bedarfsfall an bestehende Conchen montiert werden kann. (www.lippmischtechnik.de; 16.09.2013, 17:04 Uhr)

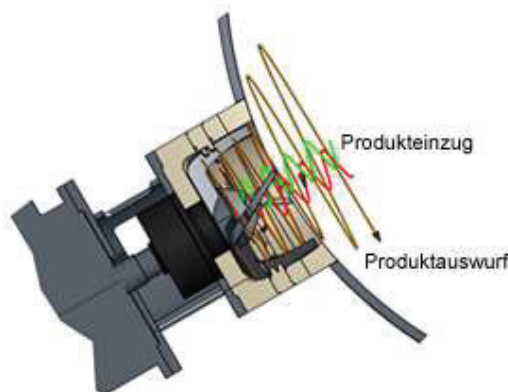


Abbildung 3: Wirbelkammer der Firma Lipp Mischtechnik (www.lippmischtechnik.de)

3 Material und Methoden

3.1 Material und Rezeptur

Für die Vergleichbarkeit aller Ergebnisse ist eine einheitliche Zubereitung erforderlich. Dies wird durch die unten aufgeführte Rezeptur (siehe Tabelle 1) gewährleistet, welche in jedem Versuch verwendet wird.

Tabelle 1: Rezeptur zur Herstellung von Milkschokolade und die errechneten Fettgehalte der einzelnen Komponenten

Rohstoffe	Menge [Ma%]	Fett [%]	Fett im Mix [Ma%]
Kakaomasse	13	55	7,15
Kakaobutter	17,59	100	17,59
Zucker	50,2	0	0,00
Butterreinfett	4,8	99,8	4,79
Magermilchpulver	13,7	1	0,14
Lecithin	0,72	94	0,68
Mix gesamt	100,01	-	30,34

Als Materialien zur Produktion der Milkschokolade dienen: Kakaobutter der Firma Euromar Commodities GmbH (Fehrbellin, Deutschland), Sojalecithin der Firma Cargill (Hamburg, Deutschland), Kakaomasse der Firma Cargill (Berlin, Deutschland), Raffinade Zucker der Nordzucker AG (Braunschweig, Deutschland), Magermilchpulver der Deutschen Milchkontor GmbH (Zeven, Deutschland) und Butterreinfett der Firma Uelzena (Uelzen, Deutschland).

3.2 Versuchsplanung

Wie schon in Punkt 1 (siehe S. 4) erwähnt, wird untersucht, ob die Packungsdichte in der Kugelmühle und eine Nachscherung nach dem Zerkleinerungsprozess einen positiven Einfluss auf die Eigenschaften der Schokolade zur Folge haben. Die positive Auswirkung der Nachscherung konnte schon in früheren Versuchen (Holm, 2010; S. 51) festgestellt werden. Diese Ergebnisse wurden allerdings mit einer Conche ohne Wirbelkammer erzielt. Des Weiteren stellt sich die Frage, ob bei der Nachscherung ein Unterschied zwischen einem Inline – Mischer und der Wirbelkammer – Conche festzustellen ist. Aus diesen Überlegungen ist folgendes Versuchsschema entstanden, welches in Abbildung 4 (siehe S. 9) dargestellt ist.

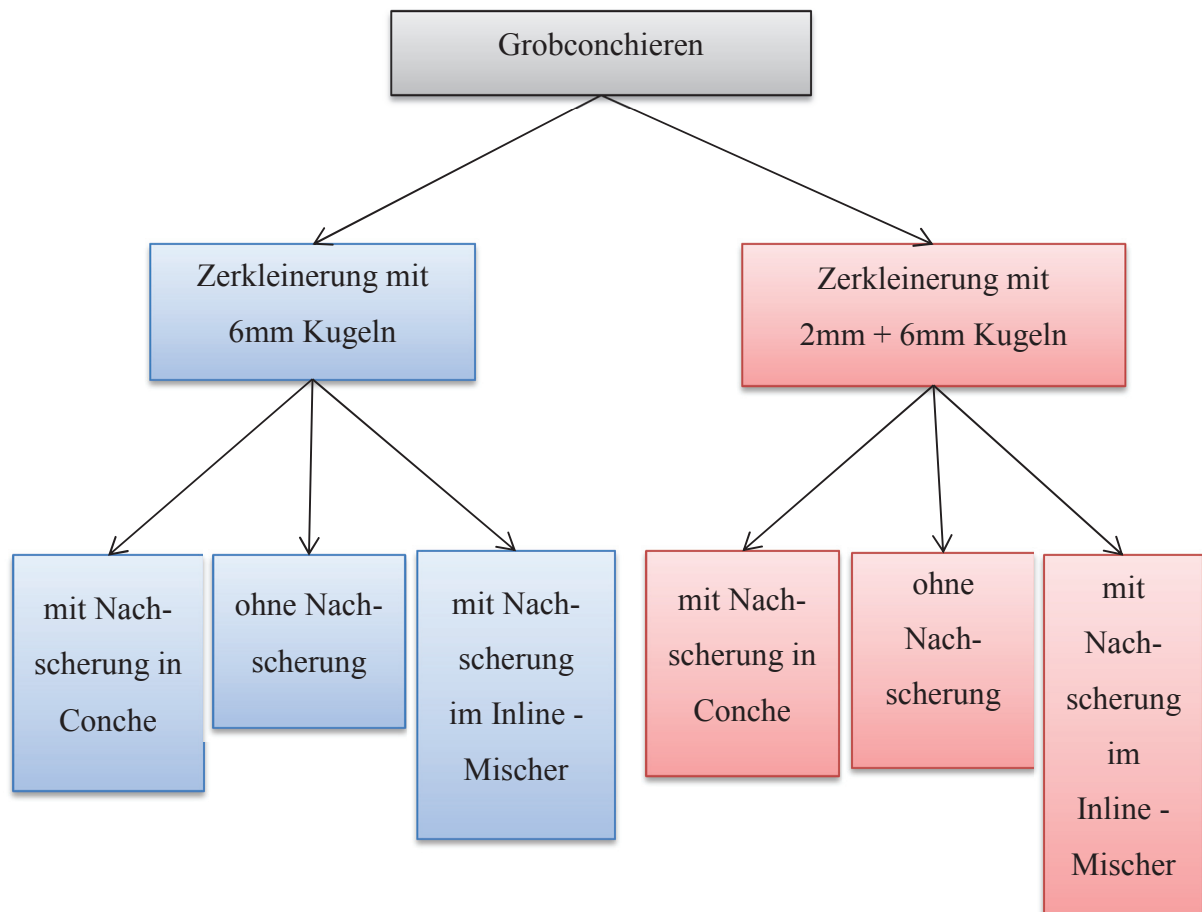


Abbildung 4 Fließschema zur Darstellung der Versuchsmuster

Erfahrungswerte aus dem Modul Prozessentwicklung 2013 zeigen, dass das Mischungsverhältnis der verwendeten Kugelmischung bei den Versuchen mit 2 + 6 mm Kugeln 1:2 betragen sollte. Dabei werden 33,3 % der 2 mm und 66,6 % der 6 mm Kugeln verwendet. Die Referenzwerte der Referenzprobe wurden durch vorhergehende Versuche ermittelt und in der Veröffentlichung (in Vorbereitung) von Bolenz et al. (2014; S. 15) aufgeführt.

Die festgelegten Versuchsparameter können der Tabelle 2 (siehe S. 10) entnommen werden.

Tabelle 2 Übersicht der Versuchsparameter während der einzelnen Prozessschritte

Prozessschritt	Parameter
Trockenconchieren	<ul style="list-style-type: none"> • Dauer: 20 Minuten • Leistung der Wirbelkammer: ca. 1400 U/min • Drehzahl des Motors der Welle: ca. 1700 U/min • Produkttemperatur: 70 – 75 °C • Belüftung/Pressluft an, Deckel auf
Grobconchieren	<ul style="list-style-type: none"> • Dauer: 60 Minuten • Leistung der Wirbelkammer: ca. 1400 U/min • Drehzahl des Motors der Welle: 1200 U/min • Produkttemperatur: 70 – 75 °C • Belüftung/Pressluft an, Deckel auf • Auffettung nach ca. 50 Minuten → Produkttemperatur auf 50 °C senken
Zerkleinerung	<ul style="list-style-type: none"> • Leistung der Kugelmühle: 25 Hz; 2,5 ± 0,2 kW • Produkttemperatur < 60 °C
Nachscherung	<ul style="list-style-type: none"> • Produkttemperatur < 60 °C • Leistung der Wirbelkammer und Conche hoch, Deckel zu • Leistung des Inline – Mixers : 3000 U/min

Die Produkttemperatur der ersten beiden Prozessschritte wurde so gewählt, dass unerwünschte flüchtige Säuren und Feuchtigkeit aus dem Produkt ausgetragen werden können (Römisch, 2012; S. 11). Um diese Stoffe aus der Conche austragen zu können, muss dazu der Deckel des Schachtes geöffnet bleiben. Zur Vermeidung von Verunreinigungen im Produkt, wird die Öffnung mit einem sauberen Geschirrhandtuch abgedeckt. Bei der anschließenden Zerkleinerung hingegen muss die Produkttemperatur auf < 60 °C gesenkt werden, um einen

Glasübergang der Laktose zu vermeiden (Bolenz et al., 2014; S. 5; Veröffentlichung in Vorbereitung). Daraus würden sich Agglomerate bilden, welche die Zerkleinerung der Partikel innerhalb der Schokolade behindern bzw. erschweren würden.

Außer der Rezeptur, die schon in Tabelle 1 dargelegt wurde, sind zusätzlich die Produktionsschritte der Herstellung zu erwähnen (siehe Tabelle 11; S. 43).

Zur einfacheren Verständlichkeit der einzelnen Produktionsschritte dient Abbildung 5.

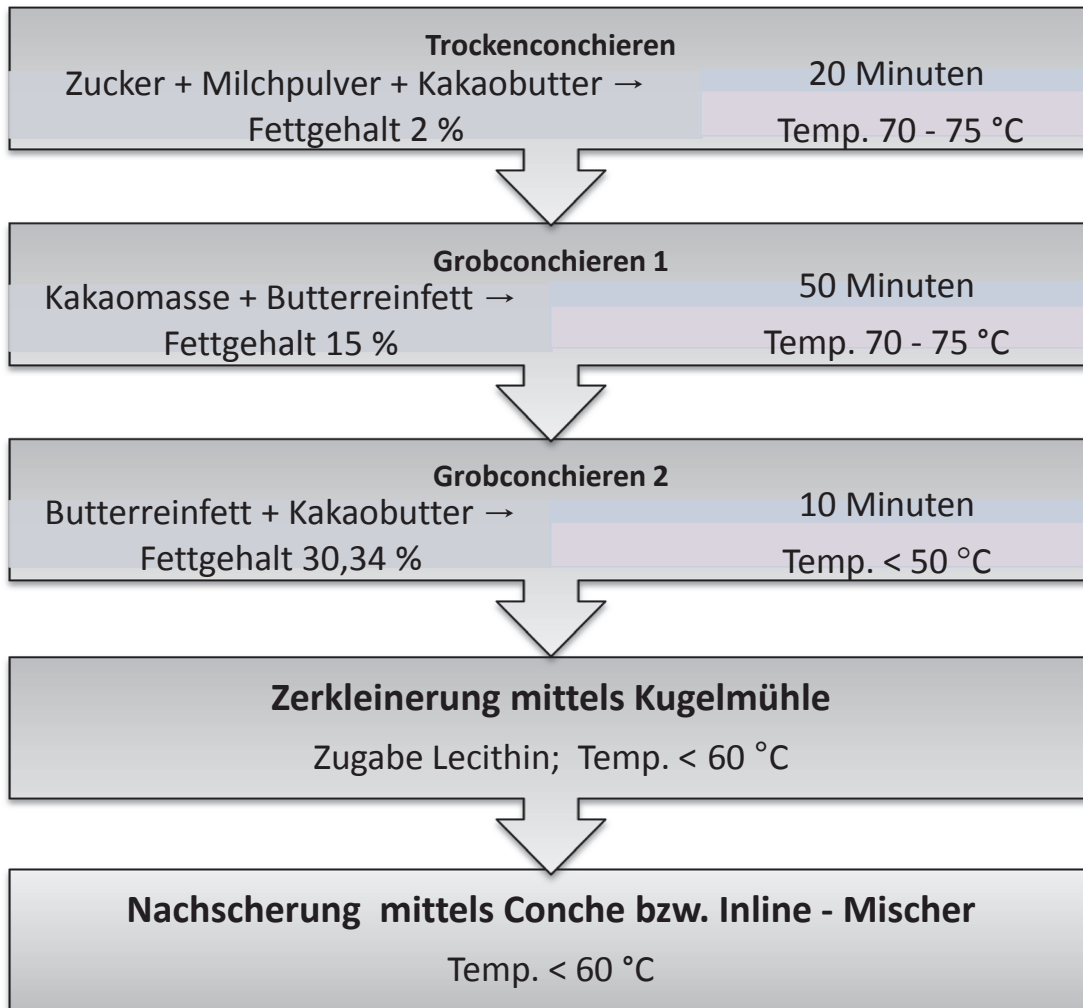


Abbildung 5 Fließschema zur Herstellung der Milkschokolade

Zu den Besonderheiten der Herstellungsprozesse ist zu sagen, dass während des ersten Prozessschrittes ein Anteil der Kakaobutter dazugegeben wird, so dass die Masse einen Fettgehalt von 2 % aufweist. Dies dient zur Verminderung der Staubentwicklung, was in Hinblick auf die Vermeidung von Staubexplosionen oder auch das nicht Einatmen von Staub wichtig ist. Im 2. Produktionsschritt erfolgt eine Auffettung der Masse auf 12 % um die Masse zu Verpasten. Die Einstellung des geplanten Endfettgehaltes erfolgt anschließend im

3. Schritt. Die Zugabe des Lecithins erfolgt erst während der Zerkleinerung der Schokoladenmasse mittels der Kugelmühle. Die Zugabe von Lecithin während der ersten Prozessschritte ist nicht notwendig, da hier genügend Fett zum Erhalt der niedrigen Viskosität vorhanden ist. Erst durch das Zerkleinern der Partikel in der Kugelmühle und die daraus resultierende Vergrößerung der Oberfläche der Partikel erfordert die Zugabe von Lecithin.

Durch die Oberflächenvergrößerung wird mehr Fett zur Ummantelung der einzelnen Partikel benötigt, welches dann wiederum zum Fließen fehlt, d.h. die Viskosität der Masse steigt an (Römis, 2012, S. 36). Durch das Lecithin wird die Viskosität der Masse vermindert, so dass sie pumpfähig bleibt. Außerdem wirkt Lecithin als Emulgator und begünstigt die gleichmäßige Umhüllung der Partikel mit Fett (Beckett, 2008; S. 93). Zum Einsatz kommen die Conche Typ IMR – E 30 mit integrierter Wirbelkammer, der Inline-Mischer Typ R003 und die Kugelmühle IMPACTOR Typ IMP 5 jeweils der Firma Lipp Mischtechnik GmbH (Mannheim, Deutschland). Weiterhin dienen zur Regulierung der Temperatur Thermostate (Regloplas, St. Gallen, Schweiz) und zum Pumpen der Schokoladenmasse in die Kugelmühle eine Rachttrichterpumpe (MDT 025-6L, Seepex, Bottrop, Deutschland). Die Überwachung der Partikelgröße während der Zerkleinerung erfolgt mit Hilfe einer Bügelmessschraube.

3.3 Versuchsablauf

Während der gesamten Prozesse wurde sich an die Versuchsparameter der Tabelle 2 (S. 10) gehalten. Als erstes wurden die Zutaten aus Schritt 1 (siehe Tabelle 11; S. 43) in die Conche gegeben und das Trockenconchieren gestartet. Die Leistung der Wirbelkammer lag während des Trockenconchierens bei 1,15 kW und die der Rührwelle der Conche bei 0,52 kW. Die Produkttemperatur wurde zwischen 70 – 73 °C gehalten. Im Laufe der gesamten Conchierprozesse wurden die Rohstoffe bzw. die Schokoladenmassen durch Zugabe von Luft durch einen Sterilluftfilter belüftet, so dass unerwünschte flüchtige Aromastoffe ausgetragen werden konnten. Die Zugabe der Luft betrug 10 Normliter. Während des Trockenconchierprozesses wurden alle 5 Minuten Proben zur Trockensubstanzbestimmung abgenommen und diese mit Hilfe der Seesandmethode ermittelt. Die Masse aus Schritt 1 konnte von einem Anfangsfeuchtegehalt von 2,68 % auf 0,51 % Restfeuchte getrocknet werden. Nach 20 Minuten wurde das Trockenconchieren beendet und die Zutaten aus Schritt 2 (siehe Tabelle 11; S. 43) dazugegeben. Die Leistungsaufnahme der Conche betrug beim Grobconchieren 0,52 kW und die der Wirbelkammer 1,20 kW. Nach 55 Minuten wurde die Produkttemperatur auf 50 °C mit Hilfe eines Thermostates herunter geregelt. Anschließend wurden nach 60 Minuten die restlichen Zutaten aus Schritt 3 (siehe Tabelle 11;

S. 43) der bisherigen Masse hinzugefügt und weitere 10 Minuten vermengt, bis der Conchierprozess nach 90 Minuten vollendet war. Die Schokoladenmasse wurde aus der Conche quantitativ in saubere Plastikbehälter überführt und in der Wärmekammer bei 50 °C zwischengelagert.

Zur Zerkleinerung wurden die jeweiligen Schokoladenmassen in 2 Chargen aufgeteilt, so dass immer eine doppelte Versuchsdurchführung vorgenommen werden konnte. Der Zerkleinerungsprozess wurde mittels einer Kugelmühle durchgeführt. Durch einen Vorlaufbehälter wurde die Schokolade der Mühle zugeführt, zerkleinert und im Vorlaufbehälter wieder aufgefangen. Die Masse wurde ständig im Vorlaufbehälter durch manuelles Rühren homogenisiert, so dass eine gleichmäßige Zerkleinerung aller Partikel gewährleistet wurde. Während der gesamten Zerkleinerung erfolgte die Messung der Partikelgröße mit Hilfe einer Bügelmessschraube. Zum Ende des Prozesses wurden Proben zur Kontrolle im Laserbeugungsspektrometer nachgemessen, um den Endzeitpunkt der Zerkleinerung festlegen zu können. Während die Proben im Laserbeugungsspektrometer gemessen wurden, wurde die Leistung der Kugelmühle auf maximal 5 Hz runter gestellt, so dass eine weitere Zerkleinerung der Partikel ausgeschlossen und die Zielpartikelgröße nicht unterschritten werden konnte. Die Kugelmühle wies eine Leistung von 25 Hz \pm 0,2 Hz auf. Sobald die Leistung auf 2,1 kW – 2,2 kW anstieg, wurde Lecithin dazugegeben, um die Viskosität der Masse wieder zu senken und um somit die Mühle in Betrieb halten zu können. Nach Beendigung jedes Zerkleinerungsprozesses wurde eine Probe für die Partikel- und Rheologiemessungen abgenommen und in der Klimakammer bei 50 °C zwischengelagert. Die Schokoladenmassen wurden in Plastikbehältern, wie auch die zuvor genommene Probe, in der Klimakammer eingelagert. Die Nachscherung der Proben erfolgt zum einen in der Conche und zum anderen in einem Inline – Mischer. Die Leistung der Conche und der Wirbelkammer wurden auf jeweils 90 % eingestellt und die Nachscherung erfolgte fünf Minuten. Die Nachscherung im Inline – Mischer erfolgte in zwei Durchgängen um eine ausreichende Nachscherung zu erreichen. Die Leistung des Inline – Mixers betrug 3000 U/min. Hierbei wurde der Scherkopf des Mixers mit ca. 30 °C warmem Wasser erwärmt. Somit wurde gewährleistet, dass die Schokolade durch das kalte Metall nicht erstarrte und den Versuch behindern würde. Auch diese nachgescherten Proben wurden in der Klimakammer bei 50 °C bis zu den analytischen Messungen zwischengelagert.

Für den Zerkleinerungsprozess mit 6 mm Kugeln in der 1. Versuchsdurchführung wurden 120 Minuten und in der 2. Durchführung 95 Minuten benötigt. Bei der Zerkleinerung mit 2 + 6 mm Kugeln betrug die Prozesszeit für die 1. Versuchsdurchführung 70 Minuten und bei

der 2. Durchführung 65 Minuten. Die unterschiedlichen Zeiten zwischen der jeweils 1. und 2. Durchführung könnten folgendermaßen erklärt werden: Wenn die 1. Zerkleinerung einer Probe stattfindet, braucht die Schokoladenmasse eine gewisse Zeit um mit Hilfe der Rachttrichterpumpe durch die Mühle gefördert zu werden. Nach der Beendigung des Prozesses wird die Pumpe so lange in Betrieb gelassen und die Schokolade in einem Behälter aufgefangen, bis der Vorlaufbehälter entleert ist. Danach wird der Vorlaufbehälter mit der nächsten Schokoladenmasse befüllt und die nächste Zerkleinerung wird gestartet. Da sich allerdings in der Mühle noch Schokoladenmasse aus dem vorherigen Versuch befindet, muss die Mühle nicht erst neu gefüllt werden, wie es vor dem ersten Versuch der Fall ist. Durch diesen Umstand können Minuten eingespart werden. Ein möglicher Grund für den kürzeren Zerkleinerungsprozess mit 2 + 6 mm Kugeln könnte die erhöhte Packungsdichte sein. Laut Holm (2010, S. 54) entstehen durch eine hohe Packungsdichte mehr Berührungspunkte zwischen den Partikeln und Kugeln, wodurch die Partikel schneller zerkleinert werden können. Allerdings muss davon ausgegangen werden, dass die Partikel nicht wie angegeben z.B. 120 min zerkleinert werden. Die Verweilzeit in der Kugelmühle wird hier für das Beispiel 120 min Prozesszeit berechnet.

Tabelle 3 Abmessungen der einzelnen Anlagenteile und der Kugelmühle zur Berechnung der Verweilzeit der Schokoladenmasse in der Kugelmühle.

Parameter	Zylinder Kugelmühle	Kugeln	Mischachse Zylinder	Produkt
Durchmesser	14,60 cm	6,34 mm	5,50 cm	15 kg
Höhe	44,00 cm	-	44,00 cm	-
Masse	-	1,08 g	-	-
eingesetzte Masse	-	15 kg	-	-
Dichte	-	8,095 g/cm ³	-	1,280 g/cm ³

Die Angaben der Tabelle 3 wurden dem Modul Prozessentwicklung entnommen. Die Dichte für die Schokolade wurde einer Internetseite entnommen (www.cosmiq.de, 28.01.2014; 13:30 Uhr).

Benötigte Formeln:

$$\tau = \frac{V_A}{\dot{V}}$$

$$\dot{V} = \frac{V_P}{t}$$

$$V_A = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times h$$

$$\varrho = \frac{m}{V}$$

τ	hier mittlere Verweilzeit
d	hier Durchmesser
V_A	Anlagenvolumen
$V_{KM \text{ eff}}$	effektives Volumen der Kugelmühle
V_K	Volumen der Kugeln
\dot{V}	Volumenstrom
V_P	Volumen des Produktes
V_W	Volumen der Welle
t	Zeit
ϱ	Dichte
m	Masse

$$V_A = \frac{\pi}{4} \times (14,6 \text{ cm})^2 \times 44 \text{ cm}$$

$$V_A = \underline{7366,28079 \text{ cm}^3}$$

Das Volumen des Kugelmühlensylinders beträgt $\approx 7366,28 \text{ cm}^3$.

$$V_K = \frac{m_K}{\varrho_K} = \frac{15.000 \text{ g} \times \text{cm}^3}{8,095 \text{ g}} = \underline{1852,99568 \text{ cm}^3}$$

$$V_W = \frac{\pi}{4} \times (d_W)^2 \times h_W = \frac{\pi}{4} \times (5,5 \text{ cm})^2 \times 44 \text{ cm} = \underline{1045,36495 \text{ cm}^3}$$

$$\begin{aligned} V_{KM \text{ eff}} &= V_A - V_K - V_W \\ &= 7366,28079 \text{ cm}^3 - 1852,99568 \text{ cm}^3 - 1045,36495 \text{ cm}^3 \\ &= \underline{4467,92016 \text{ cm}^3} \end{aligned}$$

Das effektive Mühlenvolumen beträgt $\approx 4467,92 \text{ cm}^3$.

$$5085,59 \text{ cm}^3 \times 1,28 \text{ g/cm}^3 = 5718,9376 \text{ g} = \underline{5,72 \text{ kg}}$$

Folglich entspricht das effektive Volumen der Kugelmühle einer Produktmasse von 5,72 kg, welche sich während der Zerkleinerung dauerhaft im Mahlraum befinden.

$$V_p = \frac{15.000 \text{ g} \times \text{cm}^3}{1,28 \text{ g}} = \underline{11718,75 \text{ cm}^3}$$

$$\dot{V} = \frac{11718,75 \text{ cm}^3}{120 \text{ min}} = \underline{97,65 \text{ cm}^3/\text{min}}$$

Die Schokoladenmasse hat ein Volumen von 11718,75 cm³. Daraus ergibt sich ein Volumenstrom von $\approx 0,098$ Liter pro Minute bzw. 5,88 Liter pro Stunde.

$$\tau = \frac{V_A}{\dot{V}} = \frac{7366,28079 \text{ cm}^3}{97,65 \text{ cm}^3/\text{min}} = \underline{75,4355 \text{ min}}$$

Die mittlere Verweilzeit der Schokoladenmasse in der Kugelmühle beträgt $\approx 75,44$ Minuten. Daraus folgt, dass das Produkt ca. 75 Minuten effektiv zerkleinert wurde.

3.4 Instrumentelle Analyse

3.4.1 Partikelgrößenverteilung

Die Partikelgröße einer Schokolade ist ein wichtiges Kriterium in Hinblick auf die Akzeptanz beim Verbraucher. Sobald die Partikelgröße mehr als 30 μm beträgt, empfindet das der Verbraucher als ein sandiges Mundgefühl (Bolenz et al., 2014; S. 2; Veröffentlichung in Vorbereitung). Da mittels einer Mikrometerschraube nur die ungefähre Partikelgröße der Schokolade gemessen werden kann, wird die genaue Verteilung der Partikelgrößen und die Endpartikelgröße der Proben mit Hilfe des Laserbeugungsspektrometers Mastersizer 2000 der Firma Malvern Instruments (Worcestershire, England) ermittelt.

Das Messprinzip des Mastersizer beruht auf der Lichtbeugung. „Dabei wird die Intensität des gestreuten Lichts eines Laserstrahls gemessen, während dieser eine dispergierte Partikelprobe durchdringt. Anhand dieser Daten wird dann die Größe der Partikel aus dem erzeugten Beugungsmuster berechnet.“ (www.malvern.de, 26.11.2013, 12:00 Uhr)

Die Probenvorbereitung bzw. Durchführung der Messung gestalten sich wie folgt. Zuerst werden 20 ml warmes Öl in einem Becherglas mit 400 mg der Probe mit einem Spatel verrührt, so dass eine Emulsion entsteht. Anschließend wird diese Emulsion für 15 Minuten in ein 30 °C temperiertes Ultraschallbad gegeben. Dies dient dazu, vorhandene Agglomerate zu zerkleinern und die Partikel gleichmäßig innerhalb der Suspension zu verteilen. Anschließend wird die zu messende Probe in das Laserbeugungsspektrometer gegeben und analysiert. Die Messergebnisse werden mit den Werten d(0,1), d(0,5) und d(0,9) aufgeführt, um eine Charakterisierung der Partikelgrößenverteilung zu ermöglichen. Diese Werte geben den Volumenanteil der jeweiligen Partikelgröße in der Probe an.

Beispiel: Ein Wert von $d(0,9)$ mit $25\text{ }\mu\text{m}$ würde demnach bedeuten, dass 90 Volumenprozent der Partikel kleiner oder gleich $25\text{ }\mu\text{m}$ groß sind. Mit den genannten Werten können Rückschlüsse auf die Breite einer Verteilungsdichtekurve geschlossen werden, die wie folgt berechnet wird:

$$\text{relative Breite} = \frac{d(0,9)}{d(0,1)}$$

Je höher dabei der errechnete Wert ist, desto breiter ist die Partikelgrößenverteilung einer Probe.

Die Gewichtung der Differenz von $d(0,9)$ und $d(0,1)$ zu $d(0,5)$ erfolgt durch die Angabe des sogenannten Span:

$$\text{Span} = \frac{d(0,9) - d(0,1)}{d(0,5)}$$

Da hier das Verhältnis von groben zu kleinen Partikeln berücksichtigt wird, ist der Span aussagekräftiger als die relative Breite. Je höher der Wert für den errechneten Span ist, desto höher ist der Anteil an feinen Partikeln in der Probe. (Römis, 2012; S. 35)

Der Span – Wert für jede Probe wird bereits in dem Computerprogramm Mastersizer 2000 nach oben benannter Formel berechnet und ausgegeben.

Aus der Partikelgrößenverteilung kann die spezifische Oberfläche ermittelt werden:

$$\text{spezifische Oberfläche} = \frac{6 \sum \frac{V_i}{d_i}}{\rho_p \sum V_i}$$

V_i = relatives Volumen

d_i = mittlerer Durchmesser

ρ_p = Partikeldichte

Die spezifische Oberfläche gibt Auskunft über die Höhe des Anteils feiner Partikel. Je mehr feine Partikel vorhanden sind, desto größer ist die spezifische Oberfläche und desto mehr Lecithin bzw. Kakaobutter wird benötigt, um die Partikel mit Fett zu umhüllen. (Römis, 2012; S. 36) Auch hier werden die Werte der spezifischen Oberfläche nach oben benannter Formel im Computerprogramm Mastersizer 2000 berechnet und ausgegeben.

3.4.2 Messung der rheologischen Eigenschaften

Laut Schramm (1995, S.4) beschreibt die Rheologie, „wie sich ein Körper bei Beanspruchung durch äußere Kräfte verformt“. Diese Körper könnten Festkörper, Flüssigkeiten oder auch Gase sein, die bei bestimmten äußeren Kräften irreversibel verformt werden und zu fließen beginnen. Das dafür benötigte Verhältnis von Kraft zu Flüssigkeitsfläche wird als Schubspannung (τ) bezeichnet (Römisches, 2012; S. 37). „Lässt man durch eine bestimmte Schubspannung eine Flüssigkeit im Spalt fließen, ergibt sich ein Geschwindigkeitsabfall in der laminaren Schichtenströmung zwischen zwei ebenen Platten, der je nach der Art der betreffenden Flüssigkeit unterschiedlich ist. Dieser wird auch als Scherrate ($\dot{\gamma}$) bezeichnet (Römisches, 2012; S. 37).“ Wird die Schubspannung über der Scherrate in einem Diagramm aufgetragen, erhält man für eine Flüssigkeit eine charakteristische Fließkurve (Gehm, 1998; S. 93).

In diesen Versuchen erfolgen die Analysen der rheologischen Eigenschaften mit Hilfe des Rotationsrheometer Rheolab UDS 200 der Firma Anton Paar (Stuttgart, Deutschland).

Das Messprinzip beruht darauf, dass Stoffe unter Einwirkung gewisser Scherkräfte und sich der daraus ergebenden Deformation zu fließen beginnen (Römisches, 2012; S. 38). „Dazu gibt die Software dem Motor die gewünschten Scherraten ($\dot{\gamma}$ = Umdrehung pro Zeiteinheit) vor. Der Motor ist mit einer Achse verbunden, an der die Messeinrichtung befestigt ist. Diese wird in die Probe eingetaucht. Die Achse setzt die Kraft des Motors in Drehmomente um. Der Widerstand, den die Probe dem Drehmoment entgegensetzt, wird an der Achse als Schubspannung (τ = Kraft pro Fläche) gemessen“ (Römisches, 2012; S. 38). Die zu messende Probe durchläuft 12 Messabschnitte, in denen bei unterschiedlichen Scherraten an bestimmten Messpunkten die resultierende Schubspannung ermittelt wird. Die in den Abschnitten 11 und 12 ermittelten Schubspannungen sind für die Berechnung der Viskosität und der Fließgrenze nach den Modellen Casson, welches in der Süßwarenindustrie am weitesten verbreitet ist, und Windhab relevant, welches von der IOCCC empfohlen wird (Holm, 2010; S. 35). Diese Berechnungen werden von der Software automatisch vorgenommen.

Tabelle 4 Übersicht der Messabschnitte mit den dazugehörigen Scherraten und der Anzahl der Messpunkte im Rotationsviskosimeter

Abschnitt	Scherrate [s^{-1}]	Anzahl Messpunkte
1	0 – 30	0
2	30	0
3	30 – 1	0
4	1 – 0,5	0
5	0,05	0
6	0,05	10
7	0,05 – 5	0
8	5	10
9	5 – 40	0
10	40	10
11	40 – 60	0
12	60 – 0,03	400

3.4.3 TS-Bestimmung mittels Seesandmethode

Zunächst werden die Wägeschälchen mit Seesand und einem Glasstab zum Verreiben der Probe mit dem Sand gefüllt. Anschließend werden sie in den Trockenschrank zur Vortrocknung bei ca. 102 °C gestellt, damit überschüssiges Wasser entfernt werden kann. Dieses überschüssige Wasser könnte durch das Abwaschen der Schalen und Spatel in den Sand gelangt sein und somit das Ergebnis der Proben verfälschen. Nach einer ausreichenden Vortrocknung von 5 Stunden werden die Wägeschälchen zum Abkühlen in den Exsikkator gestellt. Für die TS – Bestimmung wird zunächst das Leergewicht des Schälchens (inkl. Sand und Spatel) ermittelt und notiert. Anschließend werden ca. 2 Gramm Produkt eingewogen und das Füllgewicht des Schälchens dokumentiert. Im Folgenden werden die gefüllten Schalen 5 Stunden im Trockenschrank bei 103 ± 2 °C getrocknet, der Rückstand ausgewogen, das Ergebnis vermerkt und die TS mit folgender Formel berechnet (siehe S. 20):

(Müller, 2013; S. 7)

$$TS \% = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \%$$

m_1 = Leermasse von Wägeschale mit Seesand und Glasstab in g

m_2 = Masse von Wägeschale mit Seesand, Glasstab und Probe vor der Trocknung in g

m_3 = Masse von Wägeschale mit Seesand, Glasstab und Probe nach der Trocknung in g

3.5 Statistische Analyse

Eine statistische Auswertung der Ergebnisse ermöglicht den Vergleich der unterschiedlichen Schokoladen miteinander. So können Aussagen darüber getroffen werden, welche angewandten Verfahren vergleichbar sind bzw. zwischen welchen Verfahren signifikante Unterschiede bestehen. Die Analyse wird mit Hilfe der Statistik – Software IBM SPSS Statistics vorgenommen. Es werden sowohl eine einfaktorielle ANOVA als auch ein Tukey – Test durchgeführt. Die ANOVA beschreibt, ob signifikante Unterschiede zwischen den Proben bestehen. Der Tukey – Test hingegen zeigt, welche Proben sich signifikant unterscheiden. (Kassmann, Dr. M, 2007)

3.6 Ergebnisse der statistischen Auswertung

Aus Tabelle 5 (S. 21) wird ersichtlich, welche Schokoladen bei einer Scherrate von $0,05 \text{ s}^{-1}$ miteinander verglichen werden können. So weisen sowohl die Proben 6o1 und 6C1 als auch 6R1 und 6C2 Ähnlichkeiten auf. Erkennbar ist, dass die Schokoladen, welche mit einer Kugelmischung hergestellt wurden, nicht mit den anderen Schokoladen vergleichbar sind, d.h. sie weisen signifikante Unterschiede auf.

Aus Tabelle 6 (S. 21) wird ersichtlich, dass die Proben 6C2 und 6R1 sowie 6o2 und 6R2 miteinander vergleichbar sind. Auch hier weisen die Schokoladen, die mit einer Kugelmischung hergestellt wurden, keine Vergleichbarkeit mit den anderen Schokoladen bzw. untereinander auf.

Tabelle 7 (S. 22) zeigt, dass die Proben 6o1 und 6C1 sowie 6C2 und 6R2 vergleichbar sind. Die Proben 6C2 und 6R2 waren schon bei einer Scherrate von 5 s^{-1} miteinander vergleichbar. Auch hier weisen die Schokoladen, die mit einer Kugelmischung hergestellt wurden, keine Vergleichbarkeit mit den anderen Schokoladen bzw. untereinander auf.

Tabelle 8 (S. 22) zeigt die anhand der Endpartikelgrößen $d(0,9)$ vergleichbaren Proben. Es ist zu erkennen, dass die Proben 6o1, 6o2, 6C1, 6C2, 6R1, 6R2, 2+6C1 und 2+6R1 keine signifikanten Unterschiede aufweisen und somit gut miteinander vergleichbar sind. Des Weiteren sind die Werte der Proben 6o1, 6o2, 6C1, 2+6o1 und 2+6R1 gut miteinander vergleichbar, da diese keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

Tabelle 5 Statistische Zusammenhänge der einzelnen Proben bei einer Scherrate von $0,05 \text{ s}^{-1}$.

Versuch	Scherrate bei $0,05 \text{ s}^{-1}$; Untergruppe für $\alpha = 0,05$						
6o1	7,474000						
6C1	7,642000						
6o2		8,745000					
6R1			9,076000				
6C2			9,111000				
6R2				9,850000			
2+6R1					10,388000		
2+6C1						10,721000	
2+6o1							11,057000
Signifikanz	0,494	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabelle 6 Statistische Zusammenhänge der einzelnen Proben bei einer Scherrate von 5 s^{-1} .

Versuch	Scherrate 5 s^{-1} ; Untergruppe für $\alpha = 0,05$						
6o1	29,916000						
6C1		30,529000					
6C2			35,842000				
6R1			35,912000				
6o2				38,529000			
6R2				38,646000			
2+6o1					49,454000		
2+6R1						53,213000	
2+6C1							59,526000
Signifikanz	1,000	1,000	0,997	0,929	1,000	1,000	1,000

Tabelle 7 Statistische Zusammenhänge der einzelnen Proben bei einer Scherrate von 40 s^{-1} .

Versuch	Scherrate 40 s^{-1} ; Untergruppe für $\alpha = 0,05$						
2+6R1	106,7900						
6o1		134,5680					
6C1		136,8840					
6C2			155,7680				
6R1			156,5000				
6R2				165,5020			
6o2					172,9330		
2+6o1						216,7670	
2+6C1							263,2660
Signifikanz	1,000	0,134	0,993	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabelle 8 Statistische Zusammenhänge der einzelnen Proben bei $d(0,9)$.

Versuch	$d(0,9)$; Untergruppe für $\alpha = 0,05$.	
6R2	29,763333	
6R1	30,001667	
6C2	30,001667	
2+6C1	30,006667	
2+6R1	30,211667	30,211667
6C1	30,576667	30,576667
6o1	30,660000	30,660000
6o2	31,003333	31,003333
2+6o1		31,583333
Signifikanz	0,148	0,077

Aus der statistischen Analyse geht hervor, dass deutliche Unterschiede zwischen der Zerkleinerung mit 6 mm bzw. mit 2 + 6 mm Kugeln bestehen. So ist zu sagen, dass die Proben die mit 6 mm Kugeln zerkleinert wurden, sich untereinander nicht signifikant unterscheiden. Im Gegensatz dazu sind signifikante Unterschiede, innerhalb der Proben die mit einer Kugelmischung zerkleinert wurden, festzustellen. Des Weiteren bestehen signifikante Unterschiede bei einer Zerkleinerung mit 6 mm Kugeln und mit 2 + 6 mm Kugeln.

Ebenfalls bestehen zwischen den einzelnen Nachschermethoden Unterschiede. So kann gesagt werden, dass zwischen den Proben die nicht nachgeschert wurden und den Proben mit Nachscherung signifikante Unterschiede bestehen. Deutlich wird allerdings auch, dass sich die Proben mit der Nachscherung in der Conche und im Inline – Mischer ähneln und somit keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

4 Ergebnisse

4.1 Messergebnisse Partikelgrößenverteilung

Tabelle 9 (S. 24) zeigt die Endpartikelgrößenverteilung der Schokoladenmassen nach dem Zerkleinerungsprozess mit und ohne Nachscherung. Aus Erfahrungen vorangegangener Versuche, wurde eine Endpartikelgröße von $30\text{ }\mu\text{m} \pm 2,5\text{ }\mu\text{m}$ angestrebt (siehe Bolenz et al., 2014; S. 9; Veröffentlichung in Vorbereitung). Zum einen sind in diesem Partikelgrößenbereich gute rheologische Eigenschaften zu erwarten und zum anderen würden sich größere Partikel negativ auf die sensorischen Eigenschaften auswirken, welche vom Verbraucher nicht akzeptiert werden würden (Bolenz et al., 2014; S. 2; Veröffentlichung in Vorbereitung).

Bei einer Ausgangspartikelgröße von durchschnittlich $342\text{ }\mu\text{m}$ konnten Endpartikelgrößen zwischen $29,783\text{ }\mu\text{m}$ und $31,909\text{ }\mu\text{m}$ erzielt werden. Die Versuche 2+6o2, 2+6C2 und 2+6R2 lagen mit $25,250\text{ }\mu\text{m}$ bis $25,487\text{ }\mu\text{m}$ deutlich unter der angestrebten Zielpartikelgröße. Dies liegt daran, dass die Bügelmessschraube falsch abgelesen wurde. Durch die Kontrollmessung am Laserbeugungsspektrometer konnte dann festgestellt werden, dass die tatsächliche Partikelgröße unterhalb der Zielpartikelgröße lag. Da diese Werte zu sehr von den anderen Werten abweichen, werden diese Messwerte bei der Berechnung der Standardabweichung und der Analyse der Fließeigenschaften nicht weiter berücksichtigt. Bei der relativen Breite konnten Werte mit allen Versuchen ermittelt werden, die nahe beieinander liegen. Die Daten der ANOVA (siehe 3.6, S. 20) bestätigen dieses.

Die Messwerte des Span liegen zwischen 2,603 und 2,835. Mit Hilfe der ANOVA konnten auch hier nur bei einigen Proben signifikante Unterschiede festgestellt werden, z.B. zwischen 6o1 und 2+6o1. Aus den statistischen Daten geht außerdem hervor, dass signifikante Unterschiede vor allem zwischen den Schokoladen die mit 6 mm Kugeln und den Schokoladen die mit einer Kugelmischung hergestellt wurden bestehen.

Die Messwerte der spezifischen Oberfläche liegen zwischen $0,864\text{ m}^2/\text{g}$ und $0,891\text{ m}^2/\text{g}$.

Aus den Daten der ANOVA geht hervor, dass bei der Probe 6R2 signifikante Unterschiede zu allen Proben, außer 6C2 und 2+6R1 bestehen.

Tabelle 9 Die errechneten Mittelwerte der Endpartikelgrößen und die dazugehörigen Mittelwerte der relativen Breite, des Span und der spezifischen Oberfläche.

Probe	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	relative Breite	Span	spezifische Oberfläche [m²/g]
6o1	3,157 ± 0,010 ^S	10,381 ± 0,030	30,661 ± 0,160	9,712 ± 0,150	2,649 ± 0,010	0,868 ± 0,002
6o2	3,148 ± 0,000	10,249 ± 0,030	31,001 ± 0,100	9,848 ± 0,100	2,718 ± 0,007	0,872 ± 0,001
6C1	3,145 ± 0,050	10,403 ± 0,100	30,508 ± 0,130	9,700 ± 0,100	2,630 ± 0,021	0,870 ± 0,009
6C2	3,096 ± 0,010	10,087 ± 0,020	29,958 ± 0,060	9,676 ± 0,060	2,663 ± 0,004	0,887 ± 0,002
6R1	3,156 ± 0,010	10,352 ± 0,030	30,099 ± 0,130	9,537 ± 0,130	2,603 ± 0,007	0,869 ± 0,002
6R2	3,086 ± 0,000	10,014 ± 0,010	29,783 ± 0,060	9,651 ± 0,060	2,666 ± 0,004	0,891 ± 0,001
2+6o1	3,169 ± 0,010	10,251 ± 0,020	31,583 ± 0,120	9,996 ± 0,120	2,772 ± 0,015	0,864 ± 0,002
2+6o2	-	-	-	-	-	-
2+6C1	3,161 ± 0,150	10,209 ± 0,290	31,021 ± 1,240	9,814 ± 1,310	2,729 ± 0,093	0,868 ± 0,022
2+6C2	3,231 -	9,082 -	25,487 -	7,888 -	2,451 -	0,900 -
2+6R1	3,122 ± 0,110	10,156 ± 0,220	31,909 ± 1,930	10,221 ± 1,990	2,835 ± 0,150	0,877 ± 0,019
2+6R2	2,937 -	8,841 -	26,386 -	8,984 -	2,652 -	0,961 -
Rp	2,54 ± 0,02	9,20 ± 0,07	29,63 ± 0,38	11,67 ± 0,07	2,94 ± 0,01	1,07 ± 0,01

S = Standardabweichung der jeweiligen Probe bei dem jeweiligen Parameter

Abbildung 6 zeigt die graphische Darstellung der Partikelgrößenverteilung bei 6o1 und 6o2. Es ist zu erkennen, dass die Graphen fast vollständig deckungsgleich und somit gut miteinander vergleichbar sind.

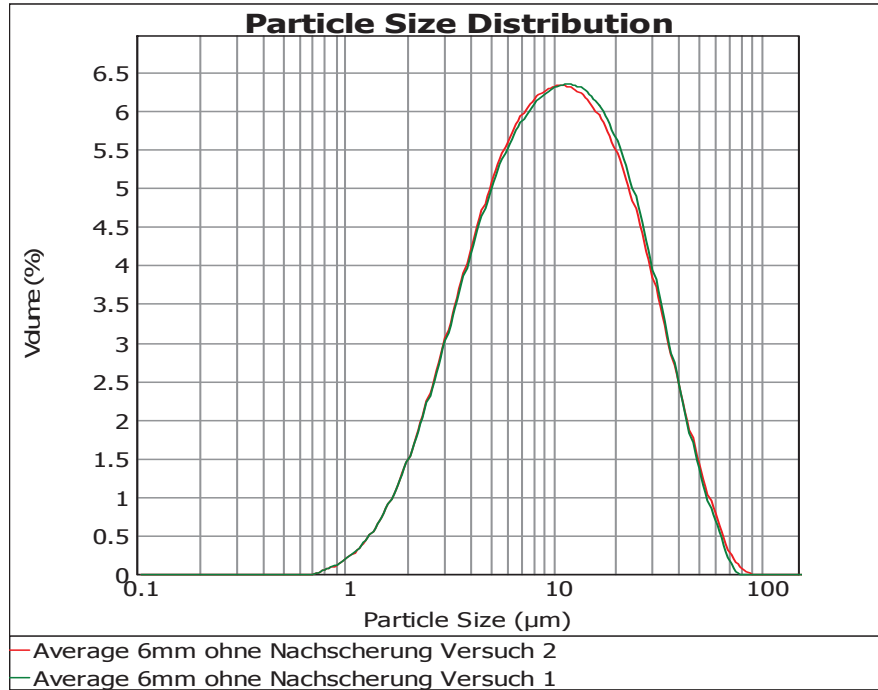


Abbildung 6 Mittelwerte Partikelgrößenverteilung der Versuche 6o1 und 6o2

Das Gleiche gilt für 6C1 und 6C2 (siehe Abbildung 7) sowie 6R1 und 6R2 (siehe Abbildung 8).

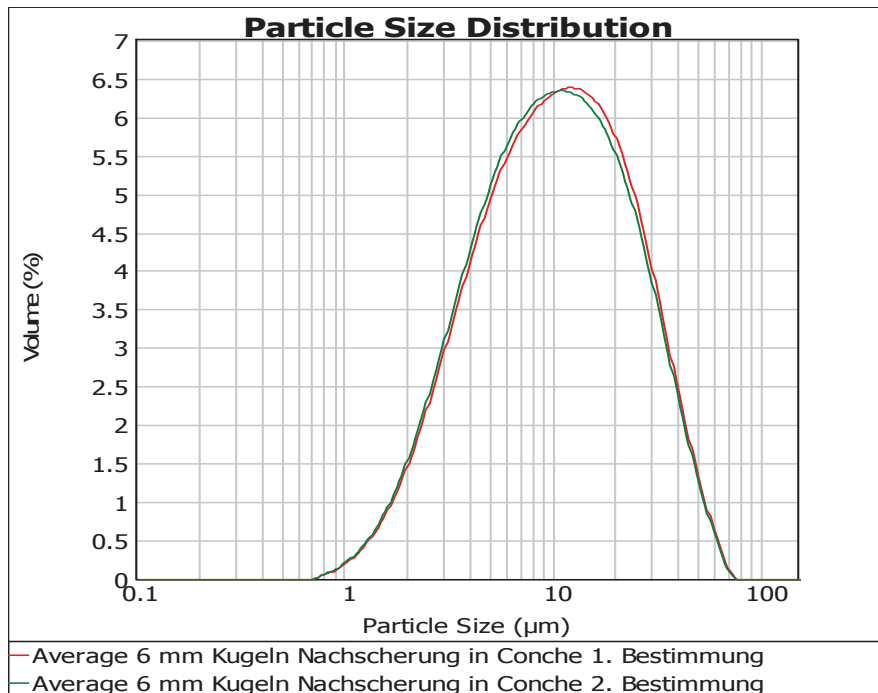


Abbildung 7 Mittelwerte Partikelgrößenverteilung der Versuche 6C1 und 6C2

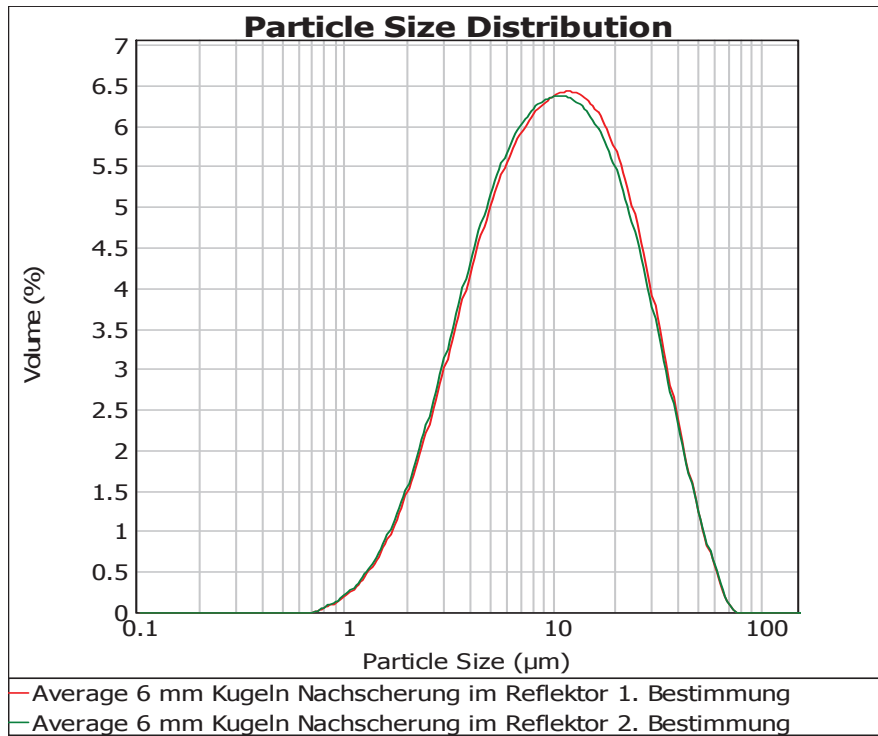


Abbildung 8 Mittelwerte der Partikelgrößenverteilung der Versuche 6R1 und 6R2

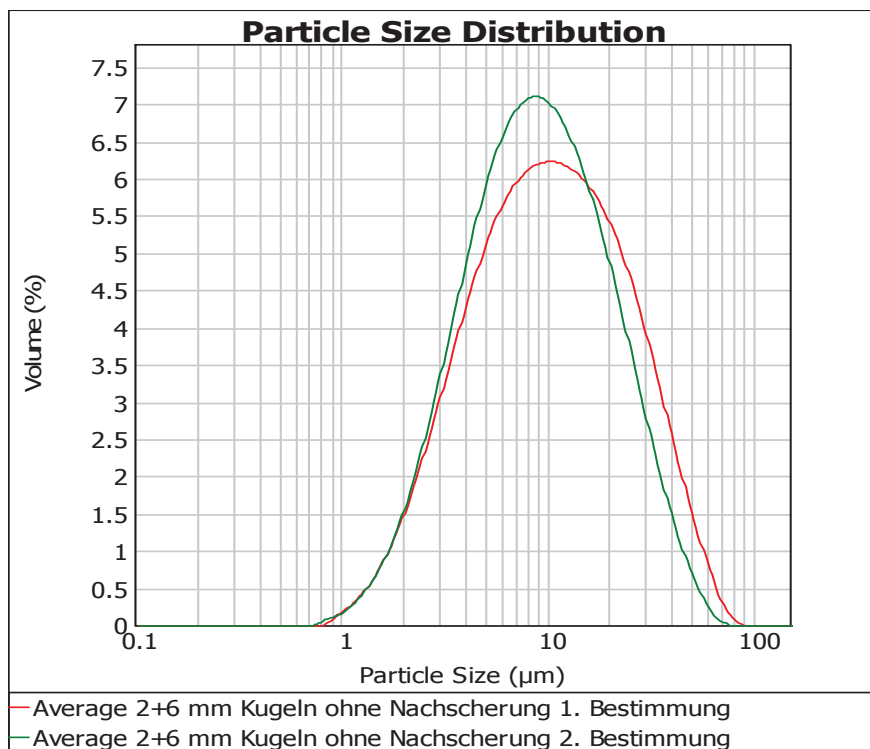


Abbildung 9 Mittelwerte der Partikelgrößenverteilung der Versuche 2+6o1 und 2+6o2

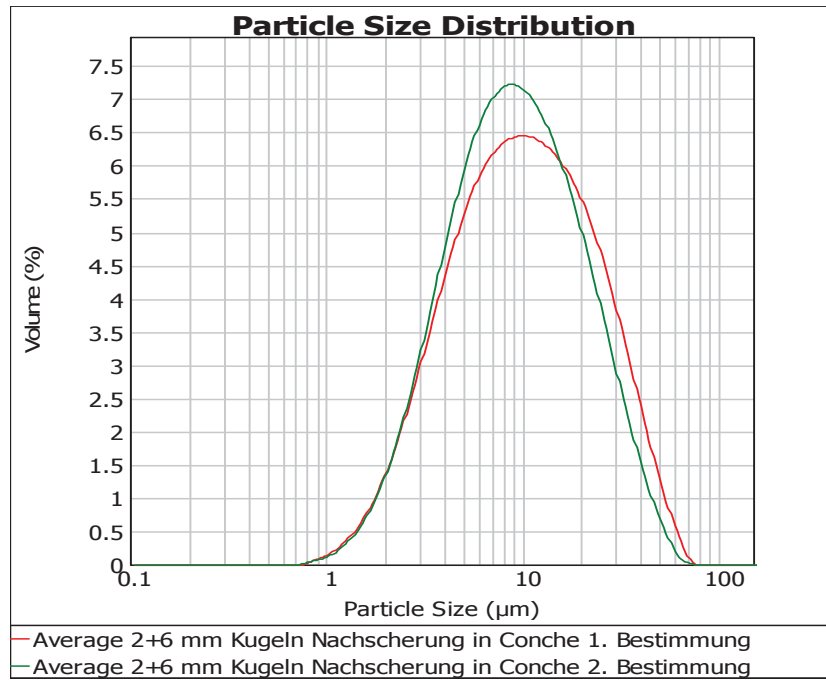


Abbildung 10 Mittelwerte der Partikelgrößenverteilung der Versuche 2+6C1 und 2+6C2

Abbildung 9 (S. 26) zeigt die Graphen der Partikelgrößenverteilung bei 2+6o1 und 2+6o2. Hier wird ersichtlich, dass die Graphen nicht deckungsgleich sind und somit wahrscheinlich unterschiedliche rheologische Eigenschaften aufweisen könnten. Das gleiche gilt für 2+6C1 und 2+6C2 (siehe Abbildung 10) sowie 2+6R1 und 2+6R2 (siehe Abbildung 11).

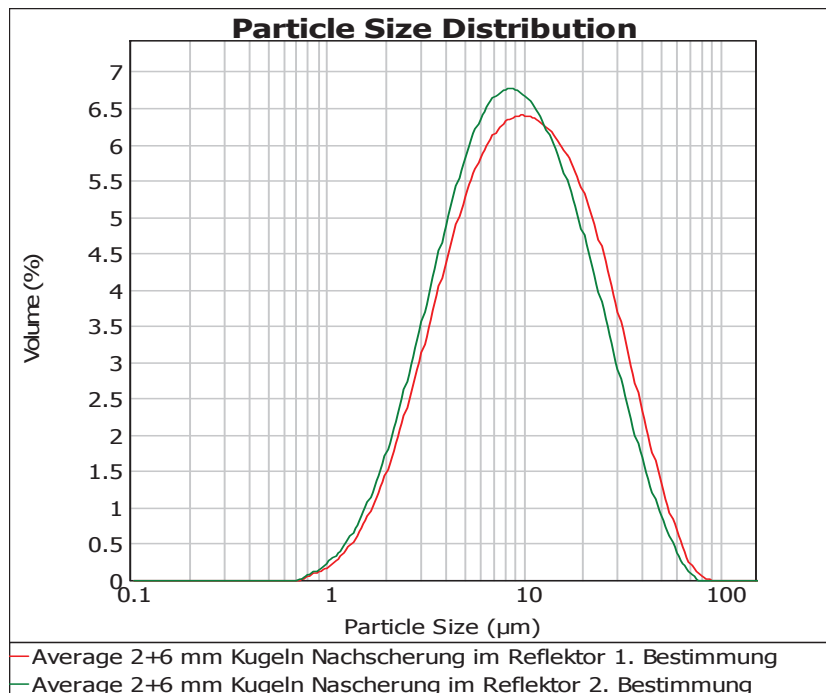


Abbildung 11 Mittelwerte der Partikelgrößenverteilung der Versuche 2+6R1 und 2+6R2

4.2 Messergebnisse Rheologie

Tabelle 10 (S. 29) zeigt die ermittelten rheologischen Ergebnisse. Die nach dem Modell Windhab ermittelten Werte für die Fließgrenzen zeigen, dass mit den Versuchen 6o1 und 6R1 die geringsten Fließgrenzen erzielt werden konnten. Daraus resultiert die geringere Viskosität der beiden Proben gegenüber den anderen Proben. Außerdem ist zu erkennen, dass mit den Proben 2+6o1 und 2+6R1 die höchsten Werte für die Fließgrenze ermittelt wurden. Demnach sind die Werte für die Viskosität ebenfalls am höchsten.

Die nach dem Modell Casson ermittelten Werte für die Fließgrenze zeigen, dass auch hier mit den Versuchen 6o1 und 6R1 die niedrigsten Werte für die Fließgrenze und somit ebenfalls die niedrigsten Viskositäten erreicht werden konnten. Im Vergleich zur Fließgrenze liegen die Ergebnisse aller Versuche bei der Viskosität nach Casson nahe beieinander. Sie bewegen sich im Bereich von 2,20 Pas – 4,65 Pas. Die Abweichungen der Messwerte zwischen den einzelnen Modellen, basiert auf den unterschiedlichen Berechnungsmodellen.

Bei den Werten der Schubspannung bei einer Scherrate von 5 s^{-1} ist zu erkennen, dass die Versuche 6o1 – 6R2 in einem ähnlichen Bereich liegen. 2+6o1, 2+6C1 und 2+6R1 dagegen weisen eine höhere Scherrate und somit auch eine höhere Viskosität auf. 2+6o2, 2+6C2 und 2+6R2 weisen eine noch höhere Schubspannung und somit eine noch höhere Viskosität im Gegensatz zu den anderen Proben auf. Bei einer Scherrate von 40 s^{-1} ist zu erkennen, dass die Werte der Schubspannung höher sind und die Werte in einem weiteren Bereich liegen.

Um eine bessere Übersichtlichkeit zu erreichen, werden die Fließkurven der Schokoladen mit unterschiedlicher Nachscherung als zweifache Versuchsdurchführung jeweils in einem separaten Diagramm dargestellt. Hierzu ist zu sagen, dass die Proben 2+6o2, 2+6C2 und 2+6R2 auf Grund der jeweils zu geringen Partikelgröße nicht in den Fließkurven berücksichtigt sind. Durch die zu kleinen Partikelgrößen weisen diese Proben andere Fließeigenschaften auf als die anderen Proben und eine Vergleichbarkeit ist somit nicht möglich.

Tabelle 10 Die errechneten Mittelwerte der Fließgrenzen und der Viskosität, der verschiedenen Proben nach den Modellen Windhab und Casson und die dazugehörigen Mittelwerte der Schubspannung bei unterschiedlichen Scherraten.

Probe	Windhab		Casson		Schubspannung [Pa] bei	
	Fließgrenze [Pa]	Grenzviskosität [Pas]	Fließgrenze [Pa]	Grenzviskosität [Pas]	Scherrate 5 [s ⁻¹]	Scherrate 40 [s ⁻¹]
6o1	7,13	3,04	5,20	2,20	29,92	134,57
6o2	8,26	4,03	6,35	2,95	38,53	172,93
6C1	8,73	3,54	6,48	2,56	35,91	156,50
6C2	9,53	3,77	7,21	2,72	38,65	165,50
6R1	7,36	3,09	5,40	2,24	29,73	132,18
6R2	8,80	3,56	6,65	2,57	35,84	155,77
2+6o1	10,15	4,99	8,50	3,60	49,45	216,77
2+6C1	8,97	4,70	9,17	3,41	53,21	216,73
2+6R1	9,20	6,08	8,73	4,56	59,53	263,27
Rp	-	-	20,69	2,03	59,91 ± 0,23 ^S	185,05 ± 0,60

S = Standardabweichung der jeweiligen Probe bei dem jeweiligen Parameter

In Abbildung 12 (S. 30) ist zu erkennen, dass die Fließkurven einen Unterschied im Anstieg ihres Graphen zeigen. Somit lässt sich schlussfolgern, dass die Probe 6o1 bessere Fließeigenschaften aufweist (auf Grund des geringeren Anstieges) als die Probe 6o2. Durch diesen Unterschied lassen sich die Proben nicht gut miteinander vergleichen. Ein möglicher Grund für diese unterschiedlichen Werte wird in Punkt 4.4 diskutiert.

Abbildung 13 (S. 30) zeigt die Fließkurven der Schokolade mit einer Nachscherung in der Conche. Hier wird ersichtlich, dass die Graphen dichter beieinander liegen als die Graphen in Abbildung 12. Somit ist eine bessere Vergleichbarkeit der beiden Proben gegeben. Zu sehen ist auch, dass die Probe 6C1 bessere Fließeigenschaften aufweist als 6C2. 6C1 weist eine Viskosität von 2,56 Pas und 6C2 von 2,72 Pas auf.

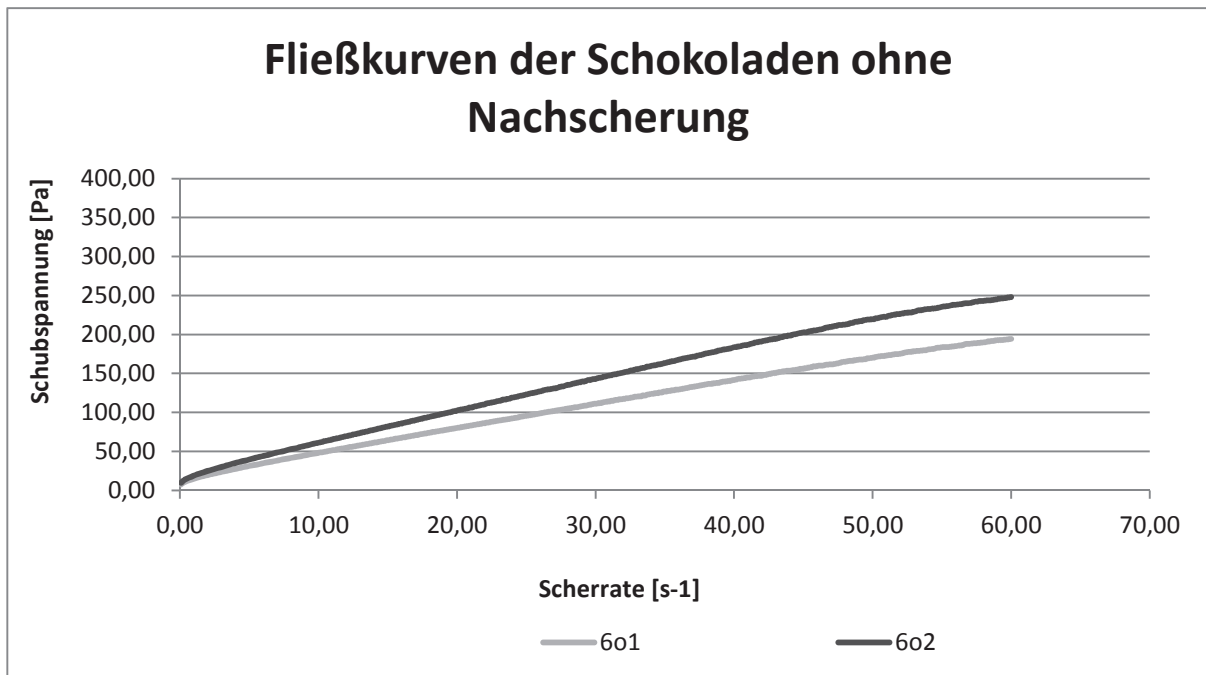


Abbildung 12 Fließkurven der verschiedenen Schokoladen bei einer Zerkleinerung mit 6mm Kugeln ohne Nachscherung - 1. + 2. Versuchsdurchführung

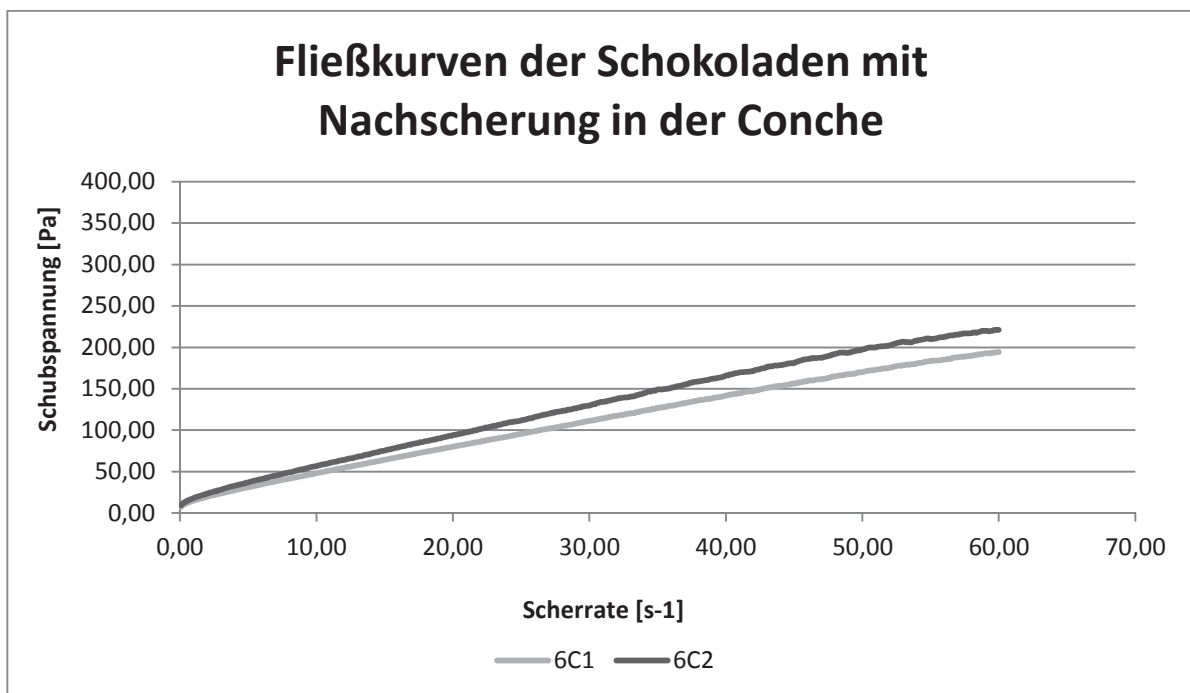


Abbildung 13 Fließkurven der verschiedenen Schokoladen bei einer Zerkleinerung mit 6mm Kugeln mit Nachscherung in der Conche - 1. + 2. Versuchsdurchführung

In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass beide Graphen sehr nahe beieinander liegen und somit sehr gut miteinander vergleichbar sind. Auch in diesem Diagramm wird ersichtlich, dass die zweite Versuchsdurchführung eine etwas höhere Viskosität aufweist als die erste Versuchsdurchführung.

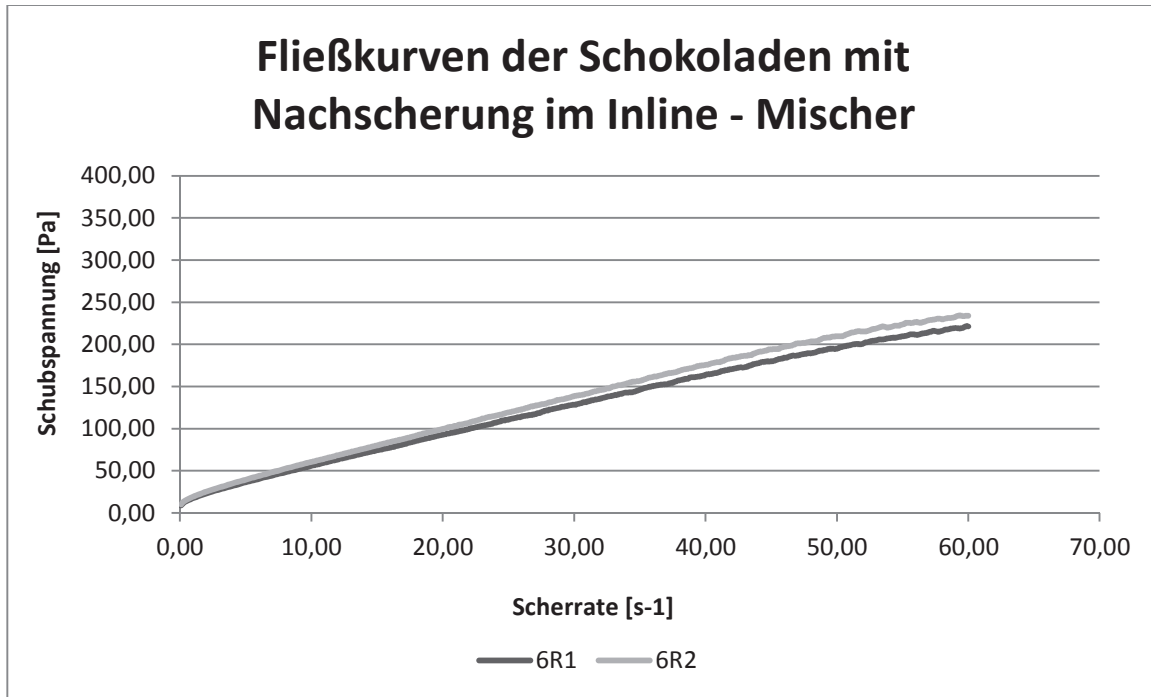


Abbildung 14 Fließkurven der verschiedenen Schokoladen bei einer Zerkleinerung mit 6mm Kugeln mit Nachscherung im Inline – Mischer - 1. + 2. Versuchsdurchführung

Abbildung 15 (S. 32) zeigt, dass mit der Nachscherung im Inline – Mischer bessere Fließeigenschaften erreicht werden konnten als mit der anderen Nachschermethode. Hier liegen die Graphen 2+6o1 und 2+6R1 sehr nahe beieinander. Die Nachscherung mit der Conche weist eine höhere Viskosität und somit schlechtere Fließeigenschaften auf als die Proben ohne Nachscherung und mit Nachscherung im Inline – Mischer. Dieser Aspekt ist als kritisch zu betrachten. In früheren Versuchen anderer Studenten und auch in den vorhergehenden Versuchen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass sich die Fließeigenschaften durch das Nachscheren mit der Conche verbessern. Ein Messfehler ist hier als sehr wahrscheinlich anzusehen. Allerdings muss auch erwähnt werden, dass diese Fließkurven im Gegensatz zu einer Zerkleinerung mit 6 mm Kugeln höhere Viskositäten aufweisen. Die Schubspannungen der in Abbildung 15 dargestellten Fließkurven lagen wesentlich höher als die der Proben in den Abbildungen 12 – 14. Dies kann ebenfalls der Tabelle 10 (S. 29) entnommen werden.

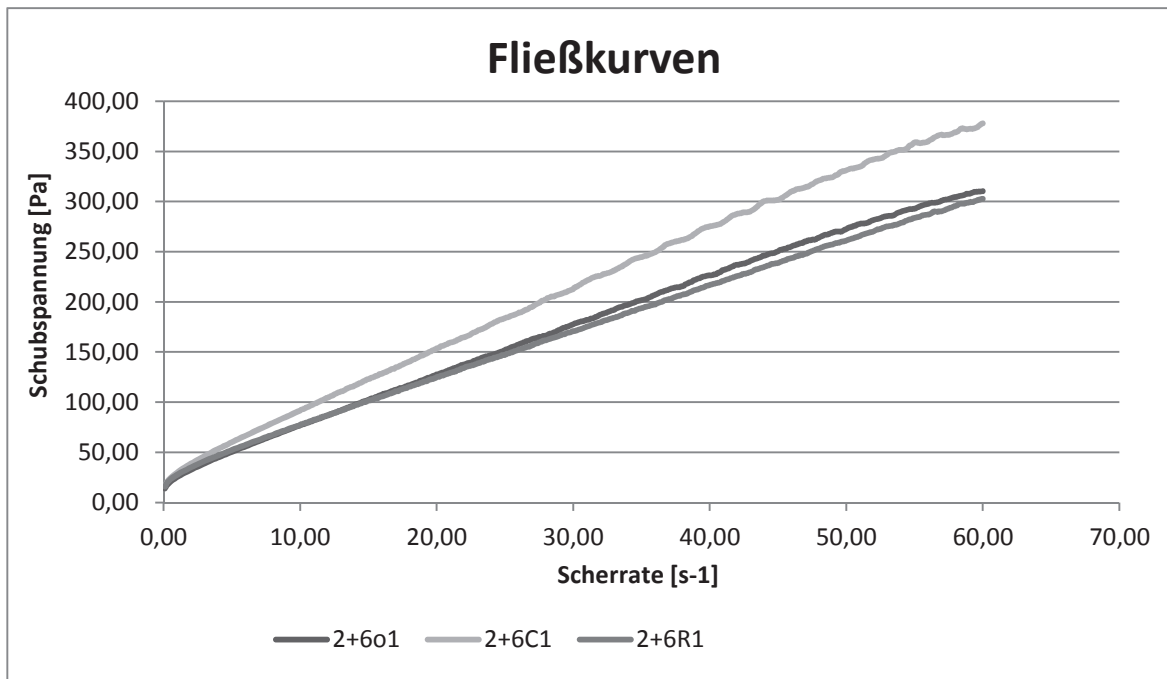


Abbildung 15 Fließkurven der verschiedenen Schokoladen bei einer Zerkleinerung mit 2+6mm Kugeln und unterschiedlichen Nachscherungen - 1. Versuchsdurchführung

Die Messwerte der Tabelle 10 (S. 29) und die Fließkurven zeigen, dass deutliche Unterschiede bei der Zerkleinerung mit verschiedenen Kugeln vorhanden sind. So kann gesagt werden, dass bei einer Zerkleinerung mit 6 mm Kugeln sehr gute rheologische Eigenschaften erzielt werden konnten. Im Gegensatz dazu ist zu erkennen, dass eine Zerkleinerung mit einer Kugelmischung (2 + 6 mm Kugeln) die rheologischen Eigenschaften negativ beeinflusst. Hier wurden wesentlich höhere Werte für die Fließgrenzen und die Viskositäten erreicht.

Werden die Fließkurven und die Werte der Tabelle 10 bezüglich der Nachschermethoden miteinander verglichen, so stellt sich heraus, dass die Unterschiede zwischen den Proben ohne Nachscherung und mit Nachscherung in der Conche bzw. dem Inline – Mischer sehr deutlich sind. Die Proben ohne Nachscherung wiesen schlechtere rheologische Eigenschaften auf, als die nachgescherten Proben. Auch zwischen dem Nachscheren in der Conche und dem Inline – Mischer bestehen Unterschiede von bis zu 1 Pa bei der Casson – Fließgrenze. Die niedrigsten und besten Werte konnten hier mit einer Nachscherung im Inline – Mischer erzielt werden. Bei der Grenzviskosität nach Casson konnten ebenfalls mit dem Inline – Mischer die besten rheologischen Eigenschaften ermittelt werden.

Der Aspekt der Nachscherung wurde in einer vorhergehenden Arbeit von Holm (2010) bearbeitet. Werden die Fließkurven von Holm (2010; S. 54) und die Fließkurven dieser Arbeit miteinander verglichen, so ist festzustellen, dass mit einer Nachscherung in der Conche mit

integrierter Wirbelkammer bessere Fließeigenschaften der Schokoladen erzielt werden konnten. Holm konnte bei einer Nachscherung in der Conche ohne Wirbelkammer bei einer Scherrate von 40 s^{-1} eine Schubspannung von 375,75 Pa erreichen. Die Nachscherung mit der Conche inklusive Wirbelkammer ergab eine Schubspannung von 156,50 Pa (6C1) bzw. 165,50 Pa (6C2) bei gleicher Scherrate. In Hinblick auf die Schubspannung von 375,75 Pa entsprechen die Werte dieser Arbeit einer Senkung der Schubspannung von 58,35 % bzw. 44,05 %.

4.3 Energiebilanzen

Während der verschiedenen Versuche wurden die Energieaufnahmen der unterschiedlichen Geräte aufgenommen. Hierzu wurde ein Stromzähler verwendet. Die Energieaufnahme ergibt sich aus der Differenz der abgelesenen Stromzählerwerte zum Anfang und zum Ende der verschiedenen Prozesse. Die Kugelmühle (Anfangsstromzählerstand: 50730,5 kWh; Endstromzählerstand: 50730,8 kWh) verbrauchte 0,3 kWh / 40 kg. D.h. die Kugelmühle verbrauchte 0,0075 kWh/kg. Die integrierte Pumpe im Thermostat zur Beförderung des Kühlwassers zur Regulierung der Temperatur der Kugelmühle (Anfangsstromzählerstand: 50730,8 kWh; Endstromzählerstand: 50731,9 kWh) wies eine Energieaufnahme von 1,1 kWh / 40 kg auf. D.h. das Thermostat verbrauchte 0,0275 kWh/kg.

Der Energieverbrauch der Conche und der Wirbelkammer konnten am FU abgelesen und berechnet werden. Berechnung für die Leistungsaufnahme des Mischelementes der Conche und der Wirbelkammer:

$$W = P \times t$$

$$\begin{aligned} W_{\text{Mischelement}} &= \frac{0,44 \text{ kW} \times 1,5 \text{ h}}{40 \text{ kg}} \\ &= \underline{0,0165 \text{ kWh/kg}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{Wirbelkammer}} &= \frac{1,09 \text{ kW} \times 1,5 \text{ h}}{40 \text{ kg}} \\ &= \underline{0,0408 \text{ kWh/kg}} \end{aligned}$$

W = verrichtete Arbeit

P = Mittelwert mechanische Leistung

t = Prozesszeit

Die integrierte Wirbelkammer der Conche wies eine durchschnittliche Energieaufnahme von 0,0408 kWh/kg auf. Das Mischelement der Conche hatte einen durchschnittlichen Energieverbrauch von 0,0165 kWh/kg.

Bei der FU – Anzeige der Conche wurde festgestellt, dass die Anzeige für die Umdrehung des Mischelementes der Conche einen falschen Wert lieferte. Dazu teilte Professor Bolenz mit, dass die FU – Anzeige auf die Motordrehzahl programmiert sei. Die Wellendrehzahl für das Mischelement würde sich aus der mechanischen Untersetzung ergeben. Um in folgenden Versuchen die richtige Wellendrehzahl ablesen zu können, wird im nachfolgenden ein Umrechnungsfaktor ermittelt, der die Umrechnung in die richtige Wellendrehzahl ermöglicht. Dem Typenschild am Getriebekasten des Motors für das Mischelement der Conche konnte entnommen werden, dass bei einer Frequenz von 50 Hz 1440 U/min erreicht werden. Um den Umrechnungsfaktor berechnen zu können, wurde die Wellendrehzahl bei 50 Hz manuell durch das Zählen der Umdrehungen und das Stoppen der Zeit ermittelt. Bei 50 Hz erreicht die Welle 72 U/min.

Der Faktor berechnet sich nun wie folgt.

$$F = \frac{U / \text{min Welle}}{U / \text{min Motor}}$$

$$F = \frac{72 \text{ U/min}}{1440 \text{ U/min}}$$

$$F = \underline{0,05}$$

Der Umrechnungsfaktor von Motordrehzahl zu Wellendrehzahl beträgt 0,05 bei 50 Hz.

4.4 Abschlussdiskussion und weitere Schritte

Während der Zwischenlagerung der Schokoladenmassen setzte sich das enthaltene Fett an der Oberfläche der Masse ab. Zur Verbesserung der Homogenisierung der Schokoladenmassen in den Plastikbehältern ist die Verwendung der Bohrmaschine mit einem Rühraufsatz empfehlenswert. In den Versuchen wurden die Massen manuell durch Rühren homogenisiert, welches sich auf Grund der mangelnden Fettverteilung als Nachteil erwiesen hat.

Wie in 4.1 dargestellt, liegen die Partikelgrößen der Versuche 2+6o2, 2+6C2 und 2+6R2 deutlich unterhalb der anderen Messergebnisse. Diese Messwerte wurden nicht weiter berücksichtigt.

Vorteilhaft an der Kugelmischung ist die Zeitersparnis beim Zerkleinerungsprozess. Diese geht einher mit einer deutlichen Energieersparnis. Im Punkt 4.3 wird deutlich, dass die Kugelmühle einen sehr geringen Energieverbrauch aufweisen kann. Dieser lag bei 0,0075 kWh/kg. Im Gegensatz dazu verbrauchte die Conche mit 0,0165 kWh/kg und die integrierte Wirbelkammer mit 0,0408 kWh/kg deutlich mehr Energie. So ist es zu empfehlen, die Zerkleinerung in einem Kreislauf zu fahren, welcher nur die Kugelmühle und die Rachentrichterpumpe beinhaltet (siehe Abbildung 16 und Abbildung 17; S. 44).

Aus den Fließkurven der anderen Versuche geht hervor, dass durch eine Nachscherung mit der Conche die Viskosität erniedrigt werden konnte. Auch die Nachscherung mit dem Inline – Mischer erbrachte eine nochmalige Senkung der Viskosität der Schokoladenmasse. Eine Ursache dafür könnte sein, dass durch die Leistung des Inline – Mixers Partikel abgerundet und in der Probe besser verteilt worden sind (Holm, 2010; S. 55). Aus den Abbildungen der Fließkurven wird deutlich, dass die Ergebnisse der 6 mm Kugel – Proben deutlich niedrigere Viskositäten aufweisen, als die 2 + 6 mm Kugel – Proben.

Ein Vergleich zeigt, dass die erzielten Messwerte der Fließgrenzen und Grenzviskositäten deutlich unterhalb der Referenzwerte (siehe Tabelle 10, S. 29) liegen. Das ist auf Grund der besseren maschinellen Verarbeitbarkeit positiv zu bewerten. Deutlich wird dies bei den Werten nach Casson. Der Referenzwert beträgt bei der Casson – Fließgrenze 20,69 Pa. Die Messwerte lagen im Bereich von 5,20 Pa bis 9,17 Pa.

Um die Probleme bei der Versuchsdurchführung, die in den Punkten 4.1 und 4.4 angesprochen wurden, zu vermeiden, wäre es ratsam, den Studenten zu Beginn ihrer Arbeit eine wiederholt kurze Einweisung in wichtige Geräte, welche für die Anfertigung der Arbeit benötigt werden, zu geben. Somit kann gewährleistet werden, dass alle offenen Fragen beantwortet werden und Fehler, wie z.B. das falsche Ablesen der Bügelmessschraube, sich nicht wiederholen.

Als weiterführender Versuch könnte geplant werden, wie sich die 4 mm Kugeln im Gegensatz zu den 6 mm Kugeln bei der Zerkleinerung auf die Schokoladen auswirken. Des Weiteren könnte untersucht werden, ob sich die Wiederholbarkeit der Versuche verbessert, indem kleinere Chargen mit der Conche hergestellt und anschließend sofort in der Kugelmühle zerkleinert werden. So würden sich vermutlich durch den Entfall der Zwischenlagerung die auftretenden Probleme des Homogenisierens verringern.

Unter Berücksichtigung aller Aspekte kann davon ausgegangen werden, dass die Herstellung von Milkschokolade im Technikumsmaßstab erfolgreich durchgeführt werden konnte.

5 Zusammenfassung

In dieser Bachelor Arbeit sollte untersucht werden, ob die Herstellung von Milkschokolade mit dem alternativen coarse conching – Verfahren im Technikumsmaßstab realisierbar sei. Die erzielten Messwerte sollten anschließend mit Referenzwerten früherer Versuche verglichen werden. Zur Umsetzung des Verfahrens diente eine Conche mit integrierter Wirbelkammer. Die anschließende Zerkleinerung wurde mit einer Kugelmühle durchgeführt. Hierzu wurde untersucht, ob die Erhöhung der Packungsdichte beim Zerkleinerungsprozess einen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften zur Folge hat. Um diese Frage beantworten zu können, wurde eine Schokolade mit 6 mm Kugeln und eine zweite mit einer Kugelmischung aus 2 + 6 mm Kugeln zerkleinert. Zusätzlich wurde der Aspekt des Nachscherens untersucht. Zum Nachscheren wurden zum einen die Conche mit der Wirbelkammer und zum anderen ein Inline – Mischer verwendet.

Die Auswertung der Messwerte hat ergeben, dass die Referenzwerte nicht eingehalten werden konnten. Fast alle Messwerte lagen deutlich unterhalb der vorgegeben Referenzwerte. Positiv zu erwähnen ist die erreichte Zeitersparnis beim Zerkleinerungsprozess der Schokoladenmassen mit einer Kugelmischung aus 2 + 6 mm Kugeln. Jedoch wiesen diese Schokoladen schlechtere Fließeigenschaften auf, als die Schokoladen, die mit 6 mm Kugeln zerkleinert wurden. Außerdem positiv zu erwähnen ist die erzielte Auswirkung der Nachscherung. Hier konnte festgestellt werden, dass die Viskosität mit beiden Nachschermethoden verringert werden konnte. Daraus resultierten bessere Fließeigenschaften gegenüber den Schokoladen, die nicht nachgeschert wurden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Herstellung der Milkschokolade mit dem alternativen Herstellprozess im Technikumsmaßstab realisiert werden konnte.

6 Abstract

This bachelor thesis is about milk chocolate that is produced using the conching process. Therefore, it was to be investigated whether the increase of the packing density of the balls within the ball mill and the shearing in the conche after the grinding process have an affect on the properties of the chocolate. The properties such as the particle size distribution and the flow properties are investigated with different methods of analysis. Subsequently, the results are compared to a reference.

7 Literaturverzeichnis

- Beckett, S.T.: Industrial chocolate manufacture and use. 4. Auflage. Oxford: Verlag Wiley-Blackwell, 2009.
- Beckett, S.T.: The Science of Chocolate. 2. Auflage. Cambridge: Verlag RSC Publishing, 2008.
- Boede, P.S.: Anwendung des Grobchonchier – Verfahrens zur Herstellung von Schokoladen im Technikumsmaßstab. 2. Studienarbeit. Neubrandenburg. 2013.
- Bolenz, Prof. Dr. S; Manske, A.; Langer, M.: Improvement of process parameters and evaluation of milk chocolates made by the new coarse conching process. Verlag Springer, 2014. Veröffentlichung in Vorbereitung.
- de.statista.com, 19.09.2013, 13:30 Uhr
- Gehm, L.: Rheologie – Praxisorientierte Grundlagen und Glossar. 1. Auflage. Hannover: Vincentz Verlag, 1998.
- Hemming, W.; Wagner, W.: Verfahrenstechnik. 10. Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2008.
- Hess, Dr. A.: Schokoladenmassen auf dem Prüfstand. Jahrgang 2001. www.suesswarentechnik.de. 24.01.2014, 9:50 Uhr
- Holm, M.: Mischen von Schokoladenmassen aus konventionellen und alternativen Zerkleinerungsprozessen. urn:nbn:de:gbv:519-thesis 2010 – 0101 – 4. Neubrandenburg, 2010.
- John, T.: Hinweise für die Durchführung von Studien- und anderen wissenschaftlichen Arbeiten. 16. Auflage. Neubrandenburg: 2010.
- Kassmann, Dr. M und Felsinger, M.: Allgemeine Biometrie. 12.12.2007. www.iam.uni-bonn.de. 16.01.2014, 7:50 Uhr

- Kleinert, J.: Handbuch der Kakaoverarbeitung und Schokoladenherstellung. 1. Auflage. Hamburg: Behr's Verlag, 1997.
- Mezger, T.: Das Rheologie - Handbuch. 1. Auflage. Hannover: Vincents Verlag, 2000.
- Müller, F.: Validierung verschiedener Messmethoden zur Trockensubstanzbestimmung anhand von Soja-, Reis- und Haferprodukten. Belegarbeit Praxissemester. Neubrandenburg. 2013.
- Römisch, J.: Physikalische und sensorische Eigenschaften von Schokoladen unterschiedlicher Herstellungsmethoden. urn:nbn:de:gbv:519-thesis 2011-0546-2. Neubrandenburg. 2012.
- Schramm, G.: Einführung in die Rheologie und Rheometrie. 1. Auflage. Karlsruhe: Verlag Gebrüder Haake, 1995.
- www.cacaochocolade.nl. 16.09.2013; 16:43 Uhr
- www.cosmiq.de. 28.01.2014; 13:30 Uhr
- www.dallasfood.org. 16.09.2013; 16:38 Uhr
- www.gesetze-im-internet.de. 25.11.2013; 12:10 Uhr
- www.lippmischtechnik.de. 16.09.2013; 17:04 Uhr
- www.malvern.de. 26.11.2013; 12:00 Uhr
- www.wikipedia.de. 25.11.2013; 09:15

8 Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Arbeitsweise des Lindt-Längsreibers (www.cacaochocolade.nl)	6
Abbildung 2: Arbeitsweise der Frisse – Conche (www.dallasfood.org).....	7
Abbildung 3: Wirbelkammer der Firma Lipp Mischtechnik (www.lippmischtechnik.de).....	7
Abbildung 4 Fließschema zur Darstellung der Versuchsmuster	9
Abbildung 5 Fließschema zur Herstellung der Milkschokolade	11
Abbildung 6 Mittelwerte Partikelgrößenverteilung der Versuche 6o1 und 6o2	25
Abbildung 7 Mittelwerte Partikelgrößenverteilung der Versuche 6C1 und 6C2.....	25
Abbildung 8 Mittelwerte der Partikelgrößenverteilung der Versuche 6R1 und 6R2.....	26
Abbildung 9 Mittelwerte der Partikelgrößenverteilung der Versuche 2+6o1 und 2+6o2.....	26
Abbildung 10 Mittelwerte der Partikelgrößenverteilung der Versuche 2+6C1 und 2+6C2	27
Abbildung 11 Mittelwerte der Partikelgrößenverteilung der Versuche 2+6R1 und 2+6R2	27
Abbildung 12 Fließkurven der verschiedenen Schokoladen bei einer Zerkleinerung mit 6mm Kugeln ohne Nachscherung - 1. + 2. Versuchsdurchführung	30
Abbildung 13 Fließkurven der verschiedenen Schokoladen bei einer Zerkleinerung mit 6mm Kugeln mit Nachscherung in der Conche - 1. + 2. Versuchsdurchführung	30
Abbildung 14 Fließkurven der verschiedenen Schokoladen bei einer Zerkleinerung mit 6mm Kugeln mit Nachscherung im Inline – Mischer - 1. + 2. Versuchsdurchführung.....	31
Abbildung 15 Fließkurven der verschiedenen Schokoladen bei einer Zerkleinerung mit 2+6mm Kugeln und unterschiedlichen Nachscherungen - 1. Versuchsdurchführung.....	32
Abbildung 16 Darstellung des Zerkleinerungskreislaufes ohne Conche	44
Abbildung 17 Darstellung des Zerkleinerungskreislaufes mit Conche.....	44

9 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Rezeptur zur Herstellung von Milkschokolade und die errechneten Fettgehalte der einzelnen Komponenten	8
Tabelle 2 Übersicht der Versuchsparameter während der einzelnen Prozessschritte	10
Tabelle 3 Abmessungen der einzelnen Anlagenteile und der Kugelmühle zur Berechnung der Verweilzeit der Schokoladenmasse in der Kugelmühle.....	14
Tabelle 4 Übersicht der Messabschnitte mit den dazugehörigen Scherraten und der Anzahl der Messpunkte im Rotationsviskosimeter.....	19
Tabelle 5 Statistische Zusammenhänge der einzelnen Proben bei einer Scherrate von $0,05 \text{ s}^{-1}$	21
Tabelle 6 Statistische Zusammenhänge der einzelnen Proben bei einer Scherrate von 5 s^{-1} ...	21
Tabelle 7 Statistische Zusammenhänge der einzelnen Proben bei einer Scherrate von 40 s^{-1} . ..	22
Tabelle 8 Statistische Zusammenhänge der einzelnen Proben bei $d(0,9)$	22
Tabelle 9 Die errechneten Mittelwerte der Endpartikelgrößen und die dazugehörigen Mittelwerte der relativen Breite, des Span und der spezifischen Oberfläche.	24
Tabelle 10 Die errechneten Mittelwerte der Fließgrenzen und der Viskosität, der verschiedenen Proben nach den Modellen Windhab und Casson und die dazugehörigen Mittelwerte der Schubspannung bei unterschiedlichen Scherraten.....	29
Tabelle 11: Produktionsschritte während des Herstellungsprozesses der Milkschokolade bezogen auf 40 kg Einwaage.....	43

10 Anlagen

Tabelle 11: Produktionsschritte während des Herstellungsprozesses der Milkschokolade bezogen auf 40 kg Einwaage

Prozess-schritt	Rohstoff	Menge [Ma%]	Fett [%]	Fett Ist [Ma%]	Menge [kg]	Fettgehalt Soll [%]
1	Zucker	50,2	0	0,00	20,08	2
	Magermilch-pulver	13,7	1	0,14	5,48	
	Anteil Kakaobutter 1	1,164	100	1,16	0,47	
Summe 1	-	65,06	2,00	1,30	26,03	
2	Kakaomasse	13	55	7,15	5,20	12
	Butterreinfett	1,04	99,8	1,04	0,42	
Summe 2	-	79,11	12	9,49	31,64	
3	Rest Butterreinfett	3,76	99,8	3,75	1,50	
	Rest Kakaobutter 1	12,67	100	12,67	5,07	
	Kakaobutter 2	1,88	100	1,88	0,75	
	Kakaobutter 3	1,88	100	1,88	0,75	
Summe 3	-	99,29	29,88	29,67	39,72	
4	Lecithin 1	0,36	94	0,34	0,14	
	Lecithin 2	0,36	94	0,34	0,14	
Summe 4	-	100,01	30,34	30,34	40,00	

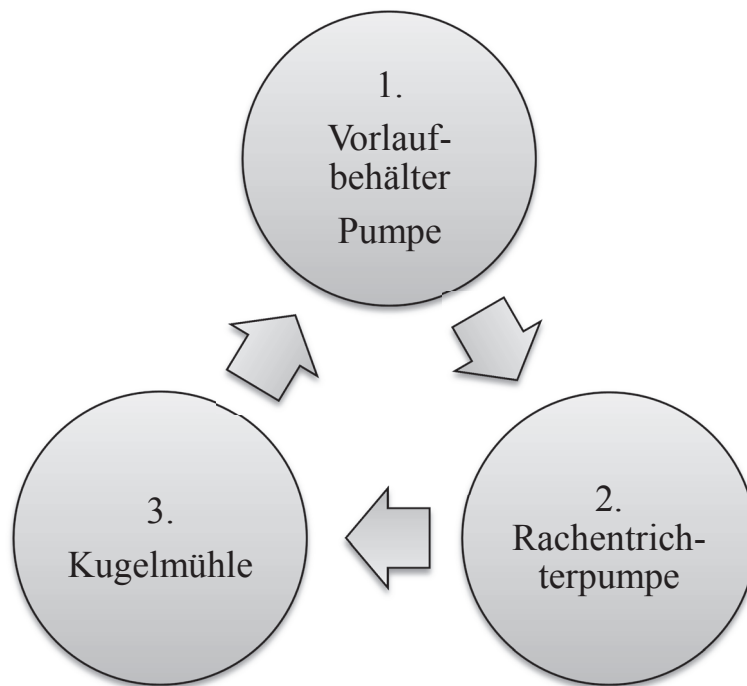


Abbildung 16 Darstellung des Zerkleinerungskreislaufes ohne Conche

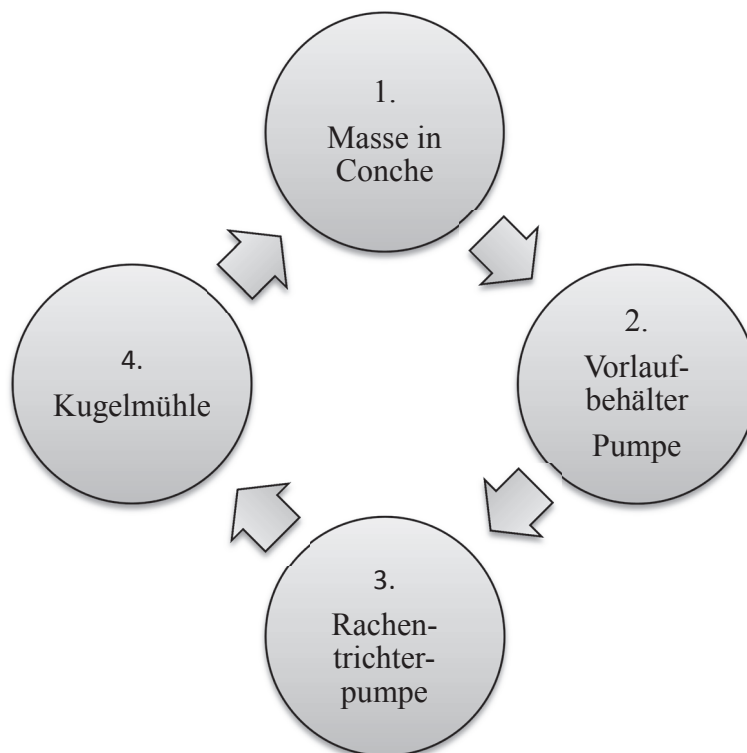


Abbildung 17 Darstellung des Zerkleinerungskreislaufes mit Conche

Eidesstaatliche Erklärung

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

Ich erkläre weiterhin, dass die eingereichte elektronische Arbeit mit der schriftlichen identisch ist.

Ort, Datum

Unterschrift