

Hochschule Neubrandenburg
Fachbereich Technologie
Studiengang Lebensmitteltechnologie

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieurin für Lebensmitteltechnologie (FH)

Thema:

„Charakterisierung und Vergleich von Ein- und Zweistufenwalzverfahren zur Optimierung des Herstellungsprozesses von Schokolade unter Berücksichtigung der Partikelverteilung“

Verfasser: Susanne Rohloff

Betreuender Dozent: Prof. Dr. S. Bolenz

Betreuer im Betrieb: Diplom Lebensmitteltechnologin E. Czupryk

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2008-0062-3

Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit ist im Rahmen meiner Diplomandentätigkeit in der Qualitätssicherung der August Storck KG (Berlin) entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. S. Bolenz für die Betreuung und Unterstützung dieser Diplomarbeit seitens der Hochschule Neubrandenburg.

Außerdem bedanke ich mich herzlich bei Frau Dipl.-Ing. E. Czupryk (August Storck KG) für ihre Betreuung und zahlreichen Ratschläge und Hilfestellungen.

Vielen Dank auch an alle Mitarbeiter der Qualitätssicherung, für die freundliche und hilfsbereite Unterstützung und die tolle Arbeitsatmosphäre.

Ein großes Dankeschön geht an Herrn Rodriguez, für seine Hilfsbereitschaft und die Beantwortung meiner unzähligen Fragen. Außerdem möchte ich mich bei allen anderen Mitarbeitern bedanken, die mir bei den Probebeziehungen geholfen haben.

Auch gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. J. Landskron von der TFH Berlin für die Einarbeitung in das Rasterelektronenmikroskop und dessen Bereitstellung.

Ebenso möchte ich mich an dieser Stelle bei meinen Eltern, meinem Bruder und meinem Freund Maik für die Unterstützung während der Dauer der Diplomarbeit und des Studiums bedanken!

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

1SWV	Einstufenwalzverfahren
2SWV	Zweistufenwalzverfahren
>30 μm	Anteil der in einer Probe enthaltenen Partikel, die größer als 30 μm sind, in Vol.-%, ermittelt mit dem Laser-Spektrometer
>30 μm	Anteil der in einer Probe enthaltenen Partikel, die größer als 30 μm sind, in % abs., ermittelt mit der Nasssieb-Methode
>75 μm	Anteil der in einer Probe enthaltenen Partikel, die größer als 75 μm sind, in Vol.-%, ermittelt mit dem Laser-Spektrometer
>75 μm	Anteil der in einer Probe enthaltenen Partikel, die größer als 75 μm sind, in % abs., ermittelt mit der Nasssieb-Methode
>120 μm	Anteil der in einer Probe enthaltenen Partikel, die größer als 120 μm sind, in Vol.-%, ermittelt mit dem Laser-Spektrometer
>120 μm	Anteil der in einer Probe enthaltenen Partikel, die größer als 120 μm sind, in % abs., ermittelt mit der Nasssieb-Methode
>200 μm	Anteil der in einer Probe enthaltenen Partikel, die größer als 200 μm sind, in Vol.-%, ermittelt mit dem Laser-Spektrometer
>200 μm	Anteil der in einer Probe enthaltenen Partikel, die größer als 200 μm sind, in % abs., ermittelt mit der Nasssieb-Methode
d(0.001)	Partikelgröße in μm , unter der 0,1% der in dem Probematerial enthaltenen Probe liegen
d(0.1)	Partikelgröße in μm , unter der 10 % der in dem Probematerial enthaltenen Probe liegen
d(0.5)	Massemitteldurchmesser, Partikelgröße in μm , bei der 50 % der in dem Probematerial enthaltenen Probe kleiner und 50 % größer sind
d(0.9)	Partikelgröße in μm , unter der 90 % der in dem Probematerial enthaltenen Probe liegen

d(0.999)	Partikelgröße in μm , unter der 99,9 % der in dem Probenmaterial enthaltenen Probe liegen
Faktor	dimensionsloser Wert, ergibt sich aus Wasser- und Fettgehalt der Schokoladenmasse, benötigt bei Nasssiebung
Mode	Modalwert, Partikelgröße in μm , die am häufigsten in dem Probenmaterial enthalten ist
η_{CA}	Casson Viskosität, in $\text{Pa}\cdot\text{s}$
OICCC	Office International du Cacao, du Chocolat et de la Confiserie
REM	Rasterelektronenmikroskop
Sieb _{Anfang}	Leergewicht Sieb in g vor Einsatz in Nasssiebung
Sieb _{Ende}	Gewicht Sieb mit Rückstand in g nach Einsatz in Nasssiebung
Span	dimensionslose Darstellung der Verteilungsbreite
Specific Surface Area (SSA)	spezifische Oberfläche definiert als die Gesamtoberfläche der Partikel dividiert durch das Gesamtgewicht in m^2/g
τ_{CA}	Casson Fließgrenze, in Pa
VMB	Schokoladenmasse Vollmilch B
VMC	Schokoladenmasse Vollmilch C

Inhaltsverzeichnis

Deckblatt

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	1
1 Einleitung	5
2 Stand der Technik im Prozess der Schokoladenherstellung.....	7
2.1 Rohstoffe	7
2.2 Kurzüberblick 1SWV und 2SWV	12
2.3 Mischer.....	13
2.3.1 Mischer im 1SWV und 2SWV der Fa. August Storck KG.....	13
2.3.2 Möglichkeiten der Rohstoffdosierung in den Mischer.....	14
2.4 Vorwalzwerk	15
2.4.1 Aufbau und Parameter.....	15
2.4.2 Einfluss des Vorwalzens auf die Schokoladenmasse.....	16
2.4.3 Einsatz von Schlagmessermühlen anstatt eines Zweiwalzwerks	17
2.5 Feinwalzwerk	19
2.5.1 Aufbau und Parameter.....	19
2.5.2 Einfluss des Feinwalzens auf die Schokoladenmasse	20
2.6 Conche.....	21
3 Material und Methoden	23
3.1 Herangehensweise und Versuchsplanung	23
3.2 1SWV und 2SWV der Fa. August Storck KG	28
3.2.1 Fließschema, Parameter des 1SWV am Beispiel der VMC.....	28
3.2.2 Charakterisierung des 1SWV am Beispiel der VMC.....	29
3.2.3 Fließschema, Parameter des 2SWV am Beispiel der VMB.....	31
3.2.4 Charakterisierung des 2SWV am Beispiel der VMB.....	32
3.3 Analytische Methoden.....	34
3.3.1 Partikelform mittels Rasterelektronenmikroskop.....	34
3.3.2 Partikelverteilung mittels Laser-Streulichtspektrometer.....	38
3.3.2.1 Messungen mit der Nassdispergiereinheit.....	40
3.3.2.2 Messungen mit der Trockeneinheit	41
3.3.2.3 Parameter zur Auswertung der Ergebnisse des Laser-Spektrometers.....	42
3.3.3 Partikelgrößenverteilung mit der Nasssieb-Methode	44
3.3.4 Bestimmung der rheologischen Eigenschaften	45

4	Ergebnisse	48
4.1	Probeziehung der VMC und VMB.....	48
4.2	REM-Aufnahmen der VMC und VMB im 1SWV und 2SWV	48
4.2.1	Schokoladenmasse VMC im 1SWV und 2SWV	49
4.2.2	Schokoladenmasse VMB im 2SWV und 1SWV	54
4.3	Partikelverteilung der Rohstoffe und Prozessschritte	59
4.3.1	optimale Messparameter aller Proben mit dem Laser-Spektrometer	59
4.3.2	Rohstoffe der VMC und VMB.....	62
4.3.3	Schokoladenmasse VMC im 1SWV und 2SWV	72
4.3.4	Schokoladenmasse VMB im 2SWV und 1SWV	79
4.3.5	Partikelgrößenverteilung der Feinwalzproben	85
4.4	Partikelgrößenverteilung der Prozessproben mit der Nasssieb-Methode	87
4.5	Rheologie der Endmassen VMC und VMB vom 1SWV und 2SWV	104
5	Abschlussdiskussion.....	108
6	Zusammenfassung.....	117
7	Abstract	118
8	Literatur.....	119
	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen.....	123
	Verzeichnis der Anlagen	131
	Anlagen	132
	Erklärung über die selbstständige Anfertigung der Arbeit.....	203

1 Einleitung

Heutzutage ist die Konkurrenz auf dem überwiegend gesättigten Lebensmittelmarkt sehr groß. Damit ein Unternehmen bei diesen Voraussetzungen bestehen kann, bedarf es einer sehr hohen Wirtschaftlichkeit im Produktionsprozess – so auch bei der Schokoladenherstellung. Es müssen Produkte mit optimaler und gleich bleibender Qualität hergestellt und ebenso Kundenwünsche und –erwartungen erfüllt werden. Bei der Herstellung von Schokolade kann die Wirtschaftlichkeit zum einen durch die eingesetzten Rohstoffe beeinflusst werden, zum anderen durch Kontrolle des Herstellprozesses und der einzelnen Arbeitsabläufe überprüft und optimiert werden. Zwei mögliche Verfahren zur Herstellung von Schokolade sind das Ein- und das Zweistufenwalzverfahren, deren Namen sich aus der Anzahl an Walzwerken im Produktionsprozess ergibt.

Schokolade ist ein disperses System der partikelhaltenden Rohstoffe Zucker, Kakaomasse, Vanillin und bei Milkschokoladen zusätzlich der Milchtrockenstoffe und den flüssigen Rohstoffen Kakaobutter und Lecithin. Die Herstellung von Schokolade lässt sich in drei wesentliche Abschnitte unterteilen. Diese sind das Vermischen der Rohstoffe zu einer homogenen Masse, die Zerkleinerung der Partikel auf die gewünschte Größe und das Conchieren zur Endveredelung. (Tscheuschner, 1996) Auf diese Weise lässt sich die Schokoladenproduktion auch im Ein- und Zweistufenwalzverfahren unterteilen. Bei dem Einstufenwalzverfahren erfolgt eine separate Vermahlung des Zuckers bevor er mit den anderen Rohstoffen vermischt wird. Er weist somit bereits beim Mischen geringe Partikelgrößen auf. Hingegen wird beim Zweistufenwalzverfahren unzerkleinerter Kristallzucker mit den anderen Rohstoffen vermischt. Die Schokoladenmasse wird nach dem Mischen mit einem Zweiwalzwerk bearbeitet, in welchem nur der Zucker zerkleinert wird. Die Schokoladenmasse soll nach dem Mischen im Einstufenwalzverfahren und nach der Bearbeitung im Zweiwalzwerk des Zweistufenwalzverfahrens ähnliche Partikelgrößen und -verteilungen aufweisen, als Grundlage für die folgenden Prozessschritte. Diese sind bei beiden Herstellmethoden die Feinzerkleinerung der Partikel auf einem Fünfwalzwerk und das Conchieren.

Neben der ausreichenden Zerkleinerung der enthaltenen Partikel werden im Prozess der Schokoladenherstellung eine homogene Verteilung der Rohstoffe, die Ausbildung einer emulsiden Struktur und das Entfernen von flüchtigen Komponenten angestrebt. (Tscheuschner, 1996)

Die Partikelgröße und -verteilung der Schokoladenendmasse hat Einfluss auf deren Eigenschaften und stellt daher einen Hauptaspekt für die Sicherung von vorgegebenen Qualitätskriterien dar. Besonders deutlich feststellbar ist dieser Einfluss bei den Fließeigenschaften, dem Verhalten der Schokoladenmasse bei der weiteren Verarbeitung und dem Geschmack.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, in wie weit mit dem Ein- und Zweistufenwalzverfahren Schokoladenmassen mit gleichen Eigenschaften produziert werden können. Betrachtet werden zwei Produktionslinien der August Storck KG, welche sich an zwei verschiedenen Standorten in Berlin befinden. Neben der Darstellung und dem Vergleich der Verfahren wird besonderer Wert auf die Partikel und deren Veränderung im Herstellungsprozess gelegt.

Dazu werden im ersten Teil der Arbeit wesentliche Eigenschaften der Rohstoffe und derzeit eingesetzten Anlagen und Maschinen beschrieben. Die Prozesse der beiden Produktionsanlagen und -abläufe werden dargestellt. Anhand von zwei Vollmilchschokoladen werden die Veränderungen der Massen und den enthaltenen Partikeln in den Prozessen während der Herstellung analysiert und verglichen.

In einer abschließenden Diskussion sollen die beiden Verfahren und die Ergebnisse der analysierten Schokolademassen gegenübergestellt werden. Für auftretende Unterschiede zwischen der erreichten und der gewünschten Qualität der Massen werden mögliche Maßnahmen und Veränderungen in den Prozessen vorgeschlagen, so dass mit beiden Verfahren gleiche Endmassen produziert werden können.

2 Stand der Technik im Prozess der Schokoladenherstellung

Die Herstellung von Milkschokolade benötigt auch bei den neusten und fortschrittlichsten Anlagen gute Rohstoffe, um qualitativ hochwertige Produkte zu erzeugen. Mit dem verwendeten Herstellverfahren kann die Qualität zusätzlich stark beeinflusst werden.

2.1 Rohstoffe

Kakaomasse

Kakaomasse ist ein Halbfabrikat und dient u.a. der Herstellung von Schokoladen. Gewonnen wird sie aus Kakaobohnen. Hauptbestandteile der Kakaomasse sind folgende Komponenten: Fett, Protein, Nahrungsfaser, Stärke, Gerbstoffe (Polyhydroxyphenole), lösliche Kohlenhydrate und Mineralstoffe. Der Fettgehalt der meisten Kakaomassen beträgt (bezogen auf die Trockenmasse) üblicherweise mehr als 50 g/100 g. (Finke, 1965)

Kakaomasse wird bei der Schokoladenproduktion häufig petzomiert eingesetzt, um die Dauer des Conchierprozesses zu verkürzen. Dafür werden die Kakaomassepartikel vorher in einer Kugelmühle auf die gewünschte Größe der Schokolade gebracht. Der Petzomat ist ein Dünnschichtkonvektionstrockner, welcher aus vier Säulen besteht. In dieser Anlage wird die Kakaomasse mit Impfwasser angereichert, da die in den Kakaomassen enthaltenen Säuren wasserlöslich sind und so besser entfernt werden können. In den einzelnen Säulen erfolgt das Entsäuern, Entgasen und Entkeimen der Kakaomasse. Zuletzt wird die Kakaomasse wieder entfeuchtet, um das eingebrachte Impfwasser zu entfernen. (Beckett, 1999)

Die Qualität der Kakaomasse ist auch abhängig von der eingesetzten Kakaobohnensorte und der angewandten Vorbehandlung der Kakaobohnen (Rösten oder Darren). (Wolf, 1987)

Kakaobutter

Als Kakaobutter bezeichnet man das aus Kakaobohnen oder Teilen von Kakaobohnen gewonnene Fett. Es können generell drei verschiedene Arten von Kakaobutter unterschieden werden. Diese sind die Kakaopressbutter, Expellerbutter und raffinierte Kakaobutter. (Verordnung über Kakao- und Schokoladenerzeugnisse, 2003)

Kakaobutter besteht hauptsächlich aus den Fettsäuren Palmitin-, Stearin-, Öl- und Linolsäure. In geringen Mengen oder Spuren kann sie die Laurin-, Myristin-, Palmitolein-, Linolensäure

und einige andere Fettsäuren enthalten. Kakaobutter ist hellgelb und hat einen Schmelzpunkt bei etwa 36 °C. Bei 18 bis 20 °C zeichnet sie sich durch ihre große Härte im Vergleich zu anderen Fetten aus. Weiterhin gibt es bei der Kakaobutter nur einen engen Temperaturbereich indem sie vom festen in den flüssigen Zustand übergeht. (Wolf, 1987) Diese Eigenschaften der Kakaobutter lassen sich mit ihrer Polymorphie begründen.

Nach Wolf (1987) bedeutet Polymorphie, dass eine Substanz je nach Temperaturbedingungen in verschiedenen Formen kristallisieren kann. Besonders wichtig ist diese Kenntnis für das Temperieren der Schokoladenmassen. Auch das leichtere Entfernen der Schokolade aus den Formen ist als Vorteil zu nennen. Außerdem werden ein hoher Oberflächenglanz, gleichmäßige Farbe, hohe Fettreifresistenz und gute Haltbarkeit erzielt. (Wolf, 1987)

Kristallzucker / Saccharose

Der Kristallzucker (Saccharose) ist ein aus Zuckerrohr oder Zuckerrüben gewonnenes Kohlenhydrat. Zusammengesetzt ist das Disaccharid aus einem Molekül α -D-Glukose und einem Molekül β -D-Fruktose verbunden mit einer α,β -1,2-glycosidische Bindung. (Beckett, 1999)

Amorpher Zucker entsteht u.a. wenn Kristallzucker unter hohem Druck im Walzenspalt oder in Prall-, Schlagmühlen zerkleinert wird. Bei der Zerkleinerung des Zuckers entstehen etwa 2 % amorpher Zucker bezogen auf das gesamte Mahlgut. (Beckett, 1999)

Der amorphe Zucker ist stark hygroskopisch, daher nimmt er schnell Wasser aus der Umgebung auf, bis er unter Wasserabgabe rekristallisiert. Das wird mit zunehmender Temperatur und Luftfeuchte beschleunigt. Außerdem nimmt amorpher Zucker Aromastoffe aus der Umgebung auf. Er hat eine höhere Löslichkeit, was für die Maillard-Reaktion zwischen Eiweißen des Kakaos, der Milchbestandteile und des Zuckers Bedeutung haben kann. (Beckett, 1999)

Wird Zucker zusammen mit den anderen Schokoladenrohstoffen gewalzt, nimmt der entstehende amorphe Zucker Aromastoffe auf und gibt diese bei Rekristallisation an die Schokolade ab. Er hat somit einen entscheidenden sensorischen Einfluss, so dass Variationen in der Zerkleinerung der Schokoladenmasse Veränderungen im Geschmack der Endmassen hervorrufen können. (Beckett, 1999)

Insgesamt betrachtet ist Saccharose ein Texturbildner und Trägerstoff für Aromastoffe. In der Schokolade überlagert sie bittere Geschmacksstoffe. (Beckett, 1999)

Milchzucker / Laktose

Laktose (Milchzucker) ist das charakteristische Kohlenhydrat der Milch. Abhängig von der Tierart beträgt der Laktosegehalt der Milch 1,5 – 9 %. (Finke, 1965) Laktose ist ein Disaccha-

rid, welches sich aus den Einzelmolekülen β -D-Galaktose und α/β -D-Glukose über eine β -1,4-glykosidische Bindung zusammensetzt. Milchzucker ist ein weiß bis hellgelbliches, kristallines, leicht süß schmeckendes Pulver. Insgesamt hat es nur ein Fünftel der Süßkraft von Saccharose. (Beckett, 1999)

Laktose gilt in Milkschokolade als Träger von Aromastoffen und als Geschmacksverstärker. Nach Scheruhn (2001) wird außerdem vermutet, dass Laktose an der Aromareaktion während des Conchierens beteiligt ist. Laktose kann aus Süß-, Sauermolke und Milchserum (Molke der durch Ultrafiltration das Protein entzogen wurde) gewonnen werden. (Kessler, 1996)

Abbildung 1 zeigt eine REM-Aufnahme von Laktosepartikeln und deren recht unterschiedliche Form.

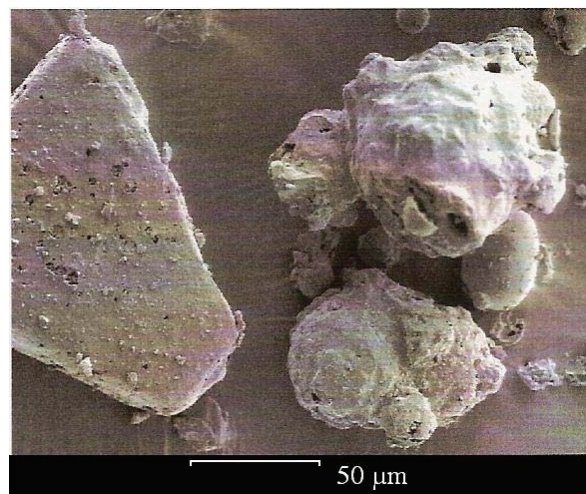


Abbildung 1: REM-Aufnahme von Laktose (Bühler AG, 2006)

Milchpulver

Milchpulver ist Milch, der das Wasser bis zu einer Höchstgrenze von 5 % Restfeuchte entzogen wurde. Milchpulver können auf zwei Arten unterteilt werden, nach den jeweiligen Ausgangsstoffen (u.a. Milchpulver, Joghurtpulver, Buttermilchpulver) und dem Fettgehalt (u.a. Voll-, Magermilchpulver, teilentrahmtes Milchpulver). Diese weisen abhängig von der Herstellungsart unterschiedliche Eigenschaften auf. (Spreer, 1995)

Für den Einsatz in Schokolade ist es wichtig, dass Milchpulver einen hohen Anteil an freiem Fett haben, da es in die Fettphase der Schokolade übergeht. (Finke, 1965) Sie werden hauptsächlich mit dem Walzen- und Sprühtrocknungsverfahren hergestellt. (Scheruhn, 2001)

Walzenmilchpulver haben insgesamt eine plättchen-, schuppenartige und längliche Form (Abbildung 2). Die bei der Sprühtrocknung entstehenden Milchkonzentratröpfchen hingegen haben eine runde, kugelartige Form (Abbildung 3). (Kessler, 1996)

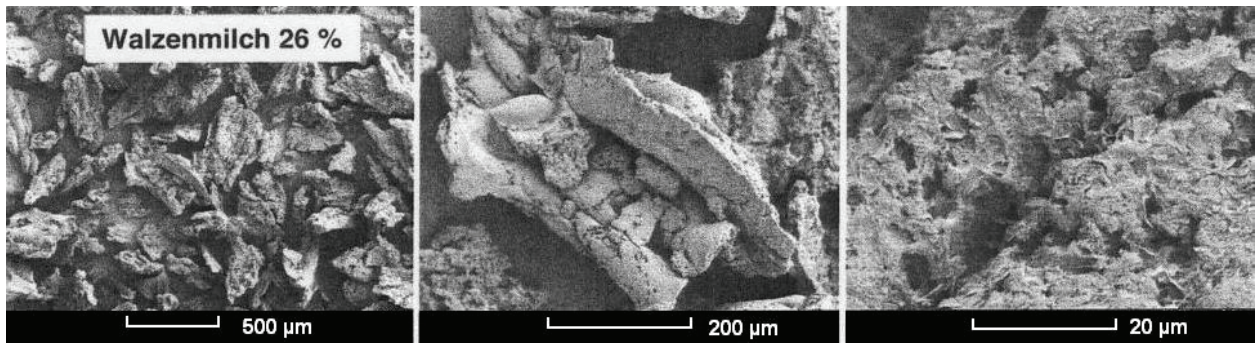


Abbildung 2: REM-Aufnahme von Walzenmilchpulver (Bühler AG, 2005)

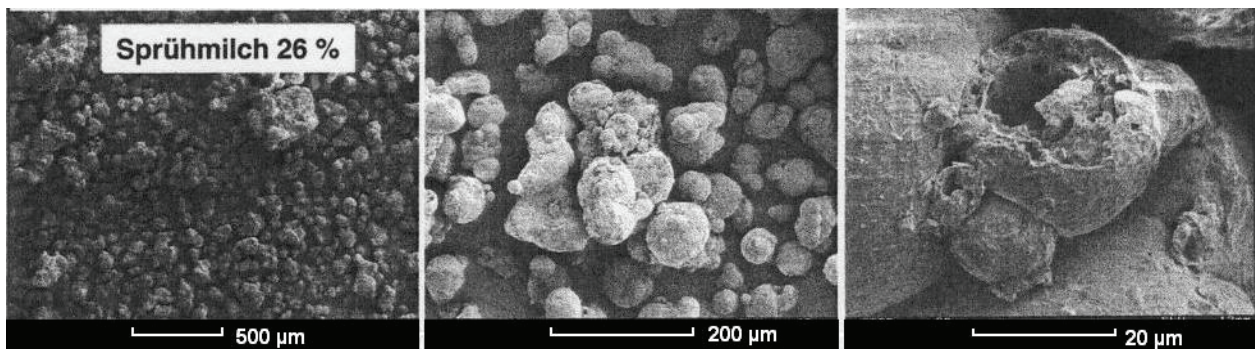


Abbildung 3: REM-Aufnahmen von Sprühmilchpulver (Bühler AG, 2005)

Die beiden Trocknungsprozesse bewirken unterschiedliche Eigenschaften der Milchpulver (Tabelle 1). Bei der Sprühtrocknung bildet sich eine Hülle um die feinen kugelförmigen Tröpfchen. Fett und Luft werden eingeschlossen, wodurch es zu der großen Schüttdichte, dem geringen Anteil an Freifett und der hellgelben Farbe kommt. (Scheruhn, 2001), (Spreer, 1995) Bei der Walzentrocknung liegen mehr als 80 % des Fettes frei vor und es erfolgt kein Einschließen von Luft, was die gelbliche Farbe und die geringe Schüttdichte erklärt. (Scheruhn, 2001) Nach Beckett (1999) scheint das Homogenisieren der Milch in der Vorbehandlung den Anteil des Freifettes bei Walzenmilchpulver zu erhöhen.

Tabelle 1: Unterschiede bei Sprüh- und Walzenvollmilchpulver (Scheruhn, 2001)

Merkmal	Sprühvollmilchpulver	Walzenvollmilchpulver
Gehalt an freiem Fett [%]	3 – 14	91 – 96
Schüttdichte [kg/m ³]	500 – 600	300 – 500
Partikelgröße [µm]	< 300	32 – 1000
Partikelform	poröse Kügelchen	Schuppen, Plättchen
Farbe	hellgelb	gelblich

Der Einsatz von Walzen- oder Sprühmilchpulver bei der Milkschokoladenherstellung hat Einfluss auf die Verarbeitungs-, Fließeigenschaften und die sensorische Qualität des Endproduktes. (Scheruhn, 2001) Im Gegensatz zur Walzentrocknung haben durch Sprühtrocknung gewonnene Erzeugnisse einen vorteilhafteren Geruch und Geschmack. (Wolf, 1987) Der Einsatz von Walzenmilchpulver bewirkt hingegen Energieeinsparung beim Kneten und Conchieren, da mehr freies Fett vorliegt und nur wenig Luft ausgetragen werden muss. Außerdem ist es möglich bei der Rohstoffdosierung weniger Kakaobutter einzusetzen, um eine Verbesserung der Rheologie der fertigen Schokoladenmasse zu erreichen. (Scheruhn, 2001)

Nach Bolenz et al. (2003) hat der Einsatz von Magermilchpulver zusammen mit Butterreinfett einen noch größeren Einfluss auf die Milkschokoladenherstellung im Vergleich zum Einsatz von Walzen- oder Sprühmilchpulver. Untersuchungen ergaben, dass bei gleichen Herstellvoraussetzungen und -bedingungen mit der Kombination von Magermilchpulver und Butterreinfett geringere Partikelgrößen, Viskositäten und Härten, sowie bessere Schmelzeigenschaften und ein besserer Ausdruck des Milcharomas erreicht werden. (Bolenz, et al; 2003)

Lecithin

In der EU gilt Lecithin als Lebensmittelzusatzstoff. In der Schokoladenindustrie ist Sojalecithin der gebräuchlichste Emulgator. (Scheruhn, 2001) Der Einsatz von Lecithin in der Schokoladenherstellung dient u.a. der Qualitätssteigerung mit dem Hauptziel die Viskosität und Fließgrenze zu verringern und gleichzeitig Kakaobutter einzusparen. Nach Scheruhn (2001) hat der Zusatz von 0,4 % Lecithin die gleiche Wirkung auf die Fließeigenschaften wie 3 bis 8 % Kakaobutter. Weitere Effekte des Lecithins sind die Stabilisierung der dispersen Verteilung der Feststoffe in der kontinuierlichen Fettphase, erhöhte Viskositätsstabilität bei hohen Temperaturen, erhöhte Wassertoleranz, größere Temperaturtoleranz beim Vorkristallisieren sowie bessere Textur und geringere Fettreifneigung im fertigen Produkt. (Scheruhn, 2001) Lecithin wird kurz vor dem Ende des Conchierprozesses, meist beim Übergang von der plastischen in die flüssige Conchierphase zugegeben. Ein früherer Zusatz hat negativen Einfluss auf den Energieeintrag und die Entfeuchtung der Masse beim Conchieren. (Scheruhn, 2001)

Vanille und Vanillin

Verwendet werden Vanille und Vanillin für die Aromatisierung von Schokolade und zur Geschmacksharmonisierung. Vanillin ist eine aromatische Verbindung und bei der Schokoladenproduktion ein Ersatzstoff für die preisintensive Vanille. Vanille enthält jedoch noch viele weitere Aromastoffe und chemische Verbindungen, was ein anderes Gesamtaroma in der

Schokolade erzeugt. Daher kann Vanillin kein vollständiger Ersatz für Vanille sein, jedoch ist es ein wirtschaftlich bedeutender Aromastoff. (Katzer, 2003)

2.2 Kurzüberblick 1SWV und 2SWV

Abbildung 4 gibt einen allgemeinen Eindruck der einzelnen Abläufe der Schokoladeproduktion im 1SWV und 2SWV. Deutlich wird der Unterschied im Einsatz des Zuckers als Kristall- und Staubzucker, sowie in den Zerkleinerungsstufen mit den Walzwerken.

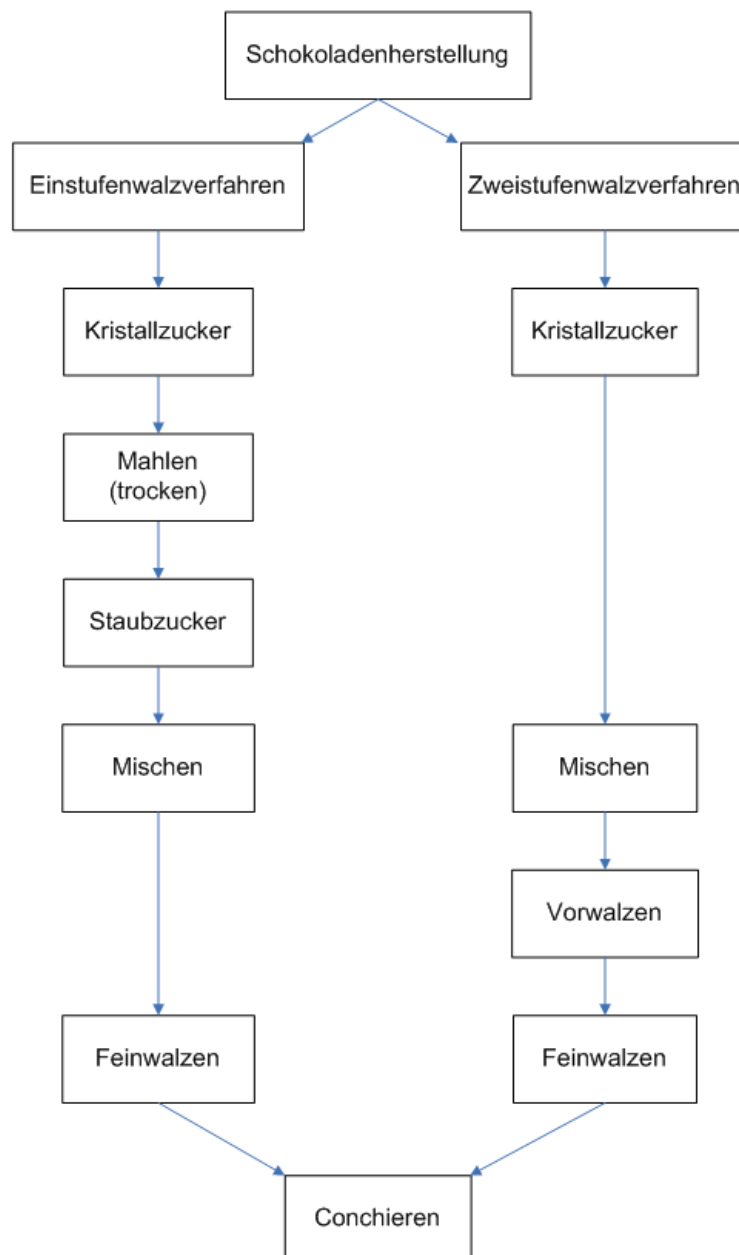


Abbildung 4: grobe Übersicht zum 1SWV und 2SWV

2.3 Mischer

2.3.1 Mischer im 1SWV und 2SWV der Fa. August Storck KG

Der Mischer stellt die erste Stufe im Herstellprozess von Schokolade im 1SWV sowie 2SWV dar. Im 2SWV der Fa. August Storck KG wird ein Mischer (Abbildung 5) der Fa. Bühler AG eingesetzt. Er eignet sich zum Vermischen von flüssigen und pulverförmigen Komponenten. Es handelt sich um einen Eintrogmischer, welcher aus zwei Ständern besteht, auf den der Mischertrog gebaut ist. In den Ständern befinden sich das Wellenlager und der Antrieb. Die Rohstoffe werden über die Einlaufplatte in den Mischertrog eingebracht, welcher für eine Heißwasserbeheizung doppelwandig ausgestattet ist. Die robusten Mischarme fördern das Mischgut nach außen, die Knetspirale streift die Trogwand ab und fördert das Mischgut in die Mitte. Der Austrag der Schokoladenmasse erfolgt durch den Auslaufschieber. (Bühler AG, 2005)

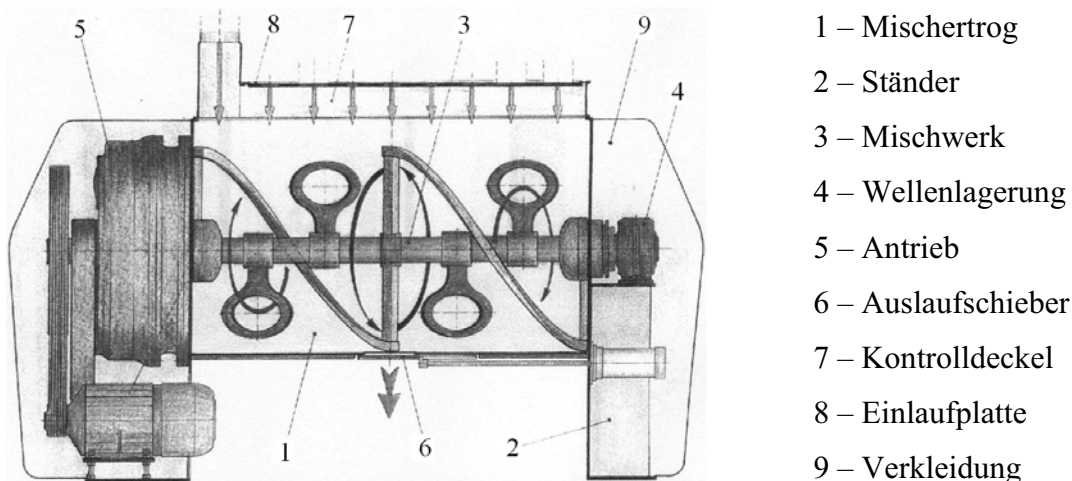


Abbildung 5: Schokolademischer der Fa. Bühler AG (Bühler AG, 2005)

Der Schokolademischer (Abbildung 6) der Fa. Richard Frisse GmbH, wird im 1SWV der Fa. August Storck KG eingesetzt. Er ist ein Doppeltrogmischer mit zwei nebeneinander laufenden Wellen. Die Mischwerkzeuge bewirken ein Pressen und Entspannen der Masse, so dass ein knetender Effekt entsteht. Der Energieeintrag dieses Mixers ist höher als der des Mixers vom 2SWV, wodurch er sich eher für Schokoladenansätze, die mehr Partikel enthalten, eignet. (Bühler AG, 2005)

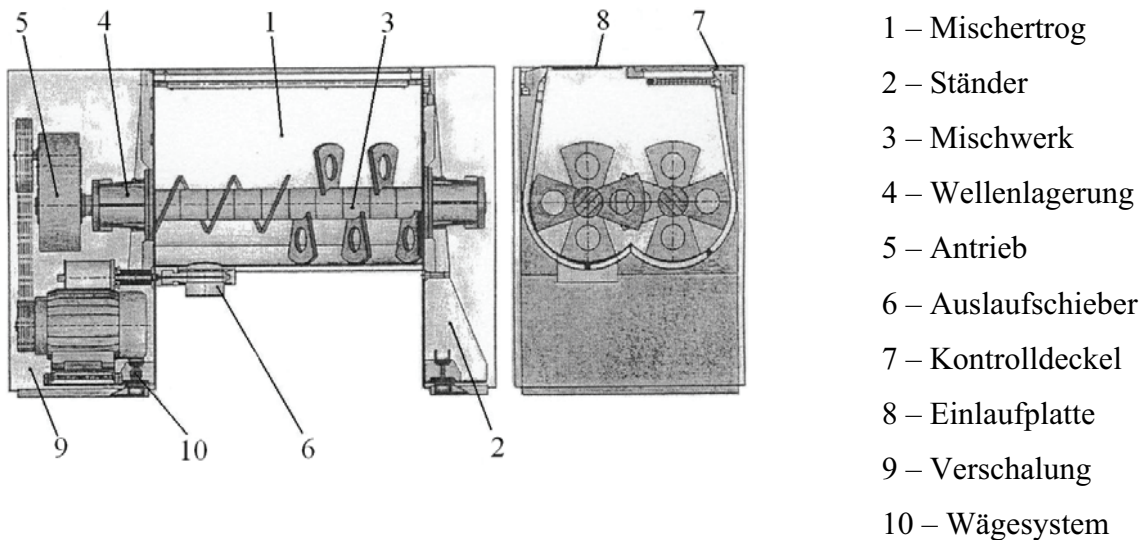


Abbildung 6: Schokolademischer der Fa. Richard Frisse GmbH (Bühler AG, 2005)

2.3.2 Möglichkeiten der Rohstoffdosierung in den Mischer

Die Rohstoffe werden entweder direkt in den Mischer oder in einen oder mehrere Vorbehälter dosiert. Werden die Rohstoffe direkt im Mischer abgewogen, sind finanzielle Einsparungen beim Gebäude, der Installation und der Steuerung möglich, da weniger Anlagenteile und auch weniger Platz benötigt wird. Jedoch erfordert die Dosierung mehr Zeit, bei gleichzeitiger Abnahme der Messgenauigkeit, da in diesem Fall nur eine Waage vorhanden ist. Es kann außerdem immer erst neu dosiert werden, wenn der Mischer entleert ist, was negative Auswirkungen auf die Leistung der Anlage hat. Beim Verwiegen der Rohstoffe in Vorbehältern erfolgt das Dosieren sehr genau, da sie mit Waagen ausgestattet sind. Während der Mischer arbeitet, kann in den Vorbehältern bereits ein neuer Rohstoffansatz dosiert werden. Nachteilig sind höhere Kosten für die Errichtung größerer Gebäude, sowie für Installation und Steuerung der Anlagen. (Bühler AG, 2005)

Um die Dosierzeiten bei geforderter Genauigkeit so kurz wie möglich zu halten, wird in Grob- und Feindosieren unterschieden. Angewendet werden bei Kakaomasse und Kakaobutter Leitungen mit unterschiedlicher Austragsleistung. Bei Milchpulver und Zucker wird die Zugabe über die Drehgeschwindigkeit von Tellerausgängen gesteuert. Es lassen sich insgesamt Genauigkeiten von 0,1 bis 0,2 % Abweichung, bezogen auf das Gesamtgewicht der Charge, erreichen.

Zum Feststellen der dosierten Menge ist der Mischer auf eine Waage gebaut. Eingesetzt werden dafür elektronische Druckmessdosen. Um beim Dosieren auf große Pumpen zu verzich-

ten, bietet es sich an, die Rohstoffe per Gravitation in den Mischer zu leiten. Üblicherweise werden erst die flüssigen und anschließend die pulverigen Komponenten in den Mischer gefüllt. Daraus resultieren eine bessere Mischung und kürzere Mischzeiten. (Bühler AG, 2005)

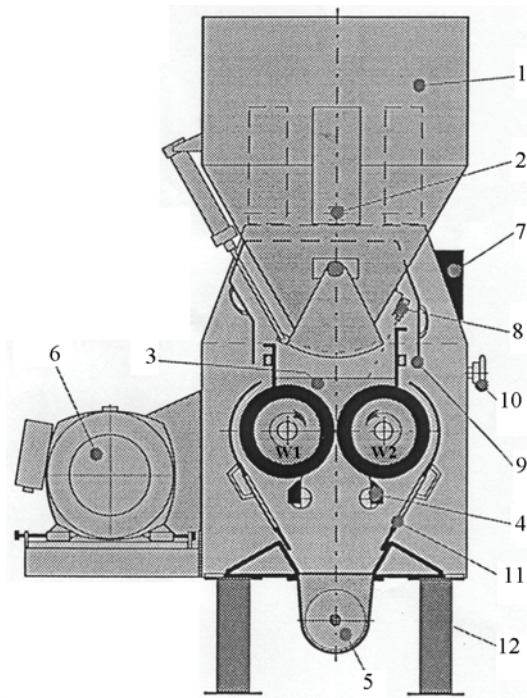
2.4 Vorwalzwerk

2.4.1 Aufbau und Parameter

Zweiwalzwerke bestehen im Allgemeinen aus einem Vorratsbehälter, zwei Walzen, zwei Abstreifmessern und einer Schnecke. Im 2SWV der Fa. August Storck KG wird ein Zweiwalzwerk (Abbildung 7) der Fa. Bühler AG eingesetzt.

Die Schokoladenmasse gelangt vom Mischer in den Vorratsbehälter der Vorwalze. An dem Vorratsbehälter ist zur Kontrolle des Inhalts eine Druckmessdose eingebaut, welche dessen Füllstand überwacht und automatisch regelt. Die sich auf den Walzen befindende Menge Schokoladenmasse wird mit einer Infrarotsonde gemessen und geregelt. Dafür öffnet sich die Dosierklappe elektropneumatisch. Der Öffnungswinkel der Dosierklappe kann der Rezeptur und somit der Konsistenz der Schokolade angepasst und die ausreichende Menge Schokoladenmasse auf den Walzen gewährleistet werden. (Bühler AG, 2005)

Im oberen Bereich der Walzen (Abbildung 7) sind zwei Keilspitzen angebracht, welche die Schokoladenmasse im Walzenspalt halten und deren Verlust durch Spritzen und Kleckern vermeiden. Die Walzen drehen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Durch das sich daraus ergebende Differential (Verhältnis der Drehgeschwindigkeiten von Walze 1 zu Walze 2) wird die Schokoladenmasse in den Walzenspalt eingezogen und durch den Druck und die auftretende Scherung zerkleinert. Nachdem die Schokoladenmasse den Walzenspalt passiert hat, wird sie mit den Abstreifmessern von den Walzen abgeschabt. Die vorgewalzte Masse fällt in die Schnecke, durch welche sie zum Transportband befördert und dabei homogenisiert und vermengt wird. (Bühler AG, 2005)



- 1 – Vorratsbehälter
- 2 – Wägekraftaufnehmer
- 3 – Einlauftrög mit Keilspitzen
- 4 – Abstreifer
- 5 – Homogenisierschnecke
- 6 – Antriebsmotor
- 7 – Bedienungstableau
- 8 – Niveau-Überwachung
- 9 – Schutzhaube
- 10 – Spalteinstellung
- 11 – Walzenverdecke
- 12 – Füße

Abbildung 7: Zweiwalzwerk der Fa. Bühler AG (Bühler AG, 2005)

2.4.2 Einfluss des Vorwalzens auf die Schokoladenmasse

Vorwalzwerke, die erste Stufe der Partikelzerkleinerung, werden nur im 2SWV der Schokoladenherstellung eingesetzt. Nach dem Mischen hat die Schokoladenmasse eine breite Partikelgrößenverteilung, aufgrund der unterschiedlichen Partikelgrößen der einzelnen Rohstoffe. Die Masse ist abhängig vom Fettgehalt, weich bis sehr weich. Bei der Vorwalze erfolgt nur die Zerkleinerung der Zuckerkristalle im Walzenspalt. Dieser Vorgang wird auch Kalibrieren genannt. Angestrebt werden Partikel mit der Größe von 100 bis 200 μm , abhängig von dem Differential des Fünfwalzwerks (Verhältnis der Drehgeschwindigkeiten von Walze 2 zu Walze 5), der Konsistenz, sowie der gewünschten Partikelgröße der Schokoladenmasse. Sie können über Spalt- und Druckeinstellung an der Vorwalze erreicht werden. Gleichzeitig werden Schwankungen des Verhältnisses zwischen Gehalt an freiem Fett zur vorhandenen Partikeloberfläche in den Rohkomponenten korrigiert. (Bühler AG, 2004)

Wird Schokoladenmasse mit einem kleinen Spalt bzw. einem hohen Druck vorgewalzt, so wird die Masse durch die Vorzerkleinerung feiner und trockener und umgekehrt. Die Konsistenz ergibt sich aus der enthaltenen Partikelmenge und deren Oberfläche, die mit Fett zu umhüllen ist. Die zerkleinerte Schokoladenmasse muss nach dem Vorwalzen ein gleichmäßiges Gefüge, optimale Plastizität haben und außerdem homogen sein, damit sie sich bei der weite-

ren Zerkleinerung auf den Feinwalzen gut verarbeiten lässt und der Einzug für die gewünschte Partikelgröße optimal ist. (Bühler AG, 2004)

2.4.3 Einsatz von Schlagmessermühlen anstatt eines Zweiwalzwerks

Je nach Verwendungszweck von gemahlenem Kristallzucker müssen unterschiedliche Kornspektren des Mahlgutes erreicht werden, wofür es verschiedene Mühlentypen gibt (Abbildung 8). (Menzel, 2006) Das jeweils erreichbare Korngrößenspektrum der einzelnen Mühlen ist aufgrund der Vielzahl von Mühlenparametern (z.B. Rotordrehzahl, Rotor-, Mahlrostkonstruktion, Siebgröße und Lochform) sehr breit. In den sich überschneidenden Korngrößensbereichen sind u.a. Energieverbrauch, Staubexplosionsgefahr oder Anlagengröße für die Wahl der Mühle entscheidend. (Menzel, 2006)

extrafein	fein	mittel	grob
		Walzenmühlen	
	Universalmühlen		
	Spaltnmühlen		
	Sichtermühlen		
1 µm	10 µm	100 µm	1 mm 10 mm

Abbildung 8: Einsatzbereiche, Mühlentypen für die Kristallzuckervermahlung (Menzel, 2006)

Bei der Schokoladeherstellung im ISVV der August Storck KG wird der Kristallzucker in einer Prallmühle (Abbildung 9) zu Staubzucker zerkleinert, die nach Abbildung 8 den Universalmühlen zuzuordnen ist. Diese Prallmühle besteht neben der eigentlichen Mühle aus einer Dosierschnecke und einem Luftansaugchalldämpfer. Die Dosierschnecke führt den Kristallzucker gleichmäßig in den Mahlraum. Der Luftansaugchalldämpfer mindert die Geräuschentwicklung und sorgt mit der Luft für die Kühlung des Mahlraums. Die Zuckervermahlung erfolgt, indem die Kristalle mit hoher Prallgeschwindigkeit auf eine Wand treffen. Haben die Partikel die nötige Partikelgröße erreicht, gelangen sie durch das in der Mühle eingebaute Lochsieb und werden mit einer Austragsschnecke abtransportiert. (Menzel, 2006) Das Lochsieb gibt die maximale Partikelgröße vor und hat Einfluss auf den Durchsatz. (Bauermeister Zerkleinerungstechnik GmbH, 2006)

Da Staubzucker stark hygroskopisch ist, würde er bei Lagerung schnell Wasser aufnehmen, verklumpen und für die Schokoladeproduktion unbrauchbar werden. (Menzel, 2006) Daher wird er nach dem Mahlen direkt in den Mischer geleitet.



Abbildung 9: Prallmühle zur Zuckermahlung (Bauermeister Zerkleinerungstechnik GmbH, 2006)

Abbildung 10 enthält eine REM-Aufnahme von Staubzucker und zeigt viele feine und große Partikel, was ein Zeichen für den breiten Korngrößenbereich dieser Mühle ist (Abbildung 8). Durch die starke Zerkleinerung des Kristallzuckers beim Vermahlen wird beim Vermengen der Rohstoffe im Mischer mehr Energie benötigt, um alle Partikel mit Fett zu umhüllen.

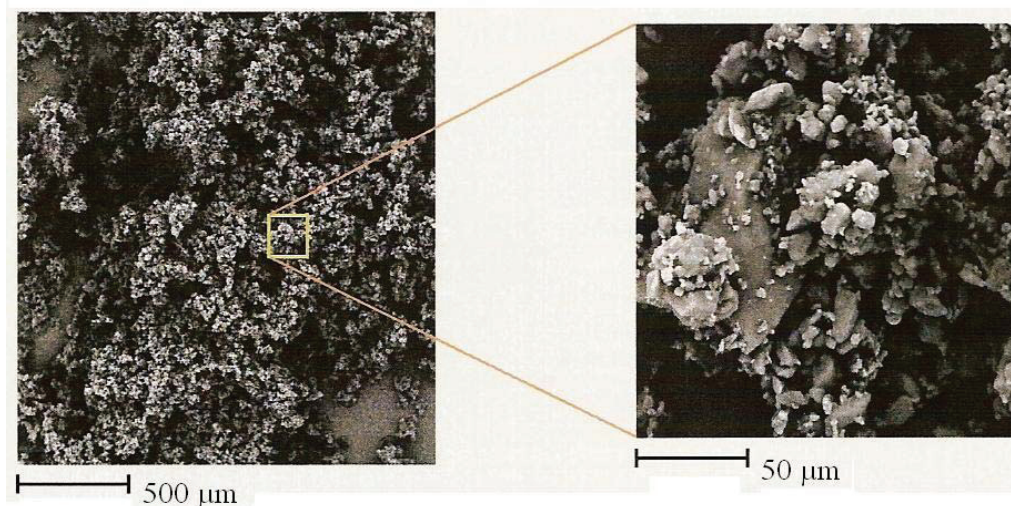


Abbildung 10: REM-Aufnahmen von Staubzucker (Bühler AG, 2006)

2.5 Feinwalzwerk

2.5.1 Aufbau und Parameter

Fünfwalzwerke bestehen aus fünf Walzen, mit vier sich dazwischen befindenden Walzenspalten. Sie werden im 1SWV und 2SWV eingesetzt, um die Partikel der Schokolademassen auf die gewünschte Partikelgröße zu zerkleinern.

In Abbildung 11 ist die Anordnung der einzelnen Walzen dargestellt. Die Drehgeschwindigkeiten der Walzen nehmen von Walze 1 bis 5 zu, wobei die Spalte zwischen den Walzen immer kleiner werden. Das Walzgut wird von unten nach oben gefördert, was durch die zunehmenden Umdrehungsgeschwindigkeiten und die daraus entstehende Scherung ermöglicht wird. Die Zerkleinerung der Partikel wird durch die Scherung und den vorherrschenden Druck ermöglicht. Die Temperatur der einzelnen Walzen steigt von Walze 1 bis 4. Es soll dadurch erreicht werden, dass es bei der Übergabe der Masse auf die nächste Walze nicht zu einer Streifenbildung kommt, was negative Auswirkungen auf die zu erreichende Partikelgröße hätte. Auf der Walze 5 ist die Temperatur wieder etwas geringer, da sich das Feinwalzgut so besser von der fünften Walze abstreifen lässt. Grund dafür ist, dass die Masse durch die geringere Temperatur nicht so weich ist und besser von der Walze abgezogen werden kann. Zwischen Walze 1 und 2 befindet sich die Einzugspassage, in welcher die gemischte (1SWV) bzw. vorgewalzte (2SWV) Schokoladenmasse aufgegeben und ein gleichmäßiger Schokoladenmassefilm auf den Walzen erzeugt wird. Dabei erfährt die Schokoladenmasse in diesem Spalt keine Zerkleinerung. Zwischen den Walzen 2 bis 5 befinden sich die Mahlspalte, wo die Partikelzerkleinerung erfolgt. (Bühler AG, 2005)

Beim Feinzerkleinern sollen optimal zerkleinerte Massen entstehen. Die dafür vorzunehmenden Einstellungen an den Feinwalzwerken beziehen sich auf die gewünschte Partikelgröße und die Konsistenz der Schokoladenmasse, wie sie auf die Einzugspassage gelangt. Mögliche Einstellungen sind das Differential (Verhältnis der Drehgeschwindigkeiten von Walze 2 zu Walze 5) bzw. die Breite des Walzenspalts der Einzugspassage (bei konstantem Differential), der Anpressdruck und die Temperatur der Walzen.

Das Differential ist für trockene Massen im Allgemeinen höher als für weiche. Trockene Massen werden schneller und weiche Massen langsamer in den Walzenspalt der Einzugspassage eingezogen. Über die Walzeinstellung soll gewährleistet werden, dass bei trockenen Massen insgesamt weniger, hingegen bei weichen Massen mehr Walzgut eingezogen wird. Es soll damit ein Ausgleich der Walzgutschichtdicke auf den einzelnen Walzen erreicht werden, um mit unterschiedlichen Konsistenzen gleiche Partikelgrößenverteilungen zu erreichen.

Die Schichtdicke des Walzguts auf den einzelnen Walzen lässt sich auch durch den Walzenspalt der Einzugs Passage (bei konstantem Differential während des Feinwalzens) beeinflussen. So ist der Spalt bei trockenen Massen kleiner und bei weichen Massen größer.

Der Einzug ändert sich weiterhin mit den Walzentemperaturen. Bei höheren Temperaturen sinkt der Einzug und umgekehrt. Das liegt am Verhalten des Fettes, so dass bei höheren Temperaturen die Schokoladenmasse weicher ist und der Einzug sich verlangsamt und umgekehrt. (Bühler AG, 2006)

Insgesamt werden mit den verschiedenen Einstellungen an den Feinwalzwerken Konsistenzschwankungen in der Schokoladenmasse ausgeglichen und ein gleichmäßiger Durchsatz pro Stunde, sowie eine einheitliche Produktion erreicht. (Bühler AG, 2004)

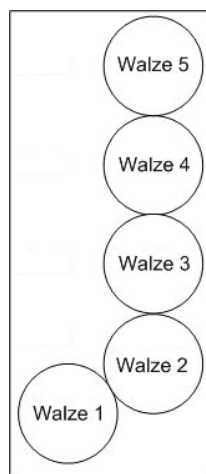


Abbildung 11: Anordnung der Walzen eines Fünfwalzwerks

2.5.2 Einfluss des Feinwalzens auf die Schokoladenmasse

Die Schokoladenmasse ist, wenn sie auf die Fünfwalzwerke gelangt, lehmig, knetbar und bei gleichem Fettgehalt je nach Vorzerkleinerung mehr oder weniger feucht. Sie hat beim 1SWV und 2SWV eine maximale Partikelgröße von 100 bis 200 μm . Die Vorzerkleinerung ist möglichst konstant zu halten. Grund dafür ist, dass das Differential des Fünfwalzwerks auf die Partikelverteilung und Plastizität des Walzguts vor der Feinzerkleinerung abgestimmt ist. Damit soll der Einzug der Masse für die angestrebte Größe der Partikel optimal sein. Korrekturmöglichkeiten sind in der Spalteinstellung der Einzugs Passage oder Drehgeschwindigkeit der zweiten Walze vornehmbar. (Bühler AG, 2004)

Auf den Walzen des Fünfwalzwerks wird die Schokoladenmasse durch die vorherrschende Scherung und den Druck als dünner Film übertragen und zunehmend zerkleinert, so dass sich

die Oberfläche der Partikel in diesem Prozess stark vergrößert. Der Massefilm und die Partikel der Schokoladenmasse sollen auf der fünften Walze nur noch die Dicke der gewünschten Partikelgröße haben. (Bühler AG, 2004)

Beim Abstreifen fällt das Walzgut als Krümel und Pulver von der Walze ab. Die einzelnen Walzgutstücke sind nach der Zerkleinerung sehr zerfurcht und porös. Auf Grund der großen Oberfläche der enthaltenen Partikel sind die Kakaobutter und das Fett in den Spalten verschwunden. Sie können die vielen kleinen Partikel, die durch das Walzen eher eine flache und längliche Form aufweisen, nur teilweise umhüllen. (Bühler AG, 2004)

In Abbildung 12 ist Schokoladenmasse nach dem Feinwalzen dargestellt. Es ist die pulverige, krümelige Struktur gut zu erkennen. Außerdem zeigt eine REM-Aufnahme des Feinwalzgangs die poröse und stark zerfurchte Oberfläche. Die enthaltenen Partikel sind stark zerkleinert.



Abbildung 12: Schokoladenpulver und REM-Aufnahme von Feinwalzgut (Bühler AG, 2006)

2.6 Conche

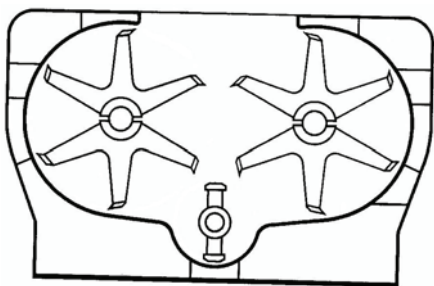
Das Conchieren ist ein Prozess zur Veredelung der Schokoladenmassen. Das traditionelle Conchiervorgehen besteht aus drei Phasen, die Trocken-, Plastifizier- und Flüssigphase. Es erfolgt dabei eine mechanische und thermische Behandlung der Schokoladenmasse, bei der chemische und physikalische Vorgänge ablaufen. Diese sind u.a. die Aromaveredelung, Entfeuchtung und Entgasung. Unerwünschte, herbbittere, adstringierende Aromastoffe werden entfernt. Weiterhin wird das trockene Walzgut fließfähig, da die Feststoffteilchen vollständig mit Fettkomponenten umhüllt werden. (Drouven, Fabry, Göpel, 1996)

Es gibt verschiedene Arten von Conchen. Sie unterscheiden sich im Aufbau, der Größe und Energieeintrag in die Schokoladenmasse. Eine von den häufig eingesetzten Arten, wie auch im 2SWV der Fa. August Storck KG ist die Conche der Fa. Thouet KG. Sie (Abbildung 13,

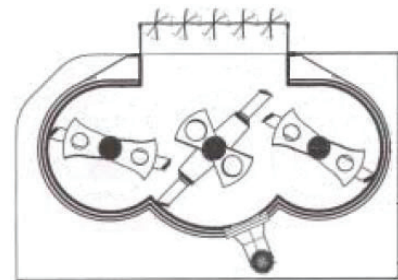
links) besteht sie aus einem horizontalen Behälter mit zwei Conchierelementen. Diese sind ausgerüstet mit Schaufeln, Abstreifern und Querverstrebungen. (Drouven, Fabry, Göpel, 1996) Die äußeren Tröge mit zugehörigen Conchierelementen sind groß, erzeugen Scherkräfte und dienen dem Conchierprozess. Der kleine mittlere Trog dient nur dem Massetransport. Die Conchierelemente und das Mischelement werden getrennt angetrieben. In dieser Conche wird ein intensives Trockenconchieren erreicht. (Beckett, 1990)

Eine weitere Ausführung von Conchen ist die Conche der Fa. Richard Frisse GmbH (Abbildung 13, rechts), eingesetzt im ISWV der Fa. August Storck KG. Verglichen mit der Thouet-Conche sind die Conchenarme Frisse-Conche der anders angeordnet. Die beiden äußeren Tröge haben einen kleineren Durchmesser als der Innere. Beim Drehen der Conchenarme entstehen Zonen mit hohem Schereffekt in der Masse und an der Wandung.

Bei beiden Conchenarten unterscheidet sich der Energieeintrag in die Schokoladenmasse. (Beckett, 1990)



Conche, Fa. Thouet KG (Beckett, 1990)



Conche, Fa. Richard Frisse KG (Beckett, 1990)

Abbildung 13: eingesetzte Conchen der Fa. August Storck KG

Abbildung 14 zeigt eine REM-Aufnahme von Schokoladenmasse nach beendetem Conchieren. Die enthaltenen Partikel sind kleiner als 50 µm.

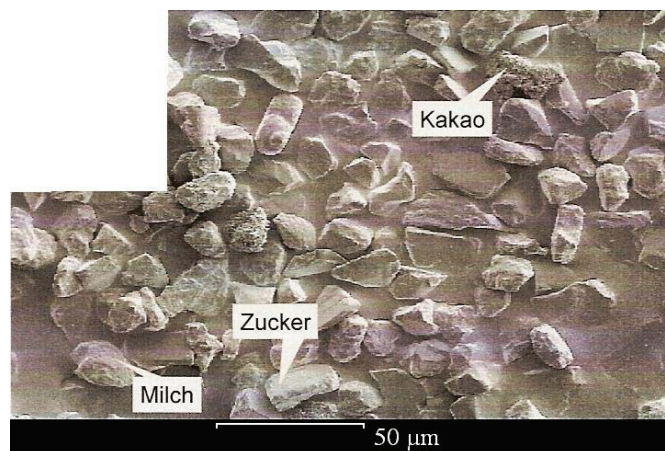


Abbildung 14: conchierte Schokoladenmasse entfettet und getrocknet (Bühler AG, 2006)

3 Material und Methoden

3.1 Herangehensweise und Versuchsplanung

Die Anlagen für das 1SWV und 2SWV der Fa. August Storck KG befinden sich in verschiedenen Werken an zwei Standorten in Berlin. Für den Vergleich der Prozesse ist es wichtig die gleiche Schokoladenmasse in beiden Anlagen zu untersuchen, was in diesem Fall nicht ohne größeren Aufwand möglich war, da keine Schokoladenmasse in beiden Werken produziert wird. So wurden zunächst Vollmilchschokoladen mit ähnlichen Rohstoffen ausgewählt. Diese sind die VMC im 1SWV und die VMB im 2SWV. Von diesen Massen wurden jeweils drei komplette Probereihen für die Untersuchungen herangezogen. Zusätzlich sind jeweils einmal die VMC im 2SWV und die VMB im 1SWV hergestellt und untersucht worden.

In Tabelle 2 sind die einzelnen Rohstoffe der beiden Massen VMC und VMB dargestellt. Zu sehen ist, dass bei VMC nur eine und hingegen bei VMB drei Kakaomassen in einem bestimmten Verhältnis eingesetzt werden.

Tabelle 2: Rohstoffe von VMC und VMB

Rohstoffe	VMC	VMB
Kakaomassen	1 Kakaomasse	3 Kakaomassen
Milchpulver	Walzenmilchpulver Sprühmilchpulver-VMC	Walzenmilchpulver Sprühmilchpulver-VMB
Zusatzstoff	Lecithin Vanillin	Lecithin Vanillin
Zucker	Laktose Kristallzucker	Laktose Kristallzucker
Fett	Kakaobutter	Kakaobutter

Aus der ähnlichen Rohstoffzusammensetzung der VMB und VMC ergeben sich zusätzlich noch Ähnlichkeiten im Fett-, Milchfett-, Wasser- sowie Laktose- und Saccharosegehalt. Die Vorgaben für die Partikelgrößenbestimmung mittels Nasssiebung und für die Viskosität liegen ebenfalls im gleichen Bereich mit identischen Grenzwerten.

Die Abbildung 15 (Seite 25) und Abbildung 16 (Seite 26) zeigen die Hauptverfahrensschritte des 1SWV und 2SWV. Zusätzlich sind die Probenahmestellen gekennzeichnet, welche die Rohstoffe, die einzelnen Prozessstufen und die Endmasse einschließen. Dabei fand Beach-

tung, dass immer Rohstoffe von den gleichen Lieferanten für die Herstellung der einzelnen Schokolademassen zum Einsatz kamen. Es wurden nur partikelenthaltende Rohstoffe in Betracht gezogen, da diese bei der Zerkleinerung verändert werden.

Die Probenziehung von den Feinwalzwerken bei VMB und VMC erfolgte zu verschiedenen Zeitpunkten des Feinwalzens (Abbildung 17, Seite 27). Diese sind beim Start des Feinwalzens nach etwa einer bis zwei Minuten, beim laufenden Walzprozess nach einer Stunde und am Ende des Walzprozesses, kurz bevor die Trockenlaufsicherung die Walze stoppt. Bei allen Zeitpunkten wurden die Proben links, in der Mitte und rechts von der fünften Walze abgenommen. Außerdem wurde auch jeweils von dem Transportband eine Probe genommen.

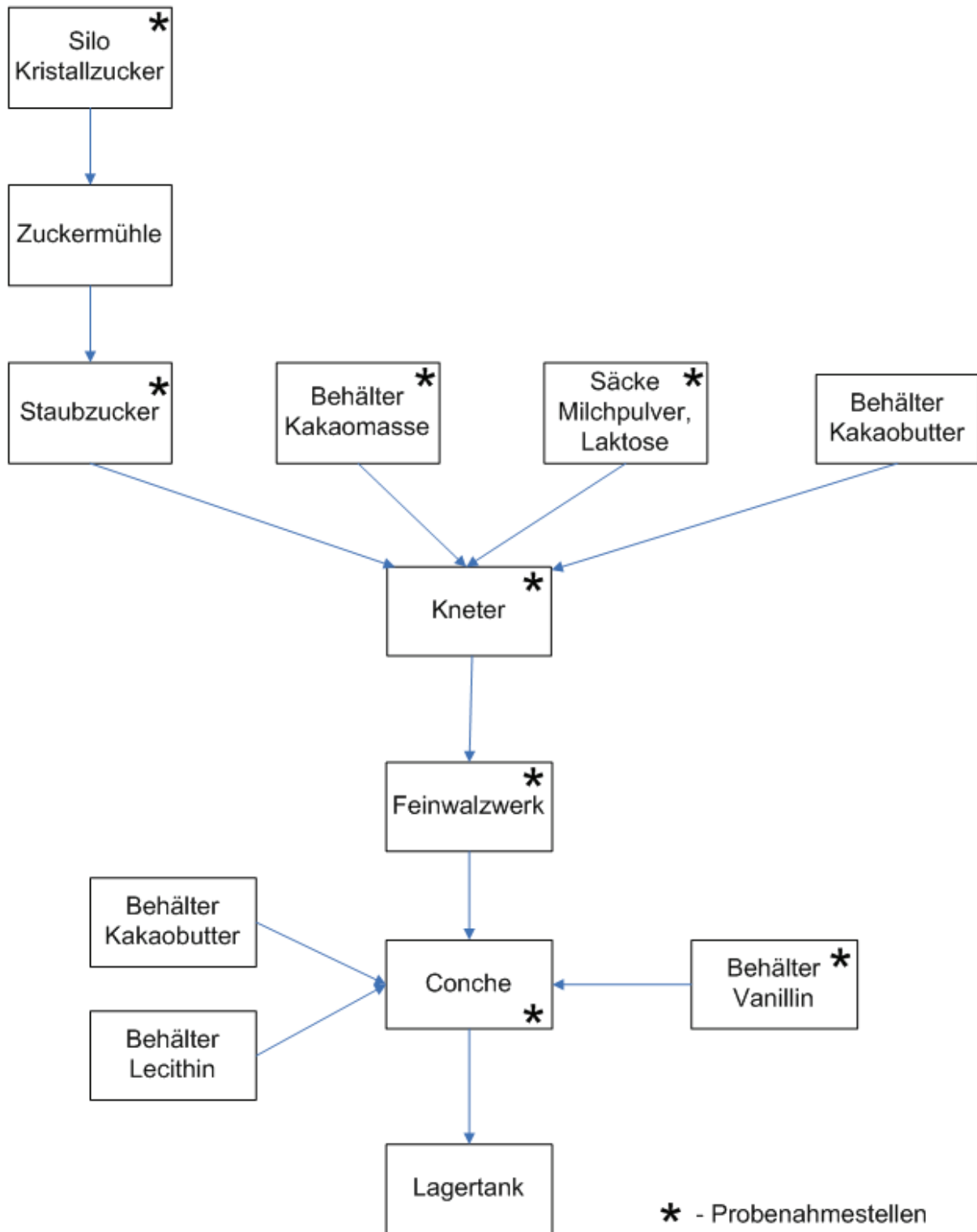


Abbildung 15: Probenahmestellen in den Prozessstufen des 1SWV

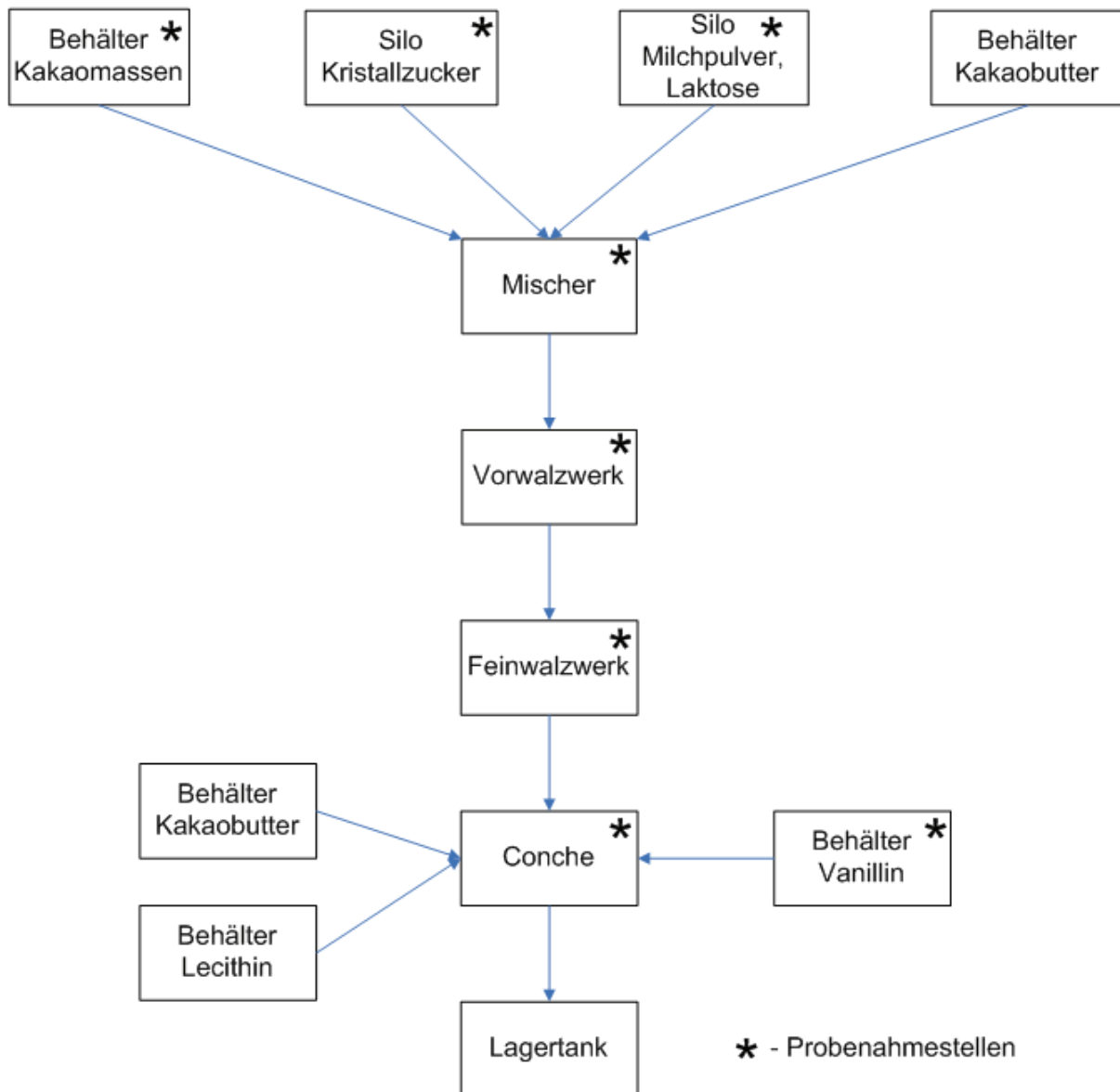


Abbildung 16: Probenahmestellen in den Prozessstufen des 2SWV

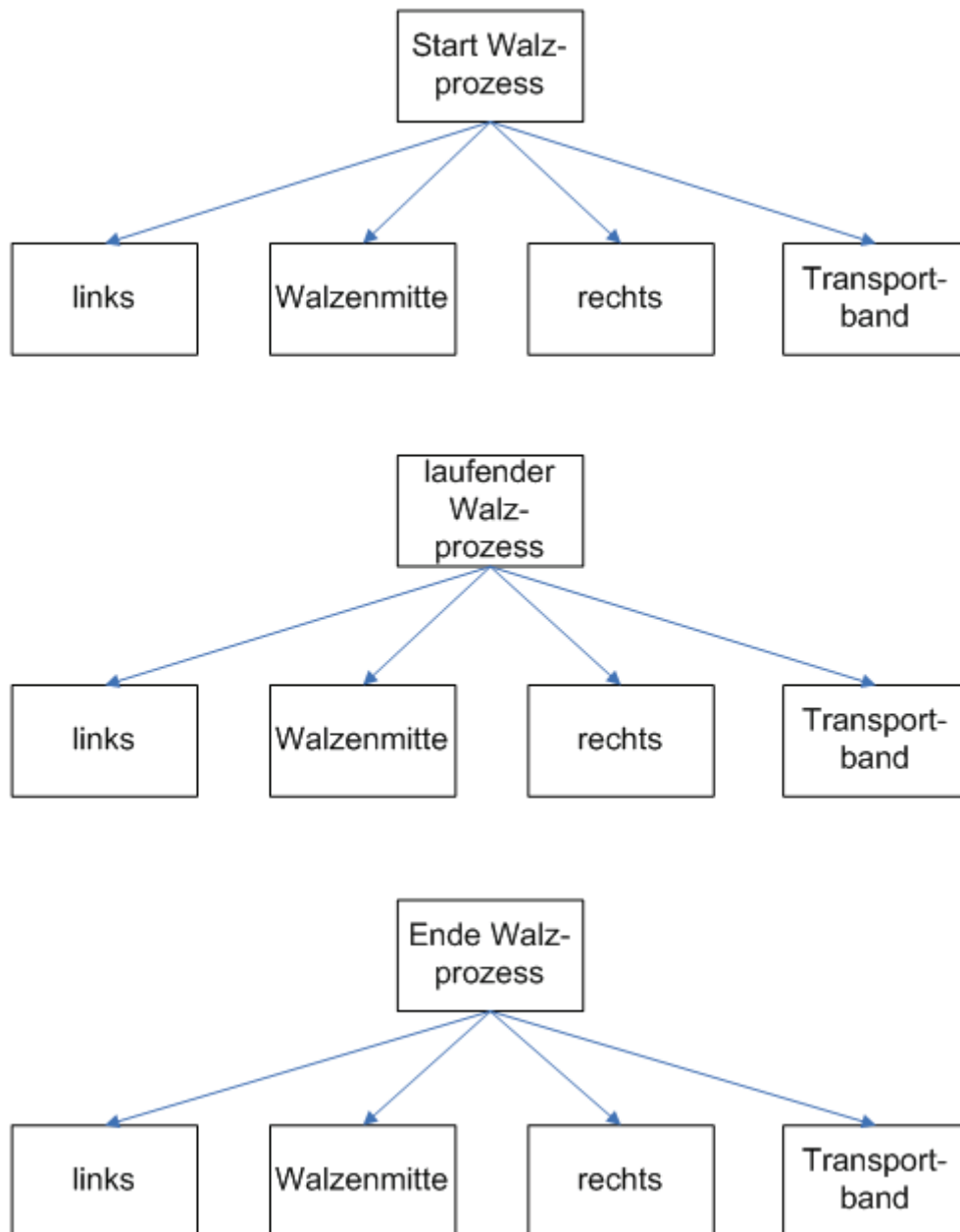


Abbildung 17: Probenahmestellen und -zeiten des Feinwalzprozesses im 1SWV und 2SWV

3.2 1SWV und 2SWV der Fa. August Storck KG

3.2.1 Fließschema, Parameter des 1SWV am Beispiel der VMC

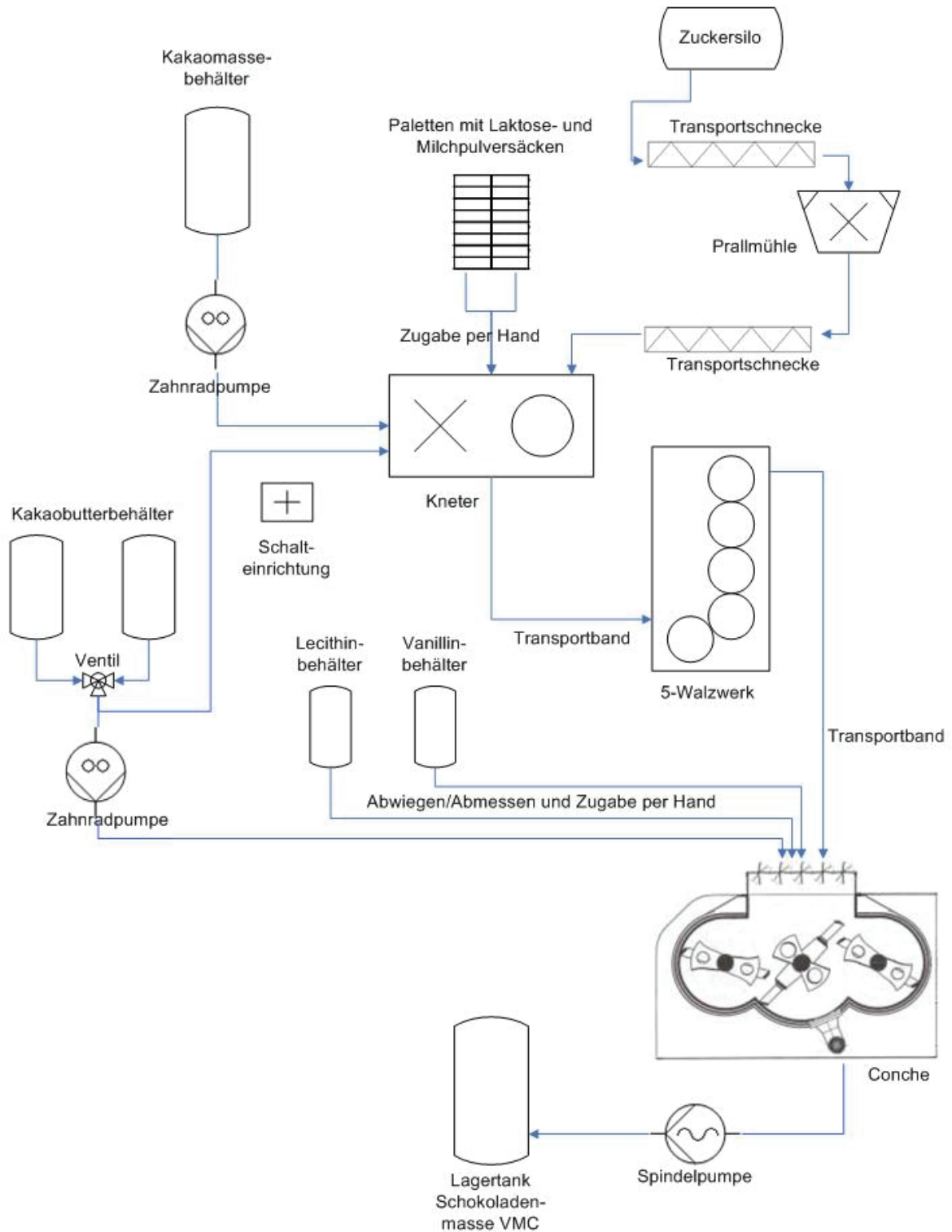


Abbildung 18: Fließschema des 1SWV am Beispiel der VMC

3.2.2 Charakterisierung des 1SWV am Beispiel der VMC

Die für die Herstellung von Schokolade benötigten Rohstoffe werden mit Tanklastzügen angeliefert und in Silos bzw. Behältern gelagert.

Der Schokoladenherstellprozess des 1SWV (Abbildung 18) beginnt mit dem Mischen und Kneten der Rohstoffe. Die Kneten werden am Anfang mit allen grundlegenden Rohstoffen befüllt. Bei der VMC wird im weiteren Verlauf der Herstellung ein Kneten gefüllt, während parallel der zweite leer fährt.

Bei der Herstellung der VMC wird die Rohstoffdosierung mit der Kakaomasse begonnen. Diese wurde bereits vor der Andienung petzomiert. Sie wird vom Kakaomassebehälter mit Zahnradpumpen ohne Unterscheidung in Grob- und Feindosierung in den Kneten gefördert. Dann erfolgt die Zugabe des Staubzuckers. Der für die Herstellung von Staubzucker verwendete Kristallzucker befindet sich im Zuckersilo und wird mit einer Schnecke in die Prallmühle gefördert, wo er vermahlen wird. Der anschließende Austrag des Staubzuckers erfolgt mit zwei Transportschnecken. Der Staubzucker wird direkt nach der Zerkleinerung in den Kneten geführt. Mit der Staubzuckerzugabe fängt der Kneten an die Rohstoffe zu mischen und zu kneten. Das ist besonders wichtig, für die sofortige Verteilung des Staubzuckers, um eine Wasseraufnahme möglichst zu verhindern. Anschließend erfolgt die Zugabe von Sprüh-, Walzenmilchpulver und Laktose bei laufendem Kneten. Für die Zugabe der Milchpulver und der Laktose werden die Säcke geöffnet und von der Palette direkt per Hand in den Kneten geschüttet. Das Kneten bewirkt die Vermischung der Rohstoffe. Zuletzt wird bei laufendem Kneten Kakaobutter dazudosiert. So können alle Partikel mit Fett umschlossen werden und die Masse wird walzfähig. Nach Beendigung des intensiven Vermischens der Rohstoffe, bedingt durch die große Oberfläche des Staubzuckers, erfolgt der Austrag der Masse aus dem Kneten.

Mit einem Transportband gelangt die Masse in den Vorbehälter des Feinwalzwerks. Die Schokoladenmasse wird vom Vorbehälter des Fünfwalzwerks nach und nach auf die Einzugs- passage gegeben und von dort in den ersten Walzenspalt eingezogen. Bei dem Feinwalzwerk erfolgt die Regelung der erreichten Partikelgrößen manuell über das Differential. Das Erreichen der angestrebten Schichtdicke auf Walze 5 wird während der Produktion mit einer Mikrometerschraube kontrolliert, um sicherzustellen, dass die Masse einheitlich zerkleinert wird. Der Feinwalzvorgang wird durch das Abstreifen der Masse von der 5. Walze beendet. Es gelangt als Pulver auf das Transportband.

Mit dem Transportband wird die feingewalzte Masse in die Conchen gefördert. Bereits während der Conchenbefüllung, beginnt der Prozess der trocknen Phase. Dabei ist der Verschluss der Conche geöffnet. Das Walzgut wird nach und nach in die bereits laufende Conche geführt.

Somit erfährt das Walzgut, welches zu Beginn der Conchierung in die Conche gefahren wird eine wesentlich intensivere Scherung, Entfeuchtung und Entgasung, als das letzte Walzgut. Für den Übergang in die plastische Phase wird Kakaobutter in die Conche dosiert, wofür die benötigte Menge mit einer so genannten Butteruhr manuell eingestellt und dann mit einer Zahnradpumpe in die Conche geleitet wird. Während der Kakaobutterzugabe drehen sich die Conchenarme mit identischer Geschwindigkeit in die gleiche Richtung weiter. Direkt im Anschluss an die Kakaobutterzugabe erfolgt der Übergang in die Flüssigconchierphase, zu dem Vanillin und Lecithin per Hand abgewogen und in die Conche gegeben werden. Dann werden die Lamellen der Conche geschlossen. Mit Beginn der flüssigen Phase drehen die Rührer in der Conche entgegengesetzt mit konstanter Geschwindigkeit. Der gesamte Conchierprozess verläuft bei konstanter Temperatur. Nachdem der Conchiervorgang beendet ist, wird die fertige Masse mit einer Spindelpumpe aus der Conche in den Lagerbehälter gepumpt und dort bis zur weiteren Verarbeitung gelagert.

3.2.3 Fließschema, Parameter des 2SWV am Beispiel der VMB

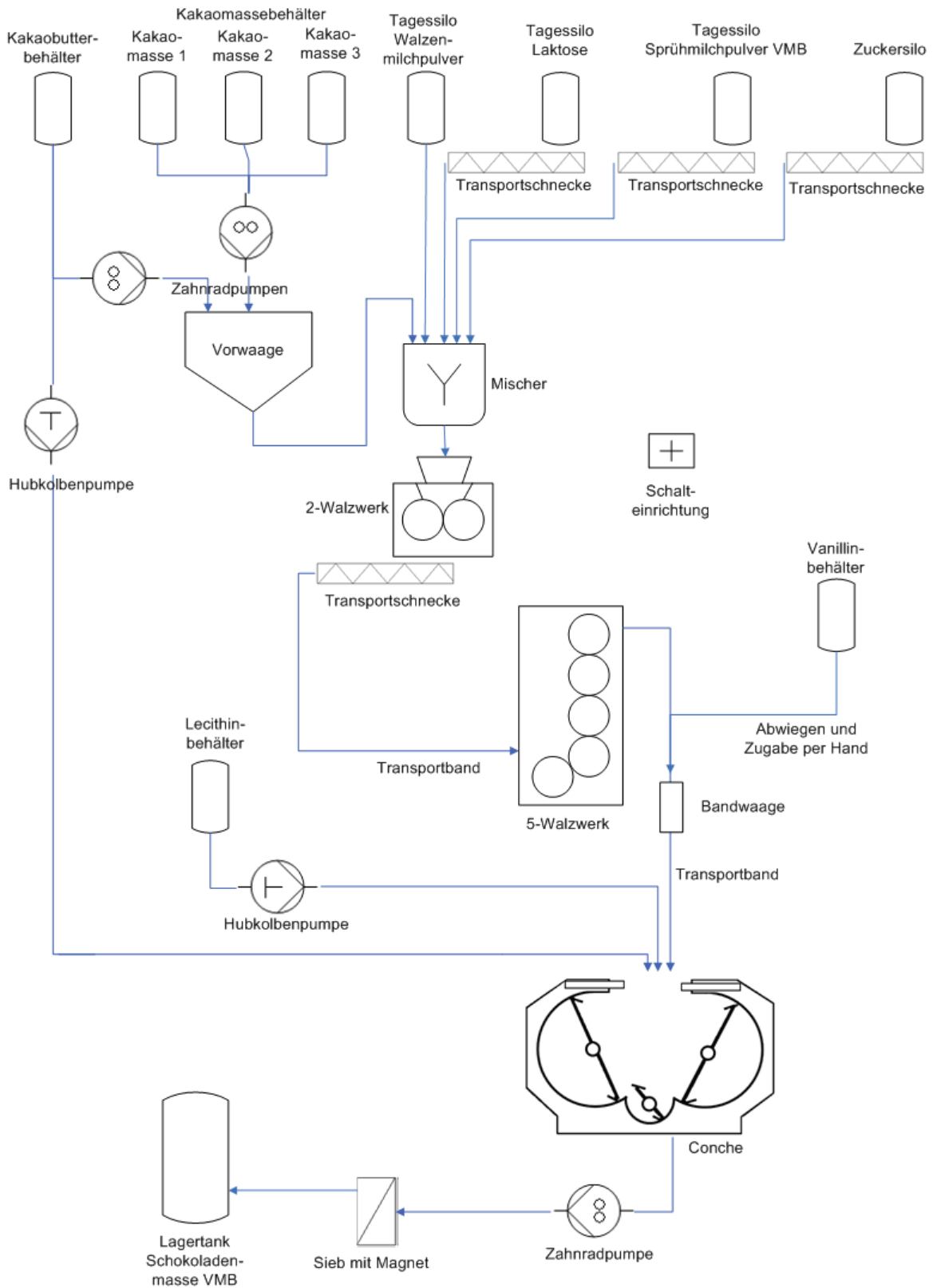


Abbildung 19: Fließschema des 2SWV am Beispiel der VMB

3.2.4 Charakterisierung des 2SWV am Beispiel der VMB

Die Rohstoffe werden von Tanklastzügen in Behältern, Säcken und Kartons angeliefert.

Bevor die Milchpulver und Laktose in der Produktion eingesetzt werden können, werden sie in einer Schüttstation in die Tagessilos eingefüllt. Dazu werden die Säcke per Hand geöffnet, in die Schütter entleert und pneumatische in die Tagessilos gefördert.

Die Schokoladenproduktion des 2SWV (Abbildung 19) beginnt beim Mischer. In diesen werden die grundlegenden Rohstoffe eindosiert. Die flüssigen Rohstoffe Kakaobutter und die drei Kakaomassen werden als erstes in den Mischer geleitet. Jedoch werden sie im Vorfeld in eine Vorwaage dosiert.

Bei der Dosierung der Kakaomassen und Kakaobutter in die Vorwaage erfolgt der Einsatz von Grob- und Feindosierung. Das Wiegen der dosierten Menge erfolgt mit elektronischen Druckmessdosen. An das Dosieren der Rohstoffe schließt die Entleerung der Vorwaage in den Mischer an. Dies erfolgt über ein Ventil, verläuft gravimetrisch und wird mit dem Schließen des Ventils beendet. Es wird sofort ein neuer Ansatz Kakaomasse und Kakaobutter in die Vorwaage dosiert.

In den Mischer werden anschließend die weiteren Rohstoffe dazudosiert. Begonnen wird mit dem Walzenmilchpulver. Die Zugabe erfolgt mit einem Tellerzugang von dem Tagessilo. Das Walzenmilchpulver wird direkt gravimetrisch in den Mischer geleitet. Bei dem folgenden Sprühmilchpulver-VMB und der Laktose gibt es einen Schneckentransport vor dem Tellerzugang, weil dieses Tagessilo zu weit von dem Mischer entfernt ist. Durch die Entfernung kann es nicht direkt gravimetrisch in den Mischer dosiert werden. So erfolgt der Transport mit einer Schnecke bis zu dem Punkt wo der gravimetrische Austrag möglich ist. Der Kristallzucker gelangt ebenfalls über eine Transportschnecke und anschließendem Tellerzugang vom Silo in den Mischer. Es gibt bei dem Walzen-, dem Sprühmilchpulver-VMB, der Laktose und dem Kristallzucker ebenfalls eine Unterscheidung in Grob- und Feindosierung, die über die Drehbewegung der Tellerzüge geregelt ist. Bei der Grobdosierung läuft das Rührwerk des Mixers. Dadurch sollen die Rohstoffe bereits verteilt und vermischt werden. Außerdem wird die Bildung eines Feststoffhaufens auf dem Mischerboden verhindert. Bei der anschließenden Feindosierung steht der Rührer, um Schwankungen beim Wiegen zu verhindern und die nötige Genauigkeit zu erreichen. Das Wiegen erfolgt beim Mischer mit elektronischen Druckmessdosen. Nachdem die Rohstoffe dosiert sind, folgen der Mischprozess und der daraufhin anschließenden Austrag der Schokoladenmasse in den Vorbehälter des Zweiwalzwerks. Ist der Mischer leer, schließt sich das Ventil und die bereits fertig vorgewogene Menge

Kakaomasse und Kakaobutter für die nächste Charge werden aus der Vorwaage in den Mischer geleitet.

Vom Vorratsbehälter des Zweiwalzwerks gelangt die Schokoladenmasse auf die Walzen. Das Zweiwalzwerk stellt nun die erste Stufe im Herstellprozess dar, bei der eine Partikelzerkleinerung erfolgt. Die Masse geht durch den Walzenspalt hindurch und wird dann mit einer Schnecke zum Transportband geführt und homogenisiert. Mit dem Transportband gelangt die Schokoladenmasse in die Vorratsbehälter der Feinwalzwerke.

Von den Vorbehältern gelangt die Schokoladenmasse auf die Einzugspassage der Feinwalzwerke. Die erreichte Partikelgröße wird hauptsächlich über Spalteinstellung zwischen Walze 1 und 2 geregelt. Die Schichtdicke auf der Walze 5 wird mit Mikrometerschrauben kontrolliert. Das Feinwalzgut wird nach dem Abstreifen von den Feinwalzwerken mit einem Transportband zu den Conchen geführt.

Die sich auf dem Transportband befindende Menge Feinwalzgut wird mit einer Bandwaage bestimmt. Sie besteht im Wesentlichen aus einer Rolle, auf der das Transportband entlang läuft. Befindet sich Feinwalzgut auf dem Transportband wird es von der Rolle durch das Gewicht erfasst. Mit Hilfe der Gewichtserfassung können die Conchen automatisch und direkt aneinander anschließend befüllt werden. Das Befüllen der einzelnen Conchen erfolgt über ein langes Transportband und wird mit Schiebern geregelt.

Der Conchiervorgang beginnt erst nachdem die Conche vollständig befüllt wurde. Jedoch zählt die Conchierdauer bereits ab dem Start des Büllens der Conche. Es wird dadurch erreicht, dass das gesamte Walzgut eine feste Zeit zum Entfeuchten und Entgasen hat. Bei der Trockenconchierphase kommt es durch die Scherung und den Kontakt mit den beheizten Wänden zu einer Erwärmung der Masse. Diese Temperatur wird bis kurz vor dem Ende der Trockenconchierphase gehalten und anschließend erneut leicht erhöht. Als Übergang von der Trockenconchier- in die Plastifizierphase werden ein Teil der Kakaobutter und des Lecithins mit Hubkolbenpumpen in die Conche dosiert. Im zweiten Teil der Plastifizierphase wird die Schokoladenmasse abgekühlt. Mit der Zugabe des zweiten Teils Kakaobutter und Lecithin wird der Übergang in die flüssige Conchierphase erreicht. Gefördert werden Kakaobutter und Lecithin ebenfalls mit Hubkolbenpumpen. Nachdem die Flüssigphase abgeschlossen ist, wird die fertige Schokoladenmasse in einen Lagerbehälter gepumpt. Dafür muss die Masse ein Sieb passieren, welches über einen Magnet metallische Fremdstoffe zurückhalten soll. Im Lagerbehälter wird die Masse bis zur Weiterverarbeitung gelagert.

3.3 Analytische Methoden

3.3.1 Partikelform mittels Rasterelektronenmikroskop

Elektronenrastermikroskope dienen der Vergrößerung von Objekten zur Oberflächenstrukturanalyse. Abbildung 20 zeigt den inneren Aufbau eines REM.

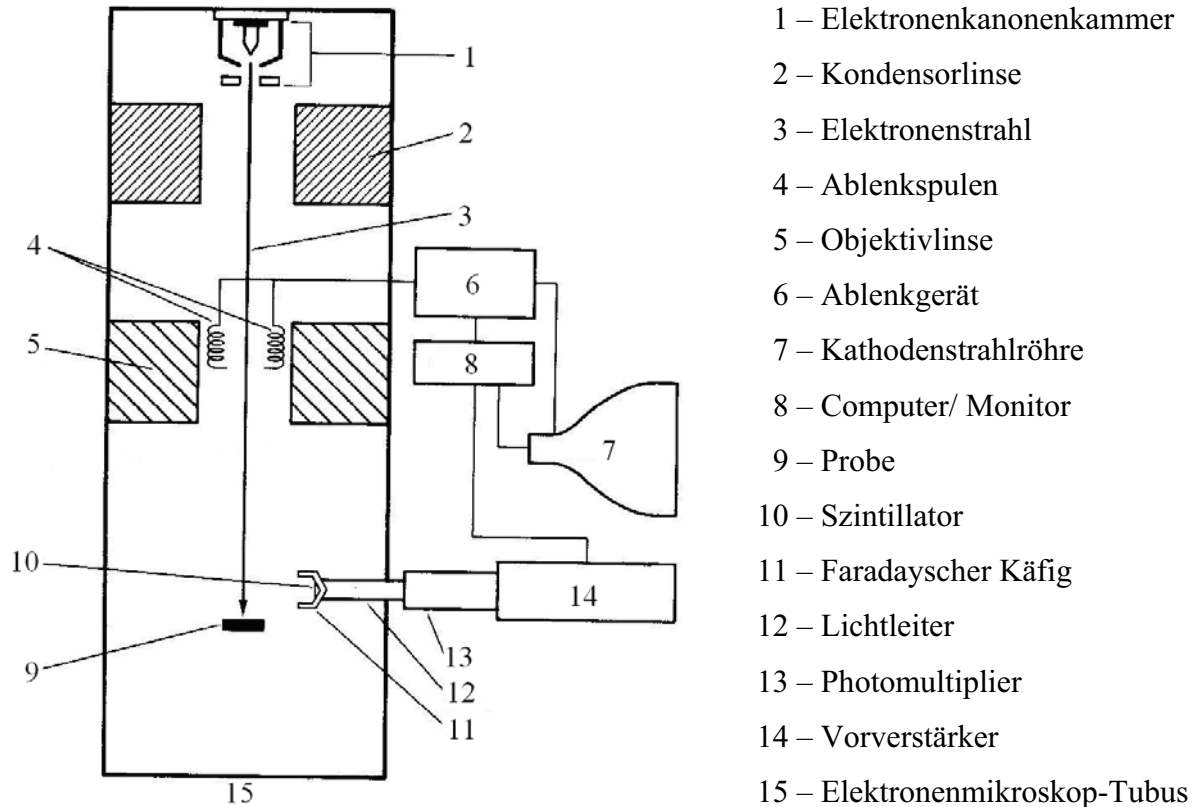


Abbildung 20: Schematische Darstellung eines REM (Flegler et al., 1995)

Gearbeitet wird mit beschleunigten Elektronen im Hochvakuum, da sonst Wechselwirkungen mit Atomen und Molekülen der Luft entstehen würden und weil in einer Gasatmosphäre kein Elektronenstrahl erzeugt oder aufrechterhalten werden kann. Das Probenmaterial wird von dem Elektronenstrahl abgetastet, wodurch den Objekten vorher enthaltene Wasser entzogen werden muss. Andernfalls kann nicht sichergestellt werden, dass es bei der weiteren Probenvorbereitung nicht zum Verformen des Objektes oder zur elektrischen Aufladung kommt. Bei Schokolade ist eine Trocknung aufgrund des geringen Wassergehalts nicht erforderlich.

Ein Elektronenrastermikroskop besteht im oberen Bereich aus einer Elektronenkanonenkammer (Abbildung 21). „Diese enthält eine Wolfram-Glühkathode, welche im Wehnelt-Zylinder Elektronen erzeugt und zu einer gesättigten Elektronenwolke konzentriert. Die angelegte Hochspannung zwischen Kathode und Anode bewirkt, dass die Elektronen als Strahl aus der

Wolke herausgesogen werden.“ (Zentrale Einrichtung Elektronenmikroskopie Uni Ulm, 2007)

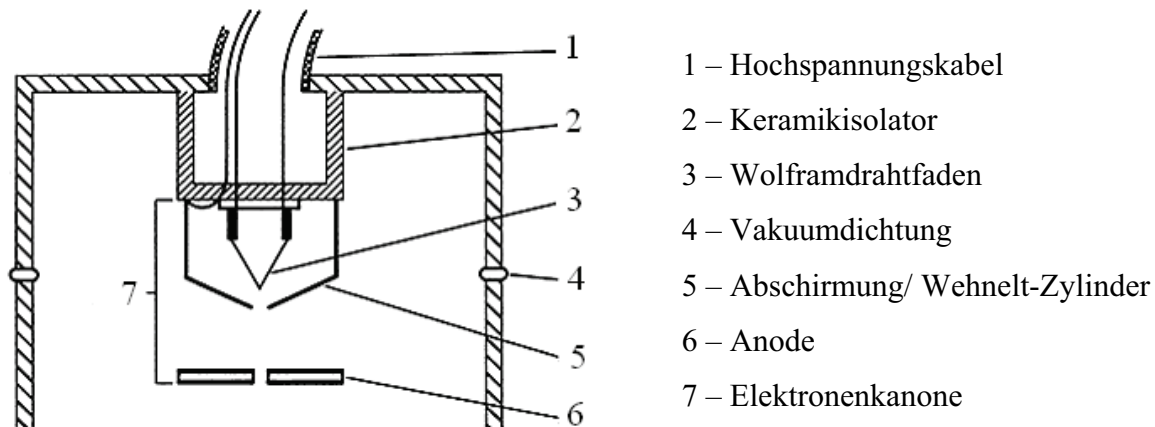


Abbildung 21: Darstellung einer Elektronenkanonenkammer (Flegler et al., 1995)

Die Magnetspulen (Kondensor-, Objektivlinse, Abbildung 20) bündeln den Elektronenstrahl und lenken ihn ab. Die Magnetspulen dienen als Linse und verkleinern den Durchmesser des Elektronenstrahls. (Flegler et al.; 1995)

„Der fein gebündelte Elektronenstrahl wird mit Hilfe der Ablenkspulen über die Probenfläche gerastert. Sie lenken den Elektronenstrahl in x-y-Richtung ab, was über einen Rastergenerator (Ablenkgerät) in Verbindung mit der Kathodenstrahlröhre gesteuert wird. Dies läuft parallel im Elektronenmikroskop-Tubus und auf dem Monitor des REM ab, da diese synchronisiert sind.“ (Zentrale Einrichtung Elektronenmikroskopie Uni Ulm, 2007)

Beim Auftreffen der Elektronen auf die Probenfläche werden sie abgebremst und geben kinetische Energie an die Probe ab, wodurch Rückstreu- und Sekundärelektronen aus der Probenfläche abgelöst werden. (Zentrale Einrichtung Elektronenmikroskopie Uni Ulm, 2007) Diese werden durch eine positive Spannung von dem Faradayschen Käfig angesaugt und durch die positive Spannung des Szintillators beschleunigt. Nach Flegler et al. (1995) ist der Szintillator eine metallbeschichtete Scheibe, die einen Kollektor darstellt. „Die Rückstreu- und Sekundärelektronen werden beim Auftreffen auf den Szintillator in Photonen (Licht) umgewandelt und durch den Lichtleiter übertragen. In dem Photomultiplier angekommen, treffen die Photonen auf eine Elektrode, welche dadurch Elektronen emittiert. Durch Aufprallen auf geladenen Plättchen vervielfacht sich die Anzahl der Elektronen, wodurch die Ausgangsspannung des Photomultipliers verstärkt wird.“ (Flegler et al, 1995) Die verstärkte Spannung wird dann an das Gitter der Kathodenstrahlröhre überführt. Dort verändert sie die Intensität des Lichtpunktes auf dem Monitor der Kathodenstrahlröhre und es entsteht ein Abbild der Probenoberfläche auf dem Monitorschirm. (Flegler et al.; 1995)

Für die Untersuchungen der Schokoladeproben wurde das Rasterelektronenmikroskop DSM 950 der Fa. Carl Zeiss AG verwendet.

Voraussetzung für die Untersuchungen mit einem Rasterelektronenmikroskop ist eine elektrisch leitende Oberfläche am Probenmaterial, was eine Vorbehandlung der Proben erfordert. Dazu werden sie mit einem Metallfilm (z.B. Gold, Platin) bedampft. Dieser Vorgang nennt sich Sputtern. Es sollen dadurch bildstörende elektrische Aufladungen an der Probenoberfläche vermieden und eine bessere Sekundärelektronen-Emission erreicht werden. Der Metallfilm darf nicht zu dick aufgedampft werden, um ein Überdecken der feinen Probenstrukturen zu verhindern. (Balzers Union Limited, 1986)

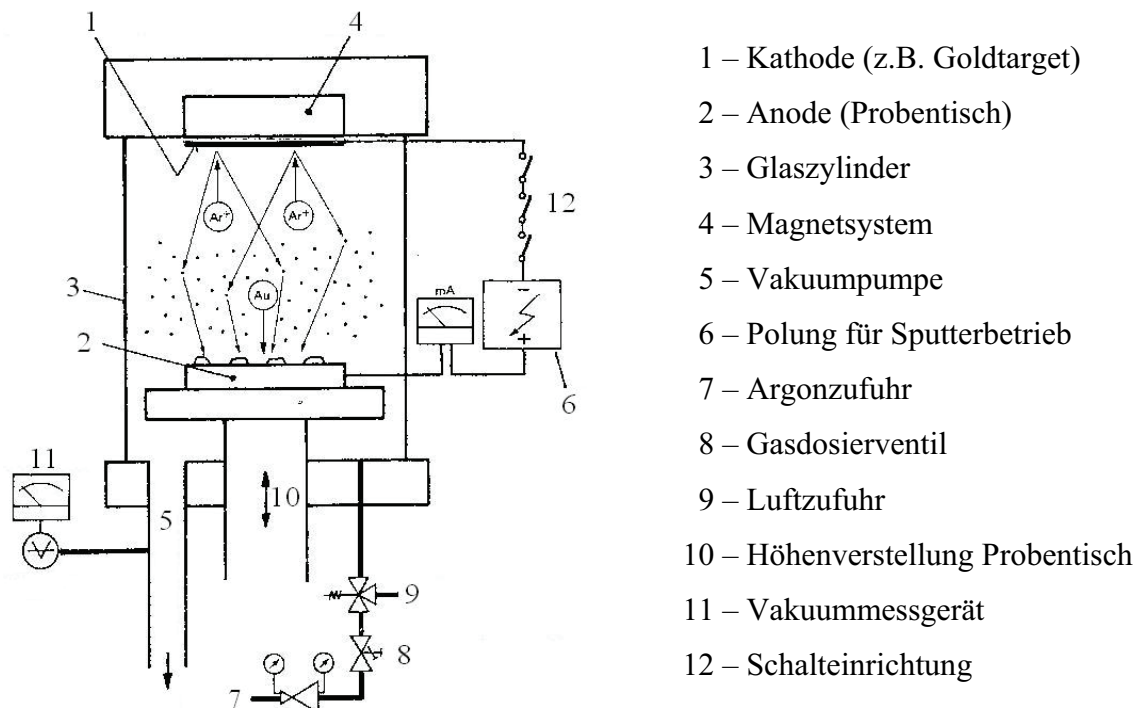


Abbildung 22: Prinzipschema des Sputterprozesses (Balzers Union Limited, 1986)

Das Sputtern erfolgt in einem Sputtergerät (Abbildung 22). Vorher wird die Probe auf einen Objektträger geklebt, welcher dann auf den Probenstück in einer Probenkammer des Sputtergeräts, gestellt wird. Die Probenkammer wird vor dem Sputtern evakuiert, indem über ein Gasdosierventil die Umgebungsluft durch Argongas ersetzt und ein Druck von 0,05 mbar eingestellt wird. Anschließend wird zwischen dem Probenstück (Anode) und dem Sputter-Target (Kathode) durch Anlegen von einer Hochspannung eine Glimmentladung gezündet. Die positiv geladenen Argon-Ionen werden dabei zur Kathode hin beschleunigt. Bei ihrem Aufprall auf das Sputter-Target schlagen sie Metallatome heraus. Diese und die Gasmoleküle stoßen mehrfach zusammen, wodurch es zu einer starken Streuung der Metallatome und zur Bildung

einer „Metallatom-Wolke“ kommt. Aus dieser lagern sich die Atome gleichmäßig auf allen Flächen der Umgebung und auch auf der Probe ab. So kommt es zur Bildung einer dünnen Metallschicht auf einer sehr zerklüfteten Probenoberfläche, die eine für REM-Aufnahmen nötige Leitfähigkeit aufweist. (Balzers Union Limited, 1986)

Die Leitfähigkeit kann nach dem Sputtern, abhängig von dem verwendeten Target-Material, Arbeitsabstand, Gasdruck, Glimmstrom und der Prozessdauer, unterschiedlich dick sein. Diese Parameter werden im Zusammenhang mit der Temperaturbelastbarkeit des Probenmaterials gewählt.

Es wurden REM-Aufnahmen von den einzelnen Prozessstufen im 1SWV und 2SWV gemacht. Bei temperaturempfindlichen Proben wie Schokolade werden ein möglichst großer Arbeitsabstand und ein niedriger Glimmstrom gewählt. Für das Leitfähigmachen der Schokoladenproben wurde das Sputtergerät SCD 040 der Fa. Balzers Union Limited eingesetzt. Zur Probenvorbereitung wurde in einer Argonatmosphäre mit einem Gasdruck von 0,05 mbar gearbeitet. Der Arbeitsabstand betrug 50 mm und das Target-Material war Gold. Die Probe wurde 120 s lang bei einem Sputterstrom von 15 mA besputtert. So ergibt sich nach Abbildung 23 eine Dicke der Goldschicht von etwa 12 bis 13 nm. (Balzers Union Limited, 1986)

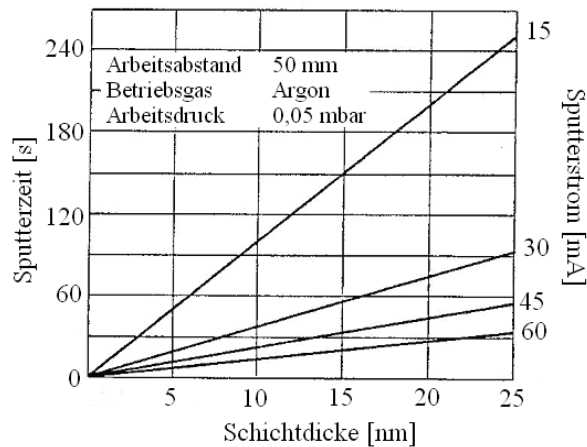


Abbildung 23: Sputterzeit-Diagramm für Gold (Balzers Union Limited, 1986)

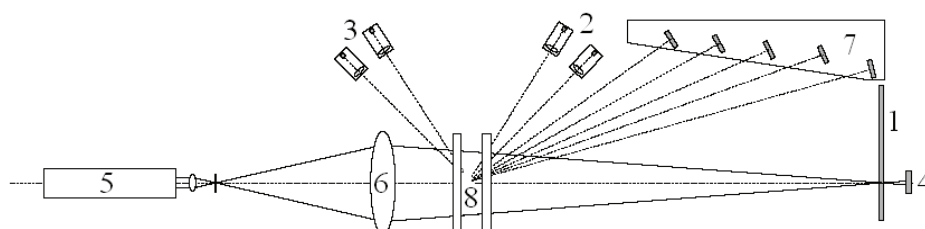
Mit den gewählten Sputterparametern soll eine Veränderung des Probenmaterials durch die Behandlung verhindert werden. Veränderungen können auftreten beim Kleben des Probenmaterials auf den Objektträger. Dabei wurde bei den meisten Proben mit Heißkleber gearbeitet, wodurch eine leichte Erwärmung des Objektträgers stattfand. Die Schokolade schmolz bei Kontakt mit dem Objektträger an der Unterseite leicht. Um Veränderungen auszuschließen wurden Schokoladenstücke von fast 1 cm Dicke auf den Objektträger geklebt, so dass die

obere Hälfte der Probe nicht von der Wärme beeinflusst wurde. Bei den krümeligen Feinwalzgutproben wurde ein Zweikomponentenkleber eingesetzt, ohne Erwärmung des Objektträgers. Der Zweikomponentenkleber wurde jedoch nur bei diesen Proben eingesetzt, da sich in Versuchen herausstellte, dass die Proben mit dem Heißkleber besser auf dem Objektträger gehalten wurden. Weitere Probeveränderungen können durch häufiges Sputtern, wobei Wärme entsteht, auftreten. Dem wurde durch große Zeitspannen zwischen den einzelnen Sputtervorgängen entgegengewirkt. So betrug die Temperatur in dem Glaszylinder nie mehr als 25 °C. In der Literatur sind sehr wenige REM-Aufnahmen von Schokolade zu finden und man kann nicht sicher sein, dass die erhaltenen Bilder dem tatsächlichen Aussehen der Schokoladenproben entsprechen.

3.3.2 Partikelverteilung mittels Laser-Streulichtspektrometer

Zur Ermittlung der Partikelverteilung der Proben wird ein Laser-Spektrometer der Fa. Malvern Instruments Ltd. eingesetzt. Die mit der Trockeneinheit untersuchten Proben sind die Walzenmilch-, Sprühmilchpulver-VMC, Sprühmilchpulver-VMB, Laktose, Vanillin und Staubzucker. Mit der Nassdispergiereinheit wurden Kakaomassen und die einzelnen Prozessstufen der Schokoladenherstellung im 1SWV und 2SWV untersucht.

Die Bestimmung der Partikelgrößen erfolgt auf der Grundlage der Lichtbeugung an dispergierten Teilchen. Als Lichtquelle enthält der Laser-Spektrometer einen Helium-Neon-Laser mit einer Wellenlänge von 633 nm. Das Messprinzip beruht auf der inversen Fraunhofer-Beugung, so dass sich die beugenden Teilchen in einem konvergenten Laserstrahl befinden (Abbildung 24).



1 – Hauptdetektor

2 – Großwinkeldetektoren

3 – Detektoren der Rückwärtsstreuung

4 – Detektor der optischen Abschattung

5 – Helium-Neon-Laser

6 – umgekehrte Fourierlinse

7 – Detektor für vorwärts gestreutes Licht

8 – Messzelle

Abbildung 24: Geräteaufbau des Laser-Spektrometers (Nitzsche, 2004)

Die in das System eingebrachten dispergierten Teilchen beugen das Laserlicht, welches von den eingebauten Detektoren (Abbildung 24) erfasst wird. Die Lichtbeugung erfolgt in Abhängigkeit von der Partikelgröße in verschiedenen großen Winkeln. Kleine Partikel beugen aufgrund ihrer stark gekrümmten Oberfläche das Laserlicht stärker und erzeugen größere Beugungswinkel und umgekehrt. (Nitzsche, 2004)

Die Berechnung der Partikelgrößenverteilung erfolgt mit Hilfe von mathematischen Modellen. Dabei sind die Fraunhofer-Theorie und die Mie-Theorie die meist verwendeten Berechnungsmodelle. Die Fraunhofer-Theorie geht von lichtundurchlässigen Partikeln aus, die eine scheiben- oder schlitzähnliche Form haben können. Dabei muss der Durchmesser der Partikel deutlich größer sein als die Wellenlänge des Laserlichts ($d > 4\lambda$), da nur bis zu dieser Grenze fehlerfrei gemessen werden kann. Bei der Wellenlänge von 633 nm des He-Ne-Lasers ergibt sich somit 2,5 μm als untere Grenze. Die Berechnung der Partikelgrößen mit der Mie-Theorie liefert auch unterhalb von 2,5 μm korrekte Werte, wobei von kugelförmigen Partikeln ausgegangen wird. Jedoch werden für diese Berechnung zusätzlich der Brechungsindex der Partikel im Dispergiermedium und das Adsorptionsvermögen der dispergierten Teilchen benötigt. (Krause, 2006)

Bei der Untersuchung von Schokolade und den zugehörigen Rohstoffen wurde stets die Fraunhofer-Theorie angewandt. Gründe dafür sind zum einen die auftretenden Partikelgrößen, welche nur zu einem sehr geringen Anteil unter 2,5 μm liegen. Zum anderen ist es bei Schokolade schwierig einen Brechungsindex und eine Adsorption festzulegen, da sie aus verschiedenen Rohstoffen besteht. Brechungsindex und Adsorption müssten je nach Rohstoffanteil ermittelt werden. Insgesamt können durch unkorrekt gewählte Parameter die Ergebnisse schnell verfälscht werden. Daher erweist sich die Fraunhofer-Theorie zur Berechnung der Partikelgrößen von Schokoladenmassen als besser geeignet. (Nitzsche, 2004)

Die mit der Laser-Streuung gemessenen Partikelgrößen werden als Durchmesser von volumenäquivalenten Kugeln angegeben. Das bedeutet, dass der Laser-Spektrometer das Volumen des unregelmäßig geformten Partikels mit einer Kugel vergleicht, die das gleiche Volumen besitzt. Bei der Auswertung des Volumens der imaginären Kugeln wird auf deren Durchmesser zurückgerechnet und somit die Partikelgröße bestimmt. (Malvern, 2004)

In Abbildung 25 ist der Laser-Spektrometer und die herausnehmbare Messzelle (für den Wechsel von Trocken- auf Nassmessung und umgekehrt) zu sehen. (Malvern, 2004)

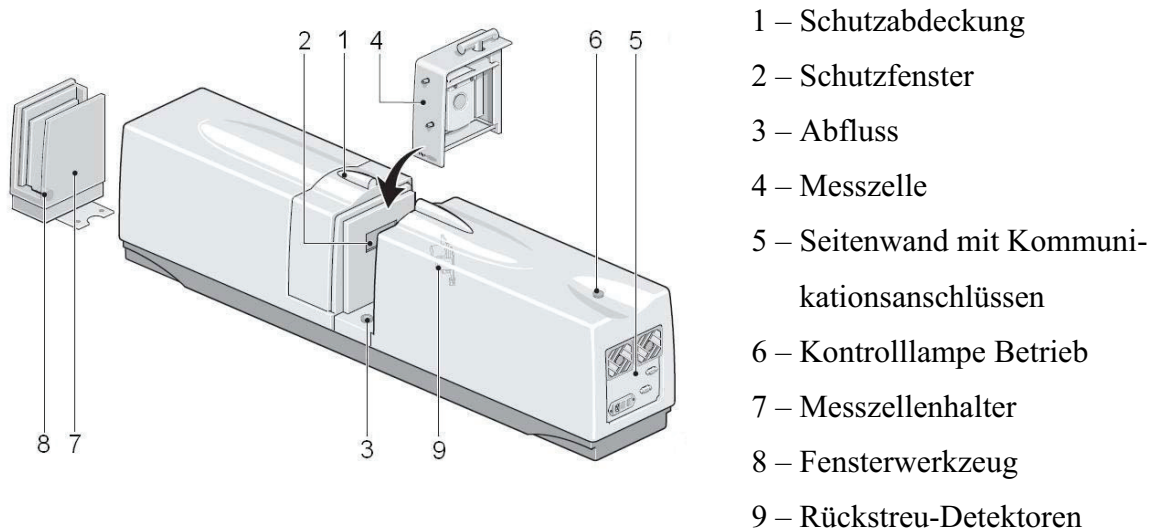


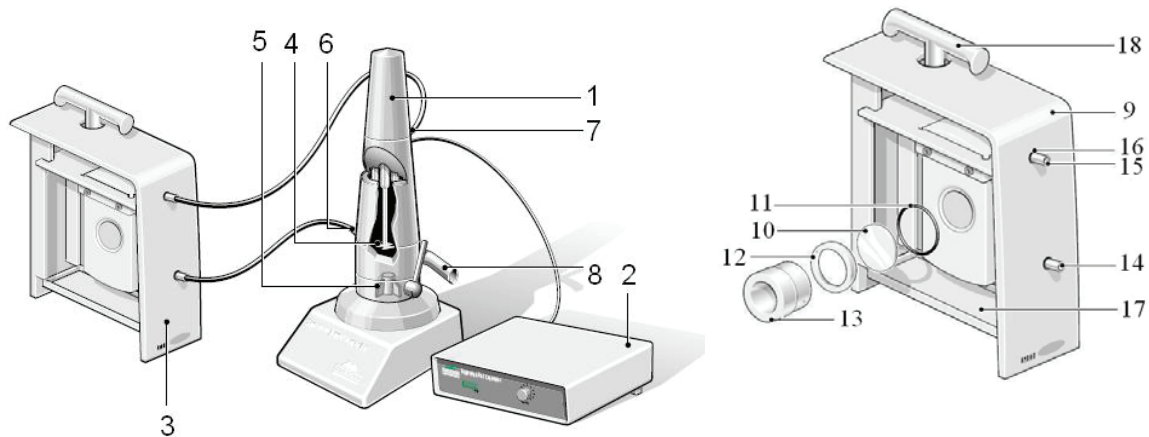
Abbildung 25: Darstellung des Laser-Spektrometers (Malvern, 2004)

3.3.2.1 Messungen mit der Nassdispergiereinheit

Die Messung mit der Nassdispergiereinheit (Abbildung 26) erfolgt, in Sonnenblumenöl als Dispergiermedium. Die Probe wird separat mit Sonnenblumenöl versetzt und nach einer Ultraschallbehandlung in die Einheit gegeben. Rührer und Impellerpumpe werden von einem Motor mit höchster Umdrehungszahl von ca. 3.500 U/min gedreht. Der Rührer vermischt Probe und Dispergiermedium. Die Impellerpumpe fördert diese Mischung im Kreislauf durch die Messzelle. (Malvern, 1999)

Die Messung erfolgt indem der Laserstrahl durch das Messzellenfensters hindurchgeht und an den sich darin befindenden Probenpartikel gestreut wird. Die Detektoren erfassen die Streuung, welche mit Hilfe der Software ausgewertet wird. Nach beendeter Messung ist die gesamte Einheit zu spülen. (Malvern, 1999) Die Ultraschallbehandlung vor der Nassmessung soll vorhandene Agglomerate aufspalten, ohne dass es zu einer Partikelzerkleinerung kommt. Die Probe soll homogen im Öl verteilt sein. (Nitzsche, 2004)

Für die Untersuchungen wird ein Ultraschallstab von Bandelin bei einer Ultraschallintensität von 30 % verwendet. Für die Probenaufbereitung wird eine unbestimmte Probenmenge mit ungefähr der gleichen Menge Sonnenblumenöl in einem Glas versetzt und verrührt. Es bedarf keiner genauen Einwaage, da die Menge, die in die Dispergiereinheit eingegeben wird, von der optischen Abschattung abhängt. Der Ultraschallstab wird direkt in dieses Gemisch eingetaucht, so dass eine direkte Ultraschallbehandlung erfolgt.



Nassdispergiereinheit

- 1 – Motor
- 2 – Rührgeschwindigkeitsregelung
- 3 – Seitenwand der optischen Einheit
- 4 – Rührer
- 5 – Impellerpumpe
- 6 – Probenezufuhrschlauch
- 7 – Probenrücklaufschlauch
- 8 – Abfluss

Aufbau der Nassmesszelle

- 9 – Schutzabdeckung
- 10 – Messzellenfenster
- 11 – Abdichtung Messzellenfenster
- 12 – Schraubverschluss Messfenster
- 13 – Fensterwerkzeug
- 14 – Probenezufuhrschlauch
- 15 – Probenrücklaufschlauch
- 16 – Schutzdichtung
- 17 – Flüssigkeitsauffangschale
- 18 – Sperrgriff

Abbildung 26: Aufbau Nassdispergiereinheit und Nassmesszelle (Malvern 1999)

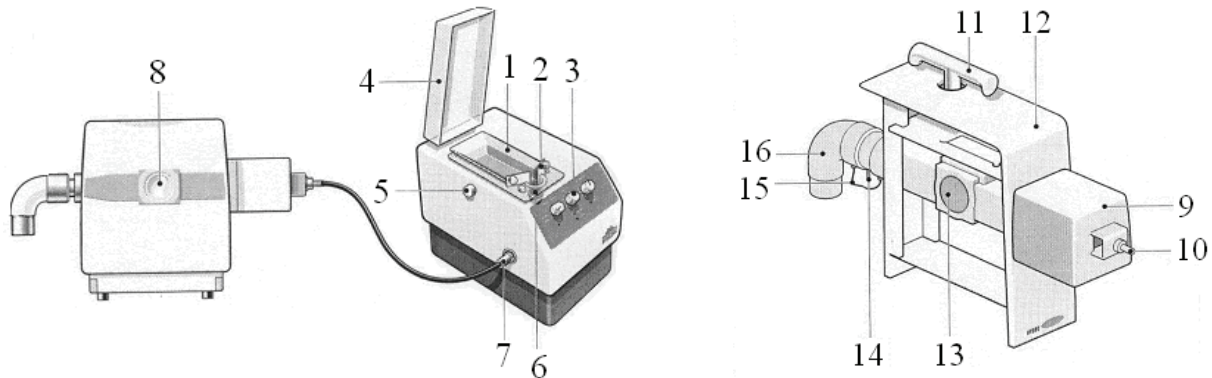
3.3.2.2 Messungen mit der Trockeneinheit

Bei der Trockenmesseinheit (Abbildung 27) wird die zu untersuchende Probe nicht im Kreislauf geführt, sondern nach der Messung sofort abgeleitet. Die pulverigen Materialien werden mittels Druckluft (über eine angeschlossene Druckluftleitung) gefördert. (Malvern, 2004)

Die zu untersuchende Probe wird in die leicht geneigte Probeaufgabepfanne der Beschickungseinrichtung gegeben. Diese fördert die Probe durch Vibration des Pfannenbodens in den Probezufuhrmechanismus, an dessen Eingang sich ein korbartiges Drahtsieb mit Kugeln befindet. Die Vibration der Probenpfanne überträgt sich auf das Sieb, so dass sich die Kugeln leicht bewegen und die Probe vorbeigeleitet wird, wobei sich vorhandene Agglomerate auftrennen. Die Druckluft, welche unterhalb des Siebes eingeleitet wird, nimmt die Probe

auf und fördert sie durch die Messzelle, wobei es zu einem weiteren Aufbruch von Agglomeraten kommt. Die Partikel werden im Messzellenfenster vom Laser erfasst und das gestreute Laserlicht an den Detektoren gemessen. Die Probe wird dann sofort abgeleitet. (Malvern, 2004)

Die Trockenmesszelle hat im Vergleich zu der Nassmesszelle einen größeren Spalt zwischen den Messfenstern, so dass genug Luft mit enthaltener Probe durch die Messzelle gefördert werden kann. (Malvern, 2004)



Trockenmesszelle mit Beschiebungsvorrichtung

- 1 – Probeaufgabefanne/ Aufgabefanne
- 2 – Regelung Spaltweite Probezufuhr
- 3 – Bedienfeld der Beschiebungsvorrichtung
- 4 – Schutzdeckel aus Plexiglas
- 5 – Feststellschraube der Aufgabefanne
- 6 – Sieb mit Metallkugeln
- 7 – Probenzufuhröffnung
- 8 – Trockenmesszellenfenster

Aufbau der Trockenmesszelle

- 9 – Lärmschutz
- 10 – Probeneingang
- 11 – Sperrgriff
- 12 – Schutzabdeckung
- 13 – Messzellenfenster
- 14 – Luftdruckaufbaukontrolle
- 15 – Erdung
- 16 – Abgasableitung

Abbildung 27: Aufbau Trockeneinheit mit Trockenmesszelle (Malvern, 2004)

3.3.2.3 Parameter zur Auswertung der Ergebnisse des Laser-Spektrometers

Wichtig für die Messungen mit der Nassdispergier- und Trockeneinheit sind die Hintergrund- und Probenmessdauer und die zugegebene Probemenge (optische Abschattung).

Der Hintergrund beschreibt die von den Detektoren empfangenen Signale im reinen Dispergiermedium. Sie werden vorab gemessen und bei der Berechnung der Partikelverteilung abgezogen, so dass nur die Partikel der Probe im Ergebnis enthalten sind.

Die Probemessdauer ist die Zeit in s, in der das gestreute Laserlicht gemessen wird. Die Messung einer Probe mit der Nassdispergiereinheit unterteilt sich in fünf Einzelmessungen, mit anschließender Bildung eines Mittelwerts. Bei der Trockenmessung erfolgt keine automatische Mehrfachmessung dergleichen Probe, da das Probenmaterial direkt nach der Messung abgeleitet wird. Somit wird kein automatischer Mittelwert erstellt.

Mit der optischen Abschattung wird die zugegebene Probemenge erfasst, gemessen durch Subtraktion der Laserleistung hinter der Messzelle von der Leistung vor der Messzelle. Je mehr Partikel im Dispergiermedium enthalten sind, desto stärker ist die Streuung und somit die Schwächung (Leistungsabnahme des Lasers). (Malvern, 2004)

Der Span (in der Software berechnete Spannweite) ist dimensionslos und stellt die Verteilungsbreite dar. Je enger die Verteilung der Partikel ist, desto kleiner ist der Span. Berechnet wird sie wie folgt:

$$\frac{d(0.9) - d(0.1)}{d(0.5)}$$

Die spezifische Oberfläche (specific surface area – SSA), angegeben in m²/g, ist definiert als die Gesamtoberfläche der Partikel dividiert durch das Gesamtgewicht. Die spezifische Oberfläche ist somit eine mathematische Berechnung, bei der die Partikel als sphärisch und nichtporös angenommen werden. Für die Berechnung muss die Dichte der Probe in der Software definiert werden. Bei dem Auswertemodell nach der Fraunhofer-Theorie ist eine Dichte von 1,0 g/cm³ für alle Proben vorgegeben. Je feiner das untersuchte Probenmaterial ist, desto größer ist die spezifische Oberfläche.

Der Mode (Modalwert) gibt die Partikelgröße in µm an, die am häufigsten in dem Probenmaterial enthalten ist.

Der d(0,001) ist die Partikelgröße in µm, unter der 0,1 % der in dem Probematerial enthaltenen Probe liegen.

Der d(0,1) ist die Partikelgröße in µm, unter der 10 % der in dem Probematerial enthaltenen Probe liegen.

Der d(0,5) (oder auch Massemitteldurchmesser) ist die Partikelgröße in µm, bei der 50 % der in dem Probematerial enthaltenen Probe kleiner und 50 % größer sind.

Der d(0,9) ist die Partikelgröße in µm, unter der 90 % der in dem Probematerial enthaltenen Probe liegen.

Der d(0,999) ist die Partikelgröße in µm, unter der 99,9 % der in dem Probematerial enthaltenen Probe liegen.

Die Werte von d(0,001), d(0,1), d(0,5), d(0,9) und d(0,999) beschreiben den Verlauf der Kurven zur Partikelverteilung näher.

Zur Berechnung der einzelnen Parameter wird in der Software von Volumenprozent ausgegangen. Wenn die Ergebnisse nach der Anzahl anstatt des Volumens angegeben werden würden, würde sich im groben Bereich statt eines großen Werts in Vol.-% eine kleine Zahl für die Anzahl ergeben. Im feinen Bereich wäre statt eines geringen Werts in Vol.-% eine hohe Zahl für die Anzahl der Partikel. (Nitzsche, 2004) Es handelt sich beim Laser-Spektrometer generell um eine Messung der Volumenverteilung. (Malvern, 2004)

3.3.3 Partikelgrößenverteilung mit der Nasssieb-Methode

Eine Bestimmung der Partikelgrößen mit der Nasssieb-Methode ist in einem Korngrößenbereich von 10 bis 200 μm möglich. Dafür werden Siebe verwendet, deren Siebfläche aus Metall besteht.

Für die Analyse der Partikelgrößenverteilung der verschiedenen Prozessproben der VMC und VMB im 1SWV und 2SWV werden Siebe mit den Maschenweiten 30, 75, 120 und 200 μm benutzt. Weitere verwendete Geräte sind: Laborsiebmaschine, Trockenschrank (80 bis 105 $^{\circ}\text{C}$), Analysenwaage (Genauigkeit $\pm 0,1$ mg), Exsikkator mit Trockenperlen, Erlenmeyerkolben (100 ml Weithals) und eine Spritzflasche.

Zu Beginn einer Nasssiebanalyse sind die Siebe auf Raumtemperatur im Exsikkator abzukühlen und deren Leergewicht zu ermitteln. Von der flüssigen Schokoladenprobe werden dann 1,0 bis 1,5 g in einen 100 ml Erlenmeyerkolben eingewogen, mit 75 bis 100 ml Aceton aufgefüllt und in das Ultraschallbad gestellt. Nach Finke (1965) löst Aceton das Fett ab und legt die Kakao-, Zucker- und Milchpulverpartikel frei, so werden alle fettfreien Feststoffteilchen der Probe im Siebrückstand ermittelt.

Das Ultraschallbad hat eine Temperatur von 40 bis 45 $^{\circ}\text{C}$. Die Probe soll innerhalb von 10 Minuten Ultraschallbehandlung völlig im Aceton dispergiert werden und ist bei ungenügender Dispergierung zu verlängern, bis keine Agglomerate mehr sichtbar sind. Für die Siebung wird ein Sieb in die Laborsiebmaschine eingespannt und einer leichten Vibration ausgesetzt. Der Erlenmeyerkolben wird aus dem Ultraschallbad genommen und außen abgetrocknet, so dass kein Wasser auf das Sieb gelangt. Es würde im Trockenschrank nicht schnell genug verdunsten und das Ergebnis verfälschen. Nach dem Schwenken des Erlenmeyerkolbens wird die dispergierte Probe vollständig über das Sieb gegossen. Der Erlenmeyerkolben und das Sieb sind sofort mit ca. 250 ml Aceton nachzuspülen, um alle Partikel auf die Sieboberfläche zu überführen. Die Vibration des Siebes richtet die Partikel auf der Sieboberfläche aus, dass sie mit der kürzesten Seite durch die Maschen gelangen. Nach einer kurzen Abtro-

ckenphase bei Raumtemperatur, werden die Siebe für 20 Minuten bei ca. 80 °C in den Trockenschrank gestellt, anschließend im Exsikkator abgekühlt und zurückgewogen. Die Berechnung der Partikelgrößenverteilung ergibt sich durch Differenzwägung und mit folgender Formel:

$$Feinheit = \frac{(Sieb_{ende} - Sieb_{anfang}) * 100}{Einwaage} * Faktor$$

Der in der Formel enthaltene Faktor lässt sich berechnen, wenn der Fett- und Wassergehalt bekannt sind, so dass sich ein Ergebnis in Prozent der fettfreien Trockensubstanz (%) ergibt. Für die Prozessproben des 1SWV und 2SWV wurde die Bestimmung des Wasser- und Fettgehalts nicht durchgeführt, so dass ein Ergebnis in Prozent absolut (% abs.) erhalten wird.

3.3.4 Bestimmung der rheologischen Eigenschaften

Für die Untersuchungen der Rheologie werden die Concheproben der VMC und VMB vom 1SWV und 2SWV analysiert. Durchgeführt werden sie an der Hochschule Neubrandenburg mit dem scherratengesteuerten Rheometer Physica UDS 200 der Fa. Anton Paar Germany GmbH. Das verwendete Messsystem ist das Z3 mit dem Drehkörper TEZ-180, gemäß DIN 53019. Zur Temperierung der Messeinheit wird das Temperiergerät Viscotherm VT2 bei einer Temperatur von 40 °C verwendet.

Die Messungen werden nach dem Searle-Prinzip durchgeführt. Das bedeutet, dass sich die Messsubstanz bei der Messung im Messspalt zwischen dem feststehenden Messbecher und dem rotierenden Drehkörper befindet. Die Messungen erfolgen durch Regelung der vorgegebenen Schergeschwindigkeit über die Drehzahl des Drehkörpers. Erfasst wird dabei die auf den Drehkörper wirkende Schubspannung, welche sich aus der Messung des Fließwiderstands der Messsubstanz ergibt.

Die Schokolademassen wurden mit dem in Tabelle 3 und der dazugehörigen Abbildung 28 dargestellten Scherprogramm untersucht. In den Programmabschnitten 1 bis 3 findet das Vorscheren der Masse statt. In den Abschnitten 5, 7 und 9 erfolgt die Erhöhung der Schergeschwindigkeit. Bei all diesen Abschnitten werden keine Werte der Schubspannung und Viskosität aufgezeichnet. Die eigentliche Messung der Schubspannung und der Viskosität erfolgt in den Abschnitten 4, 6, 8, 10, 11 und 12. Die zu ermittelnden Fließ- und Viskositätskurven lassen sich aus den erfassten Werten der Abschnitte 11 und 12 erstellen.

Nach dem OICCC Standard von 1973 sind die Messungen von Viskosität und Fließgrenze bei 40 °C durchzuführen. Empfohlen wird die Auswertung nach Casson in einem Scherbereich von $5 \dots 60 \text{ s}^{-1}$, da sie nur in diesem Bereich eine ausreichende Genauigkeit liefert. Jedoch ist die Auswertung nach Casson alt und wird heutzutage als nicht ausreichend genau angesehen. Tscheuschner entwickelte eine neue Auswertemethode für Schokoladenmassen, die einen Scherbereich von $0,1 \text{ s}^{-1} \dots 500 \text{ s}^{-1}$ umfasst. Die neue OICCC-Richtlinie empfiehlt seit 2001 hingegen die Auswertung nach Windhab im Scherratenbereich von $2 \dots 50 \text{ s}^{-1}$ bzw. $1 \dots 100 \text{ s}^{-1}$. (Westphal, et al.; 2006)

Da in der Industrie die Auswertung nach Casson gebräuchlicher ist, wird diese hier durchgeführt. Ermittelt werden die Casson Fließgrenze τ_{CA} und Casson Viskosität η_{CA} aus der vorgegebenen Scherrate D und der gemessenen Schubspannung τ als Eingangsdaten. In den durchgeführten Untersuchungen wird nach den Methoden von Tscheuschner ein Scherratenbereich von $1 \text{ s}^{-1} \dots 60 \text{ s}^{-1}$ verwendet. Genaue Messungen in den untersten Drehmoment- bzw. Schubspannungsbereichen sind möglich da der Rheometer über einen Druckluftanschluss von 5 bar verfügt und das Messmotor-Drehsystem luftgelagert ist.

Tabelle 3: Daten des verwendeten Scherprogramms mit 12 Abschnitten

Programmabschnitt	Anzahl der Messpunkte	Dauer eines Messpunkts [s]	Scherrate [1/s]	Werterfassung für Berechnung
1	2	5	0...30	nein
2	3	60	30	nein
3	2	5	30...5	nein
4	10	3	5	ja
5	2	5	5...20	nein
6	10	3	20	ja
7	2	5	20...40	nein
8	10	3	40	ja
9	10	1	40...60	nein
10	30	4	60	ja
11	150	0,6	60...3	ja
12	25	0,6	3...1	ja

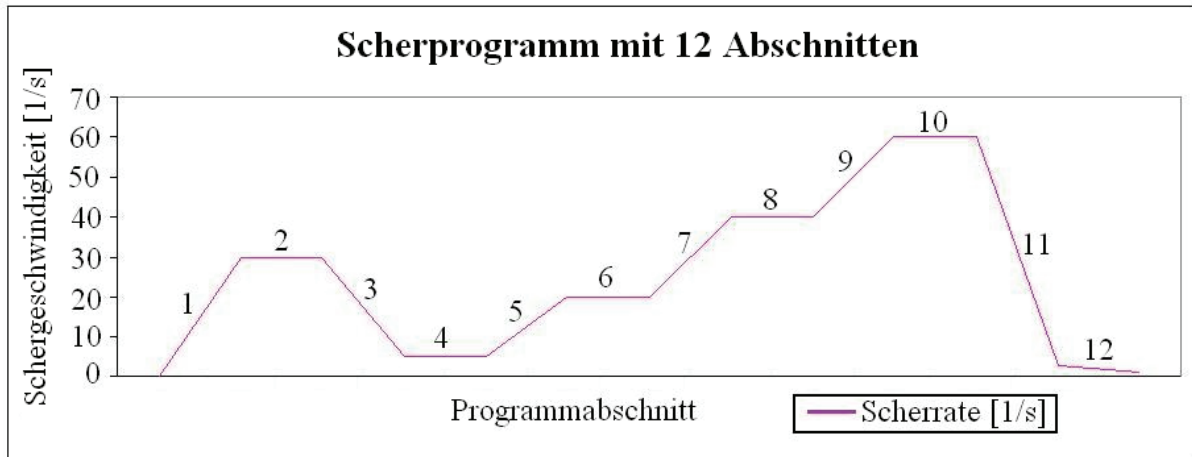


Abbildung 28: Plan über den programmierten Scherablauf mit 12 Programmabschnitten

Die Cassonsche plastische Viskosität (η_{CA}) und die Fließgrenze (τ_{CA}) werden durch den Fett-, Lezithin- und möglicherweise Wassergehalt, die Teilchengröße und Conchierbedingungen beeinflusst. Die Fließgrenze ist weiterhin abhängig von Kohäsivkräften zwischen den Teilchen der Schokolade. (Beckett, 1999)

Die Casson-Parameter liegen für Schokolade in einem Bereich von $\eta_{CA} = 1 \dots 20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ und $\tau_{CA} = 10 \dots 200 \text{ Pa}$. Für Schokoladenüberzüge liegen die Parameter im Bereich von $\eta_{CA} = 0,5 \dots 2,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ und $\tau_{CA} = 0 \dots 20 \text{ Pa}$. (Beckett, 1999)

4 Ergebnisse

4.1 Probeziehung der VMC und VMB

Von der VMC im 1SWV und VMB im 2SWV wurden jeweils 3 Produktionen beprobt. Die VMC im 2SWV und die VMB im 1SWV sind nur einmal hergestellt und beprobt worden und als Sonderproduktionen anzusehen.

Bei der Herstellung der VMB 3 im 2SWV wurde erst später bemerkt, dass bei der Rohstoffdosierung mehr Kakaobutter in den Mischer gegeben und dieser bei der Auffettung während des Conchierens abgezogen wurde. Dies zeigt sich in den Ergebnissen der Laser-Spektrometrie, der Nasssiebung und der Rheologie.

Bei der VMB 4 im 1SWV konnten die Kakaomassen nicht einzeln beprobt werden. Es war aufgrund der Behälterkapazitäten nicht möglich diese einzeln in den Knetter zu dosieren. Daher waren sie in einen Behälter vordosiert und gemischt.

Bei der VMC 4 im 2SWV wurden zwei statt einer Kakaomasse eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine petzomierte Kakaomasse. Aus anlagentechnischen Gründen konnte von dieser Masse keine Probe gezogen werden.

Beim Conchieren der Sonderproduktionen gab es Abweichungen zu den Standardconchierprogrammen. Die VMB 4 im 1SWV wurde mit dem Conchierprogramm der VMC endveredelt, da es für die VMB kein Conchierprogramm gibt. Die VMC 4 im 2SWV wurde aufgrund der hohen Produktionsauslastung mit dem Programm der VMB conchiert und nicht mit dem der VMC.

Insgesamt zeigen sich die meisten Abweichungen in den Untersuchungen und der folgenden Ergebnisdarstellung bei der VMB 3 durch die veränderte Kakaobutterdosierung.

4.2 REM-Aufnahmen der VMC und VMB im 1SWV und 2SWV

Um die REM-Aufnahmen vom 1SWV und vom 2SWV gegenüberzustellen, bedarf es der gleichen Zerkleinerungsstufe im Schokoladenherstellprozess. Somit können die mikroskopischen Bilder vom Knetter (1 SWV) mit denen der Vorwalze (2 SWV) sowie die REM-Aufnahmen der Feinwalzgut- und Concheprouben vom 1SWV und 2SWV jeweils miteinander verglichen werden. Die Prozessstufe Mischer (2 SWV) kann keiner Prozessstufe vom 1SWV gegenübergestellt werden und ist nur für die Vollständigkeit dargestellt.

Im Folgenden ist nur ein Bild für jede Prozessstufe dargestellt und im Anhang 1 und Anhang 2 von den Seiten 132 bis 139 befinden sich jeweils zwei weitere.

Da die Richtigkeit bei REM-Aufnahmen mit temperaturempfindlichen Proben oftmals anzuzweifeln ist, sei an dieser Stelle auf die Abbildungen im Theorieteil dieser Arbeit verwiesen. Abbildung 1, Seite 9 zeigt Laktose, Abbildung 2 und Abbildung 3, Seite 10 zeigen Walzen- und Sprühhmilchpulver, Abbildung 10, Seite 18 zeigt Staubzucker, Abbildung 12, Seite 21 zeigt Feinwalzgut und Abbildung 14, Seite 22 zeigt conchierte Schokoladenmasse.

4.2.1 Schokoladenmasse VMC im 1SWV und 2SWV

Die REM-Aufnahme der Mischerprobe (Abbildung 29) zeigt einen Zuckerkristall, welcher vom Fett der Kakaomasse und -butter umhüllt und von anderen Zuckerkristallen und Milchpulverpartikeln umgeben ist. Seine Oberfläche ist glatt, wodurch er in der zerklüfteten Probe gut auffällt.

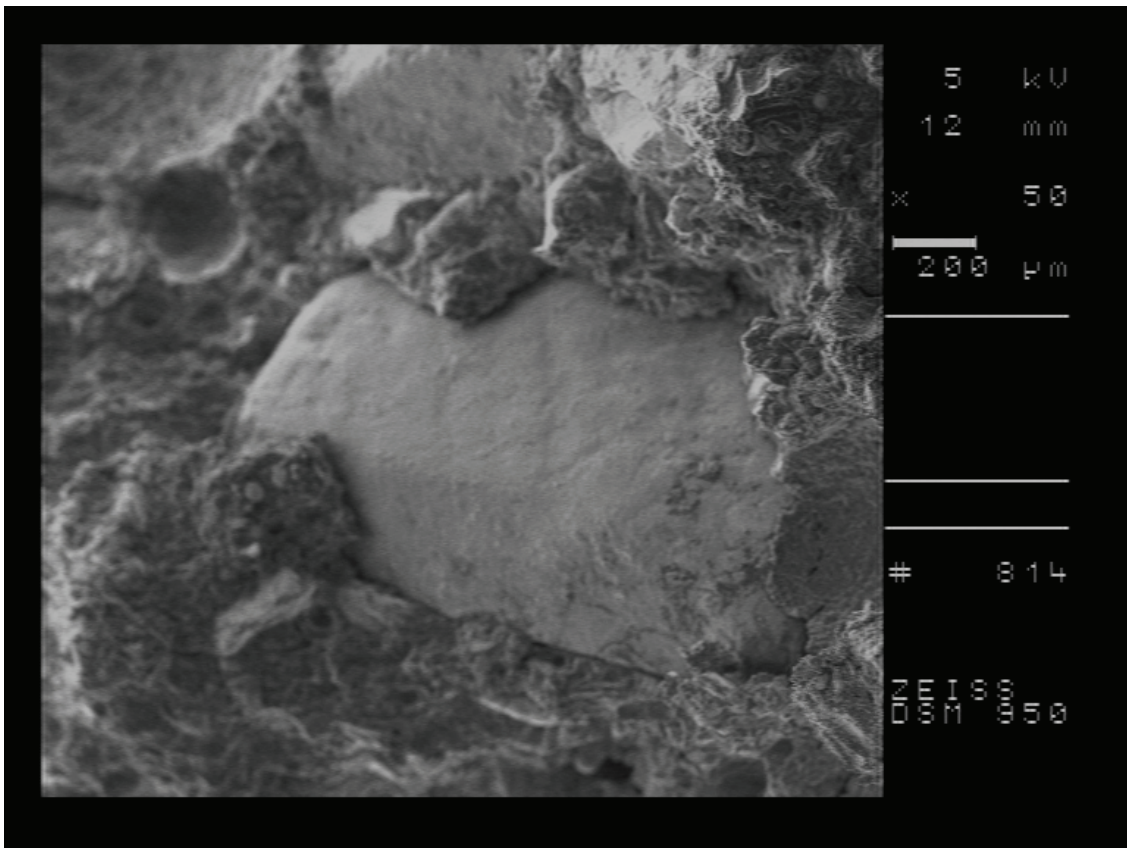


Abbildung 29: 2SWV – VMC – Mischer 50 fache Vergrößerung

Von den gegenübergestellten Aufnahmen (Abbildung 30 bis Abbildung 35) sind die ersten Bilder immer vom 1SWV und die zweiten vom 2SWV.

Die Abbildung 30 und Abbildung 31 der Knet- und Vorwalzwerkprobe (Seite 51) zeigen eine ähnlich stark zerklüftete Oberfläche wie die REM-Aufnahme der Mischerprobe und auch Strukturen von Rohstoffen können erkannt werden. Bei der Knetprobenaufnahme zeigen sich oben und oben links, bei der Aufnahme der Vorwalzwerkprobe in der Mitte der Bilder Partikel, bei denen es sich aufgrund deren Form um Laktose- und Walzenmilchpulverpartikel handeln kann. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass es sich auch um zerkleinerte Zuckerkristalle handelt.

Abbildung 32 und Abbildung 33 (Seite 52) zeigen die REM-Aufnahmen der Feinwalzproben, die sehr unterschiedliche Strukturen aufweisen. Die vielen länglichen, spitzen, flachen Partikel entstanden in den einzelnen Walzenspalten des Fünfwalzwerks durch den Druck und die Scherung. (Beckett, 1990) Weitere Strukturen sehen aus wie Zusammenlagerungen/Agglomerate von vielen kleineren Partikeln, was vermehrt bei der Aufnahme vom 1SWV zu beobachten ist.

Die Concheproben sehen sich in Abbildung 34 und Abbildung 35, Seite 53 sehr ähnlich. Die Oberfläche der Proben sieht im Vergleich zu der der Knet- (1SWV) und Vorwalzwerkproben (2SWV) sehr eben und glatt aus. Es sind bei beiden Aufnahmen Partikel von den Rohstoffen erkennbar, welche eine Größe weit unterhalb von 50 μm haben. Die Partikel haben die gewünschte Größe erreicht und sind gut in der Fettphase der Schokoladenmasse verteilt. Verglichen mit den Feinwalzgutaufnahmen sind keine Agglomerate mehr zu sehen.

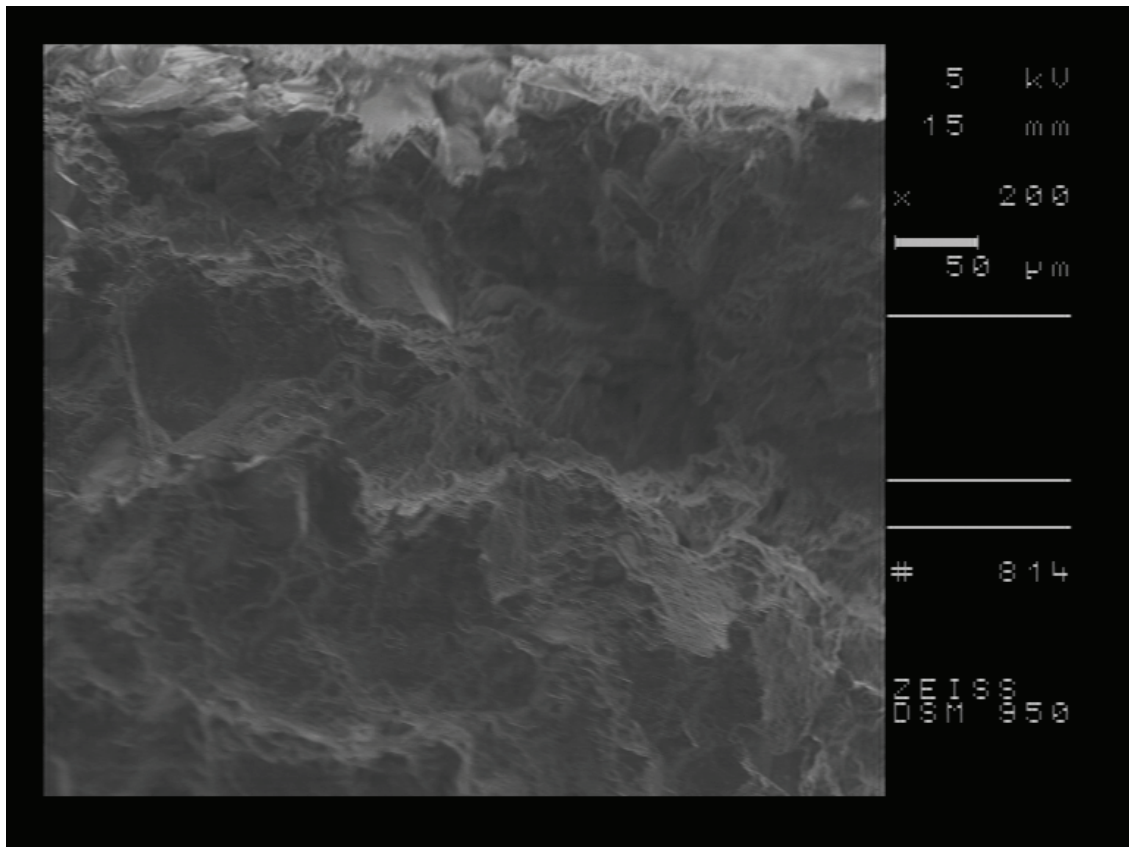


Abbildung 30: 1SWV - VMC – Kneteter 200 fache Vergrößerung

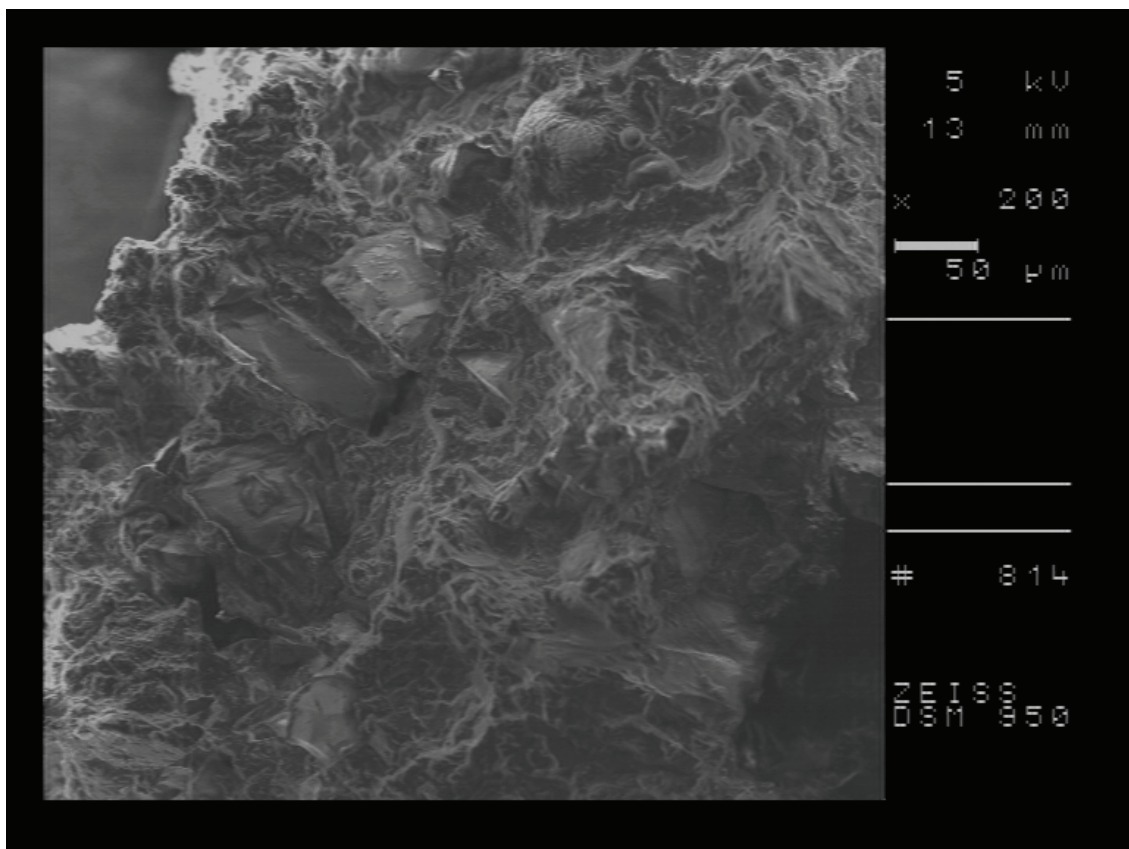


Abbildung 31: 2SWV – VMC - Vorwalze 200 fache Vergrößerung

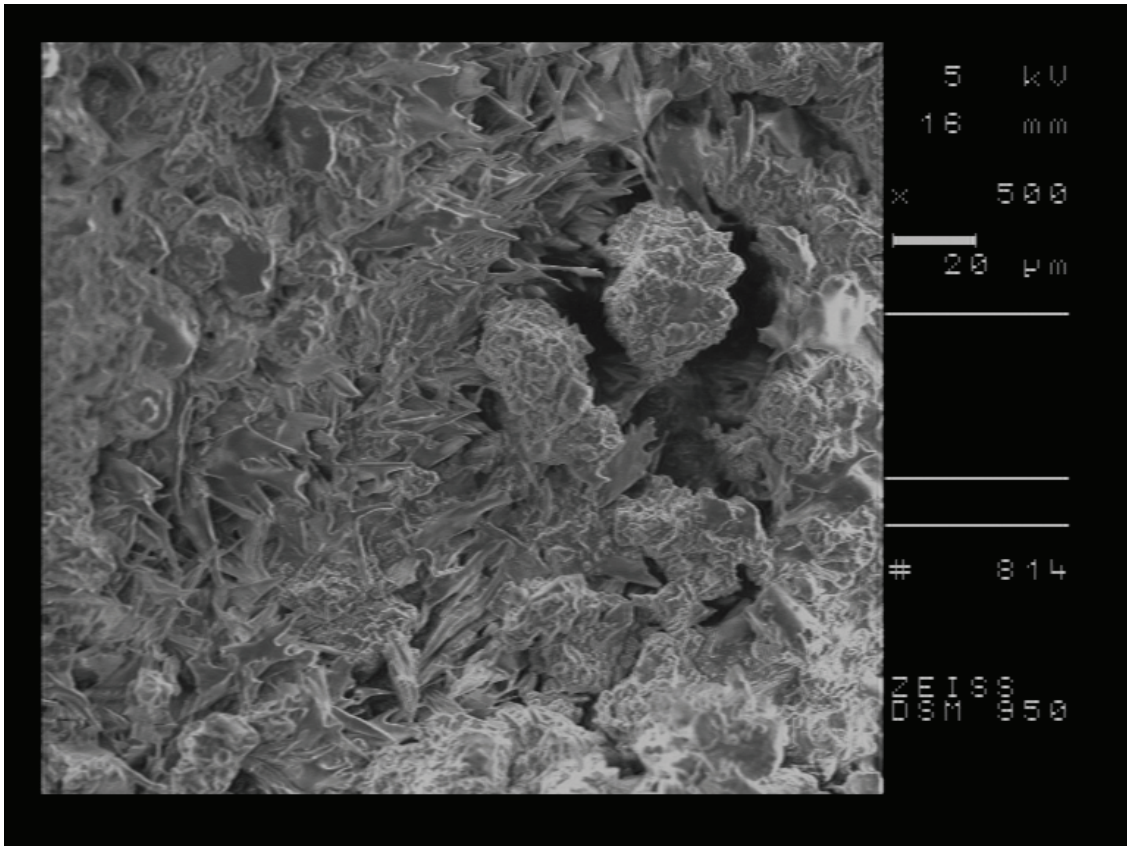


Abbildung 32: 1SWV – VMC – Feinwalze 500 fache Vergrößerung

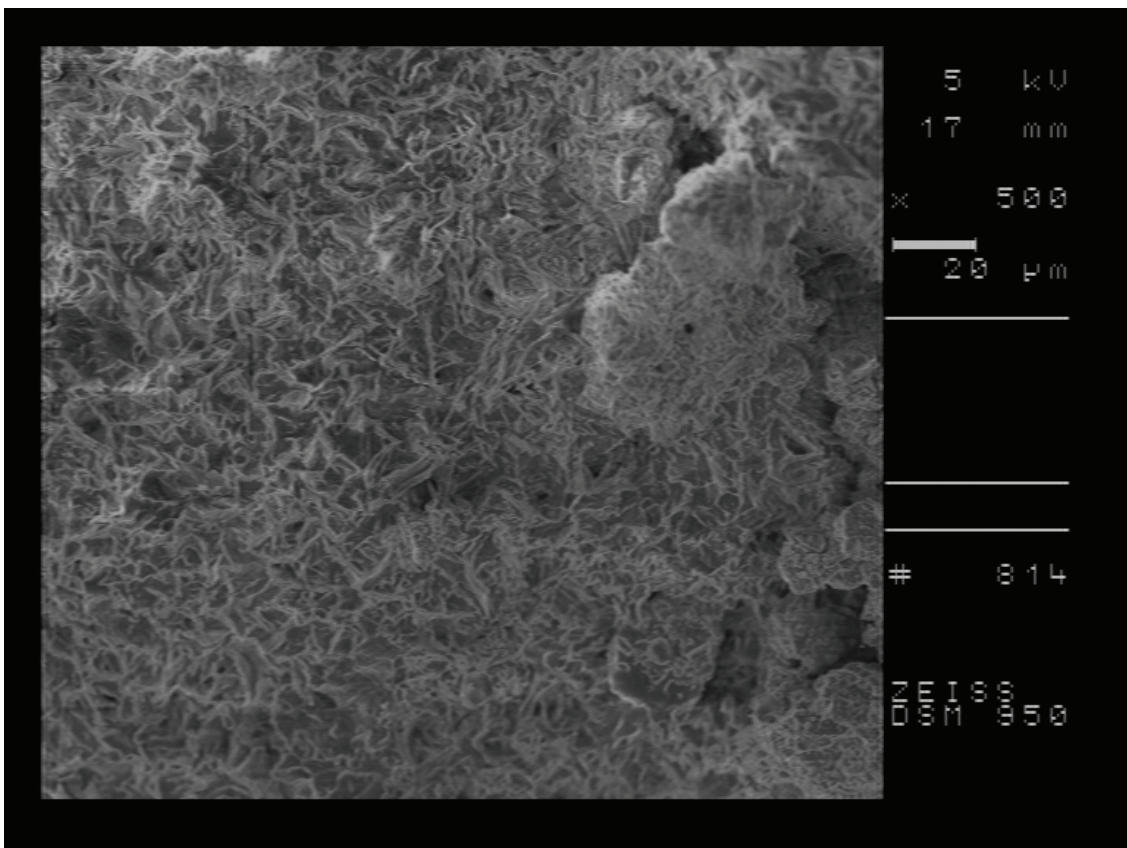


Abbildung 33: 2SWV – VMC – Feinwalze 500 fache Vergrößerung

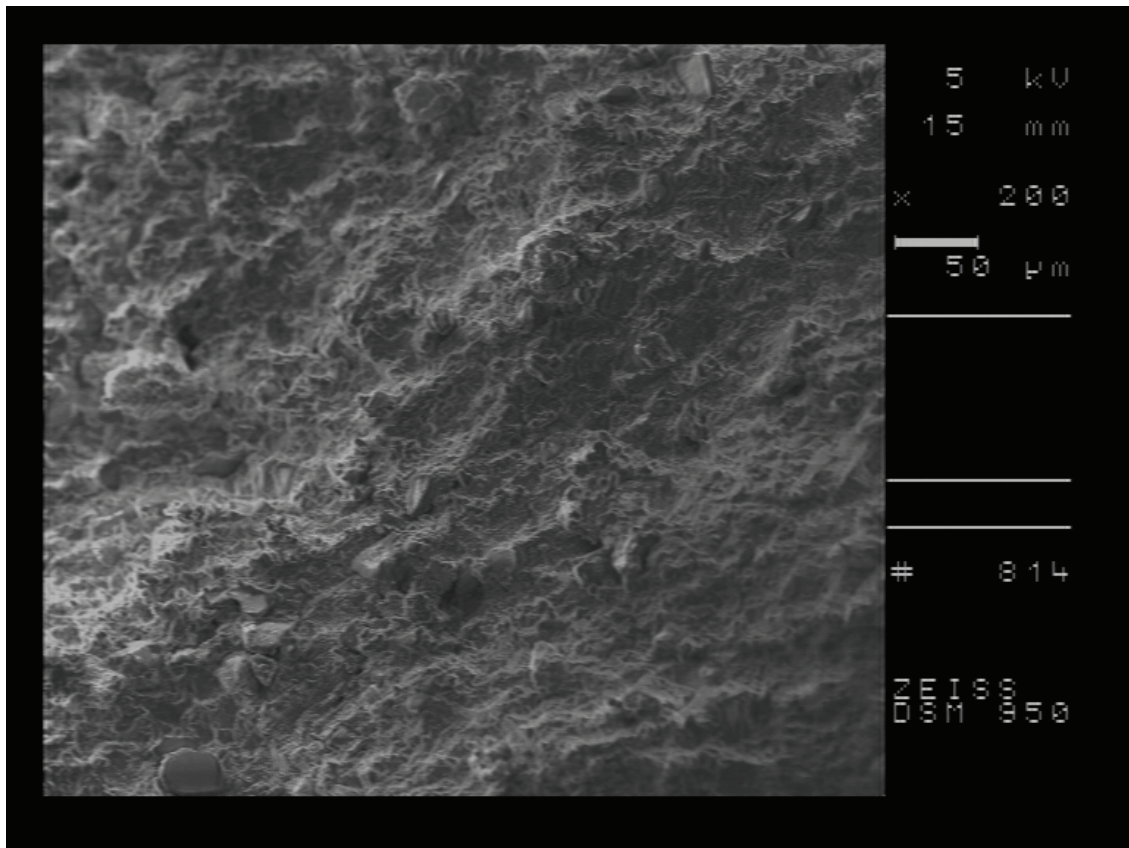


Abbildung 34: 1SWV – VMC – Conche 200 fache Vergrößerung

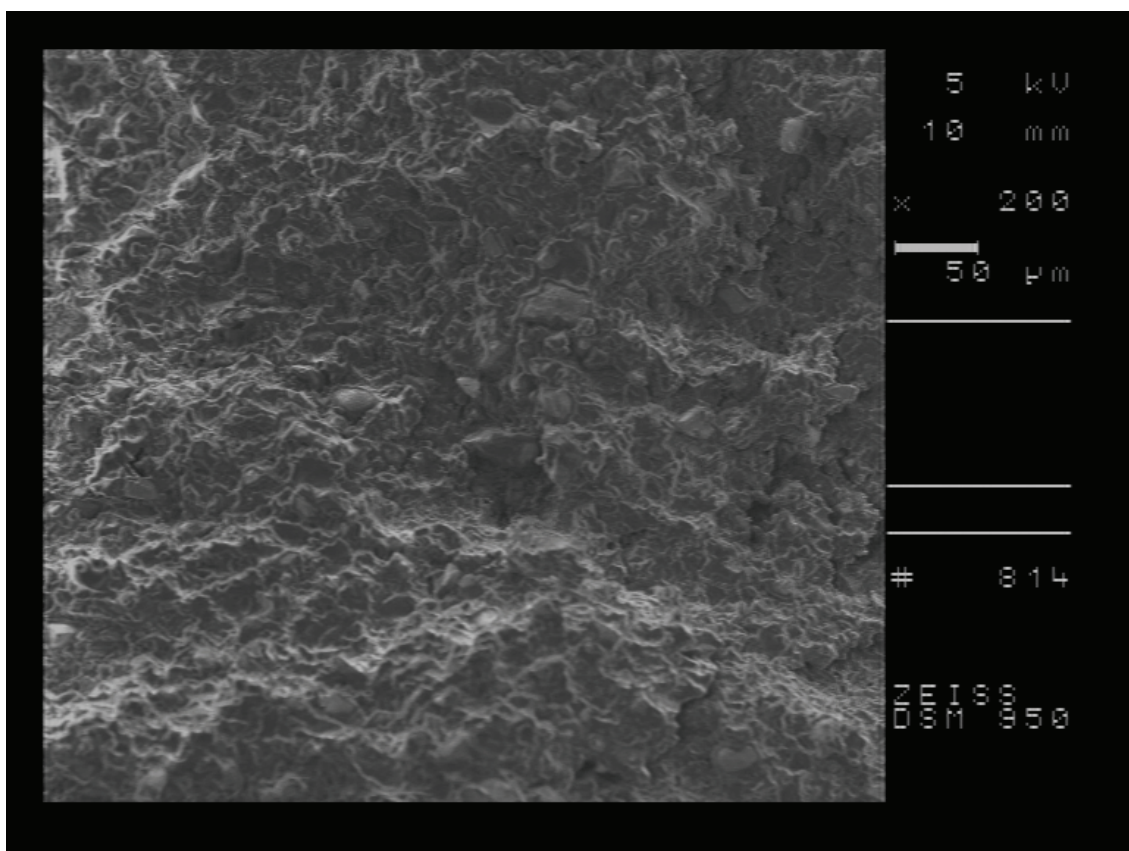


Abbildung 35: 2SWV – VMC – Conche 200 fache Vergrößerung

4.2.2 Schokoladenmasse VMB im 2SWV und 1SWV

Die REM-Aufnahme der Mischerprobe (2SWV) ist zur Vervollständigung abgebildet. Sie (Abbildung 36) enthält sehr große Strukturen, die durch die glatte Oberfläche als Zuckerkristalle zu erkennen sind. Die restliche Oberfläche ist sehr stark zerklüftet und uneben, was aus den vielen verschieden großen Rohstoffen entsteht.

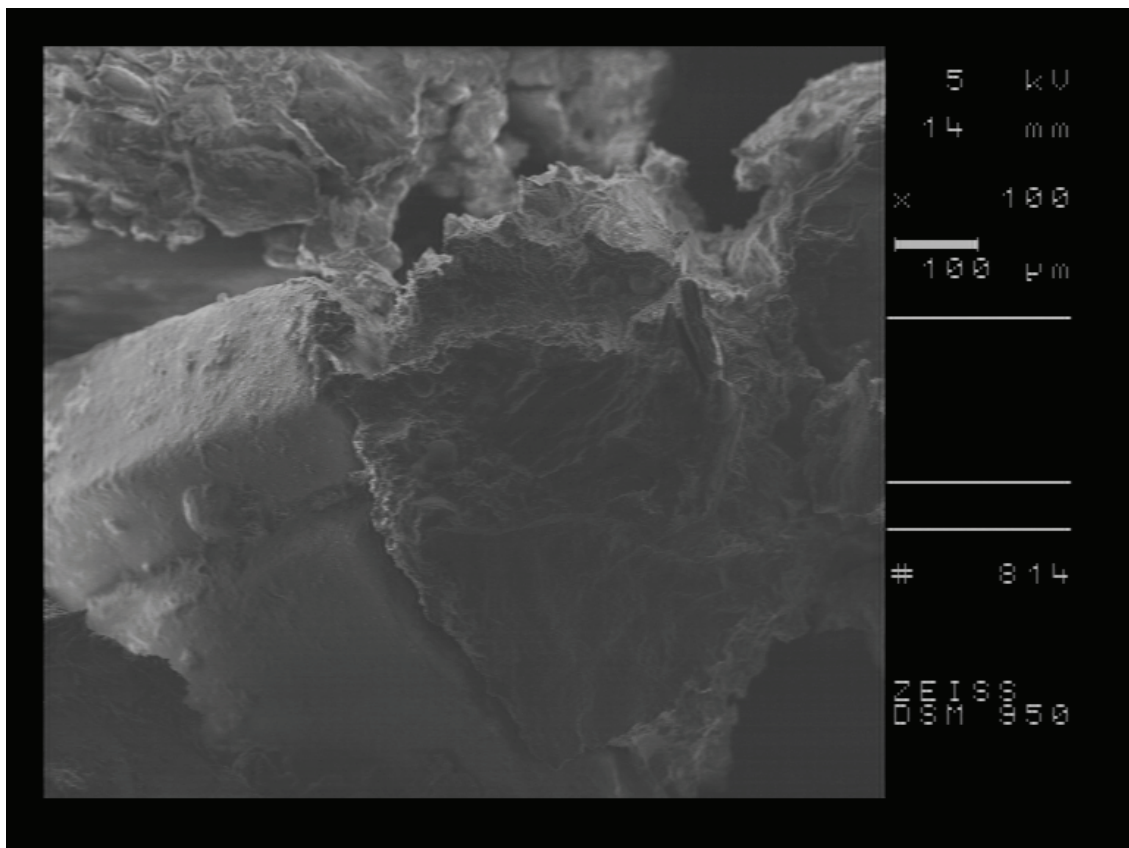


Abbildung 36: 2SWV – VMB – Mischer 100 fache Vergrößerung

Abbildung 37 bis Abbildung 42 zeigen die REM-Aufnahmen der vergleichbaren Prozessschritte der VMB vom 2SWV und 1SWV.

Abbildung 37 und Abbildung 38 (Seite 56) zeigen die Vorwalzwerk- und Knetprobe mit ihrer sehr ähnlichen Oberfläche. Sichtbar sind viele im Fett eingeschlossene Partikel von Milchpulver und Laktose. Die Vorwalzwerkprobe hat im Bild ein großes kristallartiges Partikel, wobei es sich um Kristallzucker oder Laktose handeln kann. Die Schokoladenmasse ist auf 190 bis 200 μm kalibriert und dieses Partikel kann in diesem Größenbereich liegen. Bei dem kristallartigem Partikel der Knetprobe kann es sich auch um und Laktose oder Kristallzucker handeln. In der Vorwalzwerk- und Knetprobenaufnahme sind außerdem kugelförmige Partikel zu sehen, wobei es sich um das Sprühmilchpulver-VMB handeln kann.

Die Bilder der Feinwalzgutproben sind in Abbildung 39 und Abbildung 40 (Seite 57) dargestellt und zeigen längliche, plättchenartige dünne Formen. Zusätzlich sind auch wieder zusammengeballte Partikelstrukturen sichtbar, die auf Agglomerate hindeuten. Im 1SWV sind mehr Agglomerate als beim 2SWV zu sehen.

Die Concheproben Abbildung 41 und Abbildung 42, (Seite 58) sehen in den Aufnahmen beide sehr eben aus und sind sich sehr ähnlich. Die Oberflächen sind nur minimal zerklüftet mit kleinen sichtbaren Partikeln auf der Oberfläche. Agglomerate wie bei den Feinwalzwerkproben sind nicht mehr erkennbar.

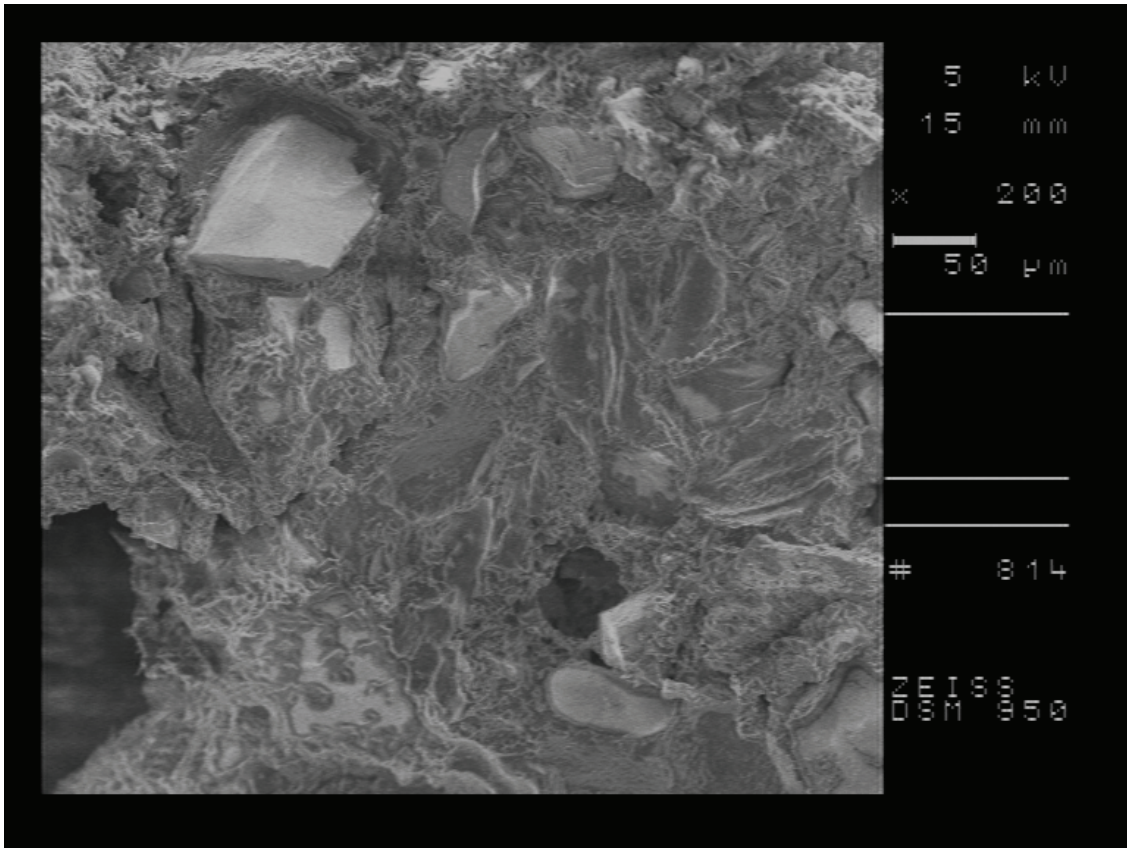


Abbildung 37: 2SWV – VMB – Vorwalze 200 fache Vergrößerung

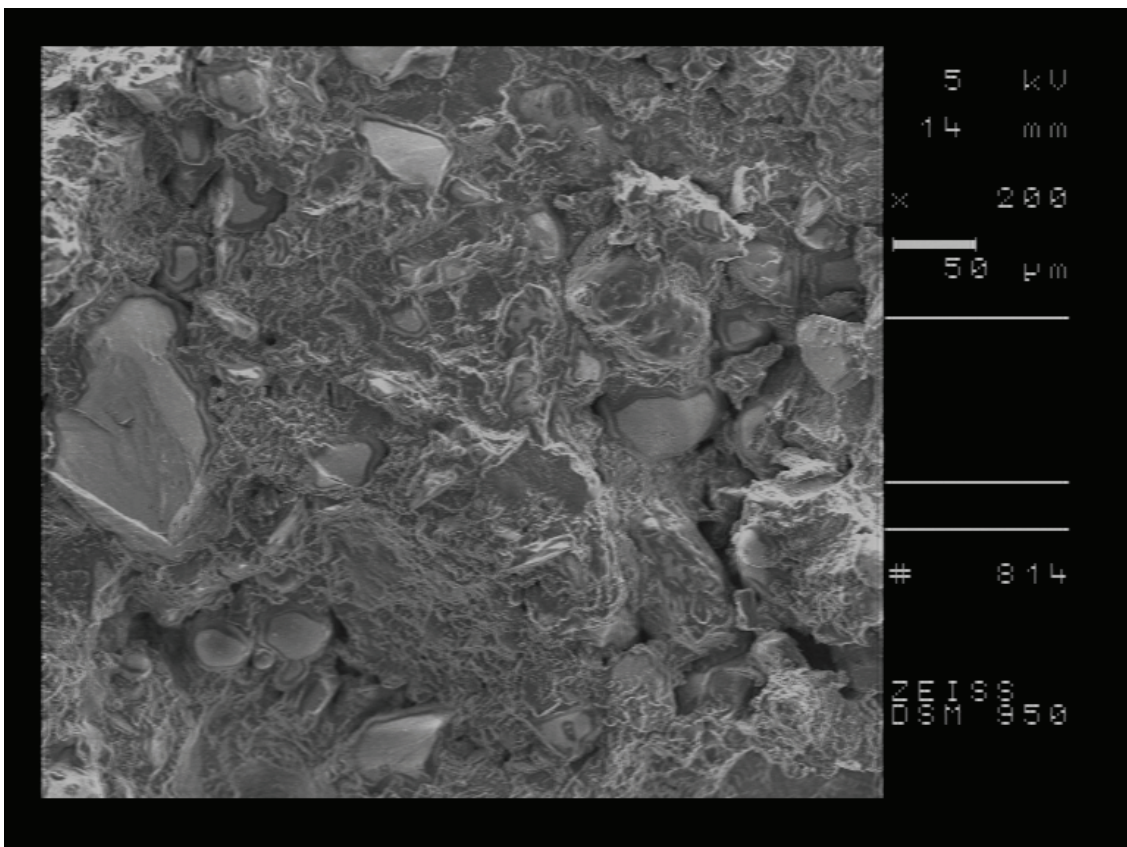


Abbildung 38: 1SWV – VMB – Knetter 200 fache Vergrößerung

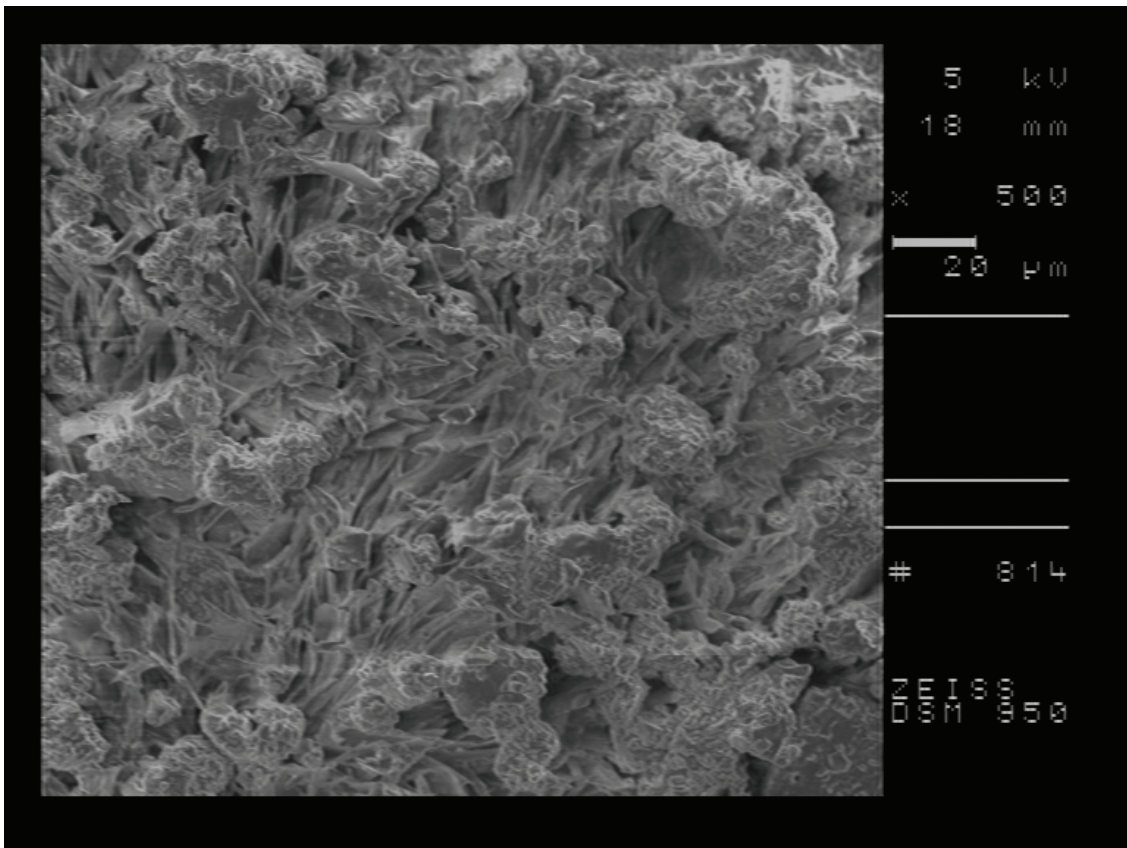


Abbildung 39: 2SWV – VMB – Feinwalze 500 fache Vergrößerung

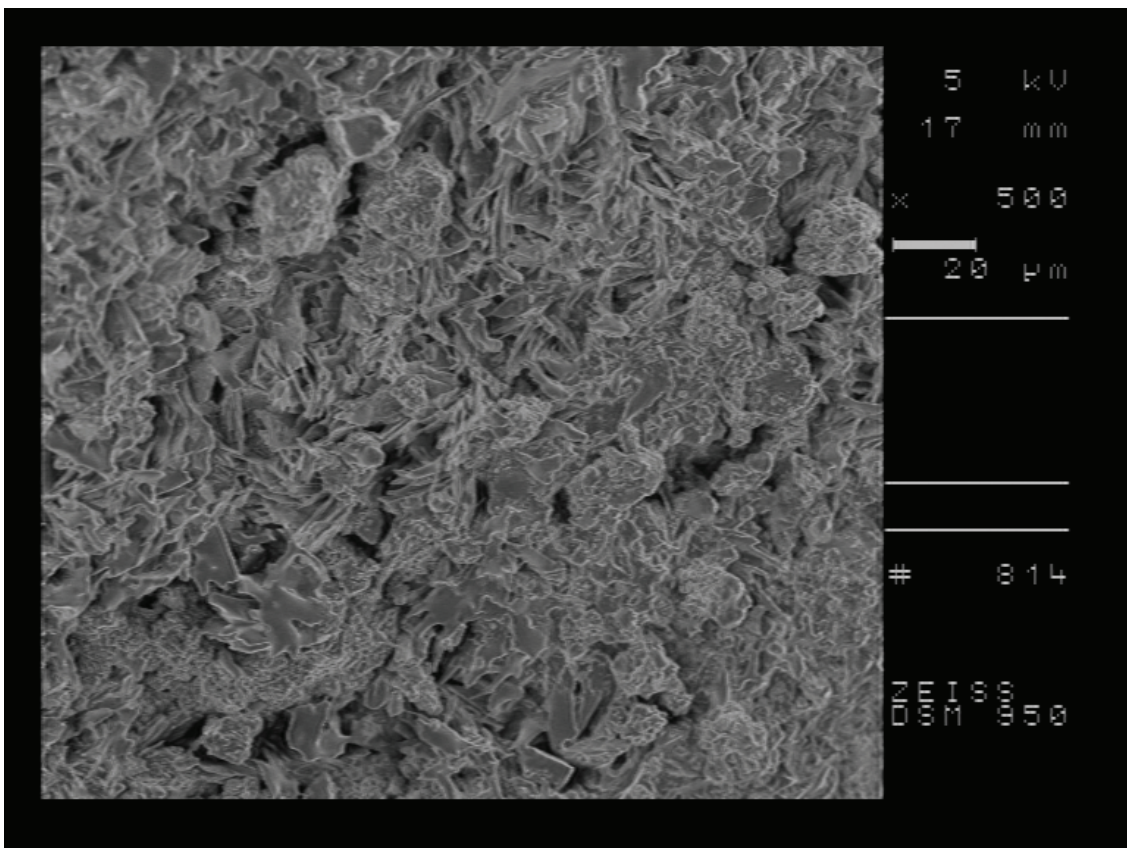


Abbildung 40: 1SWV – VMB – Feinwalze 500 fache Vergrößerung

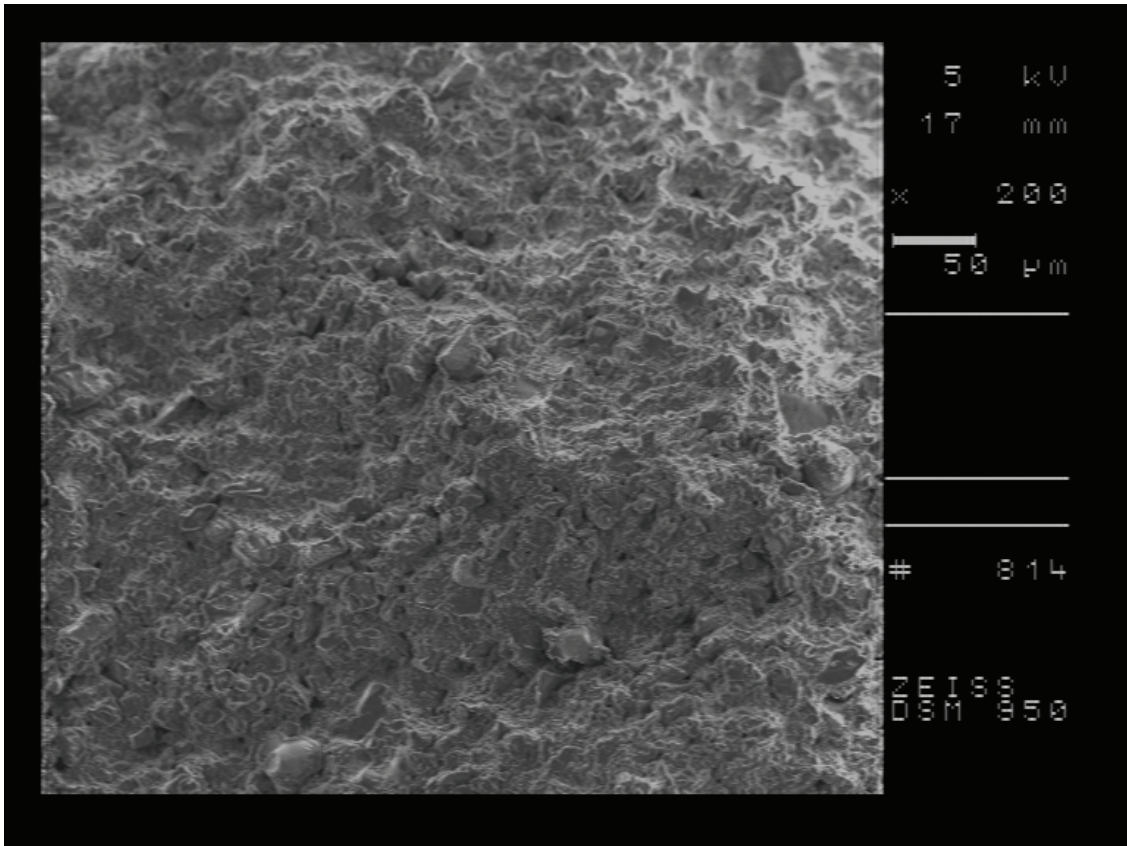


Abbildung 41: 2SWV – VMB – Conche 200 fache Vergrößerung

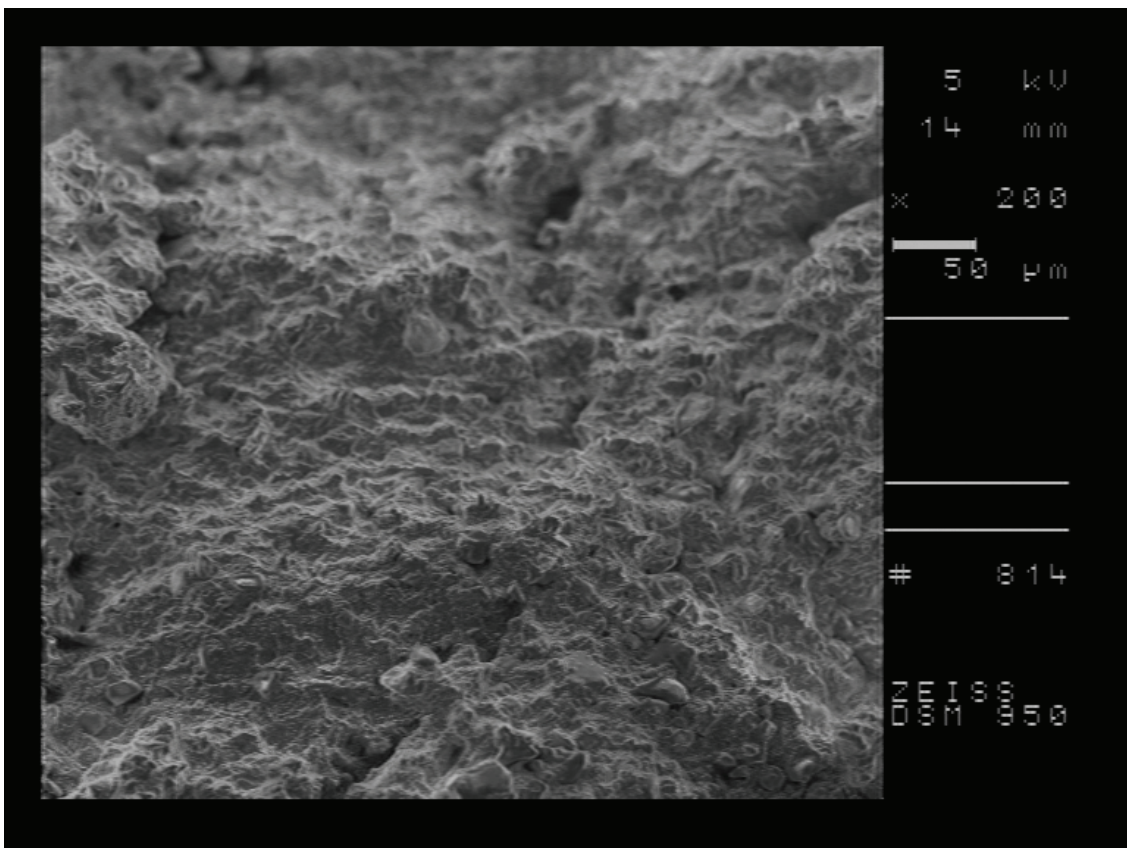


Abbildung 42: 1SWV – VMB – Conche 200 fache Vergrößerung

4.3 Partikelverteilung der Rohstoffe und Prozessschritte

4.3.1 optimale Messparameter aller Proben mit dem Laser-Spektrometer

Die Bestimmung der optimalen Messparameter mit der Nassdispergier- sowie Trockeneinheit war für die Ermittlung von verwendbaren Ergebnissen grundlegend.

Standardmäßig wurden mit der Nassdispergiereinheit bereits Kakaomassen und Schokoladenmassen als Concheproben untersucht. Daher standen für diese Proben die einzustellenden Parameter fest. Hingegen weichen die enthaltenen Partikel und deren Größenverteilung bei Proben vom Mischer, Knetter, Vorwalz- und Feinwalzwerk von den Concheproben ab. Es war sicherzustellen, dass die Messergebnisse nicht durch die gewählten Parameter beeinflusst werden. Bei der Nassdispergiereinheit sind die wesentlichsten Parameter, welche verändert werden können, die Messdauer des Hintergrunds, die Dauer der Probenmessung, die optische Abschattung und die Dauer der Ultraschallbehandlung. Wie in Tabelle 4 zu sehen, wurde bei allen Proben die Dauer der Hintergrunds- und Probenmessung immer konstant gelassen, da sie in dem eingestellten Bereich keinen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Weiterhin ist in Tabelle 4 sichtbar, dass sich die Dauer der Ultraschallbehandlung der einzelnen Proben erheblich unterscheidet, was sich aus den Graphen (Abbildung 102 bis Abbildung 105, Anhang 3 Seite 146 bis 149) ergibt.

Bei den Mischerproben zeigen die Kurven (Abbildung 102), dass in dem Probenmaterial ohne Ultraschallbehandlung noch Agglomerate vorhanden sind, erkennbar an der leichten Verschiebung der Kurve in den groben Bereich. Die Dauer der Ultraschallbehandlung von 30 oder 60 s scheint keinen zerkleinernden Einfluss zu haben. Festgelegt wurden somit 30 s.

Die Ultraschallbehandlungsdauer der Vorwalzwerkproben (Abbildung 103) ergeben Kurven mit ähnlichem Verlauf, die weiter voneinander abweichen. Es ist nicht genau festlegbar, ob es generell eine Partikelzerkleinerung gibt bzw. ob alle Agglomerate aufgetrennt werden. Festgelegt wurde eine Dauer von 30 s, um Mischer- und Vorwalzproben gleich zu behandeln.

Die Knetterproben (Abbildung 104) werden identisch zu den Mischer- und Vorwalzwerkproben behandelt. Die Kurvenverläufe sind ähnlich mit leichten Unterschieden beim zweiten Peak.

Für die Ultraschallbehandlungsdauer des Feinwalzguts (Abbildung 105) sind 30, 60, 75 und 90 s untersucht worden. Nach 30 und 60 s waren auf dem Boden des Gläschens der Probenaufbereitung noch größere, nicht im Öl verteilte Probestückchen zu sehen, was die groben Partikel bei der Kurve von 30 s erklärt. Eine Ultraschallbehandlungsdauer von 75 s ist opti-

mal, da alle Feinwalzgutkrümel im Öl gelöst sind und keine Partikelzerkleinerung auftritt im Vergleich zu 90 s, bei der sich die Kurve leicht in den feineren Bereich verschiebt.

Die optische Abschattung (Tabelle 4) wurde ebenfalls konstant bei 25 % gehalten (Abbildung 106 bis Abbildung 109 im Anhang 4, Seite 150 bis 153). Getestet wurden Abschattungen von 5, 10 und 25 %. Gründe für die Wahl von 25 % sind, dass ausreichend aufbereitetes Probenmaterial in die Dispergiereinheit gebracht werden soll. Weiterhin ist die Zugabe von nur 5 % generell als zu gering anzusehen. Die Kurven von 10 und 25 % sind sich bei den meisten Prozessproben sehr ähnlich, so dass durch die bereits standardmäßig verwendeten 25 % für die Concheproben für alle als identisch festgelegt wurden. Nachteilig an der sehr hohen Probezugabemenge ist, dass die Reinigung der Messeinheit bei Mischer-, Knet- und Vorwalzwerkproben länger dauert und öfter gespült werden muss.

Tabelle 4: messrelevante Parameter bei der Nassdispergiereinheit

Probenmaterial	Hintergrundmesszeit [s]	Probenmesszeit [s]	optische Abschattung [%]	Ultraschall-dauer [s]
Standardeinstellungen bekannter Probematerialien				
Kakaomassen	10	15	25	60
nach Conche	10	15	25	60
1SWV				
nach Knet	10	15	25	30
nach Feinwalze	10	15	25	75
2SWV				
nach Mischer	10	15	25	30
nach Vorwalze	10	15	25	30
nach Feinwalze	10	15	25	75

Da die Trockenmesseinheit zur Untersuchung der pulverigen Rohstoffe noch nicht eingefahren war, mussten zunächst die Einstellungen für brauchbare Ergebnisse herausgefunden werden. Dabei sind die entscheidenden Parameter, welche eingestellt werden können, der Luftdruck (0,4 bis 4,0 bar) und die Probezugabemenge über die Vibrationsintensität der Aufgabepfanne (10 bis 100 %). Die Hintergrundmessdauer wurde bei 10 s belassen. Die Probemesszeit wurde auf eine Minute festgelegt, so dass genug Probenmaterial die Messzelle passieren kann. Die optische Abschattung wurde auf einen Bereich von 0,3 bis 6,0 % eingestellt. Da sie während einer Messung nicht konstant gehalten werden kann, werden nur Messwerte inner-

halb dieses Bereichs für die Berechnung der Partikelverteilung einbezogen. Die Vibrationsintensität der Probeaufgabepfanne (Tabelle 5) liegt zwischen 30 und 50 %, was abhängig von den Eigenschaften der jeweiligen Pulver ist. Das Walzenmilchpulver rieselt nur sehr schwer in den Probezufuhrmechanismus, so dass es auf der Aufgabepfanne immer wieder von Hand verteilt werden muss. Zu begründen ist dieses Verhalten mit dem vorhandenen Freifett des Pulvers. Bei Walzenmilchpulver gibt es einen sehr hohen Anteil an freiem Fett, wodurch es schnell verklebt und schlecht rieselt. Bei Vanillin und Sprühmilchpulver-VMC bewirkt die mittlere Vibrationsintensität, dass mehr Pulver durch die sich leicht bewegenden Kugeln am Eingang der Probenzufuhr hindurchgelangt. Laktose, Staubzucker und Sprühmilchpulver-VMB benötigen nur eine geringe Vibrationsintensität, da sie sehr gut und schnell in den Probezufuhrmechanismus rieseln und an den Kugeln vorbeigeleitet werden.

Der Luftdruck liegt bei allen Proben in annähernd dem gleichen Bereich. Er soll vorhandene Agglomerate auftrennen, jedoch keine Partikel zerkleinern. In Abbildung 110 bis Abbildung 115 (Anhang 5, Seite 154 bis 156) sind die Grafiken dargestellt, mit denen die Luftdrücke festgelegt wurden. Für die Einstellungen des Luftdrucks der einzelnen pulverigen Rohstoffe wurden die Drücke, bei denen im Verlauf der Kurven (besonders von $d(0,1)$ und $d(0,5)$) eine Parallelität zur Abszisse erkennbar ist, gewählt. Bei dem jeweiligen Druck sollen vorhandene Agglomerate ohne Partikelzerkleinerung aufgetrennt werden.

Tabelle 5: messrelevante Parameter bei der Trockenmessenheit

Probenmaterial	Hintergrundmesszeit [s]	Probemesszeit [s]	Probezugabemenge [%]	Luftdruck [bar]
Rohstoffe VMC und VMB				
Walzenmilchpulver	10	60	50	2,0
Laktose	10	60	30	2,0
Vanillin	10	60	40	2,4
Rohstoffe VMC				
Sprühmilchpulver-VMC	10	60	40	2,0
Staubzucker	10	60	30	2,0
Rohstoffe VMB				
Sprühmilchpulver-VMB	10	60	30	2,4

4.3.2 Rohstoffe der VMC und VMB

Da bei den Messungen mit der Trockeneinheit keine automatischen Mittelwerte gebildet werden können, wurde jede Probe einer Dreifachbestimmung unterzogen und daraus ein Mittelwert gebildet. Die folgenden Abbildungen zeigen die Partikelverteilung der einzelnen Rohstoffe von VMB und/oder VMC. Tabelle 25 (Anhang 6, Seite 157) zeigt eine Auflistung der gemittelten Werte aller Trockenrohstoffe zur näheren Beschreibung der Kurvenverläufe.

Die Partikelverteilung des Walzenmilchpulvers (Abbildung 43) zeigt schmale, spitz zulaufende Kurven mit einer recht engen Partikelverteilung. Bestätigt wird das durch die kleinen Span-Werte (Tabelle 25, Seite 157). Der größte Partikelanteil dieser Verteilungen, ausgedrückt durch den Mode-Wert, liegt bei einem Durchmesser von ca. 150 μm . Das ist für die trockenen, pulverigen Rohstoffe der Schokoladenherstellung als grober Bereich anzusehen, da sie keiner Zerkleinerung vor dem Feinwalzwerk unterzogen werden. Weiterhin sind die Werte der spezifischen Oberfläche sehr gering, was zusätzlich für die großen Partikel spricht. Zusätzlich wird das durch die einzelnen d-Werte bestätigt. Die Kurven beginnen bei ca. 5 bis 14 μm Partikeldurchmesser ($d(0,001)$), steigen stark an (hohe Werte von $d(0,1)$ und $d(0,5)$) und enden ($d(0,999)$) bei ca. 600 μm Partikeldurchmesser. Die Partikelgröße entsteht durch die Trocknung und das Abschaben des Pulvers von den Walzen. Bestätigt wird dies bei der Gegenüberstellung von sprüh- und walzengetrocknetem Milchpulver (Tabelle 1, Seite 10). Innerhalb der Untersuchungen der einzelnen Walzenmilchpulverproben ergeben sich sehr ähnliche Kurven mit nur sehr geringen Abweichungen untereinander. Das zeigt, dass die Partikelgrößen dieses Milchpulvers konstant sind.

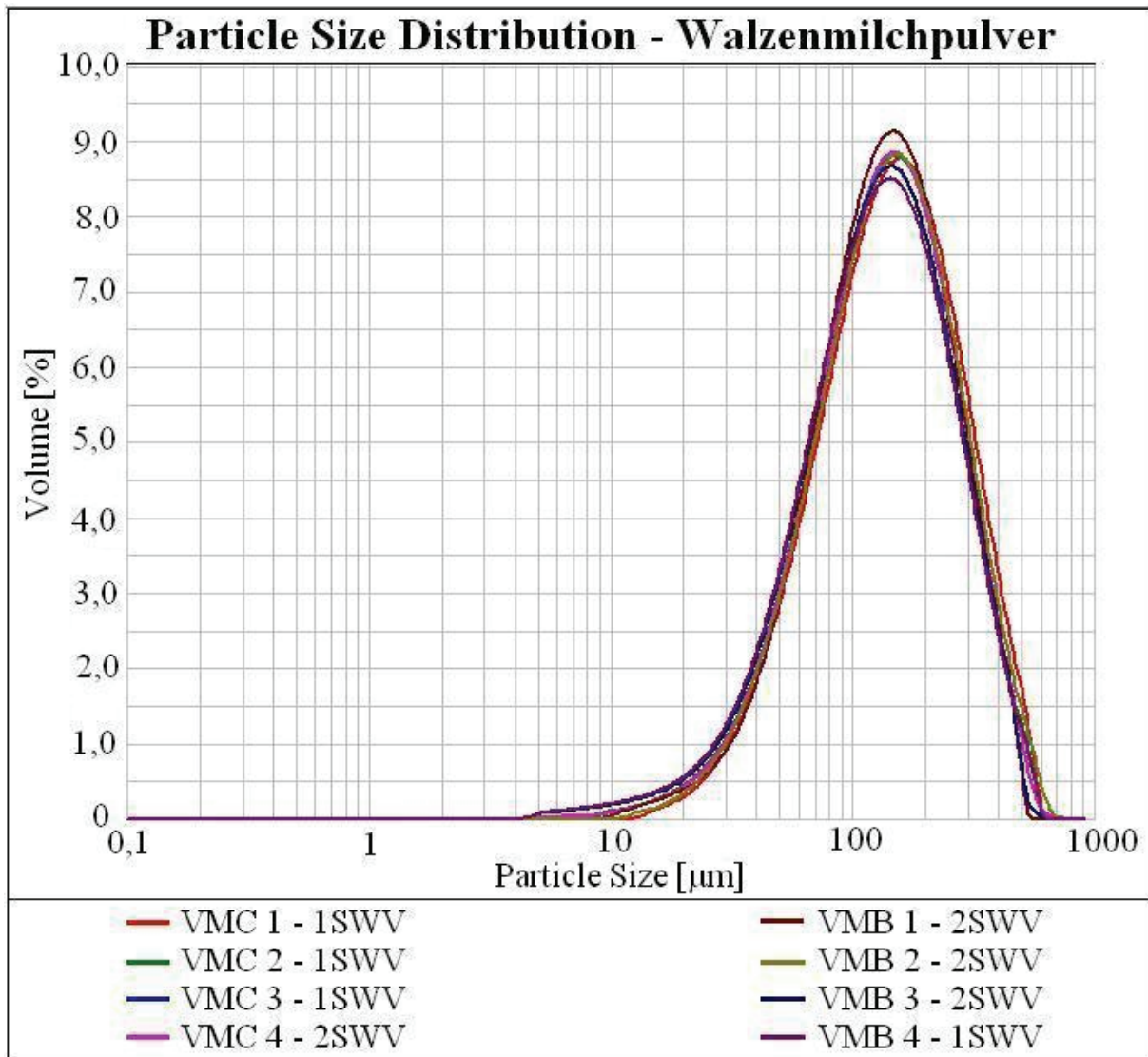


Abbildung 43: Partikelgrößenverteilung von Walzenmilchpulver, verwendet für VMC und VMB im 1SWV und 2SWV

Die Partikelverteilung von Laktose (Abbildung 44) ist relativ breit, was der Span-Wert bestätigt (Tabelle 25, Seite 157). Die Kurve beginnt bei ca. 1 µm ($d(0,001)$) und endet bei etwa 300 µm ($d(0,999)$) Partikeldurchmesser. Die Kurve steigt langsamer an im Vergleich zum Walzenmilchpulver ($d(0,1)$ und $d(0,5)$) und fällt nach dem Mode-Wert langsam wieder ab ($d(0,9)$). Die spezifische Oberfläche zeigt zusammen mit dem Mode-Wert, dass die Partikel kleiner sind als die vom Walzenmilchpulver. Auffällig an den Kurven ist, dass sich im Bereich von 1 bis 3 µm eine größere Partikelmenge befindet.

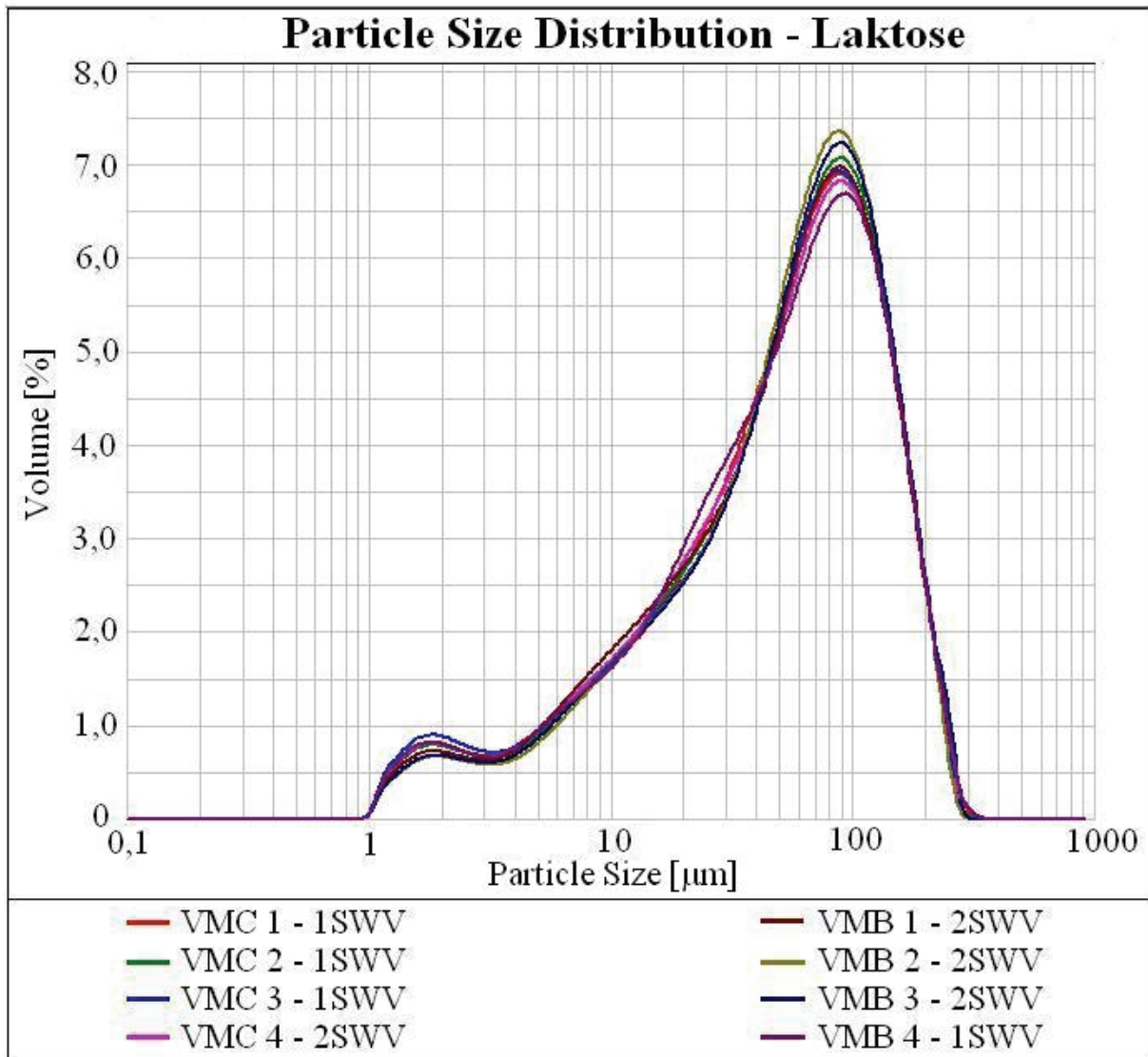


Abbildung 44: Partikelgrößenverteilung von Laktose, verwendet für VMC und VMB im 1SWV und 2SWV

Die Partikel von Vanillin (Abbildung 45) sind breit verteilt, bestätigt durch den Span-Wert (Tabelle 25, Seite 157). Der Mode-Werte liegt bei ca. 140 μm , was für den groben Bereich spricht. Die spezifische Oberfläche verdeutlicht, dass die Partikel größer als die von Laktose sind. Die d-Werte zeigen, dass die Kurve im feinen Bereich beginnt ($d(0,001)$ und $d(0,1)$) und im recht groben Bereich bei ca. 650 μm ($d(0,999)$) Partikeldurchmesser enden. Die meisten Partikel scheinen wesentlich größer als 30 μm zu sein.

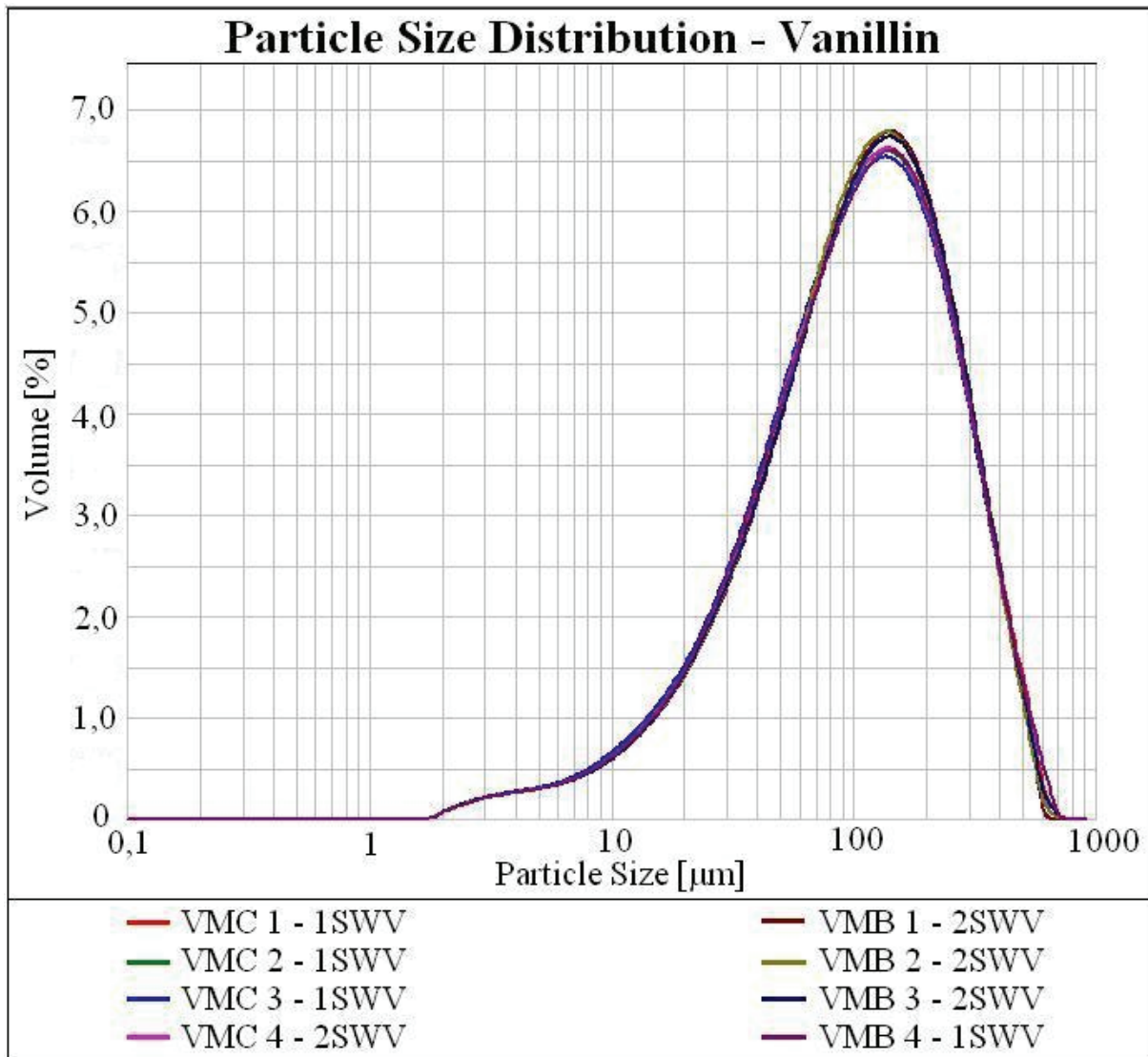


Abbildung 45: Partikelgrößenverteilung von Vanillin, verwendet für VMC und VMB im 1SWV und 2SWV

Bei der Partikelverteilung des Sprühmilchpulvers-VMC (Abbildung 46) zeigt sich, dass die Proben von den Produktionen der VMC 1, 2 und 3 sehr ähnlich und sehr breit verteilt (Spannweite) sind. Die Kurven beginnen im feinen Bereich bei etwa 1,2 µm Partikeldurchmesser und steigen langsam an. Die Mode-Werte liegen bei ca. 60 µm Durchmesser und sind damit dem $d(0,5)$ sehr ähnlich. Die Kurven zeigen untereinander leichte Abweichungen ab einer Partikelgröße von ca. 400 µm und enden dann im sehr groben Bereich von ca. 930 µm Partikeldurchmesser ($d(0,999)$). Die spezifische Oberfläche deutet wieder auf recht grobe Partikel hin. Die Probe der VMC 4 hat ab einer Partikelgröße von ca. 150 µm einen anderen Kurvenverlauf, mit den größten Partikeln bei etwa 700 µm. Hingegen enden die Kurven der Proben

von VMC 1, 2 und 3 nicht auf der Abszisse, sondern gehen scheinbar über den Messbereich von 1.000 μm hinaus, was der $d(0,999)$ (Tabelle 25, Seite 157) nicht bestätigt.

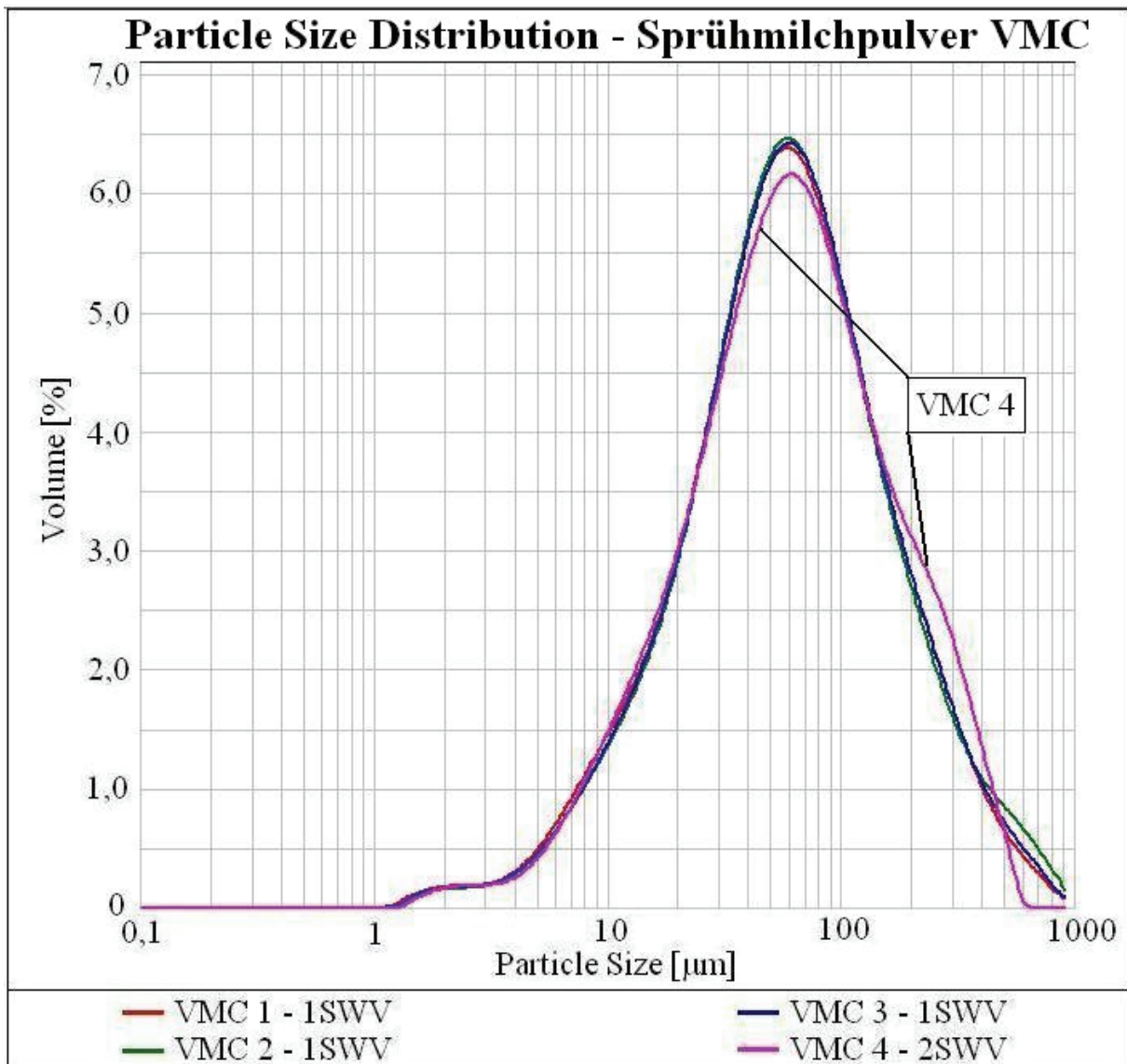


Abbildung 46: Partikelgrößenverteilung von Sprühmilchpulver-VMC, verwendet für VMC im 1SWV und 2SWV

Die Partikelverteilungen des Staubzuckers (Abbildung 47) zeigen wie die Laktose eine breite Partikelverteilung (Span-Werte). Die spezifische Oberfläche weist auf bereits feinere Partikel hin. Bestätigt wird das durch den Beginn der Kurven bei ca. 0,9 μm Partikeldurchmesser ($d(0,001)$). Die Kurven steigen langsam an ($d(0,1)$ und $d(0,5)$) und zeigen mit den Mode-Werten, dass die Partikel bereits recht fein sind. Die Kurven enden im noch recht feinen Bereich von 350 bis 410 μm Partikeldurchmesser. Im Bereich von 1 bis 3 μm befindet sich eine größere Partikelmenge.

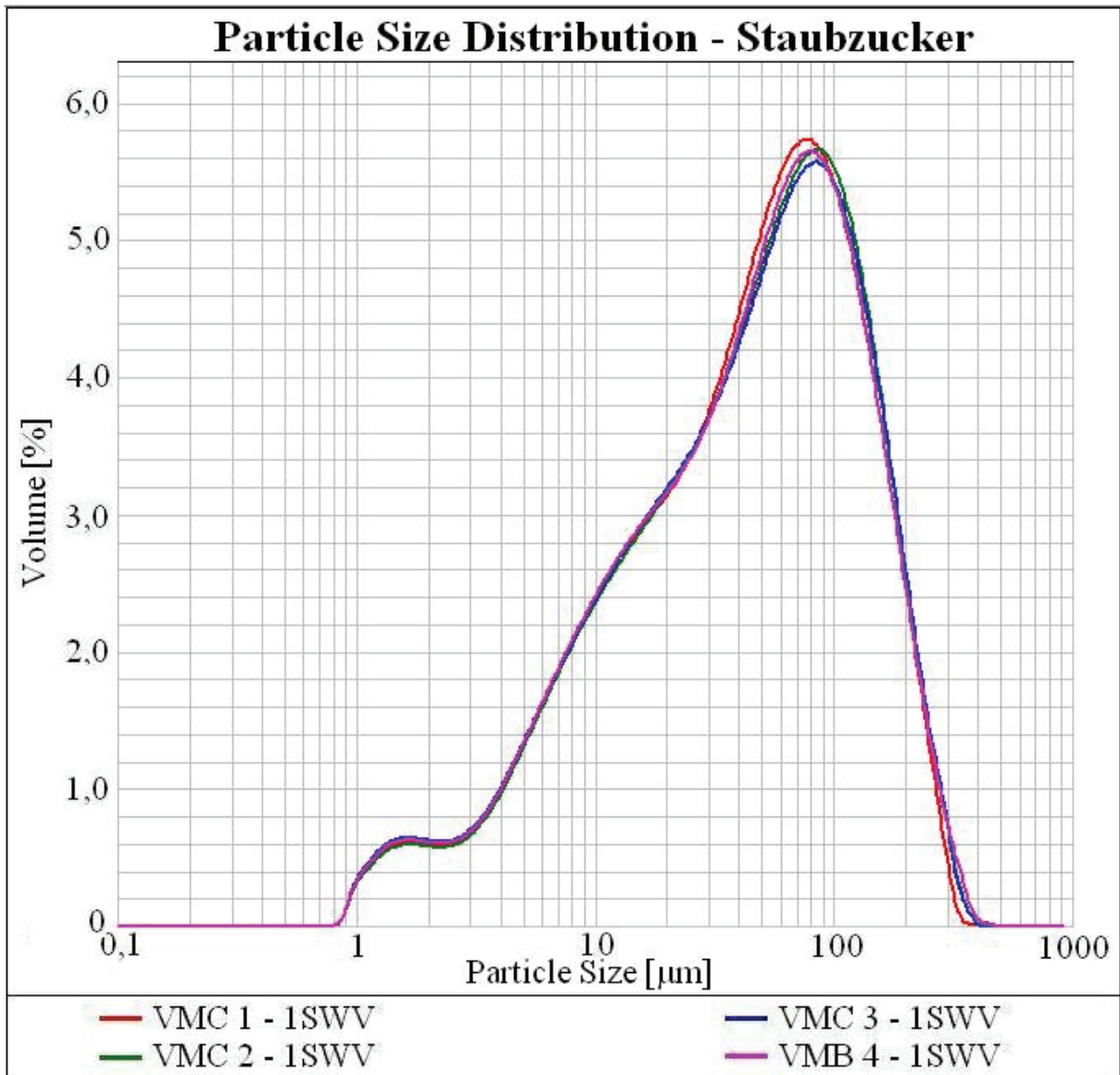


Abbildung 47: Partikelgrößenverteilung von Staubzucker, verwendet für VMC und VMB im 1SWV

Das Sprühmilchpulver-VMB (Abbildung 48) zeigt eine enge Partikelgrößenverteilung, u.a. zu erkennen an der schmalen Kurve, dem hohen Maximum und den Span-Werten. Die spezifische Oberfläche zeigt, dass die Partikel noch relativ grob sind. Jedoch enden die dargestellten Kurven ($d(0,999)$) bei einer Partikelgröße von ca. 260 µm und die einzelnen d-Werte, sowie die Mode-Werte verweisen eher auf feine Partikel (Tabelle 25, Seite 157). Das Sprühmilchpulver-VMB wird sprühgetrocknet, wodurch sich ein ähnlicher Mode-Wert wie beim Sprühmilchpulver-VMC (Abbildung 46) ergibt. Es fällt weiterhin bei Sprühmilchpulver-VMC und Sprühmilchpulver-VMB auf, dass sie im Bereich von ca. 1 bis 3 µm einen geringen Feinanteil aufweisen.

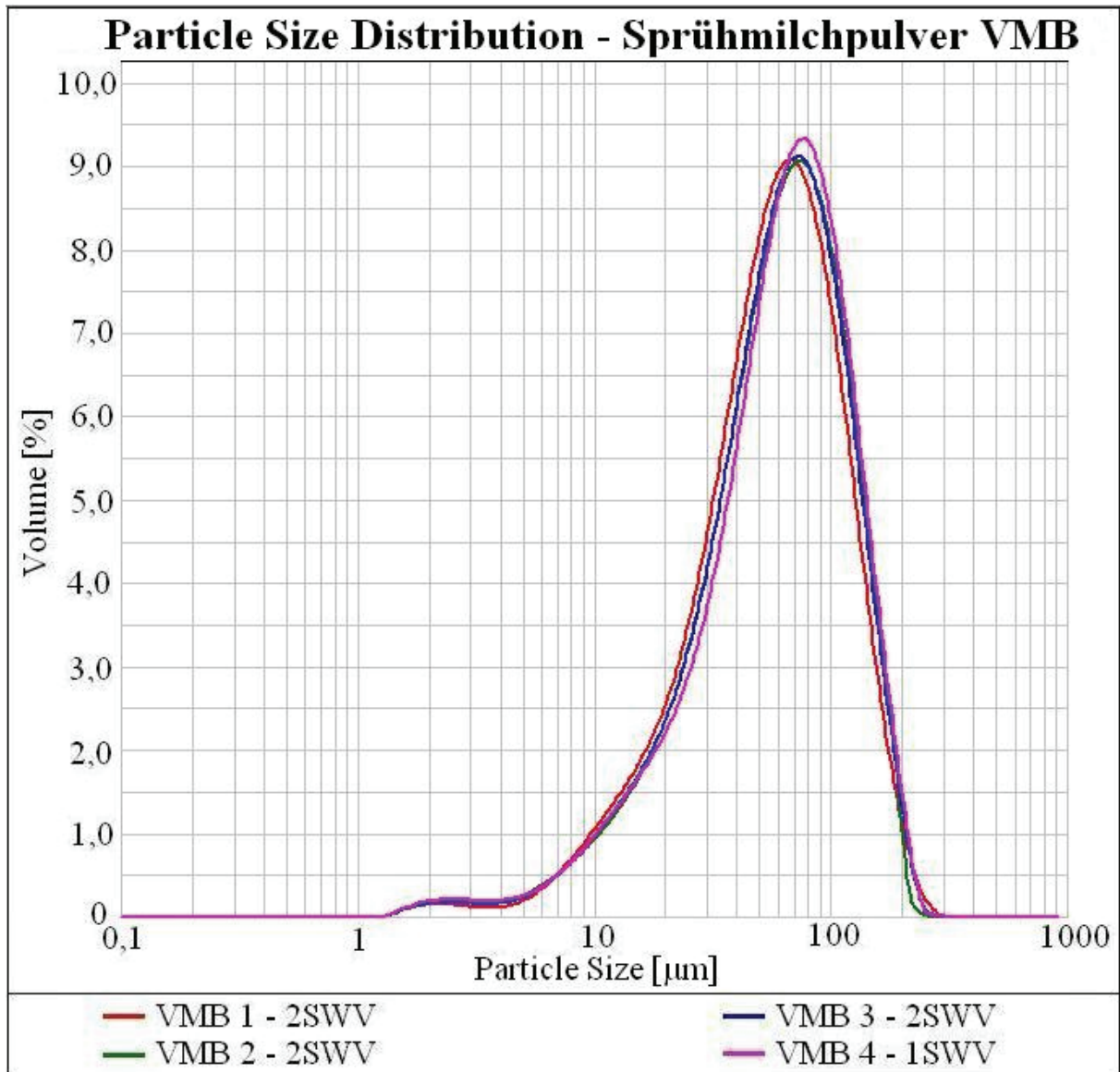


Abbildung 48: Partikelgrößenverteilung von Sprühmilchpulver-VMB, verwendet für VMB im 2SWV und 1SWV

Die in Tabelle 25, Seite 157 dargestellten Standardabweichungen der einzelnen Proben verdeutlichen zusätzlich die ähnlichen Kurvenverläufe. Größere Abweichungen zeigen sich lediglich in den Werten von $d(0,999)$.

Die Abbildung 49 (VMC) und Abbildung 50 (VMB) zeigen die Partikelverteilungen der verwendeten Kakaomassen für beide Vollmilchschokoladen. Tabelle 26 (Anhang 6, Seite 160) enthält die Werte der einzelnen Parameter zur Beschreibung der Partikelverteilungen der untersuchten Kakaomassen. Bei den Kurven fällt auf, dass sie einen sehr ähnlichen Verlauf haben. Bestätigt wird dies von den aufgelisteten Werten von $d(0,001)$, $d(0,1)$, $d(0,5)$, $d(0,9)$, den Mode-Werten, den Span-Werten und den Werten der Specific surface area. Der einzige größere Unterschied zeigt sich in dem $d(0,999)$, welcher das ungefähre Ende der Kurven angibt. Es ist zu erkennen, dass die meisten Partikel aller Kakaomassen bereits sehr fein sind ($d(0,001)$, $d(0,1)$, spezifische Oberfläche).

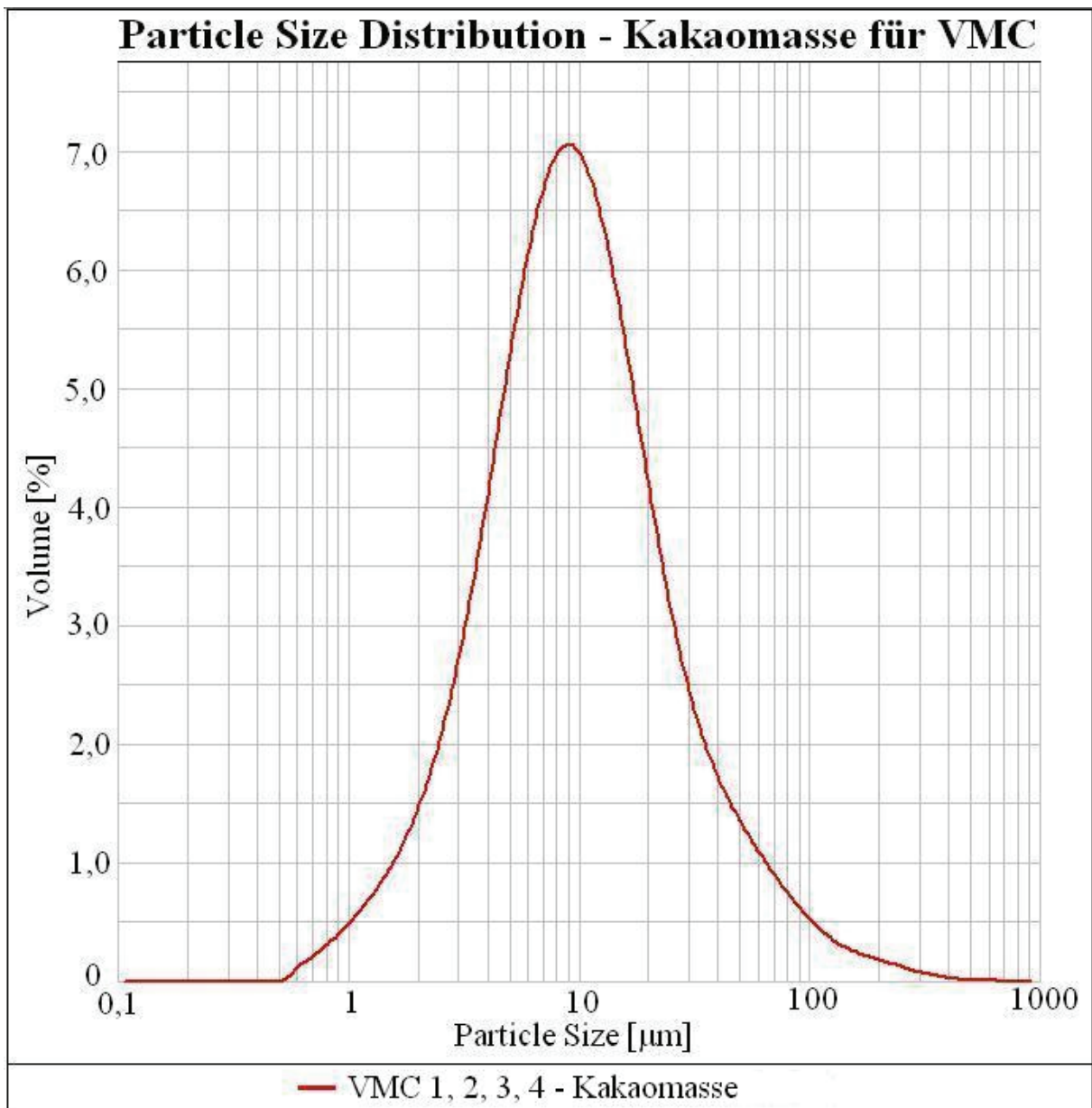


Abbildung 49: Partikelgrößenverteilung von Kakaomasse, verwendet für VMC im 1SWV und 2SWV

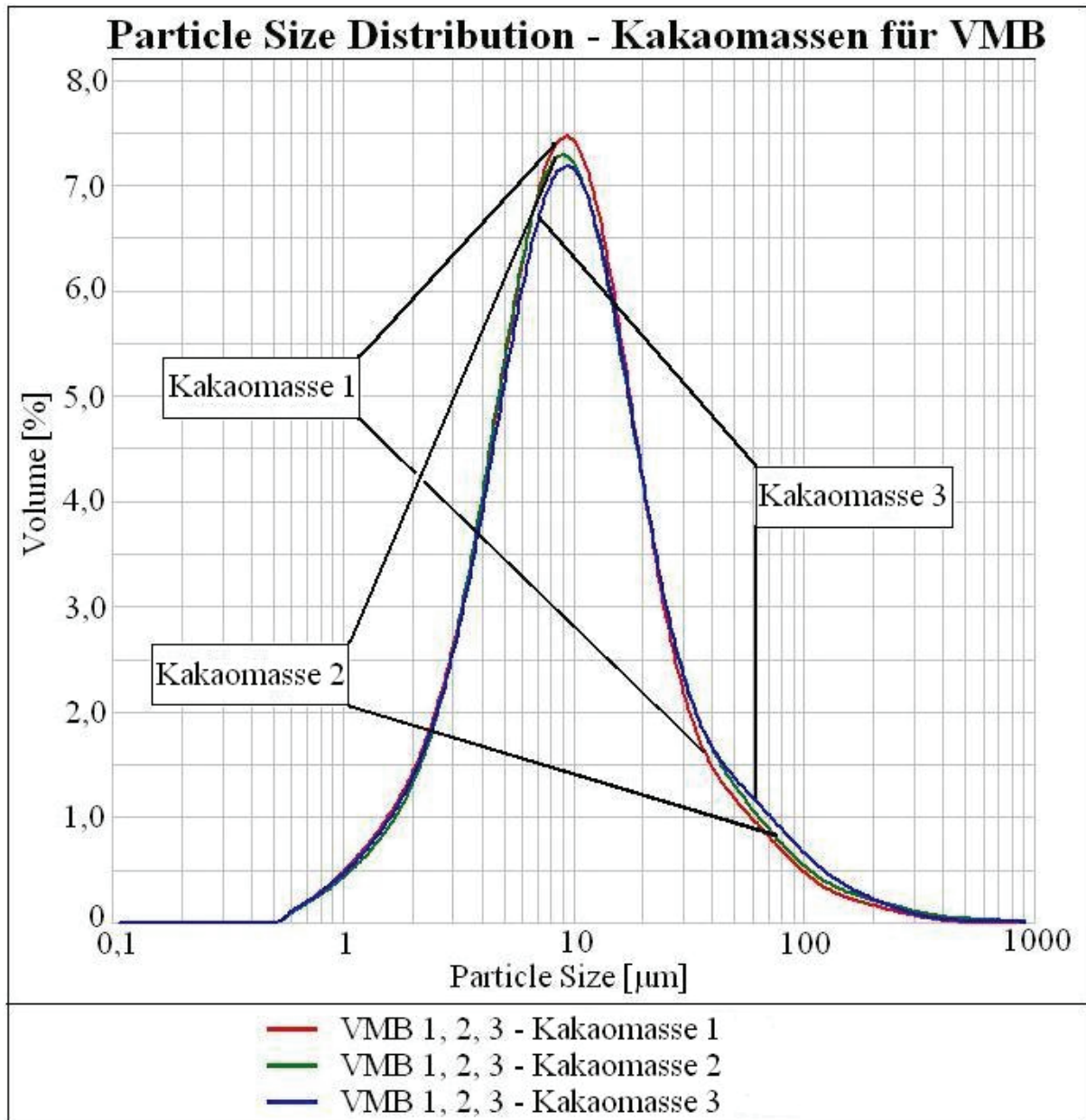


Abbildung 50: Partikelgrößenverteilung der Kakaomassen, verwendet für VMB im 2SWV

Die Kurve der Kakaomassenmischung (Abbildung 51) zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die einzelnen drei Kakaomassen in Abbildung 50. Alle Parameter in Tabelle 26 (Seite 160) zeigen in etwa den Mittelwert von den einzeln untersuchten Kakaomassen von VMB 1, 2 und 3. Die Werte von $d(0,001)$, $d(0,1)$, $d(0,5)$, $d(0,9)$, sowie die Werte der spezifischen Oberfläche und des Mode verdeutlichen die geringen Durchmesser der Partikel. Die Span-Werte zeigen für alle Kakaomasse, dass es sich um breite Partikelverteilungen handelt.

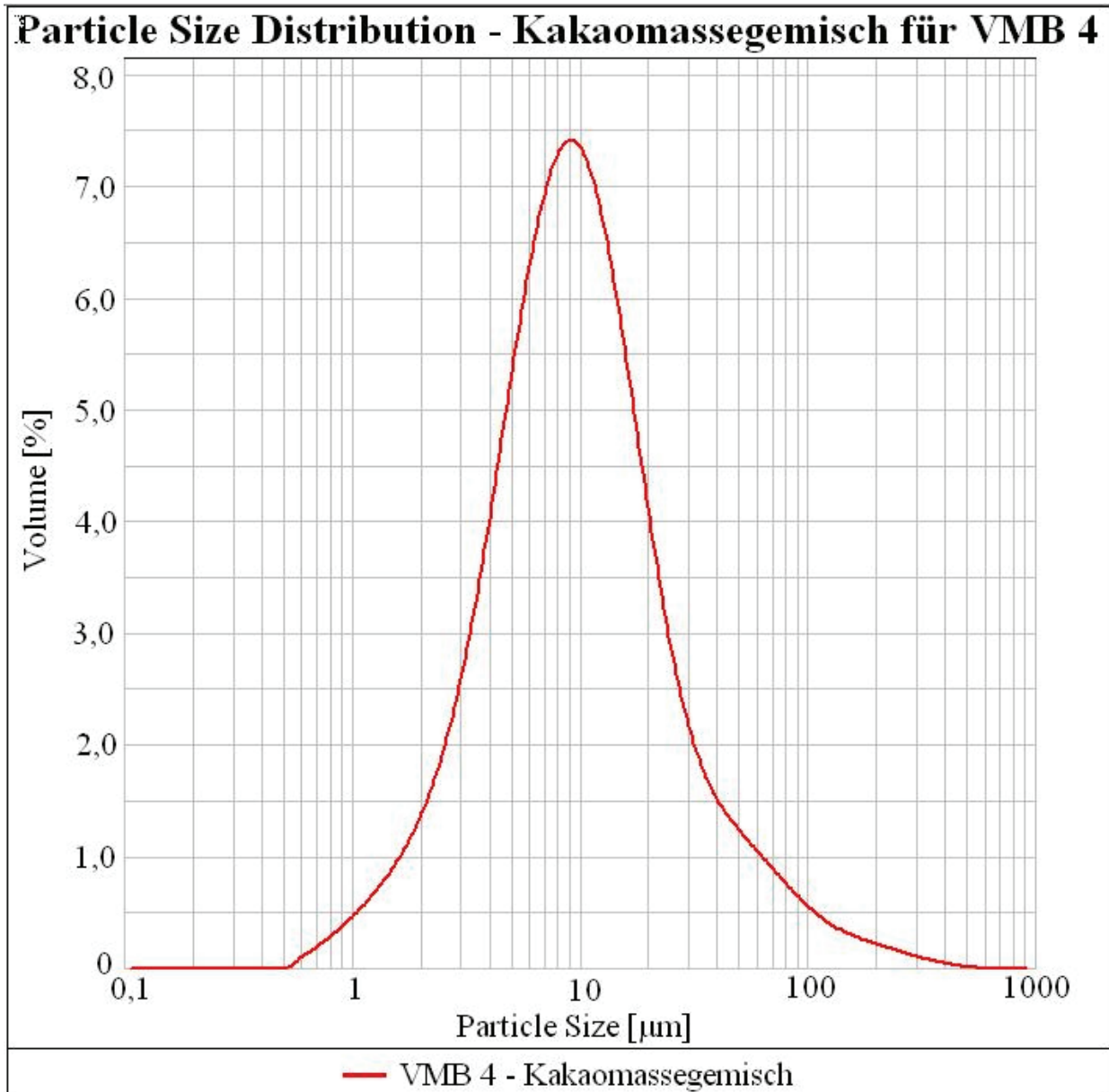


Abbildung 51: Partikelgrößenverteilung des Kakaomassengemisches, verwendet für VMB im 1SWV

Die fehlende zweite Kakaomasseprobe der VMC 4 im 2SWV kann nicht dargestellt werden, da aus anlagentechnischen Gründen keine Probe gezogen werden konnte.

4.3.3 Schokolademasse VMC im 1SWV und 2SWV

Bei den folgenden Abbildung 53 bis Abbildung 55 der VMC sind die Partikelverteilungen der vergleichbaren Prozessstufen vom 1SWV und 2SWV, wie bereits bei den REM-Aufnahmen, gegenübergestellt. Die Feinwalzwerkproben wurden für diese Untersuchung vom Transportband genommen. In Abbildungen und Tabellen gezeigte Mittelwerte der VMC 1, 2, 3 sind im Anhang 7 von den Proben einzeln dargestellt. Die Kurve der Mischerprobe ist wiederum allein abgebildet.

Die Partikelverteilungen (Abbildung 52) der beiden Mischerproben von VMC 4 weichen etwas weiter voneinander ab (Tabelle 6). Die Kurven haben einen bimodalen Verlauf, beginnen im sehr feinen Bereich ($d(0,001)$) und enden bei 640 bis 680 μm ($d(0,999)$). Die Partikel sind breit verteilt (Span-Werte). Die spezifische Oberfläche zeigt, dass es sich nicht um sehr grobe Partikel handelt. Die Mode-Werte befinden sich ebenfalls im feinen Bereich. Der $d(0,999)$ beider Kurven behauptet, dass die größten Partikel eine Größe von ca. 700 μm haben. Auch die Werte von $d(0,1)$, $d(0,5)$ und $d(0,9)$ zeigen eher auf eine noch recht feine Partikelverteilung hin.

Es ist anzunehmen, dass die ermittelten Partikelverteilungen, die dargestellten Kurvenverläufe, sowie die Werte der einzelnen Parameter fehlerhaft sind.

Tabelle 6: Parameter der Partikelgrößenverteilung VMC Mischer

Prozess- stufe	$d(0,001)$ [μm]	$d(0,1)$ [μm]	$d(0,5)$ [μm]	$d(0,9)$ [μm]	$d(0,999)$ [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
Mischer 1	0,658	5,153	46,823	263,448	683,795	92,161	5,516	0,444
Mischer 2	0,658	5,016	41,308	230,406	643,403	89,997	5,456	0,463

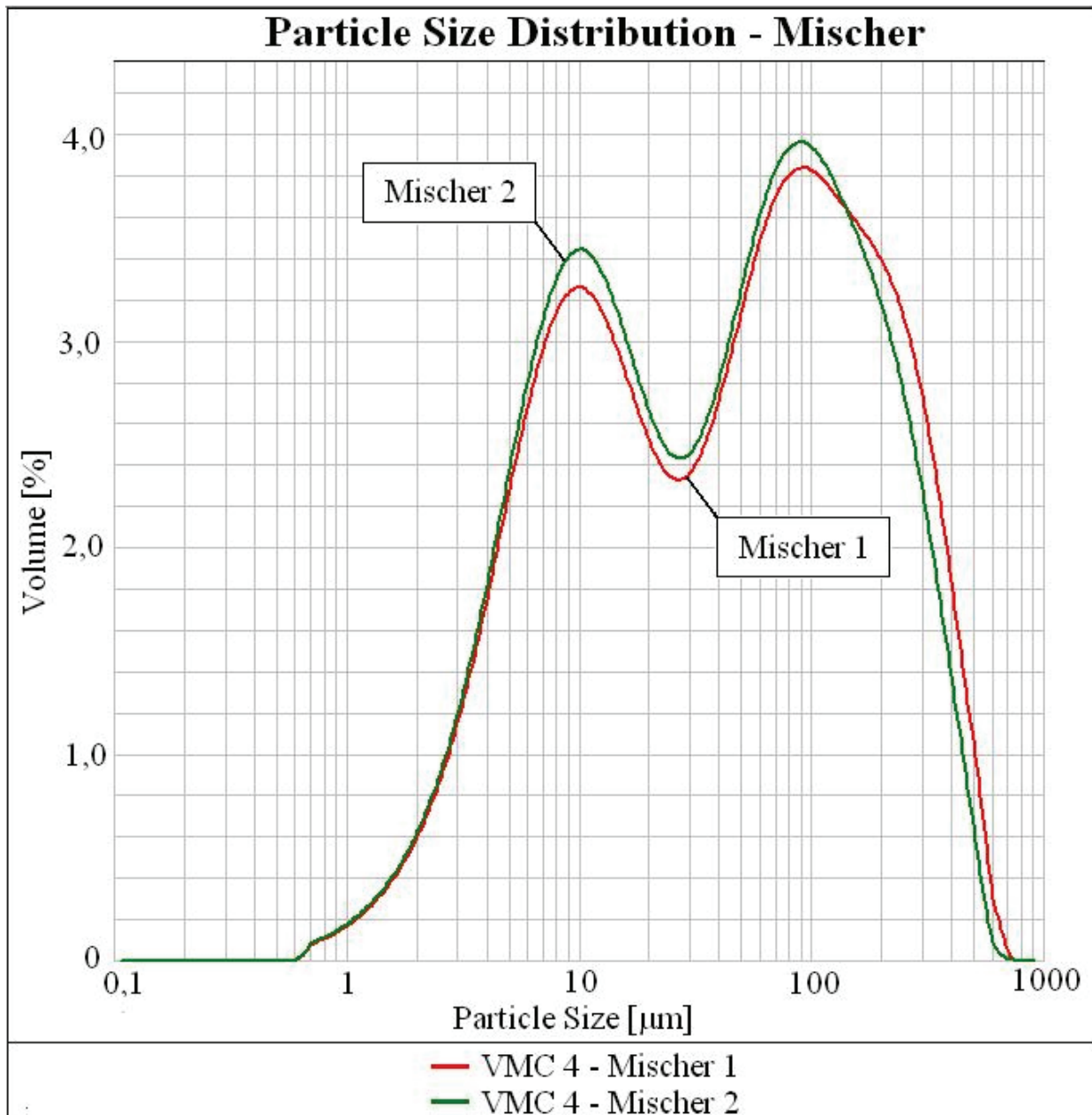


Abbildung 52: Partikelgrößenverteilung von VMC im 2SWV in der Prozessstufe Mischer

Die Abbildung 53 zeigt die Partikelverteilung der Knet- (Mittelwert der VMC 1, 2, 3, 1SWV) und Vorwalzwerkproben (VMC 4, 2SWV). Alle drei Kurven weisen einen bimodalen Verlauf auf. Bei dem ersten Peak handelt es sich hauptsächlich um Partikel der Kakaomasse und einen kleinen Anteil der feinen Partikel von Milchpulver und Laktose, im 1SWV auch vom Staubzucker. Beim zweiten Peak ist dies umgekehrt (Vgl. Partikelverteilung der Rohstoffe 4.3.2).

Die Kurve der Knet- und Vorwalzprobe beginnen beide bei ungefähr dem gleichen Partikeldurchmesser ($d(0,001)$ und $d(0,1)$). Die Kurve der Vorwalzprobe steigt dann schneller an als die der Knetprobe und zeigt im weiteren Verlauf eine Partikelverteilung, die etwas feiner ist ($d(0,5)$, $d(0,9)$, $d(0,999)$, Mode-Werte (Tabelle 7)). Die spezifische Oberfläche bestätigt die feineren Partikel in der Vorwalzprobe. Die Werte des Span zeigen, dass die Knetprobe eine engere Partikelverteilung hat als die Vorwalzprobe. Die Kurve der Knetprobe hat im Vergleich zu den Vorwalzproben einen kleineren ersten und einen größeren zweiten Peak. Die vier Kurven verlaufen ab etwa 400 μm relativ identisch und enden in etwa dem gleichen Bereich von 650 bis 700 μm .

Tabelle 7: Parameter der Partikelgrößenverteilung VMC Knet- und Vorwalzprobe vom 1SWV und 2SWV

Prozessstufe	$d(0,001)$ [μm]	$d(0,1)$ [μm]	$d(0,5)$ [μm]	$d(0,9)$ [μm]	$d(0,999)$ [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
1SWV Ø VMC 1, 2, 3 Knet- 1	0,769	5,683	72,734	265,006	675,779	141,266	3,565	0,363
1SWV Ø VMC 1, 2, 3 Knet- 2	0,768	5,868	70,942	251,714	790,863	128,619	3,465	0,356
2SWV Vorwalz- 1	0,890	5,159	44,317	243,379	651,004	92,879	5,375	0,425
2SWV Vorwalz- 2	0,786	5,100	41,404	246,563	703,652	78,415	5,832	0,435

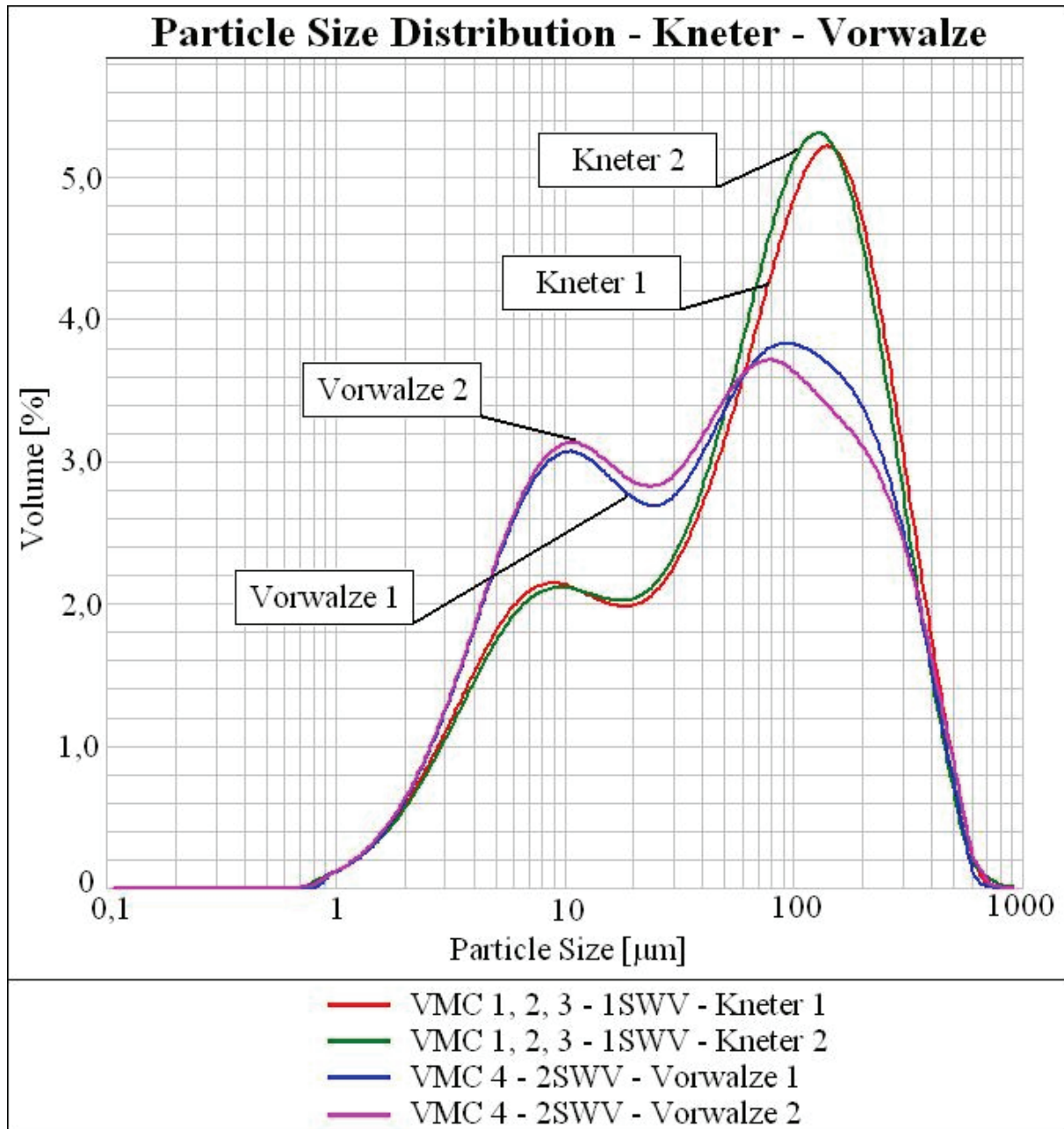


Abbildung 53: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von VMC im 1SWV und 2SWV in den Prozessstufen Knetter und Vorwalze

Die Abbildung 54 zeigt die Gegenüberstellung der Partikelverteilungen der Feinwalzproben vom 1SWV und 2SWV und Tabelle 8 die zugehörigen Werte der einzelnen Parameter. Der Zeitpunkt der Probenahme war nach etwa 1h Betrieb der Feinwalzwerke vom Transportband. Die beiden Kurven beginnen bei ungefähr der gleichen Partikelgröße ($d(0,001)$, $d(0,1)$). Die Kurve des Feinwalzwerks im 1SWV steigt langsam an, zeigt zwei deutliche Peaks und endet bei über 80 μm . Die Kurve der Partikelverteilung des Feinwalzguts im 2SWV hat einen stärkeren Anstieg, ebenfalls zwei Peaks, welche nicht so deutlich sind und endet bei etwa 60 μm . Die Kurve der Feinwalzwerke im 2SWV zeigt, eine kleinere Partikelgrößen, was durch $d(0,9)$, $d(0,999)$, die Mode-Werte und der spezifischen Oberfläche bestätigt wird. Die Span-Werte verdeutlichen, dass die Partikelverteilung der Feinwalzwerkprobe vom 2SWV enger ist.

Tabelle 8: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Feinwalzproben vom Transportband VMC vom 1SWV und 2SWV

Prozess- stufe	$d(0,001)$ [μm]	$d(0,1)$ [μm]	$d(0,5)$ [μm]	$d(0,9)$ [μm]	$d(0,999)$ [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
1SWV Feinwalze	0,695	2,804	11,410	35,521	82,062	22,655	2,867	0,910
2SWV Feinwalze	0,764	2,666	9,012	26,649	59,797	14,475	2,661	1,010

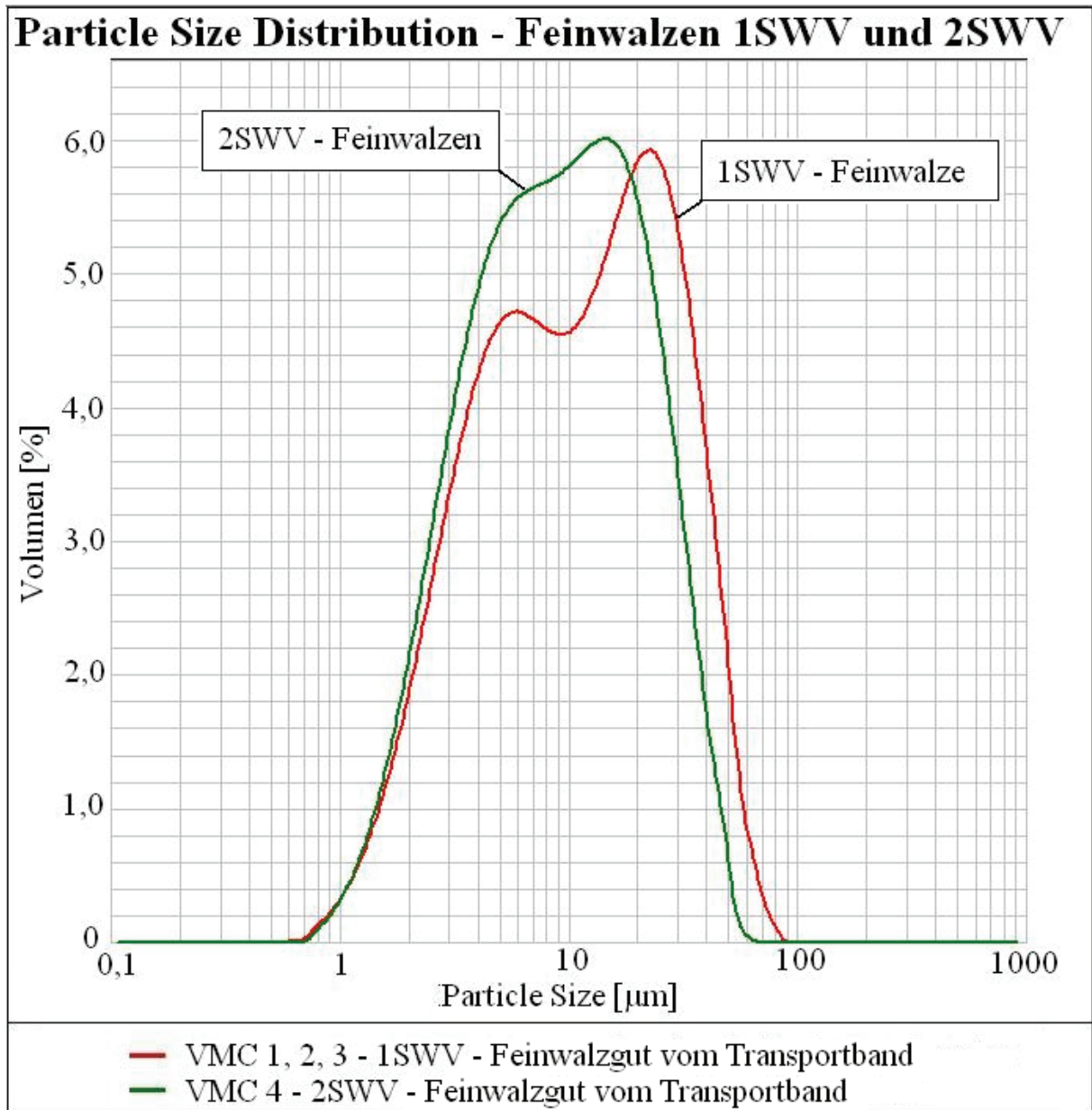


Abbildung 54: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von VMC im 1SWV und 2SWV in der Prozessstufe Feinwalzwerk

Die Abbildung 55 und die zugehörige Tabelle 9 zeigen Partikelverteilungen und Werte der Concheproben vom 1SWV und 2SWV. Die Kurvenverläufe ähneln denen der Feinwalzproben in Abbildung 54. Die Kurven beginnen nahezu identisch ($d(0,001)$, $d(0,1)$) und haben ähnliche Span-Werte, die auf eine enge bis mittlere Verteilungsbreite hinweisen. Die Kurve vom 2SWV zeigt in der Verteilung insgesamt kleinere Partikel im Vergleich zum 1SWV, belegt durch die Werte von $d(0,5)$, $d(0,9)$, $d(0,999)$, den Mode-Werten und der spezifischen Oberfläche. Die spezifische Oberfläche zeigt insgesamt, dass es sich um viele kleine Partikel in den Proben handelt, verglichen mit den Massen des Mischers, Kneters und der Vorwalze.

Tabelle 9: Parameter der Partikelgrößenverteilung VMC der Conchen vom 1SWV und 2SWV

Prozess- stufe	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
1SWV Conche	0,703	2,759	10,566	33,049	72,860	20,536	2,867	0,939
2SWV Conche	0,764	2,655	8,797	26,637	52,336	14,107	2,726	1,020

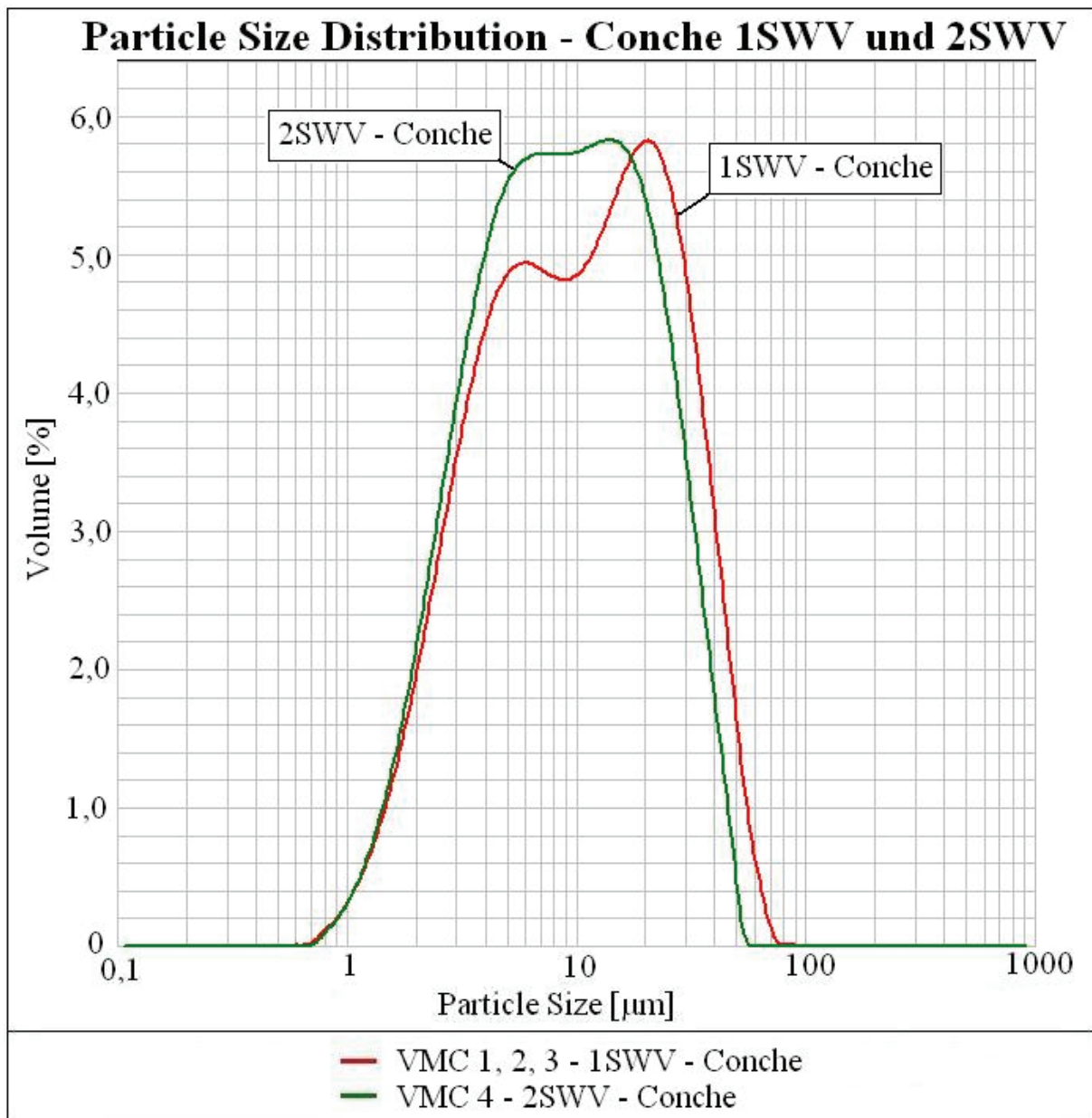


Abbildung 55: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von VMC im 1SWV und 2SWV in der Prozessstufe Conche

4.3.4 Schokolademasse VMB im 2SWV und 1SWV

Die folgenden Abbildung 57 bis Abbildung 59 der VMB enthalten die Partikelverteilungen der vergleichbaren Prozessstufen vom 2SWV und 1SWV, die wie bei den REM-Aufnahmen gegenübergestellt sind. Proben für die Untersuchung des Feinwalzguts wurden vom Transportband genommen. In Abbildungen und Tabellen dargestellte Mittelwerte der VMB 1, 2, 3 sind im Anhang 7 einzeln dargestellt. Die Kurve der Mischerprobe ist erneut allein dargestellt.

Die beiden Partikelverteilungen der Mischerproben (Abbildung 56, Tabelle 10) zeigen einen sehr ähnlichen, bimodalen Kurvenverlauf, was dadurch bestätigt wird, dass alle Parameter; ausgenommen des $d(0,999)$, sich sehr ähnlich sind. Der erste Peak ist klein und der zweite groß. Die Werte von $d(0,001)$, $d(0,1)$, $d(0,5)$, $d(0,9)$ und die Mode-Werte liegen in einem sehr feinen Bereich. Auch der $d(0,999)$ ist für die Größe der enthaltenen Partikel gering und die spezifische Oberfläche dafür groß.

Es ist anzunehmen, dass die ermittelten Partikelverteilungen, die dargestellten Kurvenverläufe, sowie die Werte der einzelnen Parameter fehlerhaft sind.

Tabelle 10: Parameter der Partikelgrößenverteilung Mischer, 2SWV

Prozess- stufe	$d(0,001)$ [μm]	$d(0,1)$ [μm]	$d(0,5)$ [μm]	$d(0,9)$ [μm]	$d(0,999)$ [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
Mischer 1	0,660	7,262	98,541	276,251	646,371	146,528	2,730	0,300
Mischer 2	0,660	7,359	101,322	292,289	780,359	152,671	2,812	0,295

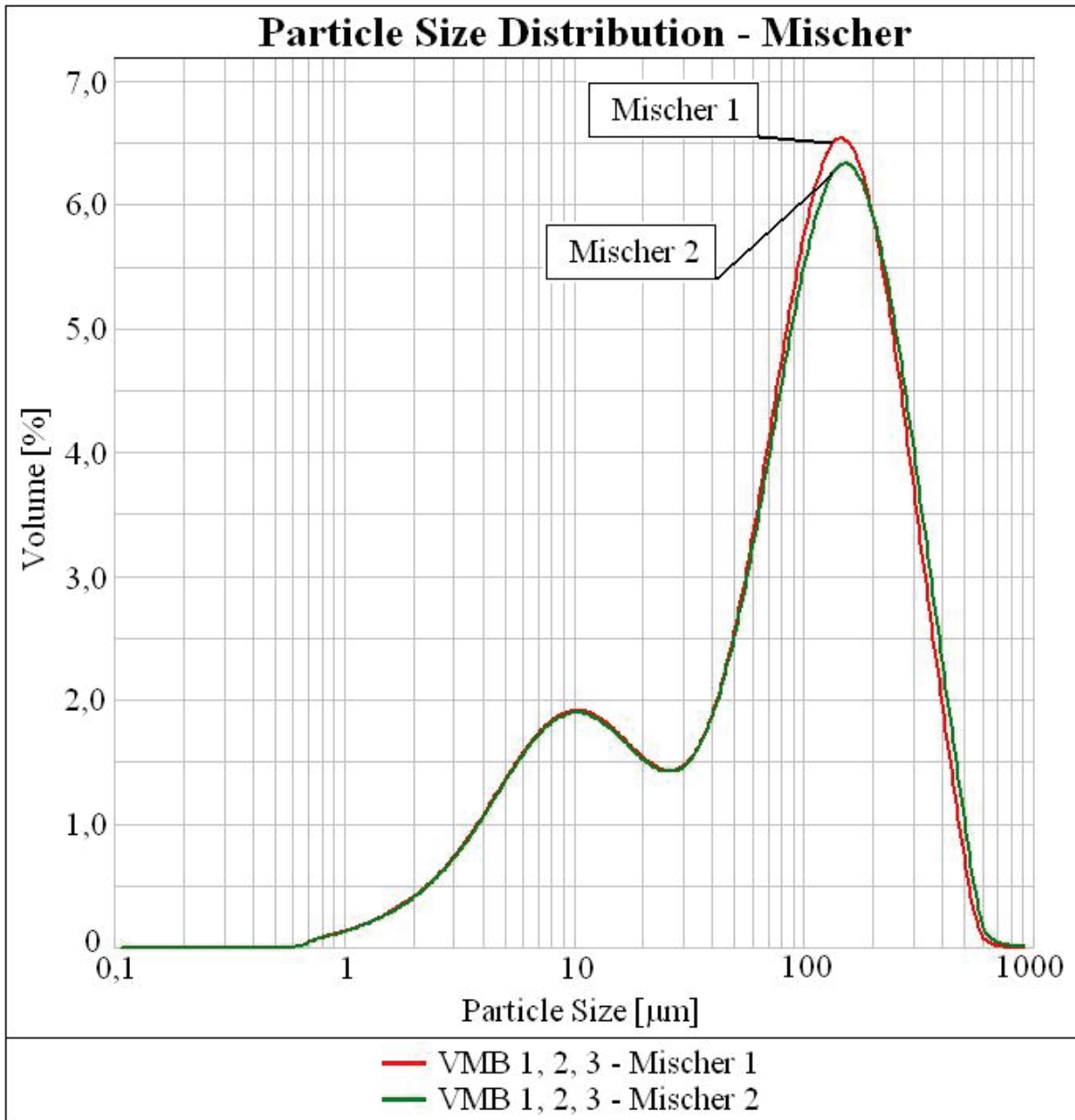


Abbildung 56: Partikelgrößenverteilung von VMB im 2SWV in der Prozessstufen Mischer

Die Partikelverteilungen der beiden Vorwalzproben (Abbildung 56) sind fast identisch. Sie zeigen Bimodalität und haben eine breite Partikelverteilung, was der Span-Wert (Tabelle 11) verdeutlicht. Die Kurve der Knetprobe hat einen ähnlichen Verlauf wie die Vorwalzproben. Sie hat ebenfalls zwei Peaks, von denen der erste etwas größer und der zweite kleiner im Vergleich zu den Vorwalzwerkproben ist. Der Span-Wert der Knetprobe zeigt eine noch breitere Partikelverteilung. Die vier Proben haben ähnliche Werte in den Parametern $d(0,001)$, $d(0,1)$, $d(0,5)$, sowie in den Mode-Werten und der spezifischen Oberfläche. Das zeigt, dass die Partikel bei diesen Prozessschritten sich in ihrer Verteilung ähneln. Größere Unterschiede sind in den Werten von $d(0,9)$ und $d(0,999)$ erkennbar. Diese resultieren aus der breiteren Partikelverteilung der Knetprobe. Die spezifische Oberfläche verdeutlicht, dass in den Proben noch grobe Partikel vorhanden sind und dass die Partikel im 1SWV bereits etwas feiner sind als im 2SWV.

Tabelle 11: Parameter der Partikelgrößenverteilung VMB Vorwalze und Knetter vom 2SWV und 1SWV

Prozessstufe	$d(0,001)$ [μm]	$d(0,1)$ [μm]	$d(0,5)$ [μm]	$d(0,9)$ [μm]	$d(0,999)$ [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
2SWV Ø VMB 1, 2, 3 Vorwalze 1	0,768	6,192	70,629	180,115	682,874	112,550	3,644	0,345
2SWV Ø VMB 1, 2, 3 Vorwalze 2	0,770	6,229	69,304	176,104	739,235	115,829	3,588	0,344
1SWV Knetter 1	0,891	5,903	62,919	288,730	908,076	108,163	4,487	0,356
1SWV Knetter 2	0,891	5,640	53,219	243,029	738,805	90,233	4,461	0,380

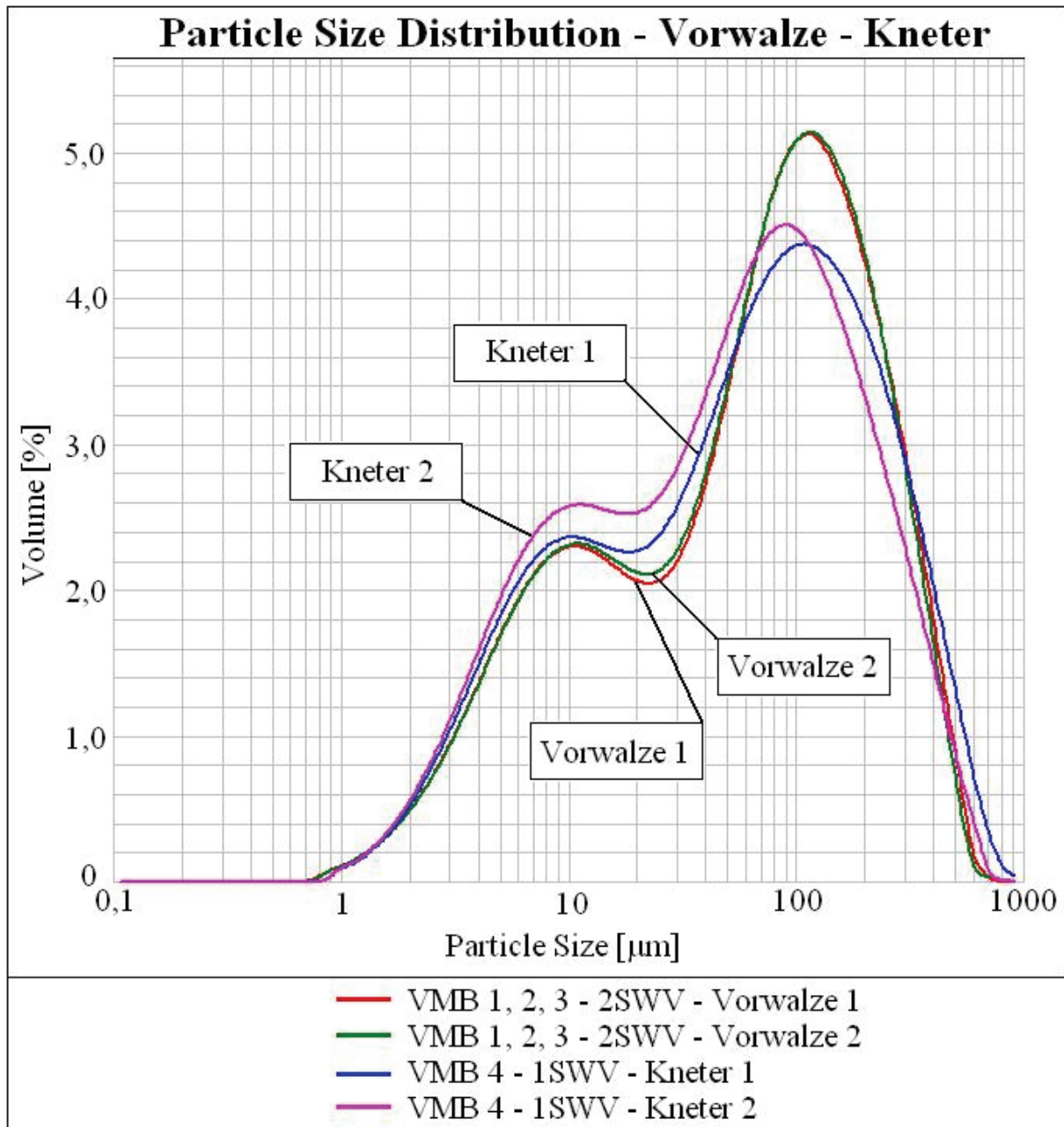


Abbildung 57: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von VMB im 2SWV und 1SWV in den Prozessstufen Vorwalze und Knetter

Die Partikelverteilungen der beiden Feinwalzgutproben (Abbildung 58) beginnen und enden in etwa gleich ($d(0,001)$, $d(0,1)$ und $d(0,999)$) und haben zwei Peaks bei ungefähr gleichen Partikelgrößen. Die Partikelverteilungen zeigen, dass die Massen sehr fein sind, was durch die spezifische Oberflächen und den Mode-Werten bestätigt wird. Die Unterschiede in den Werten von $d(0,5)$, $d(0,9)$ und den Mode-Werten (Tabelle 12) zeigen dabei, dass die Probe vom 1SWV etwas größere Partikel enthält. Somit ist zu sagen, dass die Kurve des Feinwalzguts vom 1SWV im Vergleich etwas gröber ist als die vom 2SWV.

Tabelle 12: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Feinwalzproben Transportband VMB vom 2SWV und 1SWV

Prozess- stufe	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
2SWV Feinwalze	0,764	2,767	10,288	31,599	60,558	20,331	2,802	0,945
1SWV Feinwalze	0,764	2,806	11,089	32,980	60,764	22,115	2,721	0,918

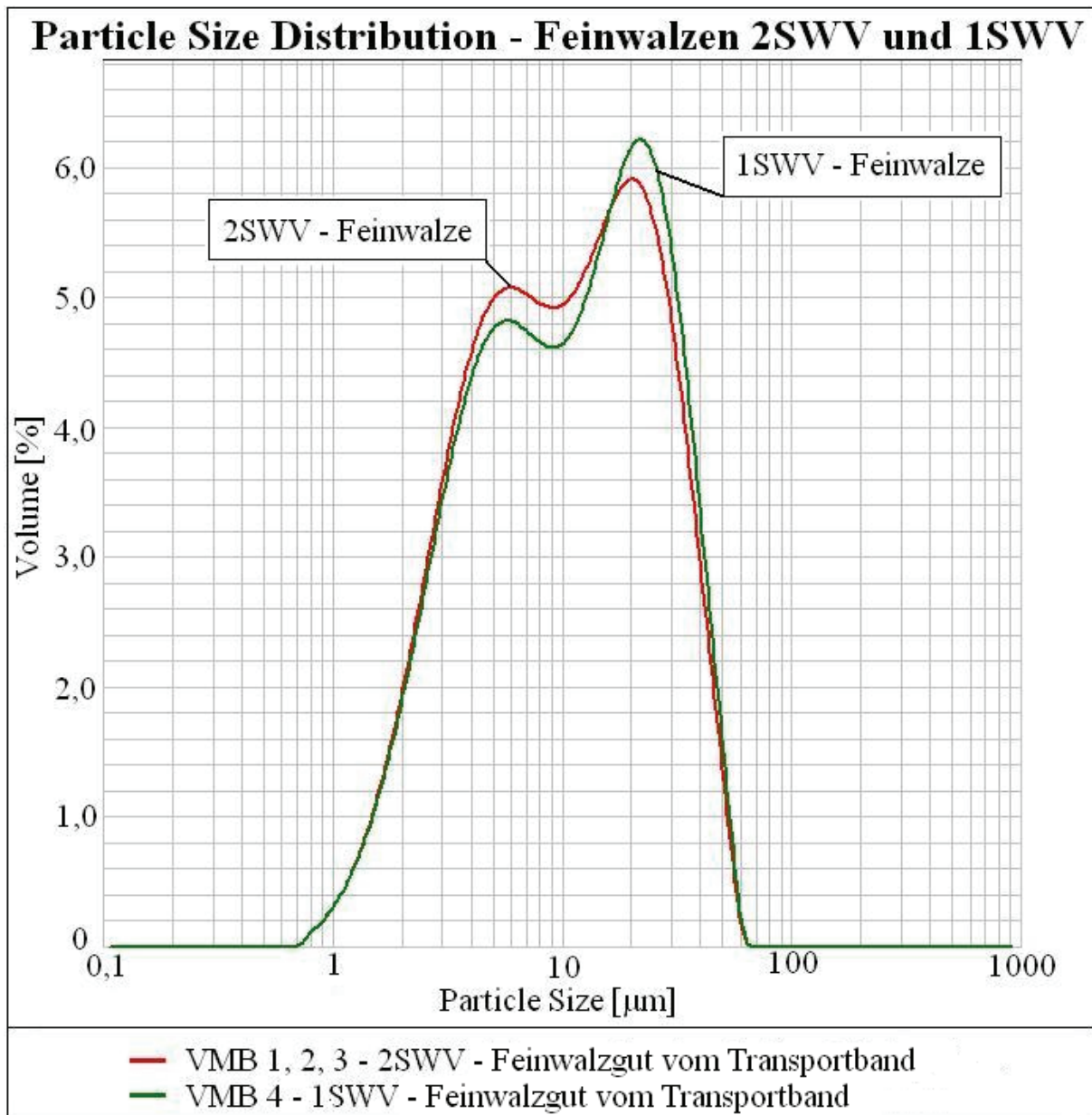


Abbildung 58: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von VMB im 2SWV und 1SWV in der Prozessstufe Feinwalzwerk

Die Partikelverteilungen der Concheproben vom 2SWV und 1SWV beginnen bei den gleichen Partikelgrößen ($d(0,001)$, $d(0,1)$) und enden fast gleich bei ca. $60 \mu\text{m}$ ($d(0,999)$). Es zeigen sich weiterhin große Ähnlichkeiten der Kurvenverläufe in der spezifischen Oberfläche und den Span-Werten. Die spezifische Oberfläche und die Mode-Werte verdeutlichen, dass die Partikel sehr fein sind. Aber auch alle d -Werte bestätigen die feinen Partikel der Schokoladenmasse nach dem Conchieren. Die Kurven der Concheproben zeigen, eine etwas kleinere Partikel im 2SWV als im 1SWV, was die Werte von $d(0,5)$, $d(0,9)$, den Span- und Mode-Werten zeigen.

Die Partikelverteilungen der Concheproben (Abbildung 59) zeigen verglichen mit denen der Feinwalzgutproben eine weitere Annäherung aneinander. Besonders deutlich wird das an den Werten von $d(0,5)$ und $d(0,9)$ (Tabelle 13), welche nicht mehr so weit voneinander abweichen.

Tabelle 13: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Conchen VMB vom 2SWV und 1SWV

Prozess- stufe	$d(0,001)$ [μm]	$d(0,1)$ [μm]	$d(0,5)$ [μm]	$d(0,9)$ [μm]	$d(0,999)$ [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
2SWV Conche	0,764	2,723	9,597	29,995	59,939	18,789	2,842	0,974
1SWV Conche	0,765	2,780	10,102	30,952	59,489	20,124	2,789	0,946

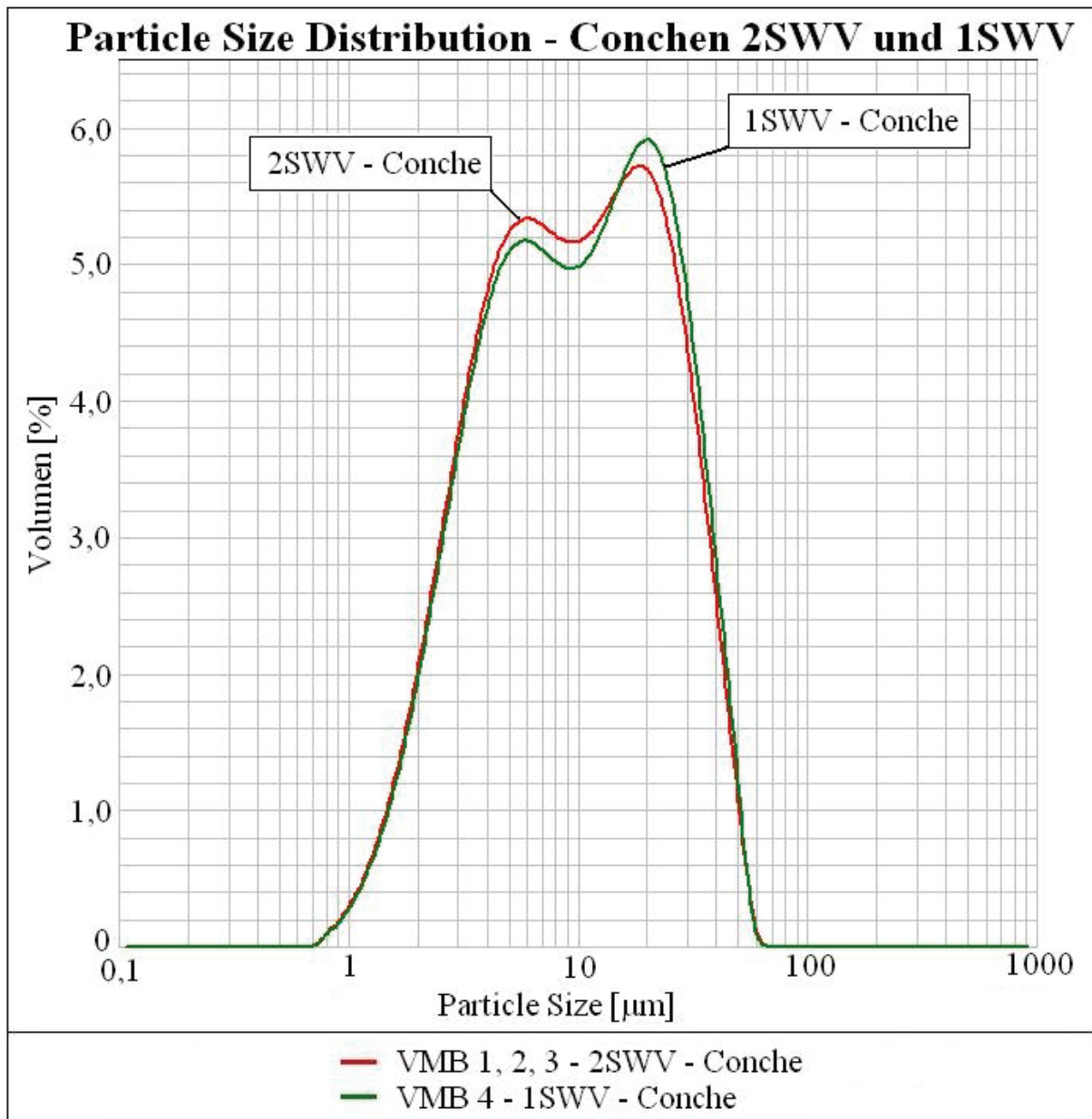


Abbildung 59: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von VMB im 2SWV und 1SWV in der Prozessstufe Conche

4.3.5 Partikelgrößenverteilung der Feinwalzproben

Der Feinwalzprozess wurde von der VMC und VMB im 1SWV und 2SWV untersucht. Die Proben wurden, wie in Abbildung 17, Seite 27 zu sehen, links, in der Mitte und rechts von der fünften Walze gezogen. Dabei wurde der Start, der laufende Prozess und das Ende des Feinwalzens beprobt. Beim Start erfolgte die Probennahme nach höchstens 2 Minuten konstanten

Walzens. Es soll überprüft werden, ob die erzielten Partikelverteilungen am Anfang, bei Betrieb und am Ende einheitlich sind.

Einfluss auf die erreichte Verteilung der Partikel auf den Fünfwalzwerken hat die Umdrehungsgeschwindigkeit bzw. die Spalteinstellung, die gleichmäßige Anpressung der ersten an die zweite Walze für einen parallelen Walzenspalt, die Temperatur dieser Walzen und die gleichmäßige Pressung der Walzen 3 bis 5 aufeinander.

Die Abbildungen und Tabellen zu diesen Untersuchungen befinden sich im Anhang 8 von Seite 174 bis Seite 199.

Bei den Untersuchungen der Feinwalzproben der VMC 1, 2, 3 im 1SWV zeigen sich bei allen Probenahmen uneinheitliche Partikelverteilungen im Feinwalzgut. Bei der VMC 1 (Abbildung 126 bis Abbildung 128) ist die Masse zu den drei Zeitpunkten in der Mitte der Feinwalze gröber als an den Seiten. Bestätigt wird das zusätzlich durch alle in Tabelle 34 enthaltenen Werte der einzelnen Parameter.

Bei der VMC 2 (Abbildung 129 bis Abbildung 131) sind die Kurven der Partikelverteilung am Start relativ nah beieinander (Tabelle 34), was auf eine gleichmäßige Walzenanpressung und einen gleichmäßigen Einzug der Masse hinzeigt. Die Partikelverteilungen nach 1h und am Ende des Feinwalzprozesses machen deutlich, dass rechts die Masse feiner gewalzt wird, wohingegen die erzielten Partikelverteilungen in der Mitte und links relativ konstant vom Start bis zum Ende des Prozesses bleiben.

Die Partikelverteilungen der VMC 3 (Abbildung 132 bis Abbildung 134, Tabelle 34) sind ähnlich wie die der VMC 1. In der Mitte sind die Partikel gröber und an den Seiten feiner. Die größten Abweichungen zeigen sich bei den Proben nach 1h Betrieb.

Bei der VMC 4 (2SWV) (Abbildung 135 bis Abbildung 137) war beim Start und am Ende des Feinwalzens eine leicht ungleichmäßige Partikelverteilung in den einzelnen Kurven vorhanden. Bei den Proben nach 1h Betrieb des Feinwalzwerks hingegen sind die erhaltenen Verteilungen der Partikel über die gesamte Walze gleich, was ein Vergleich der einzelnen Werte der Partikelverteilung (Tabelle 34) zusätzlich bestätigt.

Die Feinwalzproben der VMB 1, 2, 3 im 2SWV zeigen insgesamt einheitliche Partikelverteilungen an den drei Probenahmestellen des Walzwerks. Bei der VMB 1 (Abbildung 138 bis Abbildung 140) sind die Partikelverteilungen über den gesamten Feinwalzenprozess sehr ähnlich und konstant über die gesamte Walzenlänge. Das zeigen auch die Werte in Tabelle 35, die für alle Parameter sehr ähnlich sind.

Bei der VMB 2 (Abbildung 141 bis Abbildung 143, Tabelle 35) war der Anpressdruck zu Beginn des Walzprozesses links und rechts zu hoch, wodurch in der Mitte mehr Material durchgelangt ist. Nach 1h Betrieb des Feinwalzwerks waren die Walzen 1 und 2 fast völlig parallel. Am Ende des Feinwalzprozesses der VMB 2 zeigt sich, dass die Masse von der rechten Seite der Walze wesentlich größer ist als links und in der Mitte, verdeutlicht durch alle in Tabelle 35 dargestellten Werte.

Die Partikelverteilungen des Feinwalzguts der VMB 3 (Abbildung 144 bis Abbildung 146, Tabelle 35) lassen bei allen drei Probenahmezeiten darauf schließen, dass die Partikelverteilungen links und rechts weiter im feinen Bereich lagen und in der Mitte mehr Walzgut durchgefördert wurde.

Die Partikelverteilungen der VMB 4 (1SWV) (Abbildung 147 bis Abbildung 149) sind ähnlich wie bei der VMC 1, 2 und 3 sehr unterschiedlich zwischen den Proben der linken, rechten Seite und der Mitte. Im Verlaufe des Walzprozesses der VMB im 1SWV nähern sich die ermittelten Partikelverteilungen der drei Probenahmeorte an, auch sichtbar bei den Werten in Tabelle 35, besonders bei $d(0,5)$, $d(0,9)$, $d(0,999)$ sowie den Mode- und Span-Werten.

4.4 Partikelgrößenverteilung der Prozessproben mit der Nasssieb-Methode

Für die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mit der Nasssieb-Methode wurden die Prozessproben vom 1SWV und 2SWV der VMC und VMB untersucht. Dafür wurden Proben an den laufenden Anlagen gezogen.

Die Spezifikationsvorgabe für den Partikelanteil $>30 \mu\text{m}$ ist in der Qualitätssicherung der Fa. August Storck KG für die Concheproben der VMC und VMB mit $3,0 \text{ bis } 5,0 \% \pm 0,5 \%$ angegeben (Berechnung mit dem Faktor (Gliederungspunkt 3.3.3)). Bei allen Proben wurden zur Ermittlung der Siebrückstände der Fett- und Wassergehalt nicht in die Berechnung einbezogen.

Abbildung 60 und Abbildung 61 zeigen die Siebrückstände der Prozessproben von VMC 1, 2 und 3 vom 1SWV. In den Abbildungen ist jeweils nur Knetter 1 dargestellt, in Tabelle 14 befinden sich zusätzlich die Siebrückstände von Knetter 2. Die Siebrückstände der jeweils gleichen Prozessstufe (Knetter, Feinwalzwerk und Conche) liegen nah beieinander. Es zeigt sich in Tabelle 14, dass die Schokoladenmasse im Knetter bereits sehr fein ist, da sie nur wenig Partikel $>200 \mu\text{m}$ enthält.

Bei den Siebrückständen (Abbildung 60, Tabelle 14) der Kneteprouben von VMC 1 und VMC 2 fällt bei allen Sieben auf, dass sie etwas geringer waren als die der VMC 3. Hingegen waren die Siebrückstände nach dem Feinwalzen und Conchieren von VMC 1 und 2 höher als von VMC 3.

Die Rückstände der Feinwalz- und Conchepröben (Abbildung 61, Tabelle 14) verdeutlichen, dass hauptsächlich auf dem Sieb mit der Maschenweite von 30 μm und bei VMC 2-Feinwalzwerk auch bei 75 μm Siebmaschenweite Partikel zu finden waren. Die geringen Rückstände der Siebe mit 75, 120 und 200 μm Maschenweite können Durchschüsse sein, was bedeuten würde, dass vereinzelt Partikel auf dem Fünfwalzwerk nicht zerkleinert wurden.

Die Siebrückstände (Abbildung 61, Tabelle 14) der Conchepröben von VMC 1 und 2 auf dem Sieb mit der Maschenweite 30 μm sind in Bezug auf die Spezifikationsvorgaben leicht erhöht.

Tabelle 14: Siebrückstände der VMC 1, 2, 3 hergestellt im 1SWV

Siebrückstand [% abs.]	Maschenweite der Siebe [μm]			
	30	75	120	200
VMC 1				
Knetter 1	45,9	27,7	16,7	5,3
Knetter 2	47,3	29,5	19,3	5,9
Feinwalzwerk	6,1	0,1	0,1	0,1
Conche	5,7	0,1	0,1	0,1
VMC 2				
Knetter 1	47,5	29,3	17,9	4,7
Knetter 2	45,6	31,0	18,8	5,9
Feinwalzwerk	4,7	1,3	0	0
Conche	5,3	0,2	0	0
VMC 3				
Knetter 1	49,9	32,7	21,7	8,0
Knetter 2	47,6	31,1	20,1	6,6
Feinwalzwerk	3,0	0,2	0,1	0,1
Conche	1,7	0,1	0,1	0,1

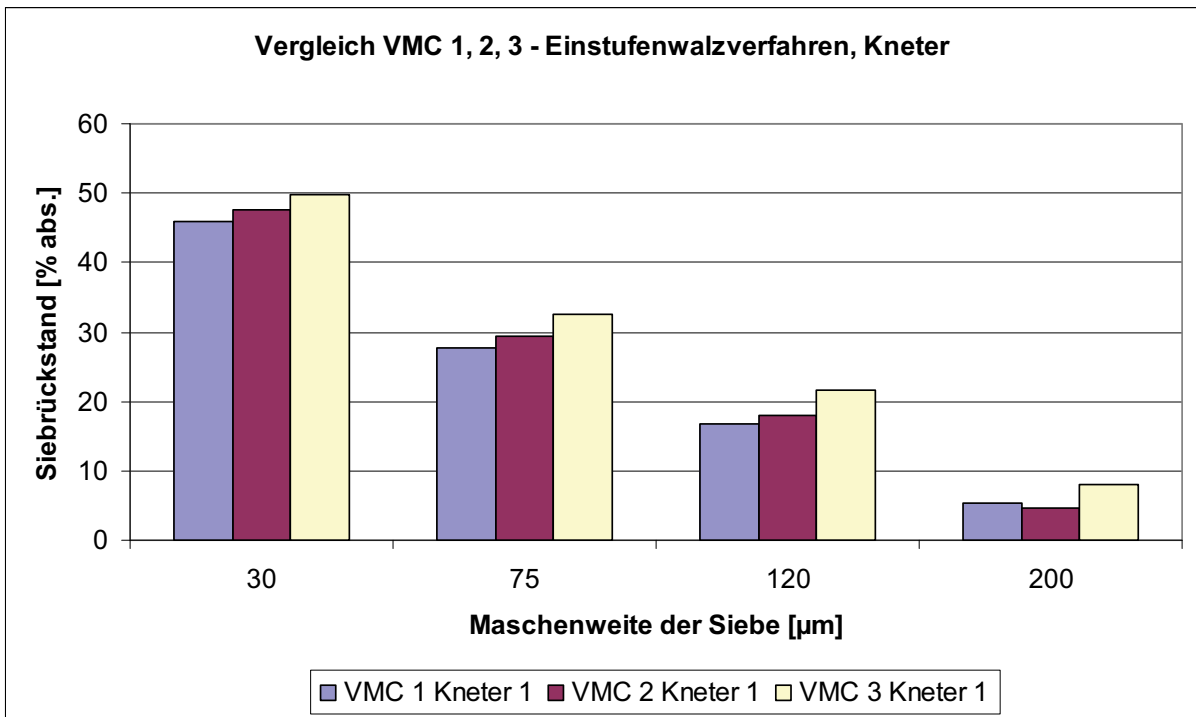


Abbildung 60: Siebrückstände der VMC 1, 2, 3 – 1SWV, Prozessstufe Kneter

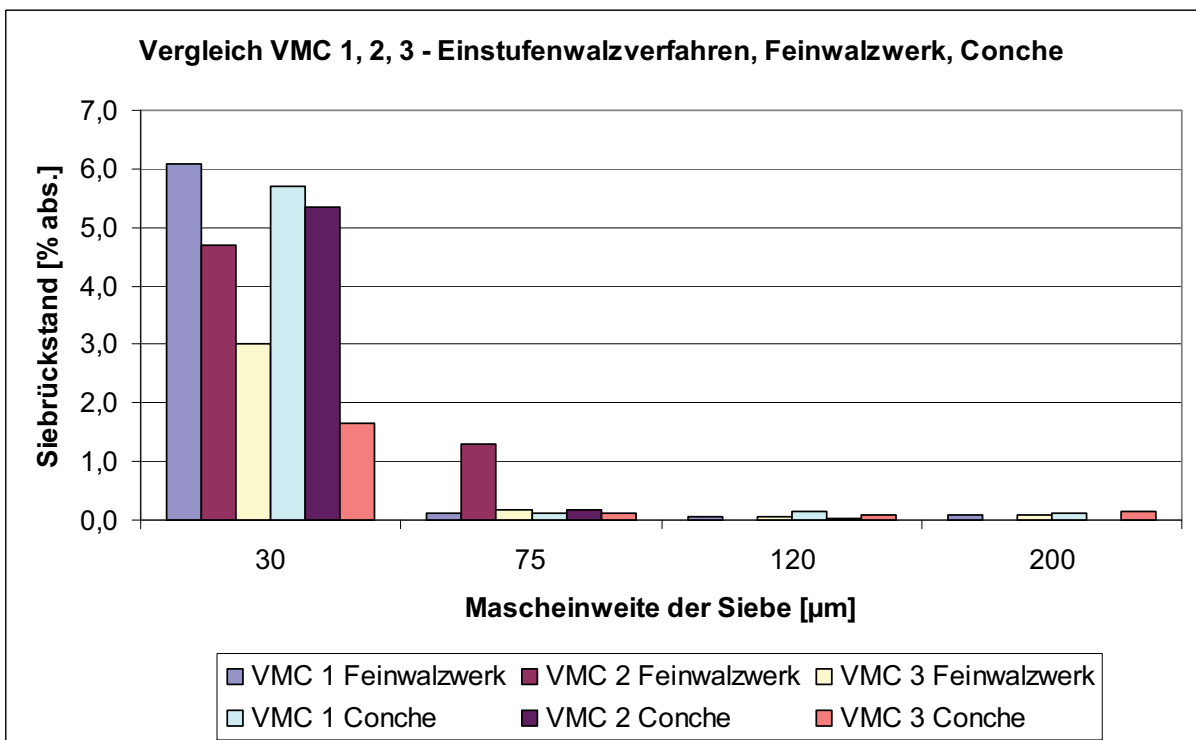


Abbildung 61: Siebrückstände der VMC 1, 2, 3 – 1SWV, Prozessstufen Feinwalzwerk und Conche

In Abbildung 62, Abbildung 63 und Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Nasssiebung von der VMC 4 (2SWV) dargestellt. Dabei enthält Abbildung 62 nur die Werte von Mischer 1 und Vorwalze 1, Tabelle 15 hingegen auch von Mischer 2 und Vorwalze 2.

Bei der Durchführung der Nasssiebung der Mischerprobe waren auf der Sieboberfläche des 200 µm Siebes hauptsächlich Zuckerkristalle und Partikel von den Milchpulvern und Laktose zu sehen. Die Kristalle des Zuckers liegen lt. Rohstoffspezifikation der August Storck KG fast ausschließlich in einem Größenbereich von 0,5 bis 2,5 mm, wodurch sich der gesehene Siebrückstand erklärt. Der Siebrückstand der Mischerprobe nimmt von den Sieben mit der Maschenweite von 30 bis 200 µm nur leicht ab. Das bedeutet, dass die meisten Partikel größer als 200 µm sind und sich ein geringer Anteil innerhalb des Bereichs von 30 bis 200 µm befindet. Bestätigt wird das damit, dass Kristallzucker und Walzenmilchpulver (Abbildung 43, Seite 63) den Großteil der partikelenthaltenden Rohstoffe in der Rezeptur von VMC ausmachen. Bei den Proben der ersten Zerkleinerungsstufe, dem Vorwalzwerk (Abbildung 62, Tabelle 15), ist sichtbar, dass die Partikelrückstände auf allen Sieben verglichen mit den Rückständen der Mischerprobe geringer werden, was bedeutet, dass die Partikel der Schokoladenmasse bereits wesentlich feiner geworden sind. Im Vergleich zu den Rückständen der Mischerproben auf den einzelnen Sieben ist der Unterschied der Rückstände der Vorwalzproben vom 30 und 200 µm Sieb wesentlich größer (Abbildung 62). Zu sehen waren hauptsächlich Milchpulver-, Laktosepartikel und vereinzelt Zuckerkristalle als Rückstände auf der Oberfläche des Siebes mit 200 µm Maschenweite. Insgesamt befinden sich mehr Partikel in dem Größenbereich von 30 bis 200 µm.

Die Siebrückstände der Feinwalz- und Concheprouben (Abbildung 63, Tabelle 15) sind sich ähnlich. Der Hauptanteil der Partikel dieser Proben befindet sich auf dem Sieb mit der Maschenweite von 30 µm und ein Teil auf dem Sieb mit 75 µm Maschenweite. Die Siebrückstände auf dem 30 µm Sieb erfüllen bereits nach dem Feinwalzen die Spezifikationsvorgaben der Qualitätssicherung. Bei den geringen Rückständen auf den Sieben mit den Maschenweiten von 120 und 200 µm könnte es sich um nicht zerkleinerte Partikel beim Feinwalzen handeln. Ein Vergleich der Rückstände der Feinwalz- und Concheprouben (Abbildung 63) zeigt, dass auf den Sieben mit 75, 120 und 200 µm Maschenweite die Rückstände von der Feinwalz- zur Concheproube abnehmen.

Tabelle 15: Siebrückstände der VMC im 2SWV

Siebrückstand [% abs.]	Maschenweite der Siebe [μm]			
	30	75	120	200
Mischer 1	62,6	55,5	53,2	49,6
Mischer 2	63,1	56,6	52,4	50,3
Vorwalzwerk 1	50,5	36,4	28,2	20,0
Vorwalzwerk 2	50,1	36,9	29,7	19,7
Feinwalzwerk	2,2	0,4	0,2	0,2
Conche	2,3	0,1	0	0

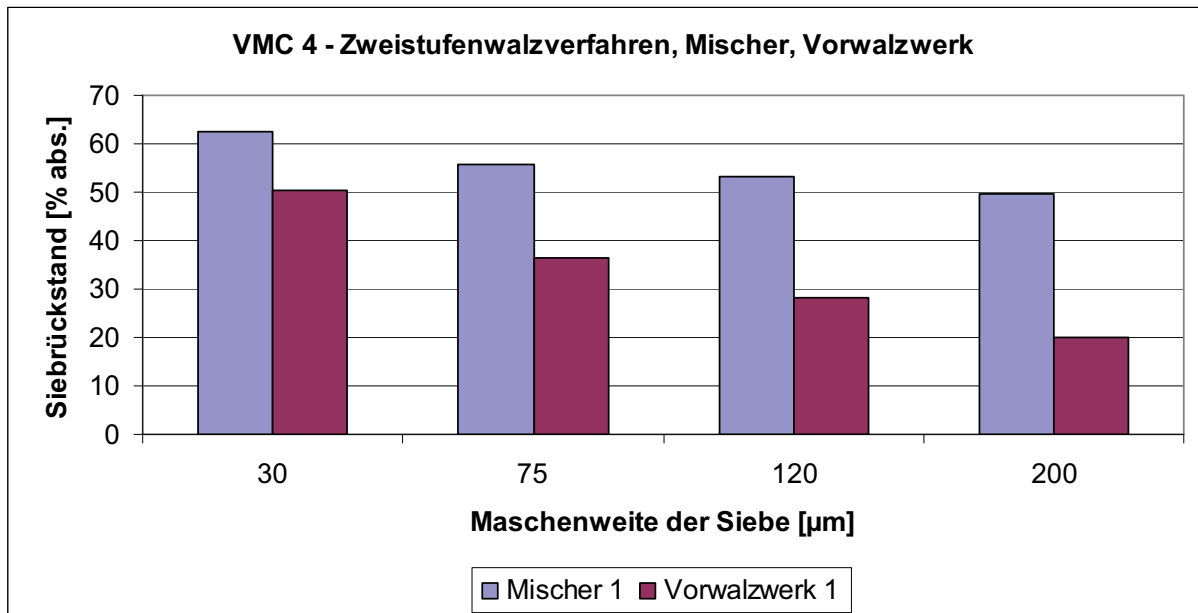


Abbildung 62: Siebrückstände der VMC 4 – 2SWV, Prozessstufen Mischer und Vorwalzwerk

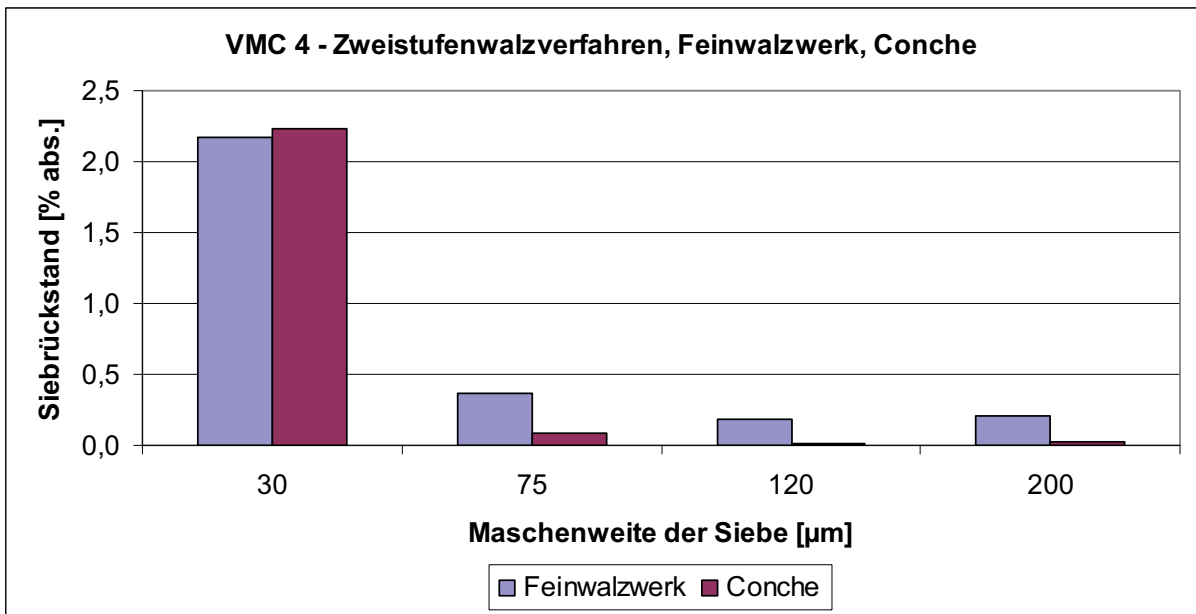


Abbildung 63: Siebrückstände der VMC 4 – 2SWV, Prozessstufen Feinwalzwerk und Conche

In Abbildung 64 und Abbildung 65 werden die ermittelten Siebrückstände der VMC vom 1SWV (Mittelwerte der Dreifachbestimmung, dargestellt in Tabelle 16) und 2SWV (Tabelle 15) gegenübergestellt. In Abbildung 64 sind nur die Rückstände von Knetter 1, Mischer 1 und Vorwalzwerk 1 aufgezeigt.

Die Rückstände der Mischerprobe (2SWV) (Abbildung 64) sind deutlich höher als die der Knetter- und Vorwalzwerkprobe.

Bei der Gegenüberstellung der Siebrückstände der vergleichbaren Prozessstufen Knetter (1SWV) und Vorwalze (2SWV) (Abbildung 64) fällt auf, dass die Knetterprobe einen wesentlich geringeren Rückstand auf dem 200 µm Sieb hat. Der Partikelanteil mit einer Größe zwischen 30 und 200 µm ist bei der Knetterprobe bereits wesentlich größer als bei der Vorwalzprobe, was aus deren Differenz deutlich wird.

Bei der Gegenüberstellung der Siebrückstände der Feinwalz- und Concheproben (Abbildung 65, Tabelle 23 und Tabelle 24) fällt bei dem Sieb mit 30 µm Maschenweite auf, dass die erreichten Partikelgrößen im 2SWV wesentlich geringer sind als im 1SWV. Zu grobe Partikel aus möglichen Durchschüssen zeigen sich sowohl beim 1SWV als auch im 2SWV auf den Sieben mit 75, 120 und 200 µm Maschenweite.

Tabelle 16: Mittelwerte der Siebrückstände von VMC 1, 2, 3 – 1SWV

Siebrückstand [% abs.]	Maschenweite der Siebe [μm]			
	30	75	120	200
Knetter 1	47,8	29,9	18,8	6,0
Knetter 2	46,8	30,5	19,4	6,1
Feinwalzwerk	4,6	0,5	0	0,1
Conche	4,2	0,1	0,1	0,1

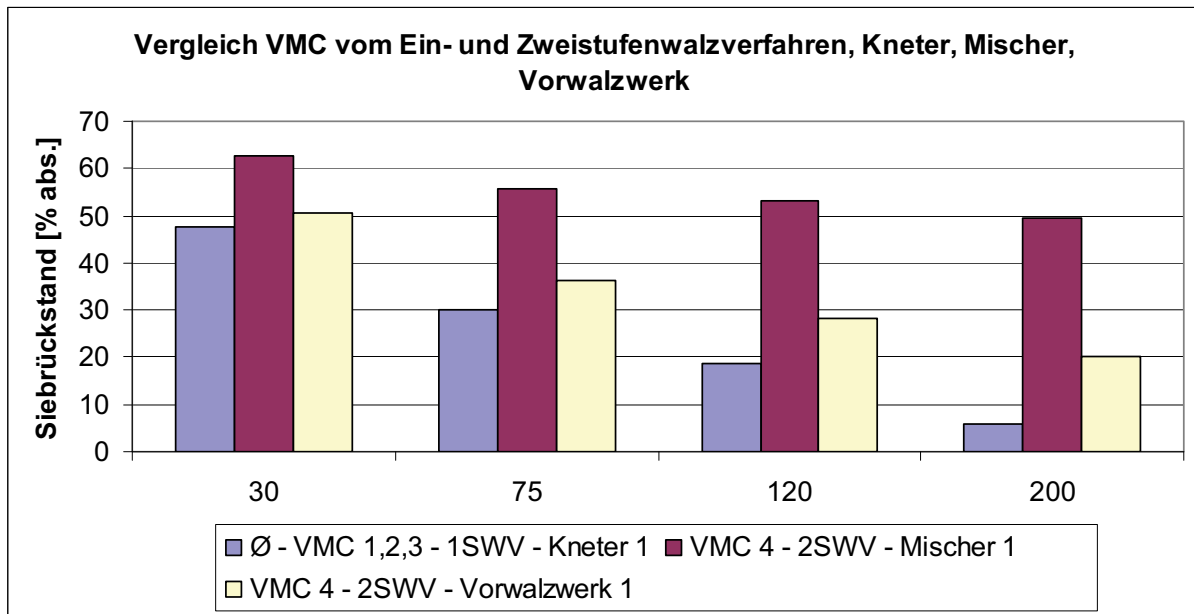


Abbildung 64: Gegenüberstellung der Siebrückstände VMC –1SWV und 2SWV, Prozessstufen Knetter, Mischer und Vorwalzwerk

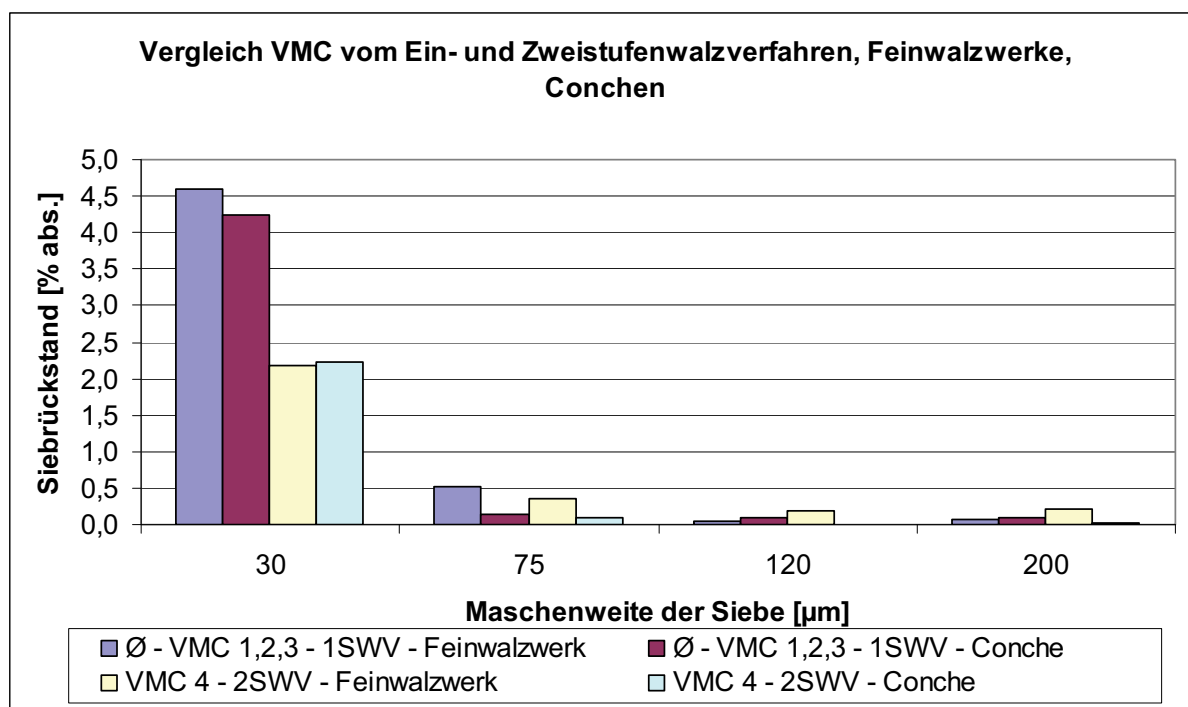


Abbildung 65: Gegenüberstellung der Siebrückstände VMC – 1SWV und 2SWV, Prozessstufen Feinwalzwerk und Conche

In Abbildung 66, Abbildung 67 und Tabelle 17 sind die Siebrückstände der drei im 2SWV produzierten VMB-Probereihen dargestellt. Es sind jeweils nur Mischer 1 und Vorwalzwerk 1 in Abbildung 66 dargestellt. Zu sehen ist, dass die Rückstände der Mischer-, Vorwalz-, Feinwalz- und Concheprouben bei allen Sieben jeweils nah beieinander liegen.

Es zeigt sich ähnlich wie bei der VMC 4 vom 2SWV (Abbildung 62 und Abbildung 63), dass in der Mischerprobe (Abbildung 66, Tabelle 17) die meisten Partikel der Rohstoffe größer als 200 µm sind. Auf dem Sieb waren nach der Nasssiebung hauptsächlich Kristallzucker-, Milchpulver- und Laktosepartikel auf der Sieboberfläche des 200 µm Siebes zu sehen. Durch die Zerkleinerung des Kristallzuckers in der Vorwalze nehmen die Rückstände auf allen Sieben ab. Besonders deutlich wird das bei dem 120 und 200 µm Sieb. Der Partikelanteil im Größenbereich von 30 bis 200 µm nimmt stark zu, was die Differenzen aus den Siebrückständen zeigen. Nach der Nasssiebung waren auf dem 200 µm Sieb hauptsächlich Milchpulver und vereinzelt noch Zuckerkristalle zu sehen.

Die Untersuchung der Feinwalz- und Concheprouben (Abbildung 67, Tabelle 17) ergab für die einzelnen Siebe, dass hauptsächlich auf dem 30 µm Sieb Rückstände ermittelt wurden. Bei den Sieben mit der Maschenweite 75, 120 und 200 µm kann es sich bei den ermittelten Rückständen um nicht zerkleinerte Partikel handeln. Nach dem Feinwalzen war die Spezifikationsvorgabe für die Größe der Partikel erreicht.

Der Siebrückstand des 30 µm Siebes von VMB 2 Feinwalzwerk (Abbildung 66) weicht stark von den anderen Ergebnissen ab, was auf einen möglichen Messfehler zurückzuführen ist.

Tabelle 17: Siebrückstände der VMB hergestellt im 2SWV

Siebrückstand [% abs.]	Maschenweite der Siebe [µm]			
	30	75	120	200
VMB 1				
Mischer 1	61,7	54,2	50,1	42,8
Mischer 2	60,6	52,9	50,4	43,2
Vorwalzwerk 1	52,7	37,7	29,5	20,2
Vorwalzwerk 2	52,9	38,3	30,6	22,1
Feinwalzwerk	2,6	0,2	0,1	0,1
Conche	2,8	0,1	0,1	0
VMB 2				
Mischer 1	62,3	58,8	50,1	45,3
Mischer 2	62,0	55,5	52,1	42,6
Vorwalzwerk 1	54,0	41,1	32,7	22,9
Vorwalzwerk 2	52,3	37,4	30,2	18,5
Feinwalzwerk	6,5	0	0	0
Conche	3,0	0	0	0
VMB 3				
Mischer 1	61,5	54,7	49,8	43,6
Mischer 2	63,6	55,1	52,1	45,4
Vorwalzwerk 1	53,3	39,2	30,5	21,2
Vorwalzwerk 2	53,5	38,4	31,3	19,7
Feinwalzwerk	1,5	0,2	0,1	0,2
Conche	1,0	0	0	0

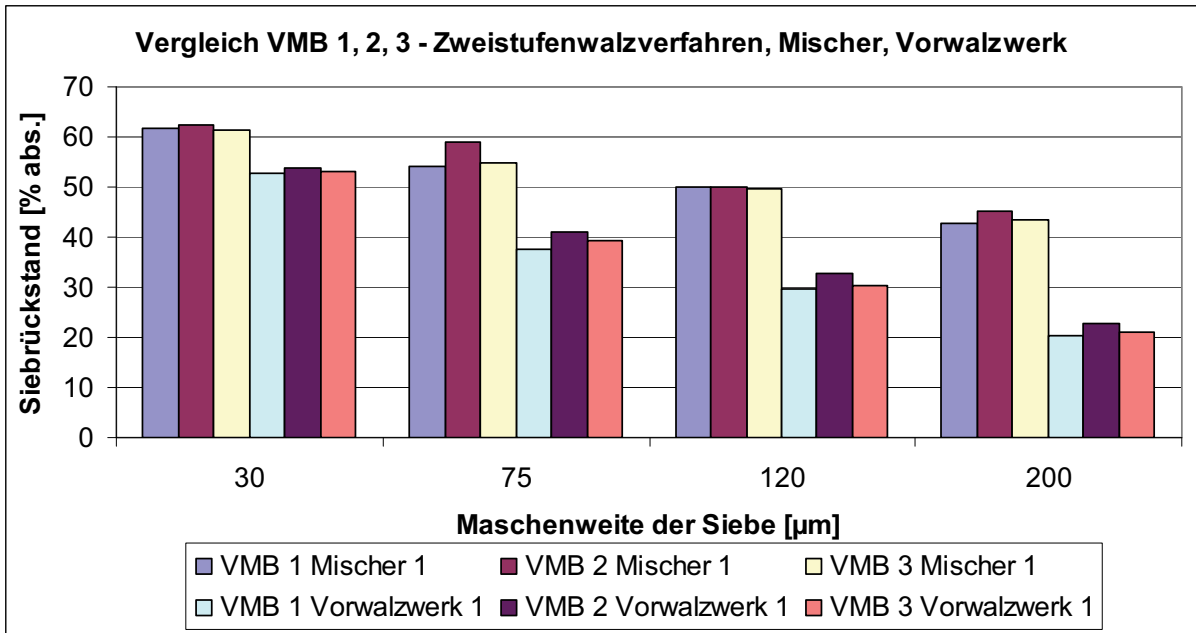


Abbildung 66: Siebrückstände der VMB 1, 2, 3 – 2SWV, Prozessstufen Mischer und Vorwalzwerk

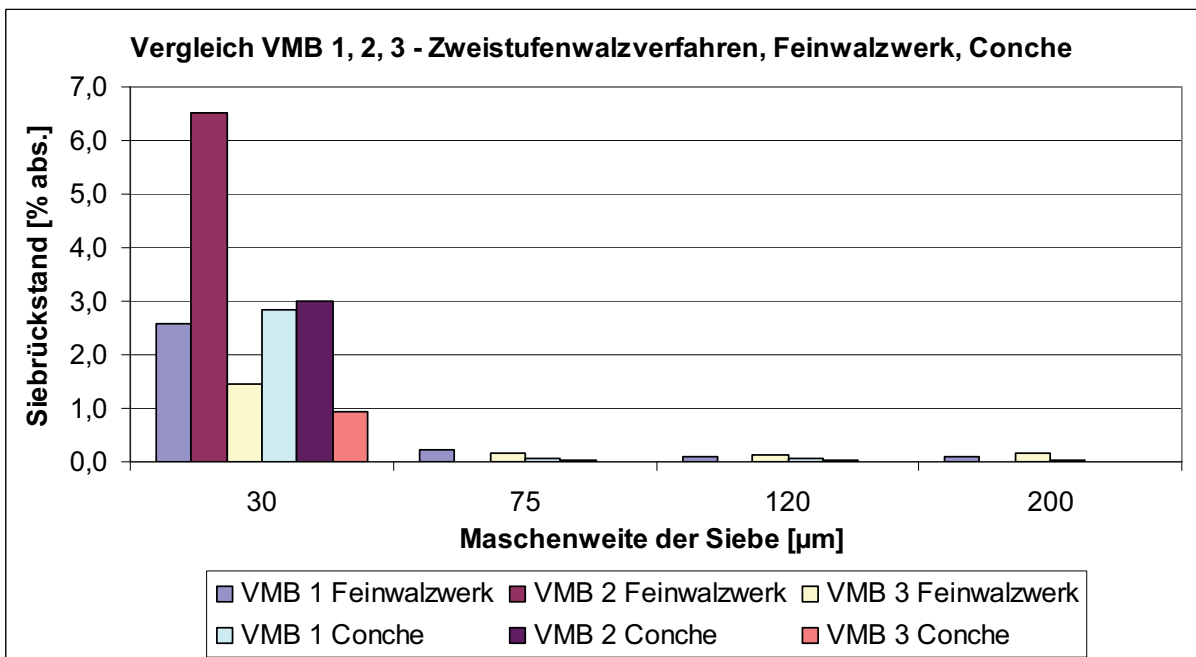


Abbildung 67: Siebrückstände der VMB 1, 2, 3 – 2SWV, Prozessstufen Feinwalzwerk und Conche

In Abbildung 68, Abbildung 69 und Tabelle 18 sind die Siebrückstände der VMB 4 (1SWV) dargestellt. Die Abbildungen enthalten wieder nur Knetter 1, in der Tabelle sind zusätzlich die Siebrückstände von Knetter 2 aufgeführt.

Die geringen Rückstände auf dem 200 µm Sieb der Knetterprobe in Abbildung 68 zeigen, dass bereits die meisten Partikel kleiner als 200 µm sind. Bei der Durchführung der Nasssiebung waren auf dem 200 µm Sieb hauptsächlich Milchpulver, Laktose und vereinzelt zerkleinerte Zuckerkrystalle zu sehen. Die Differenz des Siebrückstandes der Siebe mit 30 und 200 µm Maschenweite zeigt, dass ein großer Teil der Partikel sich in diesem Größenbereich befindet.

An den Siebrückständen aller Siebe der Feinwalz- und Concheprobe (Abbildung 69, Tabelle 18) ist zu erkennen, dass nach dem Feinwalzen die gewünschte Größe der Partikel erreicht war. Die Rückstände der Feinwalz- und Concheproben (Abbildung 69, Tabelle 18) auf den Sieben mit den Maschenweiten 75, 120 und 200 µm könnten Durchschüsse beim Feinzerkleinern sein.

Tabelle 18: Siebrückstände der VMB im 1SWV

Siebrückstand [% abs.]	Maschenweite der Siebe [µm]			
	30	75	120	200
Knetter 1	51,6	33,8	23,4	11,0
Knetter 2	50,2	31,9	22,1	9,9
Feinwalzwerk	3,6	0,2	0,2	0,2
Conche	3,0	0,3	0,1	0,2

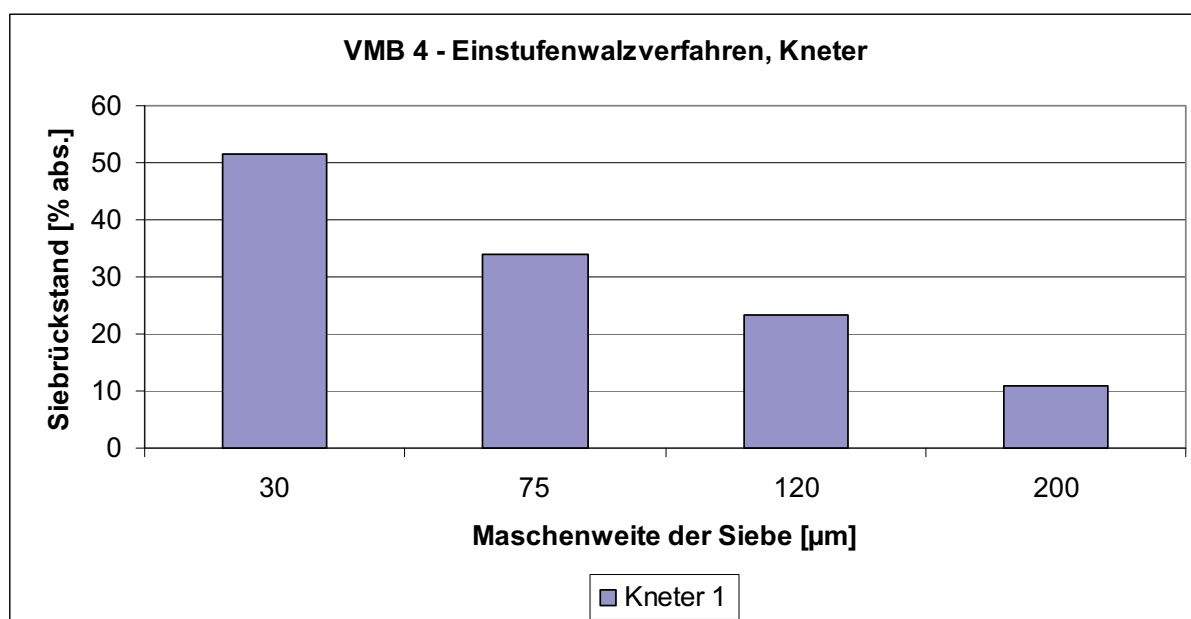


Abbildung 68: Siebrückstände der VMB 4 – 1SWV, Prozessstufe Knetter

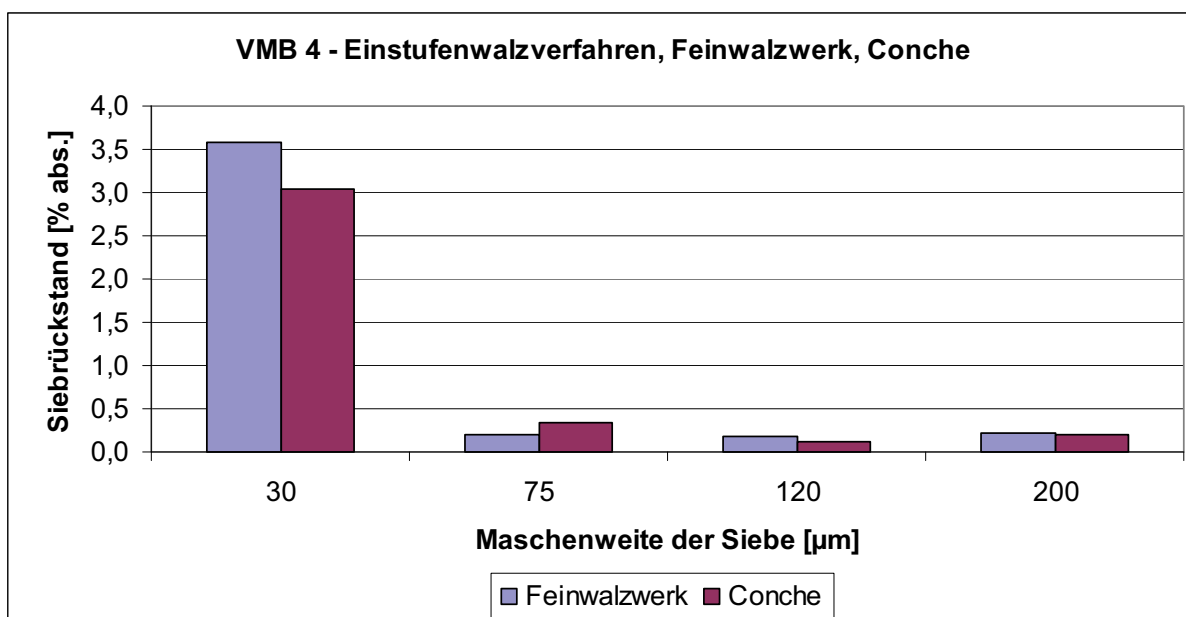


Abbildung 69: Siebrückstände VMB 4 –1SWV, Prozessstufen Feinwalzwerk und Conche

In Abbildung 70 und Abbildung 71 sind die Siebrückstände der VMB vom 2SWV (Mittelwerte der Dreifachbeprobung, Tabelle 19) und 1SWV (Tabelle 18) gegenübergestellt. In Abbildung 70 sind nur Mischer 1, Vorwalzwerk 1 und Knetter 1 dargestellt.

Es zeigt sich in Abbildung 70, dass die Knetterprobe wesentlich feiner ist als die Vorwalzwerkprobe. Sichtbar ist das besonders am Rückstand auf dem Sieb mit 200µm Maschenweite. Die ermittelten Rückstände der Feinwalz- und Concheprouben wurden hauptsächlich auf dem Sieb mit der Maschenweite von 30 µm gefunden. Bei den gemittelten Werten entsteht durch die mögliche Fehlmessung von VMB 2 (Abbildung 67) der Eindruck einer übertriebenen Partikelgrößenabnahme in der Conche des 2SWV. Bei den Partikelrückständen auf den Sieben mit der Maschenweite 75, 120 und 200 µm kann es sich um Durchschüsse handeln.

Tabelle 19: Mittelwerte der Siebrückstände von VMB 1, 2, 3 – 2SWV

Siebrückstand [% abs.]	Maschenweite der Siebe [µm]			
	30	75	120	200
Mischer 1	61,8	55,9	50,0	43,9
Mischer 2	62,1	54,5	51,5	43,7
Vorwalzwerk 1	53,3	39,3	30,9	21,4
Vorwalzwerk 2	52,9	38,0	30,7	20,1
Feinwalzwerk	3,5	0,1	0,1	0,1
Conche	2,3	0	0	0

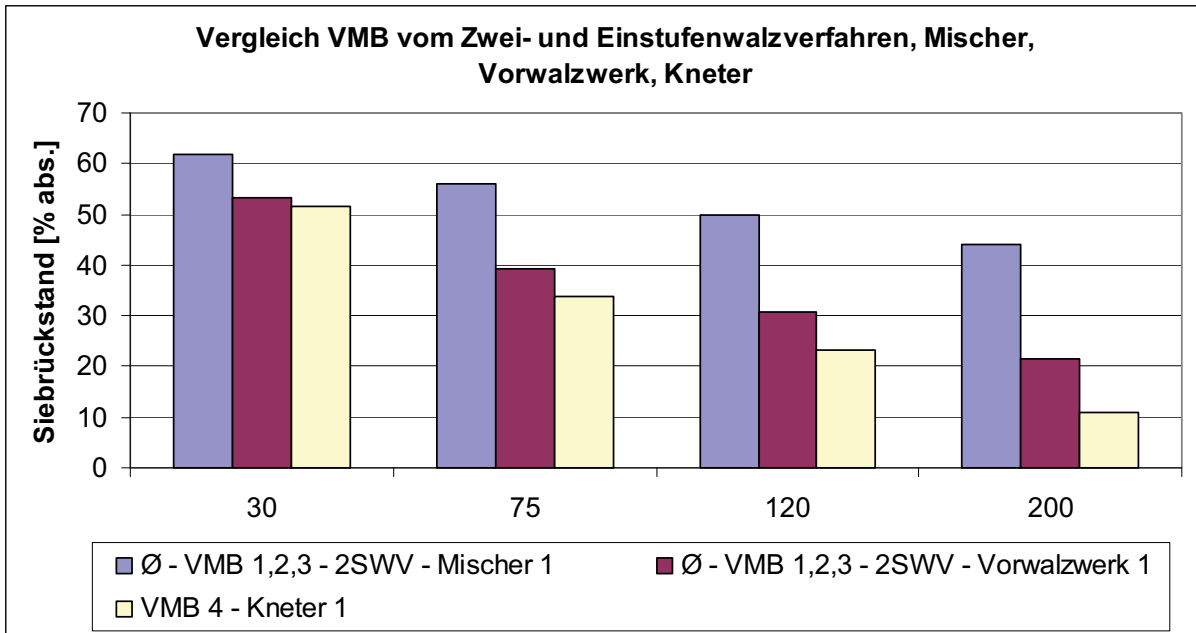


Abbildung 70: Gegenüberstellung der Siebrückstände VMB – 2SWV und 1SWV, Prozessstufen Mischer, Vorwalzwerk und Kneter

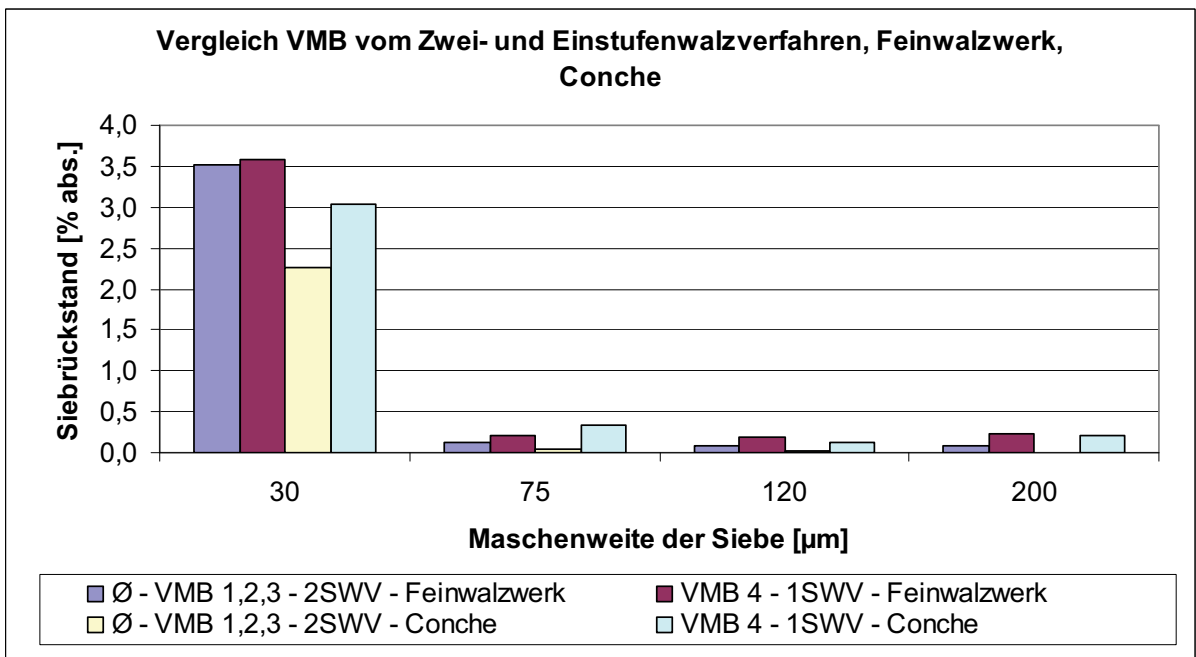


Abbildung 71: Gegenüberstellung der Siebrückstände VMB – 2SWV und 1SWV, Prozessstufen Feinwalzwerk und Conche

Korrelation der Partikelverteilungen von Nasssieb-Methode und Laser-Spektrometrie

Im Folgenden sind die Werte >30 , >75 , >120 und >200 μm von der Nasssieb-Methode und der Laser-Spektrometrie der VMC (Tabelle 22) und VMB (Tabelle 21), sowie deren Korrelation dargestellt. Für die Mischerproben wurden keine Korrelationen berechnet, da die Ergebnisse vom Laser-Spektrometer als fehlerhaft anzunehmen sind. (Abbildung 52, Abbildung 56)

In Tabelle 20 sind die Untersuchungsergebnisse der Laser-Spektrometrie und der Nasssieb-Methode und deren Korrelation von der VMC dargestellt. Die Knetprobe zeigt in allen Größenklassen vorhandene Partikel. Auf der Feinwalze werden die Partikel von allen Klassen verkleinert. Die Ergebnisse der Laser-Spektrometrie zeigen, dass nur bei >30 und >75 μm Partikel zu finden waren. Hingegen waren bei der Nasssiebung auf allen Sieben Rückstände zu finden. Die Partikelmengen der Concheproben sind etwas geringer als die der Feinwalzwerke und bei der Laser-Spektrometrie nur noch in der Größenklasse >30 μm zu finden.

Bei der VMC im 2SWV sind sich die Werte der Laser-Spektrometrie für die Mischer und Vorwalzproben sehr ähnlich. Eine deutliche Partikelzerkleinerung ist zwischen diesen Prozessstufen nicht erkennbar. Hingegen zeigen die Werte der Nasssiebung eine starke Partikelzerkleinerung, besonders in den Größenklassen von >200 , >120 und >75 μm . Aber auch bei der Klasse >30 μm ist dies sichtbar. Bei der Feinzerkleinerung der VMC im 2SWV zeigt sich, dass in allen Größenklassen eine starke Partikelzerkleinerung stattfand. Bei der Nasssiebung waren wieder Partikel in allen Größenklassen vorhanden, hingegen bei der Laser-Spektrometrie nur bei der $>30\mu\text{m}$. Gleiches zeigt sich bei den Concheproben. Im Vergleich zum 1SWV sind die Werte der Concheproben vom 2SWV nicht kleiner als die der Feinwalzproben.

Bei der Gegenüberstellung der Werte der VMC vom 1SWV und 2SWV zeigt sich, dass bei der Laser-Spektrometrie in den einzelnen Größenklassen der Knetprobe am meisten Partikel ermittelt wurden. Die Werte sind größer als die der Mischer- und Vorwalzprobe. Bei der Nasssiebung wurden hingegen die meisten Partikel in den einzelnen Größenklassen der Mischerprobe ermittelt. Auch die Vorwalzprobe ist nach der Nasssiebung größer als die Knetprobe. Somit zeigen die Korrelationen der einzelnen Werte zwar, dass diese gut übereinstimmen. Jedoch ist zu sagen, dass die Nasssieb-Methode die Ergebnisse der Laser-Spektrometrie nur bei den Feinwalz- und Concheproben unterstützt. Bei den Knet-, Mischer- und Vorwalzproben zeigen sich größere Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Laser-Spektrometrie und der Nasssiebung.

Tabelle 20: Gegenüberstellung und Korrelation der Ergebnisse vom Laser-Spektrometer und der Nasssiebung von VMC

Größen- klasse	1SWV – Mittelwerte aus VMC 1, 2, 3				2SWV – VMC 4						
	Knetter 1	Knetter 2	Feinwalze	Conche	Mischer 1	Mischer 2	Vorwalze1	Vorwalze 2	Feinwalze	Conche	
ermittelte Ergebnisse mit dem Laser-Spektrometer in Volumen-%											
>30	67,58	67,92	15,48	12,94	57,60	55,45	57,49	56,39	6,97		6,95
>75	49,18	48,41	0,11	0	39,47	36,66	37,92	36,36	0		0
>120	34,79	33,18	0	0	27,78	24,61	26,22	25,17	0		0
>200	17,78	16,18	0	0	15,83	12,84	14,15	14,09	0		0
ermittelte Ergebnisse mit der Nasssieb-Methode in Masse-%											
>30	47,75	46,80	4,60	4,23	62,60	63,07	50,45	50,14	2,17		2,23
>75	29,88	30,46	0,53	0,14	55,54	56,58	36,35	36,92	0,36		0,09
>120	18,78	19,38	0,04	0,09	53,20	52,41	28,21	29,73	0,18		0,01
>200	6,01	6,14	0,06	0,09	49,59	50,29	19,98	19,69	0,21		0,02
lineare Korrelation der Ergebnisse vom Laser-Spektrometer mit denen der Nasssieb-Methode											
	0,998	1,000	0,995	1,000	-*	-*	1,000	0,997	0,997		0,999

* Korrelation nicht berechnet, aufgrund der fehlerhaften Ergebnisse der Mischerproben bei der Untersuchung mit dem Laser-Spektrometer

In Tabelle 21 ist bei der VMB zu sehen, dass die ermittelten Werte der Partikelgrößenverteilung von den Mischerproben am größten sind. Das zeigt sich sowohl bei der Untersuchung mit dem Laser-Spektrometer als auch mit der Nasssieb-Methode. Im 2SWV ist an den Gegenübergestellten Werten zu sehen, dass die Partikelzerkleinerung im Vorwalzwerk in allen Größenklassen sichtbar ist. Hauptsächlich werden große Partikel (Zuckerkristalle) zerkleinert, weshalb ein größerer Unterschied in den Größenklassen >200 und >120 μm zu sehen ist. Die weitere Verarbeitung der Schokoladenmasse auf dem Fünfwalzwerk zeigt, dass die Partikel von allen Größenklassen stark zerkleinert werden. Bei der Laser-Spektrometrie wurden anschließend nur in der Größenklasse >30 μm Partikel gemessen. Das bedeutet, dass die Partikel eine Größe von 75 μm nicht übersteigen. Bei der Nasssieb-Methode war der Hauptanteil der ermittelten Rückstände ebenfalls auf dem Sieb mit 30 μm Maschenweite. Es wurden jedoch auch auf den anderen Sieben sehr geringe Rückstände gemessen, wobei es sich um Durchschüsse bei der Feinzerkleinerung handeln kann. Die Concheproben liefern Rückstände in den gleichen Größenklassen wie die Feinwalzproben. Bei deren Vergleich zeigen die Werte eine geringe Abnahme der Mengen in den Größenklassen.

Im 1SWV sind bei den Kneteproben von beiden Partikelgrößenmessmethoden Partikel in den einzelnen Größenklassen vorhanden. Es zeigt sich im Vergleich zum 2SWV, dass die Partikelmengen in den einzelnen Größenklassen denen der Vorwalzwerke ähneln. Dabei sind die Partikelmengen der Kneteproben in allen Größenbereichen etwas geringer als bei den Vorwalzproben. Bei der Feinzerkleinerung mit dem Fünfwalzwerk werden auch im 1SWV Partikel von allen Größenklassen zerkleinert. Mit der Nasssieb-Methode wurden auch bei diesen Proben Partikel in den Größenklassen >75 , >120 und >200 μm gefunden, was wieder auf Durchschüsse zurückführbar sein kann. bei der Laser-Spektroskopie wurden in diesen Größenklassen keine Partikel gefunden. Die Concheproben zeigen auch im 1SWV, dass die Partikelgrößen im Vergleich zu den Feinwalzproben geringer sind.

Die Rückstände der Nasssiebung und der Laser-Spektrometrie der Feinwalz- und Concheproben liegen bei der VMB vom 2SWV und 1SWV jeweils in einem ähnlichen Bereich.

Die einzelnen Korrelationswerte zeigen bei der VMC und VMB, dass die Ergebnisse der beiden Untersuchungsmethoden zur Partikelgrößenbestimmung vergleichbare Werte liefern. Es kann somit festgestellt werden, dass die Nasssiebmethode die Laser-Spektrometrie bestätigt.

Tabelle 21: Gegenüberstellung und Korrelation der Ergebnisse vom Laser-Spektrometer und der Nasssiebung von VMB

Größen- klasse	2SWV – Mittelwerte aus VMB 1, 2, 3						1SWV – VMB 4			
	Mischer 1	Mischer 2	Vorwalze 1	Vorwalze 2	Feinwalze	Conche	Knetter 1	Knetter 2	Feinwalze	Conche
>30	74,24	74,54	67,70	67,46	11,61	9,99	65,55	62,49	13,18	10,96
>75	59,01	59,63	48,23	47,69	0	0	45,37	40,60	0	0
>120	42,26	43,59	32,97	32,44	0	0	32,12	26,91	0	0
>200	20,26	22,82	16,99	16,26	0	0	18,26	13,96	0	0
ermittelte Ergebnisse mit dem Laser-Spektrometer in Volumen-%										
ermittelte Ergebnisse mit der Nasssieb-Methode in Masse-%										
>30	61,81	62,06	53,32	52,88	3,52	2,26	51,56	50,23	3,58	3,04
>75	55,92	54,48	39,34	38,03	0,13	0,04	33,83	31,88	0,20	0,34
>120	50,00	51,53	30,89	30,71	0,08	0,03	23,37	22,11	0,18	0,13
>200	43,91	43,75	21,43	20,08	0,09	0,01	10,96	9,89	0,23	0,21
lineare Korrelation der Ergebnisse vom Laser-Spektrometer 2000E mit denen der Nasssieb-Methode										
	-*	-*	0,998	0,997	1,000	1,000	1,000	0,992	1,000	0,998

* Korrelation nicht berechnet, aufgrund der fehlerhaften Ergebnisse der Mischerproben bei der Untersuchung mit dem Laser-Spektrometer

4.5 Rheologie der Endmassen VMC und VMB vom 1SWV und 2SWV

Für die Untersuchung der Rheologie wurden die Concheproben der VMC und VMB jeweils vom 1SWV und 2SWV analysiert. Tabelle 22 zeigt die gemessenen Werte der Fließgrenzen und Viskositäten der VMC und VMB ausgewertet nach Casson. Im Anhang 9, Tabelle 36, Seite 202 sind zusätzlich die Mittelwerte der gemessenen Schubspannung und die Casson Viskosität der VMC und VMB bei den konstanten Scherraten (Abbildung 28) dargestellt.

Es zeigt sich bei der VMC und der VMB, dass die Viskositäten in einem Bereich von 1,8 bis 2,4 Pa*s liegen. Als Ausnahme weicht die Viskosität von VMB 4 am weitesten von den Viskositäten der anderen Massen ab. Die Fließgrenzen zeigen zwischen VMC und VMB einen leichten Unterschied. Die Fließgrenzen von VMC 1, 2, 3 (1SWV) zeigen höhere Werte als VMC 4 (2SWV). Sie liegen insgesamt in einem Bereich von 8 bis 16 Pa. Bei der VMB sind die Fließgrenzen etwas niedriger als bei der VMC. Sie liegen in einem Bereich von 5 bis 8 Pa und zeigen kaum Unterschiede zwischen 2SWV und 1SWV. Die Fließgrenze der VMB 4 (1SWV) ist höher als die der VMB 1, 2, 3 (2SWV).

Tabelle 22: Zusammenstellung der ermittelten Rheologiedaten VMC und VMB

Schokoladen- masse	Fließgrenze τ_{CA} [Pa]	Viskosität η_{CA} [Pa*s]	Schokoladen- masse	Fließgrenze τ_{CA} [Pa]	Viskosität η_{CA} [Pa*s]
1SWV			2SWV		
VMC 1	11,02	2,09	VMB 1	6,56	1,84
VMC 2	9,94	2,04	VMB 2	5,61	2,02
VMC 3	15,81	1,98	VMB 3	7,57	2,19
2SWV			1SWV		
VMC 4	8,10	2,14	VMB 4	7,76	2,40

In Abbildung 72 und Abbildung 73 sind die Fließkurven der jeweils vier Concheproben von der VMC und VMB im 1SWV und 2SWV dargestellt. Zu sehen sind nur geringe Unterschiede zwischen den Kurven beider Herstellverfahren.

In Abbildung 72 ist die Zunahme der Schubspannung bei steigender Scherrate der VMC-Proben dargestellt. Es fällt auf, dass die Proben von VMC 1, 2 und 3 vom 1SWV höhere Schubspannungen bei gleicher Scherrate zeigen als die Probe der VMC 4. Besonders deutlich ist dies bei der höchsten Scherrate von 60 s^{-1} zu sehen. Die einzelnen Fließkurven der VMC vom 1SWV gehen mit zunehmender Scherrate weiter auseinander.

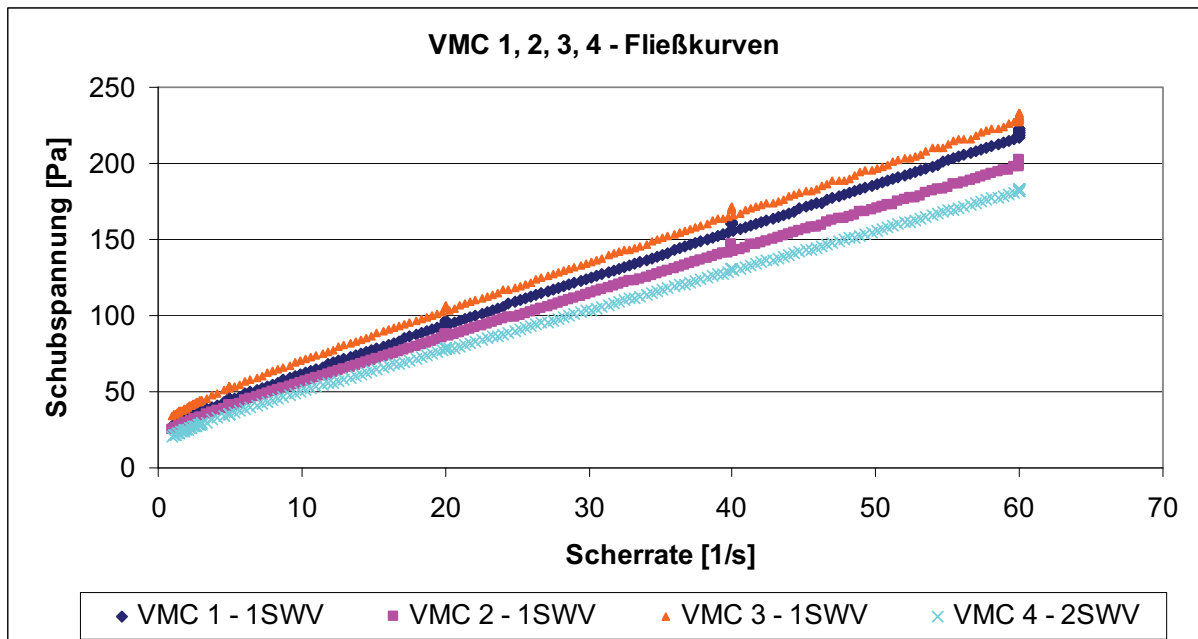


Abbildung 72: Fließkurven der VMC Concheproben vom 1SWV und 2SWV

In Abbildung 73 ist die Schubspannung bei steigender Scherrate der Proben von VMB im 2SWV und 1SWV dargestellt. Bei der VMB 1 und 2 vom 2SWV verlaufen die Kurven sehr ähnlich. Die Fließkurve von VMB 3 weicht von denen der VMB 1 und 2 weiter ab. Sie zeigt bei gleicher Scherrate eine höhere Schubspannung. Besonders deutlich wird das bereits bei einer Scherrate von 20 s^{-1} sichtbar und noch deutlicher bis zur Scherrate von 60 s^{-1} . Die mögliche Ursache dafür ist die veränderte Kakaobutterdosierung in Mischer und Conche. Die gemessene Schubspannung der VMB 4 (1SWV) ist bei steigender Scherrate noch größer als die der VMB 3, was auch etwa ab 20 s^{-1} deutlich wird.

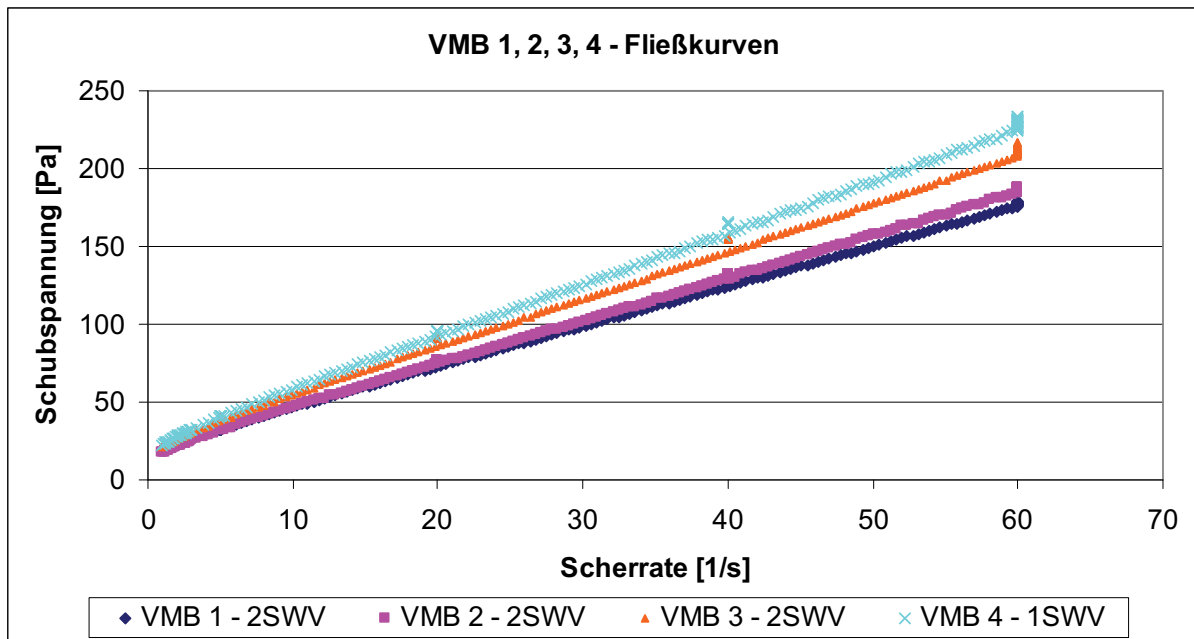


Abbildung 73: Fließkurven der VMB Concheproben vom 2SWV und 1SWV

Mögliche Gründe für die erhaltenen Fließkurven der VMC und VMB können die enthaltenen Partikel und deren Partikelanteil $>30 \mu\text{m}$ sein. So zeigen die Massen der VMC 1, 2, 3 (Tabelle 14) und VMB 1, 2, 3 (Tabelle 17) mit den kleinsten Partikeln die größte Schubspannung bei gleicher Scherrate.

Bei der VMC und bei der VMB zeigen die Proben vom 1SWV eine höhere Schubspannung bei gleicher Scherrate auf als im 2SWV. Daher können die Fließkurven mit der Herstellmethode bzw. mit den Eigenschaften der Massen vom 1SWV und 2SWV zusammenhängen.

Korrelation der Partikelverteilungen der Nasssieb-Methode und der Laser-Spektrometrie mit den ermittelten Fließgrenzen

Tabelle 23 und Tabelle 24 zeigen die Korrelation der Partikel $>30 \mu\text{m}$ der Concheproben (VMC und VMB) von der Nasssieb-Methode und der Laser-Spektrometrie mit den Fließgrenzen.

Bei der Korrelation der Partikelmenge $>30 \mu\text{m}$ der Nasssieb-Methode und der Laser-Spektrometrie mit den Fließgrenzen der VMC (Tabelle 23) scheint es keinen Zusammenhang zu geben. Auch innerhalb der VMC 1, 2, 3 gibt es keinen direkten Zusammenhang, da die Fließgrenze mit abnehmender Partikelmenge $>30 \mu\text{m}$ steigt. Von VMC 2 zu VMC 1 steigen die Partikelmenge $>30 \mu\text{m}$ und die Fließgrenzen an und bei der VMC 3, welche eine geringe Menge an Partikeln $>30 \mu\text{m}$ hat ist die Fließgrenze noch größer. Die Fließgrenze der Sonderproduktion VMC 4 weicht noch weiter von denen der VMC 1, 2 und 3 ab.

Tabelle 23: Korrelation der Partikel >30 µm mit den Fließgrenzen der Concheproben von VMC 1, 2, 3, 4

	1SWV			2SWV	lineare Korrelation der Partikel >30 µm	
	VMC 1	VMC 2	VMC 3	VMC 4		
Nasssieb-Methode Partikel >30 µm [% abs.]	5,70	5,34	1,65	2,20	der Nass- sieb- Methode	der Laser- Spektro- metrie
Laser-Spektrometrie Partikel >30 µm [Vol-%]	15,54	14,45	8,85	6,95		
Fließgrenze τ_{CA} [Pa] *	11,02	9,94	15,81	8,10	-0,350	-0,062

* Werte von Tabelle 22

Die Korrelationen der Partikelmengen >30 µm von der Nasssiebmethode und der Laser-Spektrometrie mit den Fließgrenzen der VMB (Tabelle 24) zeigen, dass es keinen engen Zusammenhang gibt. Jedoch entsteht dieser Eindruck durch die Sonderproduktionen. Denn bei VMB 1, 2, 3 ist zu erkennen, dass mit abnehmender Partikelgröße die Fließgrenze steigt.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass kleinere Partikel der Schokolademassen enger aneinander gelagert sind und die Packungsdichte somit höher ist. Die Fließgrenze ist nach Tscheuschner (1996) auf Wechselwirkungen der Feststoffe und auf das Ausbilden von räumlichen Strukturen zurückzuführen. Bei einer stärkeren Zerkleinerung steigen die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Feststoffen an, wodurch auch die Fließgrenze steigt.

Tabelle 24: Korrelation der Partikel >30 µm mit den Fließgrenzen der Concheproben von VMB 1, 2, 3, 4

	2SWV			1SWV	lineare Korrelation der Partikel >30 µm	
	VMB 1	VMB 2	VMB 3	VMB 4		
Nasssieb-Methode Partikel >30 µm [% abs.]	2,84	3,00	0,95	3,00	der Nass- sieb- Methode mit	der Laser- Spektro- metrie mit
Laser-Spektrometrie Partikel >30 µm [Vol-%]	11,30	11,15	7,53	10,96		
Fließgrenze τ_{CA} [Pa] *	6,56	5,61	7,57	7,76	-0,460	-0,506

* Werte von Tabelle 22

5 Abschlussdiskussion

Rohstoffe

Die Rohstoffuntersuchung mit dem Laser-Spektrometer (Abbildung 43 bis Abbildung 48, Seite 63 bis 68 und Abbildung 49 bis Abbildung 51, Seite 69 bis 71) ergaben jeweils sehr ähnliche, nah beieinander liegende Kurven. Dies bestärkt die gewonnenen Erkenntnisse beim Einfahren der Trockenmesseinheit (Gliederungspunkt 4.3.1). Die Konstanz der Partikelverteilungen ist ein Vorteil für die Produktion der Schokoladenmassen im 1SWV und 2SWV, da immer eine annähernd gleiche Partikeloberfläche mit Fett zu umhüllen ist.

Bei Staubzucker (Abbildung 47, Seite 67), Laktose (Abbildung 44, Seite 64), Sprühmilchpulver-VMC (Abbildung 46, Seite 66) und Sprühmilchpulver-VMB (Abbildung 48, Seite 68) befinden sich Partikel im Bereich von 1 bis 3 μm . Dabei kann es sich bei Staubzucker um amorphe Zuckerteilchen, und bei den beiden Milchpulvern und Laktose um amorphe Laktose handeln. Da diese Partikel hygroskopisch sind kann deren Anteil Einfluss auf die Schokoladenherstellung haben.

Die Unterschiede der Partikelverteilung der Probe Sprühmilchpulver-VMC von VMC 4 (Abbildung 46, Seite 66) können bei gleichem Hersteller, unveränderten Messeinstellungen und –bedingungen mit abweichenden Herstellparametern beim Produzenten begründet werden.

Sprühmilchpulver-VMB (Abbildung 48, Seite 68) zeigt eine recht feine Partikelverteilung. Die spezifische Oberfläche (Tabelle 25, Seite 157) deutet jedoch auf grobe Partikel. Dies könnte aus der Berechnung der spezifischen Oberfläche und dem dafür benötigten Gewicht der Partikel resultieren. Die Partikel werden im Gegensatz zu Tabelle 1 (Seite 10) als nicht porös angenommen (Gliederungspunkt 3.3.2.3).

Vanillin (Abbildung 45, Seite 65) zeigt eine sehr grobe Partikelverteilung. Da Vanillin nur in einer sehr geringen Menge im Vergleich zur Gesamtrezeptur zugesetzt wird, sind negative sensorische Einflüsse auszuschließen (Abbildung 18, Seite 28 und Abbildung 19, Seite 31).

VMC im 1SWV und 2SWV

Mischer

Bei der Untersuchung der Mischerprobe der VMC 4 (2SWV) mit dem Laser-Spektrometer (Tabelle 6, Seite 72, Abbildung 52, Seite 73) wurde festgestellt, dass die Ergebnisse fehlerhaft sind. Der Mischeransatz enthält Zuckerkristalle deren Größe über 1.000 μm hinausgeht. Die

Mischerkurve müsste eine breitere Verteilung zeigen und über den Messbereich hinausgehen. Gründe dafür sind bei der Nassdispergiereinheit (Gliederungspunkt 3.3.2.1) und dem viskosen Sonnenblumenöl zu finden. Die Probe wird nicht im Öl verteilt und nicht durch die Einheit gepumpt. Außerdem liegt die obere Grenze des Messbereichs bei 1.000 µm, wodurch größere Partikel nicht erfassbar sind.

Die Messung mit der Nasssieb-Methode (Tabelle 15 und Abbildung 62, Seite 91) zeigt, dass die Mischerprobe die größten Partikel enthält, was die REM-Aufnahmen (Abbildung 29, Seite 49, Abbildung 74 und Abbildung 75, Seite 132) bestätigen.

Kneter – Vorwalze

Bei der Gegenüberstellung der Kneter (1SWV) und Vorwalzprobe (2SWV) hat sich bei der Laser-Spektrometrie gezeigt, dass die Kneterprobe gröber ist als die der Vorwalze (Abbildung 53, Seite 75). Die Untersuchung der Partikelgrößenverteilung mit der Nasssiebung ergab das Gegenteil (Abbildung 64, Seite 93). Ein möglicher Grund für diese Unterschiede (Abbildung 53, Seite 75) ist, dass es bei der Produktion der VMC im 2SWV Abweichungen in der Rezeptur gab (Gliederungspunkt 4.1). Es wurden zwei statt einer Kakaomasse eingesetzt. Der erste Peak (Abbildung 53, Seite 75) besteht hauptsächlich aus den Partikeln der Kakaomassen (Abbildung 49, Seite 69), so dass die zweite Kakaomasse der Grund für diesen erhöhten ersten Peak sein kann. Bei der Nasssiebung wurde die Partikelverteilung der Kneter- und Vorwalzprobe fast unabhängig von den Kakaomassen betrachtet, da diese überwiegend Partikel <30 µm enthalten (Abbildung 49, Seite 69). Insgesamt ist zu diesem Unterschied zu sagen, dass die Proben von Kneter und Vorwalze aufgrund der abweichenden Rezeptur nicht direkt miteinander vergleichbar sind.

Die mit der Nasssiebung ermittelten Siebrückstände der Kneterproben von VMC 1 und VMC 2 (Abbildung 60, Seite 89) etwas geringer als die der VMC 3, was sich bei den Proben nach dem Feinwalzen und Conchieren (Abbildung 61, Seite 89) genau andersherum zeigt. Das lässt sich mit den Eigenschaften von Feinwalzwerken erklären. Wenn die Masse im Kneter gröber ist, ergibt sich eine weichere Masse. Diese wird langsamer in die Einzugspassage eingezogen, als trockenere Massen. Bei angenommenem konstantem Differential werden weichere Knetmassen feiner gewalzt. Für die Größe der Partikel der Schokoladenmassen vom 1SWV ist es also von Vorteil, wenn die Masse im Kneter etwas gröber und somit etwas weicher ist.

Feinwalze

Die Untersuchungen der Partikelverteilung auf der fünften Walze ergaben im 1SWV größere Abweichungen in den Kurvenverläufen. (Gliederungspunkt 4.3.5, Abbildung 126, Seite 174 bis Abbildung 137, Seite 185, Tabelle 34, Seite 186). Bei VMC 1 (Abbildung 126, Seite 174 bis Abbildung 128, Seite 176) ist eine Überpressung der Einzugspassage sichtbar. Resultieren kann das durch die Konsistenz der Masse, welche trocken zu sein scheint, da die Kurven etwas weiter im groben Bereich liegen. Bei Erhöhung des Differentials oder der Walztemperatur würde sich der Einzug verringern. Es würde sich weniger Masse auf den Walzen 2 bis 5 befinden und daher feiner zerkleinert werden. Da die Kurven (z.B. VMC 1, Abbildung 126, Seite 174 bis Abbildung 128, Seite 176) zu den einzelnen Untersuchungszeitpunkten untereinander schwanken, ist es weiterhin möglich, dass die Massen im Knetter nicht ausreichend homogen vermischt wurden. Die Feinzerkleinerung sollte im Prozess öfter kontrolliert werden, um Feinwalzeinstellungen anpassen zu können. Bei VMC 2 (Abbildung 129, Seite 177 bis Abbildung 131, Seite 179) war der Einzugsspalt anhand der Kurven (Abbildung 130, Seite 178 und Abbildung 131, Seite 179) scheinbar rechts zu klein und daher nicht parallel. Die Kurven von VMC 3 (Abbildung 132, Seite 180 bis Abbildung 134, Seite 182) zeigen eine Überpressung der Einzugspassage. Auch das Differential kann etwas zu gering oder die Masse zu trocken gewesen sein, so dass in der Mitte zu viel Masse eingezogen wird. Bei der VMC 4 im 2 SWV (Abbildung 135, Seite 183 bis Abbildung 137, Seite 185) zeigt sich nach dem Start, dass der Spalt parallel war und der gesamte Prozess mehr Konstanz aufzeigt. Da die VMC 4 nur ein Mal im 2SWV hergestellt wurde, kann dies nicht noch weiter bestätigt werden.

Bei den REM-Aufnahmen der Feinwalzproben (Abbildung 32 (1SWV) und Abbildung 33 (2SWV), Seite 52, Anhang 1 Abbildung 80 bis Abbildung 83) sind Zusammenlagerungen von Partikeln zu sehen. Ursache dafür kann von den Rohstoffen und der Massen aufgenommenes Wasser sein. Zurückgeführt werden kann die Wasseraufnahme auf hygroskopische, amorphe Bestandteile, die in den Massen vom 1SWV und 2SWV in verschiedenen großen Anteilen vorkommen. Durch den Einsatz des Staubzuckers im 1SWV ist zu vermuten, dass im 1SWV mehr Wasser aufgenommen wird und es daher zu der stärkeren Bildung von Agglomeraten kommt.

Beim Vergleich der Partikelverteilung der Feinwalzproben vom 1SWV und 2SWV (Tabelle 8, Seite 76, Abbildung 54, Seite 77) weist der Kurvenverlauf vom 2SWV auf feinere Partikel und eine einheitlichere und weniger breite Partikelverteilung hin.

Conche

Vorhandene Agglomerate werden durch Ausdampfen des in dem Feinwalzgut enthaltenen Wassers und durch Scherung und Reibung an den Conchenwandungen aufgetrennt. Dies zeigt sich in den Ergebnissen mehrerer Untersuchungen. Zum einen ist es in den REM-Aufnahmen der Concheproben von VMC des 1SWV (Abbildung 32, Seite 52 Vgl. Abbildung 34, Seite 53) und 2SWV (Abbildung 33, Seite 52 Vgl. Abbildung 35, Seite 53) sichtbar. Zum anderen zeigen die Kurven der Partikelverteilung mit der Laser-Spektrometrie (Tabelle 8, Seite 76, Abbildung 54, Seite 77 und Tabelle 9, Seite 78, Abbildung 55, Seite 78), dass grobe und feine Agglomerate aufgetrennt werden. Bei der Nasssiebung wird die Agglomeratauftrennung bei VMC 1 und 3 (Tabelle 14, Seite 88, Abbildung 61, Seite 89) sichtbar.

Die Kurvenverläufe der Concheproben vom 1SWV und 2SWV (Abbildung 55, Seite 78) zeigen, dass die Partikel der Probe des 2SWV einheitlicher verteilt sind und die Probe insgesamt feiner zerkleinert ist.

Die Viskositäten und Fließgrenzen (Tabelle 22, Seite 104) entsprechen den Vorgaben, wobei die Fließgrenzen im 1SWV höher sind als im 2SWV.

VMB im 2SWV und 1SWV

Mischer

Die Partikelverteilung der Mischerproben der VMB (2SWV) (Tabelle 10, Seite 79, Abbildung 56, Seite 80) zeigt ebenfalls, dass die Ergebnisse fehlerhaft sind. Die Kurven müssten wie bei der VMC über den Messbereich hinausgehen. Zu begründen sind die Messfehler ebenfalls damit, dass die Partikel nicht richtig durch die Einheit (Gliederungspunkt 3.3.2.1) gefördert werden. Die Kurven sehen sich dennoch sehr ähnlich und zeigen im Vergleich zu den Mischerproben der VMC (Abbildung 52, Seite 73) einheitlichere Werte. Bei der Nasssiebung war die Mischerprobe aufgrund der enthaltenen Partikel und deren Größe die größte Probe. Die REM-Aufnahme (Abbildung 36, Seite 54) bestätigt dies durch erkennbare Zuckerkristalle.

Vorwalze & Knetter

In Abbildung 57 (Seite 82) ist zu sehen, dass die Vorwalzproben einen fast identischen Kurvenverlauf haben, wohingegen die Knetterproben etwas weiter auseinander liegen. Das bestätigt sich bei der Gegenüberstellung der Partikelverteilungen von der Nasssiebmethode (Tabelle 21, Seite 103). Im Gegensatz zur VMC zeigen die Partikelverteilungen der Laser-

Spektrometrie bei der VMB, dass die Vorwalzproben gröber sind als die Kneterproben (Tabelle 11, Seite 81, Abbildung 57, Seite 82). Das wird durch die Ergebnisse der Nasssiebung (Tabelle 19, Seite 98, Abbildung 70, Seite 99) bestätigt. Die beiden Prozessstufen ähneln sich in der Partikelverteilung (Tabelle 21, Seite 103). Aufgrund der größeren Partikeloberfläche im 1SWV ist zu sagen, dass die Knetermasse trockener als die Vorwalzmasse ist. Daher benötigen Kneter und Vorwalzmassen verschiedene Einstellungen an den Feinwalzen um einen gleichmäßigen Einzug für eine einheitliche Partikelverteilung zu erreichen. Aufgrund der geringeren Schwankungen in der Partikelverteilung der Vorwalzproben untereinander (Tabelle 11, Seite 81, Abbildung 57, Seite 82) sind kaum Veränderungen an den Einstellungen des Feinwalzwerk vorzunehmen.

Feinwalze

Bei der Untersuchung der Partikelverteilung auf der fünften Walze während des Walzprozesses (Abbildung 138, Seite 188 bis Abbildung 149, Seite 199, Tabelle 35, Seite 200) ergaben sich die größten Abweichungen bei der VMC 4 im 1SWV (Abbildung 147, Seite 197 bis Abbildung 149, Seite 199, Tabelle 35, Seite 200). Bei der VMB 1 (Abbildung 138, Seite 188 bis Abbildung 140, Seite 190) bedeuten die ähnlichen Kurven über den gesamten Feinwalzprozess, dass der Anpressdruck gleichmäßig und der Einzugsspalt parallel ist. Bei der VMB 2 (Abbildung 141, Seite 191 bis Abbildung 143, Seite 193) kam es zu einer leichten Überpressung der Walzen in der Einzugspassage. Zum Ausgleich ist der Anpressdruck an den Seiten zu verringern, um die Parallelität des Einzugsspalt zu erreichen. Durch die Partikelverteilung (Abbildung 143, Seite 193) der rechten Seite mit den sehr groben Partikeln am Ende des Prozesses ist zu vermuten, dass der Massefilm dort bereits teilweise abgerissen war oder nur ungleichmäßig über die Walzen lief und das Walzwerk kurz darauf gestoppt wurde. Es zeigt sich bei VMB 3 anhand des zweiten Peaks der Kurven (Abbildung 144, Seite 194 bis Abbildung 146, Seite 196), dass über den gesamten Feinwalzprozess eine leichte Überpressung der Einzugspassage vorlag. Das resultiert aus der veränderten Kakaobutterdosierung (Gliederungspunkt 4.1). Korrigiert werden könnte das durch Verringerung des Anpressdrucks an den Seiten, um die Parallelität des Einzugsspalt herzustellen. Beim Feinwalzen der VMB 4 (1SWV) (Abbildung 147, Seite 197 bis Abbildung 149, Seite 199) zeigt sich, dass zu Beginn der Feinzerkleinerung der Anpressdruck an den Seiten zu hoch gewesen ist. Eine andere Ursache könnte die Konsistenz der Masse sein, welche in diesem Fall zu trocken gewesen wäre, so dass zu viel Walzgut in die Einzugspassage eingezogen wurde. Die Walzeneinstel-

lungen wurden zum Vorteil verändert, so dass die Partikelverteilungen nach 1h Betrieb und am Ende des Prozesses ähnlicher sind.

Auch die REM-Aufnahmen der Feinwalzproben vom 2SWV (Abbildung 39, Seite 57, Anhang 2 Abbildung 94 und Abbildung 95) und 1SWV (Abbildung 40, Seite 57, Anhang 2 Abbildung 96 und Abbildung 97) zeigen Zusammenlagerungen von Partikeln. Genau wie bei der VMC kommt es wahrscheinlich durch aufgenommenes Wasser zu Agglomeratbildung. Da im 2SWV Kristallzucker eingesetzt wird, ist anzunehmen, dass die Wasseraufnahme im 1SWV durch den eingesetzten Staubzucker größer ist. Anhand der REM-Aufnahmen sind Unterschiede im Agglomeratanteil im 1SWV oder 2SWV nicht abschätzbar.

Beim Vergleich der Partikelverteilungen der Feinwalzproben vom 2SWV und 1SWV (Abbildung 58 und Tabelle 12, Seite 83) wird deutlich, dass die Kurven nah beieinander liegen und sich nur in der Höhe der zwei Peaks unterscheiden. Die Kurve vom Feinwalzwerk des 2SWV zeigt, dass diese Probe feiner war.

Conche

Die Agglomeratauftrennung wird bei der VMB ebenfalls in mehreren Untersuchungen deutlich. Die REM-Aufnahmen der Concheproben 2SWV (Vgl. Abbildung 39, Seite 57 und Abbildung 41, Seite 58) und 1SWV (Vgl. Abbildung 40, Seite 57 und Abbildung 42, Seite 58) zeigen, dass nach dem Conchieren keine Agglomerate mehr vorhanden sind. Die Kurven der Laser-Spektrometrie (Abbildung 58 und Tabelle 12, Seite 83 und Abbildung 59, Seite 85, Tabelle 13, Seite 84) zeigen durch eine mögliche Agglomeratauftrennung eine Annäherung aneinander. Bei der Nasssiebung ist eine Agglomeratauftrennung nur bei VMB 3 (Abbildung 67, Seite 96, Tabelle 17, Seite 95) vom 2SWV und bei VMB 4 (1SWV) (Abbildung 69, Seite 98, Tabelle 18, Seite 97) zu sehen.

Beim Vergleich der Partikelverteilungen der Concheproben vom 2SWV und 1SWV (Abbildung 59, Seite 85, Tabelle 13, Seite 84) fällt auf, dass sich die Kurven sehr ähnlich sind und sich nur geringfügig in der Peakhöhe unterscheiden. Die Kurve der Concheprobe vom 2SWV zeigt, dass die Partikel geringfügig feiner sind.

Die Viskositäten und Fließgrenzen (Tabelle 22, Seite 104) entsprechen den Vorgaben. Die Fließgrenze ist im 1SWV nur minimal höher als im 2SWV.

1SWV und 2SWV

Generelle Unterschiede der beiden Herstellverfahren liegen im Vermischen der Rohstoffe. Im 2SWV erfolgt das Vermischen aufgrund der geringen Partikeloberfläche durch den Kristallzucker viel schneller. Im 1SWV ist durch den Einsatz von Staubzucker eine wesentlich größere Oberfläche mit Fett zu umhüllen.

Insgesamt ist zu den Ergebnissen der untersuchten Herstellverfahren zu sagen, dass im 2SWV Schokolademassen mit einheitlicheren Partikelverteilungen im Verlauf der Herstellung (Anhang 7) und in den fertigen Schokolademassen produziert werden. Die einzelnen Prozessschritte (2SWV) sind für minimale Schwankungen in den Partikelverteilungen genau aufeinander abgestimmt. Im 1SWV kommt es hingegen zu größeren Schwankungen in den Partikelverteilungen der einzelnen Prozessstufen (Anhang 7).

In den Untersuchungen mit der Laser-Spektroskopie und der Nasssieb-Methode fiel die Abhängigkeit der Partikelverteilung der Endmasse von der im Knetter (1SWV) (Tabelle 14, Seite 88, Abbildung 60, Seite 89, Abbildung 61, Seite 89) bzw. Vorwalzwerk (2SWV) (Gliederungspunkt 4.1, Tabelle 33, Seite 173, Abbildung 125, Seite 173) auf. Je gröber bzw. weicher die Masse zu Beginn ist, umso feiner ist sie am Ende der Prozesse. Abhängig ist das von der Rohstoffdosierung und dem vorhandenen Fett um die Partikel mit Fett zu umschließen.

Bei der Untersuchung der Partikelverteilung im Feinwalzprozess zeigt sich im 2SWV eine gleichmäßigere Partikelzerkleinerung. Grund dafür kann die gute Homogenität der Masse nach der Vorzerkleinerung sein, so dass weniger Schwankungen der Partikelgrößenverteilung auf dem Feinwalzwerk ausgeglichen werden müssen.

Die Endmassen des 1SWV und 2SWV sind sich ähnlich in der Partikelverteilung und der Rheologie und weisen gute Eigenschaften für die Weiterverarbeitung auf. Daher ist der Hauptkritikpunkt am 1SWV, dass die Partikelverteilung in den einzelnen Prozessstufen untereinander vermehrt Abweichungen zeigen. Durch diese Schwankungen muss die Feinzerkleinerung öfter überprüft und Einstellungen am Feinwalzwerk müssen öfter verändert werden.

Vorschläge für Veränderungen

Da die Anlagen im 2SWV optimal aufeinander abgestimmt sind, konzentrieren sich die Veränderungsvorschläge auf das 1SWV. Die Vorschläge beziehen sich auf die Verringerung der Schwankungen in den Partikelverteilungen der einzelnen Prozessstufen.

Nach dem Vermischen soll die Schokoladenmasse eine gute Homogenität aufweisen. Um diese zu erhöhen kann eine Veränderung in der Reihenfolge der Rohstoffdosierung von Vor-

teil sein. Die Kakaobutter wird derzeit als letztes in den Knetter gegeben. Wenn sie nach der Kakaomasse dosiert werden würde, könnten die pulverigen Rohstoffe während der Dosierung besser verteilt werden.

Ein weiterer Aspekt wäre das Sichten des Staubzuckers, um den Feinstkornanteil abzutrennen. Dadurch könnte die Partikeloberfläche, die mit Fett zu umhüllen ist, verringert werden. Die Homogenität der Knetermasse könnte erhöht werden, was sich positiv auf die Feinzerkleinerung auswirken würde.

Aufgefallen ist, dass bei der Rohstoffdosierung in den Knetter dessen Fassungsvermögen nicht vollständig ausgenutzt wird. Es werden ca. 0,2 t weniger dosiert. Die vollständige Nutzung des Fassungsvermögens würde keinen Vorteil für den Produktionsablauf und die Endmasse bringen, da sie unhomogener werden und die Mischzeit sich verlängern würde. Hingegen könnte die begrenzt mögliche Verringerung der dosierten Rohstoffmenge zu einem größeren Energieeintrag und einer einheitlicheren Partikelverteilung führen. Dabei dürfen jedoch der gesamte Produktionsablauf und das Conchierprogramm nicht beeinträchtigt werden.

Weiterhin könnte die Knetermasse durch den Einbau einer Homogenisierschnecke an den Kneterausgang zu einer zusätzlichen Homogenisierung führen. Der Austrag der Schokoladenmasse aus dem Knetter könnte auch weiterhin automatisch erfolgen.

Unabhängig vom gesamten Prozess des ISWV kann das unbenutzte Feinwalzwerk aus dem Produktionsbereich entfernt werden. Der Austausch gegen ein neues Walzwerk ist nicht empfehlenswert, da für weitere benötigte Knetter kein Platz ist und die Schokoladenmasse aus dem Knetter somit zu schnell weggewalzt werden würde und eine kontinuierliche Produktion nicht möglich wäre. Es könnte somit aber der nötige Platz für den Einbau von Homogenisierschnecken nach den Knetern gewonnen werden.

Die Homogenität der Schokoladenmasse im Knetter kann außerdem durch eine zusätzliche Kakaobutterdosierung ohne oder mit Rezepturveränderung erreicht werden. Ohne die Änderung, würde sich die Rheologie verschlechtern. Durch die Änderung der Rezeptur kann die Schokoladenmasse nach dem Kneten weicher und homogener sein und die Rheologie durch zusätzliche Lecithinzugabe in die Conche ausgeglichen werden, was nur begrenzt möglich ist.

Grundlegend sollten im Verlauf der Feinzerkleinerung öfter Proben links, rechts und in der Mitte von der fünften Walze gezogen und mit der Mikrometerschraube untersucht werden. Diese arbeitet nicht genau, bietet jedoch die nötige Schnelligkeit, um die größten Partikel festzustellen. Auf Abweichungen und Konsistenzänderungen kann durch Anpassung des Differentials reagiert und die Parallelität des Einzugspalts sichergestellt werden.

Um den Feinwalzprozess zu automatisieren sollte in Erwägung gezogen werden, das vorhandene Schichtdickenmessgerät zur Regelung der Partikelgrößen einzusetzen. Die erreichte Größe der Partikel kann sofort kontrolliert und die Walzendrehzahl angepasst werden. Es müsste jedoch erst sichergestellt werden, dass das Schichtdickenmessgerät richtig arbeitet und die automatische Walzeneinstellung gute Ergebnisse liefert.

In der Conche kann nur in sehr geringem Maße Einfluss auf die Partikelverteilung genommen werden. Es kann bei dem verwendeten Conchierprogramm ein Unterschied in den Massen bei einer Conchenbefüllung von 6 und 4 t bestehen. Grund dafür kann die unterschiedlich lange Trockenconchierphase des gesamten Feinwalzguts sein. Der Austrag von Wasser und enthaltenen Säuren kann bei einer Conchenbefüllung von 4 t stärker sein, verglichen mit der Befüllung von 6 t. Unterschiede in den Endmassen können sich im Wassergehalt, Geschmack und den Fließeigenschaften zeigen.

Es wäre von Vorteil, wenn bei der Schokoladenmasseproduktion im ISWV zwei Anlagenführer arbeiten würden. Der Feinwalzprozess könnte somit durch mehr Kontrollmessungen besser überwacht werden.

6 Zusammenfassung

Ziel dieser Diplomarbeit war es, das Ein- und Zweistufenwalzverfahren der August Storck KG (Berlin) zur Produktion von Schokolade zu charakterisieren und zu vergleichen. Betrachtet wurden dabei beide Herstellverfahren zusammen mit zwei Vollmilchschokolademassen, welche im Hinblick auf die enthaltenen Partikel und deren Zerkleinerung in der Herstellung untersucht wurden.

Zur Bestimmung der Partikelgröße und –verteilung von den einzelnen Prozessstufen beider Herstellverfahren wurden die Laser-Spektroskopie, Nasssieb-Methode und Mikroskopie mit einem Rasterelektronenmikroskop durchgeführt. Zusätzlich wurden die eingesetzten Rohstoffe mit der Laser-Spektroskopie untersucht. Von den Endmassen wurden auch rheologische Untersuchungen durchgeführt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit dem Zweistufenwalzverfahren Schokoladenmasse mit konstanten und guten Eigenschaften erzeugt werden. Im Verlauf der Herstellung sind die Partikel der Dreifachbestimmung ähnlich breit verteilt. Die Endmassen zeigen sehr ähnliche Partikelverteilungen und Fließeigenschaften. Beim Einstufenwalzverfahren hingegen traten im Verlauf der Herstellung größere Abweichungen in der Partikelverteilung auf. Die Endmassen zeigten ebenfalls ähnliche Verteilungen der Partikel, so dass die Anforderungen der Qualitätssicherung erfüllt wurden. Auch bei den Untersuchungen zur Rheologie zeigte sich, dass die Qualitätsanforderungen erfüllt sind.

Im Hinblick auf eine mögliche Verringerung der Schwankungen in der Partikelverteilung der einzelnen Prozesse wurden Vorschläge für das Einstufenwalzverfahren gemacht. Diese betreffen u.a. Änderungen zur Verbesserung der Homogenisierung des Schokoladenansatzes, der Rohstoffdosierung und der gleichmäßigeren Zerkleinerung auf dem Feinwalzwerk. Deren Ziel sind geringere Schwankungen der Partikelgrößen und –verteilungen in den Prozessstufen.

Abschließend ist zu sagen, dass im Ein- und Zweistufenwalzverfahren Schokoladenmassen mit konstanten Eigenschaften hergestellt werden. Die untersuchten Anlagen zeigen jedoch, dass beim Einstufenwalzverfahren die einzelnen Prozesse optimiert werden sollten.

7 Abstract

The aim of this dissertation is to characterize and compare the one-stage and two-stage chocolate refining for the production of chocolate of the firm August Storck KG (Berlin). Considered are both manufacturing methods together with two milk chocolates which are analyzed with regard to contained particles and their refining in the production process.

To determine the particle size and distribution of all sub-processes of the one-stage and two-stage chocolate refining laser diffraction, sieving with acetone and scanning electron microscopy was used. Further the inserted raw materials are analyzed using laser diffraction. The chocolate masses after finishing conching also are examined in their rheological behavior.

The researches have shown constant and good characteristics of the chocolates produced on the two-stage chocolate refining. The particles of the threefold determination have over the course of the complete production similar broad particle distributions. The finished masses show almost identical fineness and flow properties. The same researches have pointed out greater variances in the results of the samples of the sub-processes of the one-stage chocolate refining. The final masses also show similar particle distributions so the requirements of the quality assurance were fulfilled. The samples show that the preset requirements in the values of the rheology are fulfilled.

With regard to a possible decrease of the variations in particle distributions in the sub-processes suggestions for the one-stage refining process are made. They concern modifications for a better homogeneity of the chocolate charge, a better dose of raw materials and the equal refining on the five roll refiner among others. They aim at a minimized variation in the particle size and distribution in all sub-processes.

Concluding it has to be said that chocolates with constant properties can be produced on the one-stage and two-stage chocolate refining. However the examined machines and devices show the sub-processes of the one-stage chocolate refining must be improved.

8 Literatur

Literaturverzeichnis

Balzers Union Limited (Hrsg.): Betriebsanweisung: Sputtergerät SCD 040. 1. Aufl. Liechtenstein. 1986.

Bauermeister Zerkleinerungstechnik GmbH (Hrsg.): Informationsmaterial: Bauermeister Universal- und Spaltmühlen. Norderstedt, 2006.

Bauermeister Zerkleinerungstechnik GmbH (Hrsg.): ATEX-Kurzinformation für Mahlanlagen. Norderstedt, 2006.

Beckett, S.T.: Industrial Chocolate: Manufacture und Use. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1999.

Beckett, S.T.: Moderne Schokoladentechnologie: Rohstoffe, Verfahrenstechnik, Qualitätskontrolle, Marketing. Hamburg: Behr's, 1990.

Bolenz, S., Thiessenhusen, T., Schäpe, R.: Influence of milk components on properties and consumer acceptance of milk chocolate. European Food Research and Technology 216 (2003), Nr. 1, S. 28 – 33.

Bühler AG (Hrsg.): Das Zweistufen-Walzen von Schokolade: ein wichtiger Schritt zu einer optimalen Conchierung. Uzwil, 2005.

Bühler AG (Hrsg.): Einstellungen an Schokolade-Fünfwalzwerken. Uzwil, 2006.

Bühler AG (Hrsg.): FineSens/SEDA+: Automatische Feinheitsregelung. Uzwil, 2005.

Bühler AG (Hrsg.): Fünfwalzwerk Finer-V. Uzwil, 2006.

Bühler AG (Hrsg.): Retrofit – Bühler-Trockenlaufüberwachung SELA. Uzwil, 2005.

Bühler AG (Hrsg.): Rohstoffe für die Schokoladeherstellung. Uzwil, 2006.

Bühler AG (Hrsg.): Schokolade-Conchiertechnologie. Uzwil, 2006.

Bühler AG (Hrsg.): SZW/SZAN/SZAE: Nutzwertsteigerung und Modernisierung der Vorwalzwerke. Uzwil, 2005.

Drouven, H.; Fabry I.; Göpel, G.: Süßwarentechnologie. Band I: Schokolade. 1996.

Flegler, S.L., Heckman, J.W., Klomparens, K.L. Elektronenmikroskopie: Grundlagen-Methoden-Anwendungen. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1995.

Finke, A. (Hrsg.): Handbuch der Kakaoerzeugnisse. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1965.

Kessler, H.G.: Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik: Molkereitechnologie. 4.Aufl. München: Verlag A. Kessler, 1996.

Kiermeier, F.; Lechner, E.: Milch und Milcherzeugnisse: Grundlagen und Fortschritte der Lebensmitteluntersuchung. Berlin: Verlag Paul Parey, 1973.

Kleinert, J.: Handbuch der Kakaoverarbeitung und Schokoladeherstellung. 1. Aufl. Hamburg: Behr's, 1997.

Malvern Instruments Ltd. (Hrsg.): Hydro 2000 SM: User Manual (MAN 0289). 1. Aufl. Worcestershire. 1999.

Malvern Instruments Ltd. (Hrsg.): Installations Guide (MAN 0244). 4. Aufl. Worcestershire. 2001.

Malvern Instruments Ltd. (Hrsg.): Mastersizer 2000E: Operators Guide (MAN 0320). 1. Aufl. Worcestershire. 2004.

Malvern Instruments Ltd. (Hrsg.): Scirocco: User Manual (MAN 0327). 1. Aufl. Worcestershire. 2004.

Menzel, U.: Produktveredelung mit Bauermeister-Mühlen. Die häufigsten Anwendungen. Bauermeister Zerkleinerungstechnik GmbH, Norderstedt, 2007.

Menzel, U.: Verfahrenstechnische Information Zucker: Zuckervermahlung. Bauermeister Zerkleinerungstechnik GmbH, Norderstedt, 2006.

Nitzsche, R.: Praxis Laserbeugung – Intensivkurs Teil 2 mit Probennahme, Malvern Instruments Ltd., 2004.

Spreer, E.: Technologie der Milchverarbeitung. 7. Auflage. Hamburg: Behr's, 1995.

Tscheuschner, H.-D. (Hrsg.): Grundzüge der Lebensmitteltechnik. 2.Aufl. Hamburg: Behr's, 1996.

Verordnung über Kakao- und Schokoladenerzeugnisse (idF v. 15.12.2003) Anlage 1.

Weipert, D.; Tscheuschner, H.-D.; Windhab, E. (Hrsg.): Rheologie der Lebensmittel. Hamburg, Behr's, 1993.

Wolf, G.: Rohstoffe und Halbfabrikate für Süßwarenhersteller: Begriffe, Zusammensetzung, Qualitätsmerkmale, Verwendung und Lagerung. 4. Aufl. Leipzig: Fachbuchverlag, 1987.

Internetquellen

Anonym: Lecithine. http://de.wikipedia.org/wiki/Lecithin#_ref-ABC_0. 11.07.2007;
23.07.2007

Anonym: Viskosität – Temperatur: Eine starke Abhängigkeit.
http://prorheo.given.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Viskositaet-Temperatur.pdf. 02.06.2007;
09.11.2007

BMW (Hrsg.): Technische Grundlage für die Beurteilung von Einwirkungen, die beim Betrieb von Koch-, Selch-, Brat- und Backanlagen auftreten können und Abhilfemaßnahmen. <http://www.bmwa.gv.at/NR/rdonlyres/989E24A3-326E-4A70-BB9D-837A7CBB883/17126/KochSelchBratundBackanlagen.pdf>. 2004; 10.07.2007

Chocoland: <http://www.chocoland.ch/herstellung.php> . 2003; 08.09.2007

Fasel, A.: Schokolade. <http://www.fr.ch/mhn/de/expositions/mhndet2001.htm> . 10.10.2005; 08.09.2007

Fletcher, J. Hill, A.: Zusammenhänge verstehen – Partikelgröße, Größenverteilung und Rheologie. <http://www.chemie.de/articles/d/61207/>. 10.04.2007; 18.07.2007

Gehm, L.; Schelske-Gehm, J.: Vergleichbarkeit von Viskositätsmessungen. Warum bewährte Messvorschriften nicht umgeschrieben werden müssen! http://prorheo.given.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Vergleichbarkeit.pdf. 06.09.2009; 09.11.2007

Homborg, A.: Herstellung von Kakaopulver. <http://www.theobromacacao.de/herstell/herpul.htm>. 2007; 20.07.2007

Katzer, G.: Vanille (*Vanilla planifolia* Andrews). http://www.uni-graz.at/~katzer/germ/Vani_pla.html. 24.08.2003; 23.07.2007

Scheruhn, E.: Einfluss ausgewählter Milchpulvercharakteristika auf die rheologischen Eigenschaften von kakaobutterhaltigen Suspensionen vom Typ Milkschokolade. http://edocs.tu-berlin.de/diss/2000/scheruhn_eva.pdf. 22.03.2001; 16.07.2007

Zentrale Einrichtung Elektronenmikroskopie Uni Ulm (Hrsg.): Das REM. http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/Praktikum_Herbst_2001.html. 25.10.2007; 12.11.2007

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: REM-Aufnahme von Laktose (Bühler AG, 2006).....	9
Abbildung 2: REM-Aufnahme von Walzenmilchpulver (Bühler AG, 2005).....	10
Abbildung 3: REM-Aufnahmen von Sprühmilchpulver (Bühler AG, 2005).....	10
Abbildung 4: grobe Übersicht zum 1SWV und 2SWV	12
Abbildung 5: Schokolademischer der Fa. Bühler AG (Bühler AG, 2005)	13
Abbildung 6: Schokolademischer der Fa. Richard Frisse GmbH (Bühler AG, 2005).....	14
Abbildung 7: Zweiwalzwerk der Fa. Bühler AG (Bühler AG, 2005).....	16
Abbildung 8: Einsatzbereiche, Mühlenarten für die Kristallzuckervermahlung (Menzel, 2006).....	17
Abbildung 9: Prallmühle zur Zuckermahlung (Bauermeister Zerkleinerungstechnik GmbH, 2006).....	18
Abbildung 10: REM-Aufnahmen von Staubzucker (Bühler AG, 2006).....	18
Abbildung 11: Anordnung der Walzen eines Fünfwalzwerks	20
Abbildung 12: Schokoladenpulver und REM-Aufnahme von Feinwalzgut (Bühler AG, 2006).....	21
Abbildung 13: eingesetzte Conchen der Fa. August Storck KG.....	22
Abbildung 14: conchierte Schokoladenmasse entfettet und getrocknet (Bühler AG, 2006).....	22
Abbildung 15: Probenahmestellen in den Prozessstufen des 1SWV	25
Abbildung 16: Probenahmestellen in den Prozessstufen des 2SWV	26
Abbildung 17: Probenahmestellen und -zeiten des Feinwalzprozesses im 1SWV und 2SWV	27
Abbildung 18: Fließschema des 1SWV am Beispiel der VMC	28
Abbildung 19: Fließschema des 2SWV am Beispiel der VMB	31
Abbildung 20: Schematische Darstellung eines REM (Flegler et al., 1995)	34
Abbildung 21: Darstellung einer Elektronenkanonenkammer (Flegler et al., 1995).....	35
Abbildung 22: Prinzipschema des Sputterprozesses (Balzers Union Limited, 1986).....	36
Abbildung 23: Sputterzeit-Diagramm für Gold (Balzers Union Limited, 1986).....	37
Abbildung 24: Geräteaufbau des Laser-Spektrometers (Nitzsche, 2004).....	38
Abbildung 25: Darstellung des Laser-Spektrometers (Malvern, 2004)	40
Abbildung 26: Aufbau Nassdispergiereinheit und Nassmesszelle (Malvern 1999)	41

Abbildung 27: Aufbau Trockeneinheit mit Trockenmesszelle (Malvern, 2004).....	42
Abbildung 28: Plan über den programmierten Scherablauf mit 12 Programmabschnitten	47
Abbildung 29: 2SWV – VMC – Mischer 50 fache Vergrößerung	49
Abbildung 30: 1SWV - VMC – Knetter 200 fache Vergrößerung	51
Abbildung 31: 2SWV – VMC - Vorwalze 200 fache Vergrößerung.....	51
Abbildung 32: 1SWV – VMC – Feinwalze 500 fache Vergrößerung	52
Abbildung 33: 2SWV – VMC – Feinwalze 500 fache Vergrößerung	52
Abbildung 34: 1SWV – VMC – Conche 200 fache Vergrößerung	53
Abbildung 35: 2SWV – VMC – Conche 200 fache Vergrößerung	53
Abbildung 36: 2SWV – VMB – Mischer 100 fache Vergrößerung	54
Abbildung 37: 2SWV – VMB – Vorwalze 200 fache Vergrößerung.....	56
Abbildung 38: 1SWV – VMB – Knetter 200 fache Vergrößerung.....	56
Abbildung 39: 2SWV – VMB – Feinwalze 500 fache Vergrößerung	57
Abbildung 40: 1SWV – VMB – Feinwalze 500 fache Vergrößerung	57
Abbildung 41: 2SWV – VMB – Conche 200 fache Vergrößerung	58
Abbildung 42: 1SWV – VMB – Conche 200 fache Vergrößerung	58
Abbildung 43: Partikelgrößenverteilung von Walzenmilchpulver, verwendet für VMC und VMB im 1SWV und 2SWV	63
Abbildung 44: Partikelgrößenverteilung von Laktose, verwendet für VMC und VMB im 1SWV und 2SWV	64
Abbildung 45: Partikelgrößenverteilung von Vanillin, verwendet für VMC und VMB im 1SWV und 2SWV	65
Abbildung 46: Partikelgrößenverteilung von Sprühmilchpulver-VMC, verwendet für VMC im 1SWV und 2SWV	66
Abbildung 47: Partikelgrößenverteilung von Staubzucker, verwendet für VMC und VMB im 1SWV	67
Abbildung 48: Partikelgrößenverteilung von Sprühmilchpulver-VMB, verwendet für VMB im 2SWV und 1SWV	68
Abbildung 49: Partikelgrößenverteilung von Kakaomasse, verwendet für VMC im 1SWV und 2SWV	69
Abbildung 50: Partikelgrößenverteilung der Kakaomassen, verwendet für VMB im 2SWV	70
Abbildung 51: Partikelgrößenverteilung des Kakaomassengemisches, verwendet für VMB im 1SWV	71

Abbildung 52: Partikelgrößenverteilung von VMC im 2SWV in der Prozessstufe Mischer.....	73
Abbildung 53: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von VMC im 1SWV und 2SWV in den Prozessstufen Knetter und Vorwalze.....	75
Abbildung 54: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von VMC im 1SWV und 2SWV in der Prozessstufe Feinwalzwerk	77
Abbildung 55: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von VMC im 1SWV und 2SWV in der Prozessstufe Conche.....	78
Abbildung 56: Partikelgrößenverteilung von VMB im 2SWV in der Prozessstufen Mischer.....	80
Abbildung 57: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von VMB im 2SWV und 1SWV in den Prozessstufen Vorwalze und Knetter.....	82
Abbildung 58: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von VMB im 2SWV und 1SWV in der Prozessstufe Feinwalzwerk	83
Abbildung 59: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von VMB im 2SWV und 1SWV in der Prozessstufe Conche.....	85
Abbildung 60: Siebrückstände der VMC 1, 2, 3 – 1SWV, Prozessstufe Knetter	89
Abbildung 61: Siebrückstände der VMC 1, 2, 3 – 1SWV, Prozessstufen Feinwalzwerk und Conche.....	89
Abbildung 62: Siebrückstände der VMC 4 – 2SWV, Prozessstufen Mischer und Vorwalzwerk	91
Abbildung 63: Siebrückstände der VMC 4 – 2SWV, Prozessstufen Feinwalzwerk und Conche.....	92
Abbildung 64: Gegenüberstellung der Siebrückstände VMC –1SWV und 2SWV, Prozessstufen Knetter, Mischer und Vorwalzwerk	93
Abbildung 65: Gegenüberstellung der Siebrückstände VMC – 1SWV und 2SWV, Prozessstufen Feinwalzwerk und Conche	94
Abbildung 66: Siebrückstände der VMB 1, 2, 3 – 2SWV, Prozessstufen Mischer und Vorwalzwerk	96
Abbildung 67: Siebrückstände der VMB 1, 2, 3 – 2SWV, Prozessstufen Feinwalzwerk und Conche.....	96
Abbildung 68: Siebrückstände der VMB 4 – 1SWV, Prozessstufe Knetter	97
Abbildung 69: Siebrückstände VMB 4 –1SWV, Prozessstufen Feinwalzwerk und Conche.....	98

Abbildung 70: Gegenüberstellung der Siebrückstände VMB – 2SWV und 1SWV, Prozessstufen Mischer, Vorwalzwerk und Knetter	99
Abbildung 71: Gegenüberstellung der Siebrückstände VMB – 2SWV und 1SWV, Prozessstufen Feinwalzwerk und Conche	99
Abbildung 72: Fließkurven der VMC Concheproben vom 1SWV und 2SWV	105
Abbildung 73: Fließkurven der VMB Concheproben vom 2SWV und 1SWV	106
Abbildung 74: 2SWV – VMC – Mischer 100 fache Vergrößerung	132
Abbildung 75: 2SWV – VMC – Mischer 200 fache Vergrößerung	132
Abbildung 76: 1SWV – VMC – Knetter 100 fache Vergrößerung.....	133
Abbildung 77: 1SWV – VMC – Knetter 100 fache Vergrößerung.....	133
Abbildung 78: 2SWV – VMC – Vorwalze 100 fache Vergrößerung.....	134
Abbildung 79: 2SWV – VMC – Vorwalze 200 fache Vergrößerung.....	134
Abbildung 80: 1SWV – VMC – Feinwalze 500 fache Vergrößerung.....	135
Abbildung 81: 1SWV – VMC – Feinwalze 1000 fache Vergrößerung.....	135
Abbildung 82: 2SWV – VMC – Feinwalze 500 fache Vergrößerung.....	136
Abbildung 83: 2SWV – VMC – Feinwalze 1000 fache Vergrößerung.....	136
Abbildung 84: 1SWV – VMC – Conche 200 fache Vergrößerung	137
Abbildung 85: 1SWV – VMC – Conche 500 fache Vergrößerung	137
Abbildung 86: 2SWV – VMC – Conche 200 fache Vergrößerung	138
Abbildung 87: 2SWV – VMC – Conche 500 fache Vergrößerung	138
Abbildung 88: 2SWV – VMB – Mischer 200 fache Vergrößerung	139
Abbildung 89: 2SWV – VMB – Mischer 500 fache Vergrößerung	139
Abbildung 90: 2SWV – VMB – Vorwalze 200 fache Vergrößerung.....	140
Abbildung 91: 2SWV – VMB – Vorwalze 500 fache Vergrößerung.....	140
Abbildung 92: 1SWV – VMB – Knetter 100 fache Vergrößerung.....	141
Abbildung 93: 1SWV – VMB – Knetter 500 fache Vergrößerung.....	141
Abbildung 94: 2SWV – VMB – Feinwalze 500 fache Vergrößerung.....	142
Abbildung 95: 2SWV – VMB – Feinwalze 1000 fache Vergrößerung.....	142
Abbildung 96: 1SWV – VMB – Feinwalze 1000 fache Vergrößerung.....	143
Abbildung 97: 1SWV – VMB – Feinwalze 1000 fache Vergrößerung.....	143
Abbildung 98: 2SWV – VMB – Conche 200 fache Vergrößerung	144
Abbildung 99: 2SWV – VMB – Conche 500 fache Vergrößerung	144
Abbildung 100: 1SWV – VMB – Conche 200 fache Vergrößerung	145
Abbildung 101: 1SWV – VMB – Conche 500 fache Vergrößerung	145

Abbildung 102: Veränderung der Ultraschallbehandlungszeit der Probe VMB nach Mischer.....	146
Abbildung 103: Veränderung der Ultraschallbehandlungszeit der Probe VMB nach Vorwalze	147
Abbildung 104: Veränderung der Ultraschallbehandlungszeit der Probe VMC nach Knetter	148
Abbildung 105: Veränderung der Ultraschallbehandlungszeit der Probe VMB nach Feinwalze	149
Abbildung 106: Veränderung der optischen Abschattung der Probe VMB nach Mischer....	150
Abbildung 107: Veränderung der optischen Abschattung der Probe VMB nach Vorwalze	151
Abbildung 108: Veränderung der optischen Abschattung der Probe VMC nach Knetter	152
Abbildung 109: Veränderung der optischen Abschattung der Probe VMB nach Feinwalze	153
Abbildung 110: Luftdruckeinstellung für Walzenmilchpulver.....	154
Abbildung 111: Luftdruckeinstellung für Laktose.....	154
Abbildung 112: Luftdruckeinstellung für Vanillin	155
Abbildung 113: Luftdruckeinstellung für Sprühmilchpulver-VMC	155
Abbildung 114: Luftdruckeinstellung für Staubzucker.....	156
Abbildung 115: Luftdruckeinstellung für Sprühmilchpulver-VMB	156
Abbildung 116: Darstellung der Partikelverteilung der Proben von Knetter 1 von VMC 1, 2, 3, 1SWV	162
Abbildung 117: Darstellung der Partikelverteilung der Proben von Knetter 1 von VMC 1, 2, 3, 1SWV	163
Abbildung 118: Darstellung der Partikelverteilung der Feinwalzwerkproben von VMC 1, 2, 3, 1SWV	164
Abbildung 119: Darstellung der Partikelverteilung der Concheproben von VMC 1, 2, 3, 1SWV	165
Abbildung 120: Darstellung der Partikelverteilung der Mischer 1 von VMB 1, 2, 3, 2SWV	167
Abbildung 121: Darstellung der Partikelverteilung der Mischer 2 von VMB 1, 2, 3, 2SWV	168
Abbildung 122: Darstellung der Partikelverteilung der Vorwalze 1 von VMB 1, 2, 3, 2SWV	170

Abbildung 123: Darstellung der Partikelverteilung der Vorwalze 2 von VMB 1, 2, 3, 2SWV	171
Abbildung 124: Darstellung der Partikelverteilung des Feinwalzguts von VMB 1, 2, 3, 2SWV	172
Abbildung 125: Darstellung der Partikelverteilung der Concheproben von VMB 1, 2, 3, 2SWV	173
Abbildung 126: VMC 1 – Feinwalze im 1SWV – Start	174
Abbildung 127: VMC 1 – Feinwalze im 1SWV – 1h Betrieb	175
Abbildung 128: VMC 1 – Feinwalze im 1SWV – Ende.....	176
Abbildung 129: VMC 2 – Feinwalze im 1SWV – Start	177
Abbildung 130: VMC 2 – Feinwalze im 1SWV – 1h Betrieb	178
Abbildung 131: VMC 2 – Feinwalze im 1SWV – Ende.....	179
Abbildung 132: VMC 3 – Feinwalze im 1SWV – Start	180
Abbildung 133: VMC 3 – Feinwalze im 1SWV – 1h Betrieb	181
Abbildung 134: VMC 3 – Feinwalze im 1SWV – Ende.....	182
Abbildung 135: VMC 4 – Feinwalze im 2SWV – Start	183
Abbildung 136: VMC 4 – Feinwalze im 2SWV – 1h Betrieb	184
Abbildung 137: VMC 4 – Feinwalze im 2SWV – Ende.....	185
Abbildung 138: VMB 1 – Feinwalze im 2SWV – Start	188
Abbildung 139: VMB 1 – Feinwalze im 2SWV – 1h Betrieb	189
Abbildung 140: VMB 1 – Feinwalze im 2SWV – Ende.....	190
Abbildung 141: VMB 2 – Feinwalze im 2SWV – Start	191
Abbildung 142: VMB 2 – Feinwalze im 2SWV – 1h Betrieb	192
Abbildung 143: VMB 2 – Feinwalze im 2SWV – Ende.....	193
Abbildung 144: VMB 3 – Feinwalze im 2SWV – Start	194
Abbildung 145: VMB 3 – Feinwalze im 2SWV – 1h Betrieb	195
Abbildung 146: VMB 3 – Feinwalze im 2SWV – Ende.....	196
Abbildung 147: VMB 4 – Feinwalze im 1SWV – Start	197
Abbildung 148: VMB 4 – Feinwalze im 1SWV – 1h Betrieb	198
Abbildung 149: VMB 4 – Feinwalze im 1SWV – Ende.....	199

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterschiede bei Sprüh- und Walzenvollmilchpulver (Scheruhn, 2001)	10
Tabelle 2: Rohstoffe von VMC und VMB	23
Tabelle 3: Daten des verwendeten Scherprogramms mit 12 Abschnitten	46
Tabelle 4: messrelevante Parameter bei der Nassdispergiereinheit	60
Tabelle 5: messrelevante Parameter bei der Trockenmeseinheit.....	61
Tabelle 6: Parameter der Partikelgrößenverteilung VMC Mischer	72
Tabelle 7: Parameter der Partikelgrößenverteilung VMC Knetter und Vorwalze vom 1SWV und 2SWV	74
Tabelle 8: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Feinwalzproben vom Transportband VMC vom 1SWV und 2SWV.....	76
Tabelle 9: Parameter der Partikelgrößenverteilung VMC der Conchen vom 1SWV und 2SWV	78
Tabelle 10: Parameter der Partikelgrößenverteilung Mischer, 2SWV	79
Tabelle 11: Parameter der Partikelgrößenverteilung VMB Vorwalze und Knetter vom 2SWV und 1SWV	81
Tabelle 12: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Feinwalzproben Transportband VMB vom 2SWV und 1SWV	83
Tabelle 13: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Conchen VMB vom 2SWV und 1SWV	84
Tabelle 14: Siebrückstände der VMC 1, 2, 3 hergestellt im 1SWV	88
Tabelle 15: Siebrückstände der VMC im 2SWV	91
Tabelle 16: Mittelwerte der Siebrückstände von VMC 1, 2, 3 – 1SWV.....	93
Tabelle 17: Siebrückstände der VMB hergestellt im 2SWV	95
Tabelle 18: Siebrückstände der VMB im 1SWV	97
Tabelle 19: Mittelwerte der Siebrückstände von VMB 1, 2, 3 – 2SWV.....	98
Tabelle 20: Gegenüberstellung und Korrelation der Ergebnisse vom Laser- Spektrometer und der Nasssiebung von VMC	101
Tabelle 21: Gegenüberstellung und Korrelation der Ergebnisse vom Laser- Spektrometer und der Nasssiebung von VMB	103
Tabelle 22: Zusammenstellung der ermittelten Rheologiedaten VMC und VMB.....	104
Tabelle 23: Korrelation der Partikel >30 µm mit den Fließgrenzen der Concheproben von VMC 1, 2, 3, 4.....	107

Tabelle 24: Korrelation der Partikel >30 µm mit den Fließgrenzen der Concheproben von VMB 1, 2, 3, 4.....	107
Tabelle 25: gemittelte Werte der Parameter aus der jeweiligen Dreifachbestimmung der einzelnen pulverigen Rohstoffe.....	157
Tabelle 26: Werte der Parameter der Partikelverteilungen der einzelnen Kakaomassen.....	160
Tabelle 27: Parameter der Partikelgrößenverteilung Knetter VMC 1, 2, 3.....	161
Tabelle 28: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Feinwalzproben VMC, Transportband.....	164
Tabelle 29: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Concheproben von VMC	165
Tabelle 30: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Mischerproben von VMB	166
Tabelle 31: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Vorwalzwerkproben von VMB.....	169
Tabelle 32: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Feinwalzwerkproben VMB, Transportband.....	172
Tabelle 33: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Concheproben von VMB	173
Tabelle 34: Werte der Parameter zur genaueren Beschreibung der Partikelverteilungen der Feinwalzwerke, VMC	186
Tabelle 35: Werte der Parameter zur genaueren Beschreibung der Partikelverteilungen der Feinwalzwerke, VMB	200
Tabelle 36: Mittelwerte der gemessenen Schubspannung und Casson Viskosität der Abschnitte mit konstanter Scherrate	202

Verzeichnis der Anlagen

Anhang 1 – REM-Aufnahmen VMC	132
Anhang 2 – REM-Aufnahmen VMB	139
Anhang 3 – Untersuchung der Ultraschallbehandlungszeit	146
Anhang 4 – Untersuchen der optischen Abschattung	150
Anhang 5 – Untersuchung der Luftdruckeinstellungen für die Partikelgrößenverteilung der pulverigen Rohstoffe	154
Anhang 6 – Darstellung der Parameter der einzelnen Partikelverteilungen der Rohstoffe von VMC und VMB	157
Anhang 7 – einzelne Darstellung der drei Probenahmen VMC und VMB	161
Anhang 8 – Abbildungen zu den Untersuchungen der Feinwalzproben Start, 1h Betrieb, Ende jeweils links, Mitte, rechts von VMC und VMB	174
Anhang 9 – Tabelle zur Rheologie von VMC und VMB	202

Anlagen

Anhang 1 – REM-Aufnahmen VMC

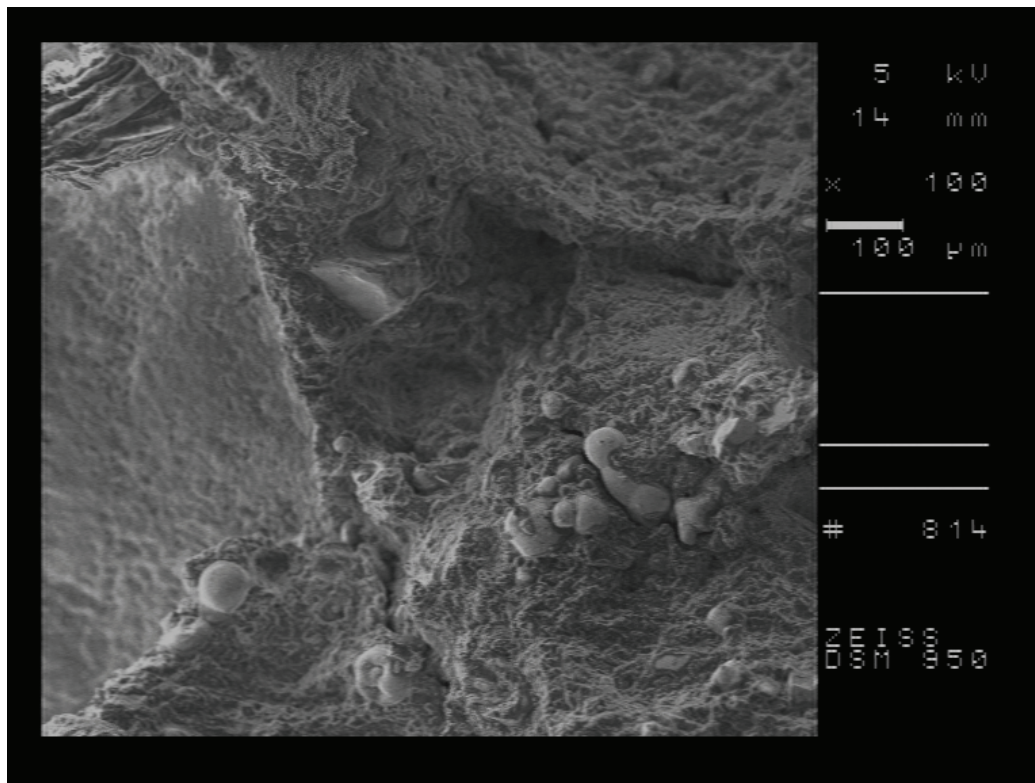


Abbildung 74: 2SWV – VMC – Mischer 100 fache Vergrößerung

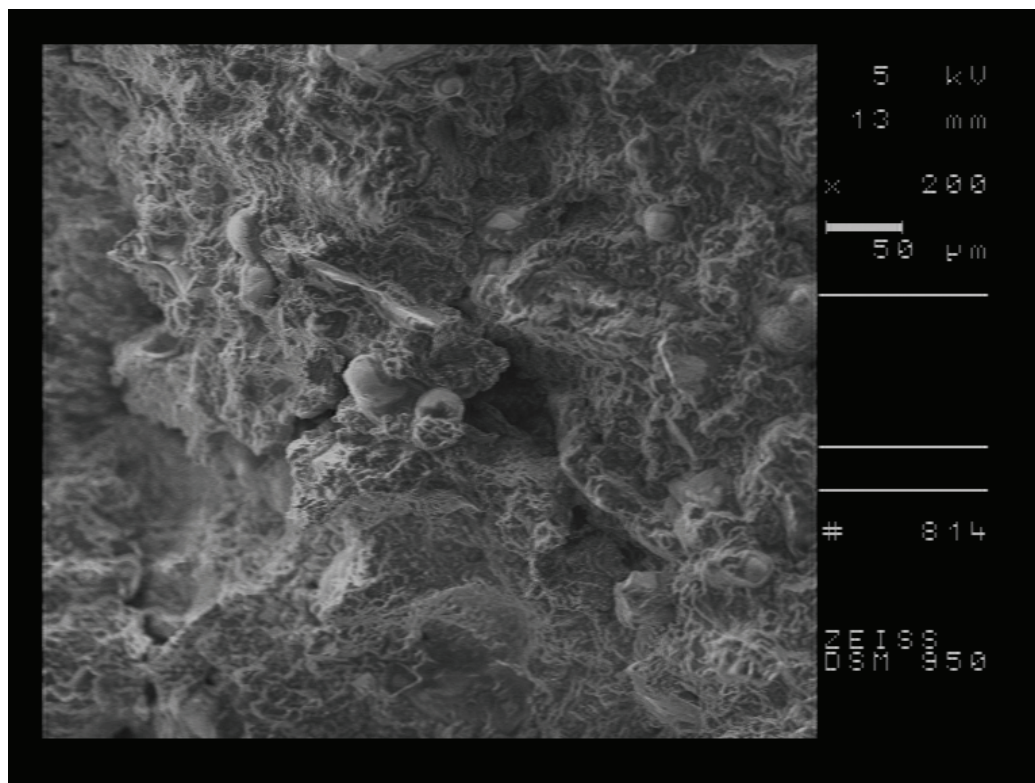


Abbildung 75: 2SWV – VMC – Mischer 200 fache Vergrößerung

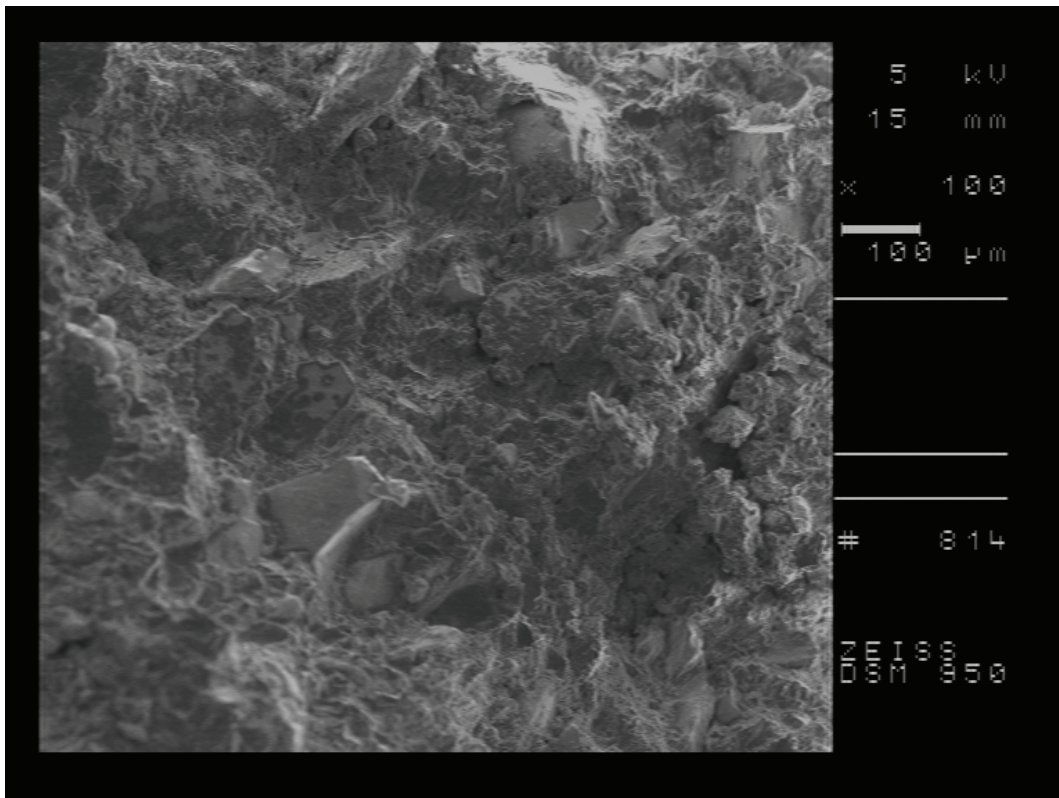


Abbildung 76: 1SWV – VMC – Kneter 100 fache Vergrößerung

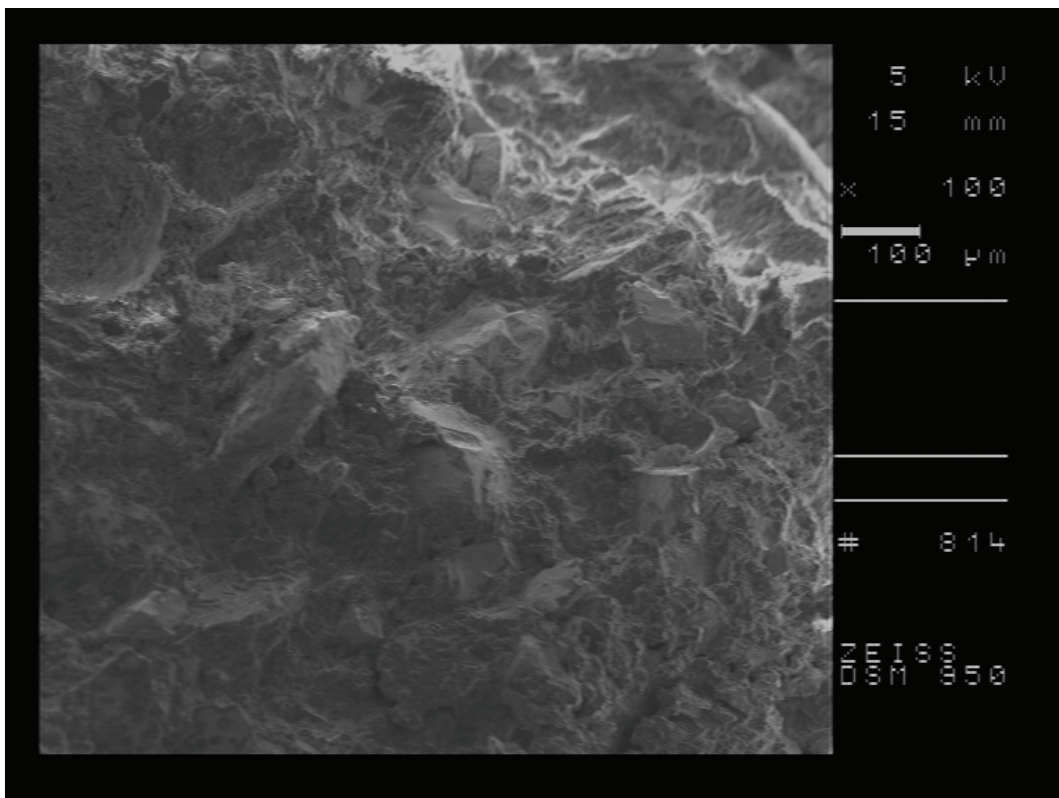


Abbildung 77: 1SWV – VMC – Kneter 100 fache Vergrößerung

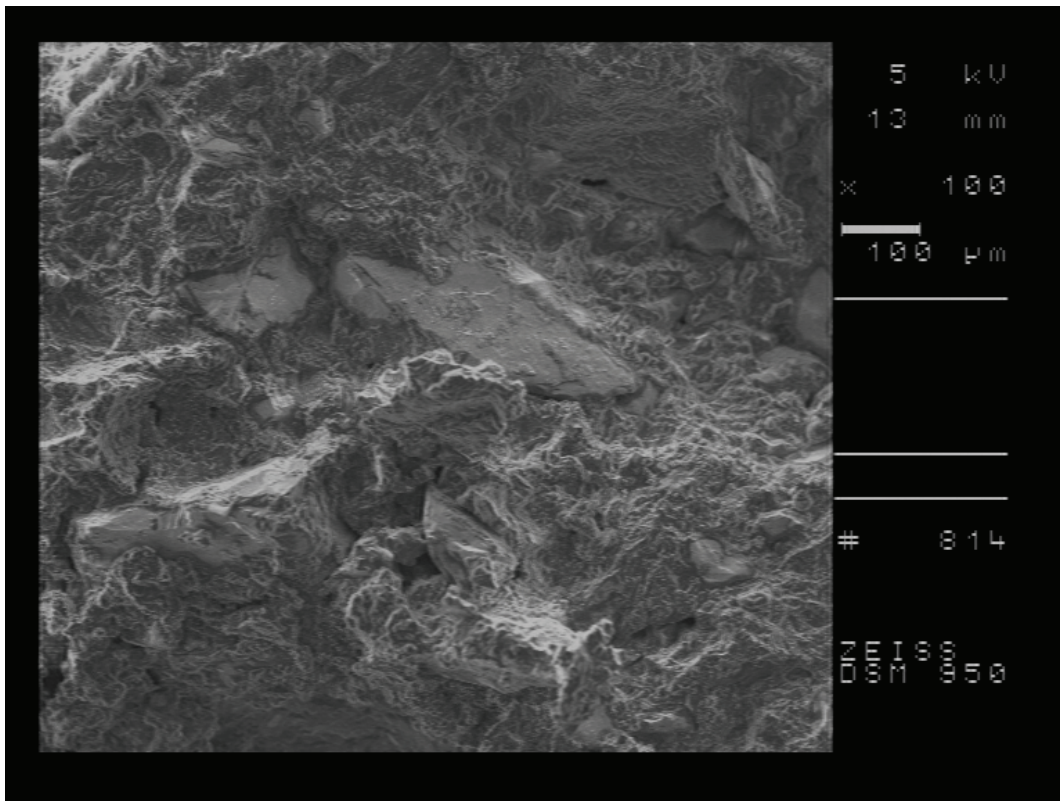


Abbildung 78: 2SWV – VMC – Vorwalze 100 fache Vergrößerung

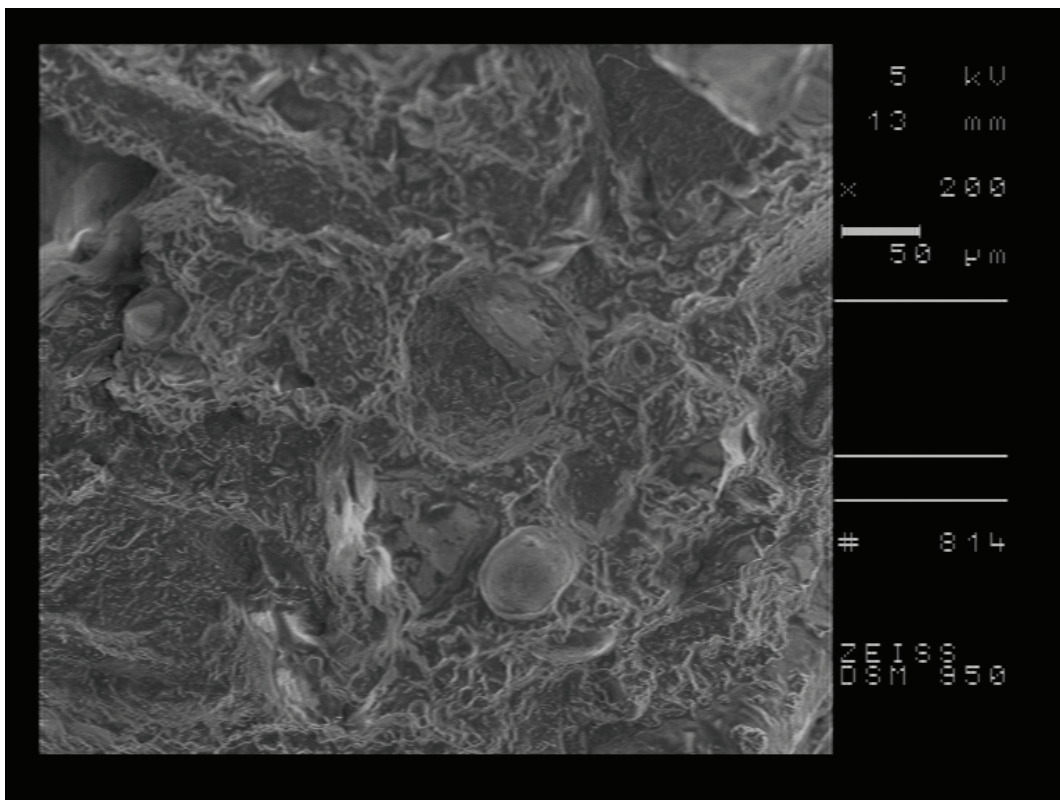


Abbildung 79: 2SWV – VMC – Vorwalze 200 fache Vergrößerung

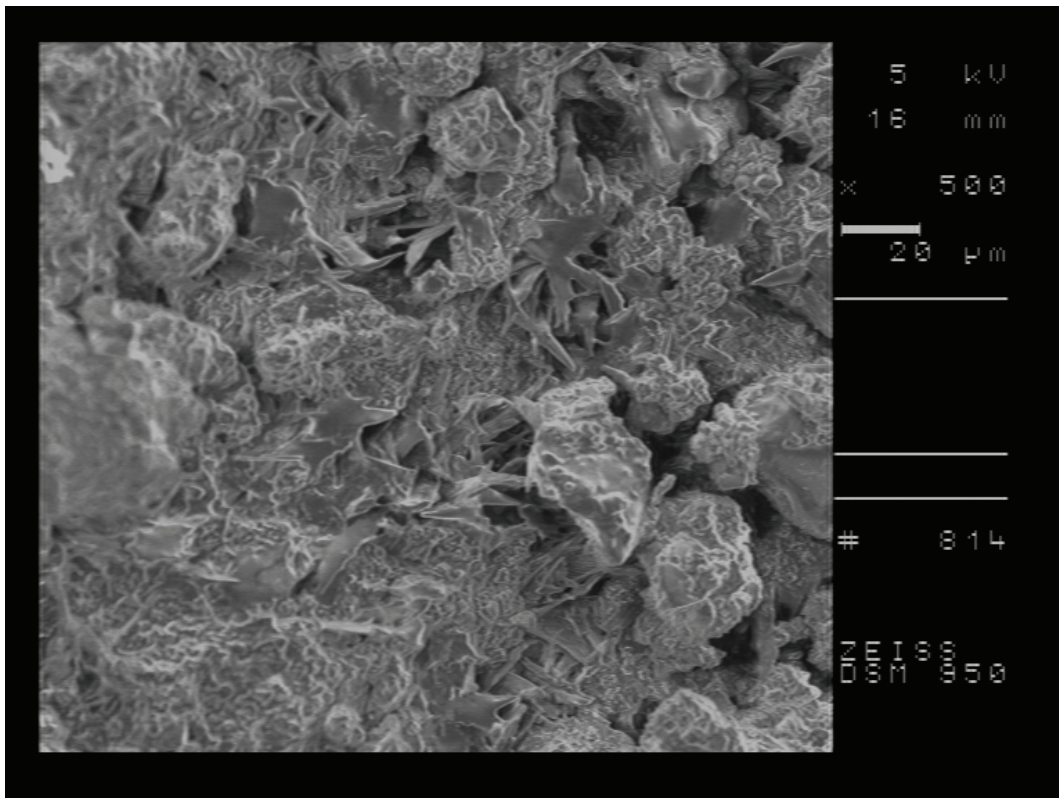


Abbildung 80: 1SWV – VMC – Feinwalze 500 fache Vergrößerung

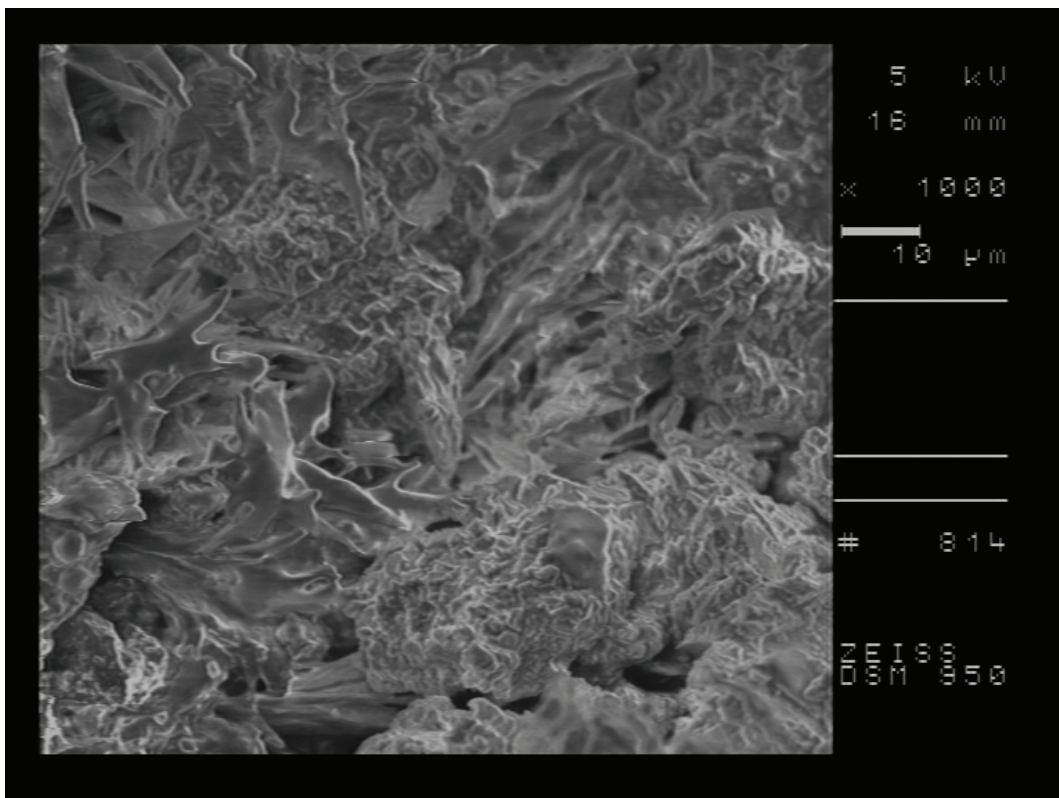


Abbildung 81: 1SWV – VMC – Feinwalze 1000 fache Vergrößerung

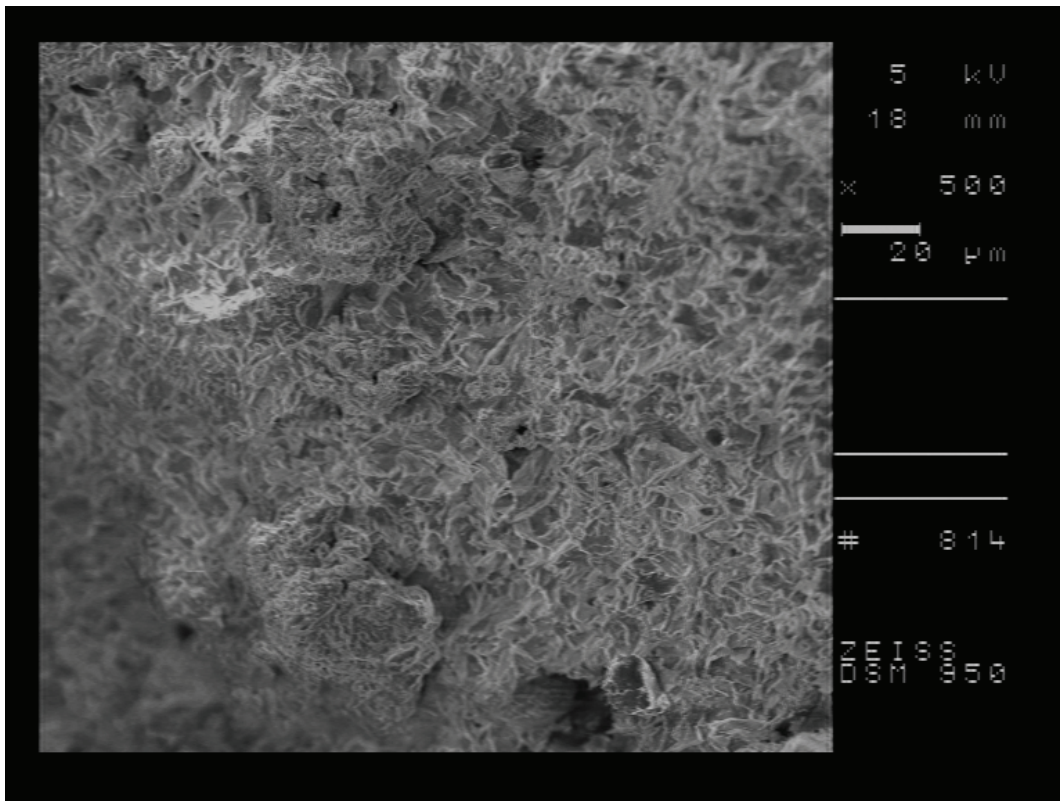


Abbildung 82: 2SWV – VMC – Feinwalze 500 fache Vergrößerung

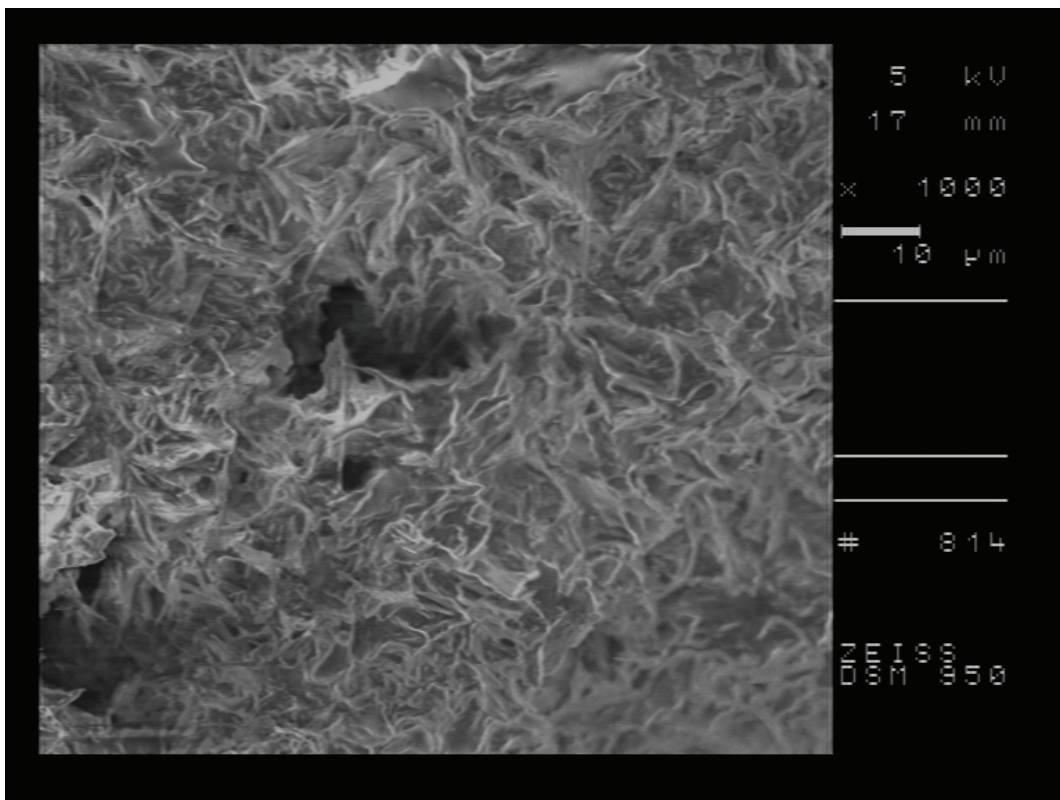


Abbildung 83: 2SWV – VMC – Feinwalze 1000 fache Vergrößerung

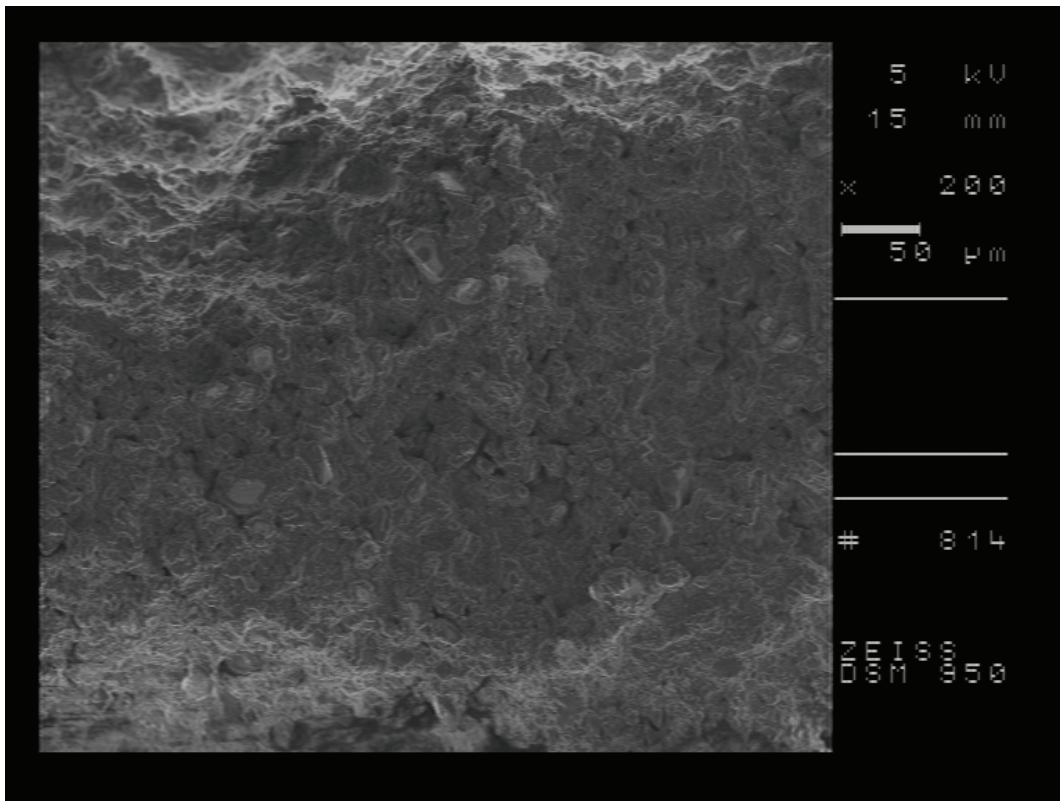


Abbildung 84: 1SWV – VMC – Conche 200 fache Vergrößerung

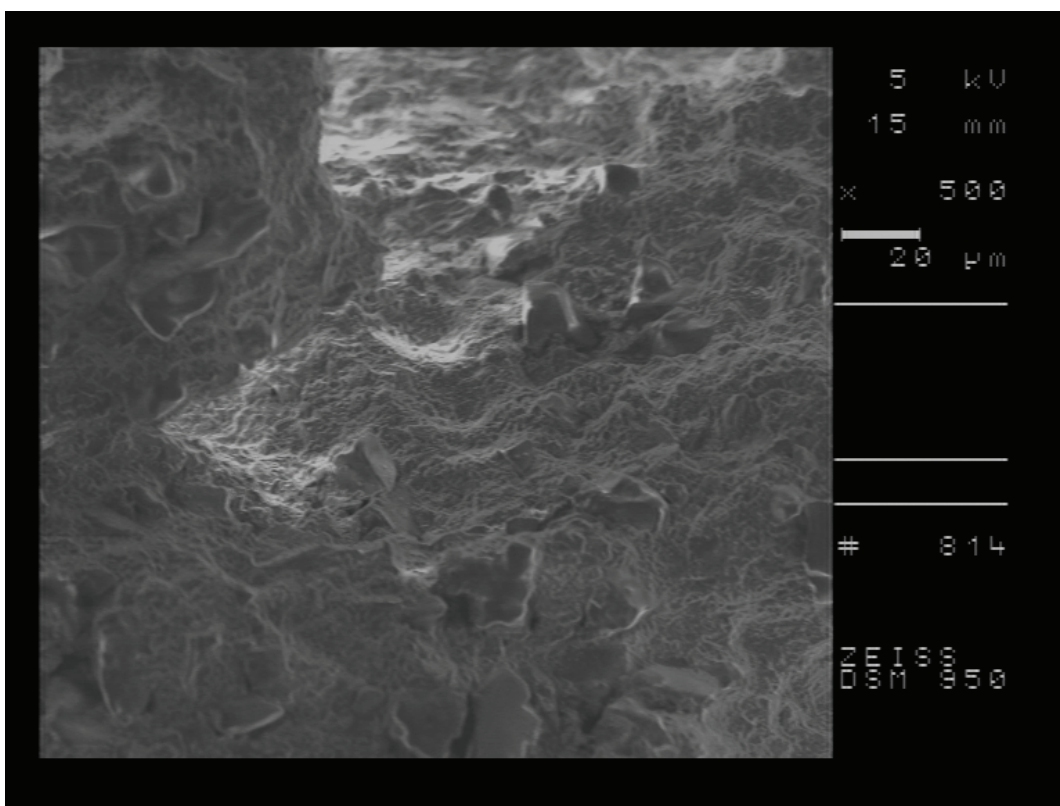


Abbildung 85: 1SWV – VMC – Conche 500 fache Vergrößerung

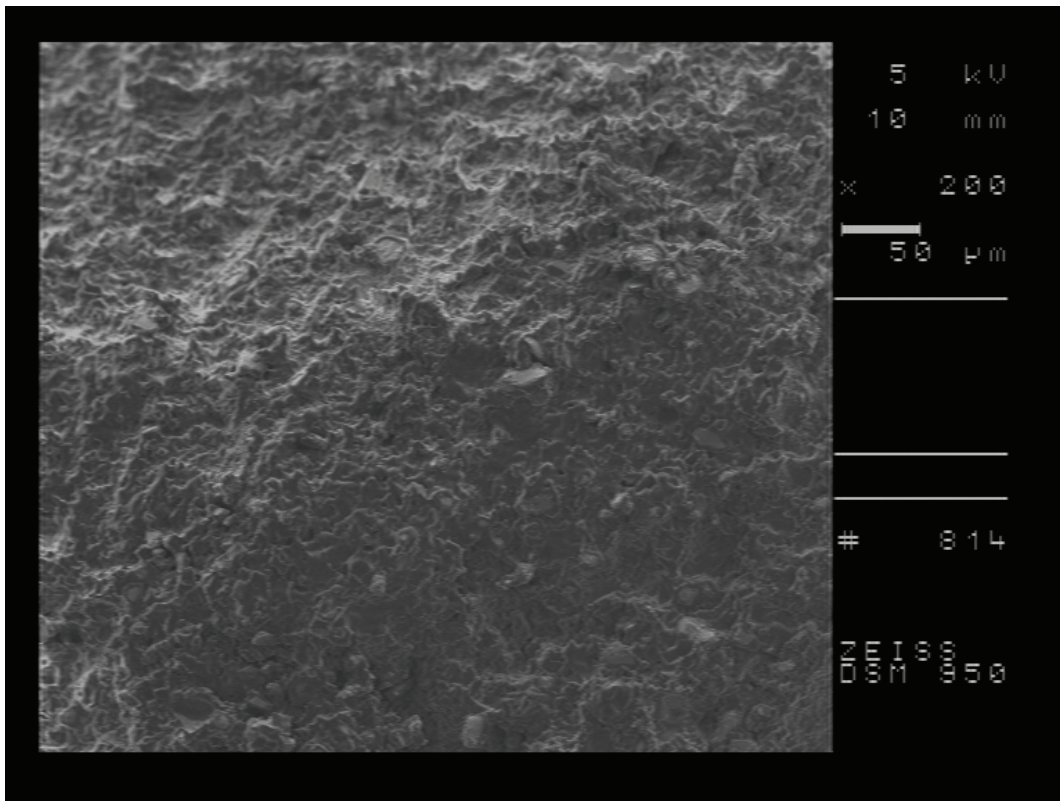


Abbildung 86: 2SWV – VMC – Conche 200 fache Vergrößerung

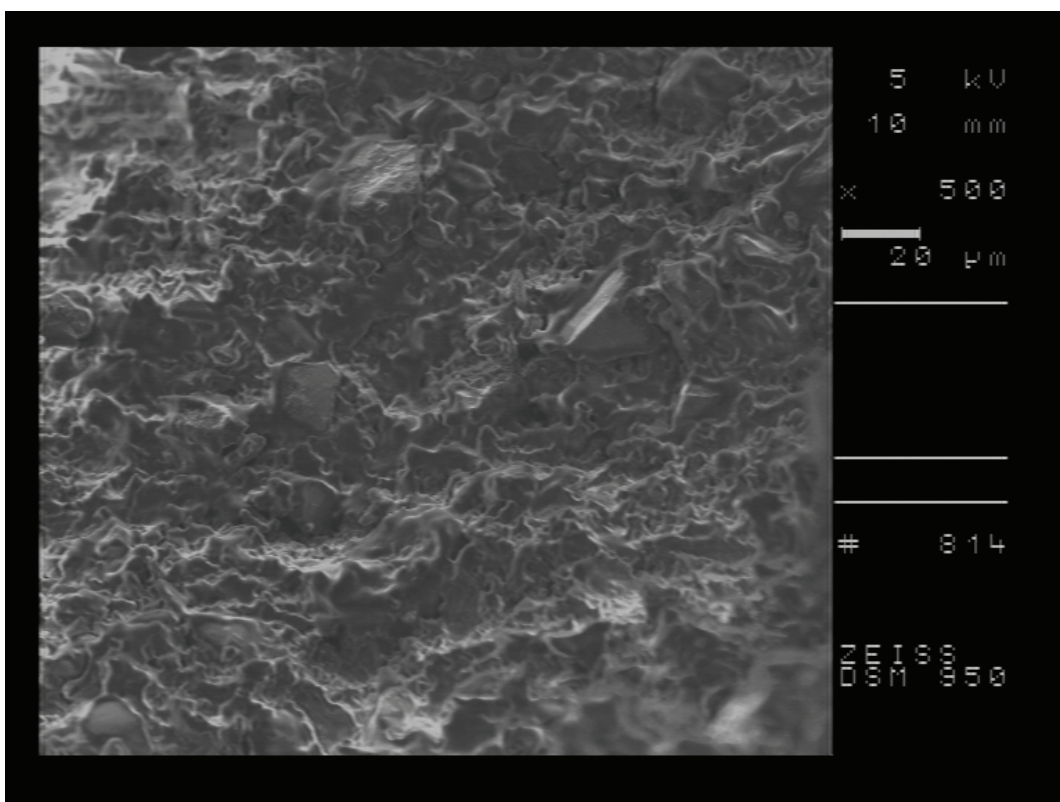


Abbildung 87: 2SWV – VMC – Conche 500 fache Vergrößerung

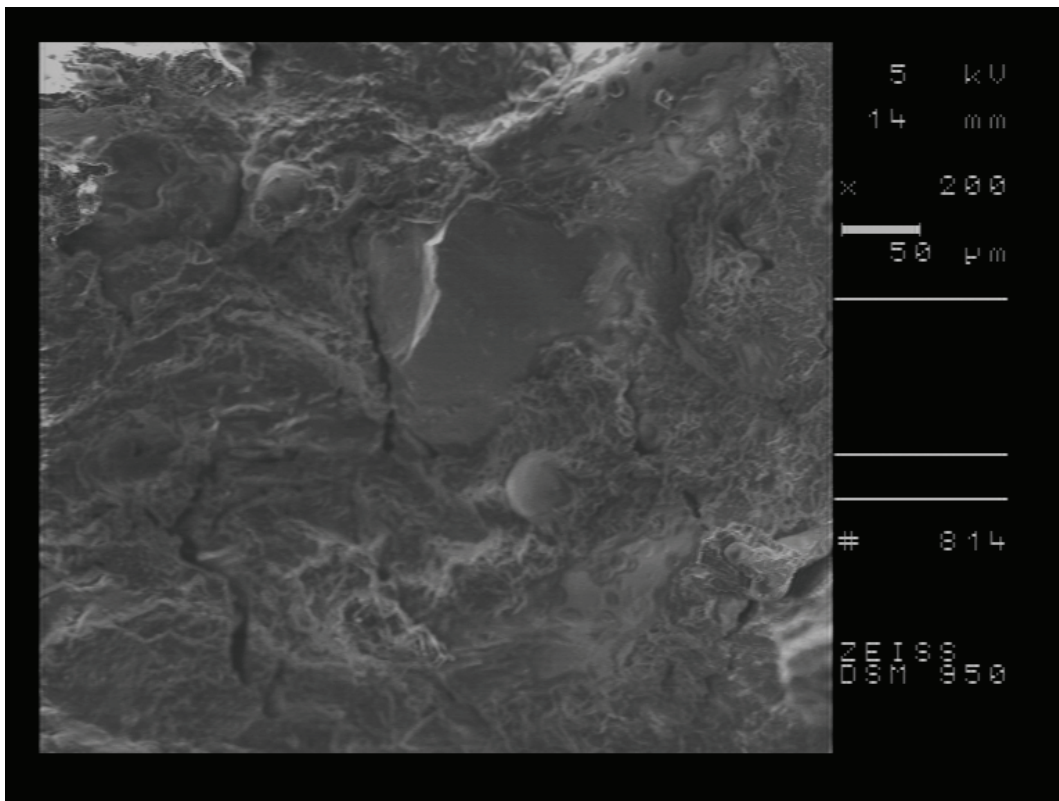
Anhang 2 – REM-Aufnahmen VMB

Abbildung 88: 2SWV – VMB – Mischer 200 fache Vergrößerung

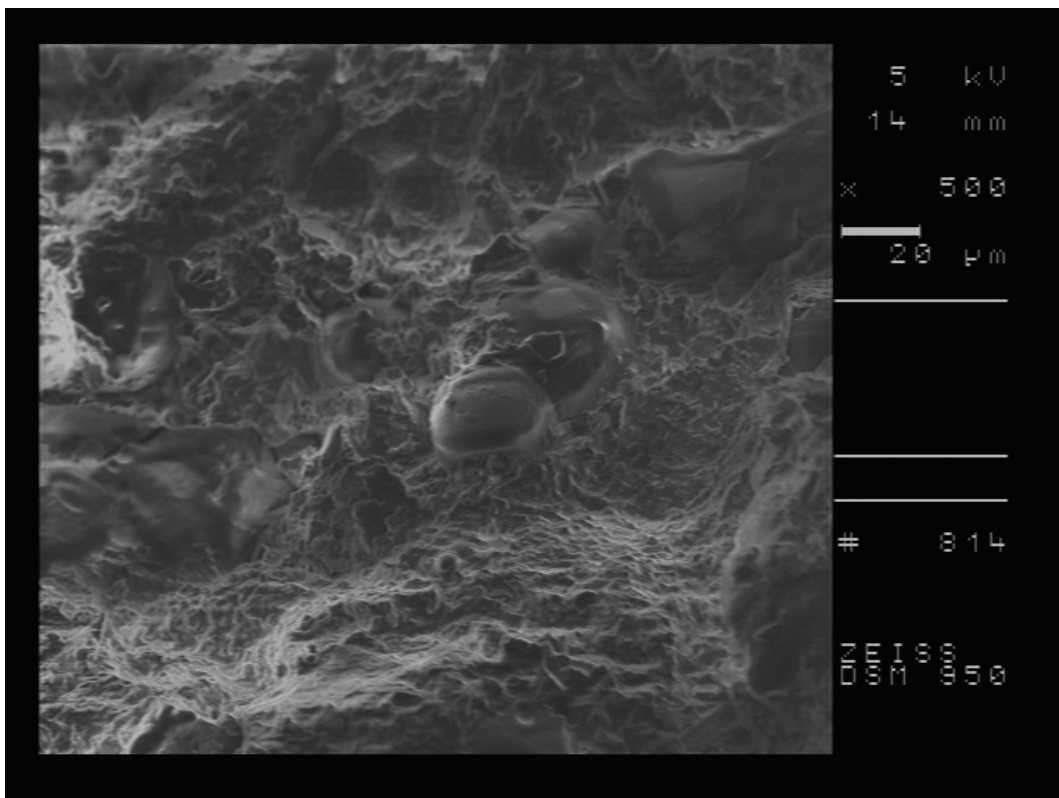


Abbildung 89: 2SWV – VMB – Mischer 500 fache Vergrößerung

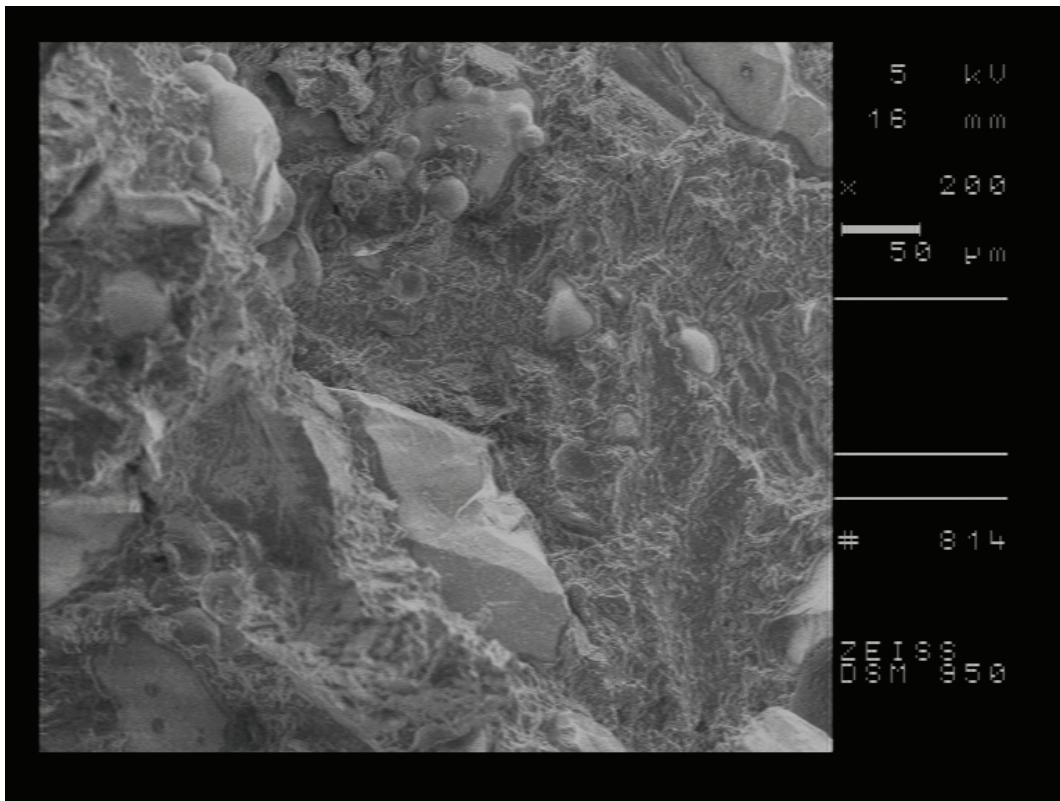


Abbildung 90: 2SWV – VMB – Vorwalze 200 fache Vergrößerung

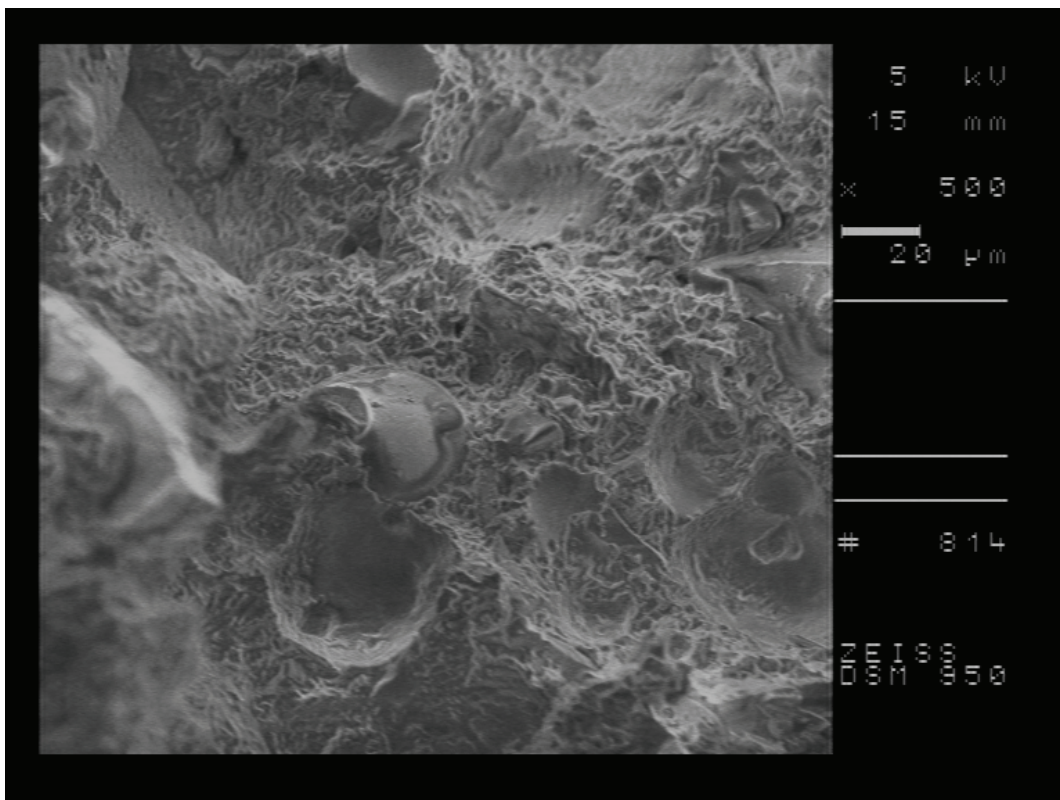


Abbildung 91: 2SWV – VMB – Vorwalze 500 fache Vergrößerung

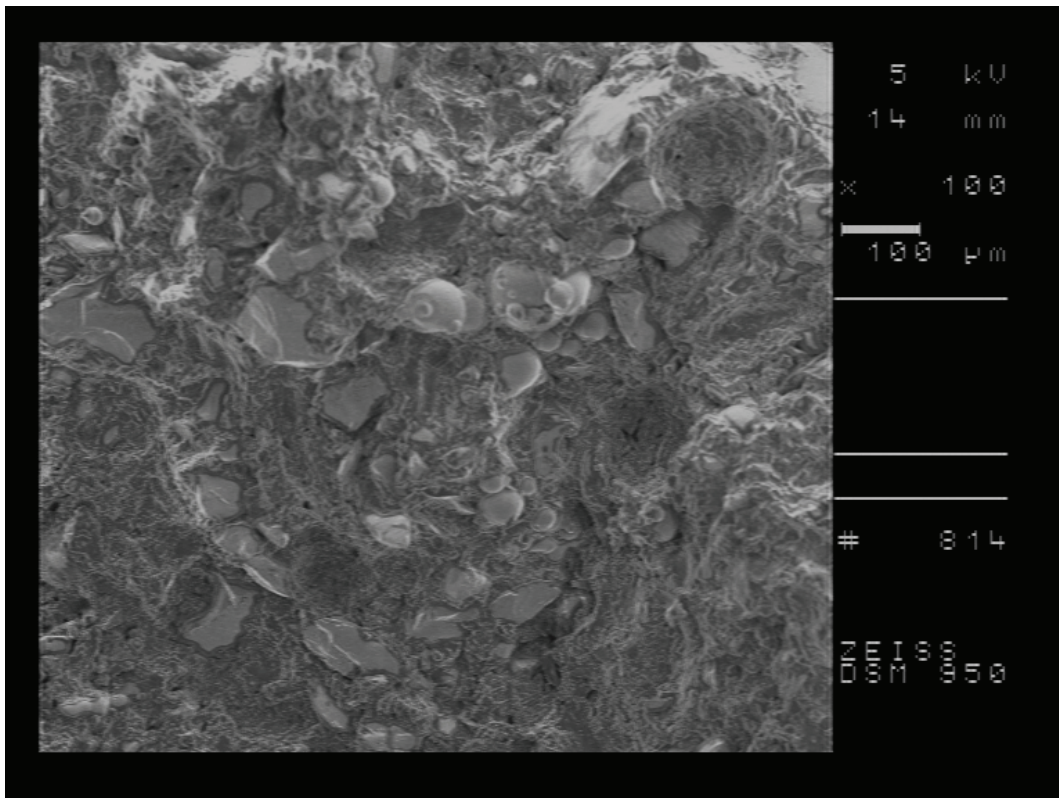


Abbildung 92: 1SWV – VMB – Knetter 100 fache Vergrößerung

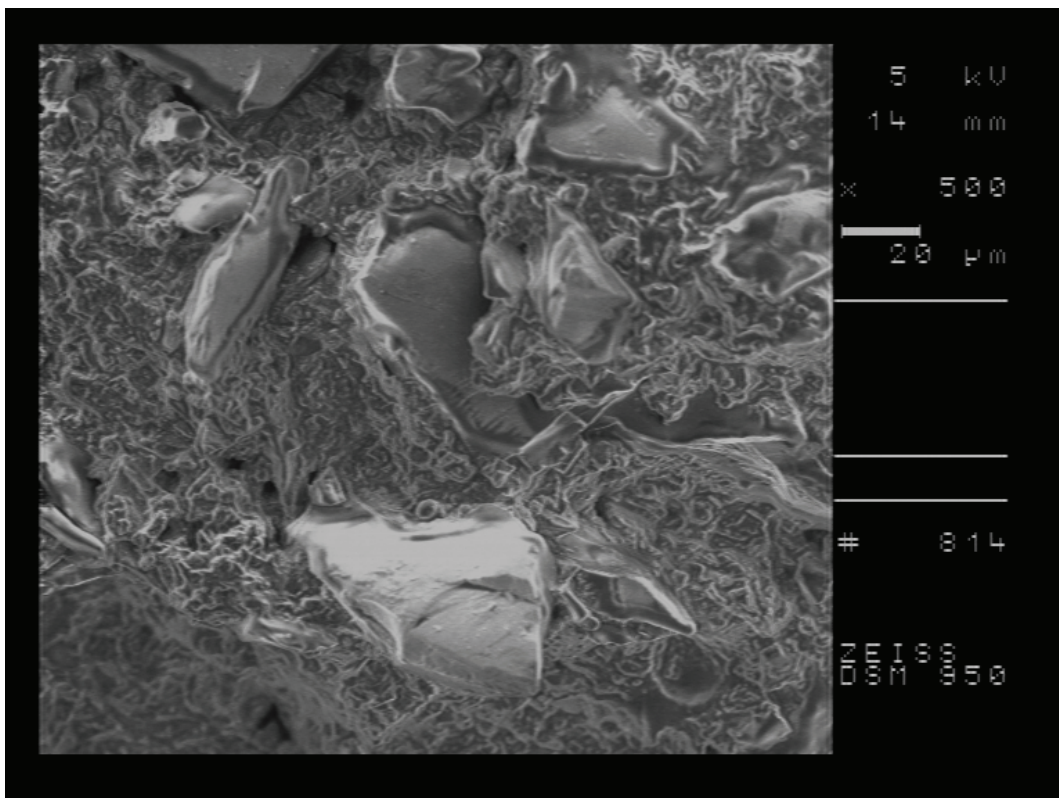


Abbildung 93: 1SWV – VMB – Knetter 500 fache Vergrößerung

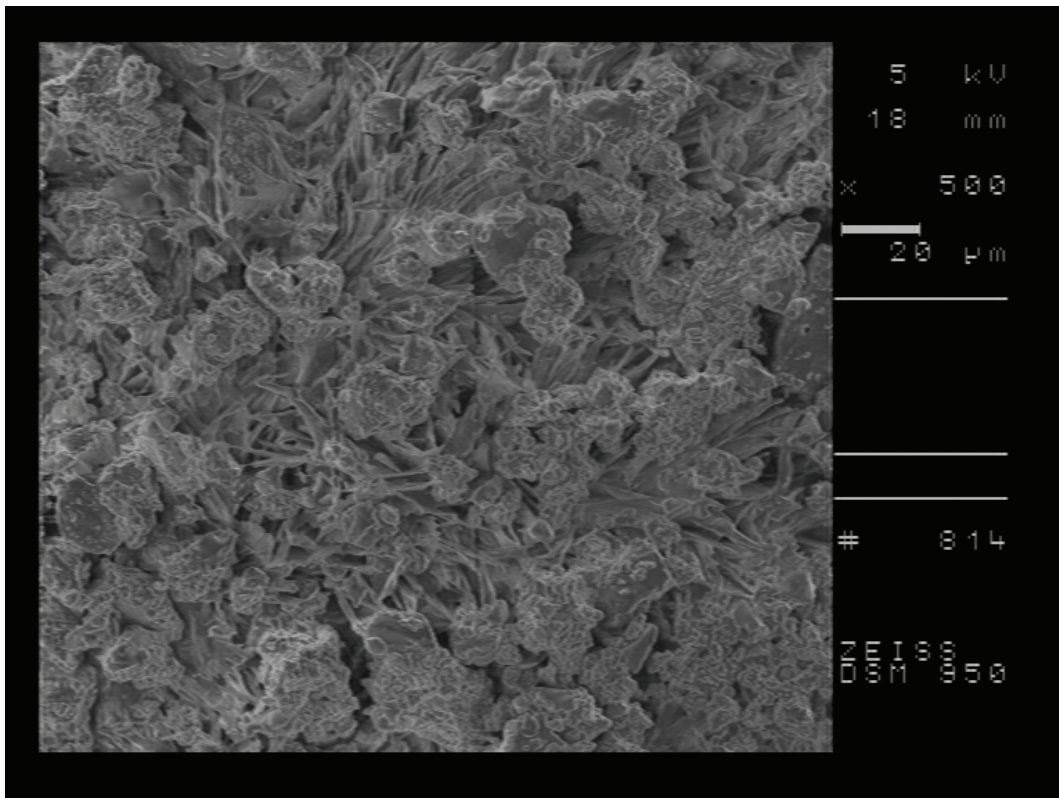


Abbildung 94: 2SWV – VMB – Feinwalze 500 fache Vergrößerung

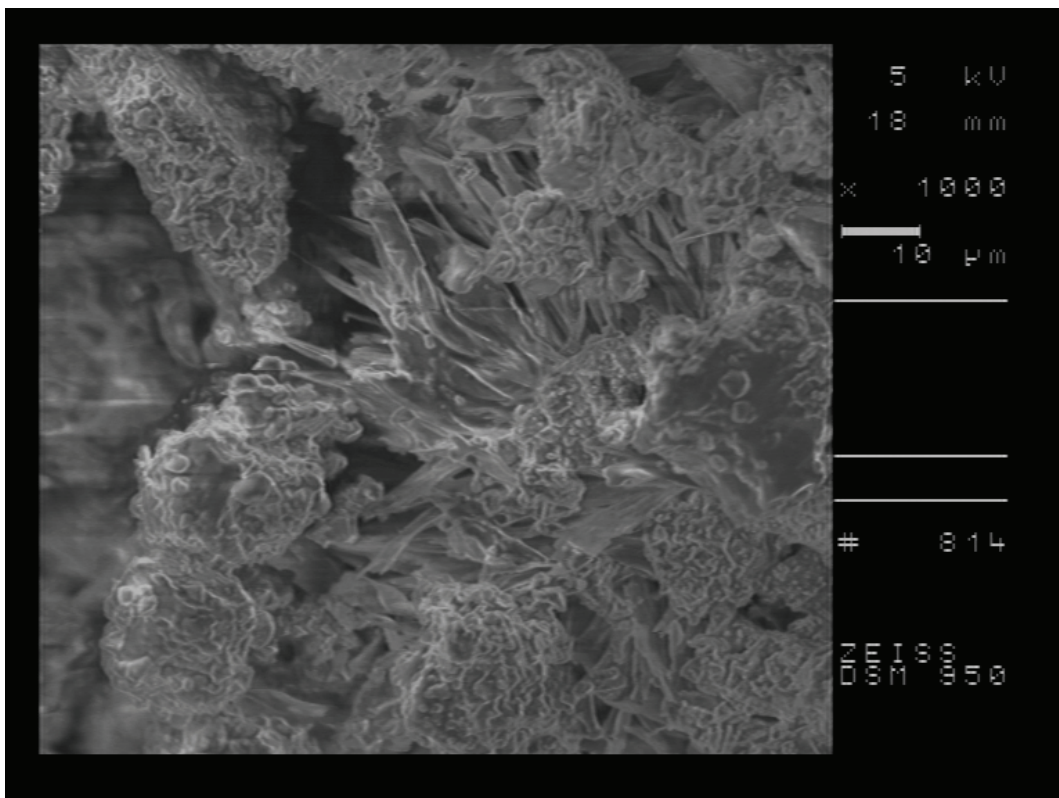


Abbildung 95: 2SWV – VMB – Feinwalze 1000 fache Vergrößerung

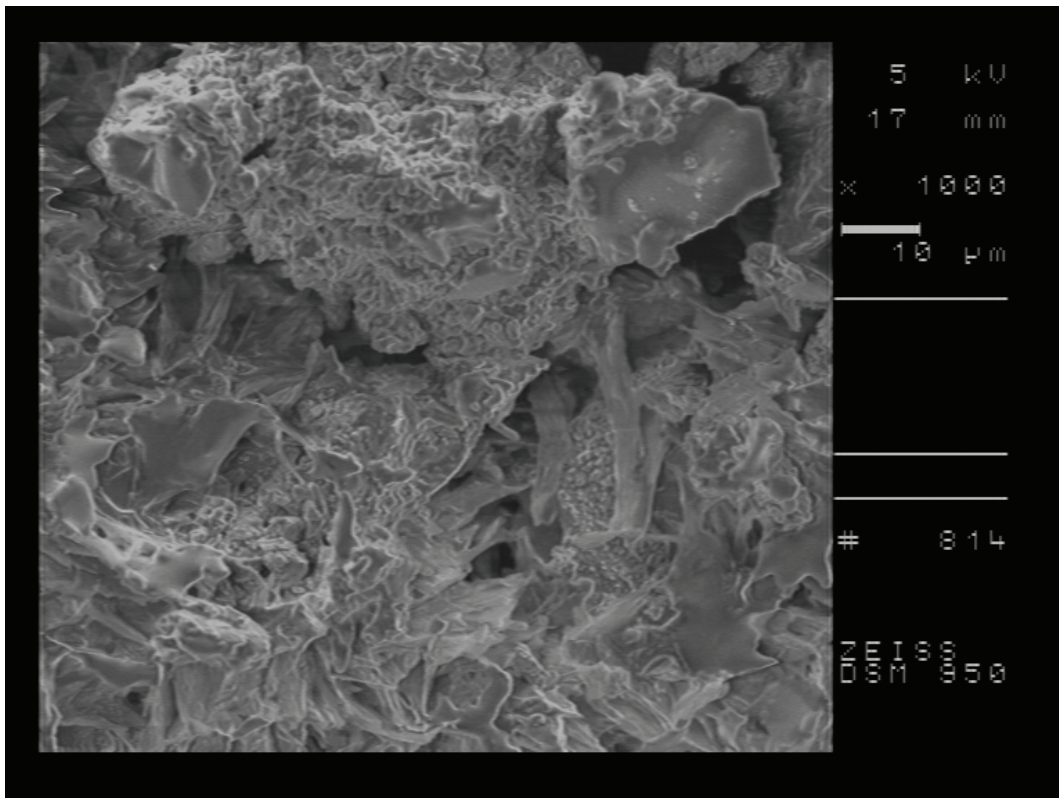


Abbildung 96: 1SWV – VMB – Feinwalze 1000 fache Vergrößerung

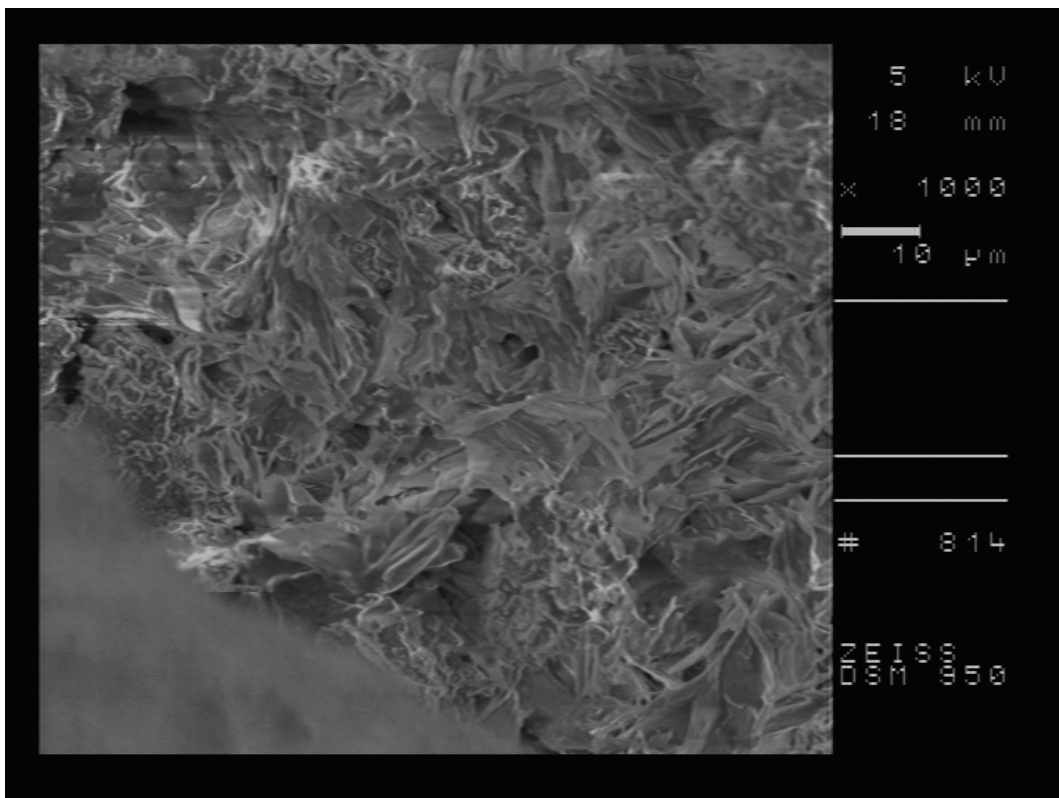


Abbildung 97: 1SWV – VMB – Feinwalze 1000 fache Vergrößerung

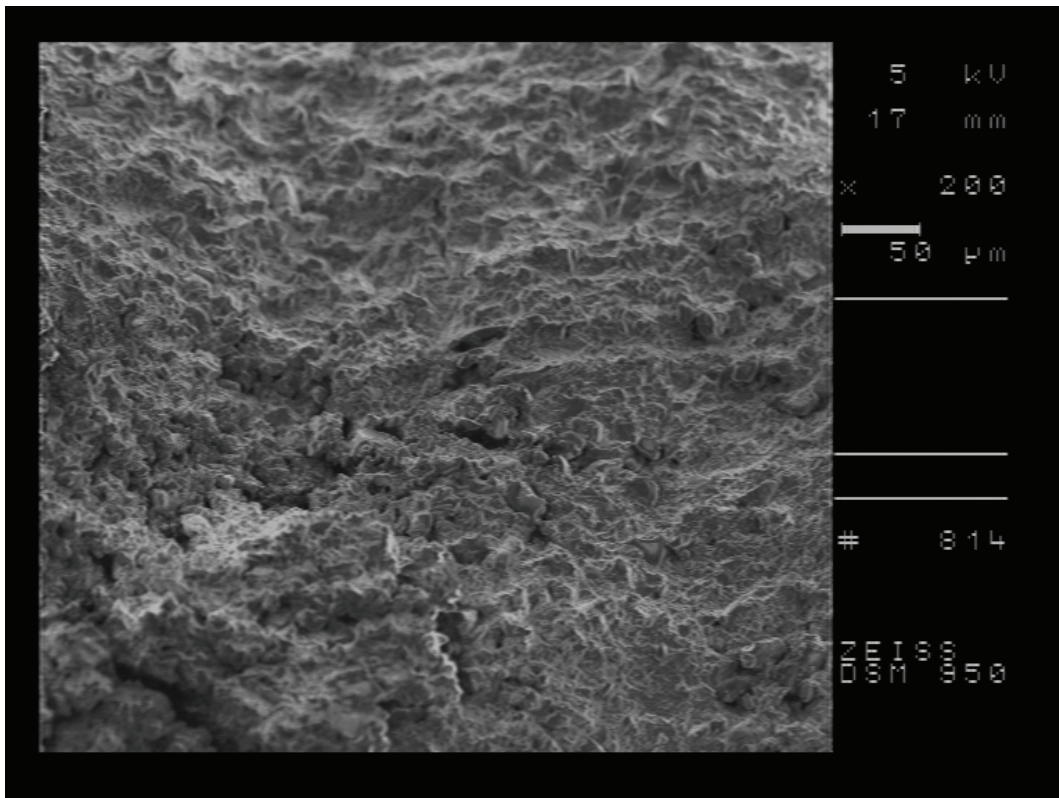


Abbildung 98: 2SWV – VMB – Conche 200 fache Vergrößerung

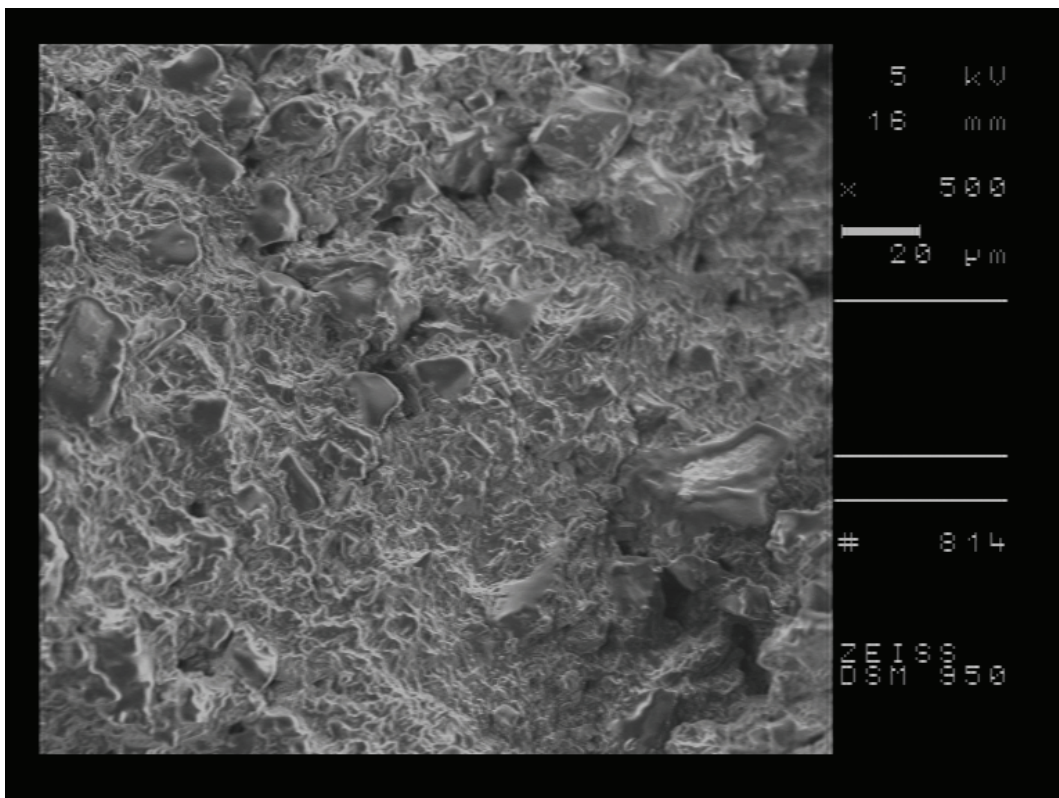


Abbildung 99: 2SWV – VMB – Conche 500 fache Vergrößerung

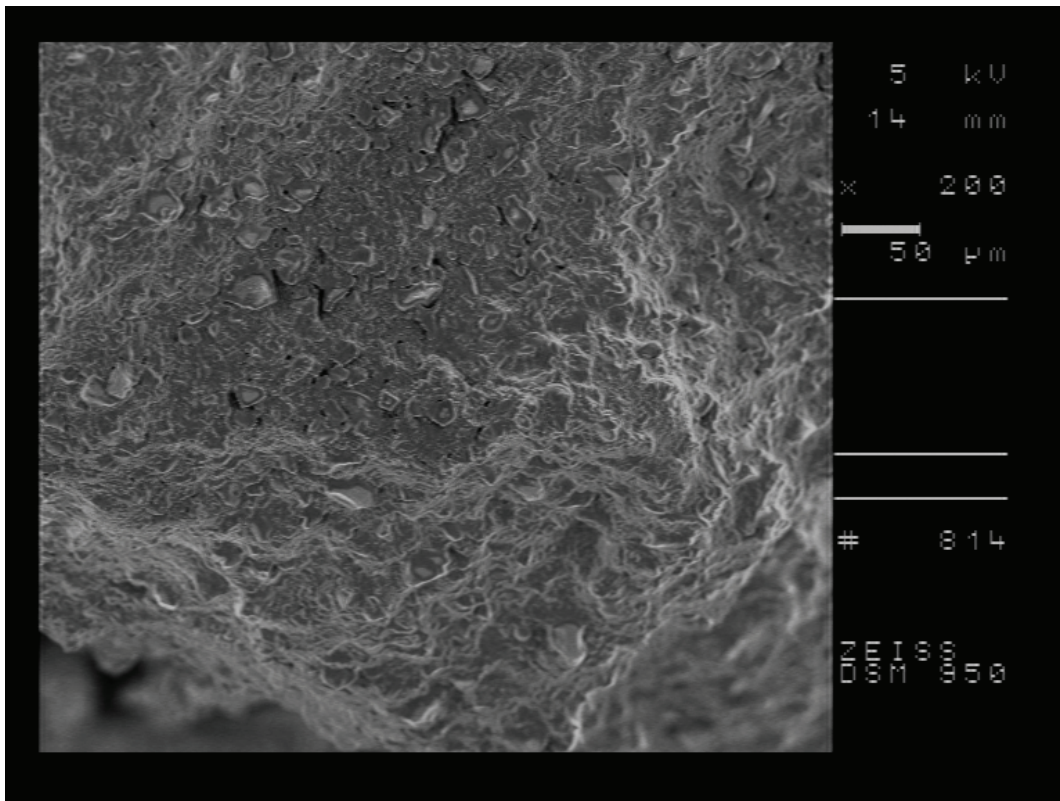


Abbildung 100: 1SWV – VMB – Conche 200 fache Vergrößerung

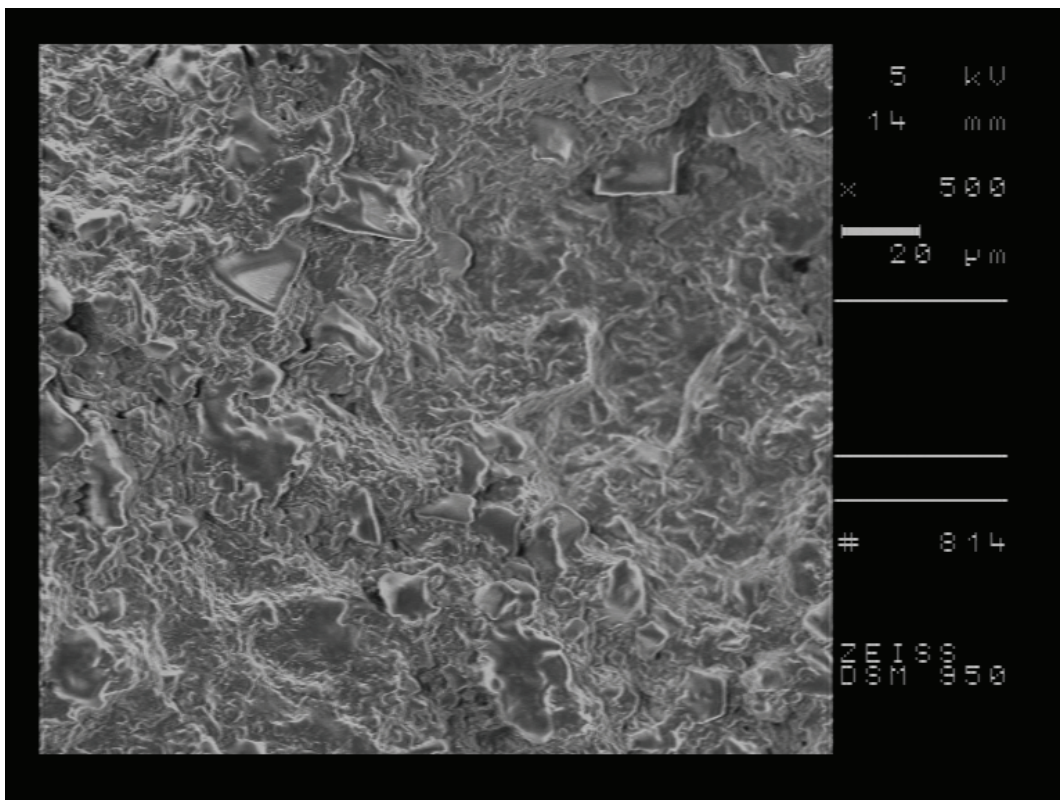


Abbildung 101: 1SWV – VMB – Conche 500 fache Vergrößerung

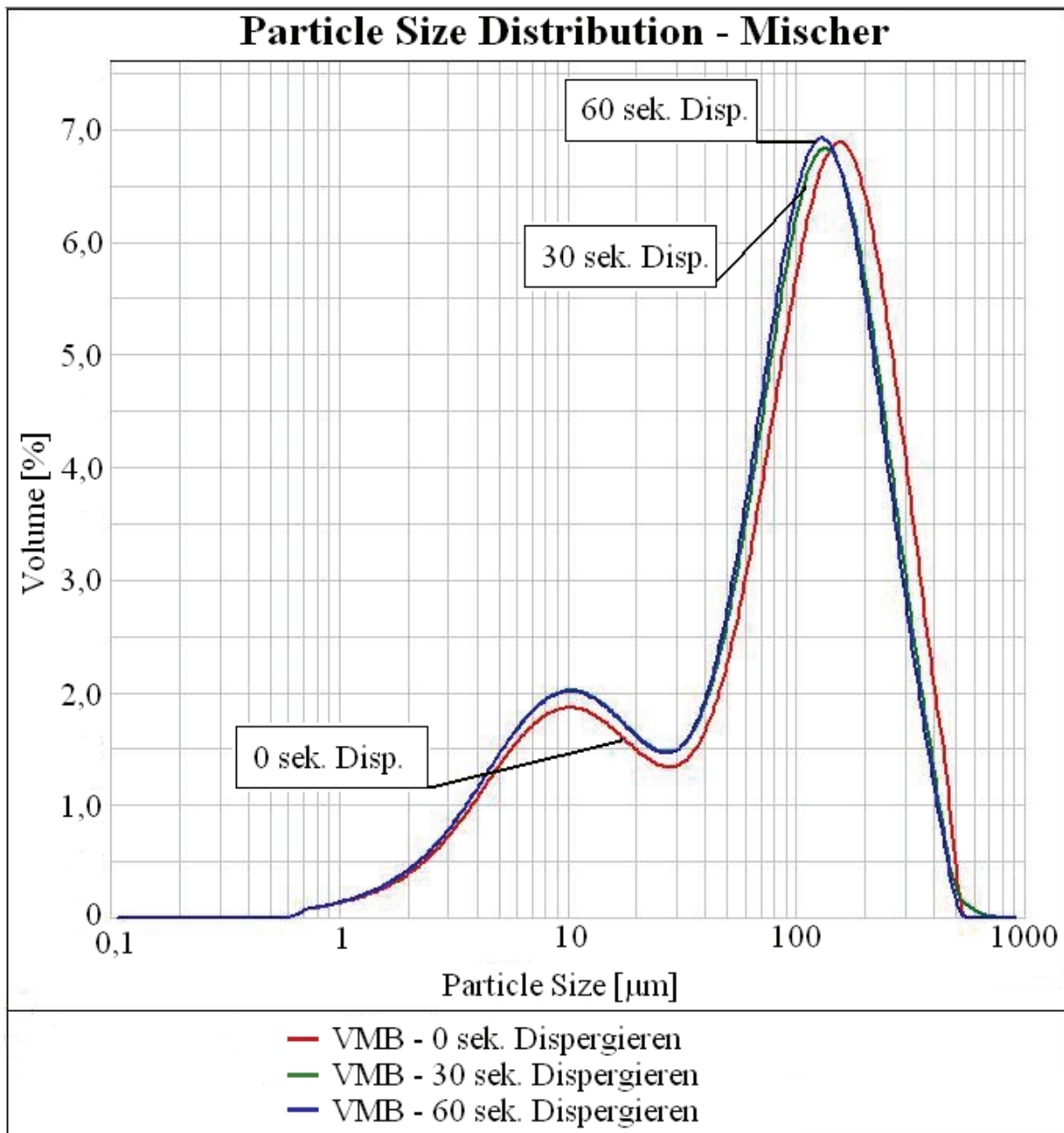
Anhang 3 – Untersuchung der Ultraschallbehandlungszeit

Abbildung 102: Veränderung der Ultraschallbehandlungszeit der Probe VMB nach Mischer

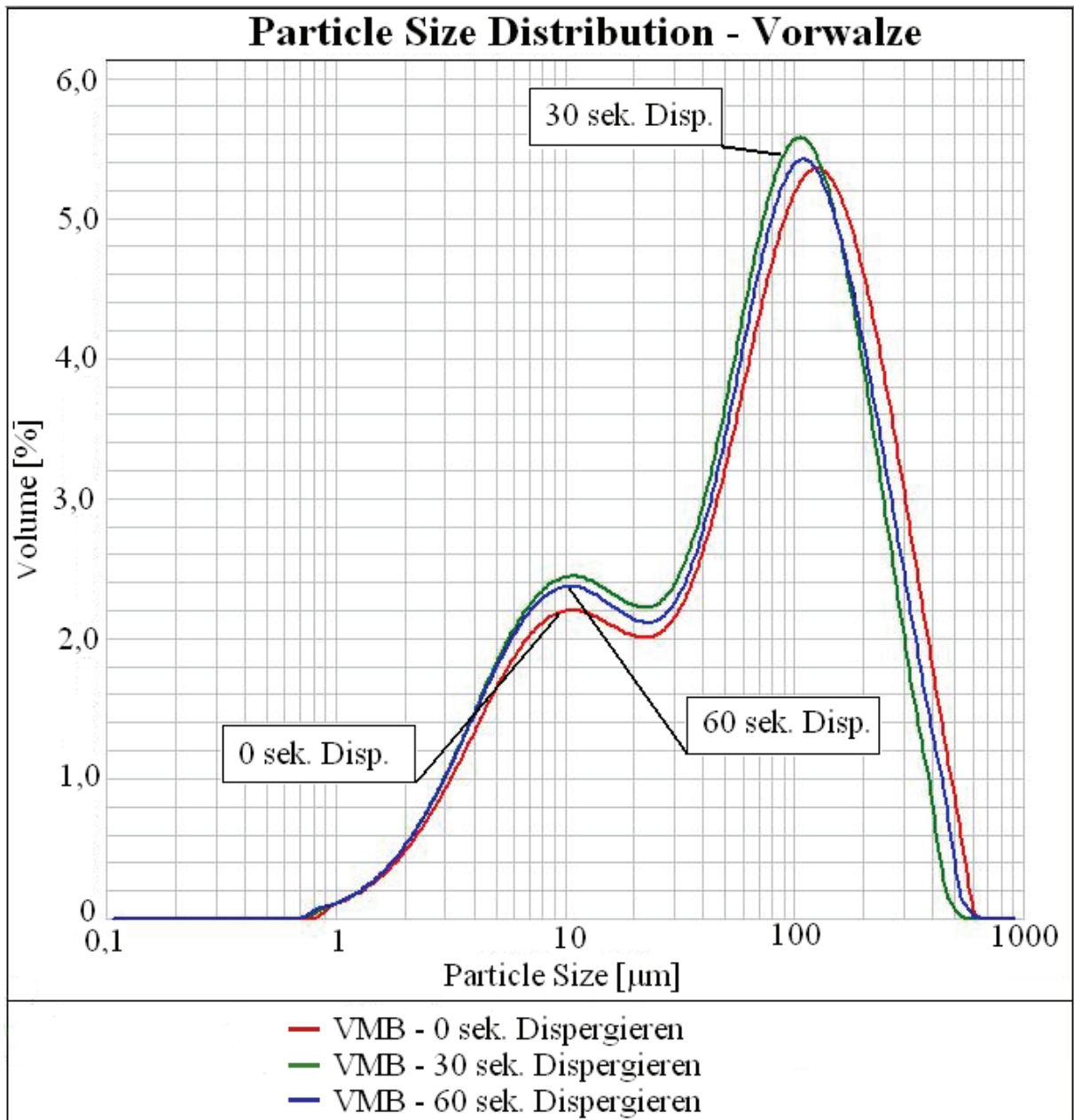


Abbildung 103: Veränderung der Ultraschallbehandlungszeit der Probe VMB nach Vorwalze

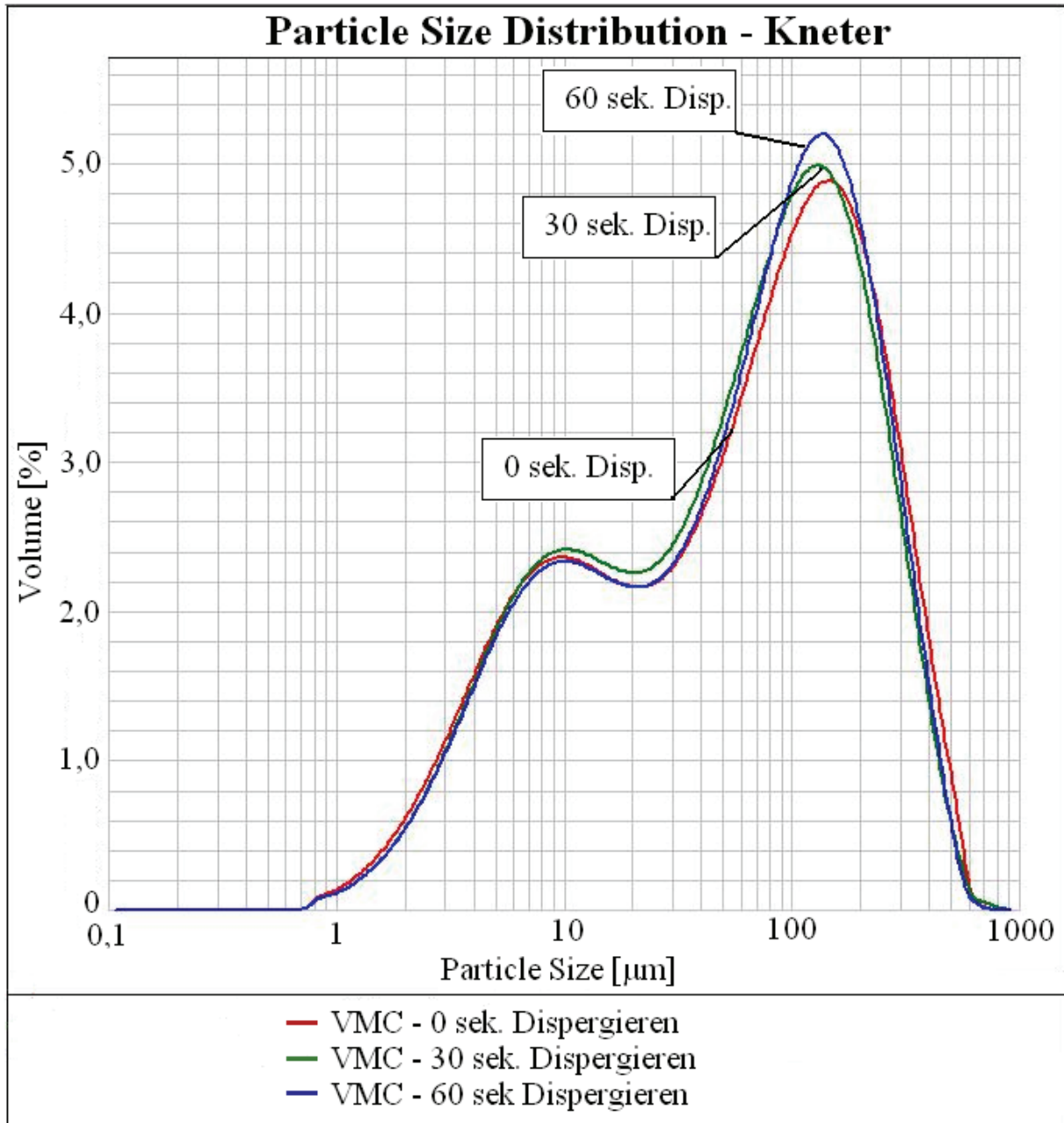


Abbildung 104: Veränderung der Ultraschallbehandlungszeit der Probe VMC nach Knetter

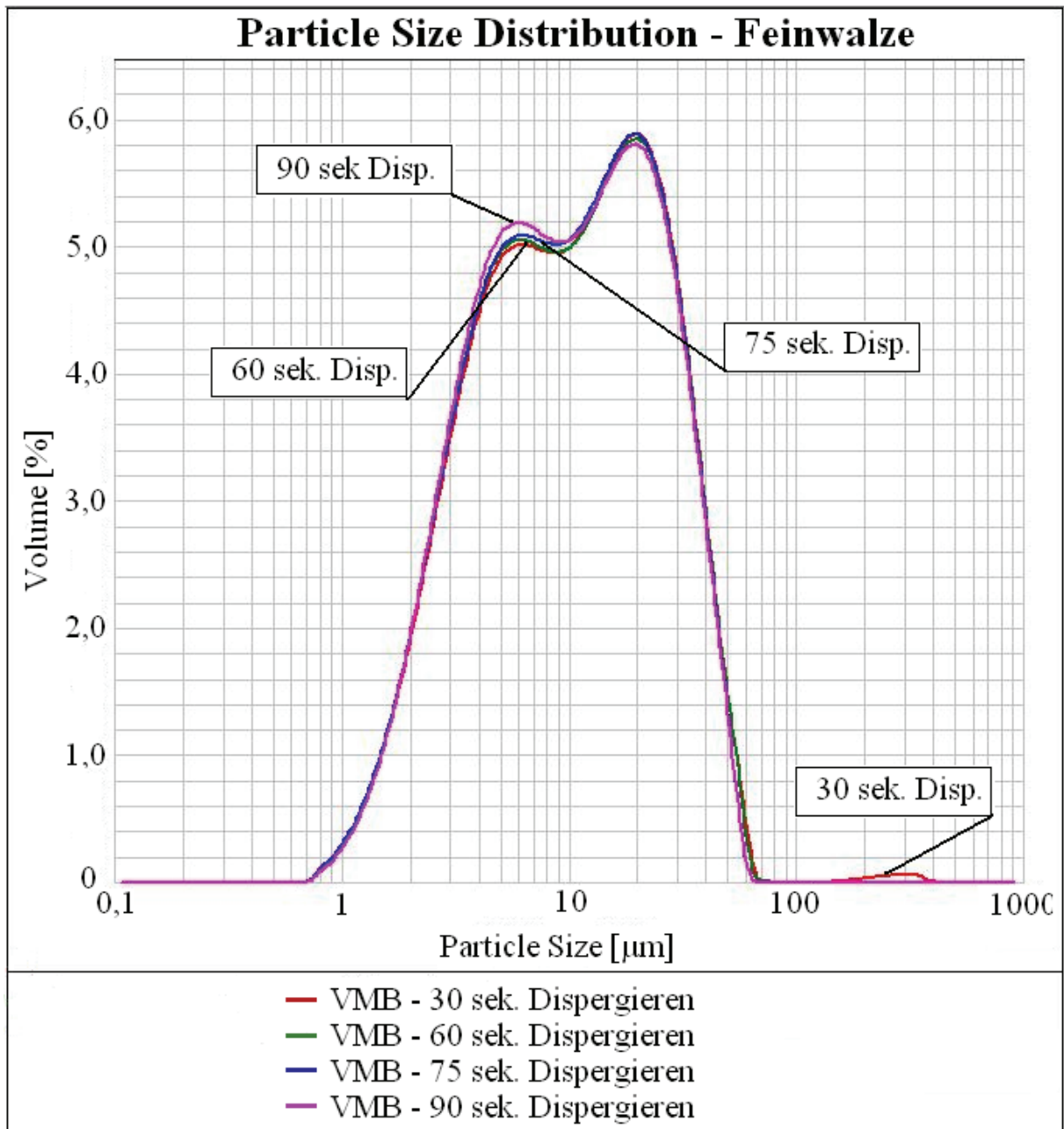


Abbildung 105: Veränderung der Ultraschallbehandlungszeit der Probe VMB nach Feinwalze

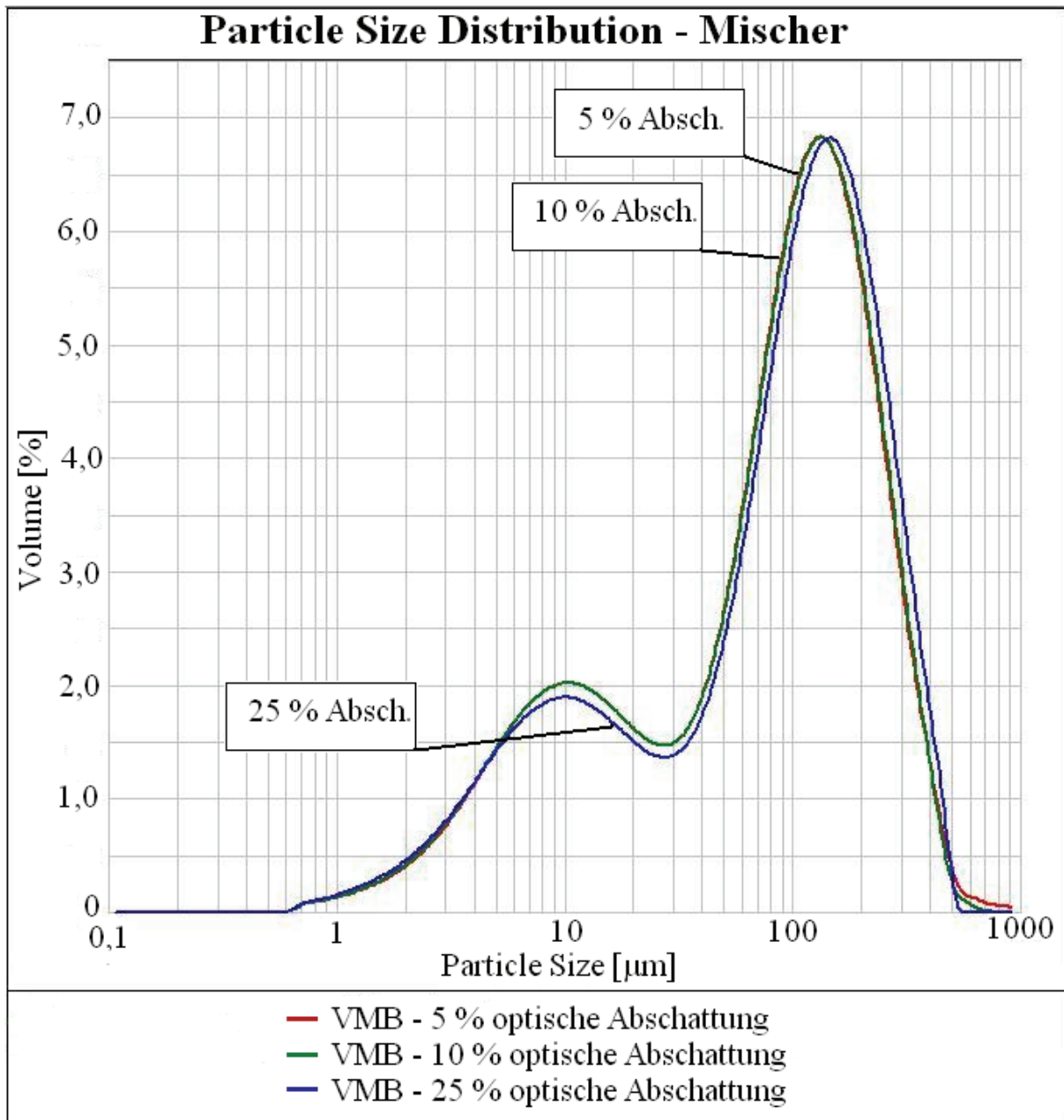
Anhang 4 – Untersuchungen der optischen Abschattung

Abbildung 106: Veränderung der optischen Abschattung der Probe VMB nach Mischer

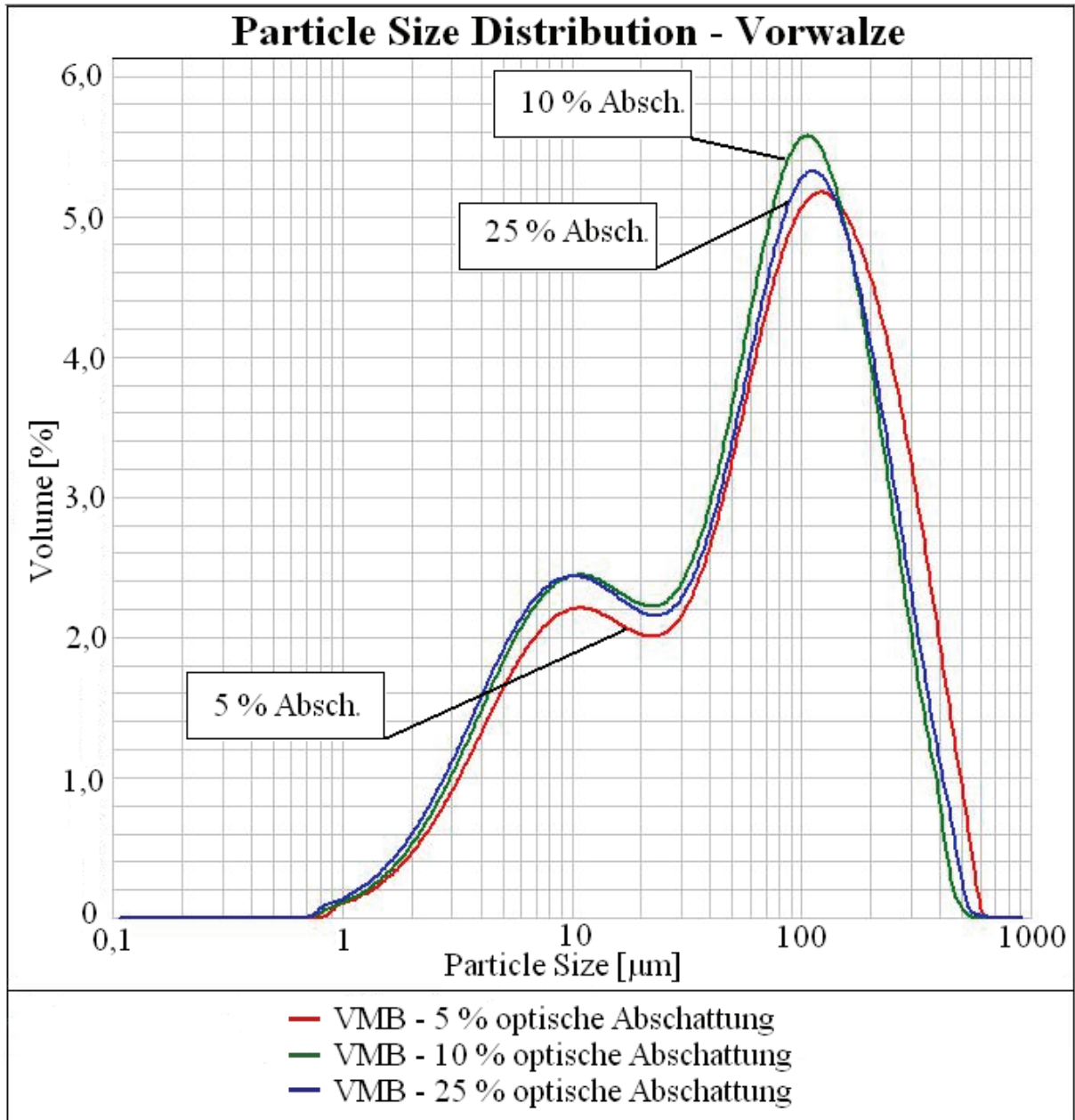


Abbildung 107: Veränderung der optischen Abschattung der Probe VMB nach Vorwalze

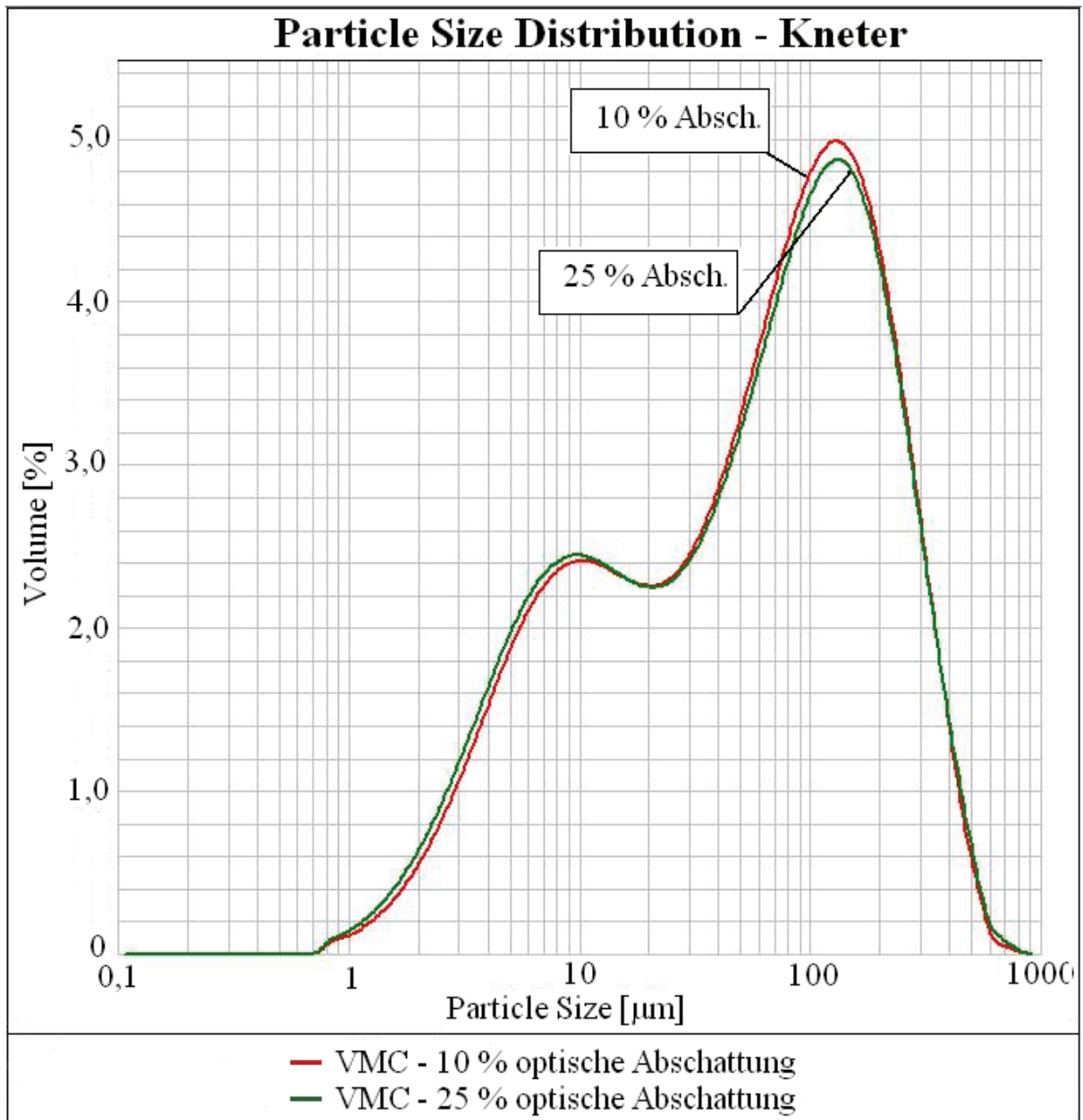


Abbildung 108: Veränderung der optischen Abschattung der Probe VMC nach Knetter

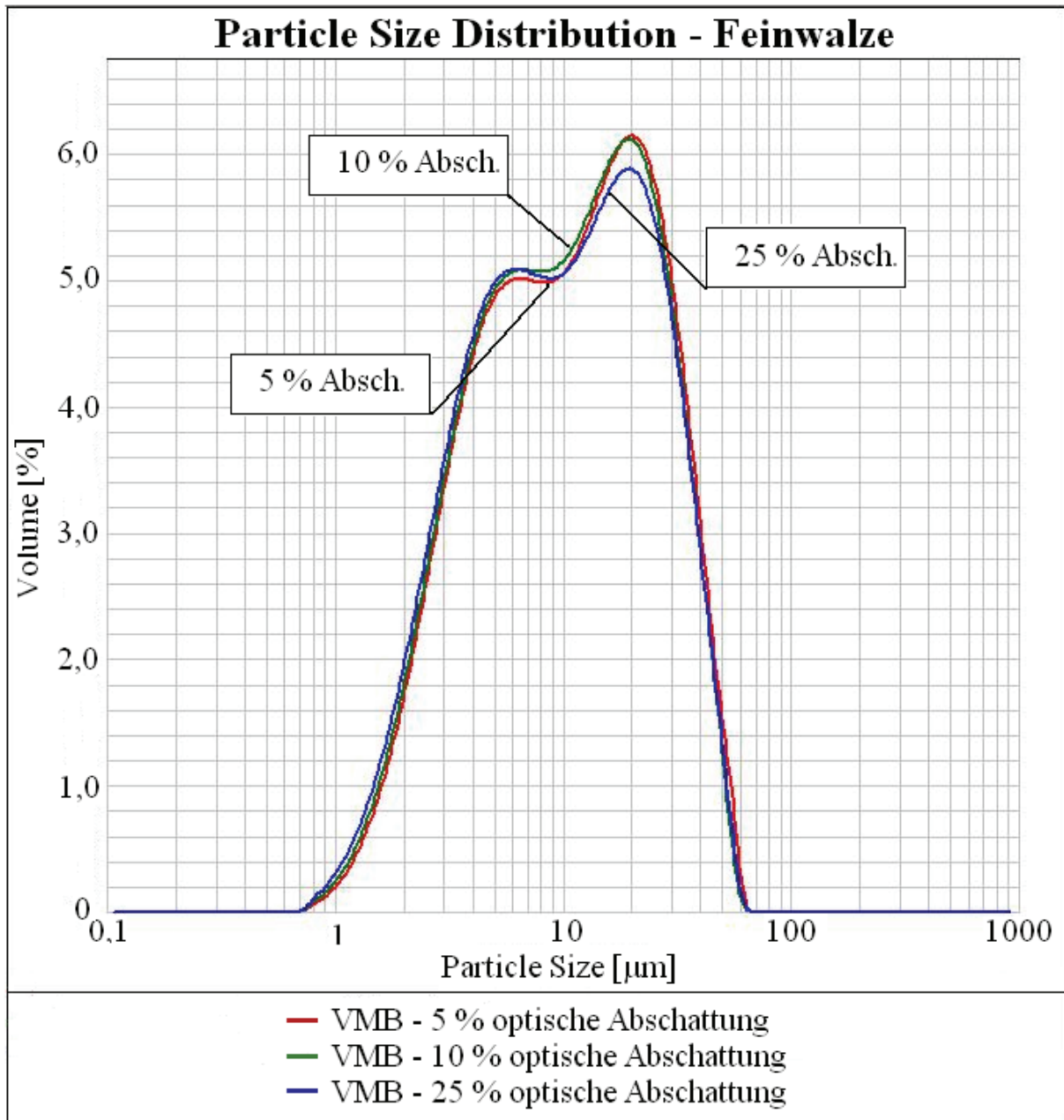


Abbildung 109: Veränderung der optischen Abschattung der Probe VMB nach Feinwalze

Anhang 5 – Untersuchung der Luftdruckeinstellungen für die Partikelgrößenverteilung der pulverigen Rohstoffe

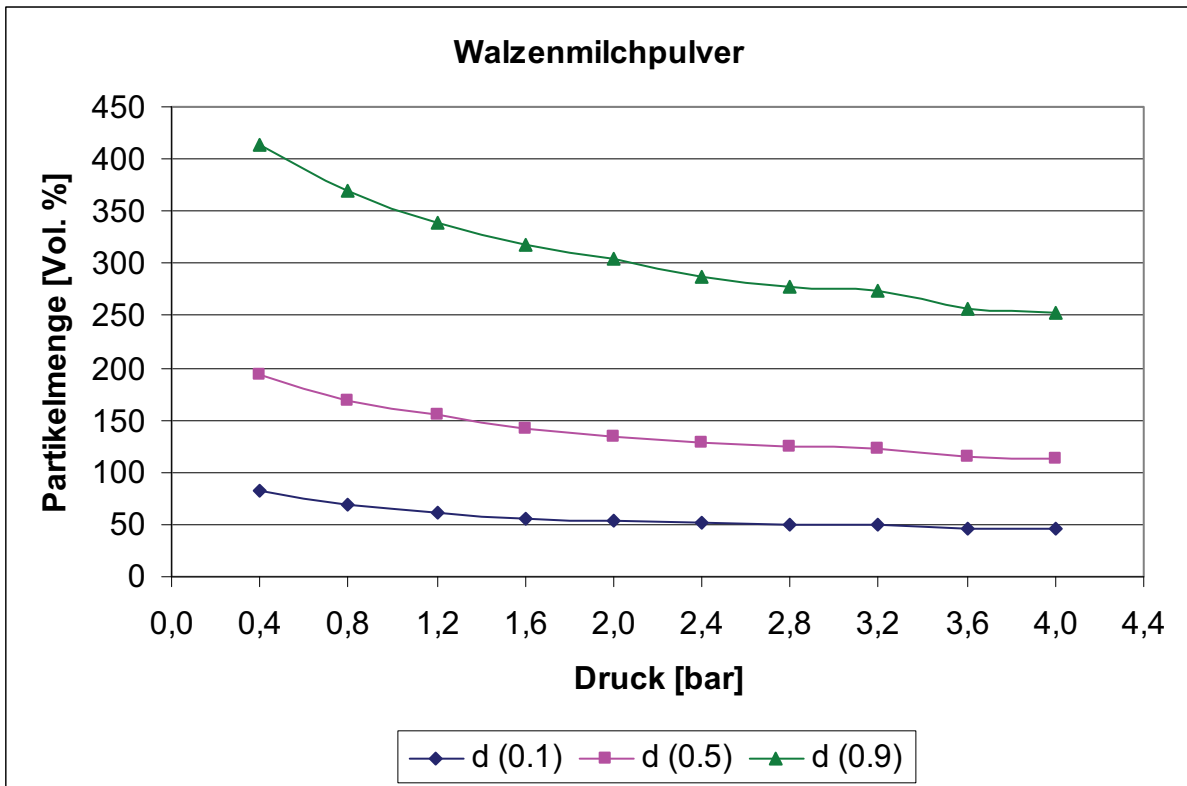


Abbildung 110: Luftdruckeinstellung für Walzenmilchpulver

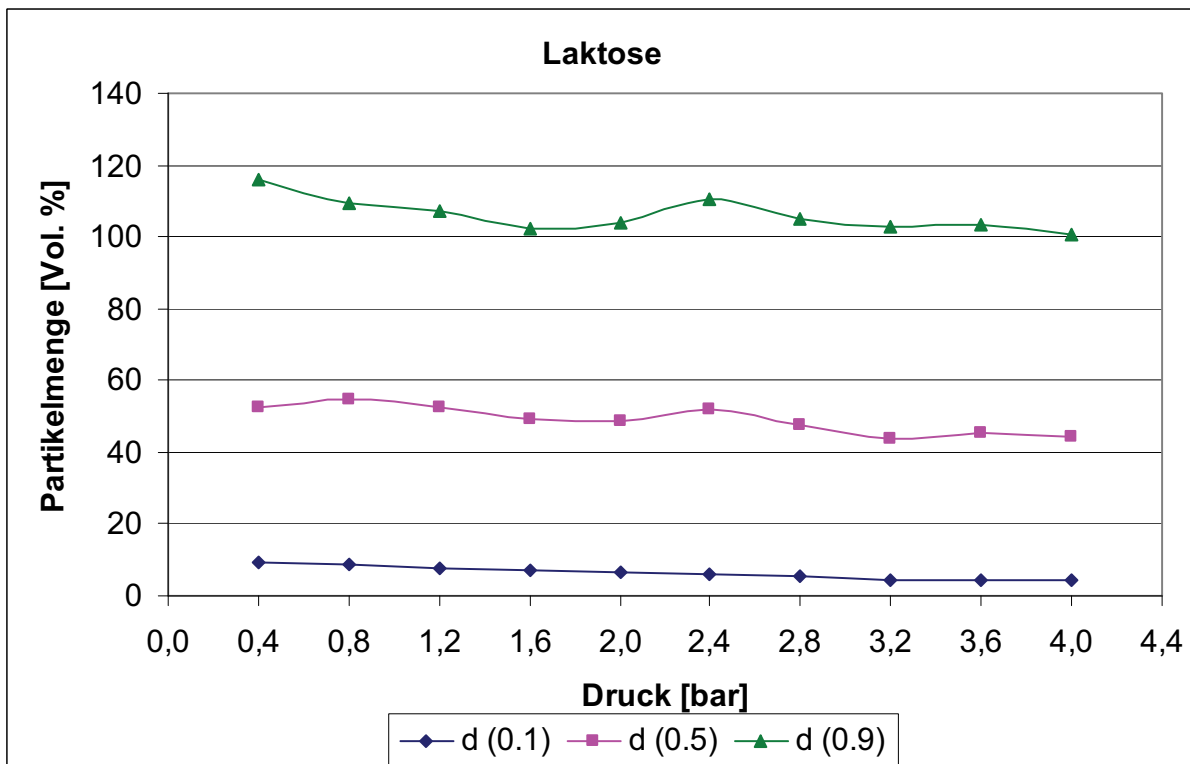


Abbildung 111: Luftdruckeinstellung für Laktose

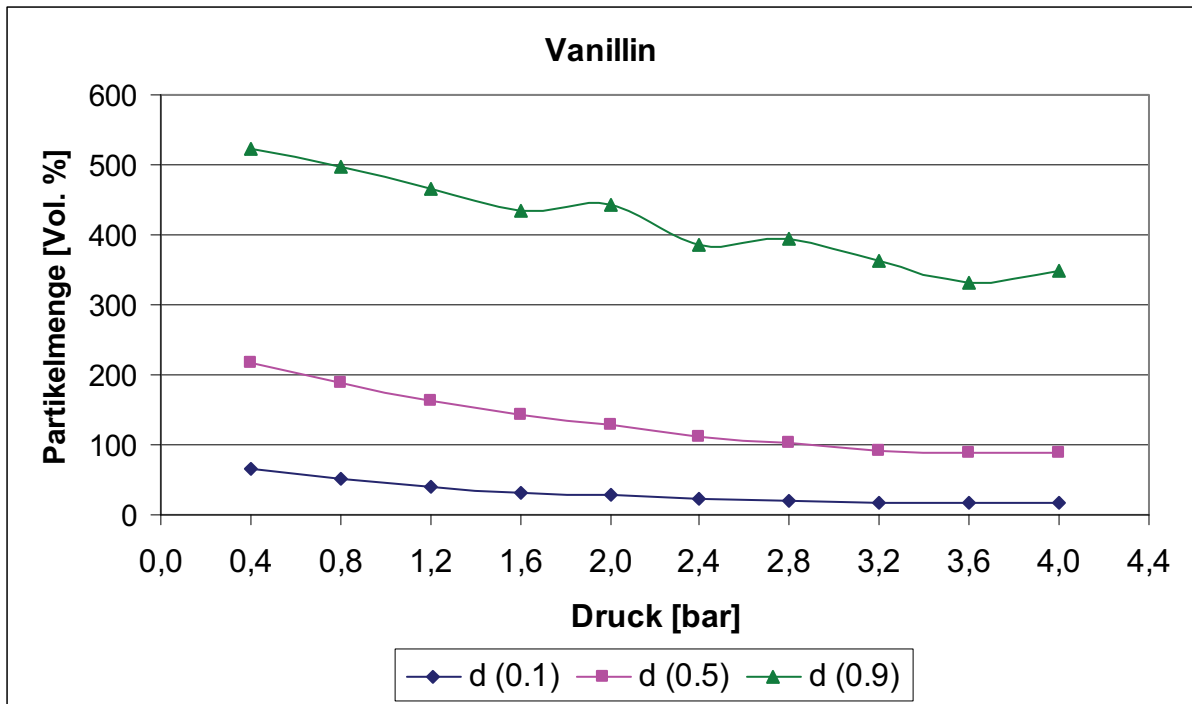


Abbildung 112: Luftdruckeinstellung für Vanillin

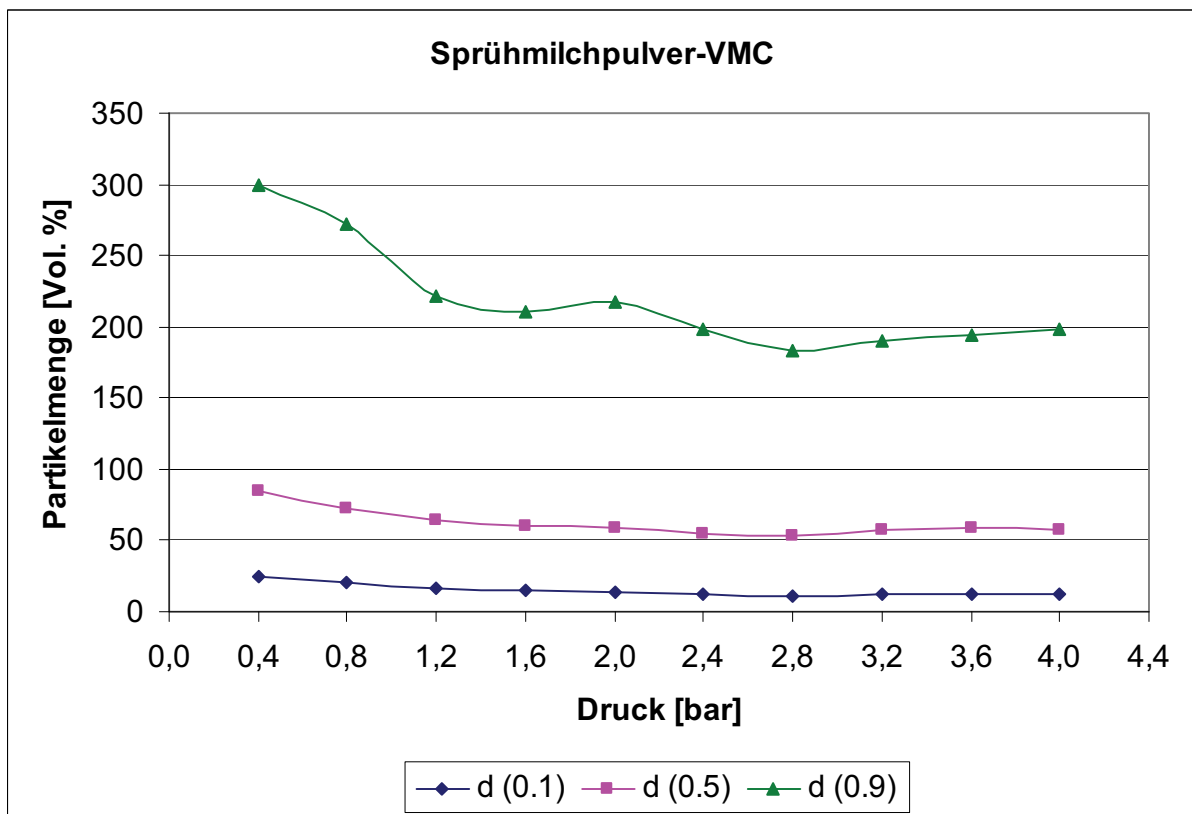


Abbildung 113: Luftdruckeinstellung für Sprühmilchpulver-VMC

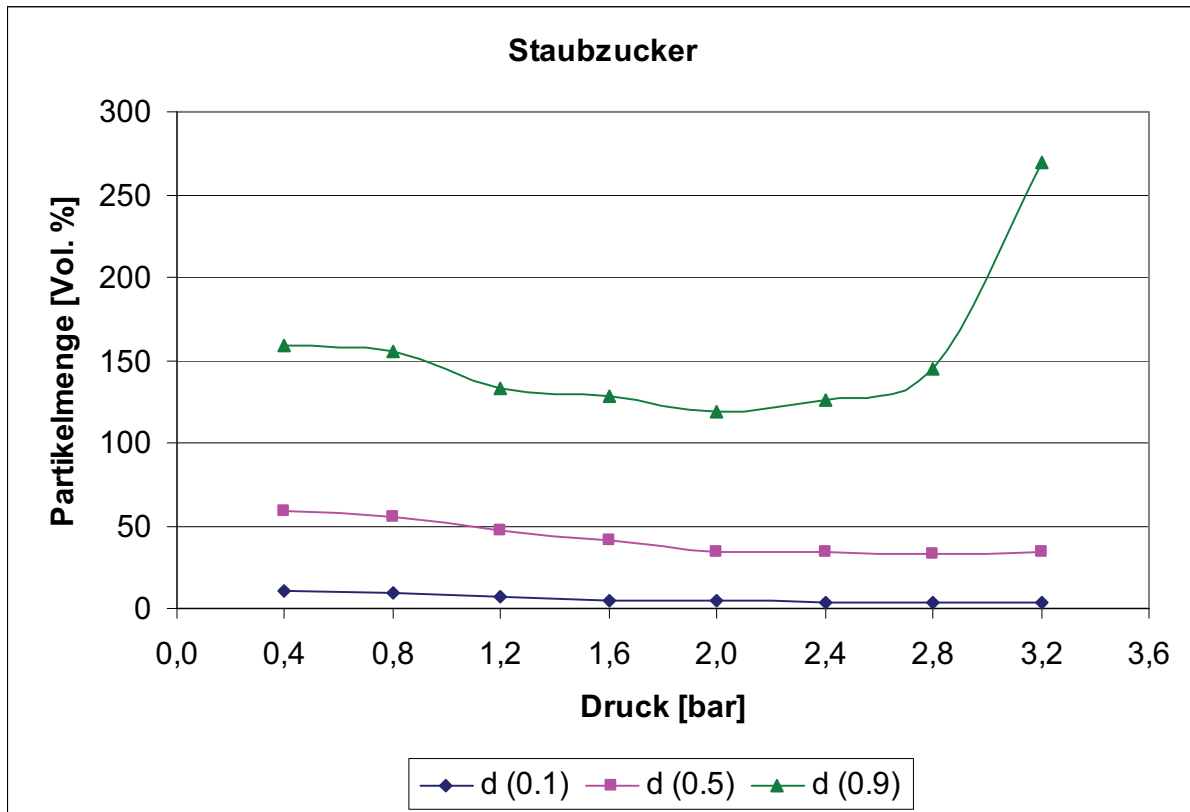


Abbildung 114: Luftdruckeinstellung für Staubzucker

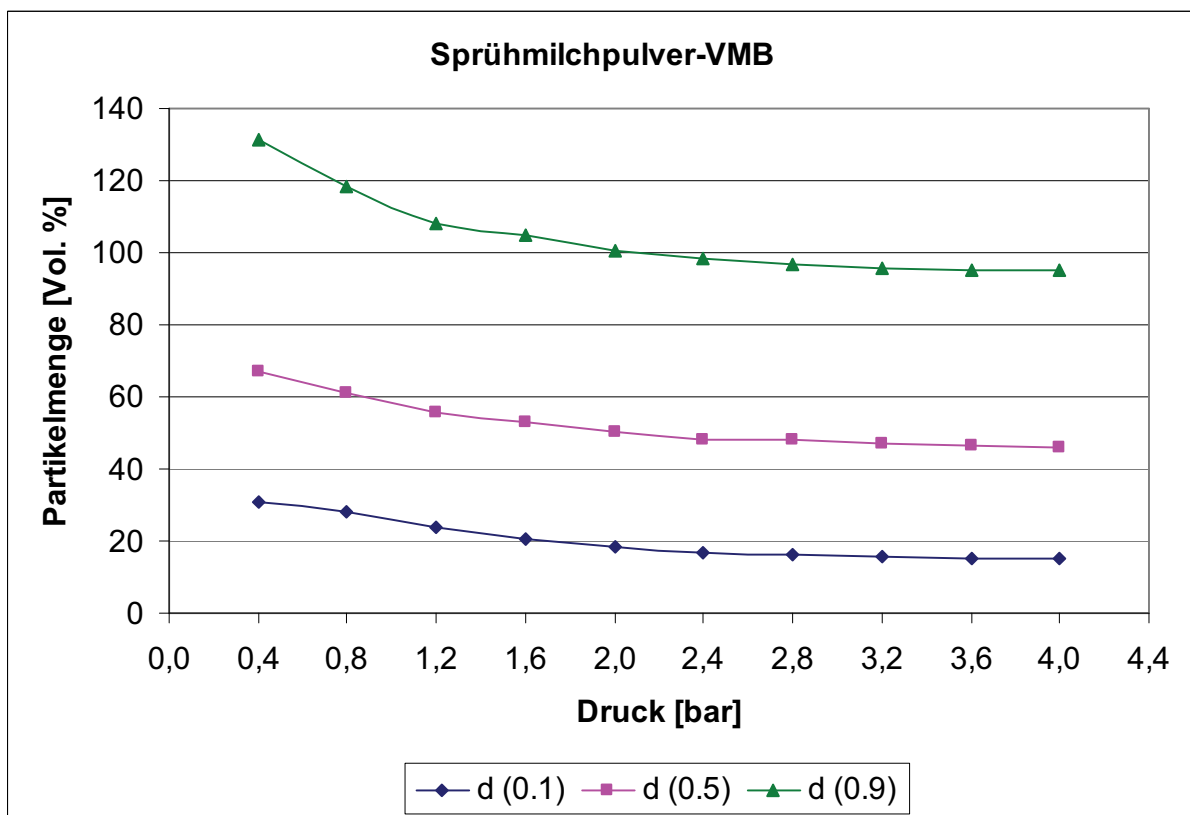


Abbildung 115: Luftdruckeinstellung für Sprühmilchpulver-VMB

Anhang 6 – Darstellung der Parameter der einzelnen Partikelverteilungen der Rohstoffe von VMC und VMB

Tabelle 25: gemittelte Werte der Parameter aus der jeweiligen Dreifachbestimmung der einzelnen pulverigen Rohstoffe

Masse	Rohstoff	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
VMC 1	Walzen- milch- pulver	13,569	56,135	145,877	329,931	592,282	158,518	1,877	0,055
VMC 2		8,628	51,775	137,419	308,536	591,392	151,964	1,868	0,061
VMC 3		4,710	47,600	130,835	296,467	579,984	145,029	1,902	0,068
VMC 4		4,766	51,976	136,631	306,009	654,418	149,842	1,859	0,061
VMB 1		10,031	54,529	136,977	298,965	509,836	148,265	1,785	0,059
VMB 2		11,683	54,211	141,410	320,555	664,091	154,082	1,883	0,057
VMB 3		4,711	48,082	131,488	297,751	580,703	145,308	1,899	0,068
VMB 4		4,708	46,632	130,089	301,410	591,126	143,562	1,959	0,070
Standardabweichung		3,622	3,561	5,493	11,974	47,840	5,110	0,049	0,006
VMC 1	Laktose	1,034	7,493	57,224	150,350	313,306	89,185	2,496	0,359
VMC 2		1,034	7,639	58,164	149,396	295,308	89,513	2,437	0,356
VMC 3		1,034	6,903	57,262	149,754	276,472	87,592	2,495	0,379
VMC 4		1,034	7,301	56,765	150,860	277,228	89,934	2,529	0,365
VMB 1		1,034	7,713	57,445	150,089	277,744	88,841	2,478	0,349
VMB 2		1,035	8,725	60,048	148,714	272,781	87,926	2,331	0,324
VMB 3		1,035	8,372	60,325	152,273	277,850	89,487	2,385	0,329
VMB 4		1,034	7,297	55,492	150,476	316,988	92,614	2,580	0,366
Standardabweichung		0	0,598	1,634	1,061	17,813	1,532	0,080	0,019

Tabelle 25: gemittelte Werte der Parameter aus der jeweiligen Dreifachbestimmung der einzelnen Trockenrohstoffe (Fortsetzung)

Masse	Rohstoff	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
VMC 1	Vanillin	1,900	25,657	109,505	306,256	682,063	138,911	2,562	0,120
VMC 2		1,900	24,923	106,785	299,163	666,575	136,753	2,568	0,121
VMC 3		1,898	24,122	105,270	296,125	590,827	136,096	2,584	0,121
VMC 4		1,898	24,962	107,451	300,395	666,401	137,593	2,563	0,122
VMB 1		1,900	25,716	110,879	301,620	591,297	142,586	2,488	0,120
VMB 2		1,898	25,456	108,761	296,706	666,899	137,438	2,494	0,123
VMB 3		1,900	25,464	110,244	302,713	681,114	141,759	2,515	0,126
VMB 4		1,900	25,080	108,615	305,285	678,668	142,010	2,580	0,123
Standardabweichung		0,001	0,523	1,861	3,689	38,774	2,599	0,039	0,002
VMC 1	Sprüh-	1,209	14,168	58,394	212,593	924,053	59,359	3,398	0,201
VMC 2	milch-	1,401	15,021	59,563	221,721	930,974	59,567	3,470	0,191
VMC 3	pulver-	1,249	14,786	59,494	216,473	926,127	60,419	3,390	0,194
VMC 4	VMC	1,402	14,565	60,503	228,508	584,101	61,775	3,536	0,191
Standardabweichung		0,101	0,363	0,863	6,893	171,500	1,097	0,069	0,005
VMC 1	Staub- zucker	0,888	6,521	46,932	151,017	347,866	77,219	3,079	0,401
VMC 2		0,889	6,644	48,245	157,081	413,728	85,690	3,118	0,393
VMC 3		0,888	6,335	47,152	156,784	372,870	84,408	3,191	0,409
VMB 4		0,888	6,421	47,152	155,248	411,094	80,160	3,156	0,405
Standardabweichung		0	0,133	0,592	2,795	31,752	3,898	0,048	0,007

Tabelle 25: gemittelte Werte der Parameter aus der jeweiligen Dreifachbestimmung der einzelnen Trockenrohstoffe (Fortsetzung)

Masse	Rohstoff	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
VMB 1	Sprüh- milch-	1,404	18,644	58,338	125,945	274,935	67,801	1,839	0,172
VMB 2		1,404	19,168	62,013	131,312	234,139	74,559	1,808	0,171
VMB 3	pulver- VMB	1,403	19,020	61,716	131,448	263,471	73,134	1,822	0,171
VMB 4		1,402	18,818	64,474	134,817	254,814	76,792	1,799	0,172
		0,001	0,229	2,522	3,668	17,232	3,823	0,017	0,001

Tabelle 26: Werte der Parameter der Partikelverteilungen der einzelnen Kakaomassen

Masse	Rohstoff	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
VMC 1	Kakaomasse	0,565	2,932	9,443	34,125	526,079	9,070	3,303	0,971
VMC 2		0,565	2,937	9,361	34,038	455,454	8,980	3,322	0,973
VMC 3		0,565	2,872	9,156	32,564	396,063	8,839	3,243	0,995
VMC 4		0,565	3,109	9,786	38,618	382,660	9,422	3,629	0,927
Standardabweichung		0	0,102	0,262	2,621	65,490	0,248	0,173	0,028
VMB 1	Kakaomasse 1	0,565	2,974	9,276	30,643	349,767	9,325	2,983	0,973
VMB 2		0,565	3,040	9,498	32,677	418,441	9,456	3,120	0,953
VMB 3		0,565	2,982	9,315	31,247	337,528	9,333	3,034	0,971
Standardabweichung		0	0,036	0,119	1,045	43,614	0,073	0,069	0,011
VMB 1	Kakaomasse 2	0,565	3,122	9,609	36,907	396,757	9,087	3,516	0,931
VMB 2		0,565	3,162	9,546	35,712	879,370	9,031	3,410	0,926
VMB 3		0,565	3,116	9,422	32,761	402,953	9,017	3,146	0,943
Standardabweichung		0	0,025	0,095	2,134	276,865	0,037	0,191	0,009
VMB 1	Kakaomasse 3	0,565	3,023	9,511	34,102	303,104	9,326	3,268	0,954
VMB 2		0,565	3,079	9,878	39,891	537,246	9,519	3,727	0,927
VMB 3		0,565	3,061	9,724	38,421	721,664	9,399	3,636	0,936
Standardabweichung		0	0,029	0,184	3,009	209,772	0,097	0,243	0,014
VMB 4	Gemisch	0,565	3,063	9,414	33,982	460,899	9,202	3,284	0,951

Anhang 7 – einzelne Darstellung der drei Probenahmen VMC und VMB

Tabelle 27: Parameter der Partikelgrößenverteilung Knetter VMC 1, 2, 3

Masse	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m ² /g]
Knetter 1								
VMC 1	0,766	5,790	70,142	261,846	679,269	147,190	3,651	0,364
VMC 2	0,766	5,550	74,215	252,504	652,824	128,306	3,328	0,368
VMC 3	0,890	5,707	73,648	280,190	680,990	155,928	3,727	0,357
Knetter 2								
VMC 1	0,766	5,825	67,467	268,826	831,997	134,158	3,898	0,364
VMC 2	0,766	6,212	76,417	226,880	650,727	118,752	2,888	0,341
VMC 3	0,890	5,634	67,747	262,146	646,125	146,964	3,786	0,365

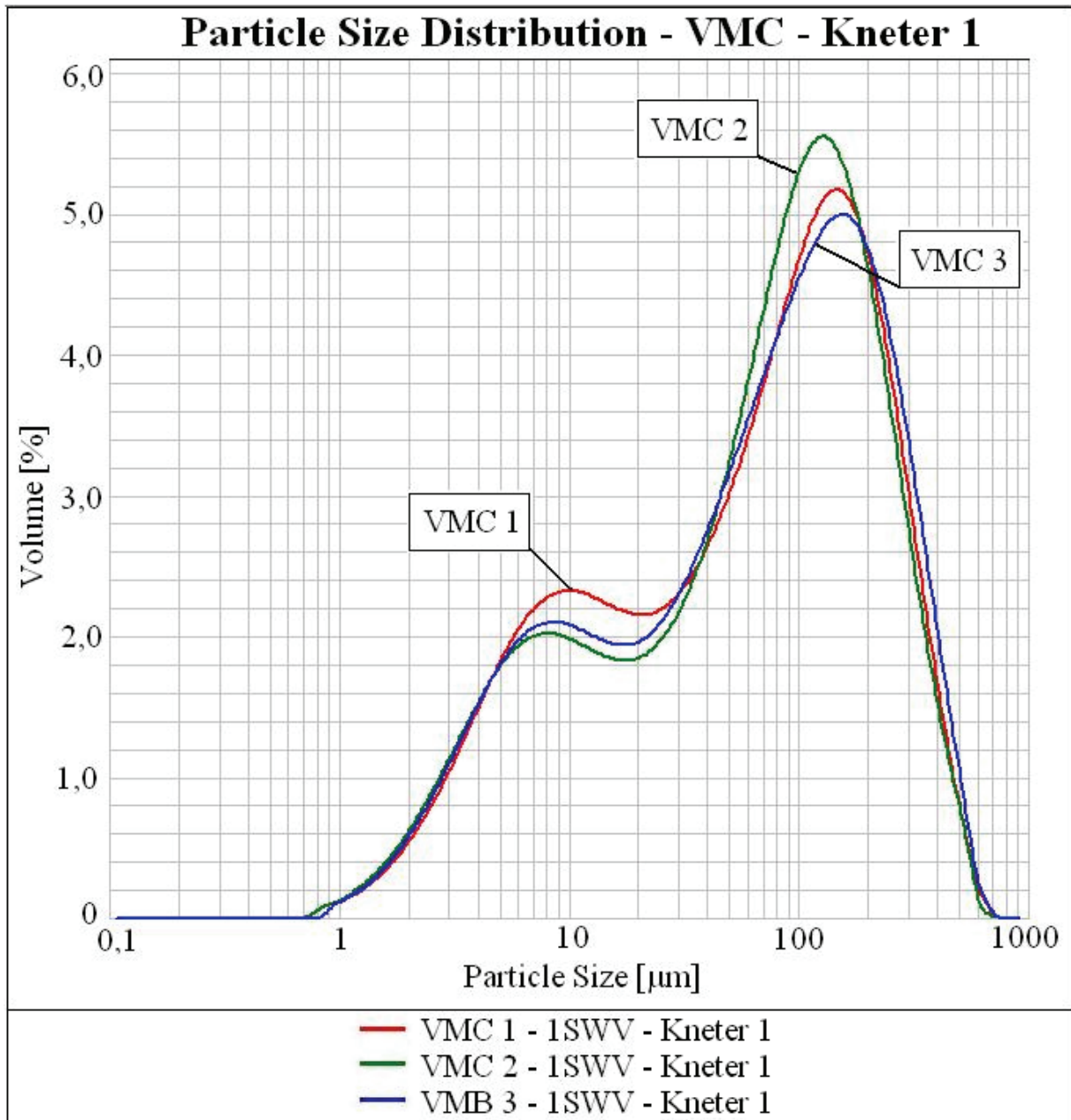


Abbildung 116: Darstellung der Partikelverteilung der Proben von Knetter 1 von VMC 1, 2, 3, 1SWV

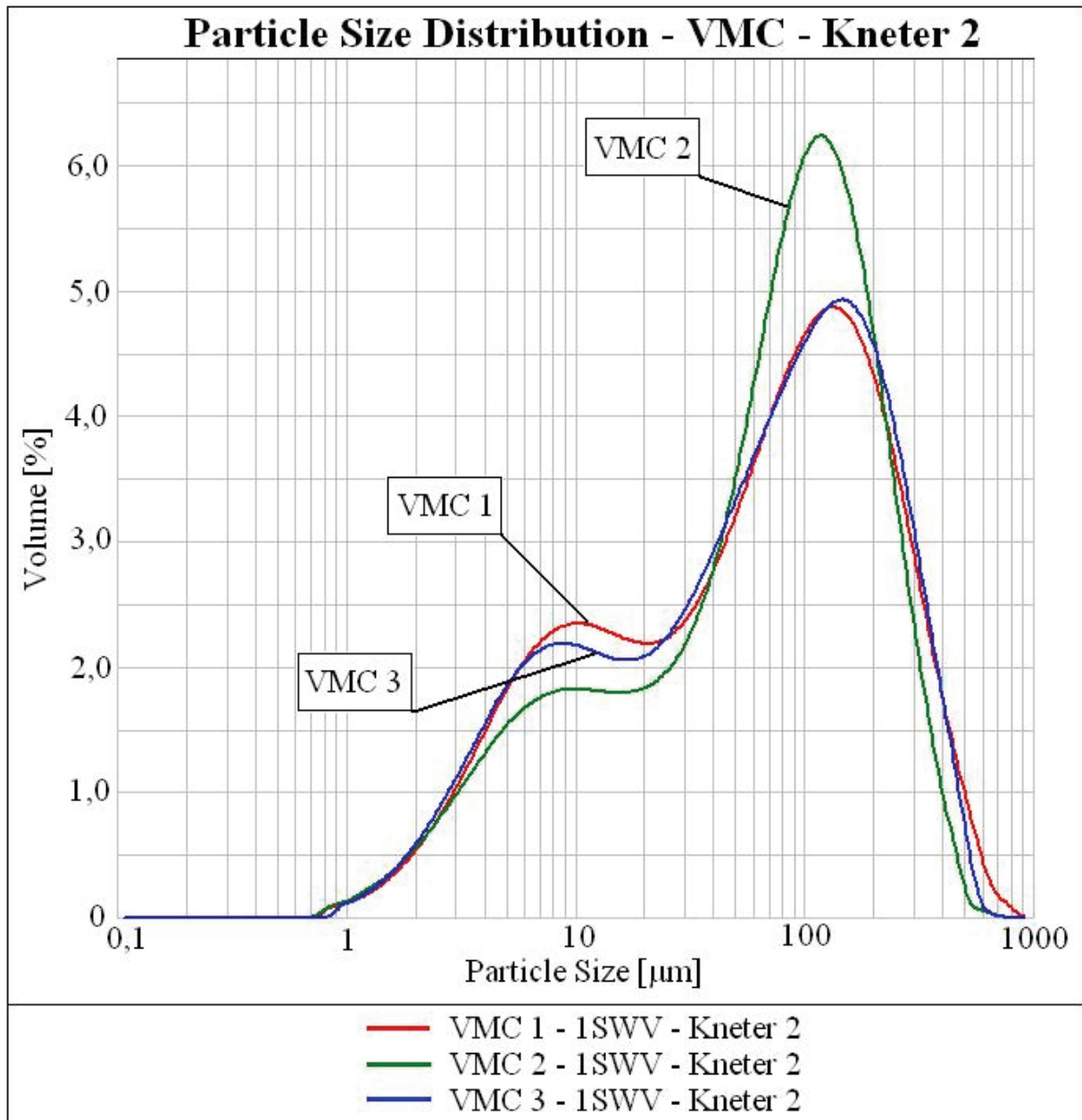


Abbildung 117: Darstellung der Partikelverteilung der Proben von Knetter 1 von VMC 1, 2, 3, 1SWV

Tabelle 28: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Feinwalzproben VMC, Transportband

Masse	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
VMC 1	0,658	2,945	32,578	43,400	82,106	29,331	3,046	0,848
VMC 2	0,764	2,763	24,280	32,072	60,329	20,916	2,695	0,933
VMC 3	0,764	2,725	23,563	31,049	60,348	20,391	2,674	0,949

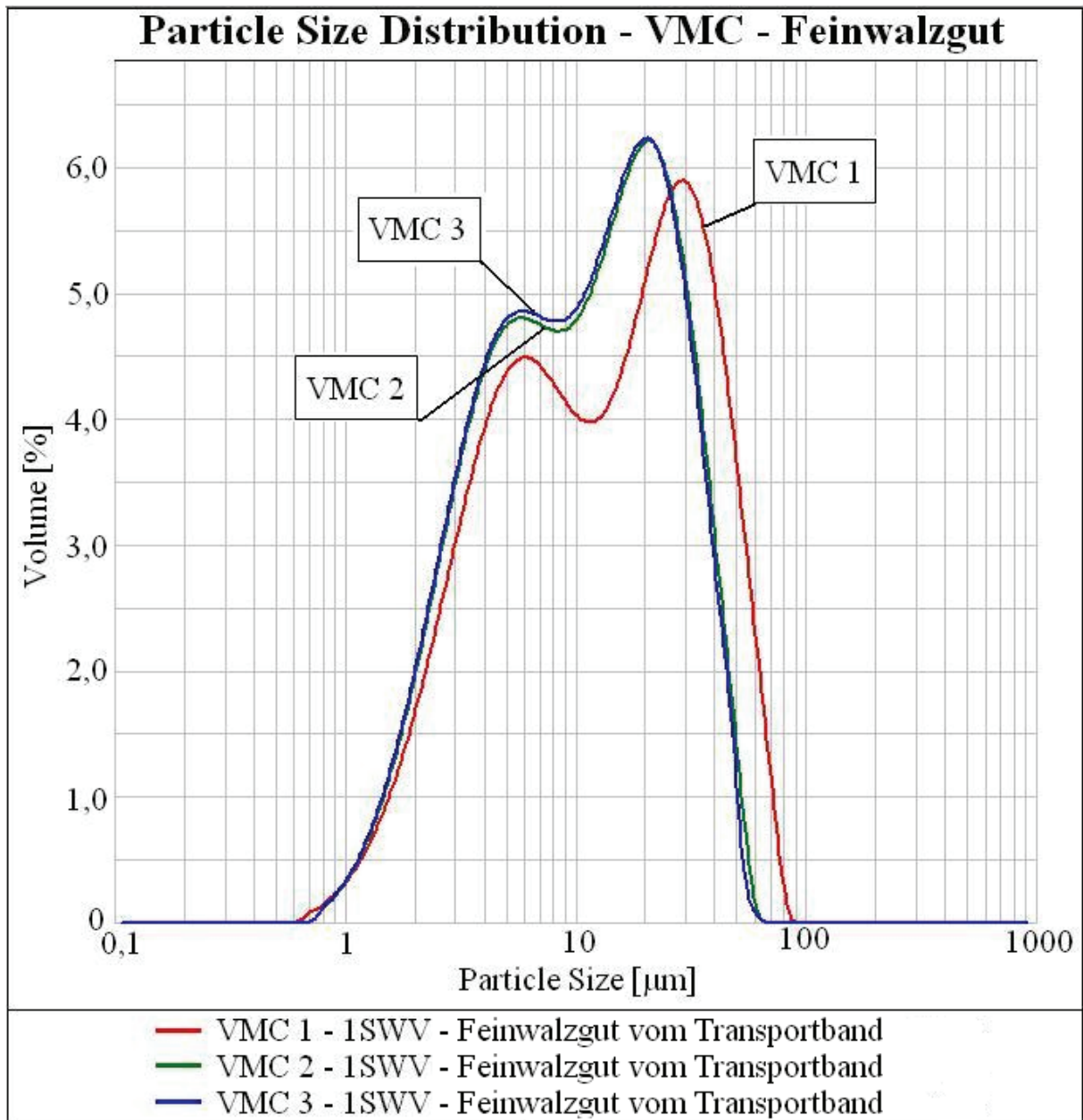


Abbildung 118: Darstellung der Partikelverteilung der Feinwalzwerkproben von VMC 1, 2, 3, 1SWV

Tabelle 29: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Concheproben von VMC

Masse	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
VMC 1	0,658	2,746	11,160	35,561	69,255	23,150	2,940	0,929
VMC 2	0,764	2,822	10,876	34,808	77,224	20,893	2,941	0,914
VMC 3	0,764	2,710	9,819	28,853	52,517	18,386	2,663	0,974

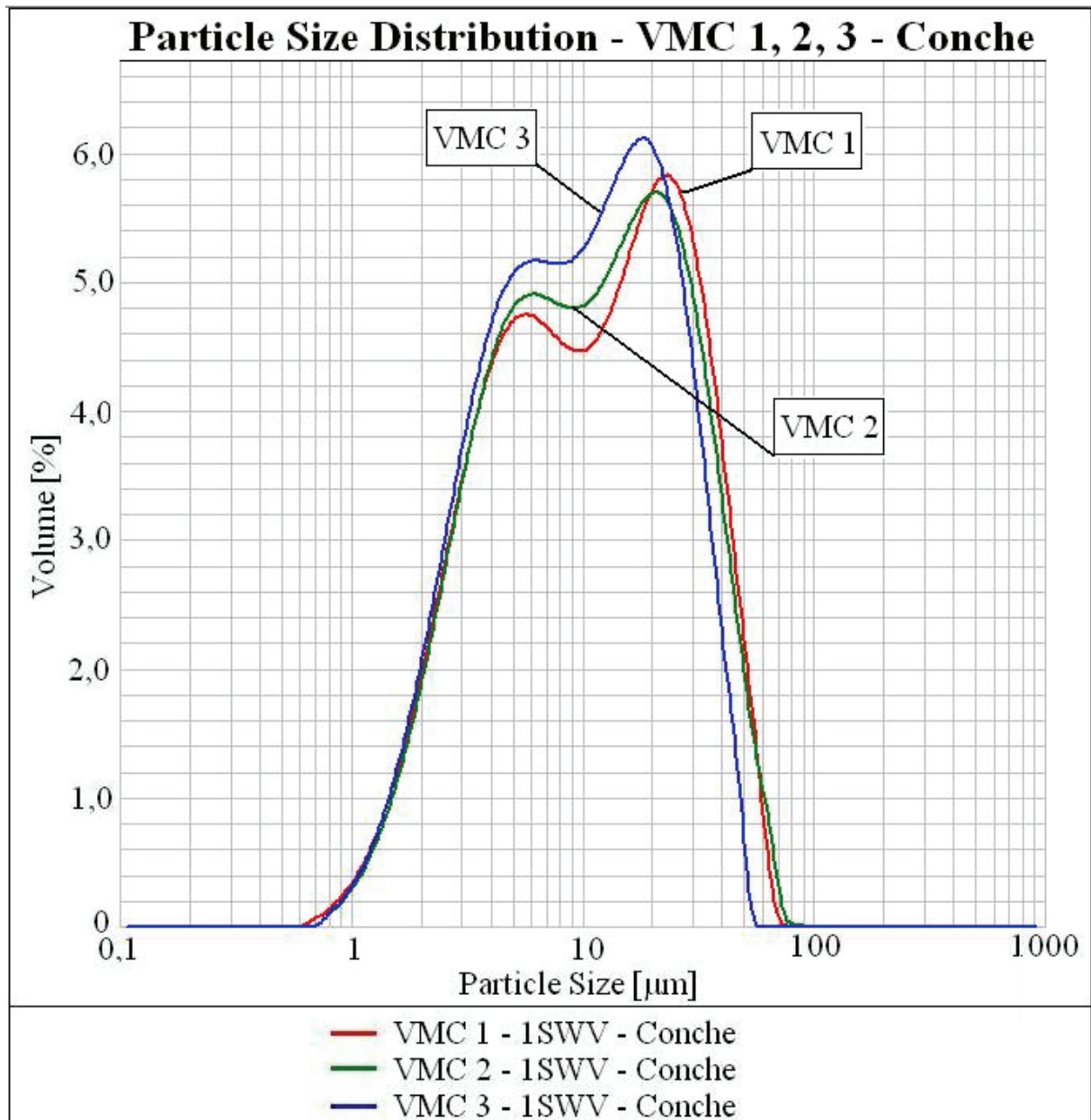


Abbildung 119: Darstellung der Partikelverteilung der Concheproben von VMC 1, 2, 3, 1SWV

Tabelle 30: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Mischerproben von VMB

Masse	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m ² /g]
Mischer 1								
VMB 1	0,765	7,667	102,493	275,618	586,985	149,411	2,614	0,282
VMB 2	0,658	7,041	96,335	282,200	675,389	144,912	2,856	0,310
VMB 3	0,658	7,110	96,705	271,225	582,687	145,048	2,731	0,307
Mischer 2								
VMB 1	0,766	8,356	115,630	305,533	585,128	167,987	2,570	0,258
VMB 2	0,658	6,924	93,074	280,178	861,478	140,209	2,936	0,315
VMB 3	0,658	7,011	95,818	288,723	656,153	147,152	2,940	0,311

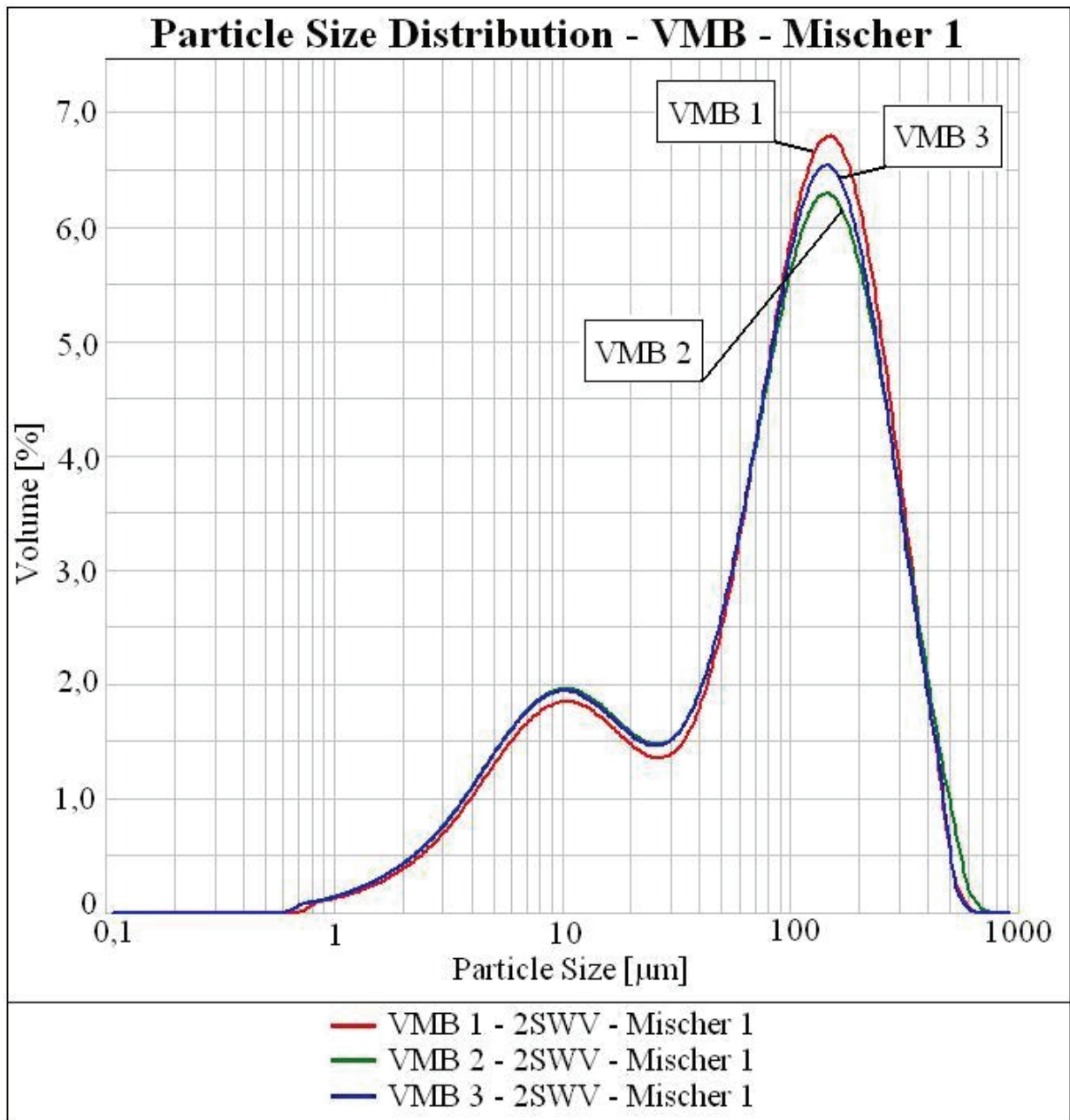


Abbildung 120: Darstellung der Partikelverteilung der Mischer 1 von VMB 1, 2, 3, 2SWV

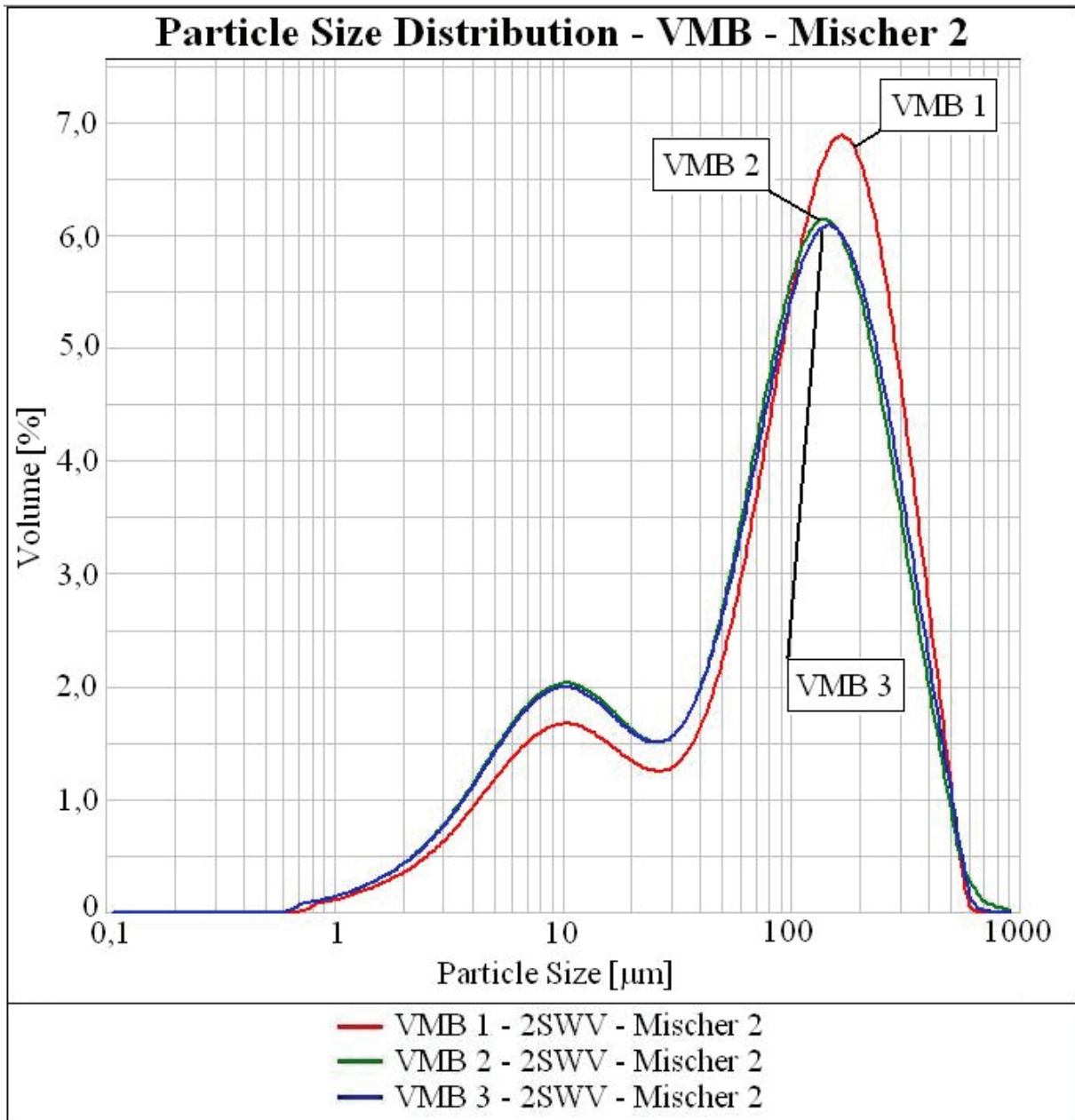


Abbildung 121: Darstellung der Partikelverteilung der Mischer 2 von VMB 1, 2, 3, 2SWV

Tabelle 31: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Vorwalzwerkproben von VMB

Masse	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
Vorwalze 1								
VMB 1	0,890	6,431	75,180	282,662	669,382	112,665	3,674	0,327
VMB 2	0,766	6,143	69,702	247,162	703,026	115,787	3,458	0,351
VMB 3	0,766	6,016	67,179	260,649	669,080	108,691	3,790	0,357
Vorwalze 2								
VMB 1	0,890	6,467	73,265	269,002	588,088	113,554	3,583	0,328
VMB 2	0,767	6,167	67,860	249,891	779,214	115,626	2,592	0,350
VMB 3	0,766	6,073	66,809	245,574	586,410	118,153	3,585	0,355

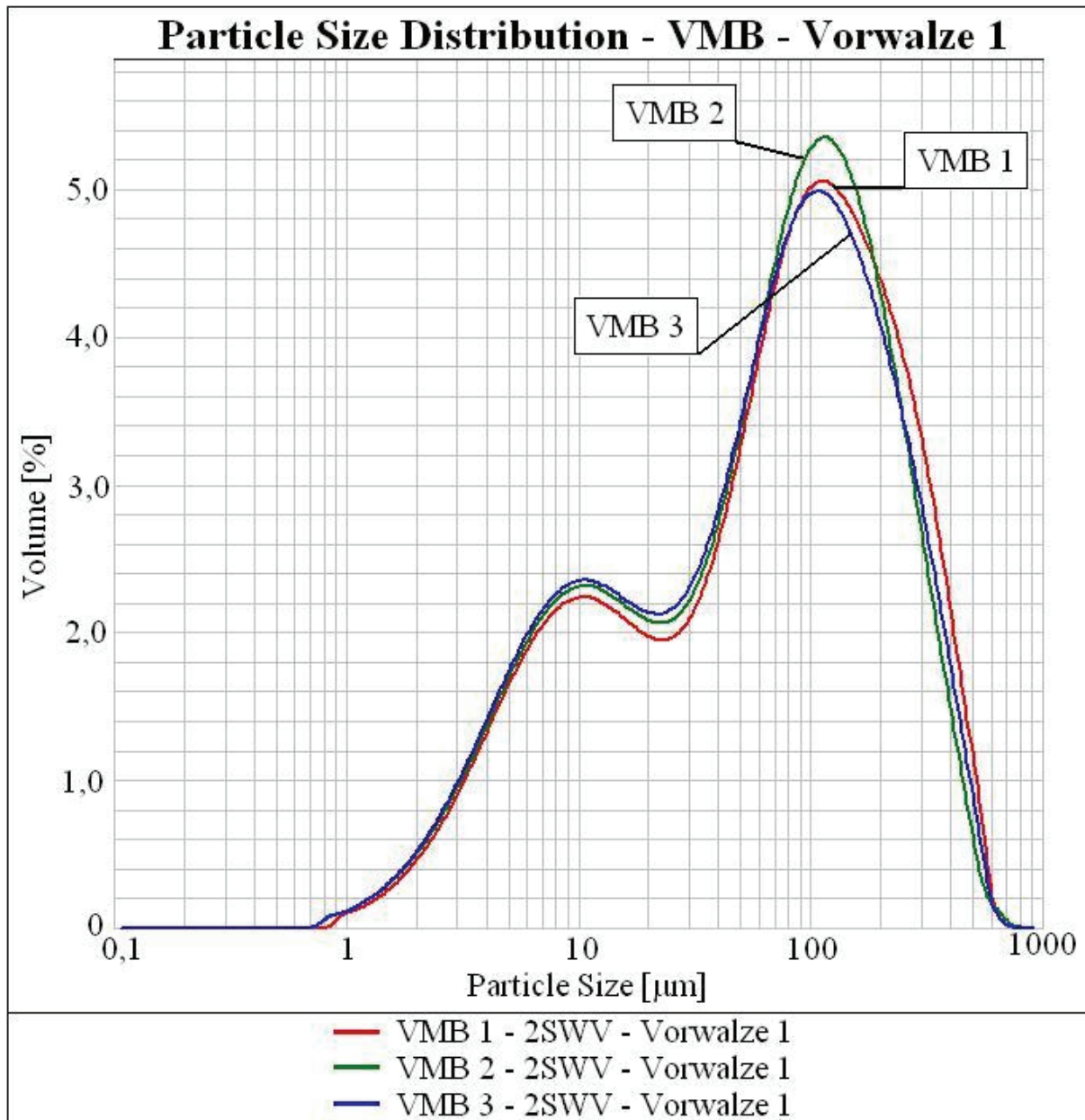


Abbildung 122: Darstellung der Partikelverteilung der Vorwalze 1 von VMB 1, 2, 3, 2SWV

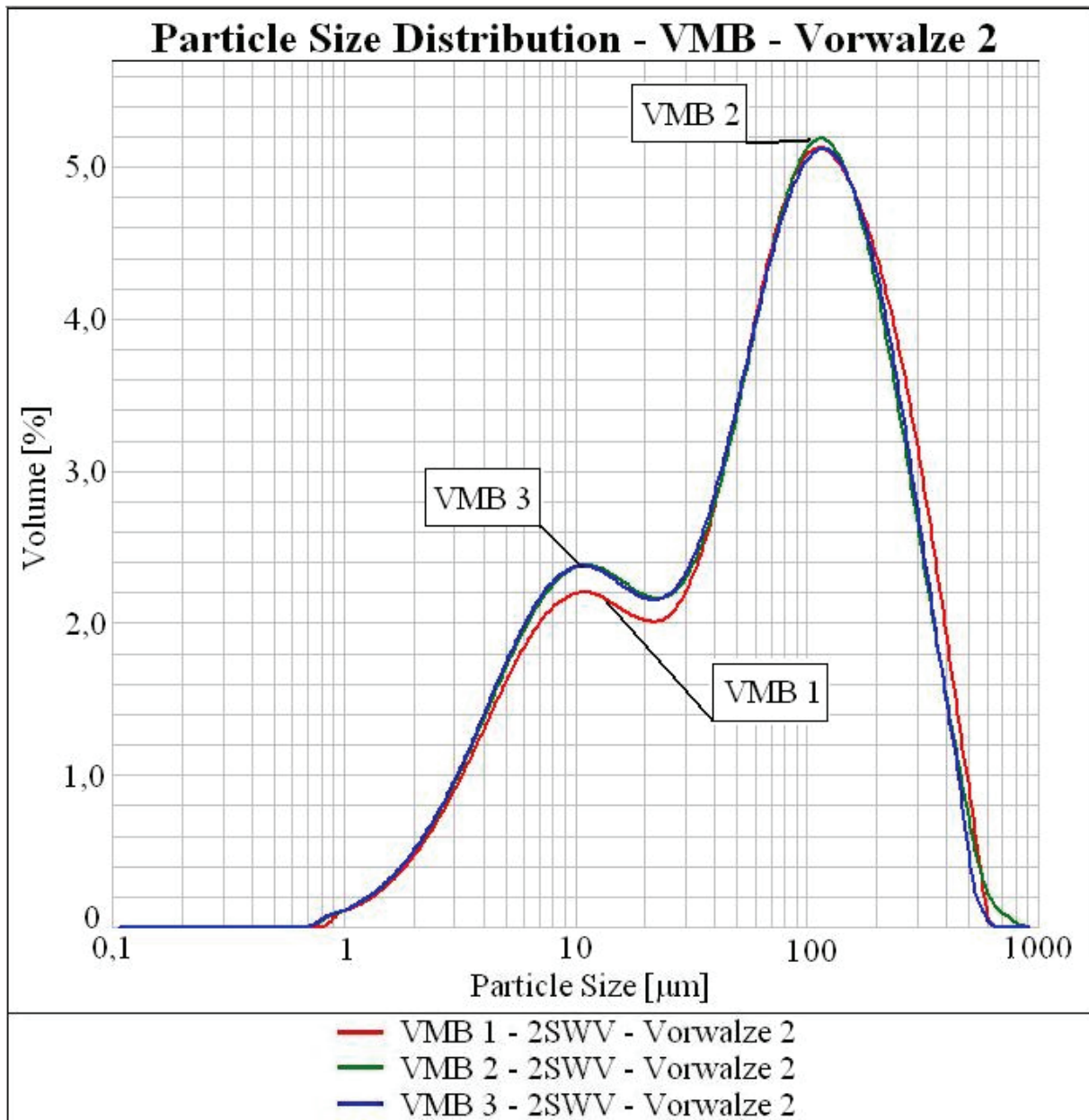


Abbildung 123: Darstellung der Partikelverteilung der Vorwalze 2 von VMB 1, 2, 3, 2SWV

Tabelle 32: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Feinwalzwerkproben VMB, Transportband

Masse	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
VMB 1	0,764	2,813	10,572	32,339	60,857	20,940	2,793	0,927
VMB 2	0,764	2,785	10,732	33,288	61,075	21,904	2,842	0,929
VMB 3	0,764	2,706	9,655	29,097	52,572	18,471	2,733	0,979

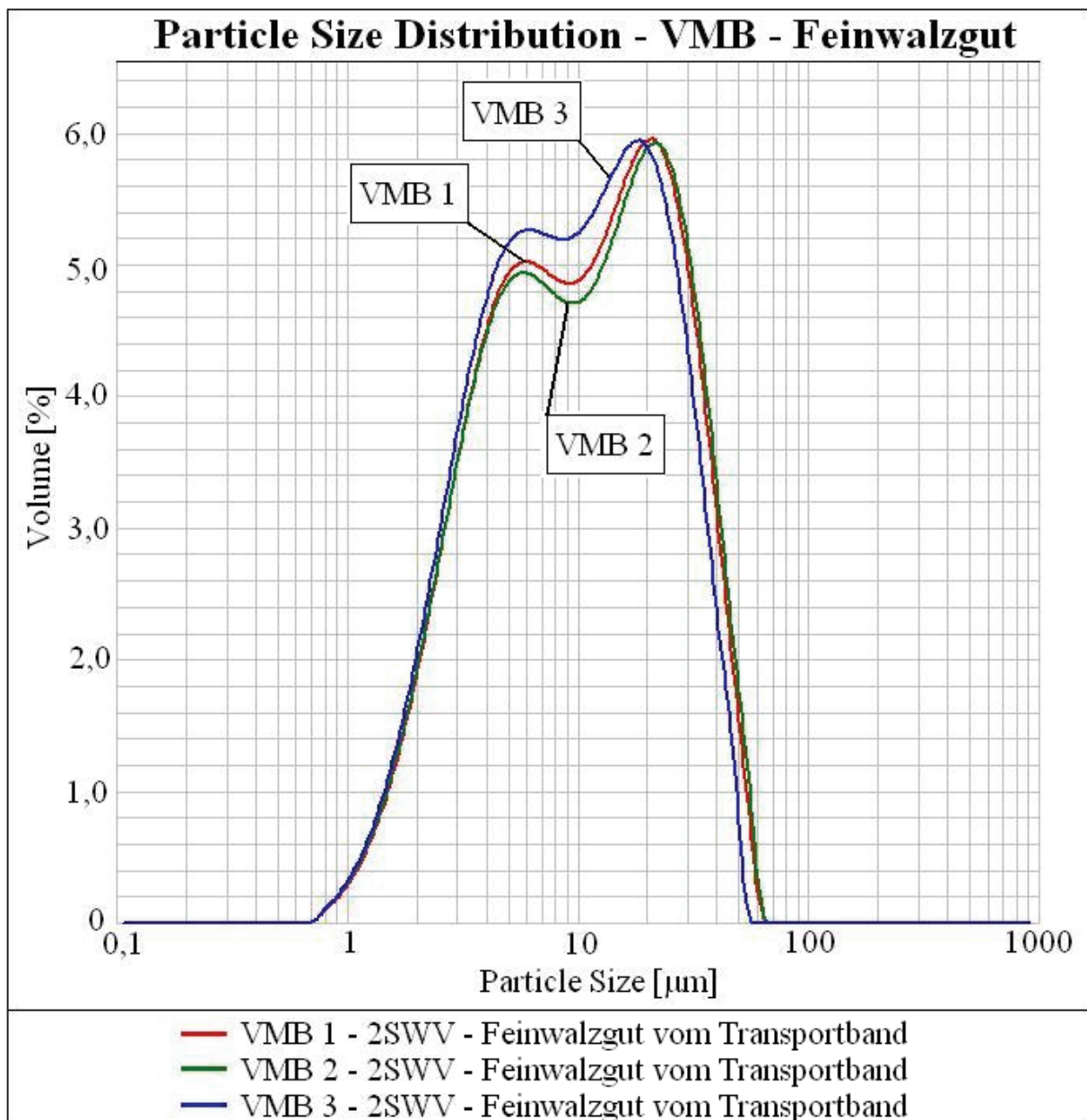


Abbildung 124: Darstellung der Partikelverteilung des Feinwalzguts von VMB 1, 2, 3, 2SWV

Tabelle 33: Parameter der Partikelgrößenverteilung der Concheproben von VMB

Masse	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
VMB 1	0,764	2,747	9,919	31,340	60,694	19,806	2,883	0,958
VMB 2	0,764	2,748	9,936	31,175	60,493	19,810	2,861	0,957
VMB 3	0,764	2,678	9,019	27,418	52,331	16,718	2,743	1,010

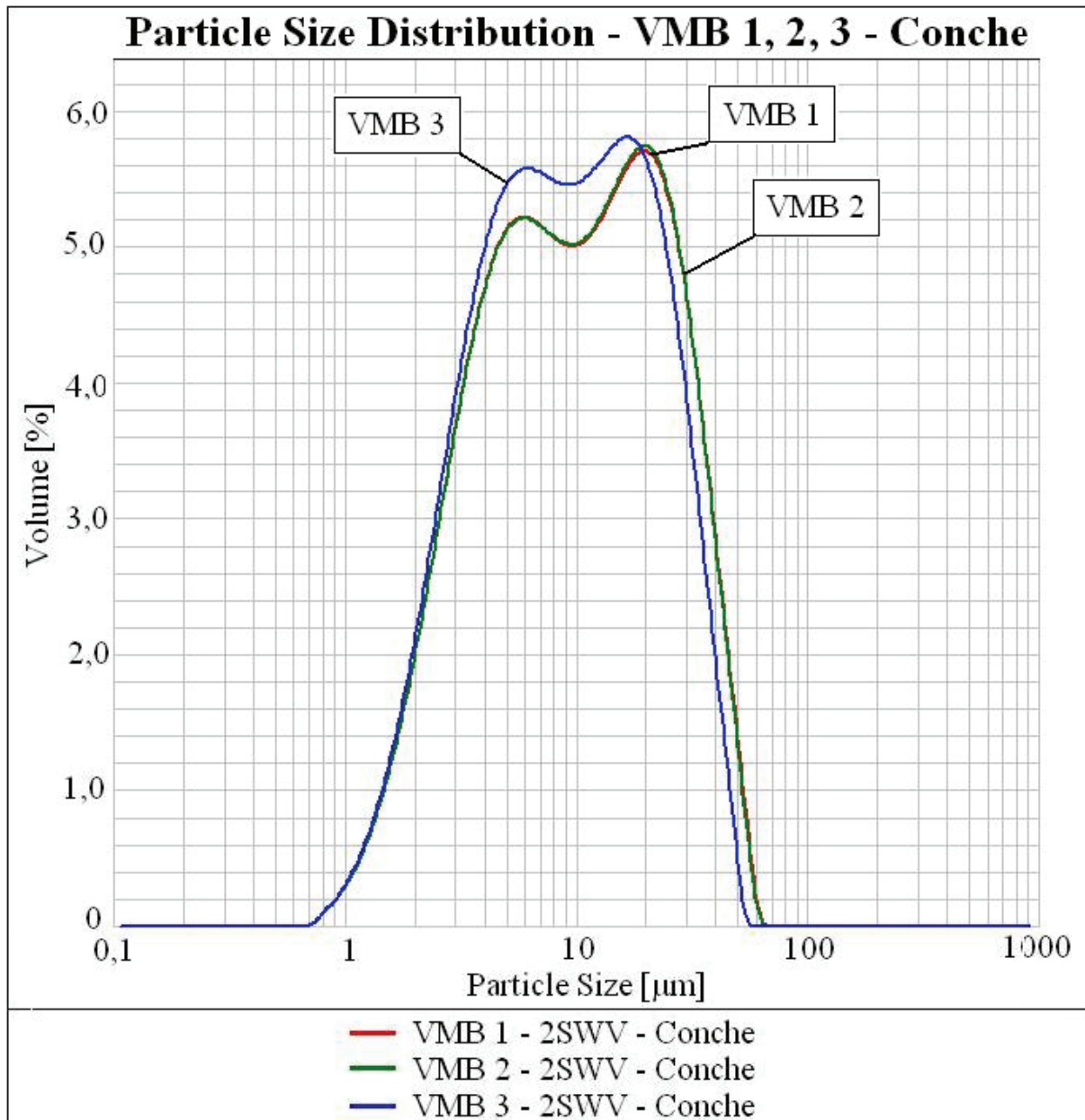


Abbildung 125: Darstellung der Partikelverteilung der Concheproben von VMB 1, 2, 3, 2SWV

**Anhang 8 – Abbildungen zu den Untersuchungen der Feinwalzproben
Start, 1h Betrieb, Ende jeweils links, Mitte, rechts von VMC und VMB**

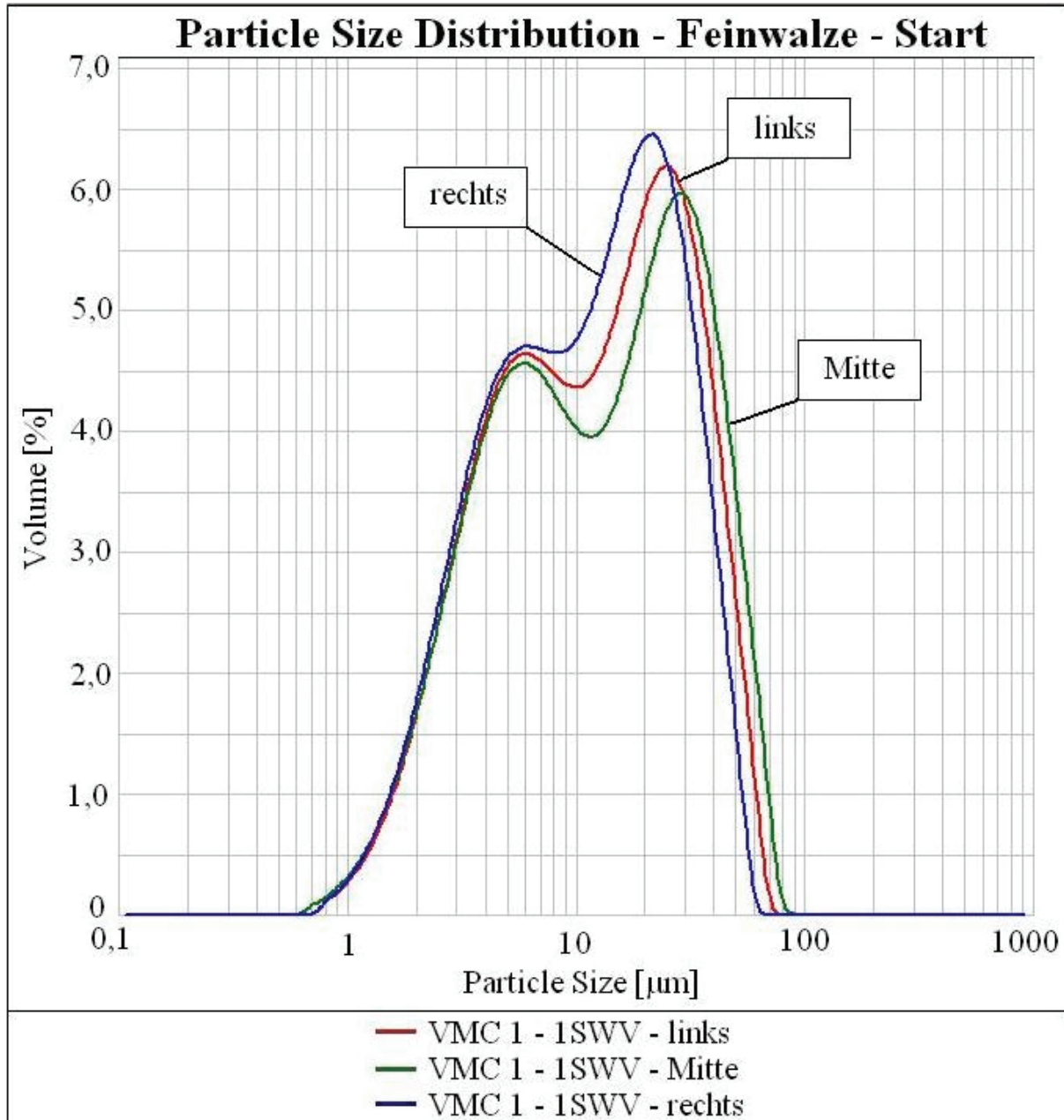


Abbildung 126: VMC 1 – Feinwalze im 1SWV – Start

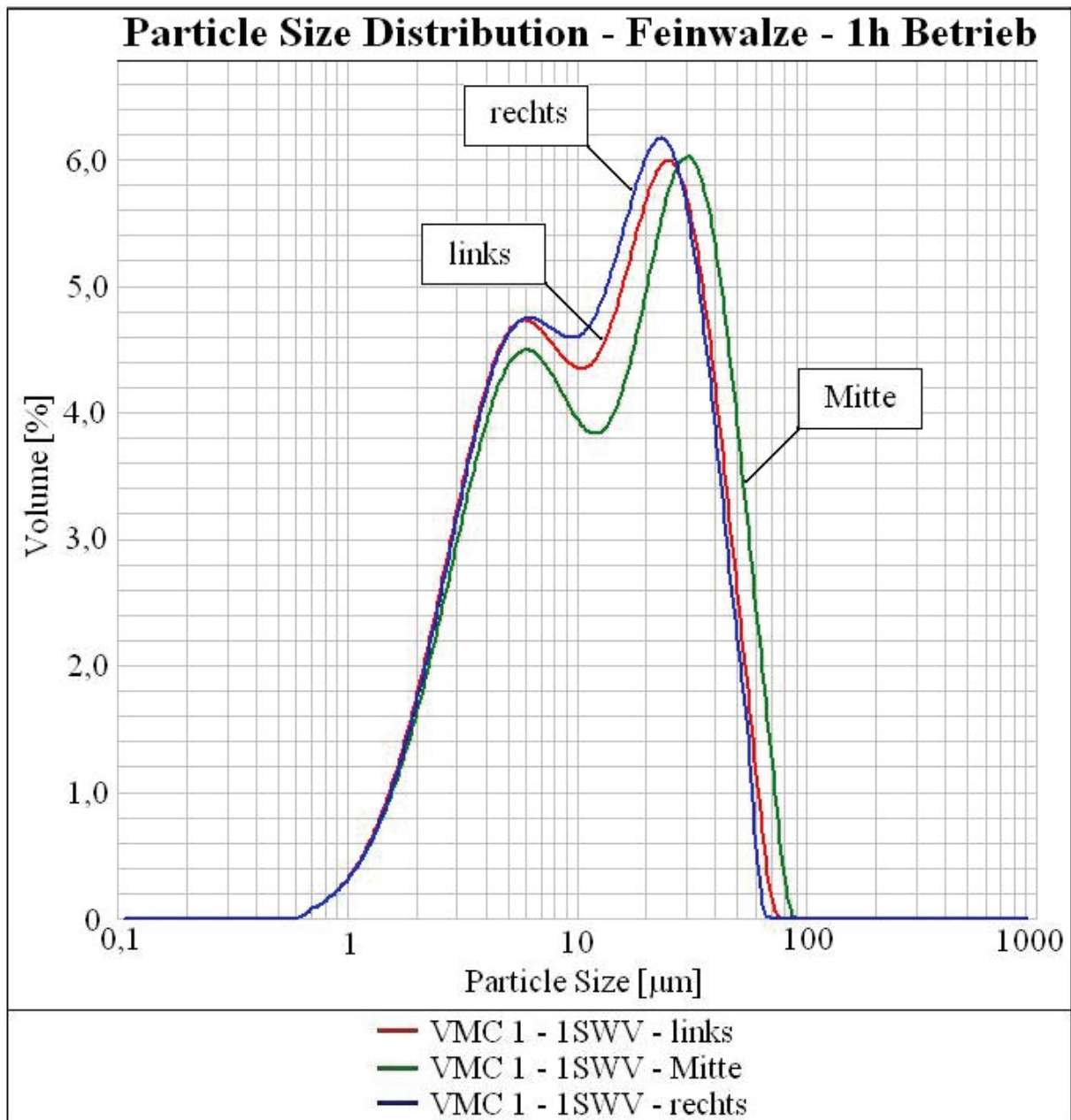


Abbildung 127: VMC 1 – Feinwalze im 1SWV – 1h Betrieb

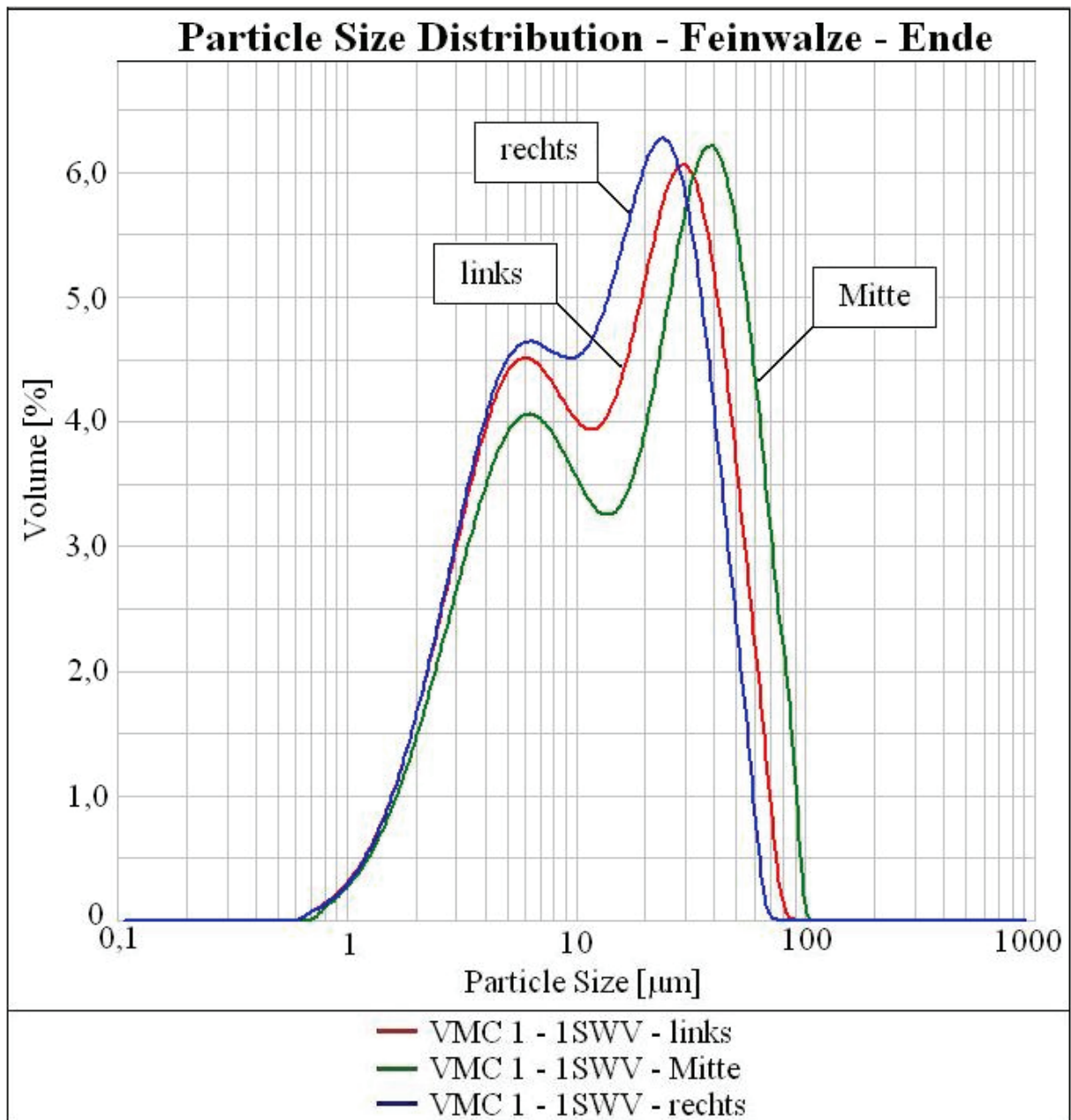


Abbildung 128: VMC 1 – Feinwalze im 1SWV – Ende

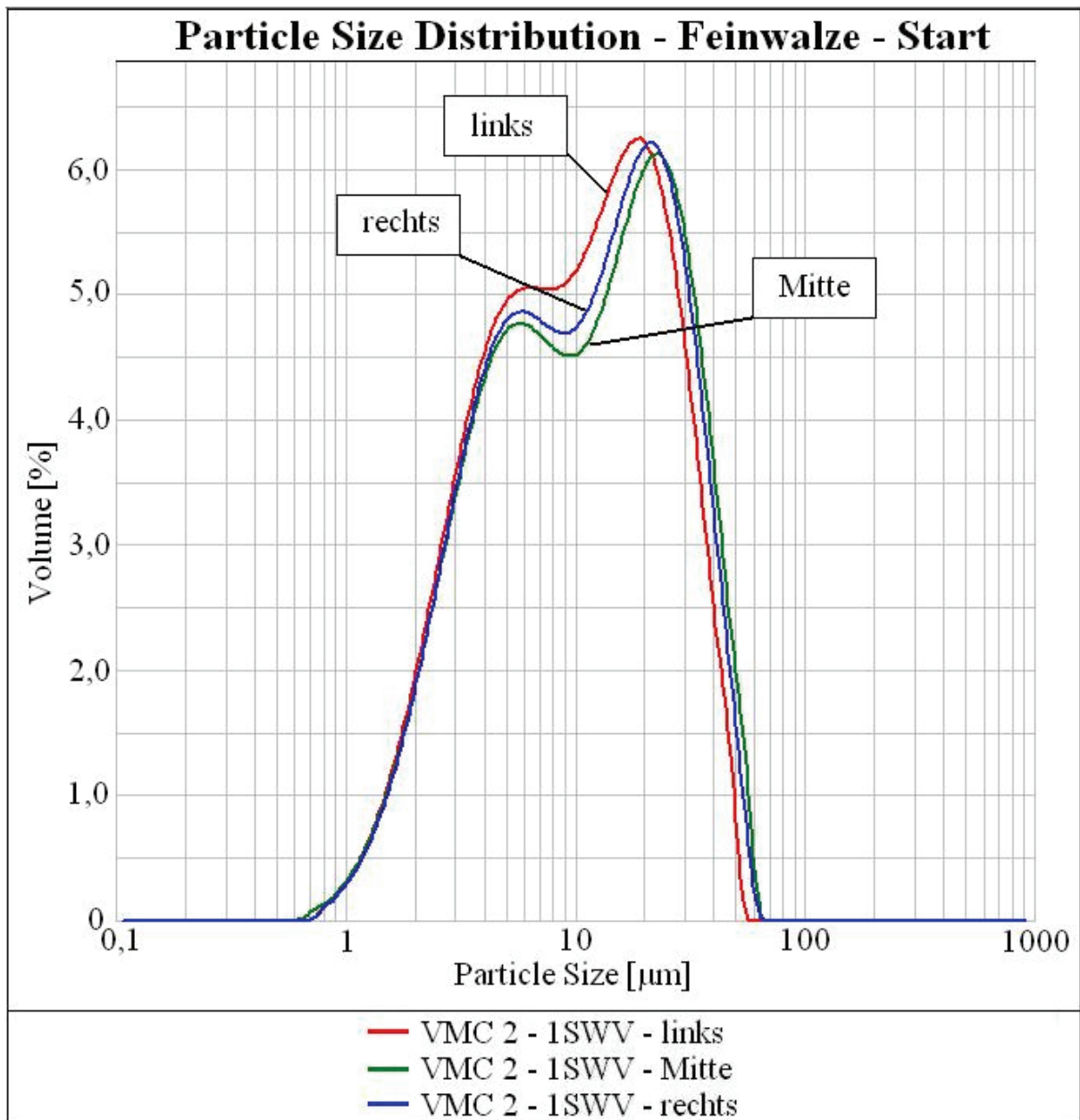


Abbildung 129: VMC 2 – Feinwalze im 1SWV – Start

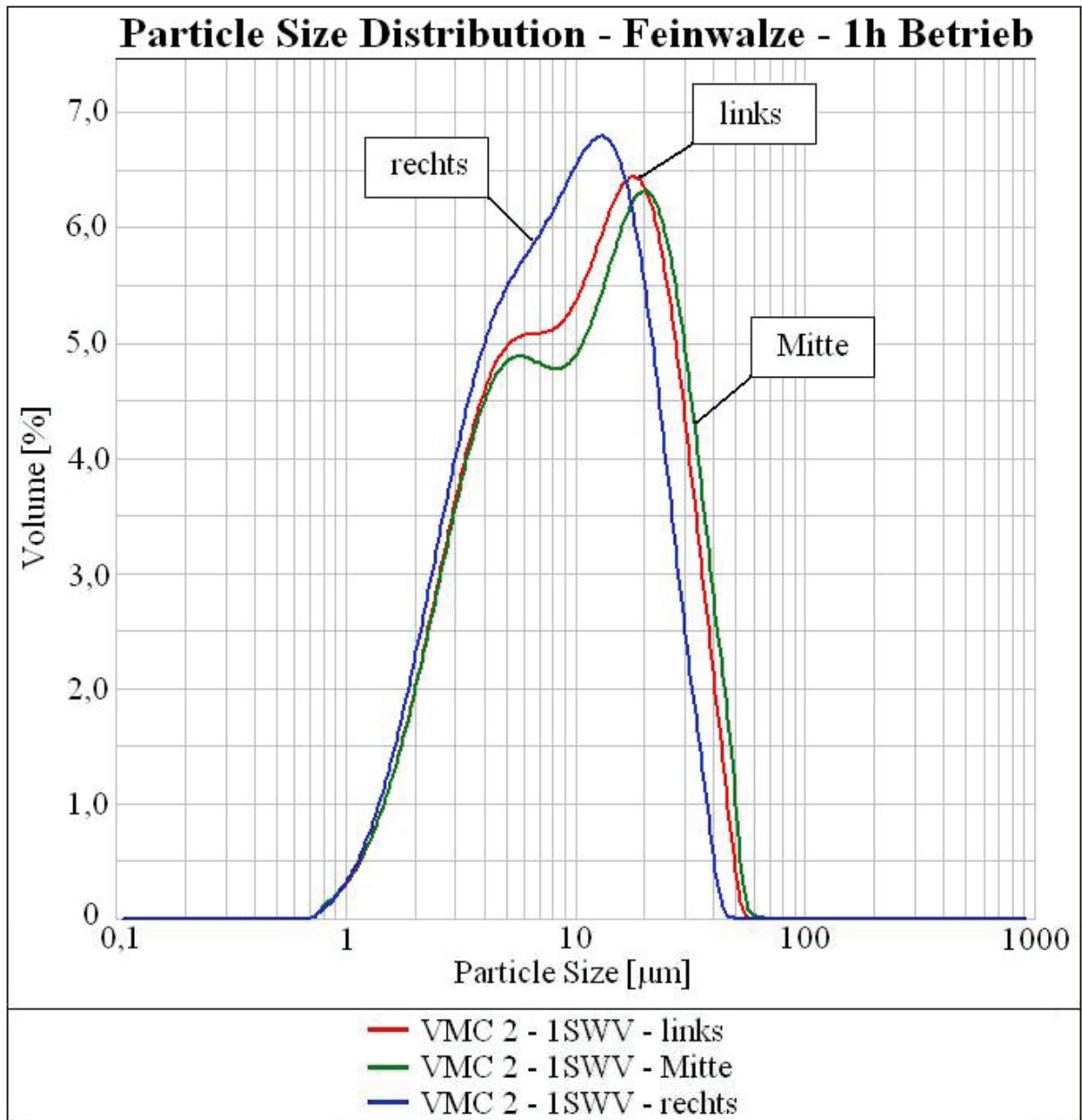


Abbildung 130: VMC 2 – Feinwalze im 1SWV – 1h Betrieb

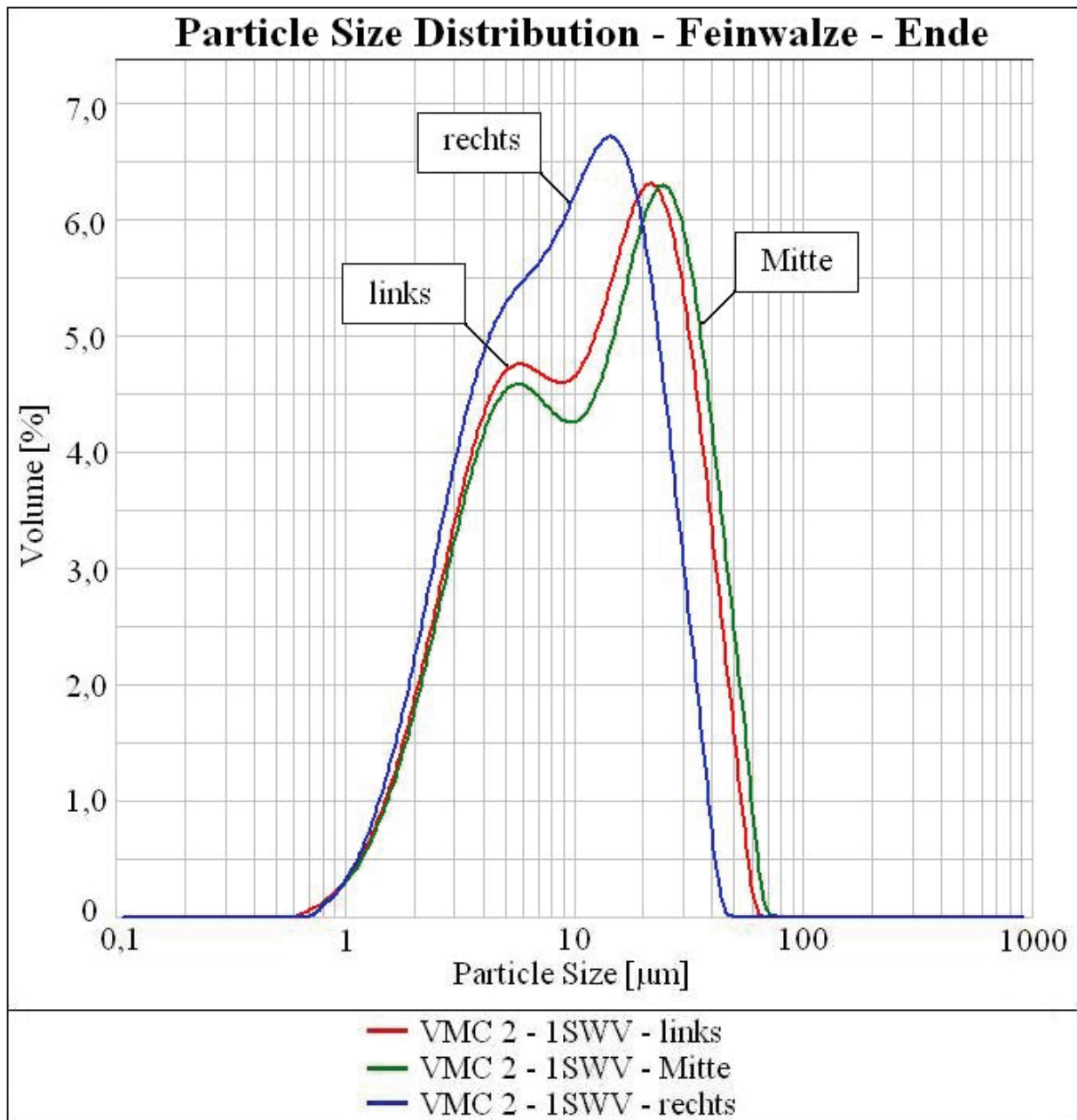


Abbildung 131: VMC 2 – Feinwalze im 1SWV – Ende

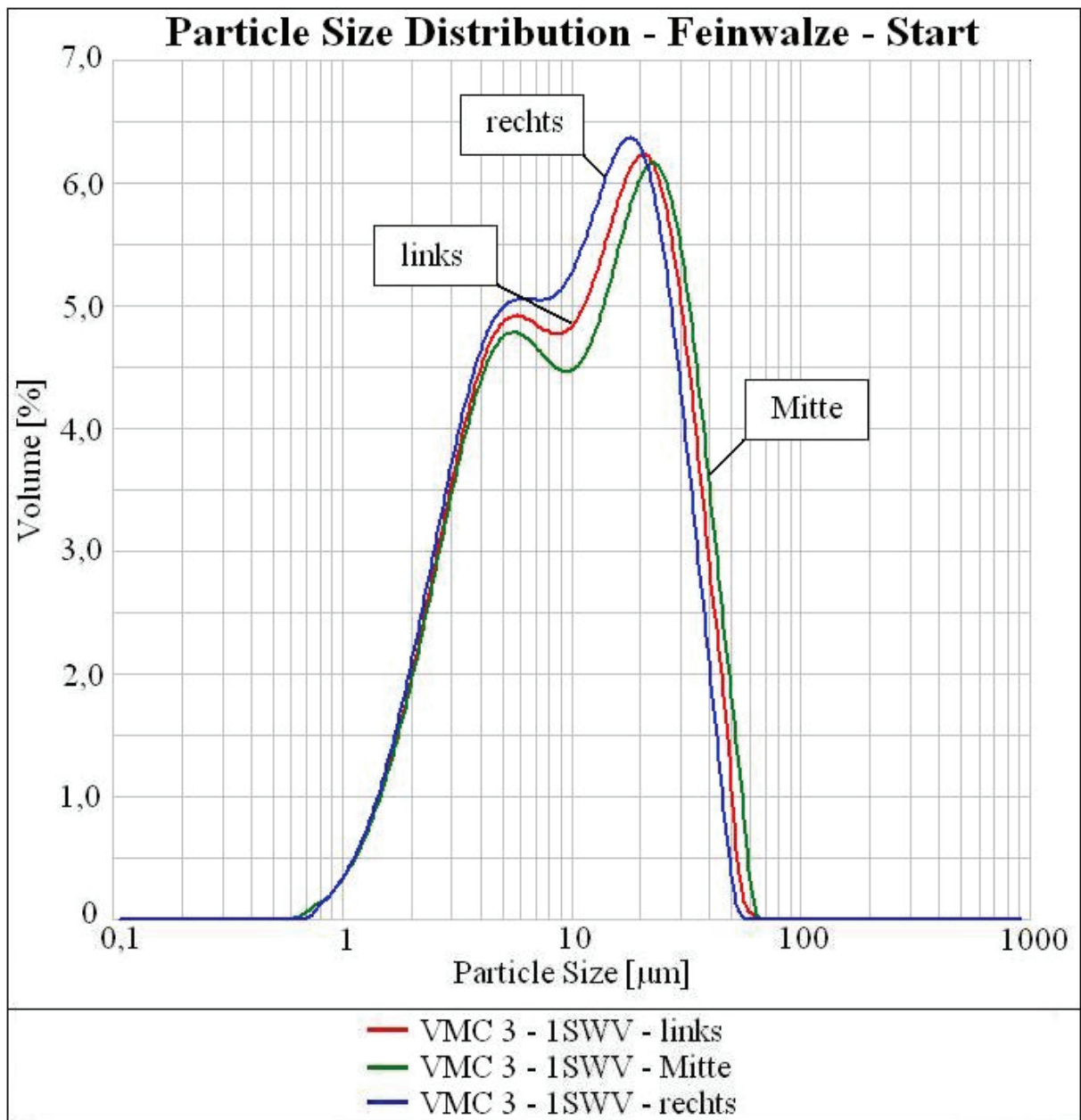


Abbildung 132: VMC 3 – Feinwalze im 1SWV – Start

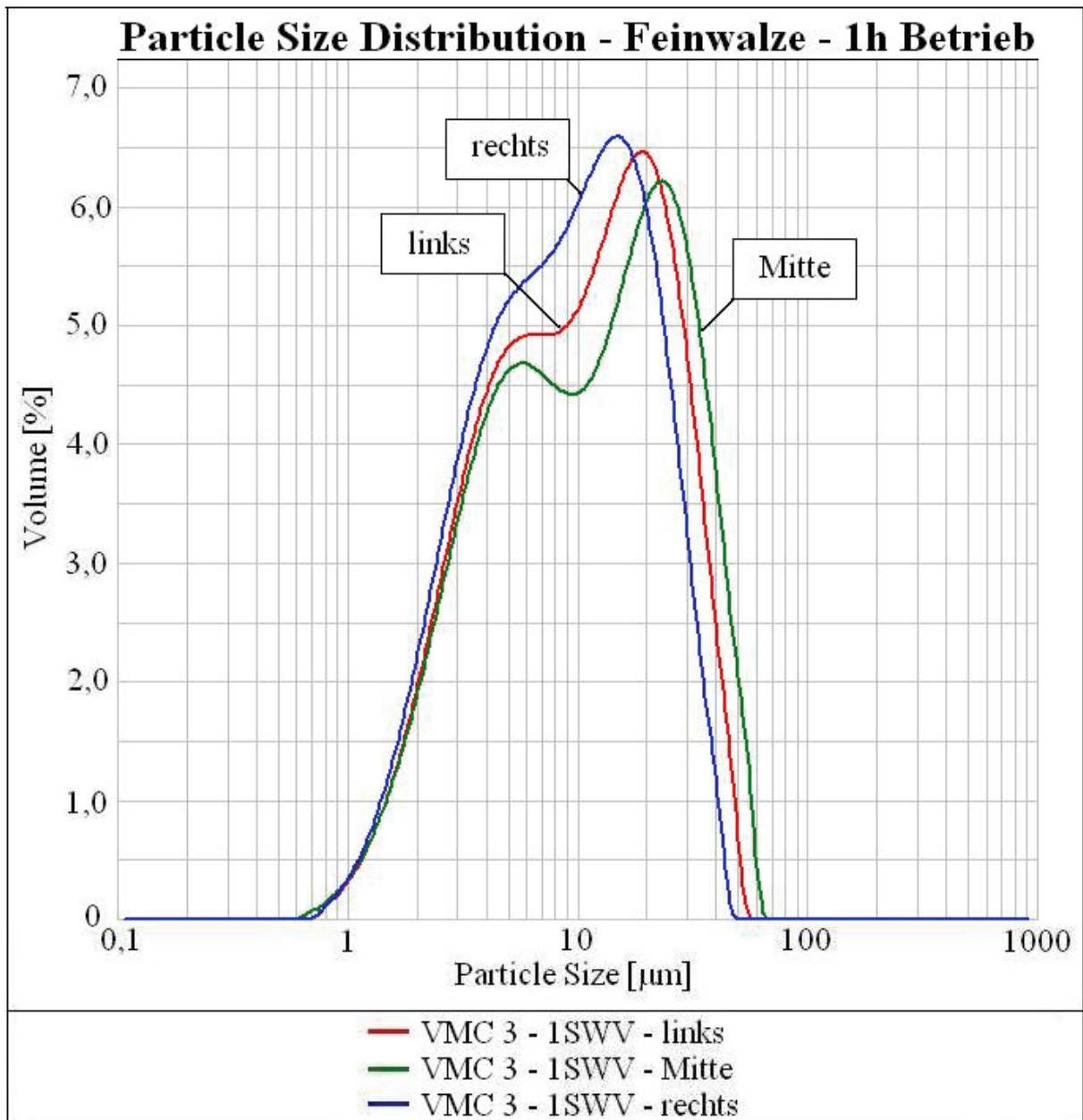


Abbildung 133: VMC 3 – Feinwalze im 1SWV – 1h Betrieb

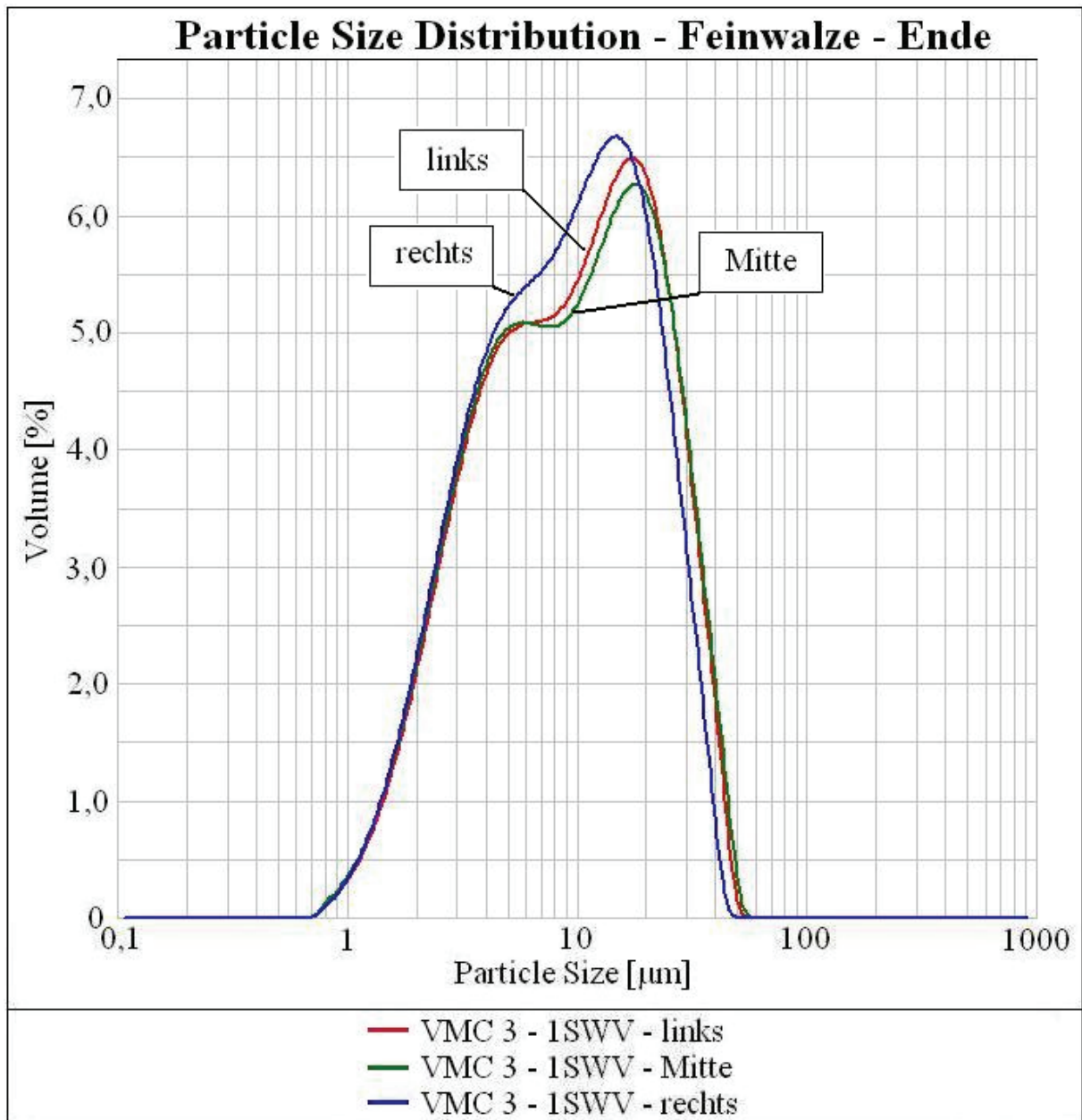


Abbildung 134: VMC 3 – Feinwalze im 1SWV – Ende

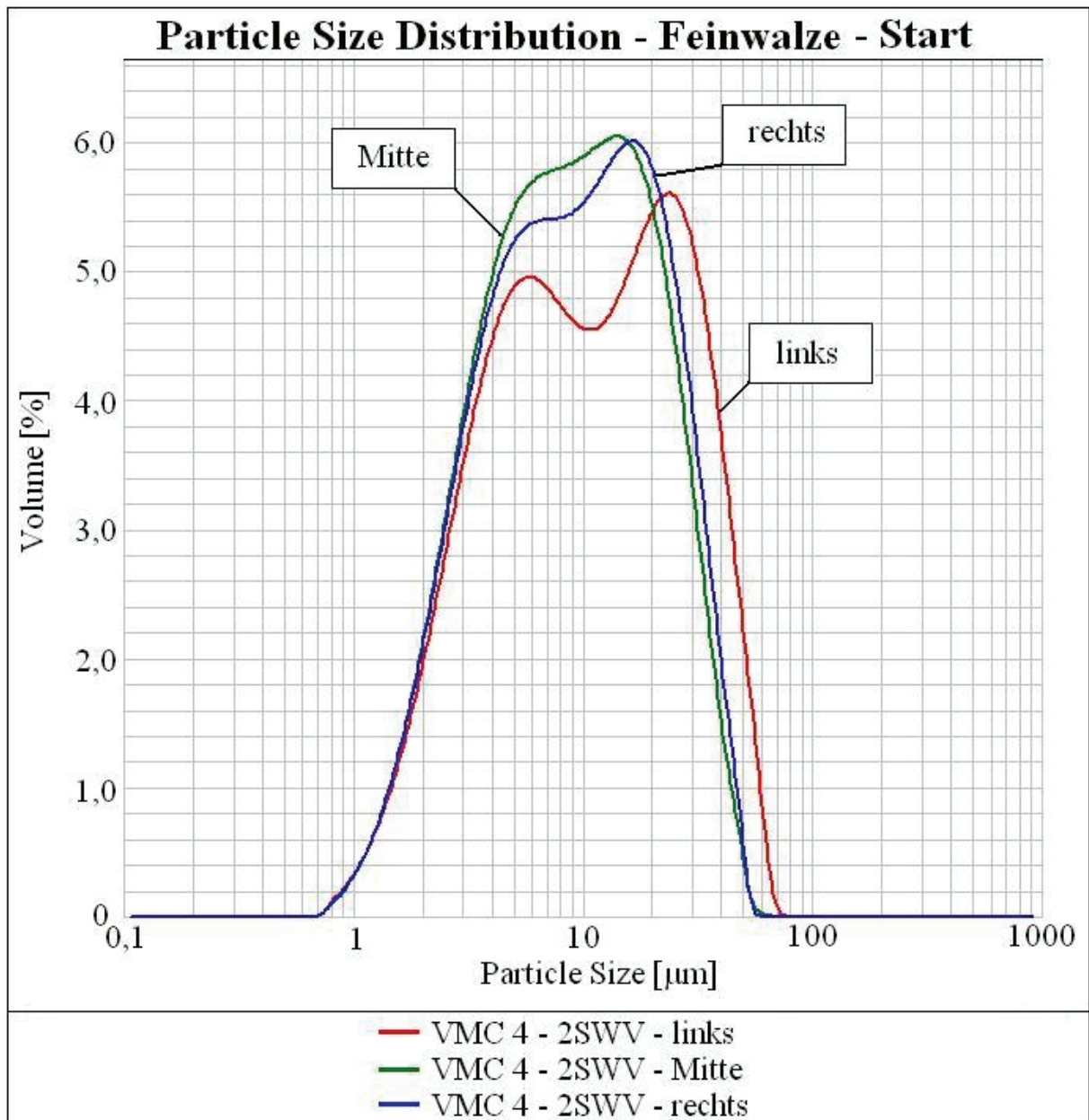


Abbildung 135: VMC 4 – Feinwalze im 2SWV – Start

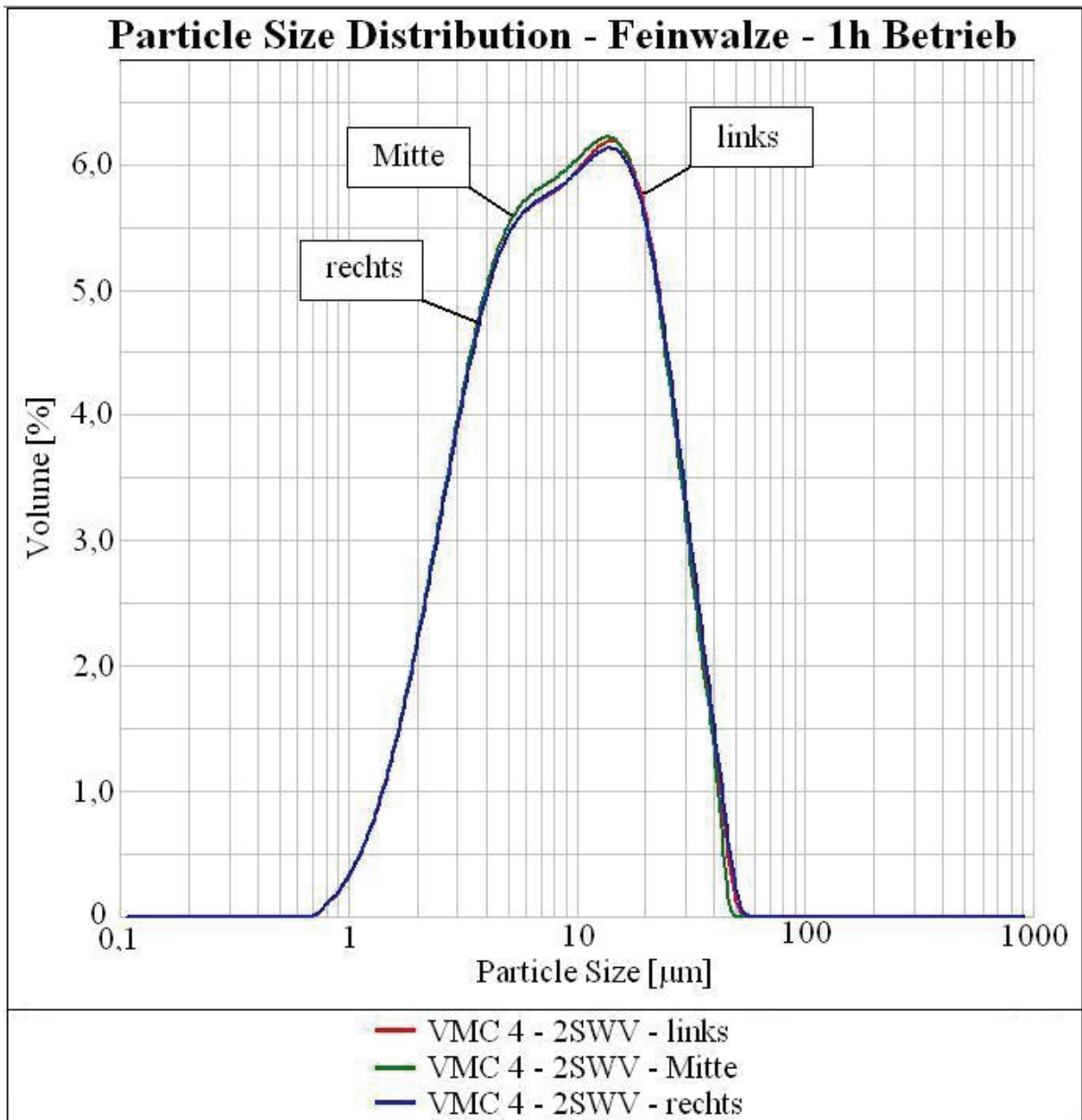


Abbildung 136: VMC 4 – Feinwalze im 2SWV – 1h Betrieb

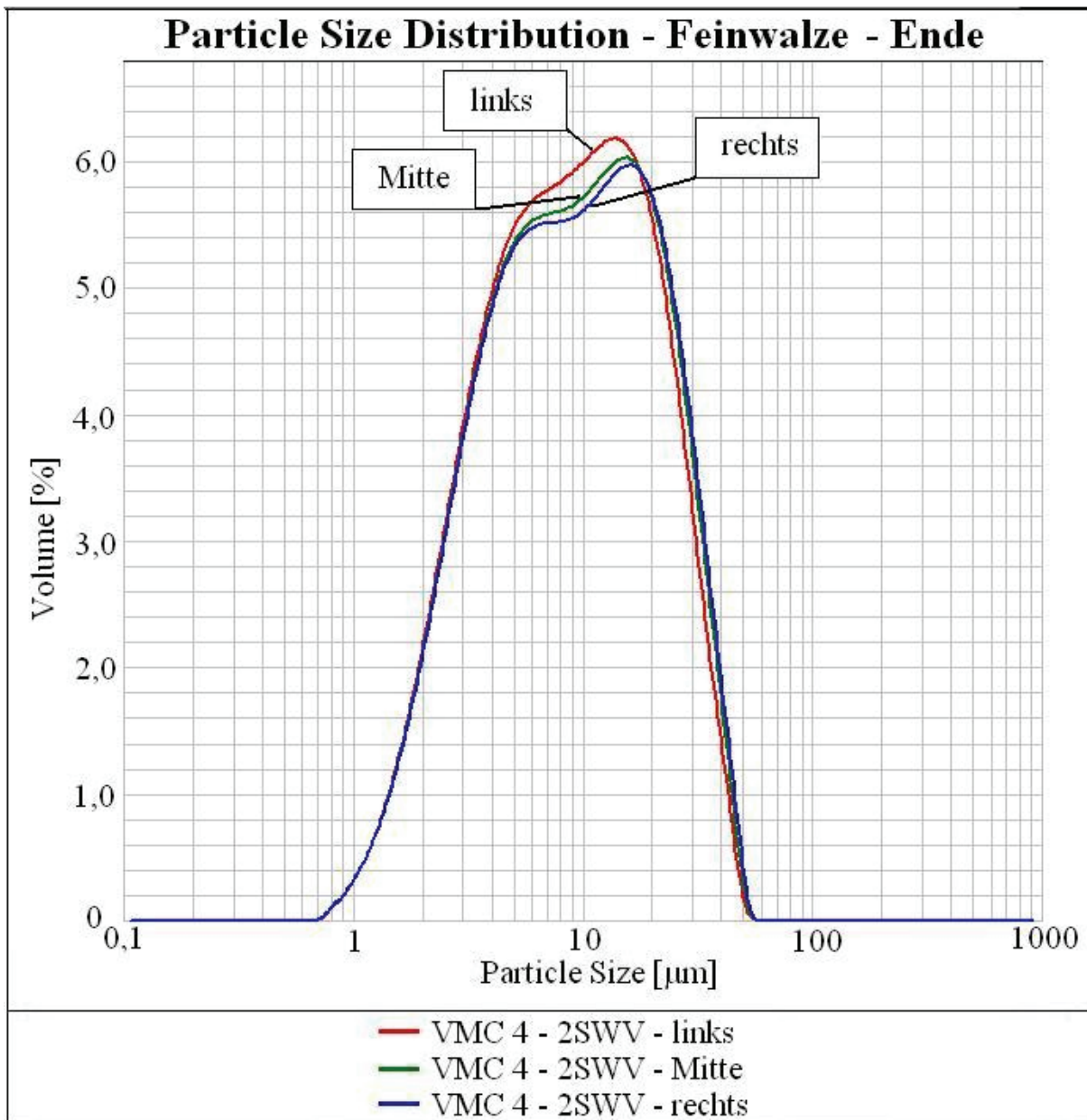


Abbildung 137: VMC 4 – Feinwalze im 2SWV – Ende

Tabelle 34: Werte der Parameter zur genaueren Beschreibung der Partikelverteilungen der Feinwalzwerke, VMC

Masse	Probe- nahmezeit	Probe- nahmeort	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
VMC 1	Start	links	0,764	2,988	12,469	37,562	70,265	25,081	2,773	0,852
		Mitte	0,658	2,937	13,027	42,318	80,233	28,984	3,023	0,854
		rechts	0,764	2,894	11,580	32,843	60,609	21,491	2,586	0,891
	1h Betrieb	links	0,658	2,873	11,890	37,347	70,416	25,153	2,899	0,889
		Mitte	0,658	2,987	13,643	44,328	82,253	30,509	3,030	0,835
		rechts	0,658	2,916	11,798	35,283	62,672	23,364	2,743	0,884
1SWV	Ende	links	0,658	2,978	13,405	42,884	80,444	29,577	2,977	0,840
		Mitte	0,764	3,185	17,497	56,182	96,435	38,836	3,029	0,747
		rechts	0,658	2,979	12,331	36,323	67,111	23,994	2,704	0,861
	Start	links	0,764	2,766	10,244	29,613	52,586	18,906	2,621	0,951
		Mitte	0,659	2,811	11,337	34,376	61,156	22,863	2,784	0,914
		rechts	0,764	2,841	11,058	32,714	60,769	21,544	2,702	0,911
VMC 2	1h Betrieb	links	0,764	2,750	10,074	28,208	52,177	18,049	2,527	0,960
		Mitte	0,764	2,754	10,601	30,686	57,998	20,128	2,635	0,943
		rechts	0,765	2,601	8,554	22,512	43,874	13,060	2,328	1,050
	Ende	links	0,658	2,813	11,262	32,917	60,728	21,831	2,673	0,917
		Mitte	0,764	2,899	12,324	36,721	67,705	24,719	2,744	0,872
		rechts	0,764	2,632	8,964	23,827	44,298	14,484	2,364	1,030

Tabelle 34: Werte der Parameter zur genaueren Beschreibung der Partikelverteilungen der Feinwalzwerke, VMC (Fortsetzung)

Masse	Probe- nahmezeit	Probe- nahmeort	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
VMC 3	Start	links	0,764	2,745	10,560	31,061	59,780	20,756	2,681	0,946
		Mitte	0,659	2,765	11,142	33,788	61,036	22,878	2,784	0,928
		rechts	0,764	2,679	9,881	28,029	52,016	18,215	2,566	0,982
	1h Betrieb	links	0,764	2,768	10,517	29,516	52,518	19,214	2,543	0,943
		Mitte	0,658	2,789	11,547	34,702	61,175	23,426	2,764	0,914
		rechts	0,764	2,619	9,082	24,625	45,119	14,969	2,423	1,030
1SWV	Ende	links	0,764	2,681	9,798	27,205	50,127	17,480	2,503	0,985
		Mitte	0,764	2,625	9,640	27,814	51,980	18,054	2,613	1,000
		rechts	0,764	2,610	9,015	24,123	44,655	14,854	2,386	1,030
	Start	links	0,764	2,756	10,706	35,505	69,133	23,791	3,059	0,932
		Mitte	0,764	2,665	8,842	25,871	58,122	14,133	2,625	1,020
		rechts	0,764	2,679	9,351	27,656	53,116	16,559	2,671	0,996
VMC 4	1h Betrieb	links	0,764	2,641	8,827	25,269	50,192	14,256	2,564	1,030
		Mitte	0,764	2,619	8,658	24,614	45,174	13,780	2,540	1,040
		rechts	0,764	2,640	8,838	25,556	51,460	14,066	2,593	1,030
	Ende	links	0,764	2,650	8,793	25,214	51,280	13,953	2,566	1,030
		Mitte	0,764	2,669	9,081	26,615	51,851	15,561	2,637	1,010
		rechts	0,764	2,682	9,211	27,277	52,270	16,183	2,670	1,000
2SWV	Start	links	0,764	2,641	8,827	25,269	50,192	14,256	2,564	1,030
		Mitte	0,764	2,619	8,658	24,614	45,174	13,780	2,540	1,040
		rechts	0,764	2,640	8,838	25,556	51,460	14,066	2,593	1,030
	1h Betrieb	links	0,764	2,650	8,793	25,214	51,280	13,953	2,566	1,030
		Mitte	0,764	2,669	9,081	26,615	51,851	15,561	2,637	1,010
		rechts	0,764	2,682	9,211	27,277	52,270	16,183	2,670	1,000

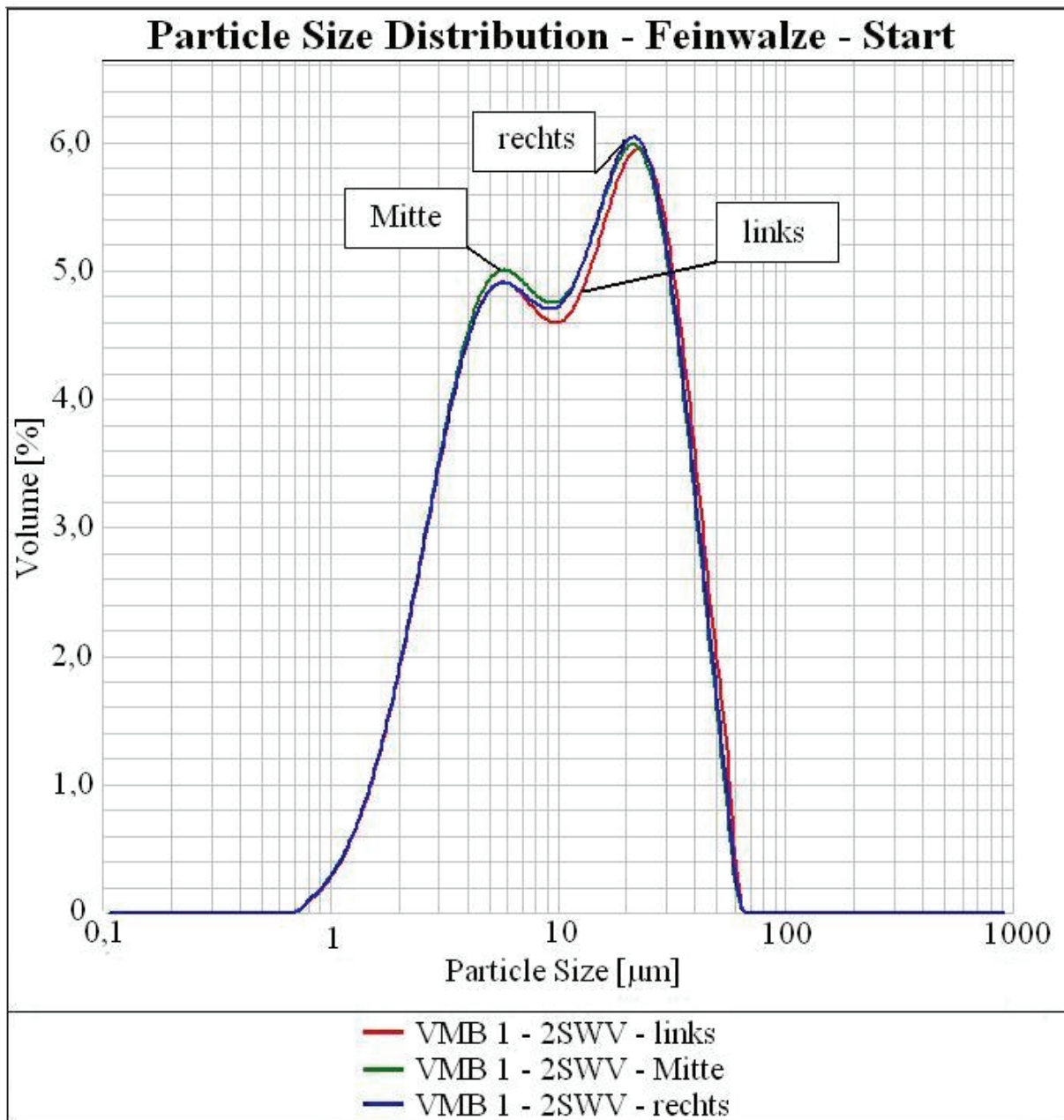


Abbildung 138: VMB 1 – Feinwalze im 2SWV – Start

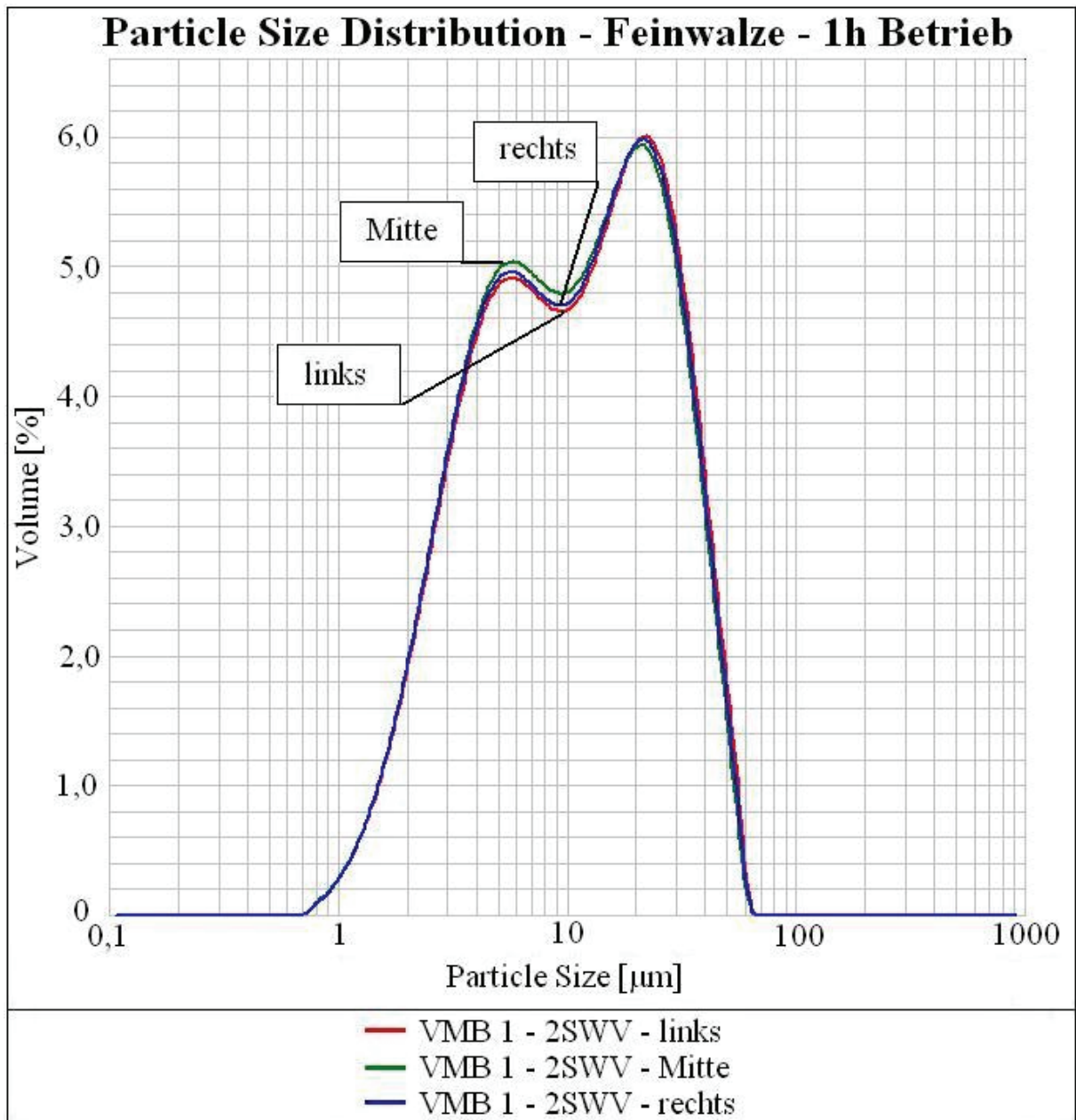


Abbildung 139: VMB 1 – Feinwalze im 2SWV – 1h Betrieb

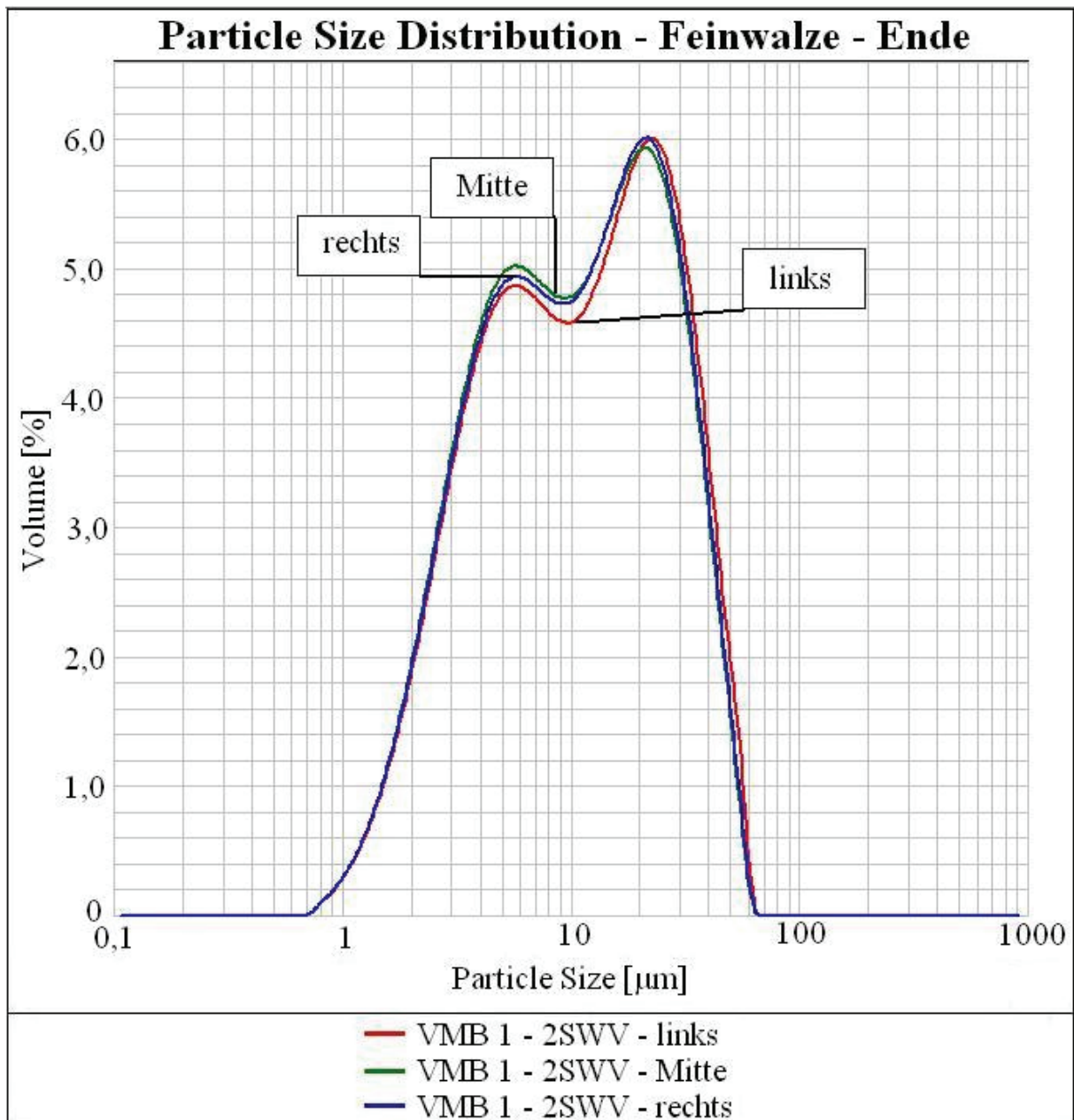


Abbildung 140: VMB 1 – Feinwalze im 2SWV – Ende

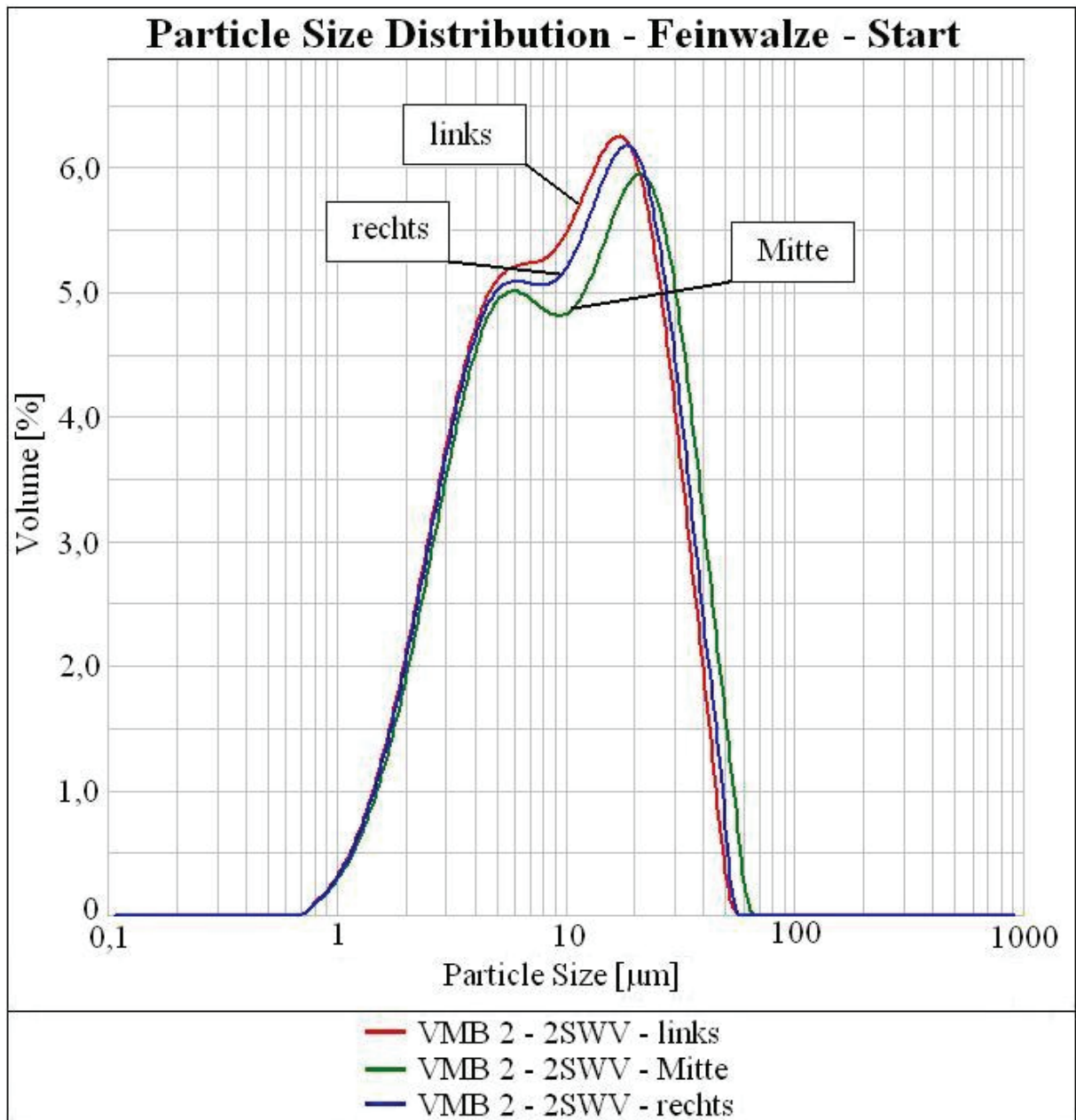


Abbildung 141: VMB 2 – Feinwalze im 2SWV – Start

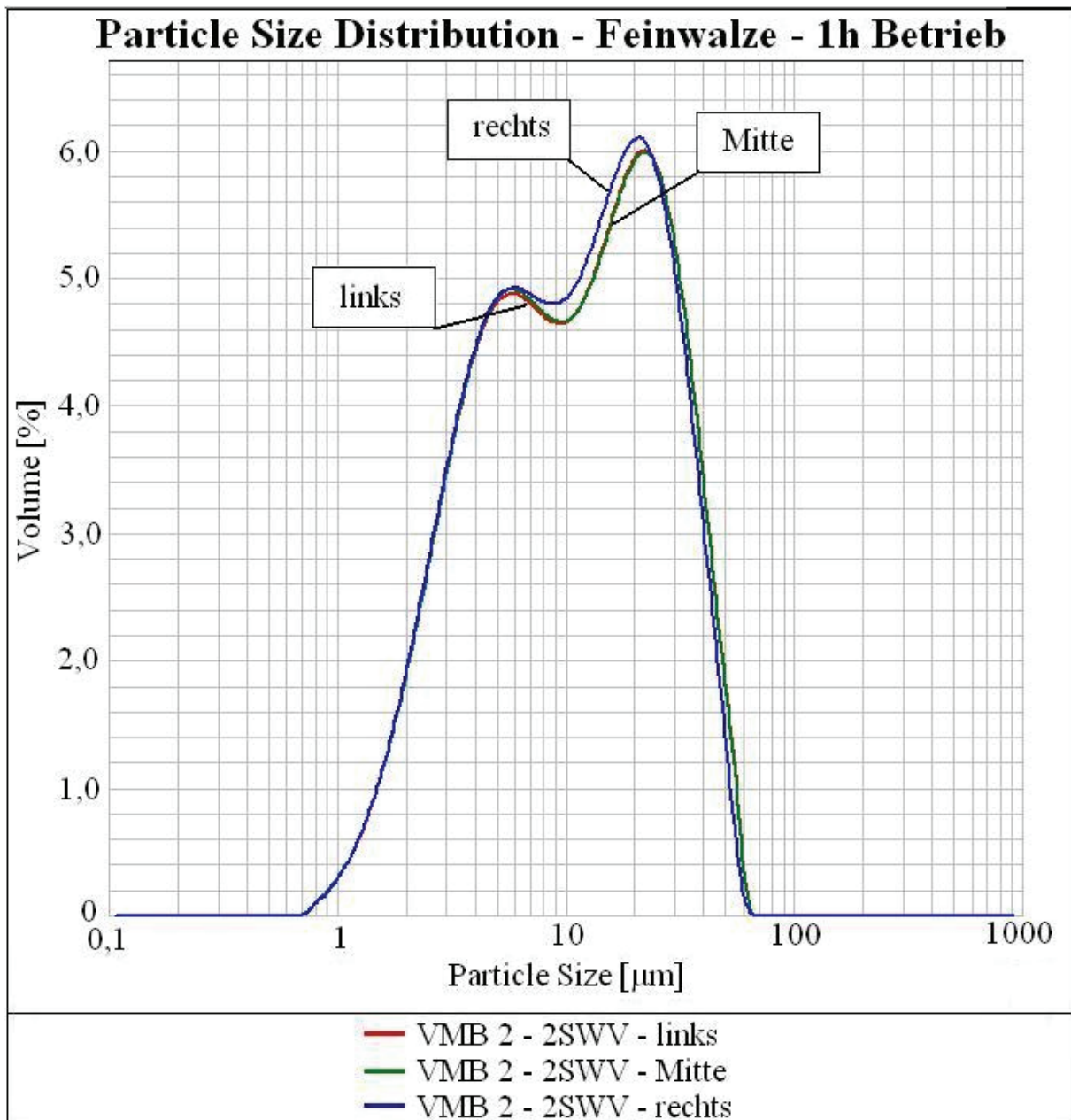


Abbildung 142: VMB 2 – Feinwalze im 2SWV – 1h Betrieb

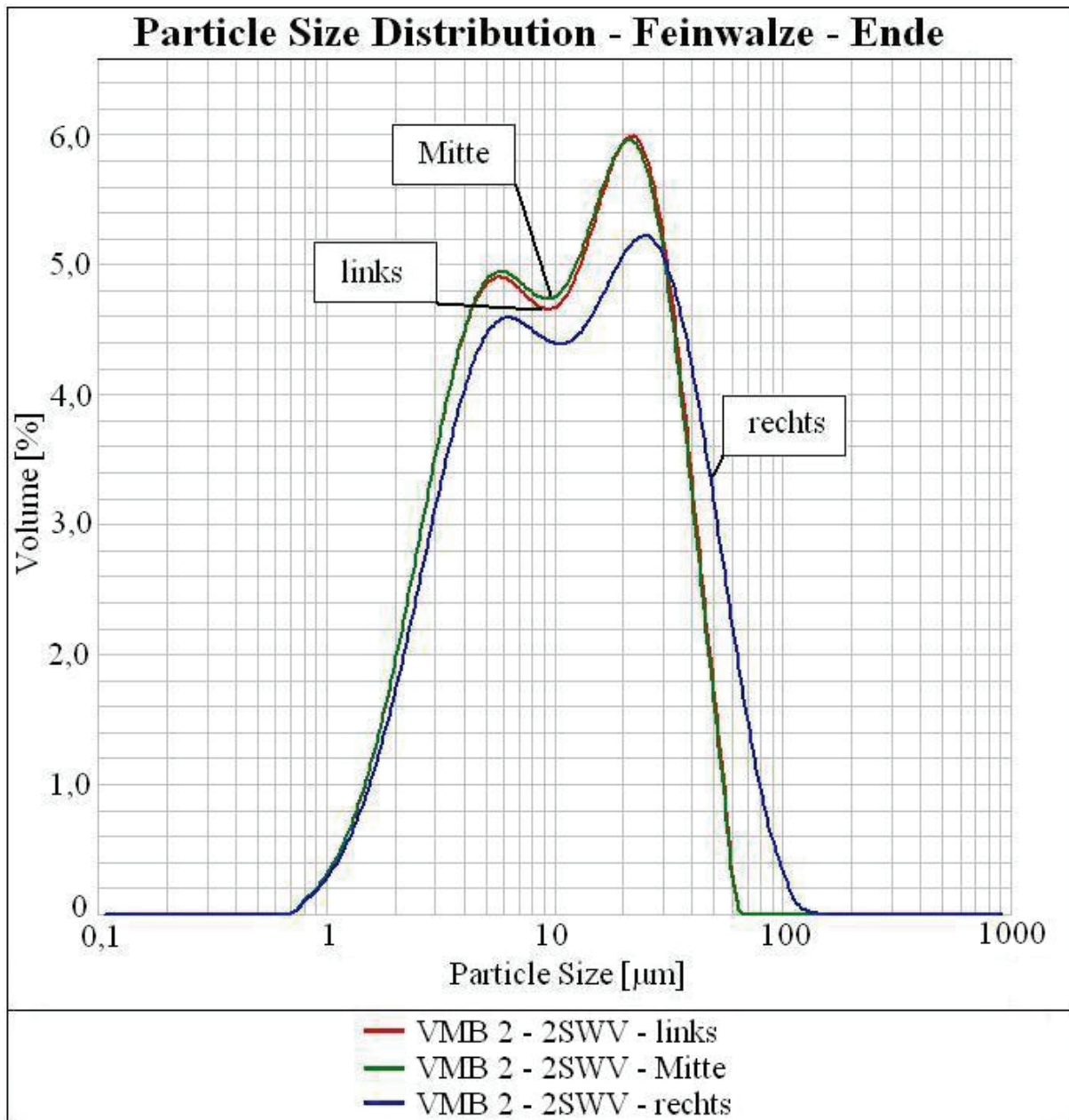


Abbildung 143: VMB 2 – Feinwalze im 2SWV – Ende

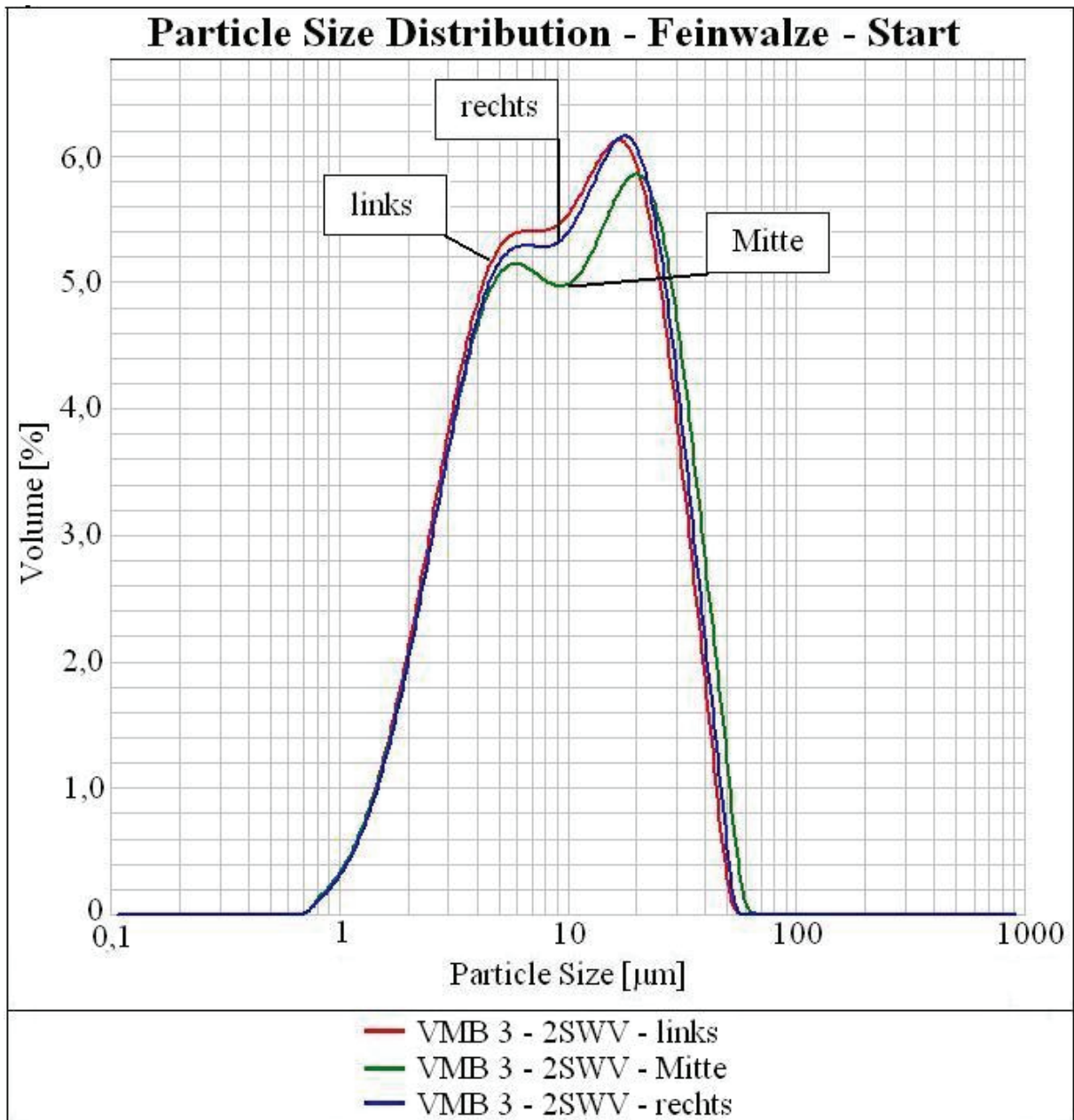


Abbildung 144: VMB 3 – Feinwalze im 2SWV – Start

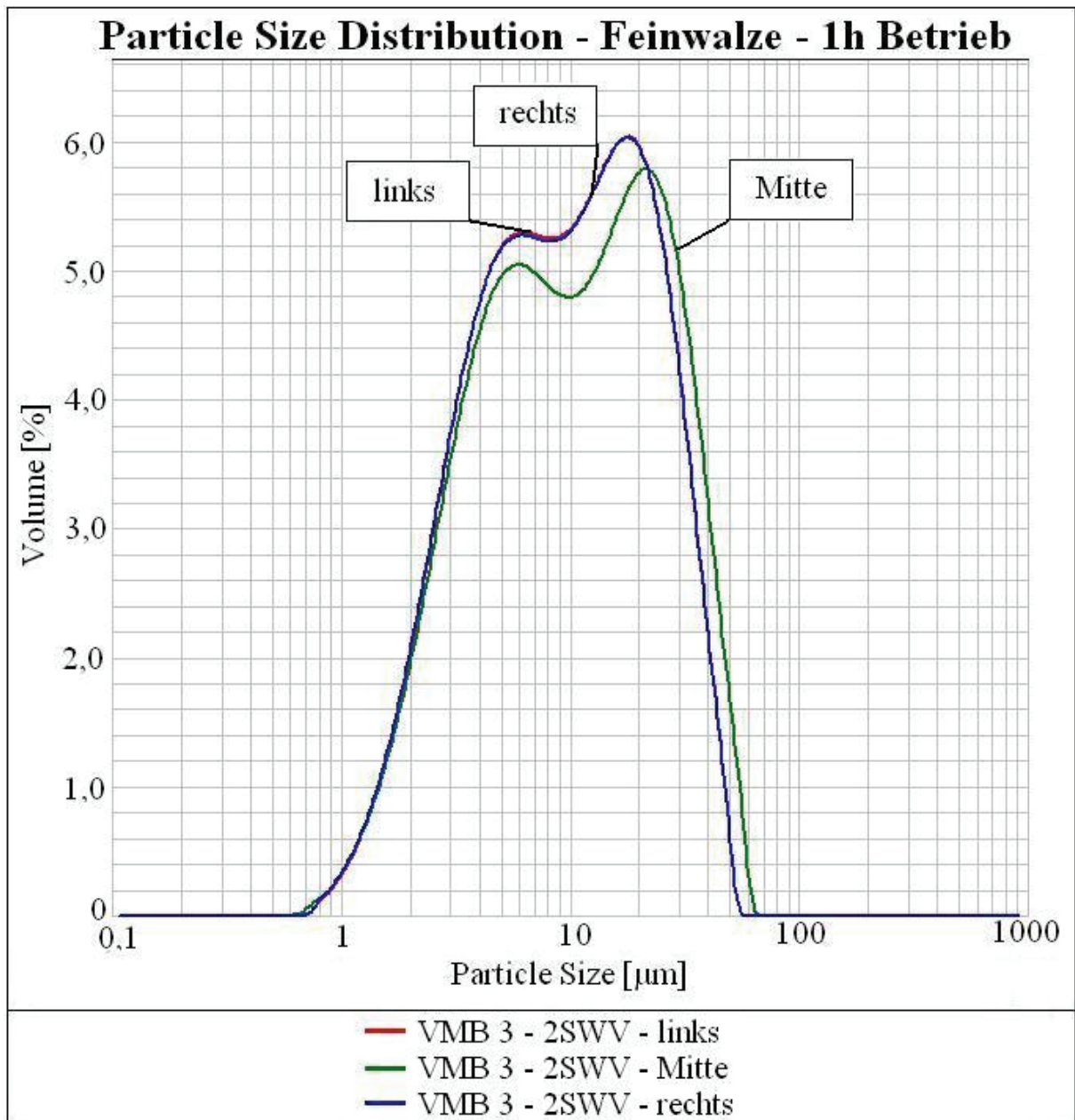


Abbildung 145: VMB 3 – Feinwalze im 2SWV – 1h Betrieb

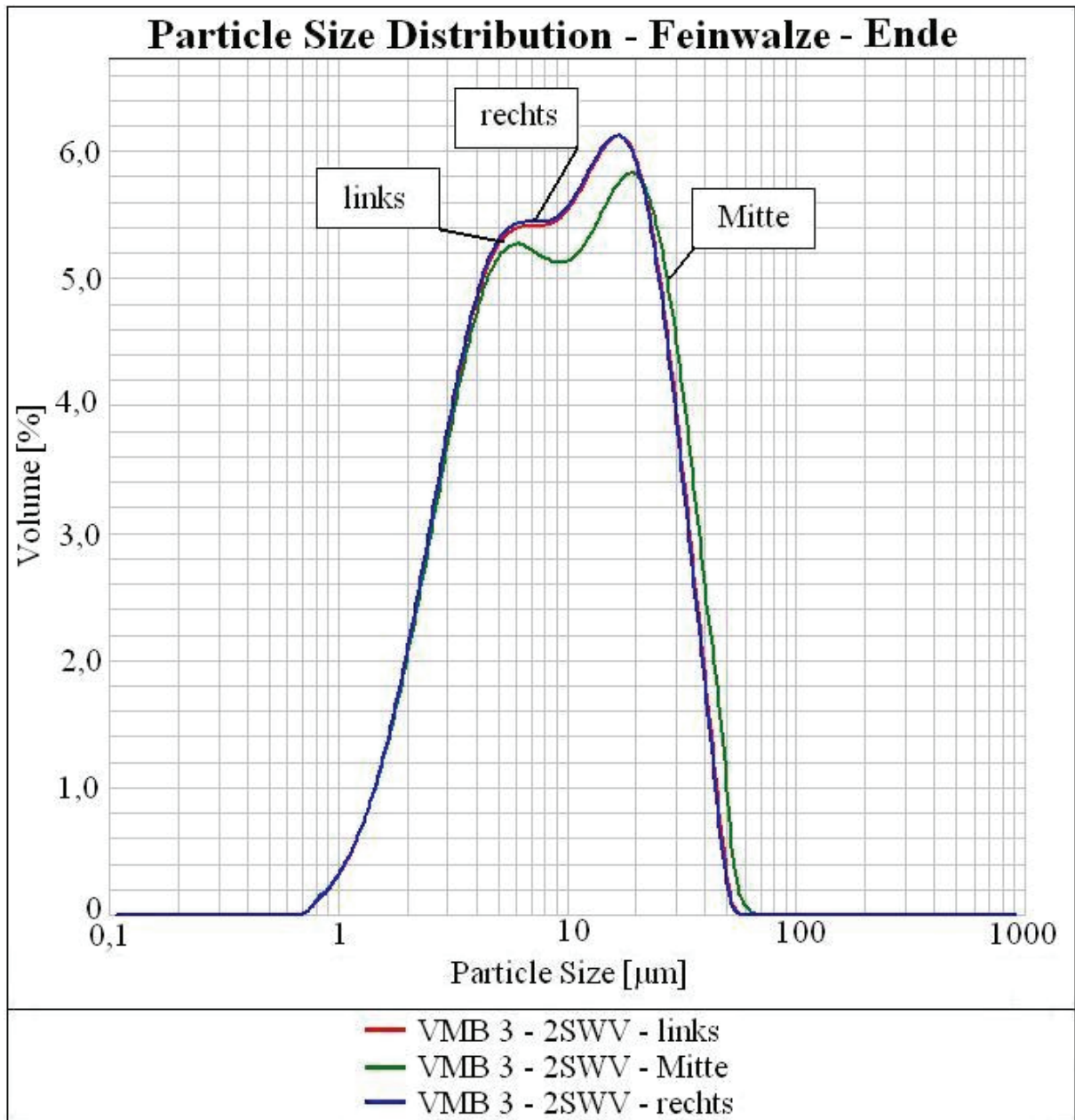


Abbildung 146: VMB 3 – Feinwalze im 2SWV – Ende

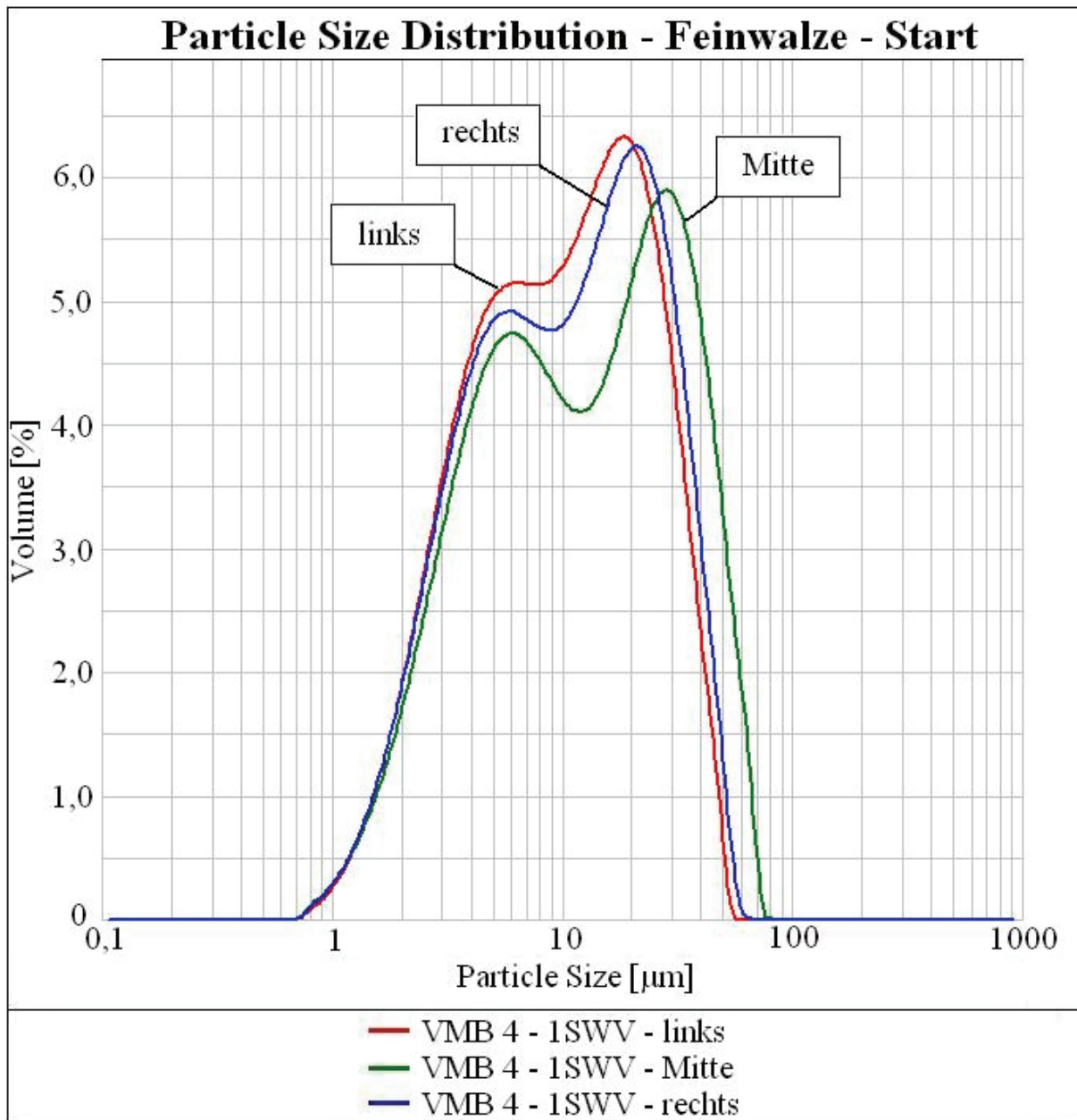


Abbildung 147: VMB 4 – Feinwalze im 1SWV – Start

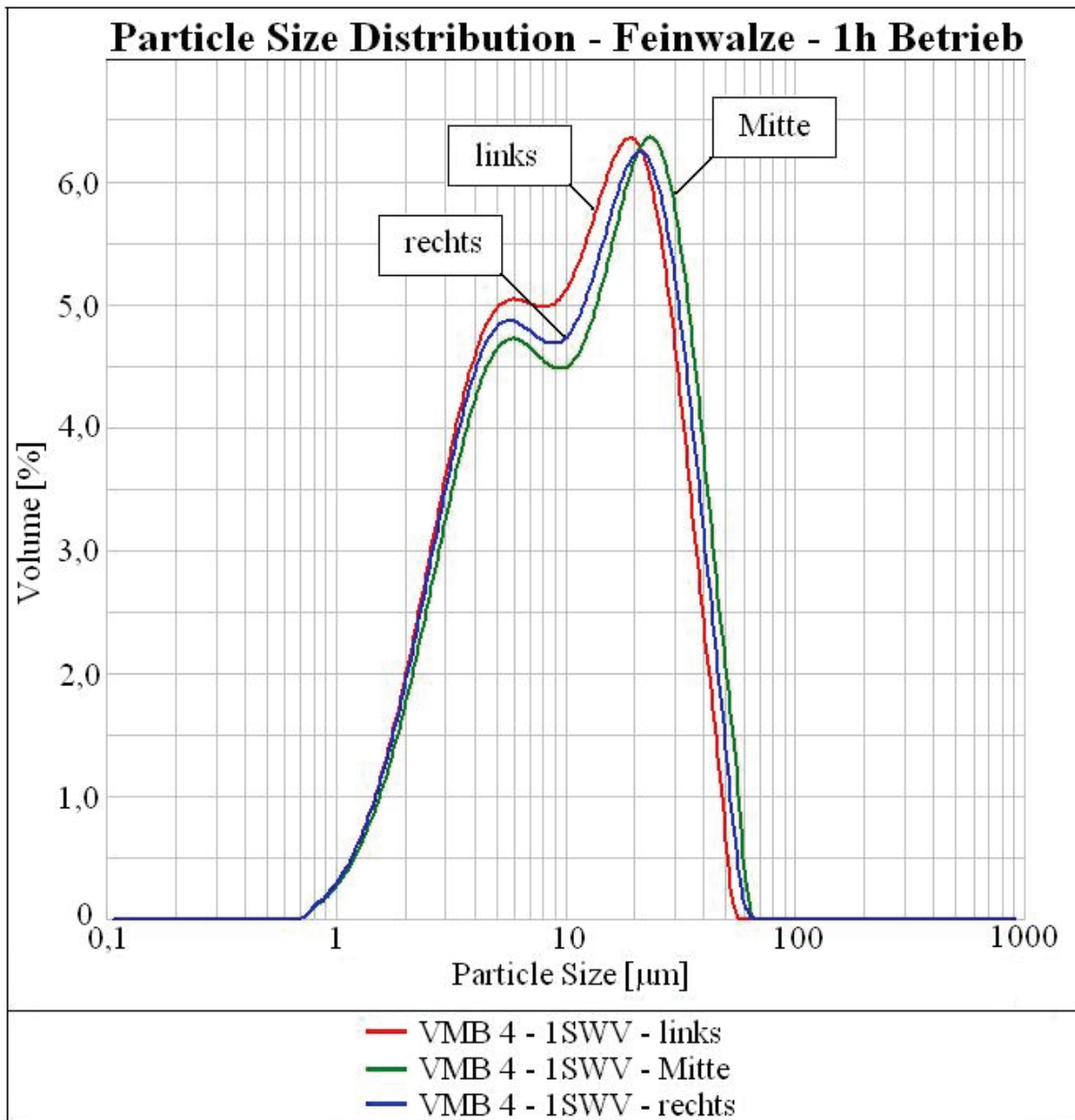


Abbildung 148: VMB 4 – Feinwalze im 1SWV – 1h Betrieb

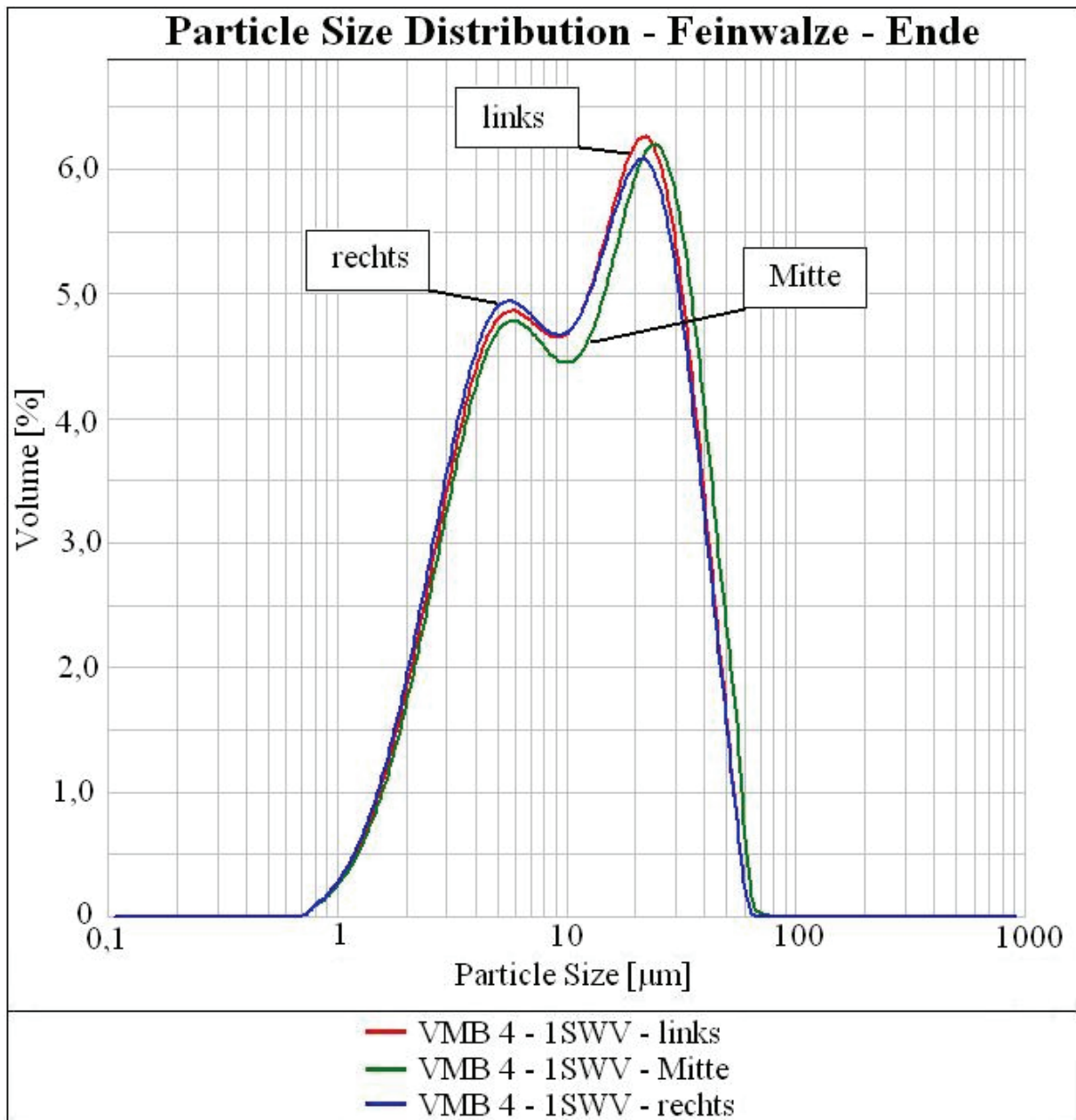


Abbildung 149: VMB 4 – Feinwalze im 1SWV – Ende

Tabelle 35: Werte der Parameter zur genaueren Beschreibung der Partikelverteilungen der Feinwalzwerke, VMB

Masse	Probe- nahmezeit	Probe- nahmeort	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
VMB 1 2SWV	Start	links	0,765	2,834	11,009	34,246	61,170	22,738	2,853	0,910
		Mitte	0,764	2,806	10,637	32,637	60,861	21,626	2,804	0,927
		rechts	0,764	2,815	10,869	33,048	60,983	21,725	2,782	0,919
	1h Be- trieb	links	0,765	2,819	10,903	33,475	61,076	22,110	2,812	0,916
		Mitte	0,764	2,784	10,461	32,269	60,766	21,265	2,819	0,936
		rechts	0,765	2,796	10,682	32,837	60,954	21,634	2,812	0,927
	Ende	links	0,764	2,826	11,097	34,222	61,163	22,728	2,829	0,911
		Mitte	0,764	2,776	10,485	32,383	60,814	21,371	2,824	0,937
		rechts	0,764	2,793	10,731	32,766	60,912	21,581	2,793	0,928
VMB 2 2SWV	Start	links	0,764	2,686	9,612	27,523	52,004	17,157	2,584	0,987
		Mitte	0,764	2,811	10,609	32,570	60,902	21,335	2,805	0,926
		rechts	0,764	2,722	9,979	29,148	52,541	18,675	2,648	0,966
	1h Be- trieb	links	0,764	2,809	10,957	33,626	61,098	22,223	2,812	0,918
		Mitte	0,764	2,806	10,893	33,555	61,083	22,283	2,823	0,920
		rechts	0,764	2,793	10,691	31,986	60,348	20,940	2,731	0,929
	Ende	links	0,764	2,780	10,791	33,222	61,027	21,997	2,821	0,928
		Mitte	0,764	2,773	10,652	32,789	60,969	21,503	2,818	0,934
		rechts	0,764	2,944	12,445	44,517	124,318	24,999	3,340	0,850

Tabelle 35: Werte der Parameter zur genaueren Beschreibung der Partikelverteilungen der Feinwalzwerke, VMB (Fortsetzung)

Masse	Probe- nahmezeit	Probe- nahmeort	d(0,001) [μm]	d(0,1) [μm]	d(0,5) [μm]	d(0,9) [μm]	d(0,999) [μm]	Mode [μm]	Span	SSA [m^2/g]
VMB 3 2SWV	Start	links	0,764	2,709	9,597	28,424	52,457	18,035	2,680	0,982
		Mitte	0,661	2,743	10,371	32,776	61,009	21,662	2,896	0,950
		rechts	0,7764	2,684	9,562	28,380	52,452	18,015	2,687	0,989
	1h Be- trieb	links	0,764	2,682	9,314	27,076	51,670	16,801	2,619	0,998
		Mitte	0,764	2,715	9,988	30,888	59,585	20,052	2,821	0,965
		rechts	0,764	2,745	9,731	28,290	52,389	17,888	2,625	0,970
Ende	links	0,764	2,701	9,372	27,239	51,879	16,892	2,618	0,992	
	Mitte	0,764	2,719	9,741	30,003	60,171	19,222	2,801	0,973	
	rechts	0,764	2,687	9,266	26,899	51,452	16,673	2,613	0,999	
VMB 4 2SWV	Start	links	0,765	2,820	10,191	29,030	52,504	18,670	2,572	0,939
		Mitte	0,764	2,943	12,355	40,693	72,422	28,610	3,055	0,858
		rechts	0,764	2,818	10,826	31,765	59,345	21,173	2,674	0,922
	1h Be- trieb	links	0,764	2,770	10,263	29,329	52,498	19,260	2,588	0,949
		Mitte	0,764	2,923	11,884	34,790	61,148	23,537	2,682	0,876
		rechts	0,764	2,798	10,891	32,137	59,964	21,419	2,694	0,924
Ende	links	0,765	2,871	11,196	32,998	60,753	22,056	2,691	0,901	
	Mitte	0,765	2,958	11,908	35,923	67,064	24,416	2,768	0,867	
	rechts	0,765	2,801	10,750	32,606	60,760	21,675	2,772	0,925	

Anhang 9 – Tabelle zur Rheologie von VMC und VMB

Tabelle 36: Mittelwerte der gemessenen Schubspannung und Casson Viskosität der Abschnitte mit konstanter Scherrate

Scherrate s ⁻¹	gemessene Schubspannung [Pa]				Casson Viskosität η_{CA} [Pa*s] in Bereichen konstanter Scherrate			
	VMC 1	VMC 2	VMC 3	VMC 4	VMC 1	VMC 2	VMC 3	VMC 4
	1SWV				1SWV			
5	45,64	40,99	53,35	35,55	9,13	8,20	10,67	7,11
20	96,75	87,75	106,03	77,93	4,84	4,39	5,30	3,90
40	160,62	145,92	170,53	130,92	4,02	3,65	4,26	3,27
60	220,14	200,42	230,22	182,71	3,67	3,34	3,84	3,05
	VMB 1	VMB 2	VMB 3	VMB 4	VMB 1	VMB 2	VMB 3	VMB 4
	2SWV				2SWV			
5	32,71	32,28	39,92	40,90	6,54	6,46	7,98	8,18
20	74,46	76,27	91,09	95,34	3,72	3,81	4,56	4,77
40	127,08	132,47	154,97	164,62	3,18	3,31	3,87	4,12
60	177,32	186,34	212,08	228,68	2,96	3,11	3,54	3,81

Erklärung über die selbstständige Anfertigung der Arbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel und Quellen angefertigt habe.

Datum:

Unterschrift: