

Justus-Liebig-Universität Gießen  
Fachbereich 09  
Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und  
Umweltmanagement

Institut für Ernährungswissenschaft  
Professur für Lebensmittelwissenschaften

Masterarbeit

Der Einfluss von Enzymen auf die physikalischen und  
sensorischen Eigenschaften bei Herstellung einer  
Hafermilch

Die wissenschaftliche Betreuung erfolgte durch:

Prof. Dr. Gertrud Morlock

Zweitbetreuer: Prof. Dr. Thomas Vilgis

Eingereicht von:

Jana Reeh (cand. M. Sc.)

Februar 2022

Danksagung

Danksagung

Mein Dank geht an Prof. Dr. Gertrud Morlock für die Möglichkeit einer experimentellen Masterarbeit am Fachbereich Lebensmittelwissenschaften in Gießen.

Die praktische Arbeit der vorliegenden Masterthesis entstand im Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz. Ich möchte mich herzlich für die Möglichkeit der Durchführung bedanken.

Mein Dank geht auch an meinen Zweitbetreuer Prof. Dr. Thomas Vilgis vom Max-Planck-Institut für Polymerforschung. Ich möchte mich für die Betreuung und Begutachtung meiner Masterarbeit, für die hilfreichen Anregungen und die Kritik, sowie die wissenschaftliche Unterstützung während der Rezeptentwicklung bedanken.

Auch möchte ich mich bei Judith Hege bedanken. Danke, dass du immer ein offenes Ohr hattest und für deine Unterstützung und deinen Rat.

Vielen Dank an das gesamte Food Science Team am Max-Planck-Institut für Polymerforschung, für die Unterstützung und Hilfsbereitschaft.

Ein großes Dankeschön geht auch an meine Laborpartnerin Antonia Schlichting, für die super Zusammenarbeit und Unterstützung. Ohne dich wären wir wahrscheinlich nicht ans Ziel gekommen und hätten am Ende keine Rezeptur.

Vielen Dank auch an meine ganze Familie, die mir dieses Studium ermöglicht haben.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis .....	VII
1. Einleitung.....	1
1.1. Sensorik .....	1
1.2. Viskosität .....	2
1.3. Hafer.....	9
1.4. Stärke .....	10
1.4.1. Amylose .....	11
1.4.2. Amylopektin.....	11
1.4.3. Stärkeverkleisterung.....	12
1.5. $\beta$ -Glucan .....	13
1.6. Enzymbehandlung.....	14
1.7. Emulsion.....	22
1.8. Fragestellung.....	26
2. Ergebnisse und Diskussion .....	27
2.1. Stärkeverkleisterungstemperatur.....	27
2.2. Viskositätsmessung .....	32
2.2.1. Enzymatische Verflüssigung der Stärke.....	32
2.2.2. Enzymatische Verzuckerung der Stärke .....	37
2.2.3. Enzymatische Spaltung des $\beta$ -Glucans.....	45
2.2.4. Zugabe von Öl und Salz.....	52
3. Zusammenfassung .....	59
4. Experimenteller Teil.....	61
4.1. Material und Methodische Beschreibung der Zutaten .....	61
4.1.1. Geräte und Software .....	61
4.1.2. Charakterisierung der Rohmaterialien.....	63
4.1.3. Rezeptur – Herstellungsprozess .....	69
4.1.3.1. Stärkeverkleisterung .....	69
4.1.3.2. Verflüssigung .....	69
4.1.3.3. Verzuckerung.....	70

## Inhaltsverzeichnis

4.1.3.4. $\beta$ -Glucan .....	70
4.1.3.5. Zugabe Öl und Salz .....	71
4.1.4. Particle Size Analyzer .....	72
4.1.5. Viskositätsmessung mit Rheometer .....	73
4.1.5.1. Stärkeverkleisterung .....	73
4.1.5.2. Messungen der Proben nach enzymatischer Behandlung .....	73
4.2. Statistik .....	74
5. Sensorische Profilprüfung .....	75
6. Literatur .....	77
Anhang .....	80
Ehrenwörtliche Erklärung .....	108

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zwei-Platten-Modell, A: obere Platte, F: Scherkraft, v: resultierende Geschwindigkeit, h: Abstand obere zu unterer Platte[1].....	4
Abbildung 2: Konzentrisches Zylinder-Messsystem [1] .....	5
Abbildung 3: Viskositätsfunktionen, Funktionen: (1) idealviskoses, (2) scherverdünnendes, (3) scherverdickendes Verhalten, es gilt $\eta$ : Viskosität, $\gamma$ : Scherbelastung [1] .....	7
Abbildung 4: Drei Makromoleküle, links: Ruhezustand mit verknäulten und ineinander verschlauften Ketten, rechts: hohe Scherbelastung mit orientierten und teilweise entschlauften Ketten [1].....	8
Abbildung 5: Schematische Darstellung des $\beta$ -Glucan [10].....	9
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Stärkestruktur [14].....	11
Abbildung 7: Vergleich einer Stoffwechsellumsetzung in einem Energie-Zeit-Diagramm mit und ohne Enzym [20] .....	14
Abbildung 8: Hydrolytische Spaltung von Stärke durch Spaltung der $\alpha$ -1,4- und $\alpha$ -1,6- glycosidischen Bindungen [27].....	18
Abbildung 9: Die zwei einfachsten Arten von Emulsionen: Öl-in-Wasser (O/W) und Wasser-in-Öl (W/O) [30].....	23
Abbildung 10: Stärkeverkleisterungskurve, ganze Haferkörner in Wasser zerkleinert und durch ein 50 $\mu$ m Sieb gefiltert, Viskosität-Verlauf mit zunehmender Temperatur .....	28
Abbildung 11: Mittelwerte der Partikelgrößenverteilung der unbehandelten Proben bei 35 °C und 70 °C.....	29
Abbildung 12: Mittelwert der Viskosität mit Standardabweichung der Proben nach Verflüssigung mit VF .....	33
Abbildung 13: Mittelwert der Partikelgrößenverteilung der Haferproben nach enzymatischer Behandlung mit der Lebensmittelenzym-Zubereitung VF.....	34
Abbildung 14: Mittelwert der Viskosität mit Standardabweichung der Proben nach Verflüssigung mit VF und Verzuckerung mit VZ.....	37
Abbildung 15: Mittelwert der Partikelgrößenverteilung der Haferproben nach enzymatischer Behandlung mit der Lebensmittelenzymzubereitung VF und VZ.....	38
Abbildung 16: Vergleich der Viskosität der Probenmittelwerte. VF: Mittelwert der Proben nach Verflüssigung mit VF, VZ: Mittelwert der Proben nach zusätzlicher Verzuckerung mit VZ.....	41
Abbildung 17: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen der Probenmittelwerte. VF: Mittelwert der Proben nach Verflüssigung mit VF, VZ: Mittelwert der Proben nach zusätzlicher Verzuckerung mit VZ.....	42

Abbildung 18: Mittelwert der Viskosität mit Standardabweichung der Proben nach Verflüssigung mit VF, Verzuckerung mit VZ und Behandlung mit ET .....	45
Abbildung 19: Mittelwert der Partikelgrößenverteilung der Haferproben nach enzymatischer Behandlung mit den Lebensmittelenzymzubereitungen VF, VZ und ET .....	47
Abbildung 20: Vergleich der Viskosität der Probenmittelwerte. VZ: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF und VZ, ET: Mittelwert der Proben nach zusätzlicher Behandlung mit ET .....	49
Abbildung 21: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen der Probenmittelwerte. VZ: Mittelwert der Proben nach Verzuckerung mit VZ, ET: Mittelwert der Proben nach zusätzlicher Behandlung mit ET .....	50
Abbildung 22: Mittelwert der Viskosität mit Standardabweichung der Proben nach Verflüssigung mit VF, Verzuckerung mit VZ, Behandlung mit ET und Zugabe von Öl und Salz .....	53
Abbildung 23: Mittelwert der Partikelgrößenverteilung der Haferproben nach enzymatischer Behandlung mit den Lebensmittelenzymzubereitungen VF, VZ und ET und Zugabe von Öl und Salz.....	54
Abbildung 24: Vergleich der Viskosität der Probenmittelwerte. ET: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET, Öl: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET und Zugabe von Öl und Salz .....	55
Abbildung 25: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen der Probenmittelwerte. ET: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET, Öl: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET und Zugabe von Öl und Salz.....	57
Abbildung 26: Vergleich der Viskosität der Probenmittelwerte. VF: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF, VZ: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ, ET: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET, Öl: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET und Zugabe von Öl und Salz.....	106
Abbildung 27: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen der Probenmittelwerte. VF: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF, VZ: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ, ET: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET, Öl: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET und Zugabe von Öl und Salz .....	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Viskositäten der Probenmittelwerte. Überschneidung der Kurven zwischen einer Scherrate von $1,58 \text{ s}^{-1}$ auf $2,51 \text{ s}^{-1}$ .	56
Tabelle 2: Auflistung aller verwendeten Geräte und Software	61
Tabelle 3: Durchschnittliche Nährwertangaben pro 100g (Midsona Deutschland GmbH)	63
Tabelle 4: Durchschnittliche Nährwertangaben pro 100 ml (Rapso Österreich GmbH)	64
Tabelle 5: Durchschnittsanalyse für SCHLIESSMANN -VF- (C. Schliessmann Kellerei-Chemie GmbH & Co.KG)	66
Tabelle 6: Durchschnittsanalyse für SCHLIESSMANN -VZ- (C. Schliessmann Kellerei-Chemie GmbH & Co.KG)	67
Tabelle 7: Durchschnittsanalyse für SCHLIESSMANN -VZ- (C. Schliessmann Kellerei-Chemie GmbH & Co.KG)	68
Tabelle 8: Ergebnisse der einfach beschreibenden Prüfung	75
Tabelle 9: Messergebnisse Temperaturrampe Stärkeverkleisterung	80
Tabelle 10: Messergebnisse nach Verflüssigung der Stärke mit VF	84
Tabelle 11: Messergebnisse nach Verzuckerung der Stärke mit VZ	85
Tabelle 12: Messergebnisse nach Spaltung des $\beta$ -Glucan mit ET	85
Tabelle 13: Messergebnisse nach Öl- und Salzzugabe	86
Tabelle 14: Messergebnisse Particle Size Analyzer Haferstärke $35 \text{ }^\circ\text{C}$	87
Tabelle 15: Messergebnisse Particle Size Analyzer Haferstärke $70 \text{ }^\circ\text{C}$	90
Tabelle 16: Messergebnisse Particle Size Analyzer Enzymatische Verflüssigung der Stärke mit VF	93
Tabelle 17: Messergebnisse Particle Size Analyzer Enzymatische Verzuckerung der Stärke mit VZ	97
Tabelle 18: Messergebnisse Particle Size Analyzer Enzymatische Spaltung des $\beta$ -Glucan mit ET	100
Tabelle 19: Messergebnisse Particle Size Analyzer Enzymatische nach Öl- und Salzzugabe	103

## Abkürzungsverzeichnis

### Abkürzungsverzeichnis

$\beta$ -Glucan	(1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)- $\beta$ -d-Glucan
bar	Bar
Cl <sup>-</sup>	Chlor-Ion
Da	Dalton
ES	Enzym-Substrat-Komplex
ET	Lebensmittelenzymzubereitung SCHLIESSMANN <i>EX-Tosan</i>
<i>F</i>	Scherkraft
G	Gramm
$\dot{\gamma}$	Scherrate
H	Plattenabstand
HTST	Kurzzeithocherhitzung
$K_m$	Michaelis-Menten-Konstante
kat	Katal
Kg	Kilogramm
L	Liter
M	Meter
M	Molmasse
min	Minute
ml	Milliliter
mol	Mol
$\mu$ m	Mikrometer
N	Newton
$\eta$	Scherviskosität
Na <sup>+</sup>	Natrium-Ion
OH <sup>-</sup>	Hydroxidion
O/W	Öl-in-Wasser
Pa	Pascal
rpm	rounds per minute

## Abkürzungsverzeichnis

S	Sekunde
$\tau$	Schubspannung
U	Unit
UHT	Ultrahoherhitzung
V	resultierende Geschwindigkeit
VF	Lebensmittelenzymzubereitung SCHLIESSMANN -VF-
VZ	Lebensmittelenzymzubereitung SCHLIESSMANN -VZ-
W/O	Wasser-in-Öl
z.B.	zum Beispiel

## 1. Einleitung

Die Produktentwicklung von Lebensmitteln hatte schon immer die Aufgabe, die Wünsche und die sich ändernden Bedürfnissen der Verbraucher gerecht zu werden. Durch Forschung werden so neue Alternativen entwickelt. Auch Milchersatzprodukte gehören zu diesen neuen Entwicklungen. Es wird versucht, das steigende Problem der Laktoseintoleranz oder Kuhmilchallergie durch pflanzliche Alternativen zu lösen und den Betroffenen eine Alternative zu bieten.[2] Immer mehr Menschen verzichten aber auch aus ethischen oder umweltbezogenen Gründen auf Milch und Milcherzeugnisse [3]. Zunächst waren es vor allem Milchalternativen, die auf der Basis von Soja hergestellt wurden. Doch durch den steigenden Absatz werden heute noch viele weitere Alternativen, wie Nüsse und Getreidearten, verwendet. Ziel ist es Produkte mit physikalischen und sensorischen Eigenschaften zu entwickeln, die nahe an das Lebensmittel Milch herankommen. Dabei ist auch die Grundzutat Hafer als pflanzliche Alternative sehr beliebt, da es sich um eine heimische Getreideart handelt, die auch sensorisch überzeugt. [2]

### 1.1. Sensorik

Der Mensch verfügt über fünf Sinne: Sehen, Riechen, Schmecken, Tasten und Hören. Lebensmittel sind komplexe Gemische chemischer Verbindungen. Die Wahrnehmung ihrer sensorischen Eigenschaften resultiert daher aus der Stimulation aller unserer Sinne, vor allem durch ihre physikalischen und chemischen, und damit den chemosensorischen [4] Eigenschaften. [5] Daher ist die Wahrnehmung von Nahrungsmitteln eine multisensorische Erfahrung in unserem alltäglichen Leben. Die Nahrungswahrnehmung und -aufnahme stellt ein Gebiet dar, welches in den letzten Jahren auf Seitens vieler Forschungsgemeinschaften Interesse geweckt hat. Es wurden große Fortschritte über das Verständnis erzielt, dass nicht nur alleine die Sinneswahrnehmung des Geschmacks für den Verzehr von Lebensmitteln wichtig ist. [6]

Die sensorischen Eigenschaften eines Lebensmittels werden im Allgemeinen eingeteilt in Aussehen, Flavour und Textur, wobei diese nicht unabhängig voneinander zu betrachten sind. So kann z.B. die Viskosität als Texturmerkmal die

Geschmackswahrnehmung beeinflussen. Das Aussehen ist die sensorischen Eigenschaften eines Lebensmittels, die hauptsächlich über den visuellen Sinn wahrgenommen wird. [5] Flavour kann definiert werden als eine komplexe Kombination der olfaktorischen, gustatorischen und trigeminalen Empfindungen, die während dem Verzehr eines Lebensmittels wahrgenommen werden. Dabei wird dieser beeinflusst durch thermische, taktile, schmerzhaft und/oder kinästhetische Effekte. Somit tragen gustatorische, olfaktorische, trigeminale und oral-somatosensorische Signale als Sinne zur Geschmackswahrnehmung bei. [6] Die Textur ist die sensorische Eigenschaft, die größtenteils über den Tast- und Bewegungssinn wahrgenommen wird. Dazu tragen jedoch auch andere Sinne bei, vor allem der Seh- und Geschmackssinn. [5]

All dies muss auch bei der Entwicklung von neuen Lebensmitteln mit beachtet werden. Immer häufiger fließt auch die Mikrostrukturtechnik in diesen Prozess mit ein. Zur kontrollierten Entwicklung spezifischer Mikrostrukturen in einem Lebensmittel beruht der mikrostrukturelle Ansatz auf einem detaillierten Verständnis der Beziehung zwischen Lebensmittelformulierung und der angewendeten Verarbeitungsmethodik. Statt die Viskosität durch die Zugabe eines Verdickungsmittels zu ändern, wird hier die Makronährstoffzusammensetzung und die Produktstruktur des Lebensmittels verändert und berücksichtigt. So kann auch die Haptik eines Lebensmittels durch die Prozessschritte beeinflusst werden. [6]

Zur Bewertung dieser sensorischen Eigenschaften eines Lebensmittels wurden zahlreiche sensorische Methoden entwickelt. So gibt es auf der einen Seite die sensorische Qualitätsmessung durch geschulte Panels. Auf der anderen Seite gibt es die instrumentellen Messungen. Diese werden vor allem dann eingesetzt, wenn der Zusammenhang von Faktoren wie Produktstruktur, Produktzusammensetzung und Verarbeitung mit der sensorischen Wahrnehmung untersucht wird. Eine wichtige Kenngröße bei solchen Untersuchungen stellt die Viskosität dar. [5]

## 1.2. Viskosität

Die Lebensmittelrheologie stellt die Untersuchung des Fließverhaltens und der Verformung von Lebensmitteln unter genau definierten Bedingungen dar. Es zeigte sich jedoch immer mehr, dass sie eng mit der Lebensmitteltextur korreliert, vor allem

Einleitung

mit der von flüssigen und halbfesten Lebensmitteln. Somit stellt die Lebensmittelrheologie durch Rheologiemessungen ein wichtiger Punkt in der Sensorik von Lebensmitteln dar. Doch auch in anderen Bereichen werden rheologische Daten benötigt. Dazu zählen zum einen das Anlagendesign. Es beeinflusst welche Rohrdimensionen und Pumpen, aber auch welche Homogenisatoren für die Lebensmittelherstellung benötigt werden. Zum anderen werden die Daten für die Qualitätskontrolle in den verschiedenen Phasen des Herstellungsprozesses herangezogen. [7]

Rheologie, auch als „Fließkunde“ bezeichnet, ist die Lehre vom Fließen und der Deformation von Substanzen. Ableiten lässt sich der Begriff aus dem Griechischen: „Rheo“ oder „rhei“ bedeuten strömen, fließen. Nicht nur das Fließverhalten von Flüssigkeiten umfassen rheologische Untersuchungen, sondern auch das Deformationsverhalten von Festkörpern. Das Verhalten von Substanzen wird als viskoelastisch bezeichnet, da diese sowohl einen viskosen als auch einen elastischen Anteil besitzen. Das Fließ- und Deformationsverhalten von Substanzen zu messen und die Ergebnisse gut deutbar darzustellen und zu erklären stellt das Ziel der Rheologie dar. [1]

Die Messtechnik, mit der rheologische Daten erfasst werden, wird Rheometrie genannt. Mit Rotationsversuchen kann das Fließverhalten oder das viskose Verhalten von Substanzen beurteilt werden. Dabei hängt das rheologische Verhalten von äußeren Einflüssen ab. So hat zum einen die Art der Belastung einen Einfluss durch die Vorgabe der Geschwindigkeit oder Scherrate, aber auch die Höhe und Dauer der Belastung und die Temperatur. Weitere wichtige Parameter sind die Konzentration von z.B. Feststoffpartikeln in einer Suspension oder von Polymeren in einer Lösung. [1]

Mit Hilfe eines Zwei-Platten-Modells werden die grundlegenden rheologischen Parameter definiert:

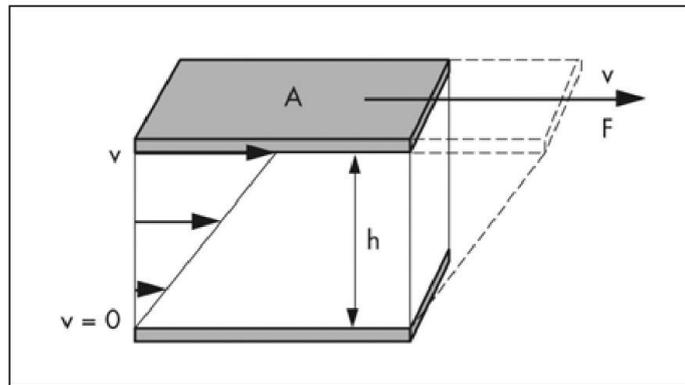


Abbildung 1: Zwei-Platten-Modell, A: obere Platte, F: Scherkraft, v: resultierende Geschwindigkeit, h: Abstand obere zu unterer Platte[1]

(Scher-) Fläche A stellt die obere Platte dar, die durch die (Scher-) Kraft F bewegt wird. Gemessen wird die resultierende Geschwindigkeit v. Die untere Platte ist befestigt und somit unbeweglich ( $v=0$ ). Vorausgesetzt werden zwei Scherbedingungen. Erst wenn diese erfüllt sind, können die Parameter der Rheologie exakt berechnet werden: 1. An beiden Platten hat die Messprobe Wandhaftung, sie gleitet oder rutscht nicht. 2. Es liegen laminare Fließbedingungen vor, es treten also keine turbulenten Strömungen bzw. keine Wirbelbildung auf. [1]

Die Schubspannung  $\tau$  wird definiert als:

$$\tau = F/A$$

Die Einheiten der (Scher-) Kraft F ist [N], die der (Scher-) Fläche A [ $\text{m}^2$ ]. Die Einheit der Schubspannung  $\tau$  ist [Pa]. Hierbei gilt  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg/m} \cdot \text{m/s}^2$ . [1]

Die Scherrate  $\dot{\gamma}$  wird folgendermaßen definiert:

$$\dot{\gamma} = v/h$$

Die Einheiten der Scherrate  $\dot{\gamma}$  ist [ $1/\text{s}$ ] bzw. [ $\text{s}^{-1}$ ], der Geschwindigkeit v [ $\text{m/s}$ ] und des Plattenabstandes h [m]. [1]

Sowohl die Schubspannung  $\tau$  als auch die Scherrate  $\dot{\gamma}$  sind wichtig für die Berechnung der Viskosität von einer Substanz. Es treten Reibungskräfte auf, wenn in einem fließenden Fluid die Moleküle gegeneinander verschoben werden. Als Viskosität kann

## Einleitung

daher der bei diesen Relativbewegungen auftretende Fließwiderstand ausgewertet werden. Als Fluide werden alle Materialien bezeichnet, die ein mehr oder weniger ausgeprägtes Fließverhalten aufweisen. Hierzu zählen neben Flüssigkeiten auch Gase. Als Scherviskosität wird das Verhältnis von Schubspannung  $\tau$  und Scherrate  $\dot{\gamma}$  bezeichnet. Bei konstanter Temperatur ist diese bei einem idealviskosen Fluid eine Materialkonstante. Die Scherviskosität wird meist nur als „Viskosität“ bezeichnet und wird definiert als:

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}$$

Dabei hat die (Scher-) Viskosität  $\eta$  die Einheit [Pa\*s], wobei gilt:  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 1 \text{ kg}/\text{s} \cdot \text{m}$ . [1]

Ein weit verbreitetes, und für sehr niedrigviskose Flüssigkeiten gebräuchliches Messsystem ist das Zylinder-Messsystem. Dieses besteht aus einem inneren Zylinder, dem Messkörper, und einem äußeren Zylinder, dem Messbecher. Da diese in der Arbeitsposition ein gemeinsames Zentrum aufweisen, wird dieses System auch als konzentrisch bezeichnet. [1]

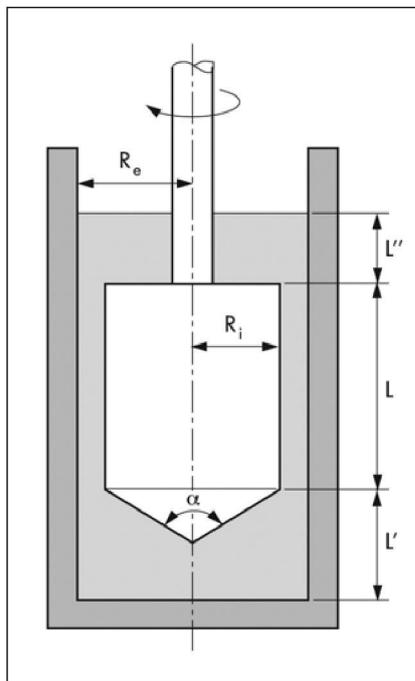


Abbildung 2: Konzentrisches Zylinder-Messsystem [1]

## Einleitung

Weist das Messsystem einen engen Spalt auf, so kann die Fläche als eben betrachtet und die Krümmung der Wände vernachlässigt werden. Somit entsprechen diese dem Zwei-Platten-Modell. Grund hierfür ist, dass anders als bei einem größeren Spalt die Wahrscheinlichkeit sehr gering ist, dass sich Sekundärströmungen ausbilden können. Als Betriebsart für dieses Messsystem wird bei der Searle-Methode als Rotor der Messkörper angetrieben. Der Messbecher selbst steht während der Messung als Stator still. [1]

Mit dem Viskositätsgesetz wird formal das idealviskose Fließverhalten, auch newtonsches Fließverhalten genannt, beschrieben:

$$\tau = \eta / \dot{\gamma}$$

Bei diesen Substanzen ist die Viskosität von Dauer und Höhe der Scherbelastung unabhängig. Idealviskose Flüssigkeiten stellen niedermolekulare Flüssigkeiten mit einer Molmasse unter  $M = 10.000 \text{ g/mol}$  dar. Hierzu zählt z.B. Wasser, Pflanzenöle und Lösemittel. [1]

Liegen jedoch nicht-idealviskose, komplexere Fließverhalten vor, so werden häufig Rotationsversuche durchgeführt. Somit können Flüssigkeiten und Dispersionen wie Suspensionen, Emulsionen und Schäume charakterisiert werden. Die sich daraus ergebenden Fließkurven werden dabei bei konstanter Temperatur gemessen. Um eine entsprechende Temperatur einzustellen, wird häufig vor der Messung ein Ruheabschnitt mit konstant  $\dot{\gamma} = 0$  zum Temperieren verwendet. Zum weiteren kann dieser zum Erholen der Messprobe dienen. Beim Erstellen einer Viskositätskurve  $\eta(\dot{\gamma})$  für die Viskositätsfunktion wird üblicherweise  $\dot{\gamma}$  auf der x-Achse und  $\eta$  auf der y-Achse aufgetragen. Hierbei können je nach untersuchter Substanz unterschiedliche Fließverhalten vorliegen. [1]

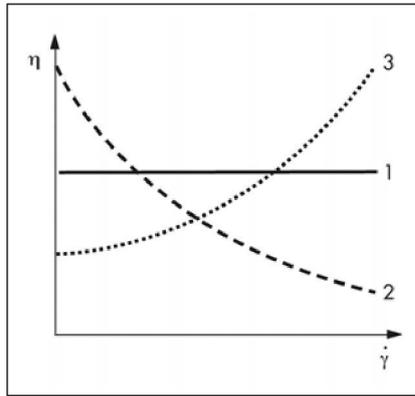
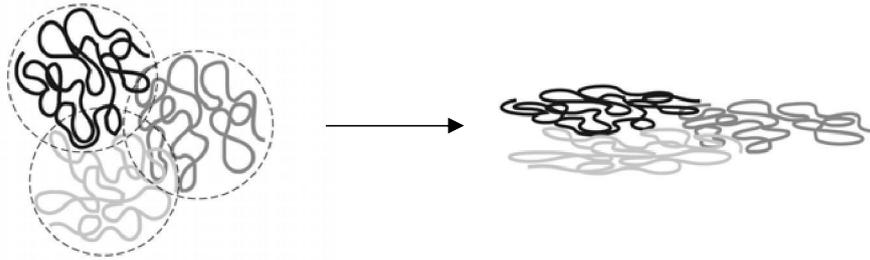


Abbildung 3: Viskositätsfunktionen, Funktionen: (1) idealviskoses, (2) scherverdünnendes, (3) scherverdickendes Verhalten, es gilt  $\eta$ : Viskosität,  $\dot{\gamma}$ : Scherbelastung [1]

Sinkt bei steigender Scherbelastung (Scherrate) die Viskosität liegt eine scherverdünnende Substanz vor. [1] Somit sinkt bei steigender Belastung die Viskosität. Zu diesen Substanzen zählen meist Polymerlösungen, organische Bindemittel und Kleister. Bei Polymerlösungen liegt dieses an der Struktur der Polymere. Im Ruhezustand nimmt jedes Makromolekül die Form an, die den geringsten Energieaufwand benötigt. Dieses stellt ein dreidimensionales Knäuel dar, dessen Umriss von außen der Form einer Kugel entspricht. Untereinander sind die Makromoleküle mit ihren benachbarten Molekülen zusätzlich noch verschlauft. Wird nun beim Schervorgang Energie auf die Moleküle ausgeübt, so richten sich diese in Scherrichtung und Schergradienten-Richtung aus (siehe Abbildung 4). Dabei sinkt der Fließwiderstand, da sie sich teilweise entschlaufen. Zu einem fast vollständigen Entschlaufungsprozess kann es kommen, wenn es sich bei dem Substrat um eine niedrig konzentrierte Polymerlösung handelt. Es liegen dann fast keine Berührungspunkte mehr zwischen den Molekülen vor und sie bewegen sich dann nahezu unabhängig voneinander. Scherverdünnendes Verhalten wird auch bei Dispersionen beobachtet. Die Wechselwirkungskräfte und damit der Fließwiderstand sinken bei entsprechender Scherkraft, da sich die Partikel in Dispersionen in Strömungsrichtung orientieren, die Form der Teilchen verändert und Agglomerate aufgelöst werden. [1]



*Abbildung 4: Drei Makromoleküle, links: Ruhezustand mit verknäulten und ineinander verschlauften Ketten, rechts: hohe Scherbelastung mit orientierten und teilweise entschlauften Ketten [1]*

Auf der anderen Seite gibt es die scherverdickenden Substanzen. Steigt bei diesen die Scherbelastung an, so steigt auch die Viskosität. Bei diesen können auch Polymere vorliegen. Zunächst liegen die Makromoleküle konzentriert und unvernetzt vor. Beim Schervorgang verschlaufen sich diese dann und die Viskosität steigt. Bei Dispersionen kann dieses Verhalten vorliegen, wenn die Partikel sich beim Prozess immer öfter berühren oder sich ineinander verkanten. [1]

Zur Entwicklung einer Milchalternative stellt die Viskosität von Kuhmilch ein wichtiger Anhaltspunkt dar. Diese kann jedoch stark schwanken. Zurückzuführen sind diese Schwankungen auf die verschiedenen Zusammensetzungen der Milch als auch deren weitere Verarbeitung. So kommt es, dass die Viskosität der Milch bei einem Fettgehalt von 3,3 % zwischen 1,8 bis 1,96 mPa\*s liegt. Bei höheren Fettgehalten zwischen 10 bis 36 % kann die Viskosität zwischen 8 bis 15 mPa\*s bei einer Scherrate von 5,6 s<sup>-1</sup> schwanken. [8]

Um ein ähnliches Mundgefühl und sensorische Eigenschaften bei einer pflanzlichen Alternative zu erhalten, muss zunächst die Zusammensetzung der Hauptzutat Hafer untersucht werden. Nur so kann ein passender Herstellungsprozess und eine Rezeptur entwickelt werden.

### 1.3. Hafer

Hafer (*avena sativa L.*) stellt eine wichtige Gruppe der Getreidearten dar, die weltweit produziert werden. Die Hauptanbauggebiete liegen in Russland, Kanada und den Vereinigten Staaten von Amerika. Hauptverwendungszweck von Hafer ist die Verwendung als Tierfutter. Jedoch stieg der menschliche Konsum in den letzten Jahren wieder aufgrund seiner gesundheitlichen Vorteile an. Hierzu zählen positive Effekte auf den Magen-Darm-Trakt als auch krebshemmende Wirkungen. [9]

Naturgemäß schwankt die Zusammensetzung von Getreide und somit auch von Hafer. Ein Grund hierfür ist zum einen die Hafersorte, aber auch Umweltbedingungen wie das Klima oder auch Anbautechniken. Durchschnittlich besteht Hafer zu 60 % aus Stärke, 11 bis 15 % aus Proteinen und 5 bis 9 % aus Fett. Aufgrund seiner ausgewogenen Zusammensetzung stellt er eine gute Quelle für Kohlenhydrate und hochwertige Proteine dar. Im Gegensatz zu anderen Getreidearten enthält Hafer einen hohen Anteil an Lipiden, insbesondere ungesättigte Fettsäuren, aber auch Mineralstoffe, Vitamine und sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe. Als besonderer Inhaltsstoff ist beim Hafer das  $\beta$ -Glucan zu nennen. Hafer besteht zu 2,3 bis 8,5 % aus diesem Ballaststoff. [9]

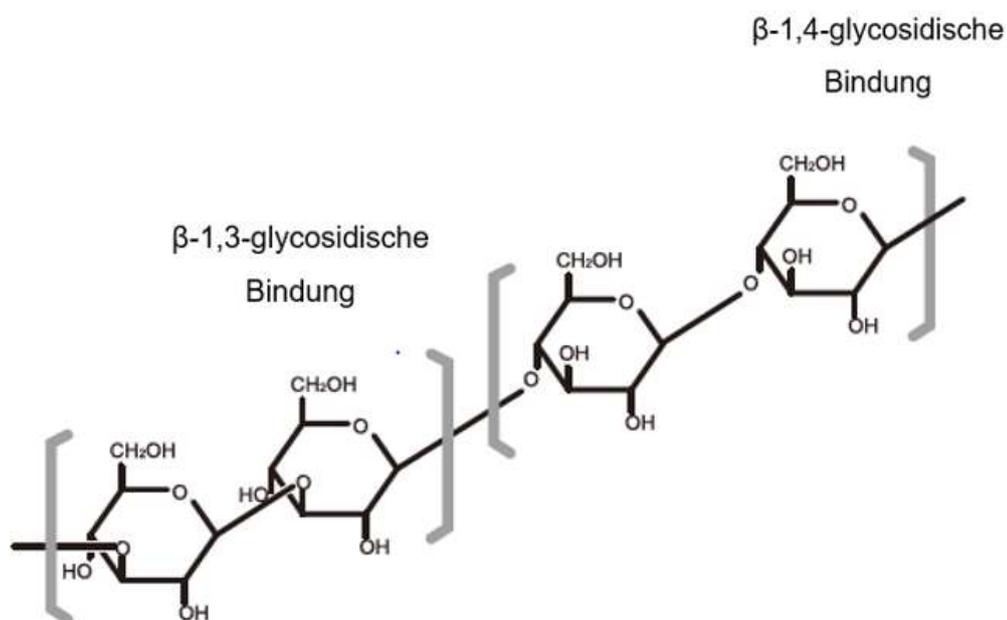


Abbildung 5: Schematische Darstellung des  $\beta$ -Glucan [10]

#### 1.4. Stärke

Glucose wird in fast allen Organismen als wichtigste Energiequelle verwendet. Aufgrund seiner hohen osmotischen Aktivität kann es jedoch nicht als Monosaccharid gespeichert werden. Organismen müssen daher Glucose als Polysaccharid speichern. Diese Polymere sind aufgrund ihrer komplexen Struktur osmotisch nicht aktiv. Bei Menschen und Tieren stellt Glykogen der wichtigste Glucose-Speicher dar. Bei Pflanzen ist es die Stärke. [11]

Stärke wird häufig aufgrund ihrer biologischen Funktion in zwei Typen unterteilt: Übergangsstärke und Speicherstärke. Übergangsstärke wird dabei die Stärke genannt, die tagsüber in den Blättern direkt aus der Photosynthese synthetisiert wird. Stärke in Geweben, in denen keine Photosynthese stattfindet, wird als Speicherstärke bezeichnet. Diese findet sich vor allem in den Samen, Wurzeln, Knollen und Stängeln. Während des Wachstums und der Keimung wird diese mobilisiert um den Energiebedarf der Pflanze zu decken. Diese Speicherstärke ist es, die uns als Nahrung dient oder für industrielle Zwecke genutzt wird. [12]

Hinsichtlich ihrer funktionellen Eigenschaften unterscheiden sich Stärken aus verschiedenen botanischen Quellen. Dabei variieren z.B. die Temperatur des Einsetzens der Verkleisterung oder die Endviskosität des Gels. Diese Variationen ergeben sich aus der Struktur der verschiedenen Stärken, der Größe der Stärkekörner, ihrer Zusammensetzung und ihres Aufbaus. [13]

Stärke besteht aus zwei Glucosepolymeren, die zusammen unlösliche, semikristalline Stärkekörner bilden. Zum einen die Amylose und zum anderen das Amylopektin. Amylopektin macht hierbei jedoch 75 bis 90 % der Stärke aus. [12] Wie bereits erwähnt macht Haferstärke etwa 60 % des Haferkorns aus und befindet sich hauptsächlich im Endosperm. Anders als bei den meisten anderen Getreidestärken weisen die Stärkekörner andere Eigenschaften auf: Geringe Granulatgröße, gut entwickelte Granulatoberfläche und einen hohen Lipidgehalt. [9]

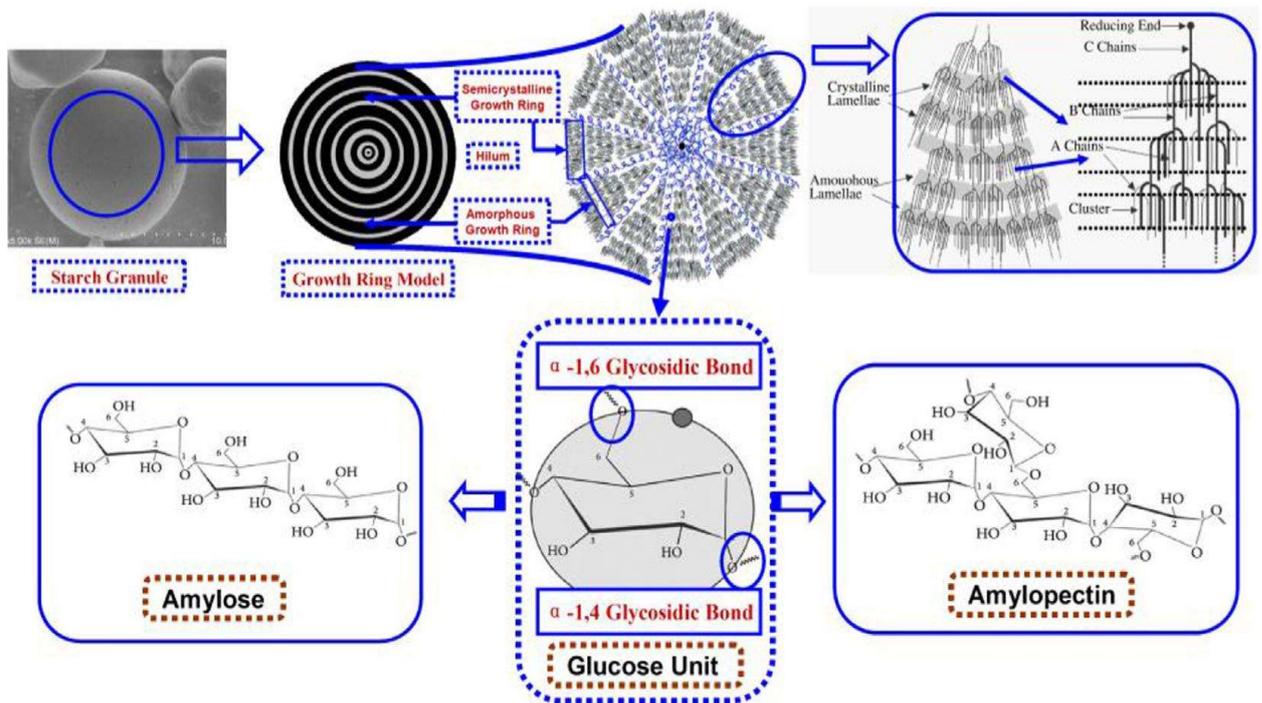


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Stärkestruktur [14]

#### 1.4.1. Amylose

Eine Form, in der die Stärke auftritt, ist die Amylose. Diese stellt die unverzweigte, lineare Form dar. Aufgebaut ist sie aus D-Glucoseeinheiten, die  $\alpha$ -1,4-glykosidisch verknüpft sind. [11] Amylose macht 10 bis 35 % der natürlichen Stärke aus. Die langen, linearen Ketten bestehen typischerweise aus 100 – 10.000 Glucoseeinheiten. Selten können auch  $\alpha$ -1,6-verknüpfte Verzweigungspunkte auftreten. Häufig tritt es in den amorphen, semikristallinen Regionen der Stärkekörner auf und besitzt ein Molekulargewicht von  $10^5$ - $10^6$  Da. [15,16]

#### 1.4.2. Amylopektin

Amylopektin ist der stark verzweigte Bestandteil der Stärke und befindet sich in den kristallinen Bereichen der Stärke. [12,16] Dabei bestehen die hunderten kurzen Ketten des Polysaccharits aus  $\alpha$ -D-Glucoseeinheiten, die aus  $\alpha$ -1,4-glykosidischen Bindungen aufgebaut und zu 5 bis 6 % zusätzlich  $\alpha$ -1,6-glykosidisch verknüpft sind.

Dabei unterscheidet sich der Grad der Verknüpfung und somit der Aufbau des Amylopektins zwischen den verschiedenen Stärkequellen. Aufgrund der jeweiligen Beteiligung der verschiedenen Ketten an der molekularen Struktur wurde eine Nomenklatur der Ketten im Amylopektin festgelegt. Diese werden A-, B- und C-Ketten genannt (siehe Abbildung 5). Die äußersten Ketten, die mit ihrer reduzierenden Gruppe an eine innere Kette glykosidisch verknüpft sind, werden A-Ketten genannt. Die inneren Ketten, die die äußeren wie Zweige tragen, werden B-Ketten genannt. Die innerste Kette, die sogenannte C-Kette, trägt ebenfalls andere Ketten als Verzweigungen, diese weist jedoch den einzigen reduzierenden endständigen Rest auf. [17]

Je nach Quelle des Amylopektins unterscheiden sich die verschiedenen Kettenverteilungsprofile. Dabei variieren die einzelnen Polysaccharide nicht nur durch das Vorliegen und Anzahl der A-, B- und C-Ketten. Auch die Kettenlängen und deren Verteilungen sind verschieden. Amylopektin kann dabei aus drei Arten von Ketten bestehen. Die kurzen Ketten, bestehend aus äußeren (A) und inneren (B) Ketten mit einem mittleren Polymerisationsgrad von 14 bis 18. Die inneren langen Ketten weisen einen Polymerisationsgrad von 45 bis 55 auf. Neben diesen beiden gibt es noch vereinzelt innere Ketten die einen Polymerisationsgrad von über 60 aufweisen können. Aufgrund seiner starken Verzweigung weist Amylopektin daher eine relative Molekülmasse von  $10^7$  bis  $10^9$  Da, meist jedoch über  $10^8$  Da, auf. Da stellt dabei die atomare Masseinheit (Dalton = Da) dar und 1 Da entspricht etwa der Masse eines Wasserstoffatoms [11]. [17]

### 1.4.3. Stärkeverkleisterung

Wird Stärke in Wasser erhitzt, verändern die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen zwischen Amylose und Amylopektin die Stärkekornstruktur. Bei geringeren Temperaturen kommt es zunächst dabei zu einer amorphen Wasseraufnahme. Steigt die Temperatur und somit die Hydratation weiter an kommt es zu dem irreversiblen Schritt der Verkleisterung. Dabei ist sowohl das hierfür benötigte Stärke-Wasser-Verhältnis als auch die Temperaturbereiche für

verschiedene Stärkequellen charakteristisch. Eingeleitet wird die Stärkeverkleisterung durch die Aufnahme von Wasser in das Granulat. Es kommt zu einer Hydratation der amorphen Hülle und der gleichzeitig erfolgenden Zerstörung der Wasserstoffbrücken. Dieser Prozess wird im nächsten Schritt auch auf die lamellaren Kristalle der Stärkekörner übertragen und es kommt letztendlich zu irreversiblen Veränderungen. Dies zeichnen sich dadurch aus, dass die Stärkekristalle aufschmelzen, die Stärke in Lösung tritt und es zu einer Erhöhung der Suspensionsviskosität kommt. [16]

### 1.5. $\beta$ -Glucan

(1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)- $\beta$ -d-Glucan ( $\beta$ -Glucan) stellt eines der wichtigsten Zellwandpolysaccharide im Endosperm von Getreiden wie Weizen, Roggen und Gerste dar. Dabei macht dieses Polysaccharid gut 3 bis 5 % des Trockengewichts der Körner aus. Es besteht vollständig aus Glucoseeinheiten die linear durch  $\beta$ -1,3- und/oder  $\beta$ -1,4-glykosidisch verbunden sind. Solche  $\beta$ -Glucane aus Getreide weisen durch ihr hohes Wasserbindungsvermögen die Eigenschaft auf, in wässrigen Medien gelartige Suspensionen zu bilden. [18]

Unter den verschiedenen Getreidesorten weist Hafer den höchsten Gehalt an  $\beta$ -Glucan auf. Dabei sind die Polysaccharide zu 30%  $\beta$ -1,3- und zu 40%  $\beta$ -1,4-glykosidisch verknüpft. Im Haferkorn kann so der Gehalt je nach Sorte und Umwelteinflüssen von 3,9 bis 5,7 % reichen. Zum Vergleich liegt der Gehalt in Weizenkörnern bei 0,5 bis 1,1 %. [19]

Die Löslichkeit des  $\beta$ -Glucans aus Hafer in Wasser ist von mehreren Faktoren abhängig. Dazu zählen die Partikelgröße, die Temperatur und der pH-Wert. So ist es nicht möglich in 45 bis 65 °C warmen Wasser das gesamte im Hafer enthaltene  $\beta$ -Glucan zu extrahieren. Daher wird hierfür meist heißes Wasser verwendet, welches eine Temperatur von 90 bis 100 °C aufweist. Auf diese Weise kann 60 bis 75 % des  $\beta$ -Glucans gelöst werden. Je nach Quelle weist extrahiertes  $\beta$ -Glucan ein Molekulargewicht um 69,650 g/mol auf. [20,21]

## 1.6. Enzymbehandlung

Nicht selten werden Enzyme in der Lebensmitteltechnologie angewendet um gezielt Stoffe umzuwandeln. Enzyme sind meist Proteine, die als Biokatalysatoren wirken und so chemische Reaktionen beschleunigen. Dabei werden sie selbst nicht verändert. [11]

Da die erforderliche Aktivierungsenergie zu hoch ist laufen ohne Enzyme die meisten biochemischen Reaktionen nur extrem langsam ab. Die Reaktion wird durch die katalytische Wirkung des Enzyms ermöglicht, indem die erforderliche Aktivierungsenergie gesenkt wird. Durch nichtkovalente Wechselwirkungen wird der Übergangszustand stabilisiert und das Substrat kann wesentlich schneller umgewandelt werden. [22]

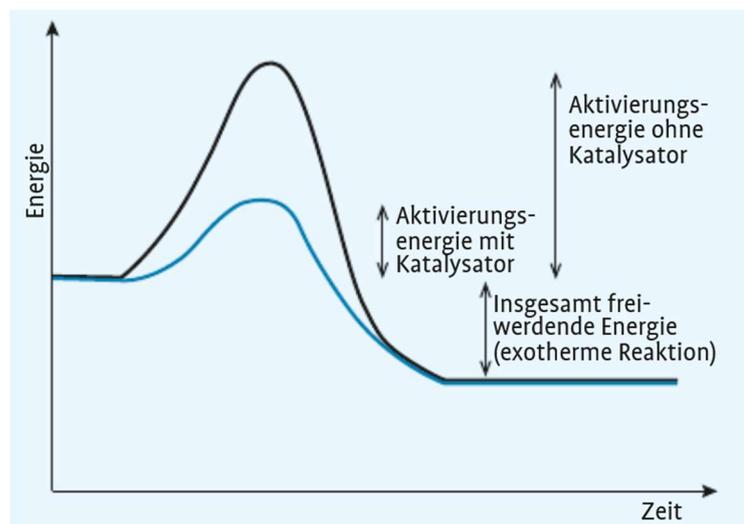


Abbildung 7: Vergleich einer Stoffwechselumsetzung in einem Energie-Zeit-Diagramm mit und ohne Enzym [20]

Die Substratspezifität wird durch die Raumstruktur des aktiven Zentrums (katalytisches Zentrum) bewirkt. Gefaltete Teile der Polypeptidkette oder reaktive Nicht-Eiweiß-Anteile wie Co-Faktoren oder prosthetische Gruppen bilden dieses Zentrum. Dabei wird die Substratspezifität durch die Raumstruktur des aktiven Zentrums bewirkt. Dadurch kommt es, dass nur passende Substrate, die Edukte, nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip gebunden werden können. Nach der Reaktion liegen die Produkte der Reaktion vor und das Enzym steht in der Ausgangsform wieder für weitere Reaktionen zur Verfügung. Bei Enzymen kann durch das aktive Zentrum auch unter optimalen Bedingungen nur eine bestimmte Anzahl von Molekülen umgesetzt werden. Diese

## Einleitung

Reaktionsgeschwindigkeit  $v$  wird in mol/l \* s gemessen. Sie ist ein Maß für die Änderung der Substratkonzentration mit der Zeit und misst so die Stoffmenge an Substrat, die in einem bestimmten Reaktionsvolumen pro Zeiteinheit umgesetzt wird. Wie viel aktives Enzym sich in einem Enzympräparat befindet gibt wiederum die Enzymaktivität an. Deren Einheiten sind Unit [U] und Katal [kat]. 1 U ist diejenige Menge Enzym, die unter definierten Bedingungen pro Minute ein  $\mu\text{mol}$  Substrat umsetzt. Die SI-Einheit der Enzymaktivität ist Katal, wobei 1 kat = 1 mol/s ist. [22]

Wie aktiv ein Enzym ist, ist jedoch stark abhängig von anderen Einflussgrößen. Hierunter fallen der pH-Wert, die Ionenstärke bzw. der Salzgehalt, die Temperatur, das Redoxpotential, die Anwesenheit von Co-Faktoren sowie die Konzentration des Substrats. Mit steigender Substratkonzentration steigt die Reaktionsgeschwindigkeit zunächst rasch, bis sie sich asymptotisch einem Grenzwert ( $v_{\text{max}}$ ) annähert. Die Substratkonzentration in mol/l, bei der die Reaktionsgeschwindigkeit die Hälfte von  $v_{\text{max}}$  ist, gibt der  $K_m$ -Wert an. Dieser wird durch die Michaelis-Menten-Konstante dargestellt: [22]

$$\frac{[E] \cdot [S]}{[E \cdot S]} = K_m \text{ (Michaelis – Menten – Konstante)}$$

Dabei ist die Reaktionsgeschwindigkeit des Enzyms E mit dem Substrat S proportional zur Konzentration des Enzym-Substrat-Komplex ES. [22]

Eine große Rolle für die Enzymaktivität spielt der pH-Wert. Die Ladung der für die Katalyse wichtigen Aminosäuren im Enzym wird durch diesen beeinflusst. Die Enzymaktivität vermindert sich jenseits des pH-Optimums eines Enzyms, bis sie irgendwann zum Erliegen kommt. Dieses gilt auch für die Ionenstärke bzw. die Salzkonzentration in der Umgebung. Auch die Temperatur stellt ein wichtiger Einflussfaktor für die Enzymaktivität dar. Diese steigt entsprechend der Q10-Regel an. Dies bedeutet, dass bei einem Temperaturanstieg von ca. 5 bis 10 °C die Reaktionsgeschwindigkeit sich innerhalb eines enzymatischen Temperaturbereichs verdoppelt. Wird jedoch das Temperaturoptimum des Enzyms überschritten, fällt die Reaktionskurve steil ab. Auf der anderen Seite können zu niedrige Temperaturen die Wirksamkeit praktisch unterbinden. Zu hohe Temperaturen führen zu einer Denaturierung der Enzyme. Zusätzlich kann die Enzymaktivität durch das Vorliegen von spezifischen Hemmstoffen, sogenannten Inhibitoren, gesenkt oder durch Aktivatoren erhöht werden. Diese können irreversibel sein, wenn z.B. ein Inhibitor eine

Einleitung

nicht umkehrbare Verbindung mit einem Enzym eingeht, oder reversibel, wenn der Komplex aus Enzym und Inhibitor wieder zerfällt. [22]

### Verwendung in der Lebensmitteltechnologie:

Aus tierischen oder pflanzlichen Zellen bestehen fast alle Ausgangsstoffe von Lebensmitteln. Diese besitzen maßgeschneiderte Enzymsysteme für alle Verbindungen, die sie für ihren Stoffwechsel abbauen oder produzieren müssen. Durch eine räumliche Trennung sind die Reaktionspartner voneinander getrennt. Zusammengebracht werden sie meist erst durch einen aktiven Stofftransport damit selektive Reaktionen stattfinden können. Z.B. sind in der Beerenhaut viele Enzyme lokalisiert. Wird eine dieser Zellen zerstört werden Enzyme freigesetzt und es laufen unmittelbar enzymatische Reaktionen ab. [22]

Anders als Gemüse oder Früchte besitzen Getreidearten wie z.B. Hafer eine stabilere Zellwand und einen ausgeprägten Stärke- und Proteinkörper. Daher werden in der Lebensmitteltechnologie zunächst vor allem Amylasen zur Spaltung der Stärke benötigt. Aber auch viele Nicht-Stärke-Polysaccharide wie Glucane spielen als Zellwandbestandteile bei der Verarbeitung von Getreide eine große Rolle und dienen dem Schutz des Mehlkörpers. Daher werden auch Glucosidasen häufig in der Lebensmitteltechnologie eingesetzt. [22]

### Alpha-Amylase:

Amylasen werden zur Klasse der Hydrolasen gezählt und werden in drei Typen eingeteilt: Die  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Subtypen.  $\alpha$ -Amylase wirkt dabei schneller als die  $\beta$ -Amylase. Diese beiden Enzyme wurden auch am häufigsten untersucht. Wie alle biologisch aktiven Enzyme können Amylasen aus Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen gewonnen werden. Häufig werden mikrobielle Enzyme bevorzugt, da diese am kostengünstigsten hergestellt werden können. Amylasen werden auch als Glycosidhydrolasen bezeichnet, da sie auf 1-4 glykosidische Bindungen wirken. [23]

Sie können in Exoamylasen und Endoamylasen unterteilt werden. Exoamylasen katalysieren die Hydrolyse an den Enden, Endoamylasen auf zufällige Weise innerhalb eines Stärkemoleküls. Dadurch wird bei der letzteren sowohl verzweigte als auch

## Einleitung

lineare Oligosaccharide mit unterschiedlichen Kettenlängen gebildet. Als Hauptsubstrat für alle  $\alpha$ -Amylasen (EC 3.2.1.1) ist Stärke. Die Produkte der Katalyse sind Glucoseeinheiten und Maltose. Als Metalloenzyme benötigen  $\alpha$ -Amylasen Kalzium als Metallionen, um ihre Stabilität und Aktivität aufrechtzuerhalten. Am häufigsten stammen sie von Mikroorganismen wie Bakterien, Pilze und Hefen. Unter den Bakterien sind es häufig *Bacillus*-Arten, aber auch *Rhodothermus marinus* oder *Lactobacillus fermentum*. [23]

Sehr weit verbreitet in der Industrie sind die  $\alpha$ -Amylasen von *Bacillus subtilis*. Häufig zeigen diese ein Wirkoptimum bei 60 °C und einem pH-Wert von 8,0. Da die enzymatische Behandlung von Stärke durch Verflüssigung und Verzuckerung bei hohen Temperaturen durchgeführt wird, werden diese  $\alpha$ -Amylasen vor allem wegen ihrer thermostabilen Eigenschaften bevorzugt. [24]

## Glucoamylase:

Nach dem Einsatz von  $\alpha$ -Amylasen liegt die abgebaute Stärke häufig als Dextrine vor, die selbst aus bis zu 20 Glucoseeinheiten aufgebaut sind. Um diese noch weiter abzubauen wird jedoch ein anderes Enzym benötigt. Hierfür wird häufig eine Glucoamylase (EC 3.2.1.3) verwendet. Diese kann die  $\alpha$ -1,4- aber auch die  $\alpha$ -1-6-Bindungen der Dextrine vom nichtreduzierenden Ende durch Hydrolyse aufspalten, damit nur noch freie Glucose vorliegt. Dieses Verfahren wird in der Industrie verwendet um aus Maisstärke Dextrose zu gewinnen. [25]

Zur Herstellung von Glucoamylase für die enzymatische Behandlung von Lebensmitteln wird häufig der Pilz *Aspergillus niger* verwendet. Das Enzym zeigt ein Temperaturoptimum bei etwa 50 °C bei einem pH-Wert von 5,0 und verliert seine Wirkung bei über 70 °C. [26]

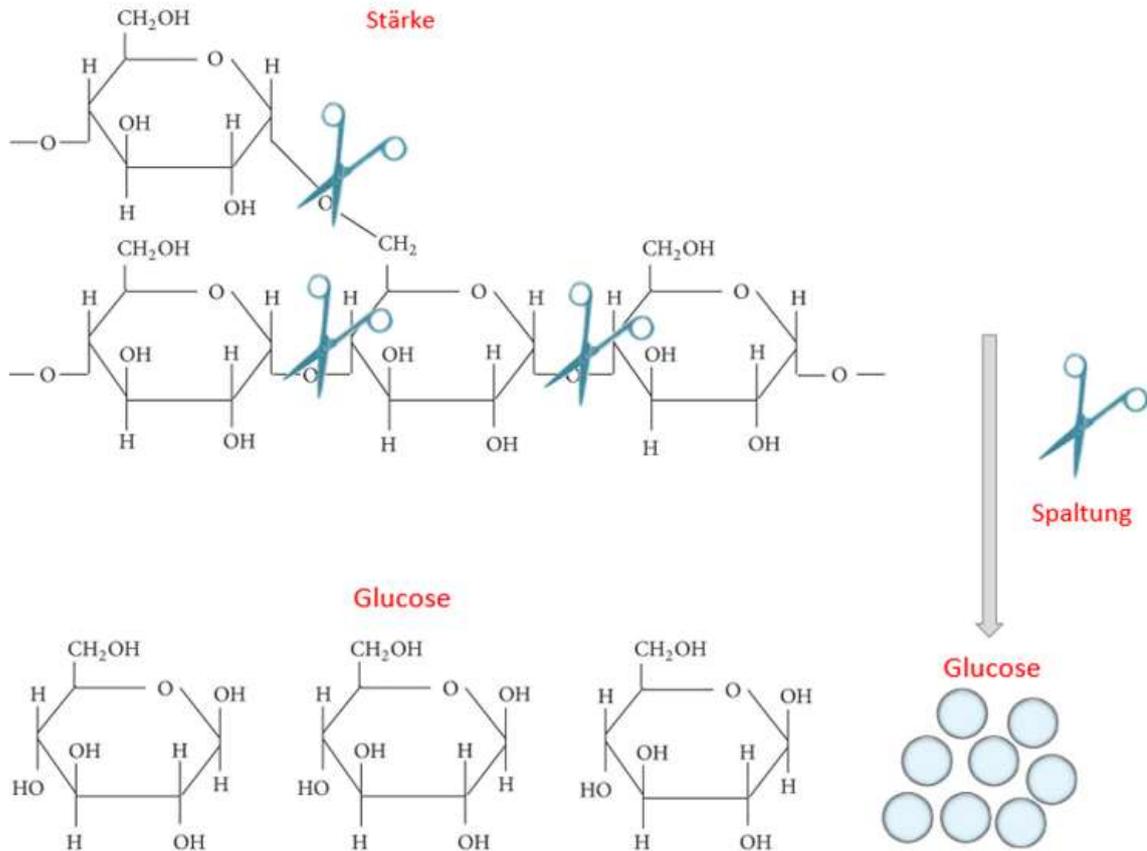


Abbildung 8: Hydrolytische Spaltung von Stärke durch Spaltung der  $\alpha$ -1,4- und  $\alpha$ -1,6-glycosidischen Bindungen [27]

Beta-Glucanase:

$\beta$ -Glucane aus Getreiden wie Hafer weisen ein hohes Wasserbindungsvermögen auf. Daher bilden sie in wässrigen Lösungen hochviskose Gele und gallertartige Suspensionen. Neben ihren physiologischen Vorteilen verursachen sie jedoch in einigen Branchen der Lebensmittelproduktion Probleme. Im Futtermittel können sie in hohen Mengen die Leistung der Tiere verringern. In der Brauindustrie wiederum erschweren sie wegen der Bildung viskoser Lösungen das Mälzen.  $\beta$ -Glucane können jedoch durch den Einsatz des Enzyms Beta-1,3-1,4-Glucanase (Beta-Glucanase) gespalten werden. Hierbei handelt es sich um eine Hydrolase. Dieses Enzym baut Beta-Glucan zu Glucosemolekülen oder Oligomere ab. [28] Neben anderen

## Einleitung

Mikroorganismen wird häufig *Trichoderma spp.* zur industriellen Herstellung des Enzyms verwendet. [29]

### Proteasen:

Proteasen zählen ebenfalls zur Klasse der Hydrolasen (EC 3.4.X.X) und werden für den Abbau von Proteinen benötigt. Sie gelten in der Industrie als die am häufigsten verwendeten Enzyme. Wie bei den Amylasen unterscheidet man zwischen Endo- und Exopeptidasen. Endopeptidasen greifen innerhalb der Polypeptidkette an verschiedenen Stellen an. Die gebildeten Fragmente weisen dann vermehrte Carboxy- und Aminoenden auf. Von diesen Enden her kann dann die Exopeptidasen die Fragmente weiter abbauen. Proteasen werden auch für die Herstellung von Lebensmitteln verwendet. So stellt deren Aktivität ein wichtiger Prozessschritt beim Bierbrauen dar. Während des Maischevorgangs wird das in der Maische vorhandene Eiweiß durch endogene Proteasen aus der Aleuronschicht der Gerste abgebaut. Zusätzlich werden bei manchen Herstellungsprozessen weitere Proteasen zugesetzt, die nach dem Abkühlen des Bieres eine Trübung verhindern sollen. [25]

### Lipasen:

Auch Lipasen (EC 3.1.1.X) sind Hydrolasen. Anders als die Esterasen, die kurzkettige Fettsäuren freisetzen, spalten Lipasen von wasserunlöslichen Lipiden langkettige Fettsäuren ab. [25] Diese Enzyme sind in den meisten Fällen der Lebensmittelherstellung ungewollt und stammen meist von bereits vorhandenen Mikroorganismen oder von den Zutaten selbst. Die durch die Lipasen in Glycerin und Fettsäuren gespaltenen Triglyzeride stellen wieder Edukte für weitere enzymatische Reaktionen dar. Somit können sich als Produkte Alkohole, Ketone und kurzkettige, flüchtige Fettsäuren bilden, die sensorisch meist als störend empfunden werden. Daher wird bei der Lebensmittelherstellung versucht, die Aktivität dieser Enzyme zu unterdrücken oder zu inaktivieren. [22]

### Thermische Behandlung:

Enzyme sind häufig Teil der Lebensmittelherstellung und verändern die Struktur der Inhaltsstoffe. Die Prozeduren sind wichtig für die Beschaffenheit der Produkte und werden daher zielgerichtet gesteuert. Nach Beendigung der Herstellung als auch nach dem Verkauf sind jedoch ablaufende enzymatische Veränderungen unerwünscht. Daher müssen Enzyme inaktiviert werden, um die enzymatischen Prozesse zu stoppen und so die Lebensmittel haltbar zu machen. Bei diesen Enzymen handelt es sich jedoch nicht nur um die, die für die Herstellung des Lebensmittels als Handelsenzyme eingebracht werden. Auch solche, die durch andere Quellen eingebracht werden, müssen inaktiviert oder verhindert werden. Daher sind Mikroorganismen als Enzymquelle in der Lebensmitteltechnologie auch ein nicht zu vernachlässigendes Thema. Spielen sie in der Herstellung von Lebensmitteln keine technologische Rolle weisen diese meist eine schädliche Wirkung auf, wenn sie diese verderben oder als pathogene Mikroorganismen durch diese übertragen werden. Die wichtigsten Gruppen stellen hierbei Bakterien und Pilze dar, aber auch Algen und Viren, auch wenn letztere keine Lebewesen darstellen. Unerwünschte Folgen von Kontaminationen sind neben dem Verderb der Lebensmittel die Toxinbildung in diesen oder aber im Darm. Zusätzlich können pathogene Bakterien oder Viren übertragen werden. Die Hygiene bei der Herstellung beeinflusst somit im hohen Grad die Sicherheit von Lebensmitteln. Die Haltbarmachung ist daher die wohl wichtigste Aufgabe der Lebensmitteltechnologie. Nur durch diese ist die Ausschaltung von unerwünschten enzymatischen und mikrobiologischen Vorgängen gegeben. Würden Mikroorganismen nicht in ihrer Aktivität durch spezielle Maßnahmen der Haltbarmachung gehemmt, würden diese durch die Enzyme ihrer Stoffwechsel die Inhaltsstoffe der Lebensmittel negativ beeinflussen. Durch Proteasen der Mikroorganismen werden Proteine in Aminosäuren und durch Lipasen Fette in Fettsäuren und Glycerin aufgespalten, die dann wiederum abgebaut werden und vor allem sensorisch das Lebensmittel verändern. Und auch Kohlenhydrate werden durch die Enzyme der Mikroorganismen gespalten. [22]

Um dieses zu Verhindern und Lebensmittel haltbar zu machen stehen eine Vielzahl an Methoden zur Verfügung. Je nach Erfordernissen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten muss entschieden werden, welche eingesetzt werden. Feste oder hochviskose Lebensmittel erfordern dabei eine andere Technik als flüssige

## Einleitung

Lebensmittel, wie z.B. eine Hafermilch. Eine häufig eingesetzte Methode ist die Hitzebehandlung. Durch diese kann es bei der Teilentkeimung zur Abtötung der vegetativen Mikroorganismen kommen, bei der Totalentkeimung werden durch Sterilisation auch deren Sporen abgetötet. Zusätzlich erfolgt durch die Hitzebehandlung die Inaktivierung der Enzyme. Je nach produktspezifisch erforderlicher Erhitzung wird entsprechend der Zeit-Temperatur-Verhältnisse von unterschiedlichen Erhitzungsarten gesprochen. Bei der Dauererhitzung wird das Lebensmittel bis zu 30 min bei etwa 65 °C erhitzt. Von Kurzeiterhitzung spricht man, wenn die Behandlung zwischen 71 und 78 °C für weniger als 1 min (bei Milch sind es z.B. 40 s) bis 10 min erfolgt. Die Kurzeithocherhitzung (HTST) oder Kurzeiterhitzung wird über wenige Sekunden bei 85 bis 90 °C durchgeführt. Von Ultrahocherhitzung (UHT) spricht man, wenn das Lebensmittel entweder bis 150 °C für 2 s (UHT direkt) oder bis 135 °C für wenige Sekunden (UHT indirekt) erhitzt wird. Für welche Erhitzungsart man sich entscheidet, hängt hierbei davon ab, was produziert und haltbar gemacht wird. Lebensmittel mit einem pH-Wert < 4,5 wie Wein oder Fruchtsaft benötigen nur eine moderate thermische Belastung. Grund hierfür ist, dass durch das saure Milieu viele Mikroorganismen im Wachstum bereits stark gehemmt sind und diese Umgebung kein Sporenwachstum erlaubt. Andere Lebensmittel müssen zur Sterilisation erheblich intensiver erhitzt werden, da sie einen höheren pH-Wert aufweisen. Hierzu zählt z.B. Milch und Bier. [22]

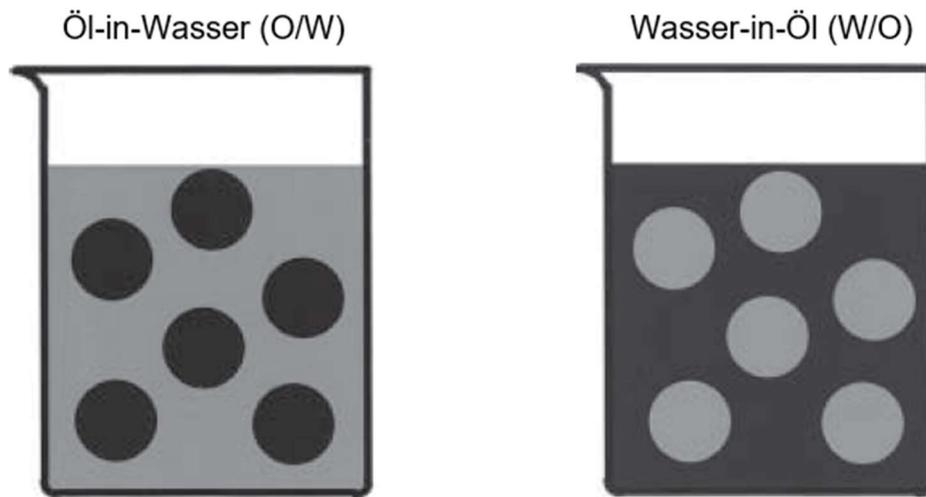
Die Erhitzung der Lebensmittel erfolgt indirekt in speziellen Wärmetauschern oder direkt durch Einleitung von Dampf. In beiden Fällen wird thermische Energie infolge eines Temperaturunterschieds in Richtung des kälteren Bereichs transportiert. Bei Wärmetauschern trennt die wärmeübertragende Wand die Stoffströme räumlich. Diese muss eine gute Wärmeleitung und eine große Oberfläche besitzen um effizient den Wärmeübergang zu gewährleisten. Die Stoffströme sind hierbei zwei Flüssigkeiten, die Wärme wird von der wärmeren auf die kältere Flüssigkeit übertragen. Dabei kann der Wärmeaustausch auf zwei Arten erfolgen: Im Gleichstrom oder im Gegenstrom. Strömen entlang der Trennwand beide Flüssigkeiten parallel, so handelt es sich um einen Gleichstrom. Laufen sie entgegengesetzt liegt ein Gegenstrom vor. Wird Dampf in das Lebensmittel eingeleitet, um dieses zu erhitzen, handelt es sich um eine direkte Erhitzung. Wird in Milch, die auf 80 °C erwärmt wurde, vorgespannter Dampf eingespeist, so steigt deren Temperatur schlagartig auf 150 °C an. Um die thermische Belastung gering zu halten kann hierbei eine Entspannungsverdampfung durchgeführt

werden. Dabei wird nach etwa 2 s Heißhaltung die durch Dampf erhitzte Milch zur Entspannung in ein Vakuumgefäß geleitet werden. Durch die Entspannungsverdampfung im Vakuum erfolgt eine rasche Abkühlung. [22]

Auch die Anwendung von Kälte stellt eine physikalische Haltbarmachung von Lebensmitteln dar. Zwar findet durch niedrige Temperaturen praktisch keine Abtötung von Mikroorganismen statt, jedoch kann so das Wachstum von Keimen und die Aktivität von Enzymen gehemmt werden. Wird das Lebensmittel wieder erwärmt, vermehren sich die Mikroorganismen wieder. Daher ist eine Kühlung von verderblichen Lebensmitteln auch nach einer Wärmebehandlung meist unerlässlich, da theoretisch keine vollständige Sterilisation stattfindet. Man spricht von Kühlung, wenn die Temperatur unterhalb der Umgebungstemperatur liegt, aber oberhalb des Gefrierpunkts. Da sich Schadbakterien bei 8 bis 10 °C bereits um mehrere Zehnerpotenzen innerhalb von 4 bis 5 Tagen vermehren können, sollte ein Haushaltskühlschrank auf eine Temperatur von 5 °C eingestellt sein. [22]

## 1.7 Emulsion

Emulsionen stellen kolloidale Dispersionen dar, bei denen eine Flüssigkeit in einer kontinuierlichen flüssigen Phase unterschiedlicher Zusammensetzung dispergiert ist. Die dispergierte (disperse) Phase wird häufig als interne Phase bezeichnet. Die kontinuierliche wiederum als externe Phase. Eine der Phasen besteht dabei aus einer wässrigen Flüssigkeit, die andere aus Öl. Je nachdem welche Art von Flüssigkeit die kontinuierliche Phase bildet lassen sich grundsätzlich zwei Arten von Emulsionen unterscheiden: Öl-in-Wasser (O/W), bei der Öltröpfchen in Wasser dispergiert sind, und Wasser-in-Öl (W/O), bei der Wassertröpfchen in Öl dispergiert sind. Ein bekanntes Beispiel für eine O/W-Emulsion ist die Milch, bei einer W/O-Emulsion ist es die Butter oder Margarine. [30]



*Abbildung 9: Die zwei einfachsten Arten von Emulsionen: Öl-in-Wasser (O/W) und Wasser-in-Öl (W/O) [30]*

Thermodynamisch stabil sind die meisten Emulsionen nicht. Es können jedoch Emulsionen auftreten, die über Wochen, Monate oder sogar Jahre sehr stabil sind. Die meisten auftretenden Emulsionen enthalten neben Öl und Wasser noch Emulgatoren oder Stabilisatoren. [30] Ionen sind der einfachste Typ von Emulgatoren. Z.B. kann  $\text{OH}^-$  an die Emulsionströpfchen einer Wasser-in-Öl Emulsion adsorbieren, wodurch eine Ladung erzeugt wird. Auch Tenside können Emulsionen gegen das Ausflocken stabilisieren. Dabei kann es sich bei ihnen um nichtionische oder ionische Tenside handeln. Auch Polymere können die Aufgabe eines Emulgators in einer Emulsion haben. Ebenfalls kann es sich bei ihnen um nichtionische oder ionische Polymere handeln. Als Pickering-Emulsionen werden jene bezeichnet, bei denen Feststoffpartikel als Emulgatoren wirken. Diese Partikel lagern sich an der O/W-Schnittstelle an, wobei sie teilweise von der wässrigen Phase und teilweise von der Ölphase benetzt sind. Um die Emulgierung und Stabilisierung der Emulsion zu erleichtern sind es häufig aber auch eine Mischung von einigen oder allen dieser Emulgatoren. [31]

Während Nanoemulsionen einen Größenbereich von 20 bis 100 nm aufweisen, stellen die meisten in der Lebensmittelindustrie vorkommenden Emulsionen Makroemulsionen dar. In der Regel weisen diese einen Größenbereich von 0,1 bis 5  $\mu\text{m}$  auf mit einem Mittelwert von 1 bis 2  $\mu\text{m}$ . Aufgrund der großen Tröpfchengröße

und des signifikanten Brechungsindexunterschieds zwischen Wasser- und Ölphase sind diese Systeme normalerweise milchig trüb. [31]

#### Destabilisierung von Emulsionen:

Da keine Emulsion ewig stabil ist kommt es im Laufe der Zeit zu einer Destabilisierung bis zum irreversiblen Brechen einer Emulsion. Es können verschiedene Destabilisierungsprozesse stattfinden, die entweder einzeln oder auch gleichzeitig auftreten können. Bei der Aufrahmung bleibt die Tröpfchengröße bestehen, durch Gravitation baut sich jedoch ein Konzentrationsgradient auf. Größere Tröpfchen, wenn ihre Dichte geringer ist als die des Mediums, wandern schneller nach oben und sammeln sich somit im oberen Bereich des Systems. [31] Ein Beispiel hierbei ist die Milch. Das Milchfett liegt als Tröpfchen oder Kügelchen in der Milch vor. Diese besitzen als Emulgatoren Lipide wie Cholesterin und Phospholipide, die sie wie eine dünne Hülle umgeben und so stabilisieren. Die Fettkügelchen weisen in unbehandelter Rohmilch einen Durchmesser von 5  $\mu\text{m}$  auf. Mit der Zeit setzen diese sich jedoch aufgrund des Aufrahmens auf der Oberfläche ab. [22] Bei der Flockung bleiben die Tröpfchengrößen in einer Emulsion ebenfalls bestehen. Aufgrund der Van-der-Waals-Anziehung zwischen den Tröpfchen kommt es zu einer Aggregation bzw. Ausflockung. Die Anziehung nimmt dabei mit abnehmendem Abstand zu. Bei der Koaleszenz kommt es zu einem verschmelzen der Tröpfchen. Der Flüssigkeitsfilm zwischen den Tropfen wird bei deren Annäherung immer dünner, bis es letztlich zu einer Tröpfchenkollision kommt. Alle diese Destabilisierungsvorgänge können in der vollständigen Trennung der Emulsion (Brechen) enden. [31]

#### Herstellen einer Emulsion:

In der Lebensmitteltechnologie gibt es verschiedene Verfahren die genutzt werden könne, um eine Emulsion herzustellen. In der Milchindustrie wird typischerweise die Hochdruckhomogenisation verwendet. Die Milch wird dabei durch einen engen Spalt gepresst. Die Fettkügelchen sind dabei extrem hohen Scherkräften ausgesetzt, die durch den hohen Druck, die hohe Strömungsgeschwindigkeit und das Aufprallen auf die feste Fläche des Rohrsystems beruhen. Somit werden die Fettkügelchen auf eine gleichmäßige Größe gebracht, deren mittlere Größe bei unter 0,7  $\mu\text{m}$  liegt. Häufig

geschieht der Prozess in zwei Schritten, wobei Drücke von 140 bis 160 bar in der ersten und Drücke von 20 bis 30 bar in der zweiten Stufe verwendet werden. [22] Eine einfachere Methode zum homogenisieren sind high-speed Mixer wie der Ultraturrax. Solche Rotor-Stator-Geräte sind die am weitesten verbreiteten Emulgierungssysteme. Sie bestehen aus einem rotierenden Teil und einem statischen. Die Flüssigkeit wird durch die Bewegung des Rotors beschleunigt. Es bilden sich bestimmte Strömungsmuster aus, die zu Spannungen und schließlich zum Aufbrechen der Emulsionströpfchen führen. Eine Änderung der Rotationsgeschwindigkeit als auch des Durchmessers des Gerätes können die lokale Spannung verändern. Durch die Erhöhung der Geschwindigkeit können somit kleinere Tröpfchen gebildet werden. Aber auch die Erhöhung der Zeiträume, in denen Spannung auf die Tröpfchen einwirkt, führt zu kleineren Tröpfchen. [32]

### Sensorische Eigenschaften:

Die Textur einer Emulsion hängt von ihren rheologischen Eigenschaften ab. Die Rheologie der Emulsion wiederum hängt von den Eigenschaften der kontinuierlichen Phase und dem Volumenanteil und der Tröpfchengröße der dispergierten Phase ab. Fettreiche O/W-Emulsionen werden normalerweise als glatt, cremig und geschmacksreich wahrgenommen. Fettärmere Produkte können durch die Erhöhung der Viskosität der kontinuierlichen Phase den fettarmen Gehalt bis zu einem gewissen Grad kompensieren. [32]

Es ist bekannt, dass auch die Größe der Öltröpfchen in einer O/W-Emulsion eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der physikalischen Eigenschaften der Emulsion spielt. Als mikrostrukturelle Eigenschaft verändern diese die Texturwahrnehmung. Dabei nimmt die Cremigkeit eines Lebensmittels mit der Abnahme der Öltröpfchengröße zu. Kleinere Tröpfchen werden dabei typischerweise erreicht, wenn bei der Emulgierung eine größere Energie zugeführt wird. [6]

Auch die Emulgatoren, der pH-Wert und das Salz, sowie deren Konzentration, beeinflussen die Rheologie und somit das Mundgefühl und den Geschmack. Jedoch scheint letztendlich nicht die Rheologie der gesamten Emulsion entscheidend zu sein, sondern vor allem die Rheologie des Films, der sich im Mund beim Verzehr eines Lebensmittels bildet. Beim Geschmack ist die Freisetzung von

Geschmackskomponenten aus der kontinuierlichen als auch der dispergierten Phase wichtig. Dabei ist die Freisetzung aus der dispergierten Phase abhängig von der Wechselwirkung mit den anderen Inhaltsstoffen der Emulsion. Dies zeigt sich bei dem Geschmack von *OW*-Emulsionen, da dieser durch die Aromakonzentration in der Wasserphase als auch in den Öltröpfchen beeinflusst wird. [32]

## 1.8 Fragestellung

Ziel dieses Projektes ist es in Zusammenarbeit mit einem Start Up eine Rezeptur für eine Barista Hafermilch zu entwickeln. Diese soll die gleichen Eigenschaften aufweisen, wie andere pflanzliche Alternativen auf dem Markt. Hierzu zählen die physikalischen Eigenschaften wie Viskosität, Sensorik und Schäumbarkeit als auch das Verhalten während der Herstellung. Ein besonderes Augenmerk sollte bei der Entwicklung der Rezeptur daraufgelegt werden, so wenige Zusatzstoffe wie möglich zu verwenden. So sollte auf Zusatzstoffe wie Dikaliumphosphat, welches in vielen kommerziell erhältlichen Barista Hafermilchsorten zu finden ist, gänzlich verzichtet werden.

Diese Thesis konzentriert sich auf den Teilbereich Viskosität und Sensorik innerhalb des Projekts „Herstellung einer Hafermilch für Barista Zwecke“. Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Auswirkungen der einzelnen Inhaltsstoffe, vor allem des Hafers, auf die Viskosität zu verstehen. Um die Zutatenliste der Hafermilch gering zu halten aber dennoch einen durchführbaren Herstellungsprozess zu entwickeln, wurde daher der Einsatz von Enzymen untersucht. Diese sollten die Eigenschaften der Inhaltsstoffe der Hafermilch so beeinflussen, dass die gewünschte Zielrezeptur erreicht wird. Daher wurde während der Untersuchungen die Grundrezeptur immer wieder verändert und die einzelnen Schritte angepasst.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Messungen wird der Einfluss von Enzymen während einzelnen Prozessschritte der Herstellung untersucht. Daher wird der Aufbau der Arbeit so gewählt, dass die Auswirkung jedes einzelnen Enzymeinsatzes während des Herstellungsprozesses betrachtet wird.

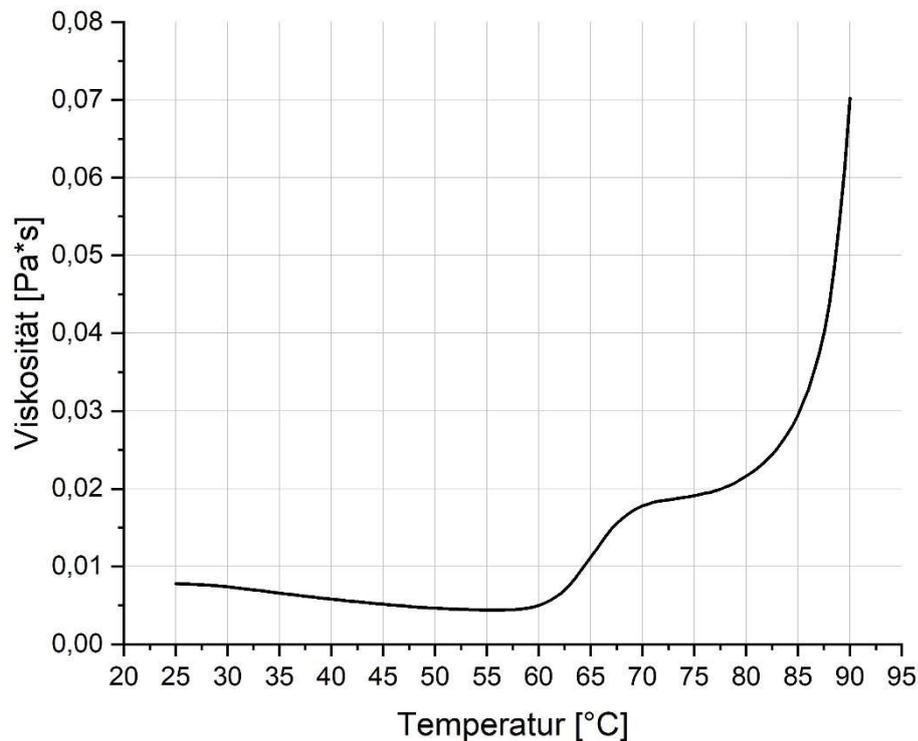
## 2. Ergebnisse und Diskussion

Um letztendlich eine Rezeptur für eine Hafermilch zu entwickeln war es zunächst nötig die Eigenschaften der Hauptzutat Hafer zu untersuchen. Da ein sicheres und haltbares Produkt entwickelt werden sollte, stellte das Erhitzen des pflanzlichen Milchersatzes einen wichtigen und unumgänglichen Produktionsschritt dar. Um den Herstellungsprozess und die Rezeptur so simpel wie möglich zu halten wurde zunächst die Auswirkung der Temperatur auf den Hafer ohne weitere Behandlungen untersucht.

### 2.1. Stärkeverkleisterungstemperatur

Die Viskosität der Probe zur Messung der Stärkeverkleisterungstemperatur wurde rheologisch in Rotation bei einem Temperaturanstieg von 0,5 °C von 25 °C bis 90 °C alle 10 Sekunden untersucht. Für die Probe wurden ganze Haferkörner in Wasser fein zerkleinert und vor der Messung durch ein 50 µm Sieb gefiltert. Die Scherrate lag bei 200 s<sup>-1</sup>. Die Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur wurde in Abbildung 10 aufgetragen. Auf der y-Achse wurde die Viskosität in Pa·s in Abhängigkeit der Temperatur in °C auf der x-Achse aufgetragen.

Von 25 °C bis zu einer Temperatur von 55,51 °C sank die Viskosität kontinuierlich von 0,007783 Pa·s bis 0,004402 Pa·s, die aufgrund der zunehmenden Molekülbeweglichkeit bei Temperaturerhöhung bedingt ist. Ab einer Temperatur von über 55,51 °C begann die Viskosität zu steigen. Dieser Anstieg verlief jedoch nicht linear. Bis zu etwa 70 °C stieg diese kontinuierlich an und flachte dann bis zu etwa 80 °C ab. Von hier an stieg die Viskosität wieder steil an bis zu der Endtemperatur von 90 °C. Bei dieser lag die Viskosität bei 0,07021 Pa·s.



*Abbildung 10: Stärkeverkleisterungskurve, ganze Haferkörner in Wasser zerkleinert und durch ein 50 µm Sieb gefiltert, Viskosität-Verlauf mit zunehmender Temperatur*

Um diesen Effekt zu verdeutlichen wurden zusätzlich die Partikelgrößen von Proben untersucht, die unterschiedlich stark erhitzt wurden. In Abbildung 11 wurden die Mittelwerte der Partikelgrößen der Proben bei einer Temperatur von 35 °C und 70 °C in µm aufgetragen. Bei einer maximalen Temperatur von 35 °C lagen die Partikelgrößen im Mittel zwischen 0,375 µm und 282,056 µm. Die meisten Partikel wiesen eine Größe von 8,147 µm auf. Die Proben, die auf 70 °C erhitzt wurden, zeigten im Mittel eine andere Partikelgrößen-Verteilung auf. Die kleinsten Partikel begannen hier erst bei 4,241 µm, die größten lagen bei 146,815 µm. Die meisten Partikel wiesen bei diesen Proben eine Größe von 17,181 µm auf.

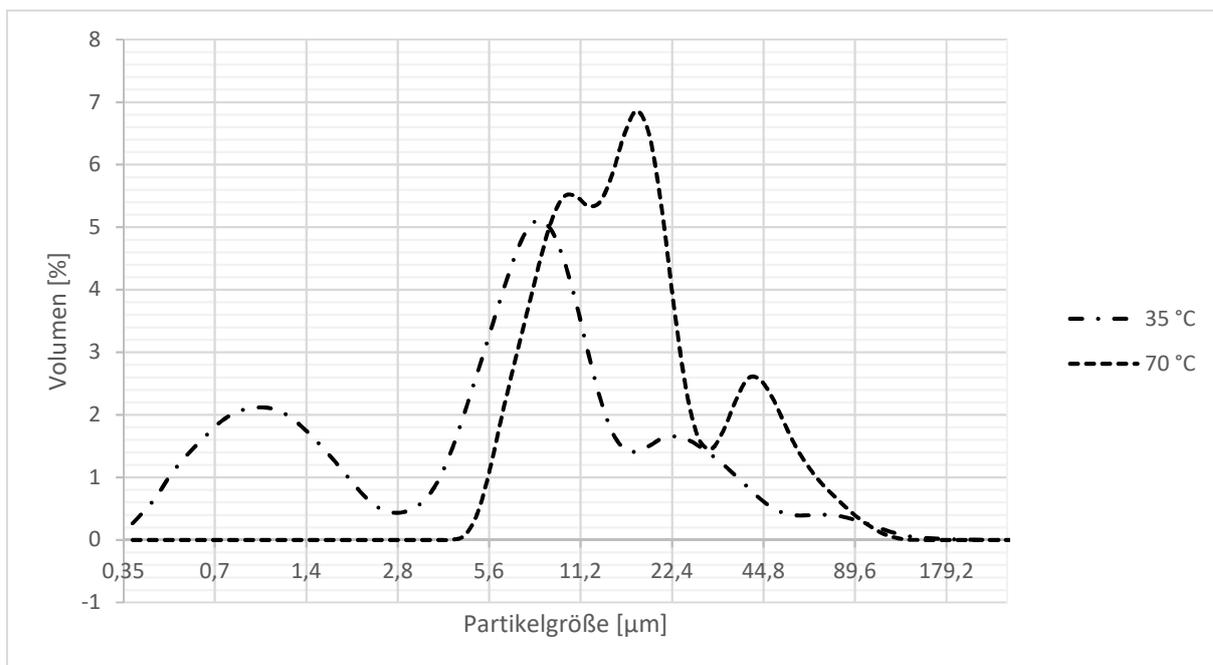


Abbildung 11: Mittelwerte der Partikelgrößenverteilung der unbehandelten Proben bei 35 °C und 70 °C

Dieser Anstieg der Partikelgrößen bei steigenden Temperaturen könnte die Veränderungen in der Viskositätsmessung erklären. Durch die Messung mit steigender Temperatur zeigte sich, dass die Viskosität der Probe zunächst sank. Die in der Probe enthaltenen Stärkekörner des Hafers könnten hier noch wenig Wasser aufgenommen haben und blieben in ihrer kristallinen Form. Hierbei handelte es sich zunächst noch um eine amorphe Hydratation der Stärkekörner. Durch die Rotation und die Erwärmung lösten sich die Kristalle voneinander und schwammen so freier in der Lösung. Daher sank die Viskosität zunächst. Erst als die Temperatur über die 55,51 °C stieg begannen die Stärkekörner weiter aufzuquellen. Durch das Aufquellen vergrößern sich die Körner stark und nahmen ein Vielfaches ihres eigenen Gewichtes an Wasser auf. Dieses ist gut an den Partikelgrößen in Abbildung 11 zu erkennen. Der Peak der am häufigsten vorkommenden Partikelgrößen verschob sich von 8,147 μm bei 35 °C auf 17,181 μm bei 70 °C. Bei der Viskositätsmessung bildete sich ein Gel, welches bei steigender Temperatur eine immer höhere Viskosität aufwies. Die Stärkeverkleisterung zeigte sich somit durch das Aufquellen und den charakteristischen Anstieg der Viskosität der Stärkekörner. Jedoch war der Anstieg der Viskosität ab der Temperatur von 55,51 °C nicht linear. Der flachere Anstieg ab etwa 70 °C könnte mit den anderen Bestandteilen des Hafers zusammenhängen. Da in der

Probe ganze Haferkörner verwendet wurden, waren neben der Stärke auch Proteine, Lipide und Ballaststoffe wie  $\beta$ -Glucan und Cellulose enthalten. All diese hatten zusätzlichen Einfluss auf die Viskosität der Probe bei steigender Temperatur. Daher konnte es zu diesem nicht-linearen Verlauf der Viskosität kommen.

Zusätzlich zeigte sich in Abbildung 11 auch eine Veränderung beim Vorliegen von sehr kleinen Partikeln. bei den Proben die auf 70 °C erhitzt wurden lagen keine Partikel vor die kleiner als 4,241  $\mu\text{m}$  waren. Bei 35 °C wiesen die kleinsten Partikel eine Größe von 0,375  $\mu\text{m}$  auf. Da die Stärkemoleküle viel zu groß für diesen Größenbereich waren, musste es sich hier um andere Bestandteile handeln. Die Proteine von Hafer könnten der Grund für diese Verschiebung sein. Das Haferproteine „12S seed storage globulin 2“ stellt ein Speicherprotein im Haferkorn dar und weist eine Länge von 518 Aminosäuren auf. Dieses hat die Eigenschaft, dass sich sechs dieser Monomere zu einem Hexamer aneinanderlagern [33]. Bei den Proben die maximal auf 35 °C erhitzt wurden lagen die Globuline noch als Hexamer vor. Sechs dieser Proteine könnten daher zusammengelagert die Partikel in dem Größenbereich von  $> 0,375 \mu\text{m}$  bei 35 °C gewesen sein. Durch das Erhitzen der Proben auf 70 °C kam es dann zu einer partiellen Denaturierung der Proteine. Die Proteine lagen nicht mehr aneinandergelagert als Hexamere vor, sondern als Hexa-3-mer oder als einzelne „Monomere“. Die Proteine selbst sind zu klein gewesen, um bei den Messungen noch erfasst zu werden. Daher lagen bei den Messungen von den 70 °C Proben keine Partikel mehr vor, die kleiner als 4,241  $\mu\text{m}$  waren.

Flüssige Lebensmittel müssen einige Produkteigenschaften vorweisen, damit diese überhaupt hergestellt werden können und auch keine gesundheitlichen Risiken für den Verbraucher darstellen. Hierbei stellt zum einen das Pasteurisieren einen wichtigen Produktionsschritt dar, wobei eine weit verbreitete Erhitzungsform die Ultrahocherhitzung ist. Wie bereits in der Einleitung erwähnt wird das Lebensmittel hierfür auf mindestens 135 °C für wenige Sekunden erhitzt [22]. Dieses Verfahren stellt auch eines der häufigsten Verfahren bei der Haltbarmachung von Milch dar. Um ein haltbares und sicheres Lebensmittel herzustellen ist eine Erhitzung des flüssigen Lebensmittels meist unumgänglich.

Da jedoch die Stärke des Hafers bei einer Temperatur ab 55,51 °C bereits verkleisterte, wäre dieses bei der Produktion ein großes Problem gewesen. Das Lebensmittel hätte beim Pasteurisierungs-Vorgang die Rohrsysteme verklebt und

verstopft. Dieses Problem würde auch bei einem Plattenerhitzer entstehen. Die einzige Möglichkeit zum Erhitzen wäre ein Kesselsystem gewesen, in dem das Lebensmittel unter Rühren erhitzt wird. Da die Probe durch das Erhitzen dickflüssig wurde, wäre auch die Abfüllung durch Rohrsysteme problematisch geworden. Zusätzlich waren die sensorischen Eigenschaften nicht die, wie man sie sich bei einer Milchalternative vorstellt. Das Produkt war nicht mehr flüssig, sondern eher puddingartig. Hätte man jedoch den Prozessschritt des Erhitzens auslassen, so wäre die Hafermilch nur für wenige Tage haltbar gewesen und hätte ein gesundheitliches Risiko für den Verbraucher dargestellt. Mikroorganismen hätten sich vermehrt und die Gesundheit gefährdet. Die Pasteurisierung war somit unumgänglich und es zeigte sich, dass die Stärke des Hafers behandelt werden musste, um eine produktionsfähige Hafermilch herzustellen. Auch die Herstellung einer Emulsion erwies sich als problematisch. Da der Hafer an sich einen zu geringen Eigenöl-Anteil aufwies, um ein vollmundiges Mundgefühl zu erzeugen, müsste Öl zugesetzt werden. Wenn dieses nach der Pasteurisierung stattgefunden hätte, wäre die Homogenisation beispielsweise durch eine Hochdruckhomogenisation nicht machbar gewesen. Diese Art des Homogenisierens ist bei der Milchindustrie weit verbreitet. Hierbei wäre die dickflüssige Hafermilch mit Druck durch einen schmalen Spalt gepresst worden. Es müsste somit ein noch höherer Druck angewendet werden, als bei einem flüssigen Lebensmittel.

Zum anderen wird bei der Herstellung einer pflanzlichen Milchalternative die Zugabe von Zucker meist vermieden. Bei dem sensorischen Test zeigte sich jedoch, dass die Probe bei maximal 35 °C, wenn sie noch nicht erhitzt und somit noch flüssig war, nicht genügend Süße und einen deutlichen Hafergeschmack aufwies. Daraus ergab sich, dass die Hafermilch, auch wegen den geschmacklichen Eigenschaften, einer Behandlung unterzogen werden musste.

## 2.2. Viskositätsmessung

Die Messungen der Stärkeverkleisterungstemperatur zeigten, dass die Proben weiter behandelt werden mussten. In der Lebensmittelindustrie werden vermehrt Enzyme eingesetzt, um die Eigenschaften von Lebensmittelinhaltsstoffen zu verändern und somit zu beeinflussen [22]. Für die weiteren Behandlungen wurden daher verschiedene Enzyme verwendet. Somit wurden die Proben soweit behandelt wie es unter Laborbedingungen möglich war, bis eine Hafermilch mit den gewünschten Eigenschaften vorlag. Die Veränderungen in der Viskosität nach den einzelnen Enzymbehandlungen wurden durch Viskositätsmessungen mit einem Rheometer gemessen.

Als Ergebnisse wurden die rückläufigen Messwerte verwendet, also die Werte die bei sinkender Scherrate gemessen wurden. Grund hierfür war, dass diese weniger Schwankungen aufwiesen. Es lag ein laminarer Flow während den Messungen vor.

### 2.2.1. Enzymatische Verflüssigung der Stärke

Die Proben wurden nach der Behandlung mit der Lebensmittelenzymzubereitung SCHLIESSMANN -VF- (VF) rheologisch in Rotation bei einer konstanten Temperatur von 25 °C untersucht. Auf der y-Achse wurde die Viskosität in Pa\*s gegenüber der Scherrate auf der x-Achse aufgetragen. Die Messungen wurden für eine Dreifachbestimmung mit drei verschiedenen Proben durchgeführt. Der aus ihnen berechnete Mittelwert und die Standardabweichung wurden in Abbildung 12 aufgetragen. Bei allen drei Messungen fiel die Viskosität mit steigender Scherrate ab. Die Proben waren somit scherverdünnend. Es kam zu keiner Überkreuzung der Kurven zwischen den einzelnen Proben.

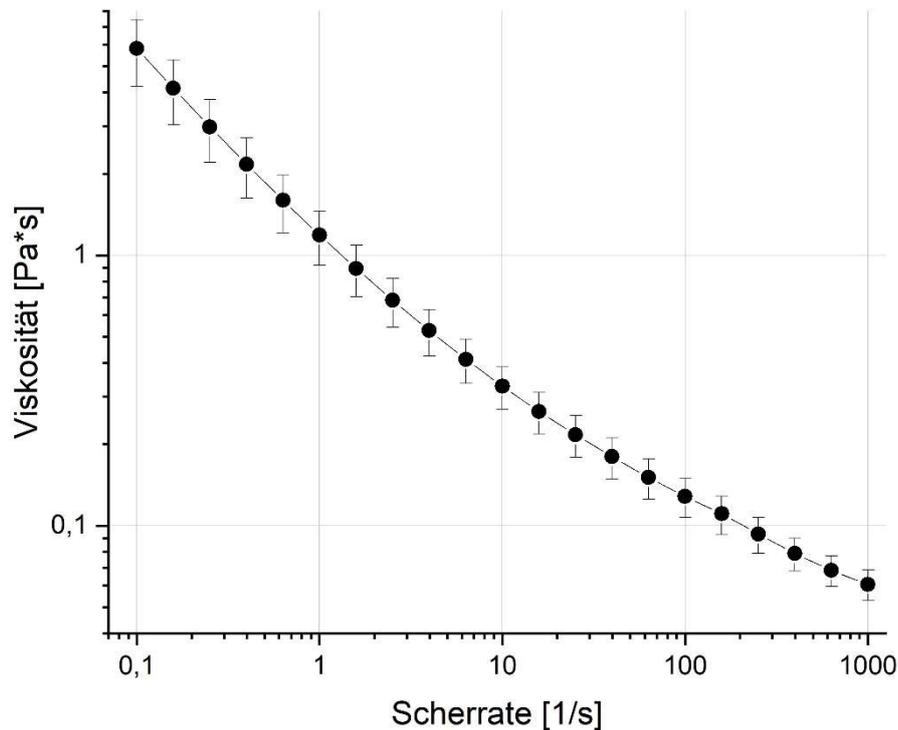


Abbildung 12: Mittelwert der Viskosität mit Standardabweichung der Proben nach Verflüssigung mit VF

Die höchste Viskosität von 5,816 Pa·s zeigte sich bei der geringsten Scherrate von  $0,1 \text{ s}^{-1}$ . Die Geringste von 0,061 Pa·s lag bei einer Scherrate von  $1000 \text{ s}^{-1}$  vor. Es zeigte sich, dass die Viskosität jedoch nicht linear sank. Der stärkste Abfall der Viskosität war im Bereich einer Scherrate zwischen  $0,1 \text{ s}^{-1}$  und  $1 \text{ s}^{-1}$  zu erkennen. Sie sank in diesem Bereich von 5,817 Pa·s auf 1,187 Pa·s.

Bei VF handelt es sich um eine Enzymzubereitung, in der aus *Bacillus subtilis*  $\alpha$ -Amylase enthalten ist. Das Enzym  $\alpha$ -Amylase spaltet die  $\alpha$ -1,4-glykosidischen Bindungen der Stärkemoleküle des Hafers. Somit entstanden aus diesem großen Polysaccharid durch hydrolytische Spaltung kleinere Oligosaccharid-Bruchstücke mit unterschiedlicher Anzahl an Glucoseeinheiten sowie vereinzelt bereits einzelne Glucosemoleküle. Die  $\alpha$ -1,6-glykosidischen Bindungen, die im Amylopektin als Verzweigungspunkte vorlagen, konnten durch das Enzym nicht gespalten werden. Diese Bruchstücke wurden durch die Messung der Partikelgrößen verdeutlicht. Der Mittelwert der Partikelgrößenverteilung der Proben wurden in Abbildung 13 aufgezeigt.

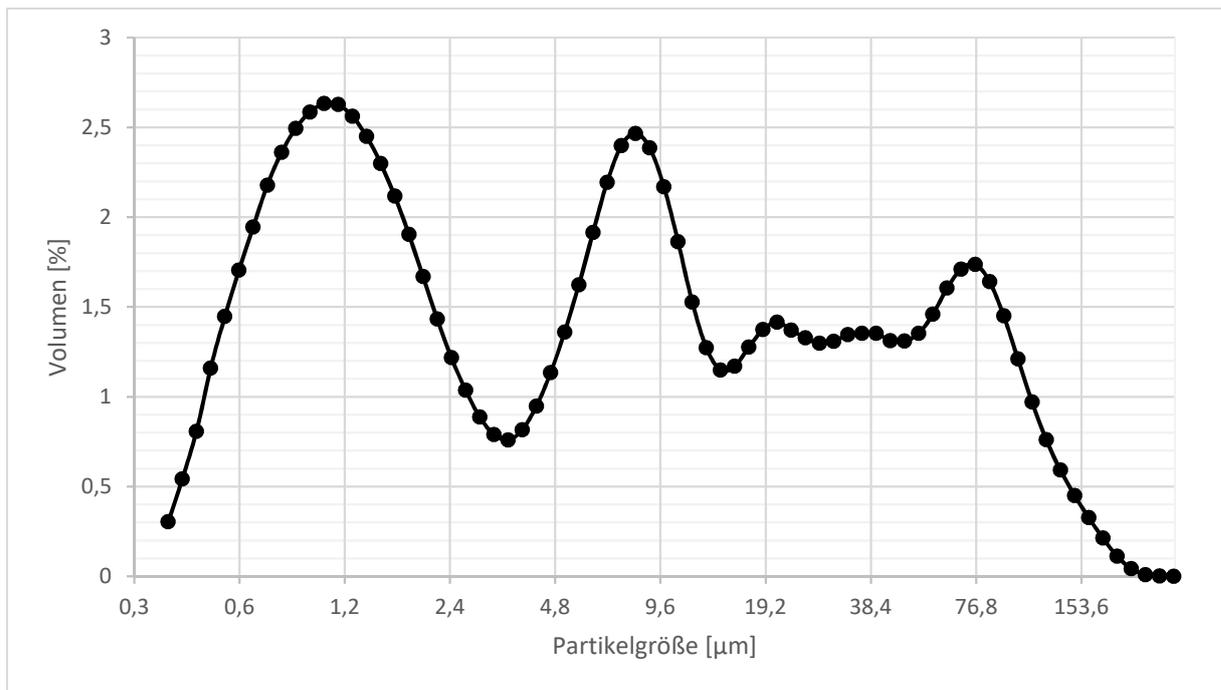


Abbildung 13: Mittelwert der Partikelgrößenverteilung der Haferproben nach enzymatischer Behandlung mit der Lebensmittelenzym-Zubereitung VF

Hier zeigte sich, dass sowohl im niedrigen Größenbereich bereits einzelne Glucosemoleküle, aber auch die gebildeten Bruchstücke der Stärke aus Glucoseketten als auch aus verzweigten Glucosesacchariden vorlagen. Bei den größeren Partikeln könnte es sich noch um nicht gesplante Polysaccharide wie Stärke aber auch  $\beta$ -Glucan und Cellulose handeln.

Alle drei Proben zeigten ein nicht-idealviskoses Fließverhalten auf (siehe Abbildung 12). Die Viskosität war abhängig von der Höhe der Scherrate und sank mit steigender Scherrate. Es handelte sich somit bei den Proben um scherverdünnende Substanzen. Die durch die Enzymbehandlung entstandenen Polysaccharide waren noch groß und lang genug, dass sie sich untereinander verknäulen konnten. Die Glucoseketten eines Moleküls verschlängten sich ineinander. Aber auch mit den Nachbarmolekülen werden sich die Ketten ineinander verhakt haben. Durch das Vorhandensein der  $\alpha$ -1,6-glykosidischen Bindungen wurden diese Effekte verstärkt. Es lagen also nicht nur lange Ketten vor die sich ineinander verschlängten, sondern auch verzweigte Moleküle, durch deren verknüpfte Äste aus Glucoseketten sich die Moleküle ineinander verhakten. Während der Rheologiemessungen wurde Scherkraft von außen auf die Proben ausgeübt. Die Viskosität sank bei steigender Scherrate, die Emulsionspartner

richteten sich somit in Scherrichtung und Schergradienten-Richtung aus. Sie entschlauften sich und waren weniger mit sich selbst als auch mit anderen ineinander verhakt. Hierfür war jedoch nur ein geringer Krafteinwirkung nötig, da sich der größte Effekt bei einer Erhöhung von nur  $0,1 \text{ s}^{-1}$  auf  $1 \text{ s}^{-1}$  zeigte. Mit sinkender Scherrate war dieser Prozess rückläufig und der Fließwiderstand stieg wieder an. Bei der Hafermilch handelte es sich jedoch auch um eine Dispersion, da andere Inhaltsstoffe neben der Stärke enthalten waren. Hierzu zählten auch Proteine, Lipide und Ballaststoffe, wie kleine Bruchstücke der Zellwände, die nicht durch das  $50 \mu\text{m}$  Sieb herausgefiltert wurden. Auch diese Partikel können zu dem scherverdünnenden Verhalten beigetragen haben. Die Partikel haben sich während der Messung in der Strömungsrichtung orientiert. Auch die Form der Teilchen könnte sich verändert und zu einem Sinken der Viskosität geführt haben. Sollten Agglomerate vorgelegen haben, konnten diese durch die Krafteinwirkung beeinflusst werden. So konnten Lipide, die durch hydrophobe Wechselwirkungen an lipophile Aminosäuren der Proteine anlagerten, sich durch die Energiezufuhr von diesen gelöst haben. Auch die Wechselwirkungskräfte von anderen Partikeln, ob nun hydrophil oder lipophil, die sich an Proteine, Lipide oder andere Moleküle angelagert hatten, könnten durch die steigende Scherkraft gesenkt worden sein. Somit konnten ggfs. auch Agglomerate teilweise oder ganz aufgelöst werden. Mit sinkender Krafteinwirkung konnte dieser Effekt auch wieder rückgängig gemacht werden, Partikel konnten sich so wieder aneinander anlagern.

Während der Herstellung der Proben wurden diese auf  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  erhitzt und die Temperatur wurde während der Enzymbehandlung gehalten. Grund hierfür war, dass das Enzym  $\alpha$ -Amylase aus VF hier sein Wirkoptimum aufwies. Zusätzlich wirkte laut Hersteller die Lebensmittelenzym-Zubereitung am besten, wenn es zu einer Stärkeverkleisterung der Rohstoffe kam. Bei der Messung der Stärkeverkleisterungstemperatur zeigte sich, dass die Stärke bereits bei  $55,51 \text{ }^\circ\text{C}$  verkleisterte. Somit war diese Voraussetzung für eine optimale Wirkung des Enzyms gegeben. Die Probe der Stärkeverkleisterung wurde nach dem Abkühlen der Rotationsmessung sehr fest. Während der Herstellung der Proben mit VF wurden diese durch Aufkochen auf  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  erhitzt. Sie blieben nach diesem Prozessschritt weitgehend flüssig, ihre Viskosität stieg allerdings nach dem Abkühlen an. Dies zeigte, dass eine Verflüssigung der Stärke durch enzymatische Behandlung nötig war. Nach dieser war es somit möglich, die Hafermilch zu pasteurisieren, ohne dass sie, wie bei

der Messung der Stärkeverkleisterung, eine feste und puddingartige Konsistenz annimmt. Bei diesem Produkt wäre es somit bereits möglich gewesen, diese durch Rohrsysteme zu leiten. Es hätte nach dem Erhitzen noch heiß abgefüllt werden können, ohne eine Anlage zu verstopfen.

Sensorisch wiesen die Proben jedoch noch Eigenschaften auf, die nicht bei einem pflanzlichen Milchersatz erwünscht sind. Vom Mundgefühl zeigte sich, dass diese zu dickflüssig waren um mit einer Kuhmilch oder anderen Hafermilch verglichen zu werden. Vor allem im kalten Zustand bei 12 bis 14 °C wiesen die Proben eine breiige und zusätzlich schleimige Konsistenz auf. Vom Mundgefühl war die Viskosität noch zu hoch. Doch auch bei einer höheren Temperatur von um die 71 °C waren sie noch zu dickflüssig und schleimig. Auch geschmacklich zeigten sie noch nicht die gewünschten Eigenschaften. Vor allem fehlte die Süße wie sie bei Kuhmilch oder bei anderen pflanzlichen Alternativen die man erwerben kann vorliegt. Hier hätte somit noch Zucker zu den Proben hinzugefügt werden müssen, um die erforderliche Süße zu erreichen. Auch fehlte bei der Verkostung das vollmundige Gefühl, dass vor allem bei Vollmilch vorliegt. Dieses wird meistens durch Fett oder Öl in Lebensmitteln erzeugt. Die Proben wiesen einen zu geringen Eigenfettanteil auf. Zwar enthält Hafer mit 5 bis 9 % einen höheren Fettanteil als andere Getreidearten [9], in den Proben war dieser jedoch zu gering, um das gewünschte vollmundige Mundgefühl und den gewünschten Geschmack zu erzeugen.

Durch die Versuche und Messungen nach der Enzymbehandlung mit VF zeigte sich, dass auf diesem Wege noch keine marktfähige Hafermilch vorlag. Zwar konnte die Viskosität trotz Wärmebehandlung bereits stark reduziert werden und zusätzlich durch die Verflüssigung der Stärke das Problem der Stärkeverkleisterung zum Teil umgangen werden, jedoch zeigte sich in der Viskosität durch die Rheologiemessungen als auch durch sensorische Tests, dass diese noch nicht ideal und nicht vergleichbar mit anderen pflanzlichen Milchalternativen war. Auch wiesen die Proben ohne Zuckerzusatz nicht die gewünschte Süße auf. Es waren also noch weitere Behandlungen der Hafermilch notwendig, um zu einer verwendbaren Rezeptur zu gelangen. Daher wurden weitere Enzymbehandlungen durchgeführt.

## 2.2.2. Enzymatische Verzuckerung der Stärke

Es wurden die Proben nach der Behandlung mit den Lebensmittelenzymzubereitungen SCHLIESSMANN -VF- (VF) und SCHLIESSMANN -VZ- (VZ) rheologisch in Rotation bei einer Scherrate von 0,1 bis 1000 s<sup>-1</sup> und einer konstanten Temperatur von 25 °C untersucht. Auf der y-Achse wurde die Viskosität in Pa·s gegenüber der Scherrate auf der x-Achse aufgetragen. Die Messungen wurden für eine Dreifachbestimmung mit drei verschiedenen Proben durchgeführt. Der aus ihnen berechnete Mittelwert und die Standardabweichung wurden in Abbildung 14 aufgetragen. Bei allen drei Messungen fiel die Viskosität mit steigender Scherrate ab. Die Proben waren somit scherverdünnend. Es kam zu keiner Überkreuzung der Kurven zwischen den einzelnen Kurven der Proben.

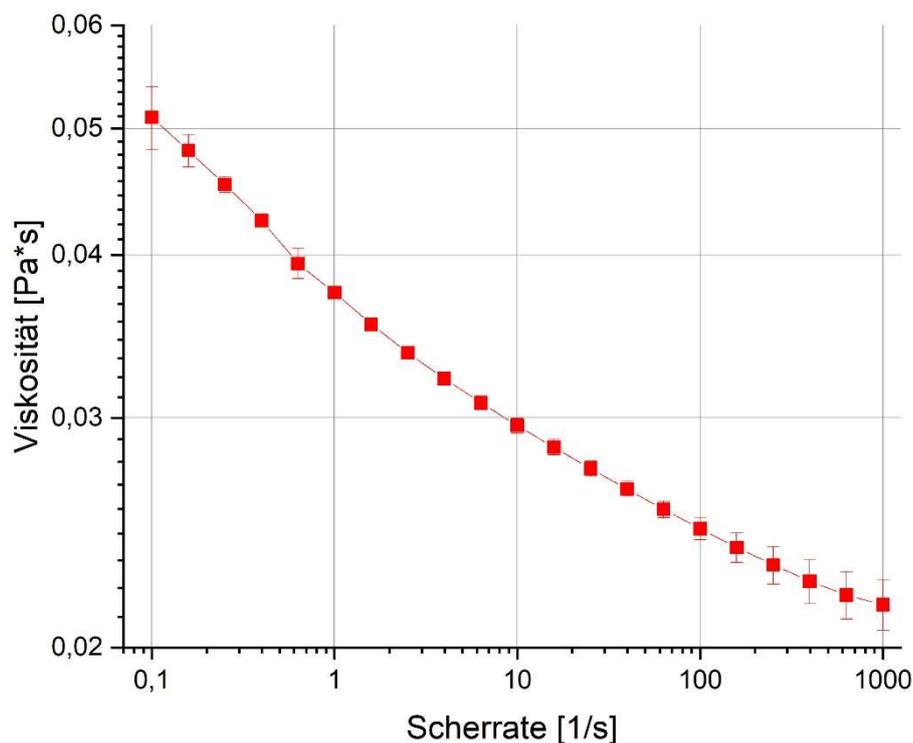


Abbildung 14: Mittelwert der Viskosität mit Standardabweichung der Proben nach Verflüssigung mit VF und Verzuckerung mit VZ

Die höchste Viskosität von 0,051 Pa·s zeigte sich bei der geringsten Scherrate von 0,1 s<sup>-1</sup>. Die Geringste von 0,022 Pa·s lag bei einer Scherrate von 1000 s<sup>-1</sup> vor. Es zeigte sich, dass die Viskosität jedoch nicht linear sank. Der stärkste Abfall der Viskosität war im Bereich einer Scherrate zwischen 0,1 s<sup>-1</sup> und 1 s<sup>-1</sup> zu erkennen. Sie sank in diesem Bereich von den 0,051 Pa·s auf 0,030 Pa·s.

VZ als Lebensmittelenzymzubereitung enthielt, anders als VF, mehrere Enzyme. Neben einer ebenfalls enthaltenen  $\alpha$ -Amylase ist zusätzlich noch eine Glucoamylase und eine Protease aus *Aspergillus niger* enthalten. Genauso wie die  $\alpha$ -Amylase aus VF spaltet die Amylase aus VZ ebenfalls die  $\alpha$ -1,4-glykosidischen Bindungen der Stärkemoleküle, die nach der 45-minütigen Enzymbehandlung mit VF noch vorhanden waren. Somit konnten durch das Vorliegen einer größeren Enzymmenge von  $\alpha$ -Amylase die Haferstärkemoleküle in mehr Polysaccharide mit einer unterschiedlichen Anzahl an Glucoseeinheiten gespalten werden. Die im Amylopektin vorliegenden Verzweigungspunkte aus  $\alpha$ -1,6-glykosidischen Bindungen konnten jedoch wie bei der Enzymbehandlung mit VF nicht mit der  $\alpha$ -Amylase gespalten werden. Die in VZ enthaltene Glucoamylase kann ebenfalls die  $\alpha$ -1,4-Bindungen der Saccharide vom nichtreduzierenden Ende hydrolysieren. Zusätzlich kann dieses Enzym auch die  $\alpha$ -1-6-Bindungen hydrolytisch spalten.

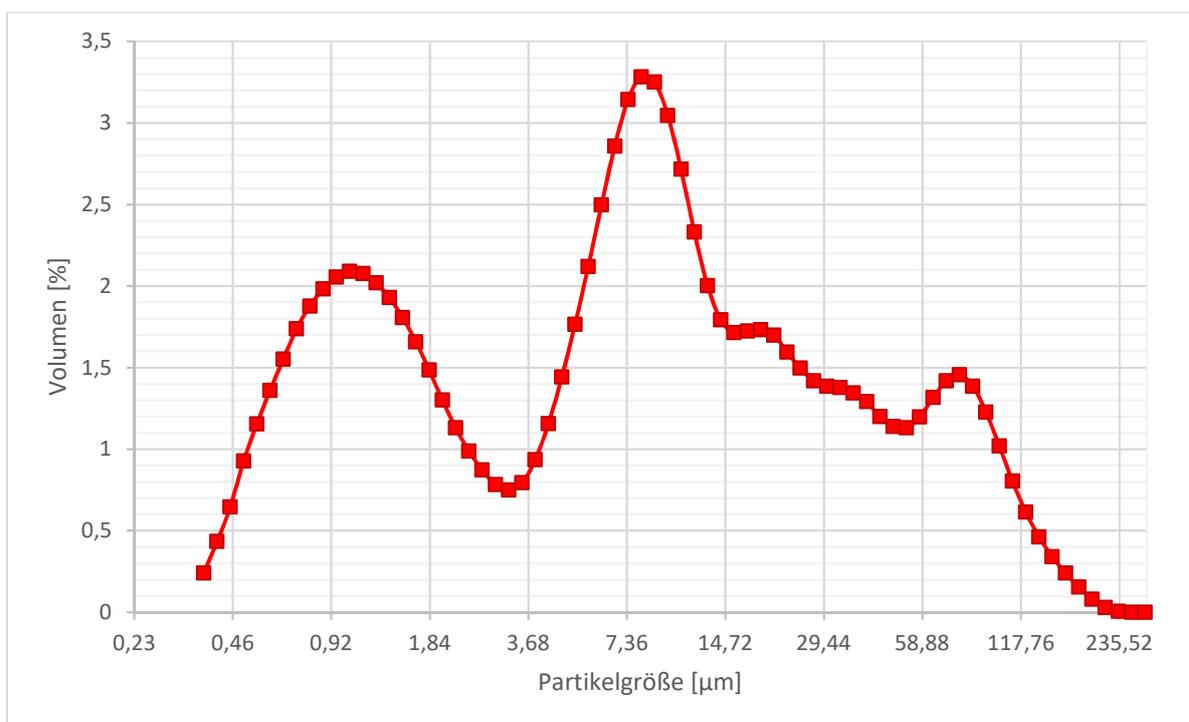


Abbildung 15: Mittelwert der Partikelgrößenverteilung der Haferproben nach enzymatischer Behandlung mit der Lebensmittelenzymzubereitung VF und VZ

Wie sich die Partikelgrößen nach der Behandlung mit VF und VZ verteilten, wurde in Abbildung 15 aufgezeigt. Hier wurde der Mittelwert der Partikelgrößenverteilung der Haferproben dargestellt. Die meisten Partikel wiesen hier eine Größe von 8,94  $\mu\text{m}$  auf, der Peak lag bei einem Volumen von 3,28 %. Dieses zeigte, dass die zusätzliche Behandlung mit VZ die Inhaltsstoffe des Hafers weiter veränderte. Durch die Enzymbehandlung konnten somit nun auch die verzweigten Glucosesaccharide, die als Produkt aus der enzymatischen Tätigkeit der  $\alpha$ -Amylasen übrigblieben, als Edukt für weitere Reaktionen dienen. Durch das Spalten der  $\alpha$ -1,6-glycosidischen Bindungen entstanden somit weitere Glucoseketten. Diese wiederum konnten dann von einer  $\alpha$ -Amylase oder von der Glucoamylase selbst wieder gespalten werden. Die Hauptaufgabe der Glucoamylase während der Enzymbehandlung bestand jedoch nicht darin, die Verzweigungspunkte des Amylopektins aufzubrechen, sondern in der Abspaltung von Glucosemolekülen von den Glucoseketten. Auch dieses geschah durch Hydrolyse vom nichtreduzierenden Ende der Saccharide. Somit sank die Länge der noch vorhandenen Glucoseketten und die Anzahl an Monosacchariden in Form von Glucose stieg an. Sowohl die Enzymaktivität der  $\alpha$ -Amylasen aus VF und VZ als auch der Glucoamylase aus VZ stellten den Hauptgrund für die geringere Viskosität der Hafermilch dar. Statt den großen Sacchariden, die aus verzweigten und langen Glucoseketten bestanden, lagen nun viele einzelne Glucosemoleküle in der Lösung vor.

Neben diesen Enzymen ist noch eine Protease in VZ enthalten. Proteasen sind die in der Lebensmittelherstellung am häufigsten verwendeten Enzyme. Sie werden auch in Brennereien und Brauereien verwendet. Dies ist ein Grund dafür, warum Proteasen in VZ enthalten waren, da diese Lebensmittelenzymzubereitung hauptsächlich für die Brauereiindustrie hergestellt wurde. Proteasen spalten Proteine in kleinere Bruchstücke (Peptide) oder können sogar einzelne Aminosäuren abspalten. Ziel am Ende der Versuche war die Rezeptur für eine schäumbar Hafermilch zu entwickeln. Jedoch sind vor allem bestimmte Proteine mit grenzflächenaktiven Eigenschaften ein maßgeblicher Grund, dass eine Lösung schäumbar ist. Daher wurde versucht, die Aktivität der Protease während der Versuche so gering wie möglich zu halten oder sogar zu unterbinden. Proteasen sind unter den Enzymen häufig sehr hitzeempfindlich und ihre Temperaturoptima liegen im Vergleich zu Amylasen häufig eher in niedrigeren

Bereichen. Die Enzymzubereitung VZ zeigt ein Temperaturoptimum von 35 bis 55 °C auf. Daher wurde die Temperatur während der Probenherstellung bei rund 68 bis 70 °C gehalten. Hierdurch sollten zwar die Proteasen in ihrer Aktivität eingestellt werden, auf der anderen Seite sollten jedoch die  $\alpha$ -Amylasen und die Glucoamylase weiterhin enzymatisch aktiv sein. Da im Durchschnitt das Temperaturoptimum der Glucoamylase bei 50 °C liegt, war deren Aktivität auch leicht eingeschränkt. Durch Vorversuche zeigte sich jedoch, dass dieses durch eine längere Einwirkzeit von VZ und durch eine Erhöhung der Enzymmenge ausgeglichen werden konnte. Das Temperaturoptimum der  $\alpha$ -Amylase lag bei 70 °C und war daher weiterhin uneingeschränkt aktiv.

Wie nach der Enzymbehandlung nur mit VF zeigten alle drei Proben auch nach der zusätzlichen Behandlung mit VZ ein nicht-idealviskoses Fließverhalten auf (siehe Abbildung 14). Somit war auch hier die Viskosität abhängig von der Scherrate und sank mit steigender Scherrate. Die Proben waren auch scherverdünnende Substanzen. Somit zeigte sich, dass durch die Enzymbehandlung mit beiden Enzymzubereitungen die Anzahl an großen Polysacchariden oder Oligosacchariden zwar sank, jedoch nicht alle enzymatisch gespalten worden waren. Es waren wohl immer noch verzweigte Saccharide vorhanden, die sich mit sich selbst aber auch mit anderen verschlauften. Ein Grund hierfür könnte sein, dass in VF  $\alpha$ -Amylase und in VZ  $\alpha$ -Amylase und Glucoamylase enthalten waren. Zwar kann Glucoamylase auch die  $\alpha$ -1,6-glykosidischen Bindungen der Stärke spalten, jedoch wurden durch die enzymatische Behandlung mit beiden Enzymzubereitungen vor allem die  $\alpha$ -1,4-glykosidischen Bindungen hydrolytisch gespalten. Es blieben somit vor allem die Verzweigungen der Stärke vorhanden, die sich ineinander verknäulen konnten. Durch die Erhöhung der Scherkraft während der Rheologiemessung entschlauften sie und die Viskosität sank.

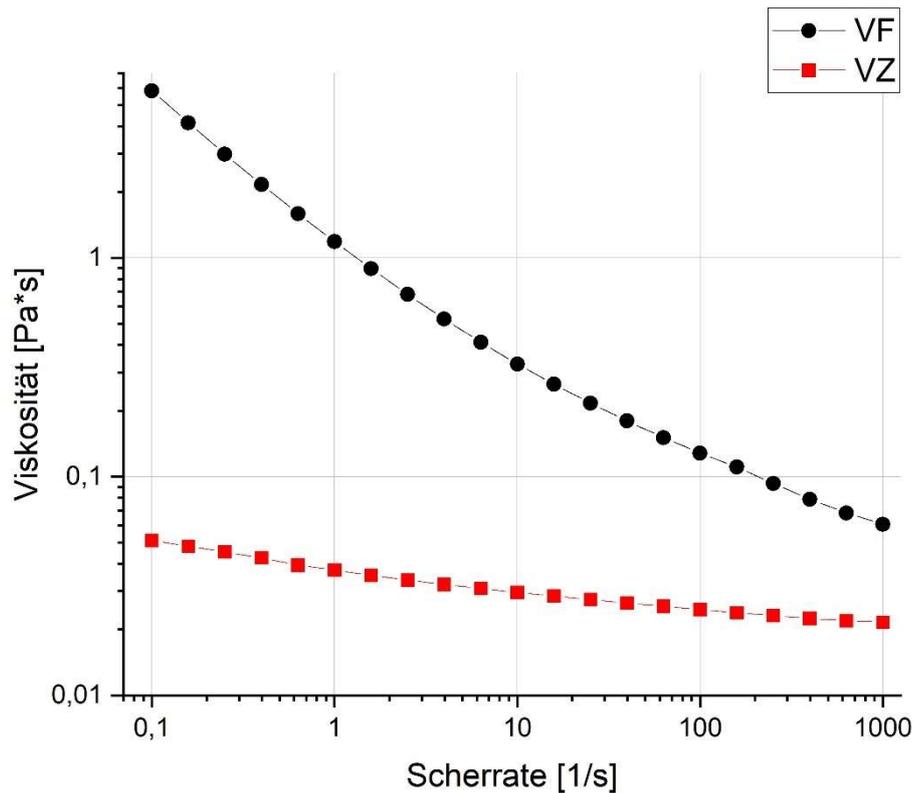
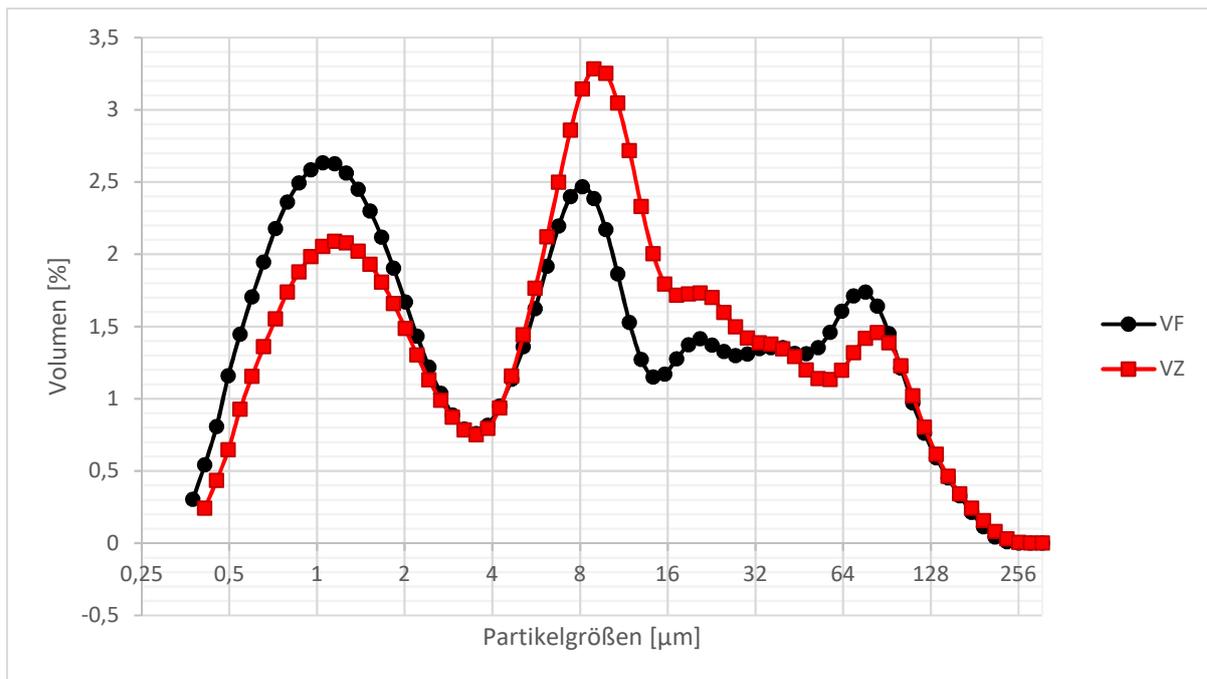


Abbildung 16: Vergleich der Viskosität der Probenmittelwerte. VF: Mittelwert der Proben nach Verflüssigung mit VF, VZ: Mittelwert der Proben nach zusätzlicher Verzuckerung mit VZ

Vergleicht man nun die Mittelwerte von den Proben nach VF und nach VZ, so zeigt sich, dass die Enzymbehandlung mit VZ einen größeren Effekt auf die Viskosität hatte, als nur die Behandlung mit VF (siehe Abbildung 16). Nach der Behandlung nur mit VF sank die Viskosität während der Messungen im Durchschnitt von 5,817 Pa·s bei einer Scherrate von 0,1 s<sup>-1</sup> auf 0,061 Pa·s bei einer Scherrate von 1000 s<sup>-1</sup>. Nach der zusätzlichen Behandlung mit VZ sank die Viskosität bei gleicher Scherrate von 0,051 Pa·s auf 0,022 Pa·s. Dieses verdeutlicht, dass in den Proben nach VZ Partikel von geringerer Größe oder Länge enthalten waren, die sich weniger stark verschlängten als längere und verzweigte Moleküle. Nach VF waren immer noch vor allem die Stärkebruchstücke enthalten, die durch VZ weiter aufgebrochen und somit verkürzt wurden. Daher kam es zu der weiteren Viskositätsabnahme.



*Abbildung 17: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen der Probenmittelwerte. VF: Mittelwert der Proben nach Verflüssigung mit VF, VZ: Mittelwert der Proben nach zusätzlicher Verzuckerung mit VZ*

Vergleicht man die Partikelgrößen der beiden Behandlungen, so zeigten sich auch hier Veränderungen durch die zusätzliche Behandlung der Proben mit der Lebensmittelenzymzubereitung VZ (siehe Abbildung 17). Nach der Enzymbehandlung nur mit VF wiesen die Proben einen größeren Peak in einem Größenbereich um die 64 µm auf als mit der zweifachen Enzymbehandlung zusätzlich mit VZ. Jedoch zeigten die Proben mit der weiteren Behandlung mehr Partikel im Größenbereich zwischen 6 bis 32 µm (rote Kurve) auf, als nach Behandlung nur mit VF (schwarze Kurve). Ein Grund hierfür könnte sein, dass nach VF noch so große Partikel vorlagen, dass diese bei der Filtration durch das 50 µm Sieb herausgefiltert wurden. Daher zeigte die Darstellung von VZ in diesem Bereich mehr Partikel. Jedoch wiesen die Proben, die nur mit VF behandelt wurden, mehr Partikel auf, die in einem Größenbereich von < 2 µm lagen.

Doch auch bei den Proben mit der Enzymbehandlung mit VZ handelte es sich um Dispersionen. Neben den Sacchariden waren auch noch andere Bestandteile enthalten. Zusätzlich zu den Proteinen und Lipiden waren wohl vor allem auch die Ballaststoffe noch zu einem großen Teil an der Viskosität der Proben beteiligt. Hafer

wird vor allem für seine löslichen Ballaststoffe bei einer ausgewogenen Ernährung geschätzt. Sowohl diese als auch die nichtlöslichen könnten daher ebenfalls für die nicht-idealviskosen Eigenschaften der Proben verantwortlich sein. Wasserunlösliche Cellulose als auch das vor allem im Hafer vorkommende wasserlösliche  $\beta$ -Glucan stellen ebenfalls lange Kettenmoleküle dar. Wie oben beschrieben können sich auch diese sowohl in sich selbst als auch mit den Nachbarmolekülen ineinander verknäulen. Erst durch die Krafteinwirkung entschlauften sie und richteten sich in Strömungsrichtung aus. Aber auch die Wechselwirkungen der einzelnen Moleküle und Partikel untereinander könnten dieses Verhalten erklären. Die sich bildenden Agglomerate in der Lösung wurden während der Messungen gelöst. Die hydrophilen als auch die lipophilen Wechselwirkungen waren nicht mehr stark genug, um während der Messung das Zusammenlagern der Partikel aufrecht zu erhalten. Erst bei sinkender Krafteinwirkung und nach den Messungen konnten sie sich wieder zu Agglomeraten aneinanderlagern.

Am Ende der Herstellung der Proben wurden diese zunächst durch ein 50  $\mu\text{m}$  Sieb gefiltert. Es zeigte sich hier, dass diese Filtration deutlich einfacher und schneller ging, als bei der Probe mit der Enzymbehandlung nur mit VF. Durch das Senken der Viskosität war dieser Produktionsschritt somit weniger zeitintensiv und die Produktion der Hafermilch könnte somit auch im Rahmen der Lebensmittelproduktion vereinfacht werden. Ein weiterer Vorteil der zweifachen Enzymbehandlung zeigte sich bei dem Abkühlen der Proben nach dem Abkochen. Diese blieben flüssig und zeigten keinen starken Anstieg der Viskosität. Selbst nach einer Lagerung über Nacht im Kühlschrank wiesen die Proben eine flüssige und nicht sämige Konsistenz auf. Die Stärke des Hafers war durch die Behandlungsschritte nun so weit aufgeschlossen, dass die Proben bei geringeren Temperaturen kein Gel mehr bildeten. Einzelne Glucosemoleküle oder kurze Glucoseketten (Oligosaccharide) waren nicht mehr in der Lage, solche Strukturen aufzubauen. In einer Produktionsanlage hätte dieses auch einen enormen Vorteil dargestellt, da die Hafermilch so auch noch im kalten Zustand durch Rohrsysteme hätte geleitet werden können. Es wäre somit nicht mehr zu einem Verstopfen oder Verkleistern von Anlagen gekommen.

Allerdings wiesen auch diese Proben noch Eigenschaften auf, die nicht bei einem pflanzlichen Milchersatz erwünscht sind. Zwar war das Mundgefühl besser, da die Proben nicht mehr zu dickflüssig waren und die Viskosität schon der einer Kuhmilch

oder einer erworbenen Hafermilch glich. Sowohl im kalten als auch im warmen Zustand wiesen sie keine sämige Konsistenz auf. Doch zeigte sich, dass noch ein schleimiges Mundgefühl vorhanden war. Dieses stellte einen Punkt dar, in dem sich die Proben noch stark von anderen Milchalternativen unterschieden. Jedoch stieg mit der zweiten Enzymbehandlung deutlich die Süße. Diese kam noch nicht ganz an die Süße einer Kuhmilch oder einer anderen pflanzlichen Alternativen heran, jedoch war sie um einiges höher als bei den Proben mit der Behandlung nur mit VF. Zusätzlich änderte sich der Geschmack der Proben. Diese wiesen nun nur noch ein leichtes Haferaroma auf und nicht mehr eines, welches an Haferflocken erinnerte. Es zeigte sich bei der Verkostung auch, dass bei diesen Hafermilchproben ebenfalls noch das gewünschte vollmundige Gefühl fehlte. Auch hier schien der Fettanteil des Hafers nicht auszureichen, um dieses einer Kuhmilch nachzuempfinden.

Durch die Versuche mit den Rheologiemessungen nach den Enzymbehandlungen mit VF und VZ zeigte sich, dass auch auf diesem Weg noch keine marktfähige Hafermilch vorlag. Zwar konnte die Viskosität noch einmal reduziert werden, jedoch war sie in den sensorischen Tests noch nicht ideal und nicht vergleichbar mit anderen pflanzlichen Alternativen. Vor allem das schleimige Mundgefühl war eine Eigenschaft, die weitere Behandlungen mit Enzymen voraussetzte. Positiv war, dass diese Produkte schon eine bessere Süße aufwiesen, so dass kein weiterer Zucker zu der Rezeptur hinzugefügt werden musste. Die Süße der Hafermilch könnte noch durch eine längere Behandlung oder die Zugabe einer größeren Menge an VZ angepasst werden.

2.2.3. Enzymatische Spaltung des  $\beta$ -Glucans

Es wurden die Proben nach der Behandlung mit den Lebensmittelenzymzubereitungen SCHLIESSMANN -VF- (VF), SCHLIESSMANN -VZ- (VZ) und SCHLIESSMANN EX-Tosan (ET) rheologisch in Rotation bei einer Scherrate von 0,1 bis 1000  $\text{s}^{-1}$  und einer konstanten Temperatur von 25 °C untersucht. Auf der y-Achse wurde die Viskosität in Pa·s gegenüber der Scherrate auf der x-Achse aufgetragen. Die Messungen wurden für eine Dreifachbestimmung mit drei verschiedenen Proben durchgeführt. Der aus ihnen berechnete Mittelwert und die Standardabweichung wurden in Abbildung 18 aufgetragen. Bei allen drei Messungen fiel die Viskosität mit steigender Scherrate zunächst ab, stieg dann bei den höheren Scherraten aber wieder an. Es kam zu keiner Überkreuzung der Kurven zwischen den einzelnen Kurven der Proben.

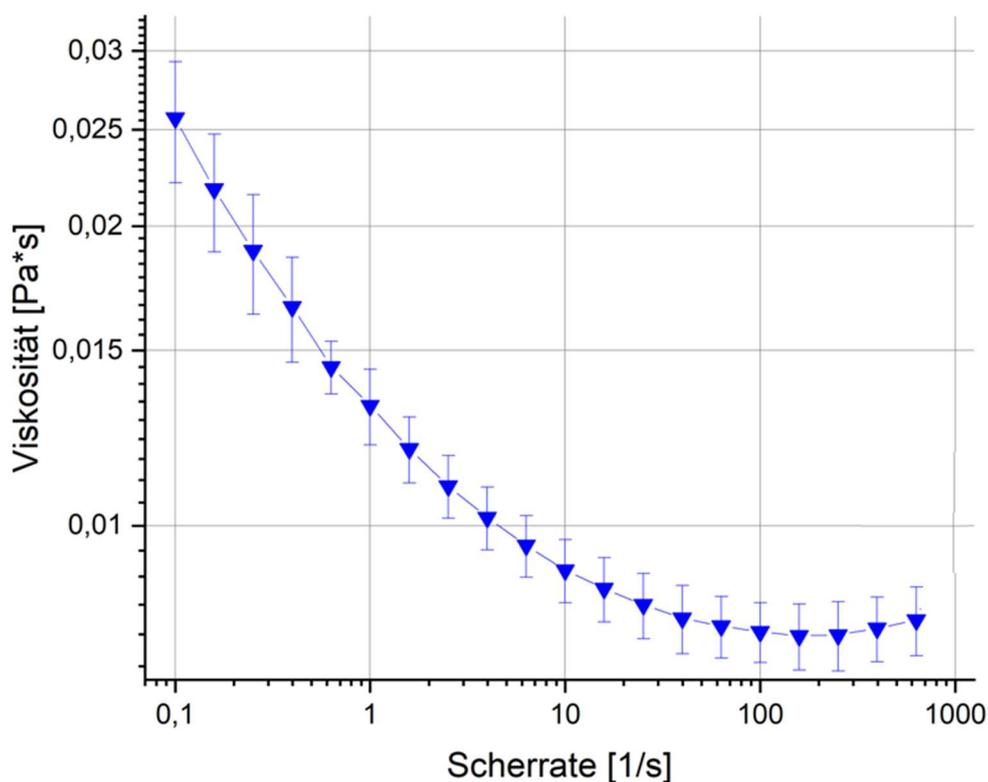


Abbildung 18: Mittelwert der Viskosität mit Standardabweichung der Proben nach Verflüssigung mit VF, Verzuckerung mit VZ und Behandlung mit ET

Die höchste Viskosität von  $0,0257 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  zeigte sich bei der geringsten Scherrate von  $0,1 \text{ s}^{-1}$ . Die Geringste von  $0,0078 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  lag bei einer Scherrate von  $158 \text{ s}^{-1}$  vor. Danach stieg die Viskosität wieder leicht an und lag bei einer Scherrate von  $631 \text{ s}^{-1}$  bei  $0,0082 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Es zeigte sich, dass die Viskosität jedoch nicht linear sank. Der stärkste Abfall der Viskosität war im Bereich einer Scherrate zwischen  $0,1 \text{ s}^{-1}$  und  $0,25 \text{ s}^{-1}$  zu erkennen. Sie sank in diesem Bereich von den  $0,0257 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  auf  $0,0189 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Der Wert bei einer Scherrate von  $1000 \text{ s}^{-1}$  wurde nicht dargestellt. Die Viskosität stieg hier von den  $0,0082 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  bei einer Scherrate von  $631 \text{ s}^{-1}$  sprunghaft auf  $0,0102 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  an. Grund hierfür könnte die geringe Viskosität der Proben darstellen. Durch die hohe Scherrate kann es bei Messungen von sehr geringen Viskositäten zu Fehlern durch das Trägheitsmoment des Instrumentes kommen [34]. Daher wurde dieser Wert bei der Darstellung ausgelassen.

ET als Lebensmittelenzymzubereitung enthielt mehrere Enzyme. Hierzu zählten als Hauptenzyme eine Cellulase,  $\beta$ -Glucanase und Pentosanase aus *Trichoderma spp.*. Als enzymatische Nebenaktivitäten waren auch noch Xylanasen und eine Protease enthalten. Diese Enzymzubereitung ist eigentlich für die Viskositätsverminderung bei der Verarbeitung schleimbildender, stärkehaltiger Rohstoffe in Brennereien vorgesehen. Im Brennvorgang in Destillieren stellen Schleimstoffe vor allem aus Roggen und Gerste ein großes Problem während der Herstellung dar. Hafer ist dafür bekannt, einen hohen Anteil an Ballaststoffe zu enthalten, die auch Schleimstoffe darstellen. Hierbei ist vor allem das  $\beta$ -Glucan zu nennen. Hafer weist unter den Getreidesorten den höchsten Gehalt auf. Während des Brennvorgangs in Destillieren wird das Produkt erhitzt, um den Alkohol zu destillieren. Durch den Temperaturanstieg kommt es jedoch in den Kesseln dazu, dass die vorhandenen Schleimstoffe anbrennen. In der Produktion einer Hafermilch stellt das Erhitzen für die Haltbarmachung ein unumgänglicher Schritt dar. Das Produkt für kurze Zeit auf eine hohe Temperatur erhitzen zu können, ohne die Anlagen durch Ablagerungen zu verunreinigen, stellt daher eine wichtige Produkteigenschaft dar. Der Hafer für die Proben hatte wahrscheinlich einen  $\beta$ -Glucan Gehalt von 3,9 bis 5,7 %. Dies stellt den Durchschnittsgehalt in dieser Getreideart dar [19]. Dabei hatte das  $\beta$ -Glucan im Durchschnitt etwa zu 30%  $\beta$ -1,3- und zu 40%  $\beta$ -1,4-glykosidische Verzweigungen [19]. Wie bereits in der Einleitung beschrieben, war die Löslichkeit des Ballaststoffs auch

hier von mehreren Faktoren abhängig. In Wasser mit einer Temperatur von 90 bis 100 °C hätte sich 60 bis 75 % lösen können [20]. Bei den geringeren Temperaturen der Probenherstellung war es somit weniger. Jedoch wurde genug gelöst, um diese als Schleimstoffe sensorisch wahrzunehmen. Durch die Behandlung der Proben mit ET konnte das enthaltene  $\beta$ -Glucan durch die  $\beta$ -Glucanase gespalten werden. Dieses Enzym spaltet die  $\beta$ -1,3- und  $\beta$ -1,4-Bindungen der Glucoseketten. Dieses hatte zur Folge, dass diese Polysaccharide hydrolytisch aufgebrochen wurden und nur noch kürzere Ketten aus Glucose oder freie Glucosemoleküle vorlagen. Durch dieses Aufbrechen sank die Viskosität noch ein weiteres Mal. Diese Veränderung zeigte sich auch durch die Messung der Partikelgrößen der Proben. Der Mittelwert der Partikelgrößenverteilung der Proben wurde in Abbildung 19 aufgezeichnet.

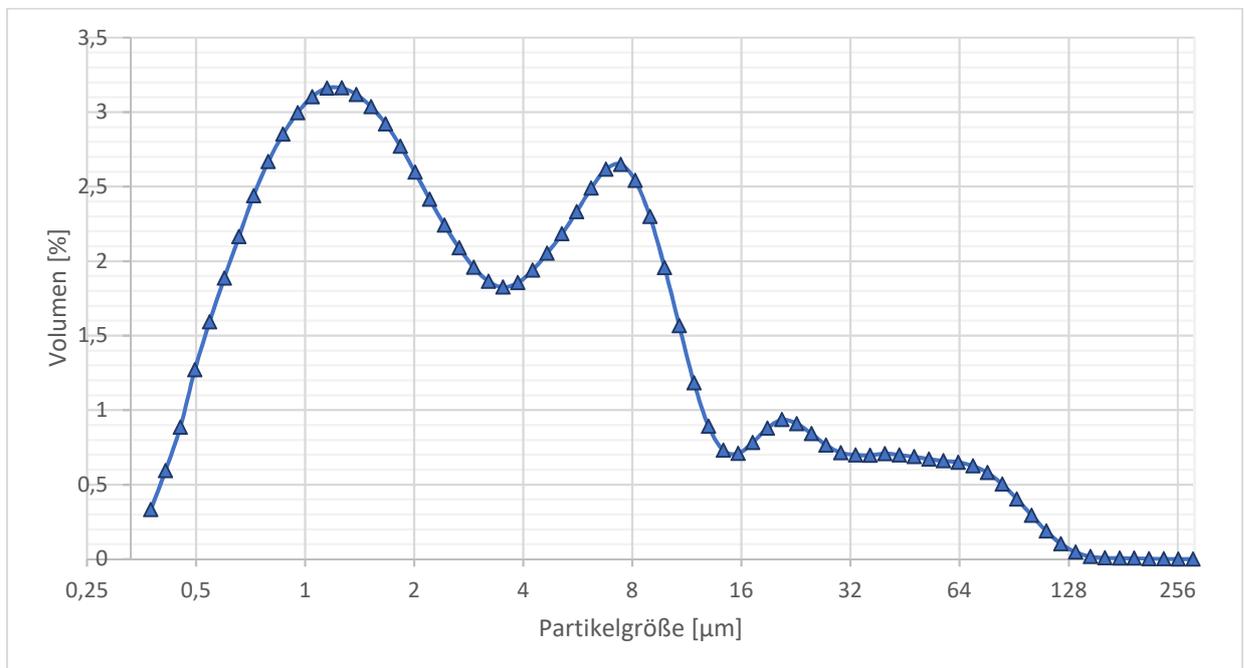


Abbildung 19: Mittelwert der Partikelgrößenverteilung der Haferproben nach enzymatischer Behandlung mit den Lebensmittelenzymzubereitungen VF, VZ und ET

Die meisten Partikel wiesen eine Größe von 1,38  $\mu\text{m}$  auf, da hier der höchste Peak bei einem Volumen von 3,16 % lag. Dies scheint auch auf die Behandlung mit  $\beta$ -Glucanase in ET zurückzuführen sein. Aber auch andere Ballaststoffe, die in dem Hafer vorlagen, konnten durch die Behandlung mit ET gespalten werden. Die in der Enzymzubereitung enthaltene Cellulase spaltete die in pflanzlichen Lebensmitteln enthaltene Cellulose. Pentosane sind Schleimstoffe und weisen auch ein hohes

Wasserbindungsvermögen auf. Die im Hafer enthaltenen Pentosane wurden somit durch die Pentosanase gespalten. Auch hierdurch kam es zu einem weiteren Abfall der Viskosität.

Auch die Proben nach der zusätzlichen enzymatischen Behandlung mit ET zeigten ein weiteres Mal ein nicht-idealviskoses Fließverhalten auf (siehe Abbildung 18). Die Viskosität war somit abhängig von der Scherrate und die Proben stellten bis zu einer Scherrate von  $158 \text{ s}^{-1}$  scherverdünnende Substanzen dar. Bei höherer Scherrate wiesen sie ein scherverdickendes Verhalten auf. Durch die Messungen mit dem Rheometer zeigten sich jetzt jedoch noch geringere Viskositäten als bei den Proben zuvor. Dies deutet darauf hin, dass nur noch geringe Mengen an verzweigten Polymeren oder Glucoseketten vorgelegen haben. Da durch die Behandlung mit VF, VZ und ET die meisten großen Polymere in den Proben aufgespalten wurden, wird das Fließverhalten zu größten Teilen darauf beruht haben, dass es sich bei den Proben um Dispersionen handelte. Zwar lagen auch noch vereinzelt verzweigte Polymere vor, jedoch wurden die Einflüsse von anderen Inhaltsstoffen auf die Viskosität immer größer. Hier sind nun vor allem die hafereigenen Proteine zu nennen. Diese können durch die Hitzeeinwirkungen denaturieren, aber auch Agglomerate bilden und so die Viskosität der Proben beeinflussen. In Abbildung 20 wurden die Mittelwerte der Viskositäten der Proben nach Behandlung mit VF und VZ sowie nach zusätzlicher Behandlung mit ET gegenübergestellt.

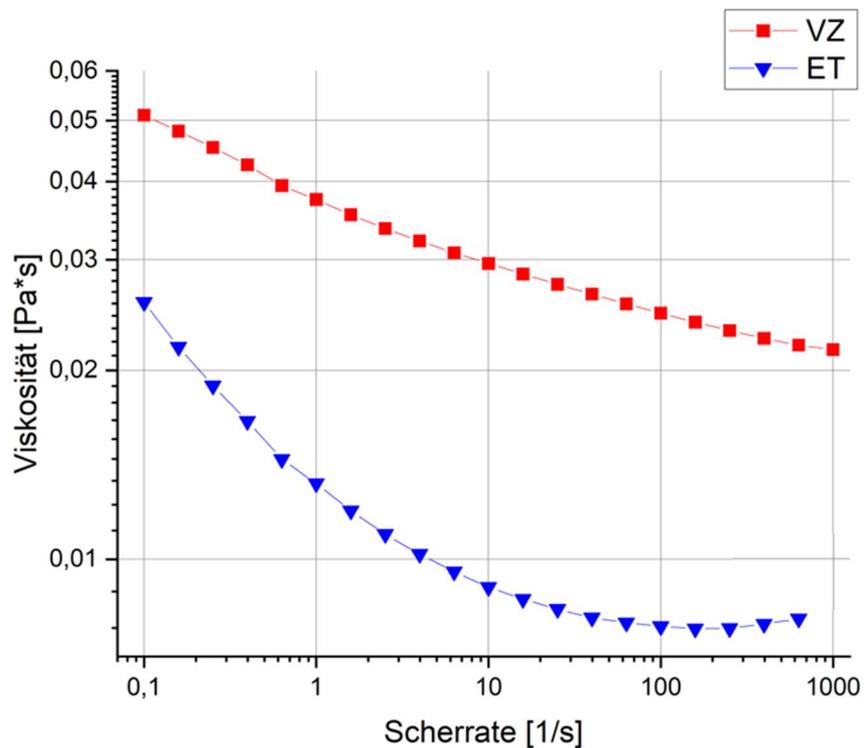
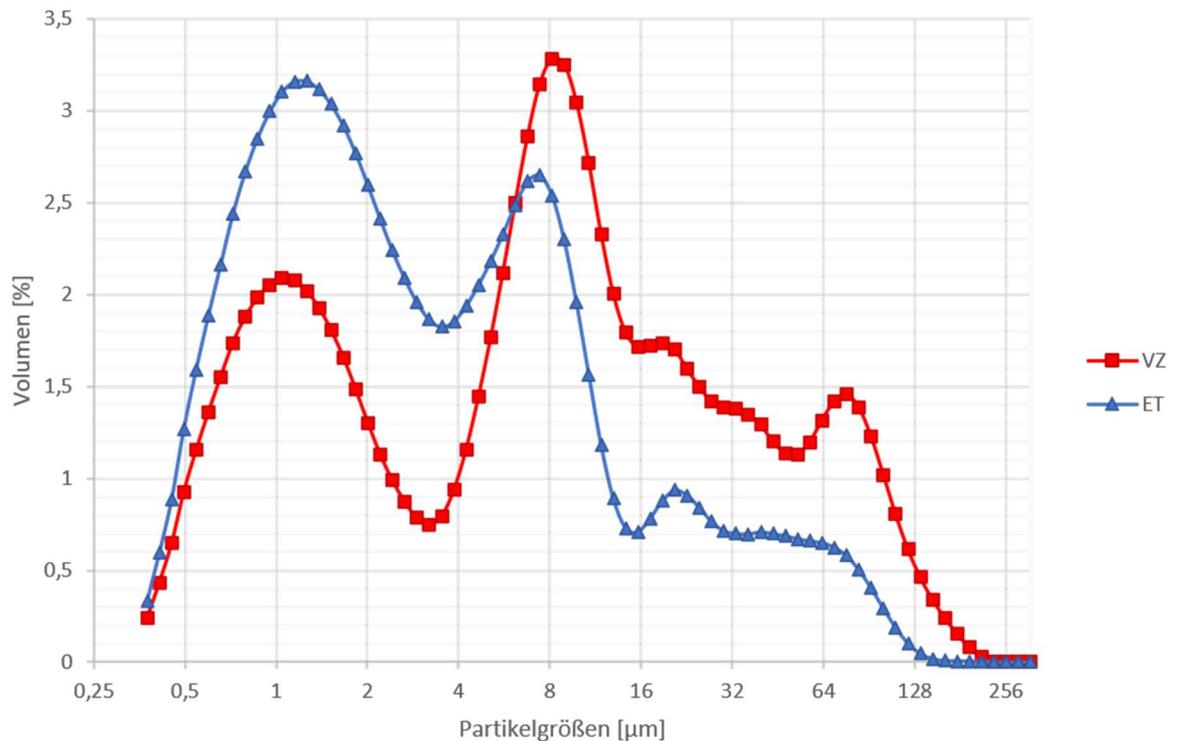


Abbildung 20: Vergleich der Viskosität der Probenmittelwerte. VZ: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF und VZ, ET: Mittelwert der Proben nach zusätzlicher Behandlung mit ET

Es zeigte sich, dass die Enzymbehandlung mit ET einen großen Effekt auf die Viskosität hatte. Nach der Behandlung nur bis VZ sank die Viskosität während der Messungen im Durchschnitt von 0,051 Pa·s bei einer Scherrate von 0,1 s<sup>-1</sup> auf 0,0219 Pa·s bei einer Scherrate von 631 s<sup>-1</sup>. Nach der zusätzlichen Behandlung mit ET sank die Viskosität bei gleichen Scherraten von 0,0257 Pa·s auf 0,0082 Pa·s. Dies verdeutlicht, dass in den Proben nach ET fast keine großen und langen Partikel mehr enthalten waren, die sich noch verschlaufen konnten. Nach VZ waren noch Ballaststoffe wie  $\beta$ -Glucan und Cellulose enthalten, die durch ET weiter aufgebrochen und somit verkürzt wurden. Daher kam es zu dieser weiteren Viskositätsabnahme der Hafermilchproben.



*Abbildung 21: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen der Probenmittelwerte. VZ: Mittelwert der Proben nach Verzuckerung mit VZ, ET: Mittelwert der Proben nach zusätzlicher Behandlung mit ET*

Vergleicht man nun auch die Partikelgrößen der beiden Behandlungen, so zeigten sich auch hier Veränderungen durch ET (siehe Abbildung 21). Durch die weitere Enzymbehandlung waren nun vor allem Partikel in einem Größenbereich von 0,4 bis etwa 4 µm in den Proben enthalten. Mehr als bei den Proben nach der Behandlung mit VZ. Dabei sank durch die Behandlung mit ET die Menge an Partikeln in einem Größenbereich von 4 bis 256 µm. Dies zeigt ein weiteres Mal, dass dies wahrscheinlich vor allem auf die Spaltung der Ballaststoffe zurückzuführen war. Die langen Polysaccharid-Ketten des  $\beta$ -Glucans und der Cellulose wurden durch die enzymatische Behandlung aufgebrochen. Es verbleiben entweder einzelne Glucosemoleküle oder Oligosaccharide aus wenigen Glucosebausteinen. Dadurch sank die Anzahl an großen Partikeln und die Anzahl an kleinen stieg an.

In den sensorischen Tests zeigte sich, dass durch die Behandlung mit ET das schleimige Mundgefühl verschwunden war. Die Proben glichen in diesem Punkt einer Kuhmilch oder einer erworbenen Hafermilch. Die Süße und das leichte Haferaroma

blieben vorhanden, wie nach den Behandlungen nur mit den Enzymzubereitungen VF und VZ. Jedoch fehlte weiterhin das vollmundige Gefühl, dass durch den Eigenfettanteil des Hafers nicht erzeugt werden konnte. Es musste somit noch ein Öl zugeführt werden, um diese Eigenschaft zu erreichen und eine passende Rezeptur zu entwickeln.

#### 2.2.4. Zugabe von Öl und Salz

Es wurden die Proben nach der Behandlung mit den Lebensmittelenzymzubereitungen SCHLIESSMANN -VF- (VF), SCHLIESSMANN -VZ- (VZ) und SCHLIESSMANN *EX-Tosan* (ET) rheologisch untersucht. Vor den Messungen wurden zu 225 g Probe jeweils 4,59 g Rapsöl (2 %) und 0,1 g Salz hinzugefügt und für 8 min bei 20.000 rpm homogenisiert. Die Rheologiemessungen erfolgten in Rotation bei einer Scherrate von 0,1 bis 1000 s<sup>-1</sup> und einer konstanten Temperatur von 25 °C. Auf der y-Achse wurde die Viskosität in Pa·s gegenüber der Scherrate auf der x-Achse aufgetragen. Die Messungen wurden für eine Dreifachbestimmung mit drei verschiedenen Proben durchgeführt. Der aus ihnen berechnete Mittelwert und die Standardabweichung wurden in Abbildung 22 aufgetragen. Bei allen drei Messungen fiel die Viskosität mit steigender Scherrate zunächst ab, stieg dann bei den höheren Scherraten aber wieder an. Es kam zu keiner Überkreuzung zwischen den einzelnen Kurven der Proben. Alle Proben wiesen somit ein identisches Verhalten der Viskosität während der Messungen auf.

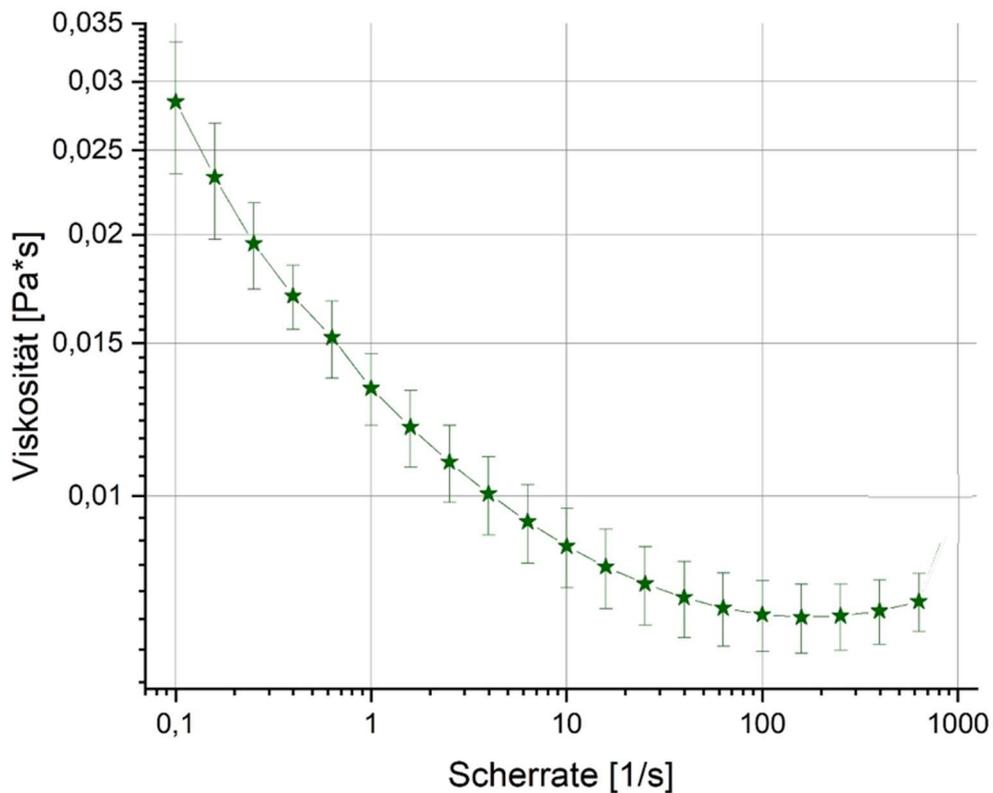
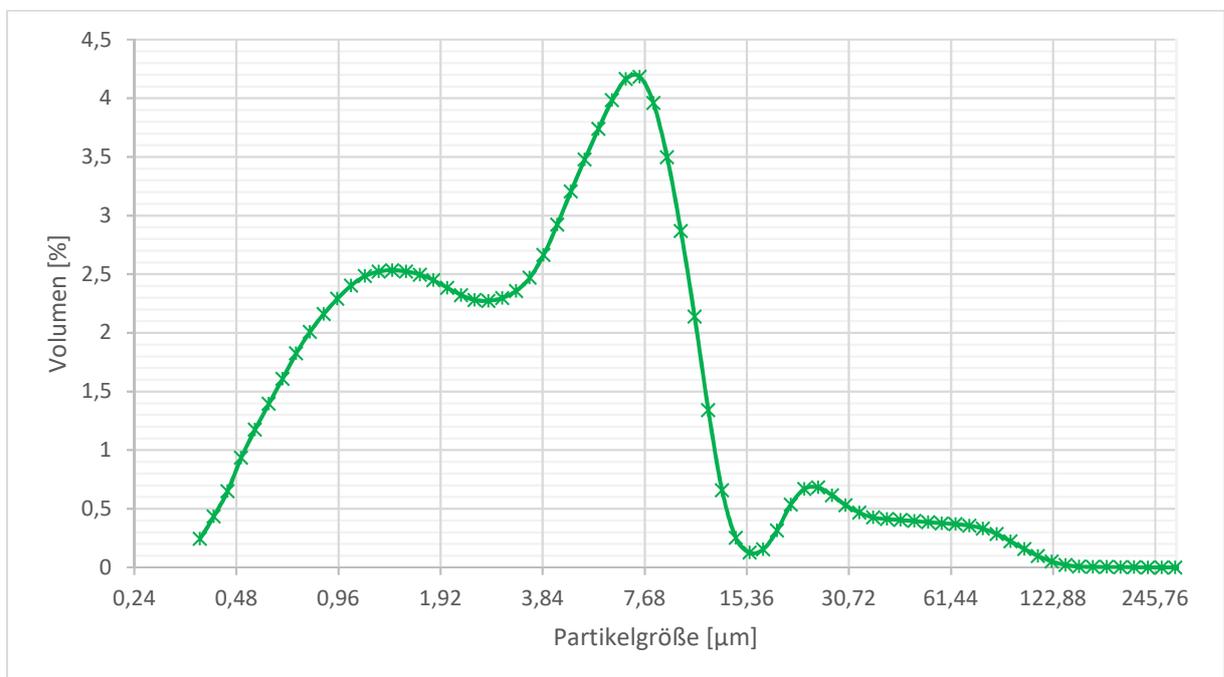


Abbildung 22: Mittelwert der Viskosität mit Standardabweichung der Proben nach Verflüssigung mit VF, Verzuckerung mit VZ, Behandlung mit ET und Zugabe von Öl und Salz

Die höchste Viskosität von 0,0284 Pa·s zeigte sich bei der geringsten Scherrate von 0,1 s<sup>-1</sup>. Die Geringste von 0,0073 Pa·s lag bei einer Scherrate von 158 s<sup>-1</sup> vor. Danach stieg die Viskosität wieder leicht an und lag bei einer Scherrate von 631 s<sup>-1</sup> bei 0,0076 Pa·s. Es zeigte sich, dass die Viskosität jedoch nicht linear sank. Der stärkste Abfall der Viskosität war im Bereich einer Scherrate zwischen 0,1 s<sup>-1</sup> und 0,25 s<sup>-1</sup> zu erkennen. Sie sank in diesem Bereich von den 0,0284 Pa·s auf 0,02 Pa·s. Der Wert bei einer Scherrate von 1000 s<sup>-1</sup> wurde nicht dargestellt. Die Viskosität stieg hier von den 0,0076 Pa·s bei einer Scherrate von 631 s<sup>-1</sup> sprunghaft auf 0,01 Pa·s an. Grund hierfür könnte die geringe Viskosität der Proben darstellen. Durch die hohe Scherrate kann es bei Messungen von sehr geringen Viskositäten zu Fehlern durch das Trägheitsmoment des Instrumentes kommen [34]. Daher wurde dieser Wert bei der Darstellung ausgelassen.

Um die gewünschten sensorischen Eigenschaften zu erreichen, wurden den Proben Rapsöl und Salz zugefügt. Da es das Ziel war, eine Rezeptur für eine schäumbarere Hafermilch zu entwickeln, wurden in vorherigen Tests die Auswirkungen der Zugabe dieser Inhaltsstoffe auf die Schaumeigenschaften untersucht. Hier zeigte sich im Voraus, dass die Schäumbarkeit der Milchalternative bei Zugabe von 4,59 g (2 %) Rapsöl und 0,1 g Salz auf ein Probengewicht von 225 g verbessert wurde. Ein wichtiger Schritt hierbei ist das Homogenisieren der Proben. Erst durch das Entstehen der kleinen Öltröpfchen und somit einer Emulsion konnte verhindert werden, dass das Öl in den Proben zu schnell wieder aggregiert. Hierfür wurden die Proben nach Zugabe von Rapsöl und Salz bei 20.000 rpm für 8 min homogenisiert. Der Mittelwert der Partikelgrößenverteilung der Proben wurde in Abbildung 23 aufgezeichnet.



*Abbildung 23: Mittelwert der Partikelgrößenverteilung der Haferproben nach enzymatischer Behandlung mit den Lebensmittelenzymzubereitungen VF, VZ und ET und Zugabe von Öl und Salz*

Nach dem Homogenisieren wiesen die Proben den höchsten Peak bei der Partikelgröße von 8,15 µm auf. Das Volumen lag hier bei 4,18 %. Es zeigte sich, dass die meisten Partikel dabei in einen Größenbereich unterhalb der 8,15 µm lagen.

Auch nach der Zugabe von Öl und Salz zeigten die Proben ein nicht-idealviskoses Fließverhalten auf (siehe Abbildung 22). Die Viskosität war somit abhängig von der

Scherrate und die Proben stellten bis zu einer Scherrate von  $158 \text{ s}^{-1}$  scherverdünnende Substanzen dar. Bei höherer Scherrate wiesen sie ein scherverdickendes Verhalten auf. Einen großen Einfluss auf die Viskosität wird hier vor allem das Rapsöl und das Salz gespielt haben. Das Salz hatte sich vollständig in den Proben gelöst. Jedoch hätten die Ionen  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$  sich an geladene Bestandteile der Proben anlagern und somit das Bilden von Agglomeraten und auch die Viskosität beeinflussen können. Mengenmäßig hätte jedoch das Rapsöl den größten Einfluss haben müssen. Bei einer Temperatur von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  weist Öl eine höhere Viskosität auf als Wasser [1]. Durch das Emulgieren des Öls in den Proben bildeten sich feine Öltröpfchen. Dieses könnte der Grund dafür sein, dass die Viskosität bei einer geringeren Scherrate leicht höher war als bei den Proben die mit VF, VZ und ET behandelt wurden, aber kein zusätzliches Öl enthielten. In Abbildung 24 wurden die Mittelwerte der Viskositäten der Proben nach Behandlung mit VF, VZ und ET mit und ohne Öl- und Salzzugabe gegenübergestellt.

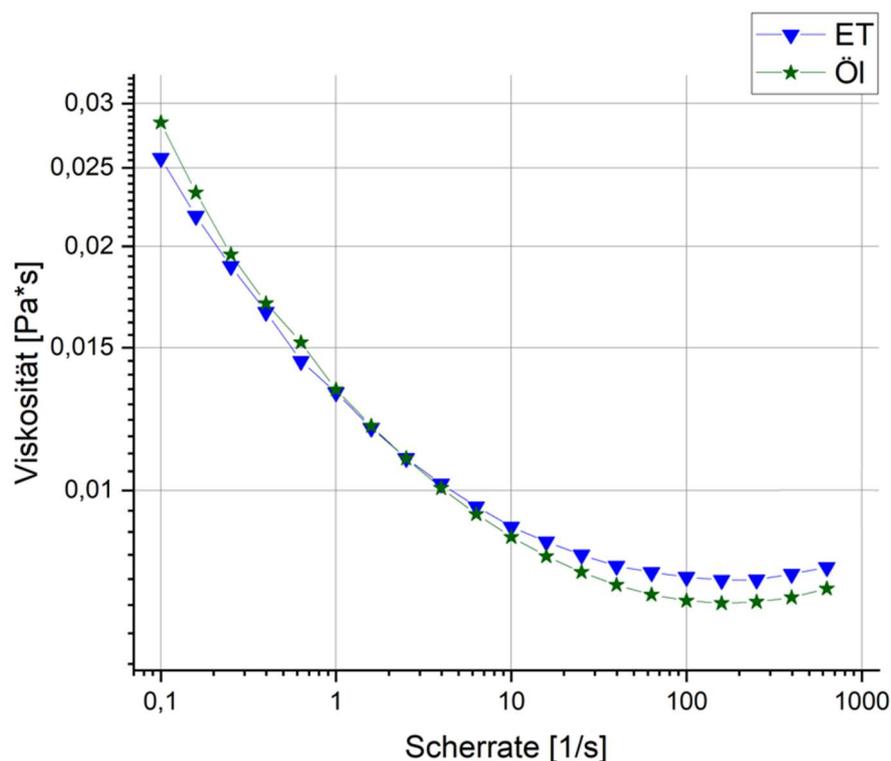


Abbildung 24: Vergleich der Viskosität der Probenmittelwerte. ET: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET, Öl: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET und Zugabe von Öl und Salz

Erst bei einer Erhöhung der Scherrate zeigte sich, dass die Kurven sich überschneiden und die Proben ohne Öl und Salz eine höhere Viskosität aufwiesen. Betrachtet man die einzelnen Messpunkte der beiden Probenmittelwerte so zeigte sich, dass der Schnittpunkt zwischen einer Scherrate von  $1,58 \text{ s}^{-1}$  und  $2,51 \text{ s}^{-1}$  lag (siehe Tabelle 1). Dabei sanken bei den Proben ohne Öl und Salz, hier „ET“ genannt, die Viskosität von  $0,01195 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  auf  $0,01097 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Bei den Proben mit Öl und Salz, hier „Öl“ genannt, sank die Viskosität von  $0,01201 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  auf  $0,01095 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

*Tabelle 1: Vergleich der Viskositäten der Probenmittelwerte. Überschneidung der Kurven zwischen einer Scherrate von  $1,58 \text{ s}^{-1}$  auf  $2,51 \text{ s}^{-1}$ .*

Scherrate [1/s]	Viskosität [Pa·s]	
	ET	Öl
1	0,013203	0,013316
1,58	0,011951	0,012011
2,51	0,010966	0,010953
3,98	0,010192	0,010067
6,31	0,009555	0,009351
10	0,009023	0,008762

Einen Grund für das Überschneiden der Kurven könnte das Rapsöl darstellen. Bei einer Scherrate von unter  $2,51 \text{ s}^{-1}$  waren die Öltröpfchen noch intakt und erhöhten so die Viskosität der Proben. Durch das Erhöhen der Scherrate wirkte eine höhere Scherkraft auf die Proben. Die Öltröpfchen richteten sich zwar in Scherrichtung aus, jedoch wurde die Krafteinwirkung auf sie so groß, dass sie auseinandergerissen wurden und sich immer kleiner Tröpfchen bilden konnten. Dadurch war der Einfluss des Rapsöls auf die Viskosität zu gering. Daher wiesen die Proben mit dem Öl bei einer Scherrate ab  $2,51 \text{ s}^{-1}$  eine geringere Viskosität auf, als die Proben ohne Öl. Durch Senken der Scherrate kam es wieder zu einer Bildung von Größeren Tröpfchen des Rapsöls und die Viskosität stieg wieder leicht über die der Proben ohne Öl.

Um den Einfluss von Öl und Salz auf die Partikelgrößen zu verdeutlichen, wurden die Mittelwerte der Proben mit einer Behandlung mit VF, VZ und ET mit und ohne Öl- und Salzzugabe in Abbildung 25 dargestellt.

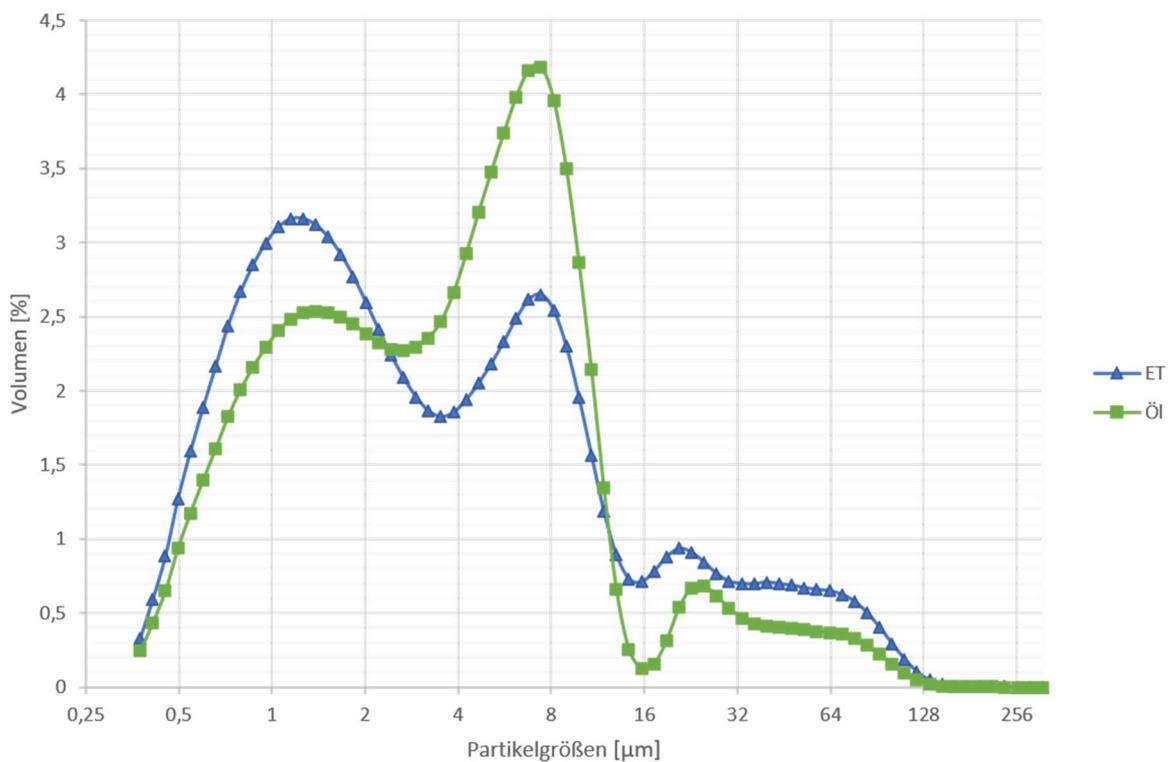


Abbildung 25: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen der Probenmittelwerte. ET: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET, Öl: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET und Zugabe von Öl und Salz

Die Proben ohne Öl und Salz wiesen mehr Partikel in einem Bereich von  $< 2,66 \mu\text{m}$  und  $> 12,99 \mu\text{m}$  auf. Die Proben mit Öl und Salz wiesen jedoch vor allem Partikel in einem Größenbereich von  $2,66$  bis  $12,99 \mu\text{m}$  auf. In diesem Bereich lag auch der Peak, der bei einer Partikelgröße von  $8,15 \mu\text{m}$  ein Volumen von über  $4,18 \%$  zeigte. Dies könnte daran liegen, dass hier vor allem die Öltröpfchen aufzufinden waren. Diese könnten hydrophobe Bestandteile der Hafermilch an sich gelagert haben. Hierzu könnten lipophile Abschnitte von den Haferproteinen zählen, aber auch das hafer eigene Öl und andere Zellpartikel. Zusätzlich könnten andere Agglomerate aus Bestandteilen des Hafers sich hier mit Hilfe des Kochsalzes gebildet haben.

In den sensorischen Tests zeigte sich, dass durch die Zugabe des Rapsöls und des Salzes die gewünschten Eigenschaften erreicht wurden. Die Zugabe des Salzes machte die Hafermilch nicht salzig im Geschmack. Es unterstrich jedoch leicht die Süße der Milchalternative positiv. In vorherigen Tests zeigte sich auch, dass durch die Zugabe von Öl und Salz die Schäumbarkeit der Hafermilch verbessert wurde. Die Proben glichen schon sehr gekauften pflanzlichen Milchalternativen. Auch das Rapsöl änderte die sensorischen Eigenschaften der Proben. Das Rapsöl selbst war neutral und verfälschte somit nicht den Geschmack der Hafermilch. Jedoch wurde durch die Zugabe vor allem das vollmundige Gefühl deutlich verbesserte. Dieses glich bereits anderen pflanzlichen Alternativen, jedoch kam es immer noch nicht an das Mundgefühl einer Kuhmilch heran. Dieses könnte jedoch noch einmal durch das Zufügen von mehr Öl verbessert werden. Um jedoch dann die Schäumbarkeit der Hafermilch zu gewährleisten, müsste auch die Menge an verwendetem Hafer angepasst werden. Zusätzlich wäre es sinnvoll, die Rezeptur in einer richtigen Produktionsanlage zu testen, um so die einzelnen Produktionsschritte anzupassen und die endgültige Rezeptur zu erhalten.

### 3. Zusammenfassung

Durch die Durchführungen der Tests konnte eine Rezeptur für eine schäumbare Hafermilch entwickelt werden. Dabei stellte der Einsatz von Enzymen einen wichtigen Verarbeitungsschritt dar. Durch die Messungen konnten so die gewünschten physikalischen und sensorischen Eigenschaften untersucht und die Rezeptur angepasst werden.

Die Haferproben ohne eine enzymatische Behandlung wiesen die Eigenschaften auf, bei ansteigenden Temperaturen ihre Viskosität stark zu erhöhen. Bei einer Temperatur von 90 °C lag die Viskosität bei 0,0702 Pa·s. Durch den Einsatz der Lebensmittelenzymzubereitung VF, die  $\alpha$ -Amylase enthielt, konnte diesem bereits teilweise entgegengewirkt werden. Die Stärke wurde durch das Enzym an den  $\alpha$ -1,4-glykosidischen Bindungen gespalten. Die geringste Viskosität von 0,061 Pa·s konnte hier im Mittel bei einer Scherrate von 1000 s<sup>-1</sup> rheologisch gemessen werden. Um jedoch auch noch die gewünschten sensorischen Eigenschaften wie Süße und Konsistenz zu erreichen, wurden weitere Enzyme angewendet. Durch die Anwendung der Lebensmittelenzymzubereitung VZ, die  $\alpha$ -Amylase und Glucanase enthielt, konnte die Viskosität noch ein weiteres Mal deutlich gesenkt werden. Die  $\alpha$ -1,4- und die  $\alpha$ -1,6-glykosidischen Bindungen der Stärke wurden gespalten. Die geringste Viskosität von 0,022 Pa·s lag hier bei einer Scherrate von 1000 s<sup>-1</sup>. Durch diese Anwendung zeigten die Proben nach dem Erhitzungsvorgang zur Haltbarmachung bei sinkenden Temperaturen kein sichtbares Andicken mehr und blieben flüssig. Sensorisch wiesen sie bereits die gewünschte Süße auf. Um jedoch das schleimige Mundgefühl zu beseitigen, wurde eine weitere enzymatische Behandlung angewendet. Die Lebensmittelenzymzubereitung ET enthielt hierfür Cellulase und  $\beta$ -Glucanase. Dadurch konnten die im Hafer vorhandenen Ballaststoffe hydrolytisch gespalten werden. Es kam zu einem weiteren Absenken der Viskosität, die geringste Viskosität von 0,0078 Pa·s wurde bei einer Scherrate von 158 s<sup>-1</sup> gemessen. Die Hafermilch wies somit nun die gewünschte Süße und kein schleimiges Mundgefühl auf. Um jedoch das vollmundige Gefühl zu erreichen, wie es eine Kuhmilch oder andere pflanzliche Alternativen aufweisen, wurde den Proben noch Öl und Salz hinzugefügt. Auf ein Probengewicht von 225 g wurden 4,59 g Rapsöl (2 %) und 0,1 g Salz durch Homogenisierung zugefügt. Es bildete sich eine Emulsion. Die Viskosität änderte sich

## Zusammenfassung

nun nur noch geringfügig, die niedrigste Viskosität von  $0,0073 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  wurde bei einer Scherrate von  $158 \text{ s}^{-1}$  gemessen. Sensorisch verbesserte sich hierdurch das Mundgefühl der Milchalternative. Die Proben mit Rapsöl und Salz waren vollmundiger als die Proben ohne die Zusätze.

Ziel der Masterthesis war es, eine Rezeptur für eine schäumbare Hafermilch zu entwickeln, ohne die Zugabe von Zusätzen wie Dikaliumphosphat. Dies konnte durch die Verwendung der verschiedenen Enzyme unter Laborbedingungen erreicht werden. Um eine marktfähige Hafermilch zu entwickeln, wäre nun die Herstellung in einer Produktionsanlage notwendig. Hier könnten die Herstellungsschritte überarbeitet und die Einwirkzeit der Enzyme angepasst werden. Zusätzlich könnte durch die Erhöhung des Öl-Anteils ein vollmundigeres Produkt entwickelt werden. Hier müsste nur darauf geachtet werden, dass die Schäumbarkeit des Produktes erhalten bleibt. Auch der Haferanteil könnte noch erhöht werden, um das Mundgefühl zu verbessern. Die vorliegende Rezeptur kann somit als Grundrezept weiterentwickelt und auf die gewünschten Eigenschaften hin abgeändert werden.

#### 4. Experimenteller Teil

##### 4.1. Material und Methodische Beschreibung der Zutaten

##### 4.1.1. Geräte und Software

*Tabelle 2: Auflistung aller verwendeten Geräte und Software*

Geräte und Software	Firma	Herkunft
Analysensieb, Maschenweite: 50 µm, Edelstahl	Linker Industrie-Technik	Bunsenstraße 200, D-34127 Kassel
Einstechthermometer, wasserdicht	Testo SE & Co.KGaA	Celsiusstraße 2, D-79822 Titisee-Neustadt
Eppendorf Pipetten Research plus 0,5-10 µL und 10-100 µL	Eppendorf AG	Barkhausenweg 1, D-22339 Hamburg
Fisherbrand® 600 ml Becherglas	Fisher Scientific GmbH	Im Hellen Feld 17, D-58239 Schwerte
Laser Diffraction Particle Size Analyzer LS 13 320	Beckmann Coulter, Inc.	250 South Kraemer Boulevard, Brea, California 92821-6232, USA
Magnetrührer mit Heizung RET control-visc	IKA®-Werke GmbH & CO. KG	Janke & Kunkel Str. 10, D-79219 Staufen
OriginPro 2021	OriginLab Corporation	One Roundhouse Plaza, Suite 303, Northampton, MA 01060, USA

Experimenteller Teil

Microsoft Excel 2019	Microsoft Corporation	One Microsoft Way, Redmond, WA 98052- 6399, USA
Präzisionswaage LS4200C SCS	Precisa Gracimetrics AG	Moosmattstrasse 32, CH-8953 Dietikon
Rheometer Discovery HR-3	TA Instruments	159 Lukens Drive, New Castle, DE 19720
S 25 EC-T-C-18G ST Dispergierwerkzeug	IKA®-Werke GmbH & CO. KG	Janke & Kunkel Str. 10, D-79219 Staufen
Software Partikelmesser: Beckman Coulter Particle Characterization, Version 6.01, Nov. 2009	Beckman Coulter GmbH	Europark Fichtenhain B13, D-47807 Krefeld
Software Rheometer: Gemini200	Malvern Instruments	Grovenwood Road, Malvern, WR14 1XZ, United Kingdom
T 25 easy clean control ULTRA-TURRAX Hochleistungsdispergiergerät mit Temperaturkontrolle	IKA®-Werke GmbH & CO. KG	Janke & Kunkel Str. 10, D-79219 Staufen
Thermomix	Vorwerk Deutschland Stiftung & Co. KG	Mühlenweg 17-37, D- 42270 Wuppertal

#### 4.1.2. Charakterisierung der Rohmaterialien

Hafer:

Für die Herstellung der Hafermilch wurde der entspelzte Hafer von der Firma „Davert“ verwendet. Der Hafer stammt aus deutschem, kontrolliert biologischem Anbau. Dieser ist mindestens bis zum 31.07.2022 haltbar. Die Nährwerte sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

*Tabelle 3: Durchschnittliche Nährwertangaben pro 100g (Midsona Deutschland GmbH)*

Energie	1.468 kJ / 349 kcal
Fett	7,1 g
- davon gesättigte Fettsäuren	1,5 g
Kohlenhydrate	56 g
- davon Zucker	1,1 g
Ballaststoffe	9,7 g
Eiweiß	11 g
Salz	0,02 g

## Experimenteller Teil

### Rapsöl:

Als Pflanzenöl wurde das Rapsöl der Firma „Rapso“ verwendet. Dieses wird zu 100% aus österreichischem Raps gepresst (nicht extrahiert) und schonend physikalisch raffiniert. Das Rapsöl ist mindestens bis September 2021 haltbar. Die Nährwerte sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.

*Tabelle 4: Durchschnittliche Nährwertangaben pro 100 ml (Rapso Österreich GmbH)*

Brennwert	3.386 kJ / 824 kcal
Fett	92 g
- davon gesättigte Fettsäuren	6 g
- einfach ungesättigte Fettsäuren	59 g
- mehrfach ungesättigte Fettsäuren	27 g
Kohlenhydrate	0 g
- davon Zucker	0 g
Eiweiß	0 g
Salz	0 g
Vitamin E**	27,5 mg

\*\* natürliches Vitamin E

### Salz:

Als Salz wurde das Ur-Salz der Firma „Erntesege“ verwendet. Hierbei handelt es sich um ein naturbelassenes unbehandeltes Steinsalz ohne Rieselhilfe und Jodzugabe. Bei sachgerechter Lagerung ist dieses unbegrenzt haltbar.

Experimenteller Teil

$\beta$ -Glucan:

Für den  $\beta$ -Glucan-Zusatz wurde PromOat Beta-Glucan der Firma „Landmänner Oats“ verwendet. Hierbei handelt es sich um eine lösliche Haferkleie-Faser, die aus Vollkornhafer gewonnen wird. Der -Glucan-Gehalt beträgt 34 % (+/- 2 %).

Enzyme:

Für die enzymatische Behandlung der Hafermilch wurden drei Enzyme der Firma „C. Schliessmann Kellerei-Chemie GmbH & Co.KG“ verwendet. Grund für die Produkte dieses Unternehmens waren, dass zum einen die Enzyme auch für die Produktion von „Bio-Lebensmitteln“ zugelassen sind. Zum anderen enthalten die Enzyme keine Roh- und Hilfsstoffe tierischer Herkunft. Somit war sicher, dass die hergestellte Hafermilch biologisch und vegan hergestellt wurde.

SCHLIESSMANN -VF-

Laut Hersteller handelt es sich um eine Lebensmittelenzym-Zubereitung ( $\alpha$ -Amylase, IUB 3.2.1.1) aus *Bacillus subtilis* für die Bereitung von Brennmaische aus einheimischem Getreide. Sie dient der enzymatischen Verflüssigung der verkleisterten Stärke bei Vermaischung stärkehaltiger Rohstoffe. Die  $\alpha$ -Amylase wirkt optimal bei pH-Werten zwischen 6,0 und 6,5 und im Temperaturbereich zwischen 65 und 75 °C. Laut den technischen Informationen und Gebrauchshinweisen des Herstellers stimmt dies mit der Verkleisterungstemperatur der Stärke von Hafern überein.

Laut Anwendungszweck / Wirkung bewerkstelligt SCHLIESSMANN -VF- zeitgleich mit der thermischen Verkleisterung der Getreidestärke auch deren enzymatische Verflüssigung (Verflüssigungsrast). Dadurch vermindert sich zum einen die Viskosität der Maische. Zum anderen ist die Voraussetzung für die anschließende Verzuckerung die Verflüssigung der Stärke.

Die Dosierung laut Hersteller liegt bei ca. 20 ml / 100 kg Getreide. Die Lebensmittelenzym-Zubereitung darf nicht über 75 °C erhitzt werden. Bei kühler

## Experimenteller Teil

Lagerung bei 4 bis 6 °C ist die Enzymaktivität für mindestens 18 Monate gewährleistet. Die Durchschnittsanalyse ist in Tabelle 5 aufgelistet.

*Tabelle 5: Durchschnittsanalyse für SCHLIESSMANN -VF- (C. Schliessmann Kellerei-Chemie GmbH & Co.KG)*

amylotische Aktivität	> 40.000 RAU / ml
Dichte (kg/L)	1,1 – 1,2
Schwermetalle, gesamt (ppm)	< 30
Blei (ppm)	< 5
Arsen (ppm)	< 1
aerobe Gesamtzahl (pro ml)	< 5 x 10 <sup>4</sup>
Coliforme Keime (pro ml)	< 30
Escherichia coli (pro 25 g)	Keine
Salmonella ssp. (pro 25 g)	Keine

## SCHLIESSMANN -VZ-

Hierbei handelt es sich um eine Lebensmittelenzym-Zubereitung (Glucoamylase, IUB 3.2.1.3;  $\alpha$ -Amylase, IUB 3.2.1.1; Protease, IUB 3.4.2x.xx) aus *Aspergillus niger* für die Bereitung stärkehaltiger Brennmaischen. Sie dient der enzymatischen Verzuckerung der verflüssigten Stärke bei der Vermaischung stärkehaltiger Rohstoffe. SCHLIESSMANN -VZ- hat ein Temperaturoptimum von 35 bis 55 °C und ein pH-Optimum von 4,5 bis 5,0.

## Experimenteller Teil

Laut Anwendungszweck /Wirkung sorgt die Nebenaktivität der  $\alpha$ -Amylase für eine zusätzliche Verflüssigung restlicher Stärkekleister. Die enthaltene Protease verhindert eine übermäßige Schaumbildung, die bei Brennvorgängen hinderlich sind.

Die Dosierung laut Hersteller liegt bei ca. 50 ml / 100 kg Getreide. Die Lebensmittelenzym-Zubereitung sollte optimal bei Temperaturen zwischen 50 und 55 °C zugefügt werden. Es muss dabei keine Verzuckerungsrast eingehalten werden. Bei kühler Lagerung bei 4 bis 6 °C ist die Enzymaktivität für mindestens 18 Monate gewährleistet. Die Durchschnittsanalyse ist in Tabelle 6 aufgelistet.

*Tabelle 6: Durchschnittsanalyse für SCHLIESSMANN -VZ- (C. Schliessmann Kellerei-Chemie GmbH & Co.KG)*

Dichte (g/ml)	1,0 - 1,2
amylotische Aktivität (AMG/g)	> 360
Schwermetalle, gesamt (ppm)	< 30
Blei (ppm)	< 5
Arsen (ppm)	< 1
aerobe Gesamtzahl (pro ml)	< 5 x 10 <sup>4</sup>
Schimmelpilze (pro ml)	< 10 <sup>3</sup>
Coliforme Keime (pro ml)	< 30
Escherichia coli (pro 25 g)	Keine
Salmonella ssp. (pro 25 g)	Keine

SCHLIESSMANN *EX-Tosan*

Laut Hersteller handelt es sich um eine Lebensmittelenzym-Zubereitung (enzymatische Hauptaktivitäten: Cellulase (IUB 3.2.1.4),  $\beta$ -Glucanase (IUB 2.3.1.6), Pentosanase; enzymatische Nebenaktivitäten: Xylanasen, Protease) aus *Trichoderma spp.* für die Viskositätsverminderung bei der Verarbeitung schleimbildender, stärkehaltiger Rohstoffe in Brennereien. Das Temperaturoptimum liegt bei 40 bis 70 °C und das pH-Optimum bei 4,5 bis 6,5.

Laut Anwendungszweck/Wirkung spaltet SCHLIESSMANN *EX-Tosan*  $\beta$ -Glucane, Pentosane sowie weitere Schleimstoffe.

Die Dosierung laut Hersteller liegt bei 15-20 ml / 100 kg Getreide. Die Lebensmittelenzym-Zubereitung darf nicht über 75 °C erhitzt werden. Bei kühler Lagerung bei 4 bis 6 °C ist die Enzymaktivität für mindestens 18 Monate gewährleistet. Die Durchschnittsanalyse ist in Tabelle 7 aufgelistet.

*Tabelle 7:* Durchschnittsanalyse für SCHLIESSMANN -VZ- (C. Schliessmann Kellerei-Chemie GmbH & Co.KG)

Cellulase-Aktivität (CX/g)	> 75.000
Dichte (g/ml bei 20 °C)	1,1 – 1,2
Schwermetalle, gesamt (ppm)	< 30
Blei (ppm)	< 5
Arsen (ppm)	< 1
aerobe Gesamtzahl (pro ml)	< 5 x 10 <sup>4</sup>
Schimmelpilze (pro ml)	< 10 <sup>3</sup>
Coliforme Keime (pro ml)	< 30
Escherichia coli (pro 25 g)	Keine
Salmonella ssp. (pro 25 g)	Keine

### 4.1.3. Rezeptur – Herstellungsprozess

#### 4.1.3.1. Stärkeverkleisterung

60 g Hafer wurden abgewogen und mit 490 ml Wasser für 2,5 min auf Stufe 9 in einem Thermomix fein zerkleinert. Die Temperatur nach der Prozedur betrug 34,8 °C. Es wurde nicht 10 min gemixt, damit die Probe nicht zu warm wurde. Die Mixtur wurde durch ein 50 µm Analysensieb gefiltert und bis zur Messung im Kühlschrank gelagert.

#### 4.1.3.2. Verflüssigung

60 g Hafer wurden mit 490 ml Wasser für 10 min auf Stufe 9 in einem Thermomix (Vorwerk Deutschland Stiftung & Co. KG, Mühlenweg 17-37, D-42270 Wuppertal) fein zerkleinert. Die Hafermischung wurde in ein 600 ml Becherglas mit einem Magnetrührstäbchen gegeben. Auf einem Magnetrührer RET control-visc (IKA®-Werke GmbH & CO. KG, Janke & Kunkel Str. 10, D-79219 Staufen) wurde diese mit einer Drehzahl von 1200 rpm unter ständigem Rühren auf 70 °C erhitzt. Nun wurden 10 µl der Enzymzubereitung VF hinzugegeben und bei konstanter Temperatur 90 min einwirken gelassen. Anschließend wurde die Heizplatte abgeschaltet und die Probe wurde für weitere 10 min gerührt. Die Probe wurde dann durch ein 50 µm Analysensieb gefiltert. Anschließend wurde sie, zur Deaktivierung der Enzyme, aufgekocht. Es wurde mit Wasser auf 450 g wieder aufgefüllt um das verdampfte Wasser zu kompensieren. 225 g der Probe wurde dann mit einem T 25 easy clean control ULTRA-TURRAX Hochleistungsdispergiergerät der Firma IKA (IKA®-Werke GmbH & Co. KG, Janke & Kunkel Str. 10, D-79219 Staufen) bei 20.000 rpm für 8 min homogenisiert. Bis zur Messung wurde die Probe im Kühlschrank gelagert.

#### 4.1.3.3. Verzuckerung

60 g Hafer wurden mit 490 ml Wasser für 10 min auf Stufe 9 in einem Thermomix (Vorwerk Deutschland Stiftung & Co. KG, Mühlenweg 17-37, D-42270 Wuppertal) fein zerkleinert. Die Hafermischung wurde in ein 600 ml Becherglas mit einem Magnetrührstäbchen gegeben. Auf einem Magnetrührer RET control-visc (IKA®-Werke GmbH & CO. KG, Janke & Kunkel Str. 10, D-79219 Staufen) wurde diese mit einer Drehzahl von 1200 rpm unter ständigem Rühren auf 70 °C erhitzt. Nun wurden 10 µl der Enzymzubereitung VF hinzugegeben und bei konstanter Temperatur 45 min einwirken gelassen. Danach wurden 50 µl der Enzymzubereitung VZ hinzugegeben und für weitere 45 min bei max. 70 °C einwirken gelassen. Die Heizplatte wurde abgeschaltet und die Probe für weitere 10 min gerührt. Diese wurde dann durch ein 50 µm Analysensieb gefiltert. Anschließend wurde die Probe zur Deaktivierung der Enzyme aufgekocht. Es wurde mit Wasser auf 450 g wieder aufgefüllt um das verdampfte Wasser zu kompensieren. 225 g der Probe wurde dann mit einem T 25 easy clean control ULTRA-TURRAX Hochleistungsdispergiergerät der Firma IKA (IKA®-Werke GmbH & Co. KG, Janke & Kunkel Str. 10, D-79219 Staufen) bei 20.000 rpm für 8 min homogenisiert. Bis zur Messung wurde die Probe im Kühlschrank gelagert.

#### 4.1.3.4. β-Glucan

60 g Hafer wurden mit 490 ml Wasser für 10 min auf Stufe 9 in einem Thermomix (Vorwerk Deutschland Stiftung & Co. KG, Mühlenweg 17-37, D-42270 Wuppertal) fein zerkleinert. Die Hafermischung wurde in ein 600 ml Becherglas mit einem Magnetrührstäbchen gegeben. Auf einem Magnetrührer RET control-visc (IKA®-Werke GmbH & CO. KG, Janke & Kunkel Str. 10, D-79219 Staufen) wurde diese mit einer Drehzahl von 1200 rpm unter ständigem Rühren auf 70 °C erhitzt. Nun wurden 10 µl der Enzymzubereitung VF hinzugegeben und bei konstanter Temperatur 45 min einwirken gelassen. Danach wurden 50 µl der Enzymzubereitung VZ hinzugegeben und für weitere 45 min bei max. 70 °C einwirken gelassen. Die Heizplatte des

Magnetrührers wurde abgeschaltet. Nach 5 min wurden 10 µl der Enzymzubereitung ET hinzugegeben und weitere 5 min einwirken gelassen. Die Probe wurde dann durch ein 50 µm Analysensieb gefiltert. Anschließend wurde die Mischung zur Deaktivierung der Enzyme aufgekocht. Es wurde mit Wasser auf 450 g wieder aufgefüllt um das verdampfte Wasser zu kompensieren. 225 g der Probe wurde dann mit einem T 25 easy clean control ULTRA-TURRAX Hochleistungsdispergiergerät der Firma IKA (IKA®-Werke GmbH & Co. KG, Janke & Kunkel Str. 10, D-79219 Staufen) bei 20.000 rpm für 8 min homogenisiert. Bis zur Messung wurde die Probe im Kühlschrank gelagert.

#### 4.1.3.5. Zugabe Öl und Salz

60 g Hafer wurden mit 490 ml Wasser für 10 min auf Stufe 9 in einem Thermomix (Vorwerk Deutschland Stiftung & Co. KG, Mühlenweg 17-37, D-42270 Wuppertal) fein zerkleinert. Die Hafermischung wurde in ein 600 ml Becherglas mit einem Magnetührstäbchen gegeben. Auf einem Magnetührer RET control-visc (IKA®-Werke GmbH & CO. KG, Janke & Kunkel Str. 10, D-79219 Staufen) wurde diese mit einer Drehzahl von 1200 rpm unter ständigem Rühren auf 70 °C erhitzt. Nun wurden 10 µl der Enzymzubereitung VF hinzugegeben und bei konstanter Temperatur 45 min einwirken gelassen. Danach wurden 50 µl der Enzymzubereitung VZ hinzugegeben und für weitere 45 min bei max. 70 °C einwirken gelassen. Die Heizplatte des Magnetührers wurde abgeschaltet. Nach 5 min wurden 10 µl der Enzymzubereitung ET hinzugegeben und weitere 5 min einwirken gelassen. Die Probe wurde dann durch ein 50 µm Analysensieb gefiltert. Anschließend wurde diese zur Deaktivierung der Enzyme aufgekocht. Es wurde mit Wasser auf 450 g wieder aufgefüllt, um die durch Verdampfung verlorengegangene Flüssigkeit auszugleichen. 225 g der Probe wurde dann nach Zugabe von 2 % (4,59 g) Rapsöl und 0,1 g Salz mit einem T 25 easy clean control ULTRA-TURRAX Hochleistungsdispergiergerät der Firma IKA (IKA®-Werke GmbH & Co. KG, Janke & Kunkel Str. 10, D-79219 Staufen) bei 20.000 rpm für 8 min homogenisiert. Bis zur Messung wurde die Probe im Kühlschrank gelagert.

#### 4.1.4. Particle Size Analyzer

Vorbereitung der Proben:

Stärke:

60 g Hafer wurden abgewogen und mit 490 ml Wasser für 2,5 min auf Stufe 9 in einem Thermomix (Vorwerk Deutschland Stiftung & Co. KG, Mühlenweg 17-37, D-42270 Wuppertal) fein zerkleinert. Die Temperatur nach der Prozedur betrug maximal 35 °C. Es wurde nicht 10 min gemixt, damit die Probe nicht zu warm wurde. 50 g der Mixtur wurde durch ein 50 µm Analysensieb gefiltert und bis zur Messung im Kühlschrank gelagert. Die restlichen 500 g wurden nun auf einem Magnetrührer RET control-visc (IKA®-Werke GmbH & CO. KG, Janke & Kunkel Str. 10, D-79219 Staufen) bei einer Drehzahl von 1200 rpm unter ständigem Rühren erhitzt. Bei einer Temperatur von 70 °C wurden wieder 50 g entnommen, durch ein 50 µm Analysensieb gefiltert und bis zur Messung im Kühlschrank gelagert. Bei einer Temperatur von 90 °C wurden die Probe durch ein 50 µm Analysensieb gefiltert und bis zur Messung im Kühlschrank gelagert.

Enzymbehandlung:

Die restlichen Proben, die einer Enzymbehandlung unterzogen wurden, wurden hergestellt wie unter „Rezeptur – Herstellungsprozess“ für die Verflüssigung, Verzuckerung,  $\beta$ -Glucan und Zugabe Öl und Salz beschrieben.

Durchführung:

Zur Bestimmung der Partikelgrößen der Proben wurde ein Laser Diffraction Particle Size Analyzer LS 13 320“ (Beckman Coulter, Inc. 250 South Kraemer Boulevard, Brea, California 92 821-6232, USA) verwendet. Dieser konnte Partikel in einem Messbereich von 0,040 bis 2000 µm messen. Vor jeder Messung wurde eine Kalibrierung durchgeführt, die Entgasen, Messung des Hintergrunds, Ausgleich und Anpassung des Probenraums beinhaltete. Jede Messung selbst bestand aus drei Läufen bei einer Obscuration von 10 %. Jede Probe wurde dreimal gemessen.

#### 4.1.5. Viskositätsmessung mit Rheometer

##### 4.1.5.1. Stärkeverkleisterung

Die Probe wurde wie unter 4.1.3.1 hergestellt um mit dem Rheometer gemessen zu werden. Für die rheologischen Messungen wurde das Rheometer Discovery HR-3 (TA Instruments, 159 Lukens Drive, New Castle, DE 19720) verwendet. Als Messsystem wurde die Cup-Vane Geometrie verwendet. ein konzentrischer Zylinder und als Messkörper ein Rotor gewählt. Der Messkörper hatte einen Durchmesser von 28 mm und eine Länge von 42 mm. Der Messbecher wies einen Durchmesser von 30,4 mm auf. Es wurde eine Temperaturrampe bei einer Scherrate von 200 Pa·s gemessen. Hierbei erhöhte sich die Temperatur erst von 25 °C auf 90 °C und sank dann wieder auf 25 °C ab. Die Rate, mit der die Temperatur stieg bzw. sank betrug 3 K/min. Alle 30 s wurde die Viskosität gemessen.

##### 4.1.5.2. Messungen der Proben nach enzymatischer Behandlung

Die Probe wurde wie unter 4.1.3.2 bis 4.1.3.5 beschrieben hergestellt um mit dem Rheometer gemessen zu werden. Für die rheologischen Messungen wurde das Rheometer Discovery HR-3 (TA Instruments, 159 Lukens Drive, New Castle, DE 19720) verwendet. Als Messsystem wurden zwei konzentrischer Zylinder gewählt. Der Messkörper hatte einen Durchmesser von 28 mm und eine Länge von 42 mm. Der Messbecher wies einen Durchmesser von 30,4 mm auf. Es wurde eine Dreifachbestimmung für die Messungen des Flow-Sweeps durchgeführt. Die Temperatur während den Messungen betrug 25 °C. Nach dem Befüllen des Messbechers hatten die Proben 300 s Ruhezeit. Es wurde in Rotation gemessen, die Scherrate stieg dabei von 0,1 s<sup>-1</sup> auf 1000 s<sup>-1</sup> und sank dann wieder auf 0,1 s<sup>-1</sup>. Die Scherrate erhöhte bzw. senkte sich alle 30 s.

## 4.2. Statistik

Arithmetisches Mittel:

Das arithmetische Mittel stellt den Durchschnittswert eines Datensatzes dar. Berechnet wird es wie folgt: [35]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Empirische Varianz:

Die Empirische Varianz stellt die mittlere quadratische Abweichung der Beobachtungswerte vom arithmetischen Mittelwert dar. Berechnet wird sie wie folgt: [35]

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x})^2$$

Empirische Standardabweichung:

Die empirische Standardabweichung stellt die durchschnittliche Abweichung der Beobachtungswerte vom arithmetischen Mittel dar. Berechnet wird sie wie folgt: [35]

$$s = \sqrt{s^2}$$

## 5. Sensorische Profilprüfung

Bei den sensorischen Profilprüfungen handelte es sich um eine einfach beschreibende Prüfung. Die Proben wurden bei 13 °C und bei 71 °C getestet. Als Merkmale wurden der Geschmack und die Textur untersucht. Die einfach beschreibende Prüfung diente zunächst zur reinen Beschreibung der Merkmale. Ihre Interpretation wurde in der Auswertung vorgenommen. Intern wurde von Antonia Schlichting und Jana Reeh (mir) geprüft. Beide Testerinnen sind zertifizierte Sensorikmanagerinnen.

*Tabelle 8: Ergebnisse der einfach beschreibenden Prüfung*

Prüfprobe	Merkmal	Merkmalseigenschaften	Bemerkungen
Stärkeverkleisterung	Geschmack	Grün Grasig Roh	
	Textur	Inhomogen Wässrig Sandig	Bei 13 °C sehr festes Produkt, bei 71 °C etwas weicher
VF	Geschmack	Grün Grasig	
	Textur	Inhomogen Gallertig Pastös	Bei 13 °C puddingartig, bei 71 °C eher flüssig
VZ	Geschmack	Süß	
	Textur	Homogen Schleimig Sämig	
ET	Geschmack	Süß Getreideartig Wässrig	

Sensorische Profilprüfung

	Textur	Wässrig Homogen	
Öl und Salz	Geschmack	Milchig Ausgewogen Getreideartig Süß	
	Textur	Glatt Homogen Cremig	

## 6. Literatur

- [1] T. Mezger, *Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*, S. 19-50 + 262-270. Vincentz Network, Hannover; 2016.
- [2] S. Sethi, S. K. Tyagi, R. K. Anurag, Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: a review, *Journal of food science and technology* 53, S. 3408–3423 (2016); doi: 10.1007/s13197-016-2328-3.
- [3] H. Sakkas, P. Bozidis, C. Touzios, D. Kolios, G. Athanasiou, E. Athanasopoulou, I. Gerou, C. Gartzonika, Nutritional Status and the Influence of the Vegan Diet on the Gut Microbiota and Human Health, *Medicina (Kaunas, Lithuania)* 56, S. 1-2 (2020); doi: 10.3390/medicina56020088.
- [4] I. Endrizzi, D. Clicerì, L. Menghi, E. Aprea, M. Charles, E. Monteleone, C. Dinnella, S. Spinelli, E. Pagliarini, M. Laureati, L. Torri, A. Bendini, T. G. Toschi, F. Sinesio, S. Predieri, F. Gasperi, Relationships between Intensity and Liking for Chemosensory Stimuli in Food Models: A Large-Scale Consumer Segmentation, *Foods (Basel, Switzerland)* 11, S. 1-23 (2021); doi: 10.3390/foods11010005.
- [5] D. Kilcast, Measurement of the sensory quality of food: an introduction. In: *Instrumental Assessment of Food Sensory Quality*, S. 1–4. Elsevier; 2013.
- [6] B. Tepper, M. Yeomans, eds., *Flavor, Satiety and Food Intake*, S. 173-199. John Wiley & Sons, Hoboken; 2017.
- [7] B. M. Mckenna, J. G. Lyng, Principles of food viscosity analysis. In: *Instrumental Assessment of Food Sensory Quality*, S. 129–162. Elsevier; 2013.
- [8] T. Truong, M. Palmer, N. Bansal, B. Bhandari, *Effect of Milk Fat Globule Size on the Physical Functionality of Dairy Products*, S. 37. Springer International Publishing, Cham; 2016.
- [9] P. Rasane, A. Jha, L. Sabikhi, A. Kumar, V. S. Unnikrishnan, Nutritional advantages of oats and opportunities for its processing as value added foods - a review, *Journal of food science and technology* 52, S. 662–675 (2015); doi: 10.1007/s13197-013-1072-1.
- [10] A. Nakashima, K. Yamada, O. Iwata, R. Sugimoto, K. Atsuji, T. Ogawa, N. Ishibashi-Ohgo, K. Suzuki,  $\beta$ -Glucan in Foods and Its Physiological Functions, *Journal of nutritional science and vitaminology* 64, S. 8–17 (2018); doi: 10.3177/jnsv.64.8.
- [11] K. von der Saal, *Biochemie*, S. 49-52 + 73-99. Springer, Berlin, Heidelberg; 2020.
- [12] B. Pfister, S. C. Zeeman, Formation of starch in plant cells, *Cellular and molecular life sciences : CMLS* 73, S. 2781–2807 (2016); doi: 10.1007/s00018-016-2250-x.
- [13] K. Wang, R. J. Henry, R. G. Gilbert, Causal Relations Among Starch Biosynthesis, Structure, and Properties, *Springer Science Reviews* 2, S. 15–33 (2014); doi: 10.1007/s40362-014-0016-0.
- [14] G. Liu, Z. Gu, Y. Hong, L. Cheng, C. Li, Structure, functionality and applications of debranched starch: A review, *Trends in Food Science & Technology* 63, S. 70–79 (2017); doi: 10.1016/j.tifs.2017.03.004.
- [15] D. Seung, Amylose in starch: towards an understanding of biosynthesis, structure and function, *The New phytologist* 228, S. 1490–1504 (2020); doi: 10.1111/nph.16858.
- [16] M. Schirmer, M. Jekle, T. Becker, Starch gelatinization and its complexity for analysis, *Starch - Stärke* 67, S. 30–41 (2015); doi: 10.1002/star.201400071.
- [17] A. Buléon, P. Colonna, V. Planchot, S. Ball, Starch granules: structure and biosynthesis, *International Journal of Biological Macromolecules* 23, S. 85–112 (1998); doi: 10.1016/s0141-8130(98)00040-3.
- [18] M. Heidary Vinche, M. Khanahmadi, S. A. Ataei, F. Danafar, Optimization of Process Variables for Production of Beta-Glucanase by *Aspergillus niger* CCUG33991 in Solid-State Fermentation Using

## Literatur

- Wheat Bran, *Waste and Biomass Valorization* 12, S. 3233–3243 (2021); doi: 10.1007/s12649-020-01177-0.
- [19] W. Biel, K. Kazimierska, U. Bashutska, NUTRITIONAL VALUE OF WHEAT, TRITICALE, BARLEY AND OAT GRAINS, *Acta Scientiarum Polonorum Zootechnica* 19, S. 19–28 (2020); doi: 10.21005/asp.2020.19.2.03.
- [20] B. Schnitzenbaumer, E. K. Arendt, A comparative study of oat (*Avena sativa*) cultivars as brewing adjuncts, *European Food Research and Technology* 236, S. 1015–1025 (2013); doi: 10.1007/s00217-013-1965-2.
- [21] A. Choromanska, J. Kulbacka, J. Harasym, R. Oledzki, A. Szewczyk, J. Saczko, High- and low-Molecular Weight oat Beta-Glucan Reveals Antitumor Activity in Human Epithelial Lung Cancer, *Pathology oncology research : POR* 24, S. 583–592 (2018); doi: 10.1007/s12253-017-0278-3.
- [22] J. Hamatschek, *Lebensmitteltechnologie: die industrielle Herstellung von Lebensmitteln aus landwirtschaftlichen Rohstoffen*, S. 74-150. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart; 2016.
- [23] S. C. B. Gopinath, P. Anbu, M. K. M. Arshad, T. Lakshmi priya, C. H. Voon, U. Hashim, S. V. Chinni, Biotechnological Processes in Microbial Amylase Production, S. 1-8, *BioMed research international* 2017, 1272193 (2017); doi: 10.1155/2017/1272193.
- [24] O. M. ALADEJANA, O. OYEDEJI, O. OMOBOYE, M. BAKARE, Production, purification and characterization of thermostable alpha amylase from *Bacillus subtilis* Y25 isolated from decaying yam (*Dioscorea rotundata*) tuber, *Notulae Scientia Biologicae* 12, S. 154–171 (2020); doi: 10.15835/nsb12110521.
- [25] H. Bisswanger, *Enzyme: Struktur, Kinetik und Anwendungen*, S. 265-273. Wiley-VCH, Weinheim; 2015.
- [26] C. Lambré, J. M. Barat Baviera, C. Bolognesi, P. S. Cocconcelli, R. Crebelli, D. M. Gott, K. Grob, E. Lampi, M. Mengelers, A. Mortensen, G. Rivière, I.-L. Steffensen, C. Tlustos, H. van Loveren, L. Vernis, H. Zorn, B. Glandorf, L. Herman, J. Aguilera, M. Andryszkiewicz, N. Kovalkovikova, Y. Liu, A. Chesson, Safety evaluation of a food enzyme with glucan 1,4- $\alpha$ -glucosidase and  $\alpha$ -amylase activities from the genetically modified *Aspergillus niger* strain NZYM-BX, *EFSA journal. European Food Safety Authority* 19, S. 1-13, e06563 (2021); doi: 10.2903/j.efsa.2021.6563.
- [27] S. C. B. Gopinath, P. Anbu, M. K. M. Arshad, T. Lakshmi priya, C. H. Voon, U. Hashim, S. V. Chinni, Biotechnological Processes in Microbial Amylase Production, S. 3, *BioMed research international* 2017, 1272193 (2017); doi: 10.1155/2017/1272193.
- [28] M. Heidary Vinche, M. Khanahmadi, S. A. Ataei, F. Danafar, Optimization of Process Variables for Production of Beta-Glucanase by *Aspergillus niger* CCUG33991 in Solid-State Fermentation Using Wheat Bran, *Waste and Biomass Valorization* 12, S. 3233–3243 (2021); doi: 10.1007/s12649-020-01177-0.
- [29] R. Kaur, A. Kalia, J. S. Lore, J. S. Sandhu, Antifungal effect of *Trichoderma* spp.  $\beta$ -1,3-glucanase on *Phytophthora parasitica* : Hyphal morphological distortions, *Journal of Phytopathology* 168, S. 700–706 (2020); doi: 10.1111/jph.12950.
- [30] L. L. Schramm, *Emulsions, Foams, Suspensions, and Aerosols: Microscience and Applications*, S. 7. Wiley, Somerset; 2014.
- [31] T. F. Tadros, *Emulsions: Formation, Stability, Industrial Applications*, S. 1-8. Walter De Gruyter, Berlin, Boston; 2016.
- [32] M. Rayner, P. Dejmek, eds., *Engineering Aspects of Food Emulsification and Homogenization*, S.1-48. CRC Press, Boca Raton, London, New York; 2015.
- [33] S. Bienert, A. Waterhouse, T. A. P. de Beer, G. Tauriello, G. Studer, L. Bordoli, T. Schwede, The SWISS-MODEL Repository-new features and functionality, *Nucleic acids research* 45, S. 313-319 (2017); doi: 10.1093/nar/gkw1132.
- [34] S. E. Spagnolie, *Complex Fluids in Biological Systems*, S. 213. Springer New York, New York, NY; 2015.

## Literatur

[35] P. Sibbertsen, H. Lehne, *Statistik*, S. 38-65. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg; 2021.

Anhang

Anhang

Messergebnisse Rheometer:

*Tabelle 9: Messergebnisse Temperaturrampe Stärkeverkleisterung*

Stress	Shear rate	Viskosität	Step time	Temperatur	Normal stress	Time
Pa	1/s	Pa*s	s	°C	Pa	s
1,55661	200	0,007783	10,04	25,01	0,0626962	310,156
1,55679	200	0,007784	20,044	25,2	0,0630189	320,16
1,55467	200	0,007773	30,048	25,61	0,0627141	330,164
1,55061	200	0,007753	40,04	26,13	0,0624171	340,156
1,54422	200	0,007721	50,04	26,75	0,0622884	350,156
1,53527	200	0,007676	60,04	27,39	0,0625955	360,156
1,5243	200	0,007622	70,048	28,05	0,0629736	370,164
1,51137	200	0,007557	80,044	28,66	0,0634557	380,16
1,49862	200	0,007493	90,032	29,23	0,0640081	390,148
1,48459	199,994	0,007423	100,036	29,8	0,0647489	400,152
1,46765	200	0,007338	110,036	30,35	0,0645174	410,152
1,45126	200	0,007256	120,04	30,9	0,0644549	420,156
1,43468	200	0,007173	130,036	31,47	0,0648377	430,152
1,41767	200	0,007088	140,048	32,02	0,0640931	440,164
1,40056	200	0,007003	150,032	32,54	0,064784	450,148
1,38334	200	0,006917	160,04	33,03	0,06314	460,156
1,36598	200	0,00683	170,032	33,52	0,0639892	470,148
1,34893	200	0,006745	180,04	34	0,0641385	480,156
1,33326	200	0,006666	190,04	34,52	0,0634174	490,156
1,31658	200	0,006583	200,04	35,04	0,0655367	500,156
1,30031	200	0,006502	210,048	35,53	0,0651945	510,164
1,28441	200	0,006422	220,036	36	0,0643972	520,152
1,26824	200	0,006341	230,04	36,49	0,0647825	530,156
1,25217	200	0,006261	240,04	37,01	0,0640273	540,156

## Anhang

1,23645	200	0,006182	250,036	37,52	0,0644883	550,152
1,22104	200	0,006105	260,036	38,01	0,0639228	560,152
1,20534	200	0,006027	270,036	38,5	0,0630041	570,152
1,19193	199,994	0,00596	280,04	38,98	0,0653228	580,156
1,17589	200	0,005879	290,036	39,47	0,0648251	590,152
1,16295	200	0,005815	300,04	39,99	0,0659066	600,156
1,14901	200	0,005745	310,036	40,52	0,0646559	610,152
1,13429	200	0,005671	320,048	41,02	0,0649434	620,164
1,12022	200	0,005601	330,04	41,5	0,0656121	630,156
1,1071	200	0,005535	340,044	42	0,0651631	640,16
1,09412	199,995	0,005471	350,04	42,51	0,0657851	650,156
1,07965	200	0,005398	360,04	43,02	0,0650254	660,156
1,06703	200	0,005335	370,044	43,51	0,0667915	670,16
1,05467	200	0,005273	380,036	44,01	0,0664089	680,152
1,04203	200	0,00521	390,036	44,5	0,0660019	690,152
1,03097	200	0,005155	400,048	45	0,0661331	700,164
1,01906	200	0,005095	410,036	45,5	0,065575	710,152
1,00708	200	0,005035	420,044	46,02	0,0652504	720,16
0,996625	200	0,004983	430,036	46,53	0,0671101	730,152
0,985745	200	0,004929	440,032	47,01	0,0661937	740,148
0,975631	200	0,004878	450,04	47,5	0,0666234	750,156
0,96604	200	0,00483	460,04	48,01	0,0647296	760,156
0,956485	200	0,004782	470,044	48,53	0,0649583	770,16
0,947992	200	0,00474	480,04	49,03	0,0663517	780,156
0,939397	200	0,004697	490,044	49,52	0,0668901	790,16
0,931832	200	0,004659	500,036	50,01	0,0663654	800,152
0,924359	200	0,004622	510,036	50,49	0,0672692	810,152
0,917151	200	0,004586	520,044	51,02	0,066306	820,16
0,910642	200	0,004553	530,036	51,54	0,0670732	830,152
0,904615	200	0,004523	540,044	52,02	0,066516	840,16
0,899357	200	0,004497	550,048	52,52	0,0676602	850,164
0,89484	200,001	0,004474	560,032	53	0,0672747	860,148
0,890242	200	0,004451	570,044	53,53	0,0666753	870,16

## Anhang

0,88615	200	0,004431	580,044	54,04	0,067149	880,16
0,88334	200	0,004417	590,036	54,54	0,0671825	890,152
0,881715	200	0,004409	600,04	55,02	0,0666105	900,156
0,880341	200	0,004402	610,036	55,51	0,067657	910,152
0,880574	200	0,004403	620,032	55,99	0,0673604	920,148
0,882351	200	0,004412	630,036	56,51	0,0679901	930,152
0,885527	200	0,004428	640,036	57,02	0,068326	940,152
0,892293	200	0,004461	650,044	57,52	0,0680709	950,16
0,9029	200	0,004515	660,04	58,02	0,0674657	960,156
0,915574	200	0,004578	670,044	58,51	0,0678254	970,16
0,936736	199,999	0,004684	680,036	59,03	0,0681798	980,152
0,965119	199,999	0,004826	690,04	59,54	0,0681334	990,156
1,00368	200	0,005018	700,044	60,05	0,0684462	1000,16
1,04907	199,999	0,005245	710,044	60,54	0,0670524	1010,16
1,11204	199,999	0,00556	720,036	61,03	0,0682266	1020,15
1,19379	200,003	0,005969	730,048	61,51	0,0676106	1030,16
1,29018	199,998	0,006451	740,04	62,03	0,0683064	1040,16
1,40614	199,998	0,007031	750,044	62,55	0,0674255	1050,16
1,54494	199,998	0,007725	760,044	63,04	0,0686588	1060,16
1,70713	199,998	0,008536	770,04	63,53	0,0698456	1070,16
1,88327	199,998	0,009416	780,044	64,02	0,0686495	1080,16
2,0676	199,998	0,010338	790,052	64,54	0,069962	1090,17
2,25656	199,998	0,011283	800,044	65,06	0,0693879	1100,16
2,43563	199,998	0,012178	810,04	65,55	0,0684266	1110,16
2,61998	199,998	0,0131	820,044	66,03	0,0687253	1120,16
2,79957	199,998	0,013998	830,032	66,52	0,0689446	1130,15
2,96024	200,006	0,014801	840,044	67	0,0679628	1140,16
3,10434	199,999	0,015522	850,036	67,52	0,0688534	1150,15
3,22812	199,999	0,016141	860,036	68,04	0,0691093	1160,15
3,33474	199,999	0,016674	870,036	68,53	0,0703571	1170,15
3,42289	199,999	0,017115	880,044	69,01	0,0690051	1180,16
3,49954	199,999	0,017498	890,036	69,51	0,0697616	1190,15
3,56008	200,008	0,0178	900,032	70,02	0,0683373	1200,15

## Anhang

3,60609	200	0,01803	910,04	70,54	0,0693468	1210,16
3,65073	200,001	0,018254	920,032	71,05	0,0701225	1220,15
3,67664	200	0,018383	930,04	71,53	0,0697392	1230,16
3,69304	200	0,018465	940,032	72,01	0,0692225	1240,15
3,71461	200	0,018573	950,036	72,51	0,0702037	1250,15
3,7373	200	0,018687	960,04	73,03	0,069188	1260,16
3,75721	200	0,018786	970,044	73,55	0,0701528	1270,16
3,77581	200	0,018879	980,044	74,02	0,070076	1280,16
3,79924	199,999	0,018996	990,036	74,52	0,0702132	1290,15
3,82388	200	0,019119	1000,04	75,01	0,0704652	1300,16
3,85024	200,001	0,019251	1010,05	75,53	0,0704495	1310,17
3,88409	200	0,019421	1020,05	76,04	0,0702271	1320,17
3,90443	199,999	0,019522	1030,05	76,53	0,0700445	1330,17
3,95257	200,003	0,019763	1040,05	77,01	0,0702796	1340,17
3,98947	199,999	0,019947	1050,04	77,5	0,0709519	1350,16
4,03836	199,999	0,020192	1060,04	77,98	0,0702033	1360,16
4,09845	199,999	0,020492	1070,04	78,52	0,0704434	1370,16
4,16889	199,999	0,020845	1080,04	79,03	0,07136	1380,16
4,24497	200,004	0,021225	1090,04	79,52	0,0714678	1390,16
4,32677	199,999	0,021634	1100,04	80,02	0,0705588	1400,16
4,41405	199,999	0,02207	1110,04	80,5	0,0707343	1410,16
4,51327	199,999	0,022566	1120,05	81,02	0,0711303	1420,17
4,63137	199,999	0,023157	1130,04	81,54	0,0723555	1430,16
4,75067	199,999	0,023754	1140,04	82,02	0,0719029	1440,16
4,88425	199,999	0,024421	1150,04	82,52	0,071153	1450,16
5,03866	199,999	0,025193	1160,04	83,01	0,0713995	1460,16
5,21955	200,008	0,026097	1170,04	83,48	0,0714916	1470,16
5,42069	200,004	0,027103	1180,04	84,01	0,0720457	1480,16
5,6513	199,998	0,028257	1190,04	84,54	0,0721825	1490,16
5,93217	199,998	0,029661	1200,03	85,04	0,0720868	1500,15
6,24628	199,998	0,031232	1210,05	85,53	0,0726874	1510,17
6,56085	199,998	0,032805	1220,05	86,02	0,0722671	1520,17
6,97037	199,996	0,034853	1230,04	86,5	0,073186	1530,16

Anhang

7,43637	199,996	0,037183	1240,05	87,02	0,0722979	1540,17
8,05293	200,005	0,040264	1250,04	87,54	0,0742481	1550,16
8,76115	200,005	0,043805	1260,04	88,02	0,0725569	1560,16
9,70679	200,004	0,048533	1270,05	88,51	0,0728241	1570,17
10,848	200,003	0,054239	1280,04	89	0,072932	1580,16
12,2401	200,001	0,0612	1290,04	89,51	0,072629	1590,16
14,0414	199,992	0,07021	1300,04	90,02	0,0741382	1600,16

Tabelle 10: Messergebnisse nach Verflüssigung der Stärke mit VF

Scherrate	Viskosität	Viskosität	Viskosität	Mittelwert	Standardabweichung
1/s	Pa*s	Pa*s	Pa*s	Pa*s	Pa*s
	P1.4	P2.4	P3.4	VF	SD
1000	0,051474	0,065764	0,06449	0,060576	0,007908013
630,957	0,058102	0,074148	0,072646	0,068299	0,008862358
398,107	0,066232	0,086026	0,084394	0,078884	0,010987624
251,189	0,076966	0,102101	0,10033	0,093132	0,014028488
158,489	0,090101	0,122329	0,119579	0,11067	0,017866093
99,9999	0,103796	0,141917	0,138724	0,128146	0,021147778
63,0958	0,121278	0,167506	0,163514	0,150766	0,025615242
39,8107	0,143916	0,200488	0,195418	0,179941	0,031301097
25,1189	0,173086	0,242264	0,235563	0,216971	0,038152926
15,8489	0,21084	0,295681	0,287143	0,264555	0,046713739
10	0,259679	0,367139	0,355817	0,327545	0,059045681
6,30957	0,323716	0,464044	0,448824	0,412195	0,07700174
3,98107	0,40841	0,595541	0,57481	0,526254	0,102580656
2,51188	0,521121	0,775915	0,747459	0,681498	0,139617702
1,58489	0,672457	1,02419	0,984733	0,893793	0,192695467
0,999998	0,876163	1,37098	1,31369	1,186944	0,270664578
0,630957	1,15494	1,85778	1,77446	1,595727	0,383998984
0,398107	1,54449	2,54441	2,42401	2,17097	0,545877214
0,251188	2,09202	3,5116	3,34426	2,982627	0,775813022
0,158489	2,86189	4,92103	4,66239	4,148437	1,121661895
0,1	3,96231	6,93772	6,54933	5,816453	1,617435416

Tabelle 11: Messergebnisse nach Verzuckerung der Stärke mit VZ

Scherrate	Viskosität	Viskosität	Viskosität	Mittelwert	Standardabweichung
1/s	Pa*s	Pa*s	Pa*s	Pa*s	Pa*s
	P1	P2	P3	VZ	SD
1000	0,022675	0,021055	0,021002	0,021578	0,0009511
630,958	0,023	0,021433	0,02139	0,021941	0,000917343
398,107	0,023498	0,021998	0,021965	0,022487	0,000876026
251,189	0,02403	0,022703	0,022687	0,02314	0,000770719
158,489	0,024579	0,023512	0,023522	0,023871	0,000613252
100	0,025204	0,02437	0,024425	0,024666	0,000466438
63,0957	0,025955	0,025259	0,025366	0,025527	0,000374743
39,8107	0,026842	0,026194	0,026353	0,026463	0,000337689
25,1189	0,027816	0,027082	0,027392	0,02743	0,000368645
15,8489	0,028851	0,028082	0,028493	0,028475	0,000384556
10	0,029941	0,029181	0,029672	0,029598	0,000385426
6,30957	0,031096	0,030385	0,030941	0,030807	0,000373849
3,98107	0,032376	0,031741	0,032364	0,03216	0,000363402
2,51188	0,033766	0,033227	0,033963	0,033652	0,000381133
1,58489	0,035405	0,035056	0,03573	0,035397	0,000337175
0,999998	0,037365	0,037205	0,037761	0,037444	0,000286628
0,630958	0,038925	0,038667	0,04062	0,039404	0,001061005
0,398107	0,042228	0,042427	0,042867	0,042507	0,000326907
0,251189	0,044644	0,045953	0,045328	0,045308	0,000654669
0,158489	0,046623	0,048284	0,049377	0,048095	0,001386589
0,1	0,048679	0,050126	0,054196	0,051	0,002860632

Tabelle 12: Messergebnisse nach Spaltung des  $\beta$ -Glucan mit ET

Scherrate	Viskosität	Viskosität	Viskosität	Mittelwert	Standardabweichung
1/s	Pa*s	Pa*s	Pa*s	Pa*s	Pa*s
1000	P 1	P 2	P 3	ET	SD

Anhang

1000	0,009831	0,010448	0,010363	0,010214	0,000334327
630,958	0,007347	0,008603	0,008165	0,008039	0,000637383
398,107	0,007262	0,008431	0,007975	0,007889	0,000588913
251,189	0,007098	0,008331	0,007864	0,007764	0,000622432
158,489	0,007129	0,008302	0,007824	0,007752	0,000590073
100	0,00727	0,008349	0,007855	0,007825	0,000540287
63,0957	0,007353	0,008475	0,007956	0,007928	0,000561749
39,8107	0,00741	0,008676	0,008128	0,008071	0,000634923
25,1189	0,007684	0,00894	0,008358	0,008327	0,00062856
15,8489	0,007998	0,009279	0,008661	0,008646	0,000640305
10	0,008349	0,009656	0,009064	0,009023	0,0006545
6,30957	0,008865	0,010219	0,009582	0,009555	0,000677505
3,98107	0,009445	0,010919	0,010212	0,010192	0,000737357
2,51188	0,010162	0,011745	0,010991	0,010966	0,000791793
1,58489	0,011086	0,012909	0,011858	0,011951	0,000914952
0,999996	0,012085	0,014394	0,013132	0,013203	0,001156315
0,630956	0,013469	0,015183	0,014667	0,01444	0,000879281
0,398107	0,014466	0,018454	0,016876	0,016599	0,002008334
0,251187	0,017016	0,021875	0,01784	0,01891	0,002600147
0,158489	0,020025	0,025212	0,020141	0,021793	0,002961764
0,1	0,023063	0,029776	0,024228	0,025689	0,003586928

Tabelle 13: Messergebnisse nach Öl- und Salzzugabe

Scherrate	Viskosität	Viskosität	Viskosität	Mittelwert	Standardabweichung
1/s	Pa*s	Pa*s	Pa*s	Pa*s	Pa*s
	P 1	P 2	P 3	Öl	SD
1000	0,01008	0,010297	0,009536	0,009971	0,000391993
630,957	0,0078	0,008007	0,006907	0,007571	0,000584593
398,107	0,007644	0,00783	0,006669	0,007381	0,000623889
251,189	0,007567	0,007737	0,006557	0,007287	0,00063819
158,489	0,00756	0,00772	0,006505	0,007261	0,000660128

Anhang

100	0,007631	0,007782	0,006522	0,007311	0,000688161
63,0957	0,007785	0,007929	0,006608	0,007441	0,00072429
39,8107	0,008024	0,008157	0,006768	0,007649	0,000766562
25,1189	0,008343	0,008464	0,006991	0,007932	0,000817921
15,8489	0,008748	0,008853	0,007292	0,008298	0,000872829
10	0,009246	0,009338	0,007701	0,008762	0,000920058
6,30957	0,009867	0,009957	0,008231	0,009351	0,000971621
3,98107	0,010628	0,010706	0,008867	0,010067	0,001039889
2,51189	0,011572	0,011627	0,009659	0,010953	0,001120476
1,58489	0,012639	0,012792	0,010601	0,012011	0,001222952
1	0,014101	0,013982	0,011864	0,013316	0,001258676
0,630959	0,016218	0,016031	0,01344	0,01523	0,001552868
0,398107	0,018391	0,017126	0,015515	0,017011	0,001441329
0,251188	0,019843	0,021582	0,01717	0,019532	0,002222593
0,15849	0,022886	0,027026	0,019962	0,023292	0,003549354
0,099999	0,027514	0,033732	0,024027	0,028424	0,004916386

Messergebnisse Particle Size Analyzer:

*Tabelle 14: Messergebnisse Particle Size Analyzer Haferstärke 35 °C*

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Channel Diameter (Lower)	Diff.	Diff.	Diff.	Volumen %
µm	Volume	Volume	Volume	35 °C
	%	%	%	
0,375124	0,257591	0,258881	0,284779	0,26708367
0,411798	0,459549	0,461649	0,507114	0,476104
0,452057	0,684336	0,687139	0,755271	0,70891533
0,496252	0,98265	0,986452	1,08514	1,01808067
0,544768	1,22067	1,22481	1,349	1,26482667
0,598027	1,42865	1,4319	1,5784	1,47965

## Anhang

0,656493	1,61715	1,61807	1,7868	1,67400667
0,720675	1,80268	1,80012	1,99232	1,86504
0,791132	1,93503	1,92762	2,13924	2,00063
0,868477	2,01719	2,00196	2,22711	2,08208667
0,953383	2,05524	2,02826	2,26498	2,11616
1,04659	2,05926	2,01634	2,26336	2,11298667
1,14891	2,01302	1,95037	2,20251	2,0553
1,26123	1,91159	1,82361	2,07204	1,93574667
1,38454	1,76763	1,64752	1,8881	1,76775
1,5199	1,59877	1,43967	1,67073	1,56972333
1,66849	1,41762	1,21398	1,43216	1,35458667
1,83161	1,22797	0,972897	1,1725	1,12445567
2,01068	1,03761	0,721668	0,900169	0,88648233
2,20725	0,869138	0,490129	0,649672	0,66964633
2,42304	0,753627	0,320876	0,465978	0,51349367
2,65993	0,714717	0,235697	0,374076	0,44149667
2,91998	0,749515	0,223115	0,363258	0,445296
3,20545	0,857732	0,281979	0,434731	0,524814
3,51883	1,05097	0,431339	0,61102	0,69777633
3,86284	1,3658	0,721035	0,951767	1,01286733
4,24049	1,80077	1,16246	1,46657	1,4766
4,65506	2,31643	1,72305	2,10995	2,04981
5,11017	2,85096	2,33221	2,79635	2,65984
5,60976	3,38551	2,96654	3,50408	3,28537667
6,1582	3,91061	3,61194	4,22191	3,91482
6,76025	4,38305	4,22726	4,89283	4,50104667
7,42117	4,71047	4,7236	5,39149	4,94185333
8,14669	4,78365	4,98182	5,56735	5,11094
8,94315	4,57089	4,94471	5,36533	4,96031
9,81748	4,09563	4,60506	4,80278	4,50115667
10,7773	3,44091	4,0425	3,98251	3,82197333
11,8309	2,67711	3,34783	3,00635	3,01043
12,9876	1,98015	2,70035	2,10029	2,26026333

Anhang

14,2573	1,48534	2,22413	1,44121	1,71689333
15,6512	1,26636	1,97864	1,10083	1,44861
17,1813	1,2912	1,92742	1,02662	1,41508
18,861	1,46835	1,96154	1,08549	1,50512667
20,705	1,70126	1,99547	1,17122	1,62265
22,7292	1,85732	1,94282	1,16853	1,65622333
24,9513	1,90869	1,83069	1,09871	1,61269667
27,3906	1,83602	1,67885	0,997493	1,504121
30,0685	1,6712	1,52012	0,902317	1,36454567
33,0081	1,43993	1,35621	0,824822	1,20698733
36,2352	1,17475	1,16562	0,739075	1,02648167
39,7777	0,928117	0,95385	0,641473	0,84114667
43,6665	0,720734	0,724109	0,525094	0,65664567
47,9356	0,583727	0,532734	0,425256	0,51390567
52,622	0,499299	0,40927	0,365307	0,42462533
57,7666	0,447768	0,370101	0,359887	0,39258533
63,4141	0,390056	0,400637	0,397608	0,39610033
69,6138	0,299697	0,465569	0,449493	0,40491967
76,4196	0,179333	0,524947	0,483362	0,39588067
83,8907	0,0722637	0,53121	0,474373	0,35928223
92,0923	0,0153886	0,474463	0,42724	0,3056972
101,096	0,00136829	0,3642	0,35598	0,2405161
110,979	7,16E-06	0,229629	0,279127	0,16958772
121,829	0	0,109806	0,209387	0,10639767
133,74	0	0,0351846	0,151303	0,06216253
146,815	0	0,00594951	0,10604	0,03732984
161,168	0	0,00041999	0,0717442	0,02405473
176,925	0	0	0,0456087	0,0152029
194,222	0	0	0,0266645	0,00888817
213,21	0	0	0,0130016	0,00433387
234,054	0	0	0,00473461	0,0015782
256,936	0	0	0,00090607	0,00030202
282,056	0	0	7,11E-05	2,3702E-05

Anhang

309,631	0	0	0	0
339,902	0	0	0	0
373,132	0	0	0	0
409,611	0	0	0	0
449,657	0	0	0	0
493,617	0	0	0	0
541,876	0	0	0	0
594,852	0	0	0	0
653,008	0	0	0	0
716,849	0	0	0	0
786,932	0	0	0	0
863,866	0	0	0	0
948,322	0	0	0	0
1041,03	0	0	0	0
1142,81	0	0	0	0
1254,54	0	0	0	0
1377,19	0	0	0	0
1511,83	0	0	0	0
1659,63	0	0	0	0
1821,88	0	0	0	0
2000				

*Tabelle 15: Messergebnisse Particle Size Analyzer Haferstärke 70 °C*

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Channel Diameter (Lower)	Diff.	Diff.	Diff.	70°C
µm	Volume	Volume	Volume	
	%	%	%	
0,375124	0	0	0	0
0,411798	0	0	0	0
0,452057	0	0	0	0

Anhang

0,496252	0	0	0	0
0,544768	0	0	0	0
0,598027	0	0	0	0
0,656493	0	0	0	0
0,720675	0	0	0	0
0,791132	0	0	0	0
0,868477	0	0	0	0
0,953383	0	0	0	0
1,04659	0	0	0	0
1,14891	0	0	0	0
1,26123	0	0	0	0
1,38454	0	0	0	0
1,5199	0	0	0	0
1,66849	0	0	0	0
1,83161	0	0	0	0
2,01068	0	0	0	0
2,20725	0	0	0	0
2,42304	0	0	0	0
2,65993	0	0	0	0
2,91998	0	0	0	0
3,20545	0	0	0	0
3,51883	0	0	0	0
3,86284	0	0	0	0
4,24049	0,00317004	0,00626219	0,0068073	0,00541318
4,65506	0,053461	0,0859381	0,0924033	0,07726747
5,11017	0,308962	0,452247	0,483359	0,414856
5,60976	0,884081	1,17273	1,24515	1,10065367
6,1582	1,66127	2,07619	2,19371	1,97705667
6,76025	2,43455	2,90857	3,05955	2,80089
7,42117	3,18862	3,71216	3,8891	3,59662667
8,14669	3,95279	4,50279	4,69631	4,38396333
8,94315	4,67013	5,19224	5,38462	5,08233
9,81748	5,14243	5,5666	5,73053	5,47985333

Anhang

10,7773	5,29353	5,54731	5,65586	5,4989
11,8309	5,28205	5,34994	5,39648	5,34282333
12,9876	5,47709	5,37304	5,37372	5,40795
14,2573	6,03403	5,78076	5,76059	5,85846
15,6512	6,76562	6,38042	6,36065	6,50223
17,1813	7,19812	6,70225	6,68865	6,86300667
18,861	6,85738	6,28227	6,26412	6,46792333
20,705	5,72137	5,10982	5,07163	5,30094
22,7292	4,13495	3,5468	3,48481	3,72218667
24,9513	2,74696	2,24329	2,16841	2,38622
27,3906	1,90546	1,51406	1,44038	1,61996667
30,0685	1,66448	1,38123	1,3132	1,45297
33,0081	1,88454	1,70759	1,6458	1,74597667
36,2352	2,28216	2,222	2,16584	2,22333333
39,7777	2,57606	2,61453	2,55437	2,58165333
43,6665	2,52313	2,6187	2,54298	2,56160333
47,9356	2,22458	2,34046	2,24324	2,26942667
52,622	1,81265	1,92414	1,81153	1,84944
57,7666	1,42611	1,52481	1,40864	1,45318667
63,4141	1,12606	1,21194	1,10556	1,14785333
69,6138	0,882212	0,955244	0,869054	0,90217
76,4196	0,686071	0,744338	0,683511	0,70464
83,8907	0,50289	0,542264	0,506561	0,51723833
92,0923	0,340118	0,359486	0,344723	0,348109
101,096	0,208172	0,211371	0,211179	0,21024067
110,979	0,100718	0,0969107	0,102127	0,09991857
121,829	0,0368681	0,0332613	0,0375314	0,03588693
133,74	0,00657667	0,00559358	0,00673103	0,00630043
146,815	0,00057027	0,00045633	0,00059246	0,00053969
161,168	0	0	0	0
176,925	0	0	0	0
194,222	0	0	0	0
213,21	0	0	0	0

Anhang

234,054	0	0	0	0
256,936	0	0	0	0
282,056	0	0	0	0
309,631	0	0	0	0
339,902	0	0	0	0
373,132	0	0	0	0
409,611	0	0	0	0
449,657	0	0	0	0
493,617	0	0	0	0
541,876	0	0	0	0
594,852	0	0	0	0
653,008	0	0	0	0
716,849	0	0	0	0
786,932	0	0	0	0
863,866	0	0	0	0
948,322	0	0	0	0
1041,03	0	0	0	0
1142,81	0	0	0	0
1254,54	0	0	0	0
1377,19	0	0	0	0
1511,83	0	0	0	0
1659,63	0	0	0	0
1821,88	0	0	0	0
2000				

*Tabelle 16: Messergebnisse Particle Size Analyzer Enzymatische Verflüssigung der Stärke mit VF*

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Channel Diameter (Lower)	Diff.	Diff.	Diff.	
µm	Volume	Volume	Volume	

Anhang

	%	%	%	
0,375124	0,29999	0,303863	0,305879	0,303244
0,411798	0,537086	0,544034	0,547606	0,54290867
0,452057	0,799431	0,809727	0,815124	0,808094
0,496252	1,14665	1,16133	1,16908	1,15902
0,544768	1,43152	1,44965	1,45885	1,44667333
0,598027	1,68743	1,70853	1,71872	1,70489333
0,656493	1,92522	1,94885	1,95972	1,94459667
0,720675	2,15727	2,18314	2,19465	2,17835333
0,791132	2,33835	2,36551	2,37668	2,36018
0,868477	2,47203	2,49972	2,50971	2,49382
0,953383	2,56366	2,59099	2,59909	2,58458
1,04659	2,61357	2,6396	2,64553	2,6329
1,14891	2,61021	2,63382	2,63696	2,62699667
1,26123	2,5483	2,56864	2,56835	2,56176333
1,38454	2,44051	2,45687	2,45264	2,45000667
1,5199	2,29423	2,3059	2,29779	2,29930667
1,66849	2,11695	2,12318	2,1117	2,11727667
1,83161	1,90851	1,9089	1,89453	1,90398
2,01068	1,67833	1,67302	1,65618	1,66917667
2,20725	1,44678	1,43614	1,41739	1,43343667
2,42304	1,23456	1,21888	1,19934	1,21759333
2,65993	1,05612	1,03553	1,01656	1,03607
2,91998	0,909618	0,885223	0,867885	0,88757533
3,20545	0,812408	0,785822	0,770206	0,78947867
3,51883	0,782855	0,75509	0,740774	0,759573
3,86284	0,840595	0,811539	0,798177	0,81677033
4,24049	0,972158	0,94219	0,929876	0,94807467
4,65506	1,15805	1,12844	1,11713	1,13454
5,11017	1,38254	1,35438	1,34317	1,36003
5,60976	1,64463	1,61829	1,60571	1,62287667
6,1582	1,93699	1,91262	1,89735	1,91565333

## Anhang

6,76025	2,21489	2,19349	2,17576	2,19471333
7,42117	2,41611	2,39943	2,38122	2,39892
8,14669	2,47825	2,46798	2,45244	2,46622333
8,94315	2,39208	2,38814	2,37843	2,38621667
9,81748	2,16917	2,17115	2,1692	2,16984
10,7773	1,85458	1,86386	1,86981	1,86275
11,8309	1,51194	1,53006	1,54142	1,52780667
12,9876	1,25125	1,27592	1,28924	1,27213667
14,2573	1,12781	1,15266	1,16578	1,14875
15,6512	1,15364	1,17118	1,18348	1,16943333
17,1813	1,26984	1,27351	1,28655	1,27663333
18,861	1,37367	1,36585	1,38146	1,37366
20,705	1,41333	1,40735	1,42548	1,41538667
22,7292	1,35387	1,37099	1,38828	1,37104667
24,9513	1,28705	1,34255	1,35356	1,32772
27,3906	1,23396	1,32821	1,32959	1,29725333
30,0685	1,23214	1,35249	1,34312	1,30925
33,0081	1,2714	1,39149	1,37413	1,34567333
36,2352	1,29829	1,39128	1,37002	1,35319667
39,7777	1,32892	1,37501	1,35296	1,35229667
43,6665	1,32123	1,31912	1,29757	1,31264
47,9356	1,34272	1,30498	1,28347	1,31039
52,622	1,39682	1,34272	1,32188	1,35380667
57,7666	1,5018	1,44723	1,42971	1,45958
63,4141	1,63975	1,59204	1,58288	1,60489
69,6138	1,73754	1,69483	1,69945	1,71060667
76,4196	1,76008	1,71464	1,73534	1,73668667
83,8907	1,66605	1,61106	1,64391	1,64034
92,0923	1,4833	1,41625	1,45073	1,45009333
101,096	1,25333	1,17852	1,20247	1,21144
110,979	1,01814	0,943329	0,949464	0,970311
121,829	0,807958	0,743197	0,734352	0,76183567
133,74	0,624501	0,580761	0,569181	0,591481

Anhang

146,815	0,462073	0,445176	0,444157	0,45046867
161,168	0,314668	0,324866	0,342263	0,32726567
176,925	0,182722	0,211816	0,245177	0,21323833
194,222	0,0812406	0,109727	0,147391	0,1127862
213,21	0,0235834	0,0397968	0,0658889	0,0430897
234,054	0,00352284	0,00736887	0,017896	0,0095959
256,936	0,00018471	0,00057165	0,00245794	0,00107143
282,056	0	0	9,51E-05	3,1715E-05
309,631	0	0	0	0
339,902	0	0	0	0
373,132	0	0	0	0
409,611	0	0	0	0
449,657	0	0	0	0
493,617	0	0	0	0
541,876	0	0	0	0
594,852	0	0	0	0
653,008	0	0	0	0
716,849	0	0	0	0
786,932	0	0	0	0
863,866	0	0	0	0
948,322	0	0	0	0
1041,03	0	0	0	0
1142,81	0	0	0	0
1254,54	0	0	0	0
1377,19	0	0	0	0
1511,83	0	0	0	0
1659,63	0	0	0	0
1821,88	0	0	0	0
2000				

*Tabelle 17: Messergebnisse Particle Size Analyzer Enzymatische Verzuckerung der Stärke mit VZ*

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Channel Diameter (Lower)	Diff.	Diff.	Diff.	
µm	Volume	Volume	Volume	
	%	%	%	
0,375124	0,295197	0,290921	0,136813	0,240977
0,411798	0,52828	0,520704	0,251485	0,43348967
0,452057	0,786701	0,775284	0,378109	0,646698
0,496252	1,12959	1,11322	0,537623	0,926811
0,544768	1,41236	1,39277	0,656431	1,15385367
0,598027	1,66795	1,64609	0,76644	1,36016
0,656493	1,90753	1,88401	0,865506	1,55234867
0,720675	2,14385	2,11892	0,951207	1,73799233
0,791132	2,33214	2,30783	0,993253	1,877741
0,868477	2,47617	2,45433	1,01658	1,98236
0,953383	2,58141	2,56361	1,01686	2,05396
1,04659	2,64856	2,63588	0,983726	2,08938867
1,14891	2,66502	2,65947	0,90742	2,07730333
1,26123	2,62494	2,62864	0,80745	2,02034333
1,38454	2,53995	2,55446	0,692841	1,92908367
1,5199	2,41683	2,44286	0,559989	1,80655967
1,66849	2,26176	2,29966	0,413521	1,65831367
1,83161	2,07334	2,12353	0,257158	1,484676
2,01068	1,86011	1,92255	0,121219	1,301293
2,20725	1,64126	1,7149	0,0354025	1,13052083
2,42304	1,43708	1,51957	0,00651195	0,98772065
2,65993	1,2616	1,3499	0,00592308	0,87247436
2,91998	1,11416	1,205	0,0315811	0,78358037
3,20545	1,01213	1,10215	0,133835	0,74937167
3,51883	0,975091	1,06118	0,344831	0,79370067

Anhang

3,86284	1,02309	1,10128	0,684581	0,936317
4,24049	1,14355	1,20902	1,11994	1,15750333
4,65506	1,31777	1,36549	1,64282	1,44202667
5,11017	1,52997	1,5576	2,20648	1,76468333
5,60976	1,7789	1,78525	2,7957	2,11995
6,1582	2,057	2,04153	3,39291	2,49714667
6,76025	2,32186	2,28361	3,96849	2,85798667
7,42117	2,51142	2,45133	4,46729	3,14334667
8,14669	2,56212	2,48516	4,80051	3,28259667
8,94315	2,46188	2,37634	4,9162	3,25147333
9,81748	2,22224	2,13829	4,77666	3,04573
10,7773	1,89262	1,8169	4,44139	2,71697
11,8309	1,53701	1,47559	3,97955	2,33071667
12,9876	1,26154	1,2182	3,52933	2,00302333
14,2573	1,11747	1,09476	3,16478	1,79233667
15,6512	1,11488	1,11403	2,91665	1,71518667
17,1813	1,19897	1,21781	2,75786	1,72488
18,861	1,27877	1,31126	2,6062	1,73207667
20,705	1,31254	1,34692	2,43918	1,69954667
22,7292	1,27206	1,29638	2,2187	1,59571333
24,9513	1,23525	1,24236	2,01452	1,49737667
27,3906	1,2111	1,20122	1,84353	1,41861667
30,0685	1,22054	1,20218	1,7338	1,38550667
33,0081	1,24184	1,22945	1,66447	1,37858667
36,2352	1,22291	1,23119	1,57851	1,34420333
39,7777	1,18472	1,21967	1,4709	1,29176333
43,6665	1,11272	1,16624	1,3172	1,19872
47,9356	1,08673	1,1401	1,19028	1,13903667
52,622	1,12415	1,15675	1,11337	1,13142333
57,7666	1,24013	1,23673	1,115	1,19728667
63,4141	1,40774	1,36592	1,17665	1,31677
69,6138	1,54182	1,47513	1,23671	1,41788667
76,4196	1,59032	1,5229	1,25547	1,45623

## Anhang

83,8907	1,50711	1,46179	1,18915	1,38601667
92,0923	1,32048	1,30744	1,05548	1,2278
101,096	1,08212	1,09416	0,882593	1,01962433
110,979	0,844338	0,863642	0,703645	0,803875
121,829	0,645692	0,652901	0,546178	0,61492367
133,74	0,49308	0,476516	0,41667	0,46208867
146,815	0,374403	0,335544	0,312252	0,340733
161,168	0,274984	0,224017	0,225547	0,241516
176,925	0,183068	0,132168	0,148185	0,15447367
194,222	0,0987722	0,0626488	0,0782183	0,07987977
213,21	0,038242	0,0207338	0,028928	0,02930127
234,054	0,00822027	0,00400888	0,00540977	0,00587964
256,936	0,00083807	0,00037752	0,00041512	0,00054357
282,056	1,72E-05	5,48E-06	0	7,5649E-06
309,631	0	0	0	0
339,902	0	0	0	0
373,132	0	0	0	0
409,611	0	0	0	0
449,657	0	0	0	0
493,617	0	0	0	0
541,876	0	0	0	0
594,852	0	0	0	0
653,008	0	0	0	0
716,849	0	0	0	0
786,932	0	0	0	0
863,866	0	0	0	0
948,322	0	0	0	0
1041,03	0	0	0	0
1142,81	0	0	0	0
1254,54	0	0	0	0
1377,19	0	0	0	0
1511,83	0	0	0	0
1659,63	0	0	0	0

Anhang

1821,88	0	0	0	0
2000				

*Tabelle 18: Messergebnisse Particle Size Analyzer Enzymatische Spaltung des  $\beta$ -Glucan mit ET*

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	
Channel Diameter (Lower)	Diff.	Diff.	Diff.	
$\mu\text{m}$	Volume	Volume	Volume	
	%	%	%	
0,375124	0,326231	0,328567	0,340072	0,33162333
0,411798	0,584516	0,588689	0,608987	0,594064
0,452057	0,869743	0,875966	0,906983	0,88423067
0,496252	1,24915	1,25806	1,30312	1,27011
0,544768	1,56646	1,57726	1,63116	1,59162667
0,598027	1,85729	1,86959	1,93012	1,88566667
0,656493	2,13233	2,14579	2,21204	2,16338667
0,720675	2,4053	2,41985	2,49292	2,43935667
0,791132	2,63205	2,64681	2,72139	2,66675
0,868477	2,81751	2,83181	2,90394	2,85108667
0,953383	2,96536	2,97854	3,04584	2,99658
1,04659	3,07461	3,08632	3,14986	3,10359667
1,14891	3,13475	3,14427	3,20189	3,16030333
1,26123	3,14079	3,14757	3,1968	3,16172
1,38454	3,10298	3,10671	3,14642	3,11870333
1,5199	3,02472	3,02547	3,05879	3,03632667
1,66849	2,91159	2,90964	2,9413	2,92084333
1,83161	2,76261	2,75843	2,79215	2,77106333
2,01068	2,58755	2,58206	2,62066	2,59675667
2,20725	2,40234	2,39671	2,44345	2,41416667
2,42304	2,22327	2,21914	2,28003	2,24081333

## Anhang

2,65993	2,06191	2,06097	2,14232	2,0884
2,91998	1,91996	1,92429	2,02977	1,95800667
3,20545	1,81441	1,82567	1,95228	1,86412
3,51883	1,76458	1,78413	1,92534	1,82468333
3,86284	1,78553	1,81413	1,96491	1,85485667
4,24049	1,86046	1,89867	2,05619	1,93844
4,65506	1,96732	2,0149	2,17407	2,05209667
5,11017	2,0958	2,15115	2,30032	2,18242333
5,60976	2,2481	2,30847	2,43459	2,33038667
6,1582	2,41649	2,47803	2,57223	2,48891667
6,76025	2,55465	2,61328	2,67766	2,61519667
7,42117	2,60019	2,65192	2,69579	2,6493
8,14669	2,50219	2,54443	2,57782	2,54148
8,94315	2,26668	2,29828	2,32943	2,29813
9,81748	1,93072	1,95232	1,98564	1,95622667
10,7773	1,54582	1,55914	1,59484	1,5666
11,8309	1,17162	1,17811	1,20035	1,18336
12,9876	0,895119	0,89496	0,883319	0,89113267
14,2573	0,754132	0,747089	0,689061	0,730094
15,6512	0,75381	0,739178	0,633744	0,70891067
17,1813	0,843529	0,821281	0,68268	0,78249667
18,861	0,945046	0,917909	0,771853	0,87826933
20,705	0,996546	0,969578	0,840015	0,93537967
22,7292	0,957825	0,93886	0,828862	0,90851567
24,9513	0,882884	0,876791	0,767907	0,84252733
27,3906	0,801249	0,80936	0,68518	0,765263
30,0685	0,751396	0,768801	0,621313	0,71383667
33,0081	0,743113	0,75792	0,596524	0,69918567
36,2352	0,749658	0,74772	0,594069	0,697149
39,7777	0,770974	0,739414	0,613257	0,70788167
43,6665	0,769563	0,70719	0,619181	0,69864467
47,9356	0,764003	0,678636	0,61859	0,68707633
52,622	0,750173	0,657404	0,605296	0,67095767

## Anhang

57,7666	0,737441	0,651799	0,587283	0,658841
63,4141	0,725447	0,657133	0,566939	0,64983967
69,6138	0,69545	0,646598	0,533466	0,62517133
76,4196	0,644476	0,608259	0,485938	0,57955767
83,8907	0,561552	0,529671	0,416307	0,50251
92,0923	0,455421	0,423643	0,330859	0,40330767
101,096	0,335998	0,30718	0,237434	0,29353733
110,979	0,217019	0,199952	0,147733	0,18823467
121,829	0,118452	0,116814	0,0723104	0,10252547
133,74	0,0526221	0,0608933	0,0247054	0,0460736
146,815	0,0198223	0,0287972	0,00436113	0,01766021
161,168	0,00856279	0,0159927	0,00031811	0,0082912
176,925	0,00689411	0,0124939	0	0,00646267
194,222	0,00684701	0,00878417	0	0,00521039
213,21	0,00489416	0,00390933	0	0,0029345
234,054	0,0020572	0,00079808	0	0,00095176
256,936	0,00041567	6,36E-05	0	0,00015976
282,056	2,69E-05	0	0	8,9509E-06
309,631	0	0	0	0
339,902	0	0	0	0
373,132	0	0	0	0
409,611	0	0	0	0
449,657	0	0	0	0
493,617	0	0	0	0
541,876	0	0	0	0
594,852	0	0	0	0
653,008	0	0	0	0
716,849	0	0	0	0
786,932	0	0	0	0
863,866	0	0	0	0
948,322	0	0	0	0
1041,03	0	0	0	0
1142,81	0	0	0	0

Anhang

1254,54	0	0	0	0
1377,19	0	0	0	0
1511,83	0	0	0	0
1659,63	0	0	0	0
1821,88	0	0	0	0
2000				

*Tabelle 19: Messergebnisse Particle Size Analyzer Enzymatische nach Öl- und Salzzugabe*

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Channel Diameter (Lower)	Diff.	Diff.	Diff.	
µm	Volume	Volume	Volume	
	%	%	%	
0,375124	0,260115	0,22644	0,244587	0,243714
0,411798	0,465167	0,403406	0,436562	0,435045
0,452057	0,694186	0,601513	0,651431	0,64904333
0,496252	1,00037	0,867266	0,938815	0,93548367
0,544768	1,25801	1,08801	1,17917	1,17506333
0,598027	1,49686	1,28855	1,39965	1,39502
0,656493	1,72866	1,48041	1,61251	1,60719333
0,720675	1,96558	1,6782	1,83031	1,82469667
0,791132	2,16795	1,84319	2,01385	2,00833
0,868477	2,34081	1,97708	2,16603	2,16130667
0,953383	2,49147	2,088	2,29553	2,29166667
1,04659	2,62155	2,18448	2,40627	2,4041
1,14891	2,71567	2,25249	2,48301	2,48372333
1,26123	2,76755	2,28434	2,51838	2,52342333
1,38454	2,78772	2,29001	2,52374	2,53382333
1,5199	2,78223	2,28192	2,50822	2,52412333
1,66849	2,75191	2,26517	2,47372	2,49693333

## Anhang

1,83161	2,69242	2,23696	2,41701	2,44879667
2,01068	2,61119	2,20081	2,34407	2,38535667
2,20725	2,5245	2,17092	2,27239	2,32260333
2,42304	2,45174	2,16693	2,22181	2,28016
2,65993	2,40509	2,20519	2,20866	2,27298
2,91998	2,38322	2,27979	2,22867	2,29722667
3,20545	2,39456	2,38832	2,28781	2,35689667
3,51883	2,4629	2,54204	2,40577	2,47023667
3,86284	2,61126	2,76842	2,6116	2,66376
4,24049	2,82322	3,0556	2,89036	2,92306
4,65506	3,05618	3,36281	3,19869	3,20589333
5,11017	3,28348	3,64976	3,50099	3,47807667
5,60976	3,50529	3,91403	3,79549	3,73827
6,1582	3,71642	4,15675	4,07934	3,98417
6,76025	3,85733	4,33825	4,29607	4,16388333
7,42117	3,83247	4,37374	4,34527	4,18382667
8,14669	3,56622	4,17767	4,13566	3,95985
8,94315	3,07508	3,74964	3,668	3,49757333
9,81748	2,44373	3,14524	3,01264	2,86720333
10,7773	1,73947	2,43475	2,24543	2,13988333
11,8309	0,976371	1,64744	1,40144	1,34175033
12,9876	0,378944	0,918885	0,674684	0,65750433
14,2573	0,0886381	0,424122	0,244746	0,25250203
15,6512	0,0400449	0,224285	0,115528	0,1266193
17,1813	0,102115	0,218861	0,145354	0,15544333
18,861	0,299222	0,34346	0,30035	0,314344
20,705	0,537565	0,551537	0,521043	0,536715
22,7292	0,665024	0,692574	0,651816	0,66980467
24,9513	0,66905	0,710388	0,666203	0,68188033
27,3906	0,598803	0,640027	0,609711	0,61618033
30,0685	0,511722	0,545156	0,535397	0,53075833
33,0081	0,451069	0,473784	0,475818	0,46689033
36,2352	0,418623	0,432336	0,426378	0,425779

## Anhang

39,7777	0,419855	0,423487	0,394792	0,41271133
43,6665	0,424995	0,42009	0,367089	0,404058
47,9356	0,426546	0,410451	0,352102	0,39636633
52,622	0,416741	0,387262	0,353148	0,385717
57,7666	0,40075	0,358626	0,370319	0,376565
63,4141	0,38654	0,333208	0,389417	0,36972167
69,6138	0,372735	0,31404	0,383605	0,35679333
76,4196	0,35874	0,2983	0,334721	0,330587
83,8907	0,33672	0,27244	0,244052	0,284404
92,0923	0,303238	0,230554	0,134433	0,22274167
101,096	0,254083	0,169155	0,0502205	0,1578195
110,979	0,189808	0,0958872	0,00940941	0,0983682
121,829	0,116229	0,0376275	0,00072654	0,05152768
133,74	0,0564807	0,00731862	0	0,02126644
146,815	0,0240389	0,00060239	0	0,00821376
161,168	0,0142258	0	0	0,00474193
176,925	0,0114945	0	0	0,0038315
194,222	0,00935555	0	0	0,00311852
213,21	0,00583519	0	0	0,00194506
234,054	0,00231762	0	0	0,00077254
256,936	0,0004429	0	0	0,00014763
282,056	2,89E-05	0	0	9,6323E-06
309,631	0	0	0	0
339,902	0	0	0	0
373,132	0	0	0	0
409,611	0	0	0	0
449,657	0	0	0	0
493,617	0	0	0	0
541,876	0	0	0	0
594,852	0	0	0	0
653,008	0	0	0	0
716,849	0	0	0	0
786,932	0	0	0	0

863,866	0	0	0	0
948,322	0	0	0	0
1041,03	0	0	0	0
1142,81	0	0	0	0
1254,54	0	0	0	0
1377,19	0	0	0	0
1511,83	0	0	0	0
1659,63	0	0	0	0
1821,88	0	0	0	0
2000				

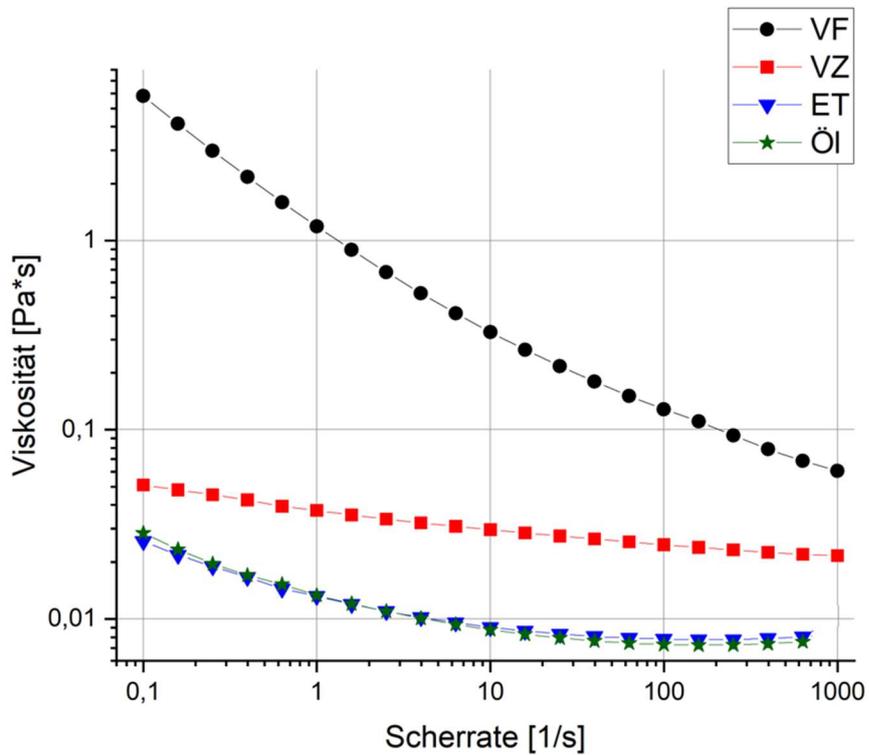


Abbildung 26: Vergleich der Viskosität der Probenmittelwerte. VF: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF, VZ: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF

## Anhang

+ VZ, ET: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET, Öl: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET und Zugabe von Öl und Salz

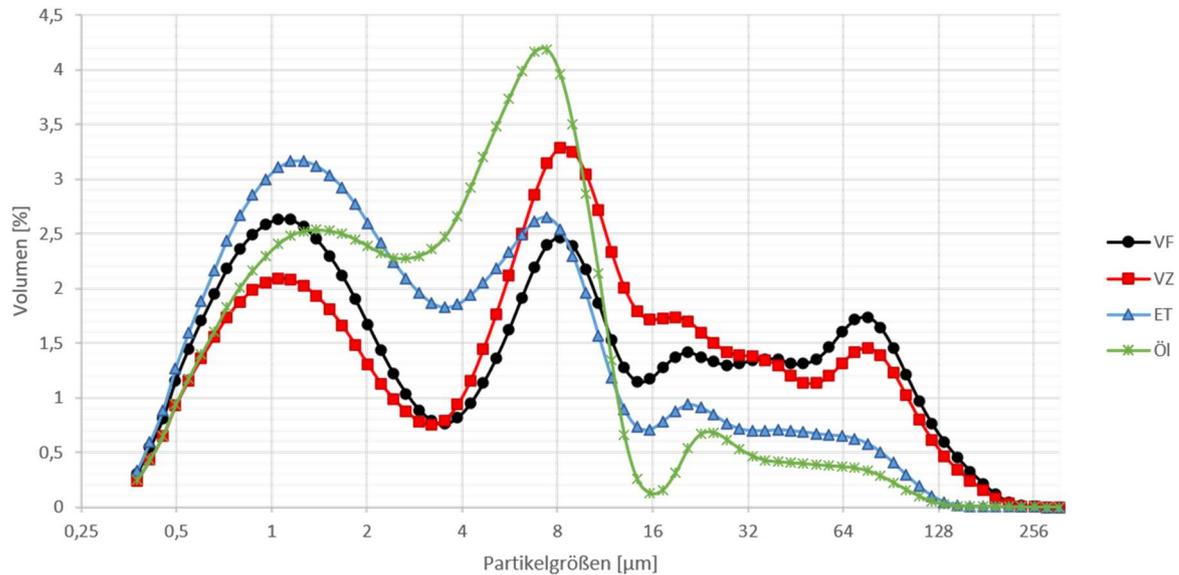


Abbildung 27: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen der Probenmittelwerte. VF: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF, VZ: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ, ET: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET, Öl: Mittelwert der Proben nach Behandlung mit VF + VZ + ET und Zugabe von Öl und Salz

Ehrenwörtliche Erklärung

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorgelegte Arbeit selbständig verfasst, alle benutzten Quellen und Hilfsmittel in der Arbeit angegeben habe und dass ich die Überprüfung mittels Anti-Plagiatssoftware dulde. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderen fremden Mitteilungen entnommen wurden, wurden als solche einzeln kenntlich gemacht. Ich versichere weiterhin, dass die Arbeit noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung verwendet wurde.

Rennerod, den 03.02.2022

(Ort, Datum)

Jana Reeh

(Unterschrift)