Einfluss der Prallvermahlung und Windsichtung auf die stoffliche Zusammensetzung und Verarbeitungseigenschaften von Weizenmehlen

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Walid Banafa
aus Jemen

von der Fakultät III - Prozesswissenschaften
der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
-Dr.-Ing.-

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr. sc. techn. L.-G. Fleischer
Gutachter:	Prof. Dr. Dr.- Ing. Dr. h.c. B. Handreck
Gutachter:	Prof. Dr. sc. techn. B. Senge

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 26.04.2004

Berlin 2004
D 83

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. B. Handreck meinen herzlichen Dank für die Betreuung, Unterstützung und die wertvollen Ratschläge und Diskussionen bei der Ausführung und Anfertigung meiner Arbeit aussprechen.

Herrn Prof. Dr. B. Senge danke ich für seine fachlichen Anregungen und die freundliche Übernahme des Korreferates.

Herrn Prof. Dr. J. M. Brümmer danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung der rheologischen Untersuchungen an der Bundesanstalt für Getreide-, Kartoffel- und Fettforschung in Detmold.

Mein besonderer Dank gilt allen aktiven und ehemaligen Mitarbeitern der Fachgebiete Aufbereitungs- und Getreidetechnologie am Institut für Lebensmitteltechnologie der Technischen Universität Berlin für die enge Zusammenarbeit und die tatkräftige Unterstützung. Hervorgehoben seien Frau Dipl.-Ing. Ch. Senge, Frau B. C. Fischer, Frau Dr. L. Howorka, Herr Dr. J. Dörfer und Herr Dipl.-Ing. L. Pötschke für ihr Engagement während der Arbeit und ihre persönliche Unterstützung.

Ich möchte auch den Mitarbeitern der Firma Planttec Biotechnologie, insbesondere Herrn Dr. V. Landschütze, für ihr Verständnis und die Unterstützung danken.

Zuletzt danke ich meiner Familie und allen Freunden, die mich während der Arbeit und bei schwierigen Situationen aufgebaut und moralisch unterstützt haben.

اللهم لك الحمد والشكرعلى المعونة والتوفيق
هذه الرسالة أهديها إلى أبي وأمي وإخوتي الذين ساندوني طوال فترة دراستي ووقفوا إلى جانبي
عندالصعاب سآئلاً المولى عزّ وجل لهم الصحة والعافية والهدايه

Einfluss der Prallvermahlung und Windsichtung auf die stoffliche Zusammensetzung und Verarbeitungseigenschaften von Weizenmehlen

Walid Banafa

Abstract

Die Prozesseigenschaften eines Weizenmehles hängen nicht nur von der Qualität des verwendeten Weizens, sondern auch von den technologischen Eigenschaften seiner Inhaltsstoffe ab, wobei die Hauptkomponenten Stärke und Protein die größte Bedeutung haben. Die Gewinnung von Weizenmehlen sowie Mehlfraktionen mit unterschiedlichen Stoff- und Eigenschaftsprofilen ermöglicht den Einsatz dieser Produkte bei der Herstellung verschiedener Lebensmittel, z.B. Panaden, Suppen, TK-Produkten aber auch bei der Herstellung von Verpackungsmitteln und Klebstoffen. Das Ziel dieser Arbeit war die Gewinnung von Fraktionen mit an- und abgereicherten Mehlinhaltsstoffen (Stärke und Protein) durch die Prallvermahlung und Windsichtung sowie Untersuchung der Veränderungen der funktionellen Eigenschaften der Mehle bzw. Mehlfraktionen.

Mit Erhöhung des Energieeintrags bis 200m/s bei der Prallvermahlung stieg der Auflösungsgrad des Mehles bis 95% an. Obwohl die Stoffzusammensetzung der Mehle infolge der Prallvermahlung unverändert blieb, zeigten die geprallten Mehle verbesserte Verarbeitungseigenschaften. Neben dem höheren Stärkebeschädigungsgrad zeigten die Mehle höhere Wasseraufnahme, Teigstabilität, Teigausbeute, Gebäckvolumina sowie bessere Bräunung. Untersuchungen der Teig- und Gluteneigenschaften ergaben eine durch die Prallvermahlung verbesserte Elastizität, die auf den erhöhten Anteil an Thiolgruppen (SH-Gruppen) zurückführbar ist. Des weiteren zeigte die Stärke der geprallten Mehle niedrigere Viskositäten und geringere Retrogradationen.

Durch das Windsichten der geprallten Mehle sind Mehlfraktionen gewonnen worden, die unterschiedliche Zusammensetzung und Qualität aufwiesen. Durch die intensive Prallvermahlung lieferte die Windsichtung hohe Masseanteile an protein- und glutenreichen Mehlfraktionen sowie an stärkereichen Mehlfraktionen. Die Mehlfraktionen zeigten unterschiedliche Wasserbindung in Abhängigkeit von der Stärkebeschädigung und dem Proteingehalt. Infolge der Prallvermahlung zeigten die Mehlfraktionen unterschiedliche Viskositätseigenschaften. Die stärkereichste Fraktion wies eine höhere Viskosität und Retrogradation auf.

Symbol- und Einheitsverzeichnis

Symbol	Einheit	Erläuterung
A_o	m²/g	massenspezifische Oberfläche
ΔA_o	m²/g	Massespezifische Oberflächenzunahme
-	AE	Amylogrammeinheit
-	BU	Brabendereinheit
-	BV	Blauwert (Blue Value)
d_m	µm	mittlere Teilchengröße
d_{TG}	µm	Trennschnitt bzw. Trenngrenze
d^{20}	g/cm³	Dichte bei 20°C
E_G	KWh/t	massenspezifische Gesamtenergie
E_{LL}	KWh/t	Massenspezifische Leerlaufenergie
E_x	-	Extinktion
F	g	Kraft (Gelfestigkeit)
-	FE	Farinogrammeinheit
g	m/s²	Erdbeschleunigung (= 9,81 m/s²)
G'	Pa	Speichermodul (Elastizität)
G''	Pa	Verlustmodul (Viskosität)
M_r	kDa	Molekularmasse
m	g	Masse bzw. Gewicht
m	kg/h	Durchsatz
m_p	-	Umrechnungsfaktor bei der Pentosanbestimmung
μ	-	Luftbeladung
n	-	Stichprobenumfang
P	-	Überschreitungswahrscheinlichkeit
-	RVU	Viskositätseinheit (1 RVU = 12 mPa.s)
$S_{y,x}$	-	Standardfehler
T	°C	Temperatur
tan δ	-	Verlusttangens (G''/G')
v_u	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
X_p	mg/l	Pentosegehalt
χ	-	Trennschärfe

Abkürzungsverzeichnis

Index/ Abkürzung	Einheit	Erläuterung
AF	cm²	Aggregationsfläche
As	-	Ascorbinsäure
AT	-	Aggregationstest
AZ	s	Aggregationszeit
Db	mm	Dehnbarkeit
Dw	N	Dehnwiderstand
DE	cm²	Dehnenergie (Fläche unter der Kurve)
E	g	Einwaage
EV	RVU	Endviskosität
F	%	Feuchtigkeit

FG	-	Feingut
FGG	%	Feuchtglutengehalt
FZ	s	Fallzahl
GG	-	Grobgut
GI	%	Glutenindex
HMW	-	High Molecular Weight
HPLC	-	High Performance Liquid Chromatotography
ICC	-	International Association for Cereal Chemistry and Technology
KG	µm	Korngröße
KE	-	Krumeneigenschaft
LMW	-	Low Molecular Weight
lösl. PR	-	Salzwasserlösliche Proteine
NZ80	-	gepralltes Mehl bei 80 m/s
NZ120	-	gepralltes Mehl bei 120 m/s
NZ160	-	gepralltes Mehl bei 160 m/s
NZ200	-	gepralltes Mehl bei 200 m/s
QZ	-	Farinograph-Qualitätszahl
REM	-	Rasterelektronenmikroskopie
Retrograd.	RVU	Retrogradation
RVA		Rapid Visco Analyser
SA	A	Stromaufnahme
SDS	-	Sodium Dodecyl Sulfate
SH	-	Sulfohydryl bzw. Thiol
SS	-	Disulfidbindungen
STB	BV/g	Stärkebeschädigung
SW	ml	Sedimentationswert
TA	%	Teigausbeute
TXA	-	Texture Analyser
TER	FE	Teigerweichung
TEZ	min	Teigentwicklungszeit
TK	-	Tiefkühl
TST	min	Teigstabilität
TS	-	Trockensubstanz
VA	ml/100g	Volumenausbeute
Verkl. Z	min	Verkleisterungszeit
Visk.- verlust	RVU	Viskositätsverlust
VM	RVU	Verkleisterungsmaximum
VMN	RVU	Verkleisterungsminimum
VT	°C	Verkleisterungstemperatur
VZ	-	Verhältniszahl
WA	%	Wasseraufnahme
WBV	%	Wasserbindungsvermögen
WM	-	mit Walzen ermahlenes Mehl
WST	-	Walzenstuhl

1 Einleitung und Aufgabenstellung 1
2 Theoretischer Teil 4
2.1 Aufbau und Qualität von Weizen 4
2.1.1 Kornaufbau, Verarbeitungseigenschaften und stoffliche Zusammensetzung 4
2.1.2 Weizenproteine 7
2.1.2.1 Charakteristik der Proteine 7
2.1.2.2 Funktionelle Eigenschaften der Glutenproteine 11
2.1.3 Kohlenhydrate des Weizens 13
2.1.3.1 Weizenstärke 13
2.1.3.2 Pentosane 15
2.1.4 Lipide 16
2.2 Stand des Wissens zur Prallmahlung und Windsichtung von Weizenmahlprodukten 16
2.2.1 Prallvermahlung und Windsichtung 16
2.2.2 Prallvermahlung von Weizengrießen und -dunsten 20
2.2.3 Feinstzerkleinerung von Weizenmehlen und Windsichtung 24
3 Material und Methoden 28
3.1 Charakterisierung des verwendeten Weizens 28
3.2 Technischer Versuchsablauf 28
3.2.1 Konditionieren 28
3.2.2 Vermahlen 31
3.2.3 Fraktionieren 32
3.3 Physiko-chemische Methoden 34
3.3.1 Standardmethoden 34
3.3.2 Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung 35
3.3.3 Stärkezustand und -eigenschaften 35
3.3.3.1 Bestimmung der Stärkebeschädigung nach Mc Dermott 36
3.3.3.2 Verkleisterungseigenschaften 36
3.3.3.3 α-Amylaseaktivität 37
3.3.4 Bestimmung der Pentosane 39
3.3.5 Zuckeranalyse (HPLC) 40
3.3.6 Bestimmung des Wasserbindungsvermögens 40
3.3.7 Schweresinkverfahren 41

3.3.8 Bestimmung der salzwasserlöslichen Proteine 42
3.3.9 Katalaseaktivität bzw. Katalasezahl 42
3.3.10 Photometrische Quantifizierung der Thiolgruppen 44
3.3.11 Mikroskopische Untersuchungen 45
3.3.12 Rheologische Untersuchungen 45
3.3.12.1 Farinograph 46
3.3.12.2 Texture Analyser....46
3.3.12.3 Extensograph....46
3.3.12.4 Glutenaggregationstest....46
3.3.12.5 Kriech-Erholungstest (Glutograph) 48
3.3.12.6 Oszillationsmessungen....48
3.3.13 Backversuche....49
4 Ergebnisse und Diskussion 50
4.1 Mahlergebnisse der prallzerkleinerten Mehle 50
4.1.1 Granulations- und Oberflächenänderungen 50
4.1.2 Ergebnisse der mikroskopischen Aufnahmen 55
4.1.3 Stoffliche Zusammensetzung und Eigenschaften der Prallmehle 59
4.1.3.1 Anteile der Inhaltsstoffe 59
4.1.3.2 Zuckergehalte der Mehle 60
4.1.3.3 Thiolgehalte der Mehle 62
4.1.3.4 α-Amylase- und Katalaseaktivitäten 64
4.1.4 Zustand und Eigenschaften der Stärke geprallter Mehle....65
4.1.5 Eigenschaften des Glutens der geprallten Mehle 71
4.1.5.1 Qualität der Glutenproteine....71
4.1.5.2 Dehnungseigenschaften (Extensogramme des Glutens)....72
4.1.5.3 Viskoelastisches Verhalten von Gluten und Teigen....73
4.1.5.4 Relaxationseigenschaften....76
4.1.5.5 Gluten- Aggregationsverhalten 77
4.1.5.6 Diskussion zur Glutenqualität der geprallten Mehle....78
4.1.6 Rheologische Eigenschaften der Teige....79
4.1.6.1 Kneteigenschaften der Mehle 79
4.1.6.2 Dehnungseigenschaften der Teige 84
4.1.7 Backeigenschaften 85
4.1.7.1 Backergebnisse der Versuchsmehle 85

4.1.7.2 Backergebnisse des Handelsmehles mit den zugemischten Versuchsmehlen 86
4.1.8 Schlussfolgerungen zum Einfluss der Prallzerkleinerung auf die Mehleigenschaften 87
4.2 Eigenschaften der windgesichteten Mehlfraktionen 91
4.2.1 Charakterisierung der Mehlfraktionen 91
4.2.1.1 Anteile und Granulation 91
4.2.1.2 Korngrößenzusammensetzung der Mehlfraktionen 93
4.2.1.3 Trennschärfe bei der Windsichtung 95
4.2.1.4 Ergebnisse der mikroskopischen Aufnahmen 98
4.2.2 Stoffverschiebungen in den Mehlfraktionen 101
4.2.2.1 Inhaltsstoffzusammensetzung 101
4.2.2.2 Ergebnisse des Schweresinkverfahrens 104
4.2.2.2.1 Sedimentierbarkeit der Versuchsmehle 104
4.2.2.2.2 Sedimentierbarkeit der Mehlfraktionen 105
4.2.4 Rheologische Eigenschaften von Gluten und Teigen 114
4.2.4.1 Dehnungseigenschaften des Glutens 114
4.2.4.2 Viskoelastisches Verhalten von Gluten der Mehlfraktionen 116
4.2.5 Schlussfolgerungen zu den Eigenschaften der windgesichteten Mehlfraktionen 118
5 Zusammenfassung 120
6 Literaturverzeichnis 123
7 Abbildungsverzeichnis 132
8 Tabellenverzeichnis 135
9 Anhang 137
10 Lebenslauf 153

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Weizen nimmt aufgrund seiner einzigartigen Backfähigkeit eine Sonderstellung unter den Getreidearten ein, doch kann diese Qualitätseigenschaft in weiten Grenzen schwanken. So sind Teig- und Backeigenschaften in starkem Maße von der Sorte und bei gegebener Sorte von den Anbaubedingungen (Boden, Klima, Standort, Düngung) abhängig. Die Unterschiede sind hauptsächlich auf eine differierende qualitative und quantitative inhaltsstoffliche Zusammensetzung des Weizens zurückzuführen. Glutengehalt und –qualität spielen eine wesentliche Rolle für die Beurteilung der Weizenqualität. Zu den herausragenden funktionellen Eigenschaften der Glutenproteine zählen die Quellfähigkeit und die Wasserbindung sowie die Eigenschaft, beim Anteigen mit Wasser eine kohäsive, viskoelastische Masse, das Gluten, zu bilden. Die strukturbildenden Eigenschaften des Glutens haben zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten bei der Herstellung von Lebensmitteln. So werden neben Brot und Kleingebäck auch feine Backwaren, Dauerbackwaren und Teigwaren aus Weizenmehl hergestellt. Aber auch in der chemisch-technischen Industrie werden Weizenmehle z.B. zur Herstellung von Verpackungsmitteln und Klebstoffen eingesetzt.

Die Vermahlung des Weizenkorns beeinflusst die technologischen Eigenschaften des daraus hergestellten Mehles. Aufgrund der starken Inhomogenität des Getreidekorns sind Mahlverfahren nicht nur Zerkleinerungsverfahren, sondern ermöglichen einen selektiven Aufschluss des Korns. Hierbei hat der Mehlkörper des Korns, der hauptsächlich aus Stärke und Glutenprotein besteht, für die Weizenvermahlung eine besondere Bedeutung.

Die Mühlenindustrie ist heutzutage aus betriebspezifischen und wirtschaftlichen Belangen gefordert, neue Technologien einzusetzen, um Mehle sowie Mahlprodukte mit spezifischen Eigenschaften nach dem Motto „Mehl nach Maß“ herstellen zu können. Die Hauptmenge der produzierten Mehle wird zur Herstellung von Typenmehlen für die Produktion von Backwaren verwendet. Darüber hinaus sind Mahlprodukte z.B. für Teigwaren, Waffeln und Oblaten, Panaden, die Suppenindustrie sowie als Aromaträgerstoff für Getränke oder als Haftmehle für die Süßwarenindustrie zu gewinnen [1, 2]. Diese verschiedenen Einsatzmöglichkeiten benötigen Mehle mit spezifischen Eigenschaften, z.B. geringe Kleberaggregation, hohe Stärkebeschädigung, geringe Enzymaktivität, bestimmte Heiß-/Kaltviskositäten. Solche Mehle können nicht mit der gängigen Vermahlungstechnologie hergestellt werden. Dazu sind spezielle Mahl- und

Sichtverfahren notwendig, die zu einer mechanischen Modifizierung der Mehle führen, z.B. durch eine selektive Feinstmahlung der Mehle mit weitestgehender Strukturauflösung des Mehlkörpers in Protein und Stärke und nachfolgende Feinsttrennung in verschiedene Fraktionen. Eingesetzt werden auch thermische und hydrothermische Verfahren zur Modifizierung der Mehle bzw. der Mehlfraktionen [2].
Bei der Zerkleinerung von Weizenmahlprodukten in der Stiftmühle mit Umfangsgeschwindigkeiten bis zu 200 m/s kann im Vergleich zur Walzenstuhlzerkleinerung eine bis zu tausendfach höhere kinetische Energie in das Gut eingetragen werden [3, 4]. Daraus resultiert eine wesentlich intensivere Zerkleinerung mit höherem Zerkleinerungsgrad, größerer Oberflächenzunahme und höherem Feingutanteil. Das führt zu einer weitestgehenden Strukturauflösung der Mehlkörperzellen mit einem hohen Anteil freigelegter Stärkekörner und Proteinteilchen.
Der hohe Energieeintrag in das Gut erhöht nicht nur die Mehlmenge, sondern verändert auch die stoffliche Zusammensetzung der Mehle, die Beschaffenheit der Inhaltsstoffe und ihre technologischen Eigenschaften. Daher ist in den letzten Jahren das Interesse der Getreidemüllerei an der Prallvermahlung von Getreide und Zwischenprodukten der Getreidevermahlung gestiegen, aber auch an der Prallvermahlung und Windsichtung von Mehlen. Die Feinstmahlung begünstigt das Auslösen der Stärkekörner aus der Proteinmatrix. Höhere Anteile an freiliegenden Stärkekörnern und Proteinteilchen werden erreicht, so dass eine An- bzw. Abreicherung der Inhaltsstoffe durch die Windsichtung ermöglicht wird. Die gewonnen feinen Mehle und deren Fraktionen können für spezielle Erzeugnisse verwendet werden [5, 6]. Darüber hinaus werden dadurch die technologischen Eigenschaften beeinflusst, die Wasseraufnahme des Mehles, der Grad der Stärkebeschädigung sowie die Verkleisterungseigenschaften von Mehlstärken werden verändert. Somit kann die Mühlenindustrie durch Prallvermahlung und Windsichtung Mehle mechanisch modifizieren, und Mehle unterschiedlicher Inhaltsstoffzusammensetzung sowie technologischer Eigenschaften gewinnen.

Aus der dargestellten Problematik wird die Zielstellung der vorliegenden Arbeit abgeleitet. Sie besteht darin, den Einfluss hoher Zerkleinerungsenergien bei der Prallvermahlung auf Mehlmenge, Granulation und Mehleigenschaften und somit auf die Mehlqualität bzw. auf die Qualität der daraus windgesichteten Fraktionen zu untersuchen.

Für die Untersuchungen wurde ein Weizenmehl mit einem niedrigen Aschegehalt von 0,54 % TS verwendet. Mit der niedrigen Ausmahlung ist ein Einfluss nichtbackfähiger Quellstoffe aus den Kornrandschichten auszuschließen.
Das Ausgangsmehl wurde in einer Stiftmühle bei den Prallgeschwindigkeiten 80, 120, 160 und 200 m/s nachzerkleinert. Anschließend sind das Walzenmehl (Ausgangsmehl) und die prallzerkleinerten Mehle mittels Windsichter in verschiedene Fraktionen klassiert worden. Die Mehle und Mehlfraktionen wurden auf ihre stoffliche Zusammensetzung und auf ihre funktionellen Eigenschaften untersucht.
Die Untersuchungen sollen Erkenntnisse liefern über den Einfluss der Prallenergie auf:

- Granulation und die stoffliche Zusammensetzung der Mehle sowie der Mehlfraktionen
- die Glutenqualität und die technologischen Eigenschaften
- die Änderungen des Stärkezustandes und ihrer Funktionalität
- die Bedeutung der Pentosane in den prallgemahlenen Mehlen

2 Theoretischer Teil

2.1 Aufbau und Qualität von Weizen

2.1.1 Kornaufbau, Verarbeitungseigenschaften und stoffliche Zusammensetzung

Weizen zählt zu den weltweit wichtigsten Getreidearten und ist ein Hauptnahrungsmittel des Menschen. Er zeichnet sich durch beachtliche Mengen an pflanzlichem Protein und an Kohlenhydraten aus. Darüber hinaus ist Weizen ein Mineralstoff-, Ballaststoff- und Vitaminlieferant.

Weizen ist neben Mais und Reis mit einem Anteil von etwa 29 % der Weltgetreideerzeugung eine der bedeutendsten Getreidearten (Abb.1). Brot und Backwaren sind die wichtigsten Weizenprodukte. Von der Weltweizenernte werden ca. 70 % für die menschliche Ernährung verwendet, eine vergleichsweise kleine Menge zur Stärkegewinnung und in technischen Bereichen, der Rest überwiegend in der Tierernährung [7].

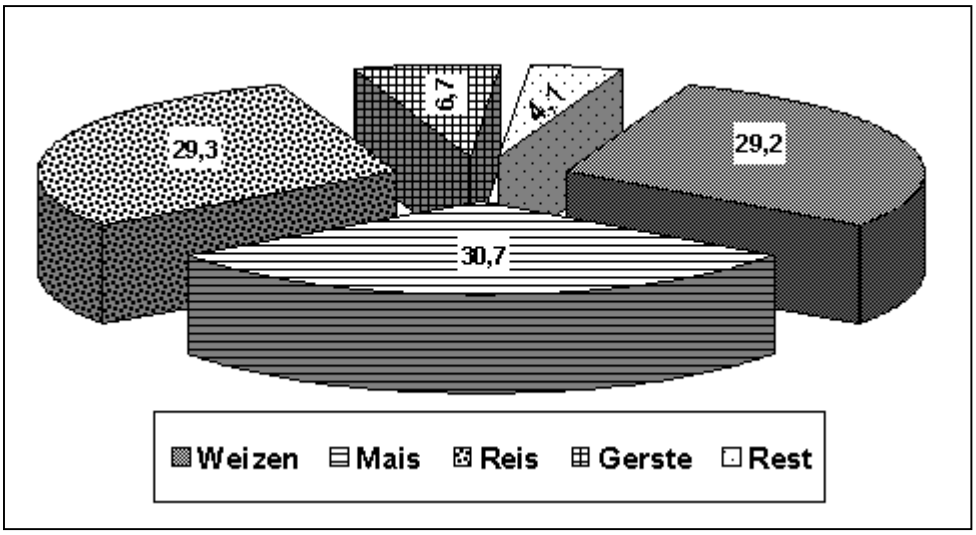


Abb.1: Weltgetreideproduktion, Jahr 2002 [8]

Das Weizenkorn (Abb. 2) besteht aus zusammengewachsener Frucht- und Samenschale, Endosperm (Aleuronschicht und Mehlkörper) und Keimling (Embryo). Der Mehlkörper ist mit etwa 82 % der wichtigste Teil des Weizenkorns. Er wird aus großen, dünnwandigen Zellen gebildet, in denen sich Stärke und als Einbettungssub-

stanz Protein befinden. Die den Mehlkörper umhüllende Aleuronschicht besteht aus Zellen, die reich an Proteinen, Lipiden, Mineralstoffen und Enzymen sind. Die Proteine der Aleuronzellen (Albumine) sind nicht zur Glutenbildung fähig.
Der Keimling enthält die höchsten Protein- und Lipidanteile, weiterhin Kohlenhydrate (Nicht-Stärke- Polysaccharide), Mineralstoffe und Enzyme. Die Proteine des Keimlings (Globuline) sind ebenfalls nicht zur Glutenbildung fähig. Die Schale besteht zum größten Teil aus Zellulose und Pentosanen, und enthält ferner Proteine sowie Mineralstoffe.

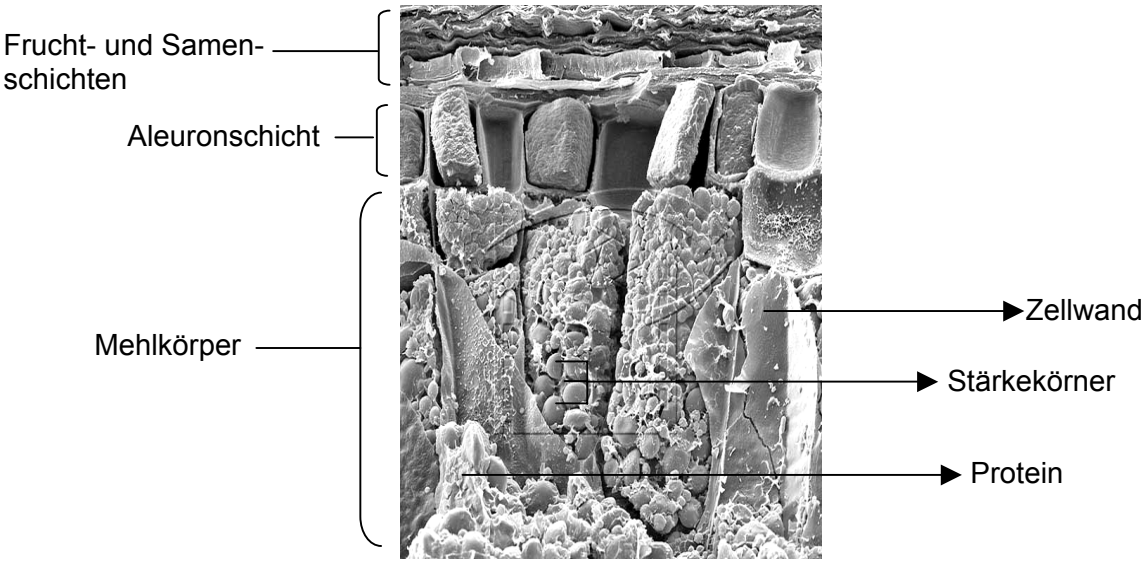


Abb. 2: Aufbau des Weizenkorns [9]

Die chemische Zusammensetzung des Weizenkorns veranschaulicht die Tabelle 1. Die Anteile der Bestandteile können in Abhängigkeit von der Sorte und den Anbaubedingungen variieren.

Tab. 1: Zusammensetzung des Weizenkorns [10]

Kornteil	Anteil [% TS]	Protein [% TS]	Asche [% TS]	Stärke [% TS]	Rohfaser [% TS]	Zellulose [% TS]	Pentosane [% TS]	Lipide [% TS]
Schale	8,0	6,9	3,4	0	23,9	27,0	46,6	0,8
Aleuron-schicht	7,0	31,7	10,9	0	6,6	5,3	28,3	9,1
Keimling	2,5	34,0	4,5	0	2,4	-	-	27,6
Mehlkörper	82,5	12,6	0,6	80,4	0,3	0,3	3,3	1,6

Die Weizensorten werden nach ihrer Qualität in Kategorien eingestuft. Neben den Sortenmerkmalen Protein- und Glutengehalt werden weitere Merkmale, die die Eigenschaftskomplexe Mahl- und Backfähigkeit beschreiben, zur Beurteilung der Qualität des Weizens herangezogen.

Die Mahlfähigkeit umfasst das Grießbildungsvermögen sowie die Mehlergiebigkeit. Der Anteil des Mehlkörpers und seine Härte (Kornhärte) bestimmen das Grießbildungsvermögen sowie die Auflösbarkeit der Grieße zu Mehl.

Nach dem Grießbildungsvermögen und der Griffigkeit (Granulation) des Mehles kann man die Weizen in zwei Gruppen einteilen, in harte und in weiche Weizen. Während harte Weizen bei der Vermahlung unter standardisierten Bedingungen im allgemeinen einen hohen Grießanfall und griffigere Mehle ergeben, liegt der Grießanfall bei weichen Weizen niedriger und die Mehle sind feiner.

Auf die Backqualität haben Menge und Qualität der Protein- und Stärkekomponenten des Weizens entscheidenden Einfluss. Die Wasseraufnahmefähigkeit des Mehles, die Teigeigenschaften und das Backvolumen sind die wichtigsten Kennwerte zur Beurteilung der Backqualität.

Die Proteinmenge und –qualität, der Stärkezustand und der durch den Vermahlungsprozess entstandene Stärkebeschädigungsgrad beeinflussen die Wasseraufnahme. Darüber hinaus spielen die Pentosane ebenfalls eine bedeutende Rolle für die Wasseraufnahme. Pentosane können etwa das 10-fache ihres Gewichts an Wasser binden. Im Weizenmehl binden sie ca. 20 % vom Schüttwasser. Von der Stärke werden Je nach Beschädigungsgrad etwa 47 % des Schüttwassers aufgenommen. Die Proteine binden ca. 23 %.

Eine hohe Wasseraufnahme eines Mehles fördert eine hohe Teigausbeute, die sich bei ausreichender Glutenqualität wiederum positiv auf die Gärtoleranz und somit auf das Backvolumen auswirkt. Bei der Teigbildung hydratisiert das Protein und bildet zwischen den Stärkekörnern eine zähe Masse, das sogenannte Gluten. Diese Glutenbildung schafft die Grundlage für die Backfähigkeit des Weizens und die vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten des Weizenmehles.

Im Backprozess wird das im Teig angebotene Wasser mengenmäßig und zeitlich in Abhängigkeit von der Temperatur unterschiedlich gebunden und gehalten. Die Proteine werden bei erhöhter Temperatur denaturiert. Dabei wird das Wasser freigesetzt, das von der Stärke zum Quellen und Verkleistern aufgenommen wird. Die Pentosane ändern sich nicht und behalten ihren Wasseranteil gebunden.

Das Wasserbindungsvermögen der Inhaltsstoffe beeinflusst das viskoelastische Verhalten und die Dehnungseigenschaften der Teige. Die Wasserbindung bestimmt auch das Viskositätsverhalten der Stärke beim Backprozess und somit die Eigenschaften der Gebäcke wie Krumenfestigkeit und Gebäckvolumen.
Durch die Stoffwechselaktivität der zugesetzten Backhefe werden die im Teig vorhandenen Zucker zerlegt, dabei entstehen Gase. Die stärkeabbauenden mehleigenen Enzyme sorgen für Nachschub an Zucker für die Hefe und damit steigt der Trieb. Das Gashaltevermögen des Teiges und das Endvolumen der Gebäcke werden in erste Linie durch Glutengehalt und -qualität bestimmt. Ein ausgewogenes Verhältnis von Dehnbarkeit und Dehnwiderstand kennzeichnet Gluten guter Qualität.

2.1.2 Weizenproteine

2.1.2.1 Charakteristik der Proteine

Die Proteine sind neben der Stärke die wichtigsten Inhaltsstoffe des Weizens und von großer technologischer und ernährungsphysiologischer Bedeutung. Sie sind in allen Teilen des Weizenkorns enthalten. Die Aleuronschicht und der Keimling besitzen den jeweils höchsten Proteingehalt, jedoch enthält der Mehlkörper wegen seines hohen Anteils am Gesamtkorn die Hauptmasse des Gesamtproteins mit etwa 70 % (Tab.1). Weizenmehl enthält ca. 10-14 % Kleberproteine.
Man unterscheidet beim Aufbau der Proteine vier Strukturtypen. Die Primär-, Sekundär-, Tertiär- und Quartärstruktur. Die Proteine des Weizens unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer Zusammensetzung als auch in ihren physikalischen Eigenschaften, wie Dissoziation und Löslichkeit. Die Bindungsart zwischen den Aminosäuren der Peptidketten spielt eine große Rolle für die Funktionalität des Proteins.
Chemische Bindungen in den Proteinen unterteilen sich in kovalente und nichtkovalente Bindungen. Die kovalenten Bindungen kommen innerhalb der Aminosäure, zwischen den Aminosäuren und als Disulfidbindungen zwischen den Peptidketten vor. Die Assoziationsenergie dieser Bindungen ist gegenüber den nichtkovalente Bindungen groß. Ionen-, Wasserstoffbrücken und van der Waals-Bindungen sind nichtkovalente Bindungen [11].
Die Proteine weisen in Abhängigkeit von Art und Anzahl ihrer funktionellen Gruppen sowohl hydrophobe als hydrophile Eigenschaften auf. Die Disulfidbindungen (SS-Bindungen) sind signifikant für die Teigstruktur und verantwortlich für das dominant

elastische Verhalten des viskoelastischen Systems Teig. Rheologische Eigenschaften von Teigen werden auf Wechselwirkungen zwischen den SS-Gruppen und SH-Gruppen zurückgeführt [12].

Darüber hinaus werden die im Weizenmehl vorkommenden Proteine nach ihrem Löslichkeitsverhalten klassifiziert. Die Klassifizierung geht auf Osborne zurück. In Tabelle 2 sind die Proteinfraktionen nach ihrer Löslichkeit zusammengefasst.

Die Glutenproteine sind die beiden quellfähigen Speicherproteine Gliadin und Glutenin; sie bilden den Proteinkomplex Gluten. Das Gluten hat die Fähigkeit, das während der Fermentation entstehende Gas zurückzuhalten. Der Backprozess führt dann zur Ausbildung eines voluminösen Brotes. Daher werden die wichtigsten Qualitätsmerkmale eines Weizenmehles (Teigbeschaffenheit und Backvolumen) wesentlich den Glutenproteinen zugeschrieben.

Die wasser- sowie salzwasserlöslichen Proteine (Albumin, Globulin) sind nichtglutenbildende Proteine. Sie befinden sich hauptsächlich im Keim und in der Aleuronschicht, sie sind aber auch im Endosperm lokalisiert, z.B. in der Zellwand und an der Stärke. Diese Proteine gelten aufgrund ihrer biologischen Funktion als ernährungsphysiologische Proteine.

Tab. 2: Anteile und Löslichkeit der Weizenproteine [13]

Weizenprotein	Anteil [%]	Löslichkeitsverhalten	Eigenschaft
Albumin	3-5	löslich in Wasser	-
Globulin	6-10	löslich in salzhaltigem Wasser	-
Gliadin	40-50	löslich in 70 % Ethanol	dehnbar, “viskos“
Glutenin (Rückstand)	30-40	unlöslich in Ethanol	wenig dehnbar, elastisch

In der Literatur gibt es unterschiedliche Angaben über die Anteile der Weizenproteine. Die Albumine haben eine Molekülmasse zwischen 17-28 kDa. Die Globuline zeichnen sich durch einen besonders hohen Anteil an Thiol (SH)-gruppen sowie Disulfidbindungen (SS-Gruppen) aus. Qualitativ bessere Weizenmehle haben im allgemeinen einen höheren Anteil an salzwasserlöslichen Proteinen als schwache Mehle. Ein positiver Zusammenhang zwischen dem Globulingehalt und dem Brotvolumen wurde festgestellt, während die Albumine eine negative Beziehung mit dem Brotvolumen zeigten [13].

Die Proteinquantität ist hauptsächlich von den Anbaubedingungen abhängt, während die Qualität vor allem genetisch determiniert ist. Jedoch bei Behandlung des Weizens bzw. des Weizenmehles, z.B. thermisch oder hydrothermisch, wird die Qualität der Proteine beeinflusst. Somit kann die Glutenbildung beeinträchtigt werden.

In Gegenwart von Wasser und unter Einwirkung einer mechanischen Energie in Form des Schergefälles beim Kneten bildet sich der Teig. Dabei entsteht aufgrund der Wechselwirkung zwischen den wasserunlöslichen Proteinfraktionen Gliadinen und Gluteninen eine dehnbare und gummiartige Substanz, das Gluten. Die Trockenmasse des Glutens enthält über 80 % Protein, ca. 5-10 % Stärke, 5 % Lipide und Spuren von Mineralstoffen [14].

Die äußerst komplex zusammengesetzten Kleberproteine, jede Weizensorte enthält mehr als hundert Komponenten, lassen sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Löslichkeit in wässrigen Alkoholen in die löslichen Gliadine und die unlöslichen Glutenine einteilen. Die chemische Zusammensetzung der Glutenproteine steht in engem Zusammenhang mit den physikalischen Eigenschaften des Glutens und damit auch des Teiges. Die Gliadine liegen überwiegend monomer vor ($M_r \approx 30– 60$ kDa) und setzen sich aus vier Typen (ω5-, ω1,2-, α-, γ- Gliadine) zusammen); sie geben dem Kleber seine viskosen Eigenschaften. Die Glutenine sind über Disulfidbindungen und nichtkovalenten Bindungen zu Aggregaten mit einem sehr breiten Molekulargewichtsbereich ($M_r \approx 100$ kDa –20000 kDa) verbunden. Sie werden für die Festigkeit/Elastizität von Teig und Kleber verantwortlich gemacht [15]. Die Glutenine bestehen aus drei verschiedenen Typen (x- und y-Typ der HMW-Untereinheiten, LMW-Untereinheiten). Die elastischen Eigenschaften des Glutens bzw. Teiges sind den Gluteninen zuzuschreiben. Damit bestimmen die Speicherproteine die physikalischen Eigenschaften des Glutens wie Kohäsivität, Festigkeit /Elastizität und Viskosität.

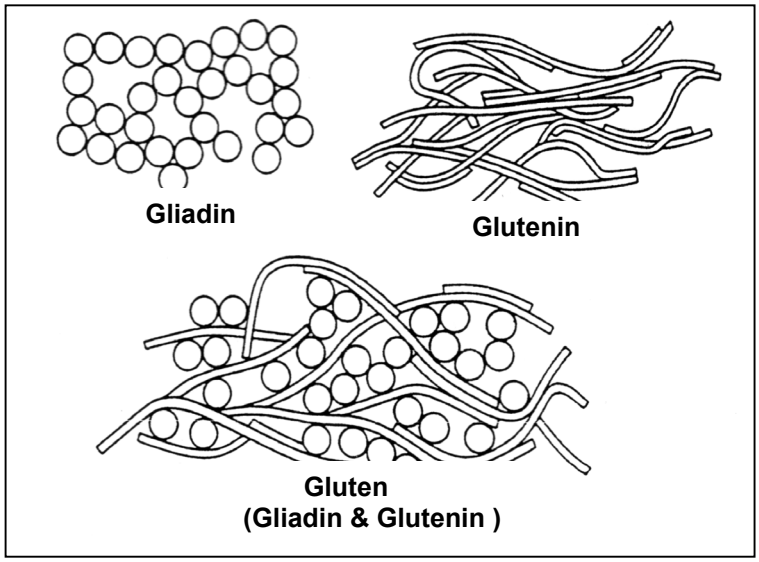


Abb. 3: Gluten und seine Komponenten [16]

Neben der Aminosäurezusammensetzung, der Molekulargewichtsverteilung und der Anzahl sowie Art der Bindungen werden die physikalischen Eigenschaften des Glutens von den Lipo- und Glykoproteinen beeinflusst. Mit zunehmendem Molekulargewicht der Glutenine nimmt die Elastizität des Glutens zu, während bei den Gliadinen höhere Molekulargewichte zu einer Zunahme der Plastizität führen. Die Lipo- und Glykoproteine bewirken die Elastizität des Glutens durch hydrophobe Wechselwirkung bei der Ausbildung des Glutennetzwerks [17].

Ein Modell, das die Struktur des Glutens und seiner Komponenten darstellt, zeigt die Abbildung 3. Dabei bilden die Glutenine das Grundgerüst des Proteinnetzes, in das sich die Gliadine einfügen. Die Gliadine bilden die Verbindungsstellen zu den Gluteninmolekülen, eine unmittelbare Berührung der Gluteninmoleküle untereinander wird dadurch unterbrochen. Die Einlagerung der Gliadine zwischen die Gluteninstränge vermindert die Festigkeit und Steifheit des Glutens [18].

Es ist bekannt, dass die Wasseraufnahme, die Knetzeit und Teigstabilität sowie der Dehnwiderstand und die Dehnbarkeit mit dem Proteingehalt sehr gut korrelieren [19]. Die Beschaffenheit der Glutenstruktur und damit des Teiges wird weitgehend durch die Molekulargewichtsverteilung und dem Verhältnis von Gliadin zu Glutenin bestimmt. Aggregations- bzw. Desaggregationsvorgänge in den Glutenmolekülen beeinflussen die Teigeigenschaften stark. Durch Ab- bzw. Zunahme der Löslichkeit der Proteinuntereinheiten verändert sich das Verhältnis der Gliadine/Glutenine und

infolgedessen ändern sich die rheologischen Eigenschaften des Glutens bzw. des Teiges.

Die Disulfidbindungen spielen dabei eine wesentliche Rolle im Aufbau des Glutennetzwerks und beeinflussen somit die rheologischen Eigenschaften von Weizenteigen. Sie erhöhen die Elastizität des Teiges bzw. des Glutens. Im Weizenmehl liegen etwa 95 % des Gesamtcysteins als Disulfide vor. Der Großteil der Cysteinreste in den monomeren α- und γ--Gliadinen ist intramolekular gebunden. Die HMW- und LMW- Untereinheiten der Glutenine bilden sowohl inter- wie intramolekulare Disulfidbindungen aus. Nur etwa 5 % des Gesamtcysteins liegen in der Form von Thiolform (SH-Form) vor, davon entfallen ca. 0,5 % auf niedermolekulare Thiolverbindungen wie Glutathion und Cystin und ca. 4,5 % auf proteingebundenes Cystein [20].

In der Literatur gibt es sehr unterschiedliche Angaben über den SH- und SS-Gehalten in Weizenmehlen. Durch amperometrische Titration bestimmte Werte an freien SH-Gruppen im Weizenmehl liegen im Bereich von 5,8 bis18,4 µmol/g_{Mehl} [21].

2.1.2.2 Funktionelle Eigenschaften der Glutenproteine

Die niedermolekularen Gliadine üben aufgrund ihrer hydrophoben Eigenschaften eine erweichende Wirkung auf den Weizenkleber aus, sie setzen die Knetzeit eines Mehles herab und verringern die Kleberfestigkeit [22]. Infolgedessen erhöht sich die Dehnbarkeit des Glutens bzw. des Teiges und der Dehnwiderstand des Glutens bzw. des Teiges kann somit verringert werden. Die Hydrophobizität der Gliadine ist auf die Aminosäuren Glutamin und Prolin zurückzuführen. Die hydrophoben Wechselwirkungen sind für die Bildung von Komplexen zwischen Lipiden und Proteinen von größter Bedeutung. Die hochmolekularen Glutenine sind hydrophil. Durch Reduktion der Disulfidbindungen werden Proteinuntereinheiten freigesetzt, die wie die Gliadine in wässrigen Alkoholen löslich sind.

Der Einfluss von Luftsauerstoff und Stickstoff auf die technologischen Eigenschaften des Glutens wurde von Dirndorfer et al. an Weizenmehlen verschiedener Qualität untersucht [23]. Nach der Vermahlung im Brabender Quadrumat Junior wurden die Mehle unmittelbar mit Luftsauerstoff bzw. Stickstoff überblasen. Aus diesen Mehlen wurden Kleber unter Luftsauerstoff bzw. Stickstoff isoliert. Ein dritter Kleber, dessen Mehl mit Stickstoff überblasen wurde, wurde unter Luftsauerstoff isoliert. Die Kleber, die mit dem Luftsauerstoff behandelt wurden, wiesen Oxidationsvorgänge auf. Die

Zugversuche dieser Kleber zeigten Verfestigungen, d.h. höhere Dehnwiderstände und niedrige Dehnbarkeiten sind festgestellt worden. Eine chemische Analyse der oxidierten Mehle in der HPLC zeigte eine Zunahme der sehr hochmolekularen Proteine. Diese Erscheinungen wurden nur bei starken Weizensorten festgestellt, dagegen konnte bei schwachen Weizensorten kein Einfluss von Luftsauerstoff beobachtet werden.
Die rheologischen Eigenschaften von Teigen und das Backverhalten reagieren sehr empfindlich auf Veränderungen des im Mehl existierenden Redoxsystems. Reduktionsmittel wie Glutathion führen zu weicheren Teigen, Oxidationsmittel wie Kaliumbromat oder Luftsauerstoff bewirken eine Verfestigung der Teige. Als Ursache hierfür werden Veränderungen in der Thiol/Disulfid-Struktur der Kleberproteine vermutet. Durch die Oxidationen von Mehlen wurden niedrigere Thiolgehalte in den Mehlen festgestellt. So wiesen unter Stickstoff ermahlene Mehle höhere Thiolgehalte im Vergleich zu unter Luftsauerstoff ermahlene Mehle auf [24]. Bezüglich der rheologischen Eigenschaften zeigen sowohl Teig als auch Kleber, die unter Stickstoff bereitet worden sind, einen geringeren Dehnwiderstand und eine erhöhte Dehnbarkeit [20, 24].

Sorten– und anbaubedingte Unterschiede in den Teig- und Backeigenschaften von Weizenmehl werden auf unterschiedliche Strukturen einzelner Kleberproteine wie auch auf ihre Mengen und Mengenverhältnisse im Mehl zurückgeführt. Seit langem ist bekannt, dass die Backqualität von Mehl mit dem Proteingehalt und damit mit der Menge der Kleberproteine korreliert ist. Da sich der Grad dieser Beziehung als stark sortenabhängig erwies, wurde der Begriff „Proteinqualität“ als weitere Einflussgröße eingeführt. Aus den zahlreichen Arbeiten der Literatur geht hervor, dass die Menge an hochmolekularen Gluteninen ein sehr wichtiger Faktor für die Proteinqualität darstellt [25, 26, 27]. Der Sedimentationstest und der Glutenindex wurden daher zur Qualitätsbestimmung der Mehlproteine als Standardverfahren eingeführt. Die quantitative Bestimmung einzelner Kleberproteintypen und die rheologischen sowie backtechnischen Untersuchungen zeigen, dass die Festigkeit von Teig und Kleber wesentlich von der Menge der Gluteninuntereinheiten sowie vom Verhältnis Gliadin/Glutenin bestimmt wird. Für die Backqualität spielt neben dem Proteingehalt des Mehles die Struktur und die Menge der HMW-Untereinheiten, insbesondere des x-Typs, eine große Rolle [28, 29, 30].

Die Tatsache, dass Stärke und Kleber im Teigsystem in Wechselwirkung treten, ist zur Erklärung der Mehlqualität wichtig. Qualitativ schlechter Kleber scheint intensiver mit der Stärke in Wechselwirkung zu treten und expandiert deswegen nicht so leicht unter dem Druck der Fermentationsgase. Andererseits treten in einem qualitativ gutem Mehl schwächere Wechselwirkungen zwischen Kleber und Stärke auf, die eine größere Expansion ermöglichen und das Gebäckvolumen somit vergrößern [31].
Ebenfalls wurden Wechselwirkungen zwischen Pentosanen und Gluten in Form von Assoziationen festgestellt, die zur Veränderungen der Dehnungseigenschaften der Teige führten. Durch die Pentosane wurde die Elastizität des Teiges erhöht [32, 33]. Die wasserunlöslichen Pentosane verbesserten das Brotvolumen. Die Wasserstoffbrückenbindungen können beim Anteigen des Mehles Assoziationen zwischen Stärke und Proteinen begünstigen [34].

2.1.3 Kohlenhydrate des Weizens

2.1.3.1 Weizenstärke

Die Stärke ist ein durch Assimilation entstandenes Reservekohlenhydrat; sie ist im Weizenkorn ausschließlich im Mehlkörper lokalisiert [10]. Die Stärke ist im Hinblick auf ihren Masseanteil der bedeutsamste Inhaltsstoff des Weizens.
Die Stärke kommt in Form von Körnern vor, die rund und abgeflacht sind (Abb. 4). Der Hauptmasseanteil der Stärkekörner in Weizenmehlen mit ca. 80 % liegt im Korngrößenbereich von 10-30 µm. Der Anteil an Stärkekörner <10 µm macht etwa 20 % aus [35, 36, 92]. Die Anzahl der Stärkekörner in einem Weizenkorn beträgt ca. 7.10^8, sie nehmen eine Oberfläche von etwa 350 cm² ein [92]. Weizenstärke besteht aus etwa 25 % linearkettiger Amylose und 75 % stark verzweigtem Amylopektin, und enthält kleine Mengen Lipide, Proteine sowie Mineralstoffe.

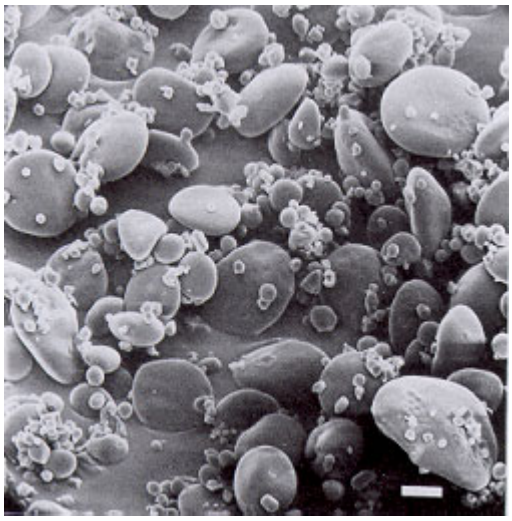


Abb. 4: Mikroskopische Aufnahme von isolierter Weizenstärke [37]

Die funktionellen Eigenschaften der Weizenstärke in Hinblick auf ihre Verarbeitung zu Backwaren und Nährmitteln beruhen auf komplexen Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Stärkekomponenten und dem Wasser.

Zu den wichtigsten Eigenschaften der Stärke zählen die Verkleisterung, Viskositätsausbildung, Retrogradation und die Gelbildung. Diese Eigenschaften werden von mehreren Faktoren beeinflusst. Unter anderem kann die Art und der Umfang der Stärkebeschädigung durch die Vermahlung beeinflusst werden. Die Wasseraufnahme korreliert stark mit dem Anteil mechanisch beschädigter Stärke. Ein hoher Beschädigungsgrad führt zu einer höheren Wasseraufnahme und höherer Enzymsuszeptibilität. Die Quell- und Verkleisterungsvermögen der Stärke werden mit steigender Stärkebeschädigung verringert [38, 39]. Ein bestimmter Beschädigungsgrad der Stärke im Weizenmehl wird für die Gasbildung im Teig angestrebt. Ein optimaler Wert der mechanisch beschädigten Stärke im Mehl für optimale Backeigenschaften ist schwierig vorauszusagen. Auf Basis des Zusammenhangs zwischen dem Proteingehalt und der Stärkebeschädigung im Mehl wurde ein mathematisches Modell für den optimalen Stärkebeschädigungsgrad erstellt [40]. Die Gleichung 1 wird zur Ermittlung des optimalen Wertes angewandt.

$$\text{Optimale Stärkebeschädigung [\%]} = \frac{(\text{Proteingehalt [\%]})^2}{6} \qquad \text{Gleichung (1)}$$

Bei qualitativ gutem Gluten wird mit Erhöhung der Stärkebeschädigung im Mehl neben einer Vergrößerung des Brotvolumens auch eine verstärkte Aromabildung sowie eine verbesserte Krustenbräunung erreicht [39, 41].
Die Retrogradation der Stärke im Gebäck ist ein Prozess, bei dem die verkleisterte Stärke nach Beendigung des Backens in einen mikrokristallinen Zustand übergeht. Die Retrogradation beruht auf der Ausbildung von intermolekularen- sowie Wasserstoffbrückenbindungen zwischen Amylose bzw. Amylopektin. Durch eine Mobilisierung des Wassers sowohl aus der Krume als auch aus der Kruste wird die Brotkrume verfestigt und die Brotkruste lederartig. Dieser Prozess ist daher, in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur, von großer Bedeutung für das Altwerden der Gebäcke.

2.1.3.2 Pentosane

Pentosane sind Zellwandbestandteile und zählen zu den Nicht-Stärke-Polysacchariden. Chemisch bestehen die Pentosane vorwiegend aus Xylose und Arabinose. Ein Teil des Arabinoxylans enthält geringe Proteinmengen (Glycoproteine), außerdem Ferulasäurereste. Weizen weist mit 4-7 % niedrigere Pentosangehalte als Roggen mit 9-11 % auf. Man unterscheidet zwischen wasserlöslichen und wasserunlöslichen Pentosanen. Die letzteren werden manchmal in der Literatur auch als Hemicellulose bezeichnet. Trotz des kleinen Masseanteils der Pentosane im Weizenmehl (etwa 2,5 %), können die Pentosane bei der Teigbereitung bis zu 20 % des Schüttwassers binden.
In Weichweizen sind etwa 2 % wasserlösliche Pentosane im Endosperm lokalisiert, die die Backeigenschaften günstig beeinflussen [42]. Der wasserlösliche Anteil der Pentosane beträgt im Weizenmehl etwa 20-25 % des Gesamtpentosangehalt. Die Pentosane weisen ein enormes Quell- und Wasserbindevermögen auf, das erheblich größer ist als im Falle des Glutens. Bei Wärmeeinwirkung verkleistern die Pentosane im Unterschied zu Stärke nicht, sie zeigen nach Abkühlung keine Retrogradation, sondern stören die Assoziation der Stärkepolymere und können die Brotalterung verzögern [13].
Über die Wechselwirkungen der Pentosane mit den übrigen Mehlbestandteilen ist relativ wenig bekannt. Es wird angenommen, dass die Pentosane beim Anteigen mit Proteinen reagieren.

Durch Zugabe von Pentosanen wurde eine geringe Abnahme des Glutengehaltes im Mehl festgestellt. Dabei wurden aber die Wasseraufnahme und die Teigentwicklungszeit erhöht [43]. Der Zusatz von bestimmten pentosanabbauenden Enzymen zum Mehl bewirkt eine Zunahme des Backvolumens.

2.1.4 Lipide

Die Lipide sind trotz ihres geringen Anteils im Weizenkorn mit etwa 1,8 % in biochemischer und funktioneller Hinsicht bedeutsame Inhaltsstoffe. Man unterscheidet zwischen polaren und neutralen Lipiden, die ungleichmäßig auf die Gewebeteile des Korns und auch innerhalb des Endosperms verteilt sind. Weizen enthält 70 % polare Lipide und 30 % neutrale Lipide [44].
Die Lipide des Mehles beeinflussen zwar die Verarbeitungseigenschaften; sie beherrschen sie aber nicht. Es gibt stärkegebundene und nichtstärkegebundene Lipide. Die stärkegebundenen Lipide begünstigen durch die hydrophobe Wechselwirkung mit den Glutenproteinen die Haftung der Stärke im Glutennetzwerk. Lipide werden auch für die Verbesserung der Frischhaltung in Backwaren eingesetzt.

2.2 Stand des Wissens zur Prallmahlung und Windsichtung von Weizenmahlprodukten

2.2.1 Prallvermahlung und Windsichtung

Während bei der Zerkleinerung im Walzenstuhl Druck- und Schubspannungen wirken, werden die Teilchen in einer Prallmühle auf Stoß und Reibung beansprucht. Die mit hoher Geschwindigkeit rotierenden Zerkleinerungsorgane treffen dabei auf die relativ langsam bewegten Teilchen des Vermahlungsgutes, beschleunigen diese stark und lassen sie gegen andere Teilchen oder feste bzw. rotierende Prallplatten bzw. –stifte prallen. Das einzelne Teilchen kann dabei für seine Zerkleinerung nur soviel Energie nutzen, wie es selbst kinetische Energie vor dem Aufprall besitzt. Da die kinetische Energie des Teilchens von seiner Masse und seiner Geschwindigkeit abhängt, müssen die Geschwindigkeiten der Prallorgane, wenn eine Zerkleinerung erreicht werden soll, um so höher sein, je feiner die Kornstrukturen des Aufgabegutes sind (Gleichung 2).

$$W_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$ Gleichung (2)

W_{kin} = kinetische Energie der Teilchen [J]
m = Masse der Teilchen [kg]
v^2 = Geschwindigkeit der Teilchen [m/s]

Beim Aufprall eines Teilchens auf eine Prallfläche wird die gesamte kinetische Energie in Wärme- und in Verformungsenergie umgewandelt. Von der Verformungsenergie wird nur ein Teil zum Zerkleinern benötigt und zwar zur Erzielung des sogenannten „Sprödbruchs“, der andere Teil dient zur plastischen und elastischen Verformung des Teilchens. In einer Stiftmühle, z.B. „Rekord C“, mit einer Drehzahl von 4150 U/min bzw. Umfangsschwindligkeit von 100 m/s passieren pro Sekunde 6370 Stifte jeden der 100 feststehenden Stifte des äußeren Stator-Stiftringes [45].
Der Zerkleinerungseffekt in einer Prallmühle ist jedoch nicht nur vom Zustand des Aufgabegutes und von der Umfangsgeschwindigkeit abhängig, sondern auch von der Art und Anzahl der Prallorgane (Abb. 5), von der Luftreibung und von der Verweilzeit des Gutes im Mahlraum.

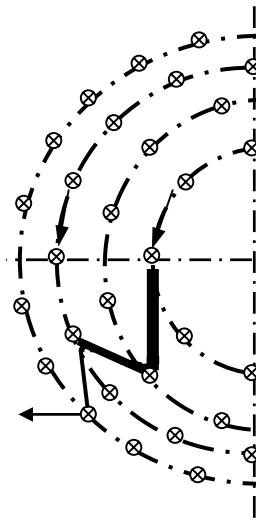


Abb. 5: Anordnung der Schlagstifte in Stiftmühle zweier Stiftkreise [46]

Man unterscheidet zwischen Prallmühlen mit oder ohne Sieb (Mahlbahn). Für die Nachzerkleinerung von Mehlen und von sauberen (geputzten) Grießen und Dunsten können Mühlen ohne Sieb eingesetzt werden.

Der Luftvolumenstrom in einer Prallmühle, z.B. in der Stiftmühle, ist bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten sehr hoch. Das bringt Vor- und Nachteile mit sich. Vorteile sind die Trocknung des Mahlproduktes bis zu Endfeuchten von etwa 5 %, so dass kein Nachtrocknen der Produkte benötigt wird. Des weiteren wird der Luftstrom gleichzeitig zum Transport des gemahlenen Gutes genutzt und so können Fördermittel eingespart werden. Der Nachteil ist der hohe Leerlaufenergiebedarf.
Mit der Prallmahlung ist ein Feinstmahlen möglich, das zu einem weitestgehendem Aufbrechen der Mehlkörperstruktur führt. Abbildung 6 veranschaulicht die verschiedenen Kurvenverläufe der Korngrößenverteilung von gepralltem Mehl und mit Walzen ermahlenem Mehl. Während Walzenmehle sowie bei niedrigen Energien hergestellte Mehle eine bimodale Verteilung der Teilchengrößen aufweisen, erreichen Prallmehle bei hohen Geschwindigkeiten, z.B. ab 110 m/s, annähernd die Normalverteilung. Durch die Freilegung der Mehlkörperbestandteile wird die Voraussetzung für die Anwendung des Windsichtens zur Gewinnung von an- und/oder abgereicherten Mehlfraktionen geschaffen.

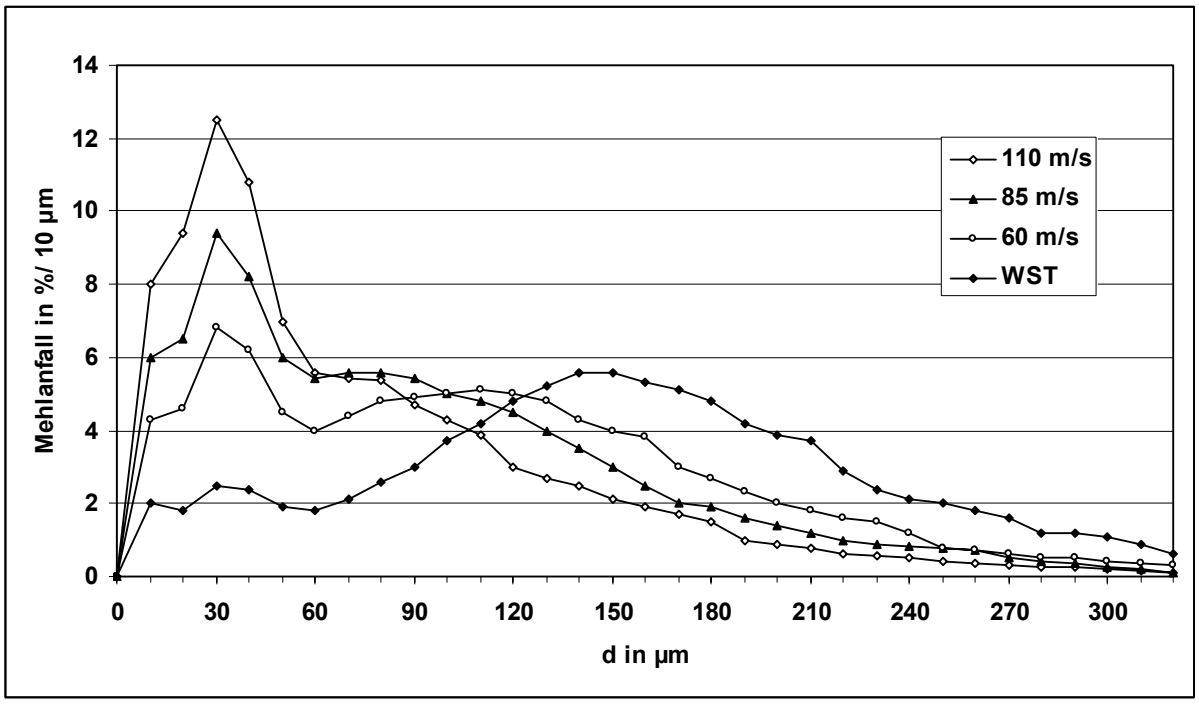


Abb. 6: Korngrößenverteilungsdichten von Mehlen bei unterschiedlichen Vermahlungsbedingungen [47]

Das Windsichten ist ein Trennverfahren, bei dem das zu trennende Gut erst in Luft dispergiert und dann der Sichtzone zugeführt wird. Im allgemeinen wirken zwei Kräfte bei der Windsichtung auf die Teilchen, nämlich die Schwerkraft einerseits und die Schleppkraft der Luft andererseits oder aber die Fliehkraft und Schleppkraft, je nach Sichtart (Abb. 7).

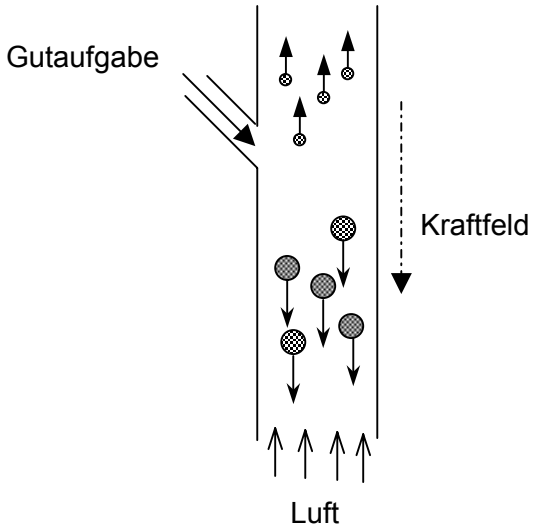


Abb. 7: Wirkprinzip des Schwerkraft- Windsichters

Maßgebend für die Bewegung des Teilchens ist dessen Sinkgeschwindigkeit, die von seiner Dichte und dem Quadrat des kugelförmig gedachten Durchmessers abhängt. Die Sinkgeschwindigkeit des Teilchens kann im stationären Zustand bei einer Beladung von $\leq$ 5 % mit der Gleichung 3 berechnet werden.

$$v_s = \frac{(\rho_T - \rho_F) \cdot g \cdot d^2}{18 \cdot \eta}$$ Gleichung (3)

v_s = Sinkgeschwindigkeit [m/s]
ρ_T = Dichte des Teilchens [kg/cm³]
ρ_F = Dichte des Strömungsmittel [kg/cm³]
g = Erdbeschleunigung [m/s²]
d = Teilchendurchmesser [cm]
η = Viskosität des Strömungsmittels, z.B. Luft [Pa.s]

Durch das Sichten wird das Material bei einer bestimmten Grenzkorngröße, am sogenannten Trennschnitt oder bei der Trenngrenze d_{TG}, in Grobgut und Feingut fraktioniert.
Als Trennschnitt beim Sichten werden die Korneigenschaften definiert, bei der die Teilchen mit 50 %iger Wahrscheinlichkeit im Feingut oder im Grobgut anfallen. Unter den Korneigenschaften sind die Größe, Form, Dichte und Gewicht zu verstehen.
Die maschinentechnischen Parameter des Sichters, z.B. Luftmenge und Durchsatz, haben einen großen Einfluss auf den Trennerfolg, deshalb muss eine geeignete Einstellung des Gerätes für das Material meistens vorher empirisch festgelegt werden.
Die Windsichtung wird bei Materialen feiner Granulation angewandt, bei denen das Siebverfahren erschwert ist. In der Lebensmitteltechnik hat die Windsichtung eine breitere Anwendung erlangt. Insbesondere zur Proteinverschiebung von Mehlen, weil sich damit wegen der unterschiedlichen Dichte von Protein und Stärke aus einem Grundmehl eine proteinreiche und außerdem eine relativ proteinarme, aber stärkeangereicherte Fraktion für unterschiedliche Verwendungszwecke gewinnen lässt. Das Windsichten von Weizenmehlen wird sowohl bei konventionell ermahlenen Mehlen als auch bei nachzerkleinerten Mehlen angewandt.

2.2.2 Prallvermahlung von Weizengrießen und -dunsten

Bei einer konventionellen Herstellung von Weizenmehlen der Type 550 beträgt der Auflösungsgrad bei Weizen mit weichem Endosperm 40-60 % und bei hartem Endosperm 10-30 % [48]. Bei der Prallvermahlung von Weizengrießen und –dunsten ist ein höherer Mehlanfall und eine feinere Granulation der Mehle gegenüber dem mit Walzen ermahlenen Mehl charakteristisch. Mit höherem Energieeintrag in das Gut verändern sich ebenfalls die Mehleigenschaften. Während die Prallvermahlung von ungeputzten Grießen gegenüber dem Walzenstuhl aufgrund der höheren Aschegehalte der Endprodukte ungeeignet ist, lassen sich hingegen beim Prallmahlen von aschearmen Weizengrießen und –dunsten bessere Ergebnisse erzielen [45, 49, 50, 51].

Die Korngrößenverteilung und die Stoffzusammensetzung eines durch Prallzerkleinerung hergestellten Mehles sind von der Härte des Weizenendosperms, seinem Bruchverhalten, den Bindungskräften zwischen Stärke und Protein als auch vom

Vermahlungsverfahren abhängig. Die Prallzerkleinerung von Weichweizen bewirkt einen höheren Auflösungsgrad des Endosperms gegenüber Hartweizen [35].
Das Mehl prallzerkleinerter Dunste zeigt ein Maximum der Teilchenverteilung bei einer Korngröße von etwa 30 µm, das Walzenmehl dagegen bei 130-150 µm [45, 52].
Der Mineralstoffgehalt des durch Prallvermahlung hergestellten Mehles hängt stark vom Mineralstoffgehalt des Aufgabeguts ab. Bei der Prallvermahlung von Grießen und Dunsten zur Herstellung von hellen Mehlen soll der Mineralstoffgehalt des Aufgabeguts 0,60 % TS nicht überschreiten. Somit können geprallte Dunste, wenn sie im Mineralstoffgehalt dem jeweiligen Typenmehl entsprechen, direkt ins Mehl geführt werden [45, 53].
Mit Zunahme der Prallenergie bei Vermahlung von Weizengrießen und –dunsten kommt es zur Anreicherung der Mehlhauptkomponenten Stärke sowie Protein und zur Abnahme des Mineralstoffgehaltes im Mehl [52]. Diese An- sowie Abreicherungen werden durch den höheren Aufschlussgrad bzw. die steigende Feinheit der Mehlteilchen verursacht. Die geprallten Mehle weisen höhere Proteingehalte gegenüber Walzenmehlen auf. Da der Feuchtklebergehalt eines Mehles in enger Korrelation zum Proteingehalt steht, nimmt er mit zunehmender Energie und infolge der Erhöhung des Proteingehaltes zu [50, 54].
Die Prallzerkleinerung führt zur Verschiebung von Proteingruppen. So führt die Prallmahlung und Windsichtung von Grieß- sowie Dunstmehlen zur Veränderung der Löslichkeit der Proteine. Untersuchungen an Mehlproteinen aus geprallten Dunsten ergaben, dass sich der Anteil an extrahierbaren Albuminen und Globulinen durch höhere Prallintensität verringert hat. Eine Korrelation zwischen den Anteilen salzwasserlöslicher Proteine und dem Mineralstoffgehalt war nicht gegeben [55].
Eine Zunahme an harnstofflöslichen Proteinen ist mit steigender Prallgeschwindigkeit ebenfalls beobachtet worden [4]. Mit zunehmendem Energieeintrag nahm die Löslichkeit der hochmolekularen Glutenine ab. Diese Abnahme wird auf eine Agglomerationen der Proteine zurückgeführt, die mit einer Oxidation von SH-Gruppen bei der Prallvermahlung in Gegenwart von Luftsauerstoff erklärt wird [57].
Eine Abnahme der Löslichkeit ist auf die Bildung von Proteinaggregaten, die Zunahme der Löslichkeit ist auf deren Abbau zurückzuführen. An der Bildung großer Molekülaggregate können auch Wasserstoffbrückenbindungen und van der Waalssche Bindungen beteiligt sein. Der hohe Anteil nichtpolarer Seitenketten im Kleberprotein

schränkt die Löslichkeit ein und fördert die hydrophoben Wechselwirkungen, die zum kohäsiven Verhalten beitragen [58].
Untersuchungen eines hellen Mehles, das aus Weizendunst sowohl durch Walzenvermahlung als auch durch Prallvermahlung hergestellt worden ist, zeigten bei Untersuchungen mittels SDS- Elektrophorese und HPLC keine Veränderungen der Extrahierbarkeit der Proteine sowie der Kettenlängen. Die HPLC-Analyse an aus dem Kleber extrahierten Proteinfraktionen zeigte signifikante Unterschiede hauptsächlich im Gliadin/Glutenin-Verhältnis. Der Kleber nach der Walzenvermahlung wies eine geringere Gliadinausbeute als nach der Prallvermahlung auf. Das deutet darauf hin, dass die niedermolekularen Proteine aus dem Kleber der Walzenvermahlung bei der Teigentwicklung fester an die Glutenine gebunden sind als nach der Prallvermahlung. Die Prallmahlung von Dunsten bewirkt eine Konformationsänderung, die mit Änderungen der hydrophilen und hydrophoben Wechselwirkungen verbunden ist. Eine Veränderung der Anzahl an freien Thiolgruppen wurde nicht festgestellt [59].
Die Prallmehle weisen höhere mechanische Stärkebeschädigungsgrade auf als die mit Walzen ermahlene Mehle. Mit erhöhtem Energieeintrag ins Mahlgut vergrößert sich der Anteil an mechanisch beschädigter Stärke. Infolgedessen erhöht sich die Wasseraufnahme der Prallmehle. Mit steigender Beschädigung der Stärke nimmt auch die Enzymsuszepilität zu [13]. Trotz des höheren Anteils an mechanisch beschädigter Stärke in den Stiftmühlenmehlen, weisen sie hohe Fahlzahlwerte auf [49, 51]. Die hohen Fallzahlen bei den Prallmehlen werden durch die bessere Penetration des Wassers infolge der Feinheit der Mehle bewirkt. Die Stärke verkleistert schneller und dabei bildet sich der Kleister, der die Bestimmung der Fallzahl beeinflusst. Ein bestimmter Stärkebeschädigungsgrad im Mehl übt einen positiven Einfluss auf die Gebäckherstellung aus, verbessert z.B. dass Gebäckvolumen, die Bräunung und den Geschmack [35]. Sehr hohe Stärkebeschädigungen dagegen können auch zu negativen Effekten führen. Dies sind etwa nachlassende Teige, geringes Brotvolumen, gröbere Porungen [13].

Mit steigender Rotorgeschwindigkeit in der Stiftmühle und in Abhängigkeit von der Stoffzusammensetzung des Ausgangsmaterials verändern sich die technologischen Teigeigenschaften unterschiedlich. Weizenmehle, die durch Prallvermahlung aus Weizengrießen mit Aschegehalten von ca. 0,7 bis 0,8 % hergestellt worden sind, zeigten im Vergleich zur Walzenvermahlung und mit steigender Prallenergie Abnah-

men der Teigstabilität im Farinographen, Zunahmen der Dehnbarkeit und Abnahmen des Dehnwiderstandes im Extensographen auf. Diese Änderungen weisen auf Erweichung des Teiges hin, was auf einen höheren Anteil an Inhaltstoffen aus den Randschichten zurückgeführt werden kann [50, 54, 60].
Weizendunste sind ascheärmer und haben etwa 0,6 % Aschegehalt. Daraus hergestellte Stiftmühlenmehle weisen dagegen mit steigender Prallgeschwindigkeit eine Zunahme der Teigstabilität und des Dehnwiderstandes sowie eine Abnahme der Dehnbarkeit auf [56]. Diese Beispiele zeigen, dass die Stoffzusammensetzung des Ausgangsmaterials neben der Prallenergie die funktionellen Eigenschaften der Mehlkomponenten Proteine und Stärke beeinflussen.
Ergebnisse über den Einfluss der Prallvermahlung auf die Backeigenschaften belegen, dass das Gebäckvolumen durch die Prallvermahlung mit steigender Energieintensität verbessert werden kann [54, 57, 61,62, 63].
Ein Katalasetest an einem mittels Stiftmühle bei Umfangsgeschwindigkeiten zwischen 80 und 110 m/s hergestellten Mehl zeigte keine Beeinträchtigung des wärmeempfindlichen Enzyms. Demzufolge ist eine thermische Schädigung der Proteine und damit eine Beeinträchtigung der Backfähigkeit nicht zu erwarten [64].

Zusammenfassend führt die hohe Beanspruchungsenergie bei der Prallzerkleinerung von Grießen und Dunsten zu einem höheren Mehlanfall und feineren Mehlen. Der Aschegehalt des Ausgangsgutes bestimmt den Aschegehalt des hergestellten Mehles. Durch die Prallmahlung und mit zunehmender Beanspruchung des Grießes sowie des Dunstes werden mehr Inhaltsstoffe aus den Randschichten vermahlen, die ins Mehl gelangen und somit die Verteilung der Inhaltsstoffe verändern. Der Anteil an nichtglutenbildenden Proteinen erhöht sich, was sich auf den Feuchtglutengehalt negativ auswirkt. So wird der Feuchtklebergehalt im Mehl geringer. Des weiteren werden Enzyme aus den Randschichten angereichert, die nicht nur die Haltbarkeit des Mehles verkürzen, sondern auch die funktionellen Eigenschaften des Mehles verschlechtern.
Durch die intensivere Prallzerkleinerung erhöht sich der Anteil an mechanisch beschädigter Stärke. Infolgedessen steigt die Wasseraufnahme der Mehle an. Eine mechanische Beeinträchtigung der Glutenproteine bei der Prallmahlung ist nicht nachgewiesen worden. Die Veränderung der Löslichkeit der Proteine sowie ein erhöhter Anteil an löslichen Proteinen ist auf eine Verschiebung des Gliadin/Glutenin-

Verhältnisses zurückzuführen. Prallmehle aus Grießen und Dunsten zeigten verbesserte Gebäckeigenschaften, z.B. größeres Brotvolumen und bessere Bräunung.

2.2.3 Feinstzerkleinerung von Weizenmehlen und Windsichtung

Das Weizenmehl ist hinsichtlich seiner Struktur und Inhaltsstoffe ein inhomogenes Mahlprodukt, das aus Teilchen unterschiedlicher Größe, Form und chemischer Zusammensetzung besteht.
Die Teilchengrößen und die Bestandteile eines Mehles ist in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Bestandteile des Weizenmehles werden in zwei Gruppen eingeteilt, nämlich in die freiliegenden Inhaltsstoffe und die eigentlichen Mehlteilchen. Der Anteil freigelegter Inhaltsstoffe wird als aufgelöstes Mehl bezeichnet, der Anteil an noch verkitteten Teilchen als nicht aufgelöstes Mehl. Der Mehlauflösungsgrad ist ein Ausdruck für den Anteil an freigelegten Inhaltsstoffe [65, 66].

Tab. 3: Weizenmehl, Bestandteile und Teilchengrößen [67]

Teilchengrößen [µm]		Bezeichnung
Cleve	Hanssen	
< 18	1-12	Freie Proteinteilchen
1-50	1-50	Freiliegende Stärkekörner
5-80	Keine Angabe	Mehlteilchen; durch Protein miteinander verkitteten Stärkekörner; vorwiegend bei Vermahlung von Weichweizen
30-100	-	Mehlkörperzellbruchstücke; vor allem bei Vermahlung von glasigen Hartweizen
-	30-100	Ganze Mehlkörperzellen
>100	Keine Angabe	Zellverbände
Keine Angabe	Keine Angabe	Mehlkörperzellwände

Die Nachbehandlung von Weizenmehlen, z.B. durch Nachzerkleinerung und Windsichtung, verändert die Struktur sowie die Inhaltstoffzusammensetzung der Mehle, und ermöglicht die Herstellung von Mehlen oder Mehlfraktionen mit spezifischen Verarbeitungseigenschaften.

Aufnahmen der Rasterelektronenmikroskopie zeigen, dass die Prallzerkleinerung von Weich- und Hartweizenmehlen in einer Stiftmühle zu einer weitreichenden Auflösung der Haftflächen zwischen Stärkekörnern und den Kleberproteinen führt. Die verbleibende Haftung zwischen wasserunlöslichen Proteinen und Stärkekörnern ist vom Überbleibsel der Amyloplasten und anderen Stoffen neben Proteinen verursacht worden [68].

Geprallte Mehle weisen jedoch, in Abhängigkeit von der Weizensorte und dem Mahlverfahren, höhere Feingutanteile, Wasseraufnahmefähigkeiten und Stärkebeschädigungsgrade als die Ausgangsmehle auf. Sie zeigten keine Veränderungen in den Gehalten der Inhaltsstoffe [48, 69, 70]. Manchmal haben nachzerkleinerte Mehle bei der Prallzerkleinerung niedrigere Proteingehalte, was aber durch einen Materialverlust infolge des erhöhten Anteils an Feingut verursacht werden kann .

Die Zunahme der Wasseraufnahmefähigkeit wurde auf das größere Wasserbindungsvermögen des freiliegenden Proteins im Mehlkörper zurückgeführt. Weiterhin trug die erhöhte Stärkebeschädigung im Mehl ebenfalls zur Zunahme der Wasseraufnahme bei. Prallzerkleinerte Mehle aus harten Weizen wiesen höheren Stärkebeschädigungsgrade auf als aus weichen Weizen [71].

Untersuchungen von Nowakowski et al. zeigen deutlich den Einfluss des Aschegehaltes auf die technologischen Eigenschaften. Weizenmehle aus verschiedenen Vermahlungspassagen und damit aus verschiedenen Weizenkornregionen wurden durch Prallmahlung feinzerkleinert. Die Stärkebeschädigung ist in allen Mehlen gleich gehalten worden. Die verschiedenen Mehle zeigten trotz gleicher Asche- und Proteingehalte unterschiedliche rheologische Eigenschaften. Während die Prallmahlung von Schrotmehlen eine Zunahme der Dehnbarkeit bewirkte, nahm die Dehnbarkeit der Auflösungsmehle ab und der Dehnwiderstand zu [74]. Die löslichen nichtglutenbildenden Proteine der Randschichten in den Schrotmehlen traten infolge der Prallvermahlung durch die Veränderung ihrer Löslichkeit mit den Glutenproteinen in Wechselwirkung. Dabei wird die Plastizität des Glutens erhöht.

Analog zu der Prallzerkleinerung von Grießen und Dunsten stieg der Anteil beschädigter Stärke auch in prallzerkleinerten Mehlen an. Mit einer Verdoppelung der Stärkebeschädigung in den Prallmehlen erhöhte sich die Wasseraufnahme um 2,5 %. Infolgedessen verbesserten sich das Gebäckvolumen und das Porenbild [39].

Bei einer Nachzerkleinerung von Mehlen sind höhere Amylosezahlen bzw. Stärkebeschädigungen in den feinsten Fraktionen festgestellt worden. Infolgedessen stieg die

Wasseraufnahme der feinen Mehlfraktionen gegenüber den Ausgangsmehlen an. Untersuchungen über den Einfluss der Teilchengrößen von Mehlen mit gleichen Asche- und Proteingehalten sowie fast gleichbleibender Stärkebeschädigung zeigten keine Änderungen der technologischen Teig- und Backeigenschaften. Während sich die maximale Viskosität im Amylogram mit abnehmender Teilchengröße nur geringfügig verringert hat, korreliert die Fallzahl mit der Teilchengröße negativ. Die Fallzahlen nehmen mit abnehmender Teilchengröße zu. Die Zunahme der Fallzahl wird durch die schnellere Penetration des Wassers in die Mehlpartikeln verursacht. Dadurch bildet sich der Stärkekleister schneller, der das Fallen des Messkörpers verlangsamt. Deshalb ist das Ergebnis der Fallzahlmethode für feine Mehle nicht relevant [72].

Bei einer Windsichtung von prallzerkleinerten Weizenmehlen der Type 550 aus hartem Weichweizen sind in den feinsten Mehlfraktionen < 5 µm Proteinkonzentrationen von 25 % bzw. 30 % gewonnen worden. Die Ausbeuten betrugen aber nur 3 % bzw. 6 %. Die Proteingehalte der mittleren Fraktionen (18-45 µm) waren am niedrigsten. Eine enge Korrelation zwischen dem Proteingehalt und der Wasseraufnahme, der Dehnbarkeit und Energie wurde nachgewiesen. Die Fraktionen >40 µm zeigten höhere Werte des Dehnwiderstands als das Ausgangsmehl [73].

Passagenmehle wurden bei einer Windsichtung nicht nach der Teilchengröße sondern nach den angefallenen Masseanteilen fraktioniert. Das Auflösungsmehl zeigte bei einem Mehlanteil von < 25 % den höchsten Proteingehalt, der dann bei Mehlausbeuten zwischen 25-85 % abnahm, und ab 85 % wieder zunahm [74]. Mikroskopische Aufnahmen weisen auf niedrige Asche- und Proteingehalte der mittleren Fraktionen (24-39 µm) hin [75].

Durch die Windsichtung von nachzerkleinerten Mehlen aus Weichweizen ist eine Verdoppelung des Anteils an feinen Mehlfraktionen ohne Erhöhung des Proteingehaltes erreicht worden, während sich der Proteingehalt bei Hartweizen erhöhte. Die feine Fraktion des Hartweizens wies höhere Asche- und Proteingehalte sowie Amylosezahlen auf. Durch Mehlmischungen aus Feingut und Basismehl wurden die Proteingehalte in den jeweiligen Mehlen erhöht und damit eine Zunahme der Wasseraufnahme, Teigstabilität, Extensogrammwerte und des Gebäckvolumens erreicht [39, 48].

Ein Beimischen von Anteilen der feinen Fraktion zum Grundmehl führte zur deutlichen Verbesserung des Gebäckvolumens.

Nach Auswertung der Literaturangaben lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten. Die Prallzerkleinerung von Mehlen führt zu einen höheren Anteil an Feingut infolge des steigenden Aufschlussgrades mit zunehmender Prallgeschwindigkeit. Die Struktur des prallzerkleinerten Mehles wurde verändert, indem sich Anteile an freiliegenden Inhaltsstoffe erhöht haben. Die Zusammensetzung des Mehles bleibt konstant. Veränderungen der technologischen Teig- und Backeigenschaften sind festgestellt worden, die auf eine Beeinflussung der Eigenschaften der Mehlkomponenten durch die Prallzerkleinerung zurückzuführen sind. Eine Erhöhung der Stärkebeschädigung und somit der Wasseraufnahme des prallzerkleinerten Mehles wurde ermittelt. Darüber hinaus weist die Stärke veränderte Verkleisterungseigenschaften auf. Durch die Prallzerkleinerung der Mehle werden beim Windsichten größere Verschiebungen der Inhaltsstoffe in den Mehlfraktionen erreicht.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit kann die Windsichtung eine Alternative zum Einsatz von Weizenkleber bzw. zur Verwendung von teureren Weizensorten sein. Die proteinreichen Mehlfraktionen sind backtechnisch gegenüber anderen Weizensorten überlegen. Weiterhin können die proteinreichen Mehlfraktionen von Bioweizenmehlen aufgrund des geringeren Proteingehaltes des Bioweizens zur Verbesserung der Backeigenschaften dieser Mehle eingesetzt werden. Die proteinarmen Fraktionen können für die Keksherstellung und auch als Rohstoff für die Stärke- sowie Alkoholindustrie verwendet werden [5].

3 Material und Methoden

3.1 Charakterisierung des verwendeten Weizens

Als Rohstoff der Untersuchungen wurde die Weizensorte Alidos der Qualitätsklasse E aus dem Erntejahr 1999 verwendet. Alidos ist ein Winterweizen. Diese Weichweizensorte eignet sich wegen der hohen Backfähigkeit für die Herstellung von Handelsmehlen sowie als Aufmischweizen zur Verbesserung von Weizen mit schlechteren Backeigenschaften. In Tabelle 4 sind die ermittelten Kennzahlen des untersuchten Weizens dargestellt.

Tab. 4: Kennzahlen der untersuchten Weizensorte Alidos

Merkmal	Messwert
Feuchtigkeitsgehalt [%]	13,6
Tausendkornmasse [g TS]	39,0
Mittlere Korngröße [mm]	3,0
Mineralstoffgehalt [% TS]	1,78
Proteingehalt [% TS]	13,7
Stärkegehalt [% TS]	69,8
Fettgehalt [% TS]	1,8
Pentosangehalt [% TS]	2,61
Salzwasserlösliche Proteine [% TS]	27,9
Fallzahl [s]	367

3.2 Technischer Versuchsablauf

Die Gewinnung der Mehle sowie deren Fraktionen verlief in verschiedenen Abschnitten. Das Fließbild in Abbildung 8 veranschaulicht den technischen Arbeitsverlauf.

3.2.1 Konditionieren

Der Weizen besaß in seinem Ausgangszustand eine Feuchte von 13,6 %. Für ein optimales Abtrennen der Schale vom Endosperm wurde der Weizen für die Vermahlung im Bühler-Mahlautomaten auf eine Feuchte von 16,5 % genetzt. Die Berechnung der erforderlichen Wassermenge erfolgte nach Gleichung 4.

$$m_w = \left(\frac{F_2 - F_1}{100 - F_2} \right) \cdot m_k$$ Gleichung (4)

m_w = Wassermenge [g]
m_k = Weizenmenge [g]
F_1 = Feuchtigkeitsgehalt des Weizens vor dem Netzen [%]
F_2 = gewünschter Feuchtigkeitsgehalt des Weizens nach dem Netzen [%]

Die Abstehzeit des Weizens betrug 18h.

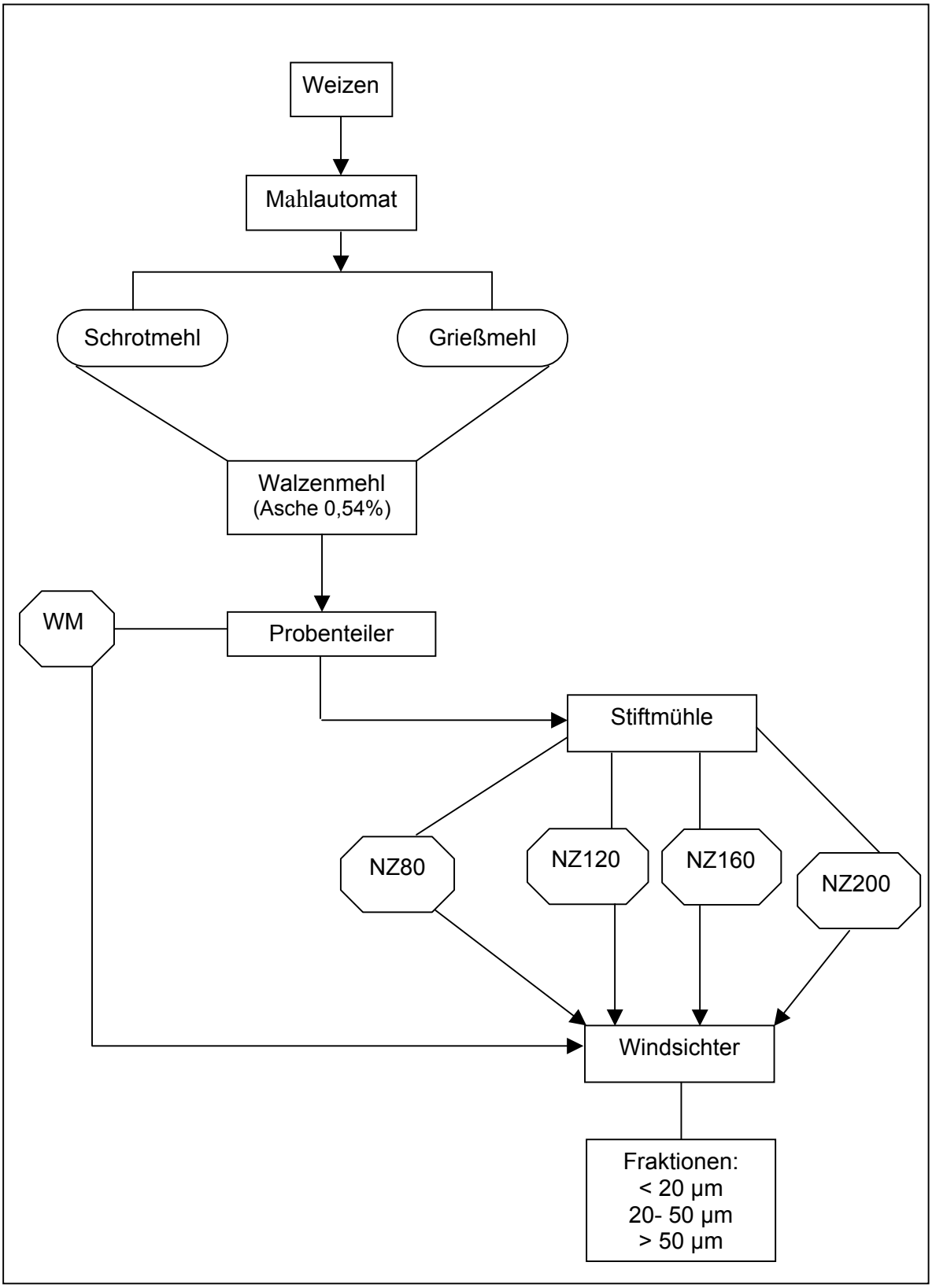


Abb. 8: Technischer Versuchsablauf zur Gewinnung der Mahlprodukte

3.2.2 Vermahlen

Der auf 16,5 % Feuchtigkeitsgehalt genetzte Weizen wurde auf dem Mahlautomaten zu einem Mehl der Type 550 vermahlen. Das Mehl (WM) fiel mit einer Ausbeute von etwa 70 % an. Dieses Mehl wurde dann zur Herstellung der geprallten Mehle in einer Stiftmühle Rekord 224 mit einem Durchsatz von 50 kg/h bei den Umfangsgeschwindigkeiten 80, 120, 160 und 200 m/s nachzerkleinert. Die Abbildung 9 veranschaulicht das Wirkprinzip der Prallzerkleinerung in einer Stiftmühle.

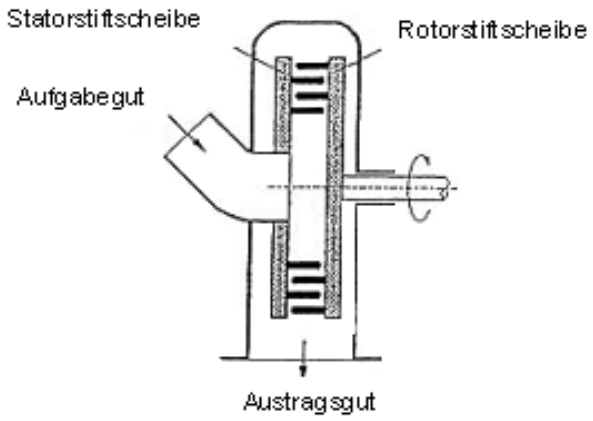


Abb. 9: Wirkprinzip der Stiftmühle [47]

Die einzustellenden Drehzahlen für die entsprechenden Umfangsgeschwindigkeiten sind aus der Tabelle 5 zu entnehmen, ihre Berechnung erfolgte nach der Gleichung 5.

$$n = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot d}$$ Gleichung (5)

n = Rotordrehzahl [U/min]
v = Umfangsgeschwindigkeit [m/s]
d = äußerer Durchmesser des Stiftkreises (0,217 m)

Während der Vermahlung in der Stiftmühle wurden die Temperaturen an zwei Stellen gemessen. Die Ablufttemperatur (Mühlenabluft) wurde im Filtersack, der der Entweichung der Luft diente, und die Temperatur des Mehles im Auffangbehälter erfasst.

Tab. 5: Drehzahlen und Umfangsgeschwindigkeiten der Stiftmühle

Drehzahl [U/min]	Umfangsgeschwindigkeit [m/s]
7041	80
10562	120
14082	160
17162	200

3.2.3 Fraktionieren

Das Ausgangsmehl sowie die Prallmehle wurden anschließend im Windsichter 50 ATP der Fa. Alpine (Abbildungen 10 und 11) durch eine zweistufige Windsichtung fraktioniert. Dabei wurden drei Fraktionen, fein, mittel und grob, gewonnen.
Das Mehl wird mittels einer Förderschnecke in den Sichtraum zugeführt. Die Sichtluft führt die zu trennende Mehlfraktion durch das rotierende Rad heraus. Die Trenngrenze wird durch die Höhe der Rotation beeinflusst.

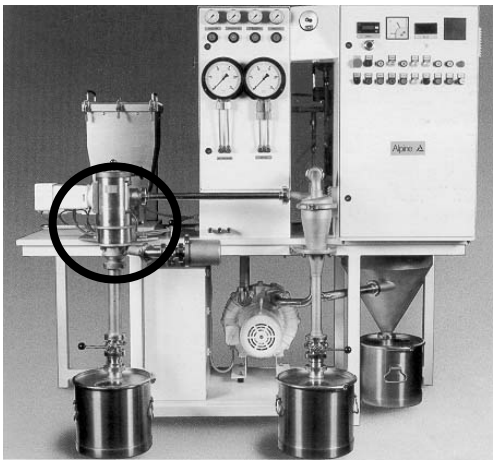


Abb. 10: Alpine Multi- Prozessanlage mit dem System 50 ATP Feinstsichter

In Anlehnung an Arbeiten aus der Literatur zur Inhaltstoffverschiebung bei der Mehlfraktionierung wurden als Trenngrenzen 20 µm und 50 µm gewählt. Bei diesen Trenngrenzen lassen sich die deutlichsten Protein- und Stärkeanreicherungen hervorrufen.

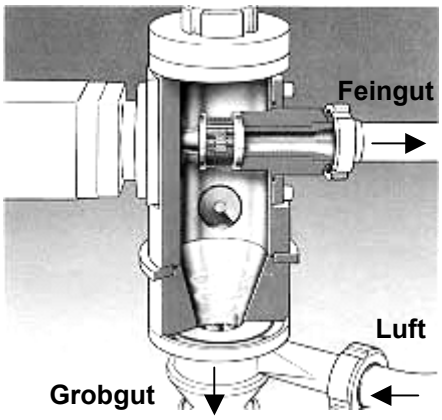


Abb. 11: Innenraum des 50 ATP Windsichters

Das Mehl wurde zuerst in Fein- und Grobgut beim Trennschnitt von 20 µm getrennt. Dann wurde das Grobgut in Fein- und Grobgut beim Trennschnitt 50 µm fraktioniert. Am Ende wurden die drei Mehlfraktionen < 20 µm, 20-50 µm und > 50 µm gewonnen.

Für das Fraktionieren der Mehle war eine Eichung der Sichtraddrehzahl notwendig, um die zu erzielenden Trenngrenzen erreichen zu können. In Abbildung 12 ist die Einstellung der Sichtraddrehzahl graphisch dargestellt, wobei der Luftstrom von 60 m³/h und der Gutdurchsatz von 1 kg/h konstant gehalten worden sind.

Die Trenngrenzen konnten damit nach der zugeschnittenen Zahlenwertgleichung Nr. 6 rechnerisch ermittelt werden.

$$d_{TG} = 4 \cdot 10^{7} \cdot (n)^{-1,64} \qquad \text{Gleichung (6)}$$

d_{TG} = Trenngrenze [µm]
n = Sichtraddrehzahl [U/min]

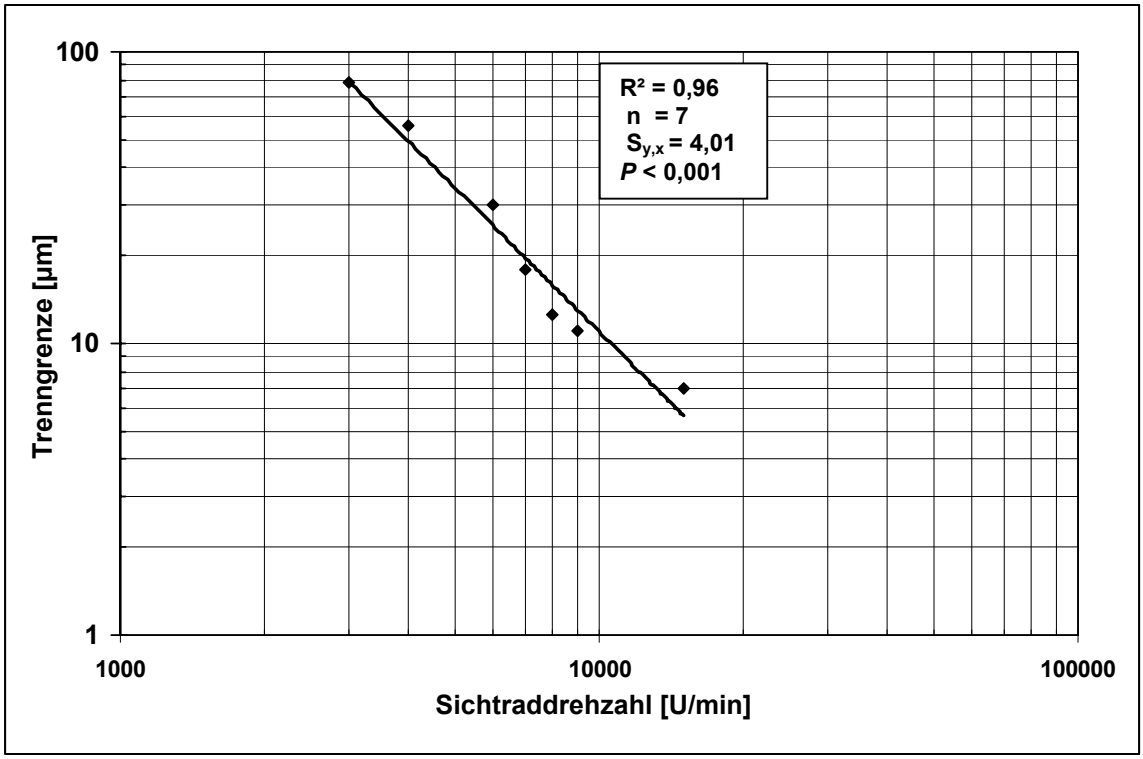


Abb. 12: Sichtraddrehzahlen und Trenngrenzen [76]

3.3 Physiko-chemische Methoden

3.3.1 Standardmethoden

Zur Bestimmung der physikalischen, chemischen Eigenschaften der Mehle sowie der Mehlfraktionen wurden die Standardmethoden (Tab. 6) durchgeführt.

Tab. 6: Standardmethoden [77]

Parameter	Standard
Feuchtigkeitsgehalt	ICC 110/1
Mineralstoffgehalt	ICC 104/1
Rohproteingehalt	ICC 105/2
Rohstärkegehalt	ICC 123/1
Fettgehalt	ICC 136
Fallzahl	ICC 107/1
Feuchtglutengehalt (Glutomatic)	ICC 137/1
Glutenindex	ICC 155
Sedimentationstest	ICC 116/1

3.3.2 Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung

Zur Ermittlung der Korngrößenverteilung der Mehle sowie der Mehlfraktionen wurde der Laserpartikelsizer “analysette 22“ der Firma Fritsch eingesetzt. Die Messung der Korngröße erfolgte in der mit Feststoff-Butanol-Suspension gefüllten Messzelle. Das Butanol verhindert das Quellen der Mehlteilchen. Bei der Beugung des Laserstrahls durch die Feststoffteilchen entsteht das Fraunhofer’sche Beugungsspektrum, welches durch eine Linse auf einen Schirm projiziert wird. Die entstehenden Beugungsringe, deren Lichtintensität und Streuwinkel zu der Partikelgröße proportional sind, dienen als Messgröße und werden von Multielement-Detektoren erfasst und ausgewertet. Durch eine computergestützte Datenverarbeitung erfolgt eine statistische Analyse der Korngrößenverteilung, der Volumenanteile sowie der spezifischen Oberfläche der Probe.

3.3.3 Stärkezustand und -eigenschaften

Neben der Fallzahlbestimmung als Untersuchungsmethode für die Stärkebeschaffenheit hat die Bestimmung der Stärkebeschädigung sowie der Verkleisterungseigenschaften der Stärke eine große Bedeutung für die Bewertung der Verarbeitungseigenschaften des Weizenmehles.

3.3.3.1 Bestimmung der Stärkebeschädigung nach Mc Dermott [78]

Auf Grundlage der jodimetrischen Bestimmung der extrahierbaren Amylose, deren prozentualer Anteil sich mit zunehmender mechanischer Beschädigung der Stärkekörner erhöht, erfolgt die Extraktion mittels einer Lösung aus 1,67 %iger Trichloressigsäure und 5 %igem Kaliumthiocyant im Verhältnis 1:1. Das Kaliumthiocyanat dient der Intensivierung der Amyloseextraktion bei geringer Temperatur und beugt zugleich Fehlereinflüssen infolge Temperaturschwankungen vor. Ein enzymatischer Abbau der Amylose wird durch den Zusatz von Trichloressigsäure bei einem pH-Wert <3 verhindert.
Die Extraktion erfolgt bei 30 °C und dauert 15 Minuten. Der abfiltrierte Extrakt bildet mit Jod in wässriger Lösung einen Amylose-Jod-Komplex, der bei 600 nm photometrisch gemessen wird. Die Farbintensität „Blue Value (BV)“ dient als Maß der Stärkebeschädigung der untersuchten Probe.
Die Berechnung der Stärkebeschädigung im Mehl erfolgt nach der Gleichung 7a, bezogen auf den Stärkeanteil nach der Gleichung 7b.

$$[BV/g_{Probe}] = (E_P - E_B) \cdot 20 \qquad \text{Gleichung (7a)}$$

E_P = Extinktion des Jod-Farbkomplexes der Probe
E_B = Extinktion der Blindprobe
20 Korrekturfaktor der Mehlmenge

$$[BV/g_{Stärke}] = [BV/g_{Probe}] \cdot 100 / (\text{Stärkegehalt [\%TS]}) \qquad \text{Gleichung (7b)}$$

3.3.3.2 Verkleisterungseigenschaften

Die Stärkeverkleisterung als eine unerlässliche Voraussetzung für den Backprozess wird im Amylographen nach ICC-Standard Nr. 126/1 aufgezeichnet. Im Verlauf der Messung finden deutliche Veränderungen der Viskosität der Stärke statt, die einerseits von der Menge und der Beschaffenheit der Stärke, andererseits von der Aktivität der stärkeabbauenden Enzyme beeinflusst werden.
Aufgrund des geringeren Materialaufwands (3,5 g Probe) und der besseren Auswertung der Messergebnisse wurde zur Bestimmung der Stärkeeigenschaften im Mehl

die Rapid Visco Analyse (RVA) angewandt. Die Einstellung des Programms ist aus der Tabelle 7 zu entnehmen.

Tab. 7: Programm des Rapid Visco Analyser [79]

Zeit	Temp. / Drehzahl	Wert [°C]/ [min^{-1}]
00:00:00	Drehzahl	960
00:00:10	Drehzahl	160
00:01:00	Temperatur	50
00:04:45	Temperatur	95
00:07:15	Temperatur	95
00:13:00	Temperatur	50

Nach Beendigung der RVA-Messung wurden die Proben im Raumtemperatur für 1 Tag abgekühlt. Die gebildeten Gele sind dann mit dem Texture Analyser zur Messung der Festigkeit zu verwenden (Punkt 3.3.12.2).

3.3.3.3 α-Amylaseaktivität

Ziel dieser Untersuchung ist, die α-Amylaseaktivität in den Mehlen in Abhängigkeit von der Prallenergie und der steigenden Temperatur zu bestimmen. Veränderungen in der Enzymaktivität kann auf eine Modifikationen der Proteine hindeuten. Die Bestimmung wurde mit dem “Tablettentest“ durchgeführt [80]. Die Arbeitsschritte der Untersuchung sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tab. 8: Arbeitsvorschrift zur Bestimmung der α-Amylaseaktivität

Arbeitsschritt	Messprobe	Blindprobe
Enzymlösung (in 0,02M $CaCl_2$)	0,1 ml	-
0,07 M Phosphatpuffer, pH 5,5	1,0 ml	1,0 ml
Tablette	1 Stck.	1 Stck.
Inkubation (55 °C)	15 min	15 min
Stopplösung	4,0 ml	4,0 ml
Enzymlösung	-	0,1 ml
Kräftig schütteln	+	+

Stehen lassen	mind. 5 min	mind. 5 min
Filtrieren (Rundfilter)	+	+
E_{1cm} bei 620 messen	gegen Wasser	gegen Wasser

Reagenzien

- Tabletten Enzympräparat (Fa. Boehringer)
- 0,07 M Phosphatpuffer, pH-Wert 5,5
- Stopplösung [10 g Na_2CO_3, (wasserfrei), 900 ml destilliertes Wasser und 100 ml Aceton]

Probenvorbereitung

5 g Mehl werden mit 20 ml 0,02 M $CaCl_2$- Lösung 1 h bei 30 °C geschüttelt und anschließend 15 min bei 4000 U/min zentrifugiert. Der Überstand wird zur Bestimmung verwendet.

Arbeitsweise

Die Arbeitsschritte sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Aus der gemessenen Extinktion wird nach Abzug des Blindwertes die α- Amylaseaktivität (E/l) mit Hilfe einer Kalibrierungsgeraden ermittelt.

Herstellen der Kalibrierungsgerade

Als Eichenzym diente ein mikrobielles α-Amylasepräperat der Firma Boehringer.
Aus der Stammlösung ($CaCl_2$) wurden verdünnten Enzymlösungen im Bereich 160 bis 800 E/l hergestellt. Aus den ermittelten Extinktionsdifferenzen (Mess- und Blindprobe) wird die Kalibrierungsgerade graphisch dargestellt (Abb. 13).

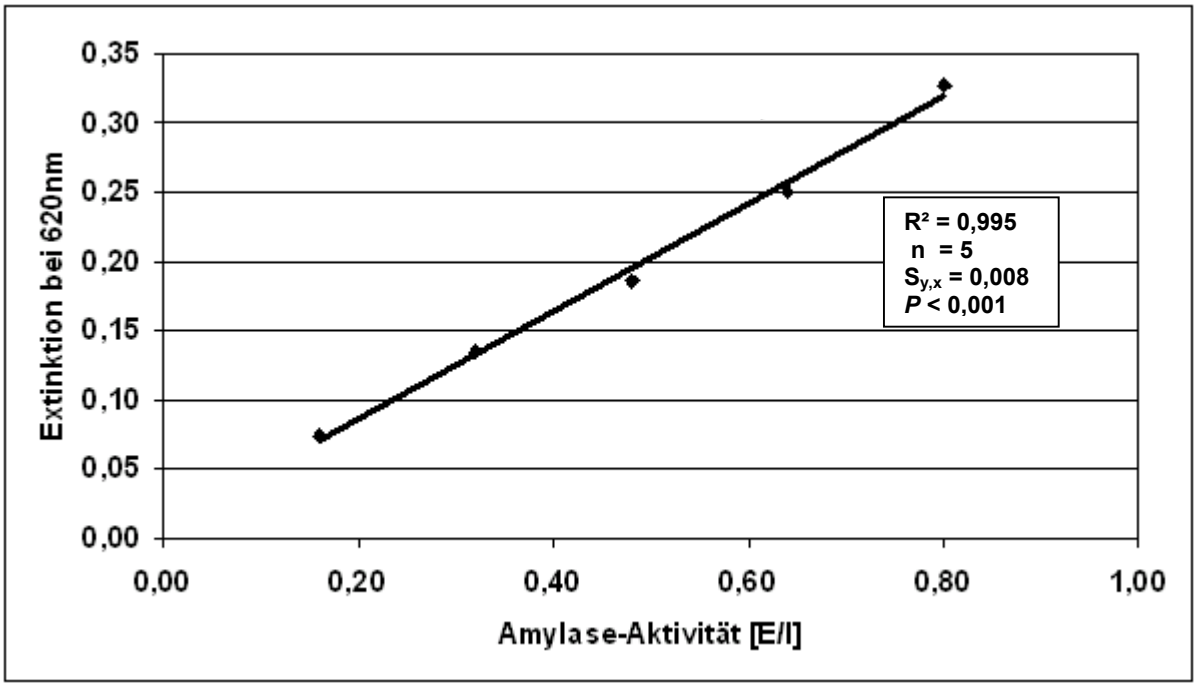


Abb. 13: Kalibrierungsgerade der α-Amylaseaktivität (E/l)

3.3.4 Bestimmung der Pentosane

Das Prinzip zur Bestimmung der Gesamtpentosane besteht darin, die Pentosane zu hydrolisieren und die dabei freigesetzten Pentosen (Xylose, Arabinose) photometrisch zu erfassen.

Die pentosehaltigen Lösungen werden mit Eisen(III)-chlorid in konzentrierter Salzsäure und Orcin erhitzt. Dabei entsteht ein grüner Farbstoff, der ein starkes Absorptionsmaximum bei 670 nm hat. Glucose wird unter den gegebenen Bedingungen zwar ebenfalls umgesetzt, der gebildete Farbstoff hat aber bei 670 nm ein geringeres Absorptionsmaximum und absorbiert bei 580 nm nahezu gleich stark wie bei 670 nm. Daher können durch Auswertung der Extinktionsdifferenz (670-580 nm) Störungen durch Glucose eliminiert werden.

Berechnung:

$$\text{Pentosangehalt [\% TS]} = \frac{X_p}{m_p} \cdot 100 \cdot 0{,}88 \qquad \text{Gleichung (8a)}$$

X_p = Pentose [mg/l], aus der Kalibrierungsgerade zu entnehmen

$$m_p = E \cdot \left(\frac{100 - F}{100} \right) \cdot \frac{5{,}556}{L}$$ Gleichung (8b)

E = Einwaage [mg]
L = Volumen [l]
F = Feuchtigkeitsgehalt [%]

3.3.5 Zuckeranalyse (HPLC)

Zur qualitativen und quantitativen Analyse der Kohlenhydrate in den Mehlen wurden die Mehle eingewogen, mit Wasser heiß extrahiert, 4 Minuten im Ultraschallbad homogenisiert und anschließend filtriert. Die Analyse erfolgte dann mittels HPLC (Tab. 9). Dabei sind die niedermolekulare Saccharide (Glucose, Fructose, Saccharose, Maltose und Maltriose) in den Mehlen bestimmt worden.

Tab. 9: HPLC-Analyse der Zucker

Pumpe:	inerte Gradientenpumpe (Fa. Dionex)
Detektor:	PAD (Fa. Dionex)
Eluent:	A: 0,15N NaOH
	B: 1N Natriumacetat in 0,15N NaOH
Flussrate:	0,5 ml/min
Säule:	2 Carbopack PA 100 (Fa. Dionex) 250mm x 4mm
Injektionsvolumen:	2 µl

3.3.6 Bestimmung des Wasserbindungsvermögens

Das Wasserbindungsvermögen (WBV) wird einerseits von Masseanteilen der Mehlinhaltsstoffe Stärke, Proteine und Pentosane, andererseits von deren Zustand bestimmt. Das Wasserbindevermögen wurde mit der Zentrifugalmethode ermittelt. Dabei wurde 1 g Mehl bzw. Mehlfraktion (Einwaage der Proben basierend auf 14 % Feuchte) bei Wasserüberschuss im Verhältnis 1:9 für eine Minute gerührt. Die Suspension dann bei 4000 U/min zentrifugiert, anschließend wurde die überstehende Flüssigkeit dekantiert und das Zentrifugenglas umgekehrt auf ein Papierfilter gestellt.

Nach 5 Minuten wurde das Zentrifugenglas mit dem Sediment zurückgewogen. Das WBV wurde damit gravimetrisch prozentual bestimmt.
Zur Berechnung des Wasserbindevermögens ist die folgende Gleichung verwendet worden:

$$\text{WBV [\%]} = \left(\frac{((m_2 - m) - (m_1 - m))}{(m_1 - m)} \right) \cdot 100 \qquad \text{Gleichung (9)}$$

m = Leermasse des Zentrifugenglases in [g]
m_1 = Zentrifugenglas + Einwaage in [g]
m_2 = Zentrifugenglas + Sediment in [g]

3.3.7 Schweresinkverfahren

Es handelt sich hier um eine Fraktionierung der Mehle sowie der Mehlfraktionen auf wasserfreiem Weg, in dem sich Protein und Stärkekörner in einer Sedimentationsflüssigkeit aufgrund ihrer unterschiedlichen Dichten trennen lassen. Die von Hess ermittelten Dichten der Stärke und Proteine sind aus der Tabelle 10 zu entnehmen [81].

Tab. 10: Dichten der Stärke und des Proteins

Parameter	Dichte (d^{20}) g/cm³
Stärke	1,504 ± 0,005
Protein	1,345 ± 0,029

Als Sedimentationsmedium wurde ein Gemisch aus Tetrachlorkohlenstoff, d^{20} = 1,5985 g/cm³ und Benzol, d^{20} = 0,8786 g/cm³, verwendet. Die Dichte des Gemisches ist auf d^{20} = 1,440 g/cm³ eingestellt worden. Die Mehle bzw. Mehlfraktionen wurden im Sedimentationsgemisch bei einem Mengenverhältnis 1:20 (m/V) geschüttelt und anschließend in der Zentrifuge mit 4000·g bei 0 °C für 15 min absedimentiert. Dieser Vorgang wurde noch einmal wiederholt. Die Feststoffe im Überstand wurden in einer Nutsche abgetrennt. Das Sediment und die Überstandfeststoffe wurden an der Luft getrocknet. Die Protein- und Stärkegehalte der Fraktionen wurden bestimmt.

3.3.8 Bestimmung der salzwasserlöslichen Proteine

Die Salzwasserextraktion der Mehlproteine wurde nach einer modifizierten Osborne-Extraktion durchgeführt (Abb. 14).
Der Proteingehalt der gefriergetrockneten Stoffe wurde nach Kjeldahl bestimmt.

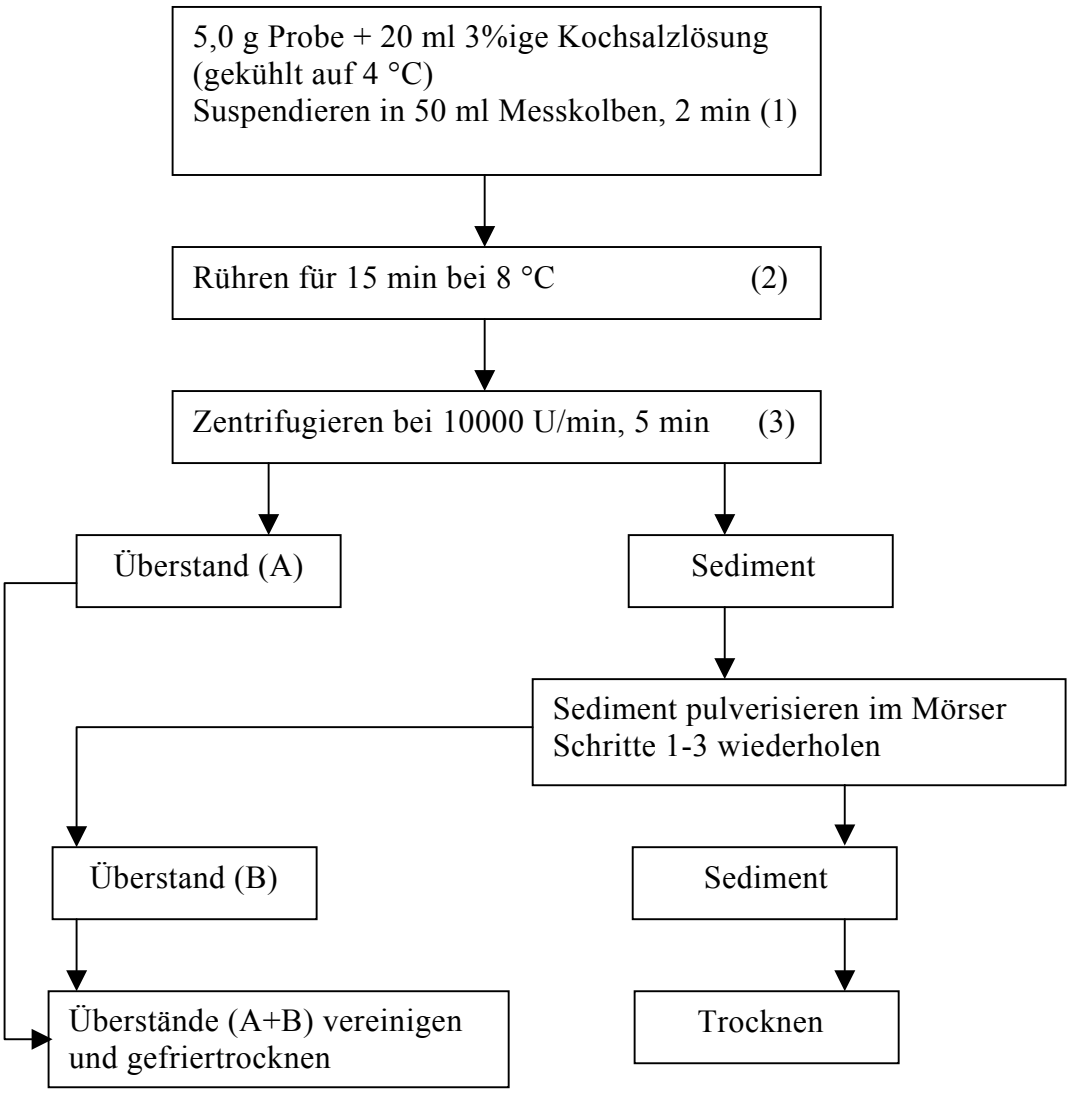


Abb. 14: Extraktionsschema der salzwasserlöslichen Proteine nach [82]

3.3.9 Katalaseaktivität bzw. Katalasezahl

Diese Methode wurde zur Indikation von Hitzeschäden in Weizen und Weizenmahlprodukten erarbeitet, indem eine Bewertung der Katalaseaktivität erfolgt.

Da höhere Temperaturen bei der Prallvermahlung gemessen wurden, soll diese Untersuchung Hinweise über eine thermische Einwirkung auf die Mehlinhaltsstoffe und deren Funktionalität geben. Um festzustellen, ob die bei erhöhten Umfangsgeschwindigkeiten hergestellten Mehle in ihrer Qualität beeinträchtigt sein würden, sind die Mehle einem Katalasetest unterzogen worden. Da das Enzym Katalase wärmeempfindlich ist, kann daraus abgeleitet werden, ob andere Stoffe, z.B. die Getreideproteine, durch die hohen Temperaturen von einer Schädigung betroffen sind [83]. Die Denaturierung umfasst im Weizenkorn sowohl die glutenbildenden Proteine als auch die wasser- bzw. salzwasserlöslichen Proteine. Die gebildete Gasmenge bei der Zersetzung des Wasserstoffperoxid durch die Katalase dient als Maß der Enzymaktivität.

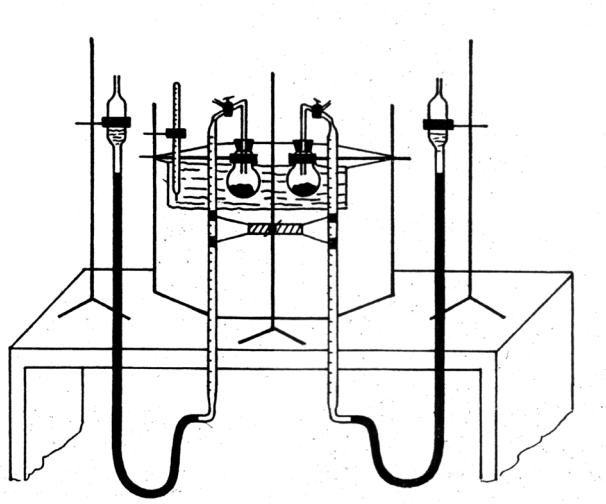


Abb. 15: Apparatur zur Bestimmung der Kataseaktivität

Prinzip

Die Katalase reguliert in den Zellen von Pflanzen und Tieren den Abbau des Zellgiftes Wasserstoffperoxid; sie setzt das Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff um.

$$2\ H_2O_2 \longrightarrow 2\ H_2O + O_2$$

Das pH-Wert-Optimum der Katalase im Weizen liegt um den Neutralpunkt, das Temperaturoptimum zwischen 10 und 25 °C.

Apparatur: siehe Abbildung 15

Reagenzien:

- Phosphatpuffer 0,01 M, pH-Wert 7,0
- 1,067 g $K_2HPO_4 . 3H_2O$
- 0,702 g KH_2PO_4

} in 1 l Meßkolben mit dest. Wasser auflösen und bis zur Marke auffüllen

- Wasserstoffperoxid (H_2O_2), 30 % (v/v))
- Bürettenflüssigkeit: 200 g Kalziumchlorid ($CaCl_2$) und 10 g Kupfer(II)-chlorid ($CuCl_2$) werden in 2l-Meßkolben gelöst und bis zur Marke aufgefüllt (pH-Wert 5)

Arbeitsweise

1 g Mehl werden in einem Becherglas mit 25 ml 0,01M Phosphatpuffer (pH-Wert 7,0) im Homogenisator 2 min aufgeschlämmt und anschließend quantitativ in einen 100 ml Kolben überführt. Homogenisator und Becherglas werden mit weiteren 75 ml Pufferlösung in den Kolben ausgespült. Der Kolben wird in das auf 25 °C temperierte Wasserbad bis zum Hals eingetaucht.
Nach 15 min werden mittels Sicherheitspipette 2,5 ml Wasserperoxid zugesetzt. Den Kolbeninhalt durch Umschwenken kurz mischen und sofort verschließen. Der Dreiwegehahn wird auf Verbindung Außenluft–Bürette gestellt, und die Flüssigkeitsspiegel der Bürettenflüssigkeit werden auf gleiches Niveau gestellt. Anschließend werden Kolbenraum und Bürettenraum miteinander verbunden. Nach 30 min und 60 min wird durch Niveauausgleich das Gasvolumen abgelesen. Anhand der Gasbildung innerhalb von 60 min wird die Nativität der Probe beurteilt.

3.3.10 Photometrische Quantifizierung der Thiolgruppen

Durchführung:
200 mg Mehl wurden mit 3 ml 50 %igem n-Propanol, 1 ml Puffer (Tris-HCl) und 1 ml Ellman's Reagenz auf einem Schüttler (Vortex) für 30 Sekunden suspendiert. Die Suspension wurde dann 30 min bei Raumtemperatur stehen gelassen. Nach 15 und 30 Minuten wurde die Mehlsuspension erneut auf dem Vortex 30 Sekunden geschüttelt. Anschließend wurde die Mehlsuspension bei 4000 U/min für 10 min zentrifugiert. Der gefärbte Überstand wurde bei 412 nm photometrisch vermessen.

Zur Quantifizierung wurde eine Kalibrierungsgerade mit L-Cysteinhydrochlorid erstellt (Abb.16).

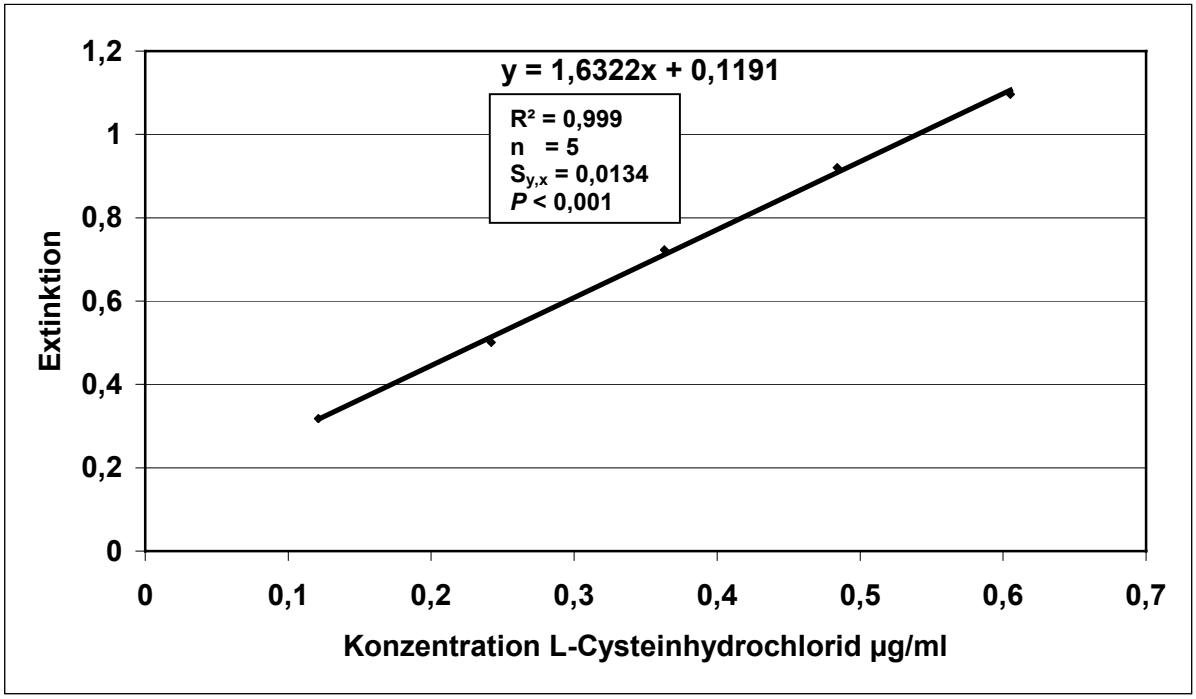


Abb. 16: Kalibrierungsgerade zur Bestimmung des Thiolgehaltes

3.3.11 Mikroskopische Untersuchungen

Von den nachzerkleinerten Mehlen sowie deren Fraktionen wurden lichtmikroskopische (Anhang 9.22) und REM–Aufnahmen angefertigt. Die Bilder sollen die veränderten Mehlstrukturen infolge der Prallzerkleinerung visuell darstellen sowie Hinweise über den Zustand der Mehlkomponenten geben.

3.3.12 Rheologische Untersuchungen

Mit rheologischen Untersuchungen können die physikalischen Eigenschaften des Teiges sowie des Klebers bestimmt werden. Eine Veränderung der Teig- sowie der Kleberbeschaffenheiten infolge der intensiveren Zerkleinerung soll damit untersucht werden. Das rheologische Verhalten eines Systems gibt Rückschlüsse auf dessen Zusammensetzung und strukturellen Zustand.

3.3.12.1 Farinograph

Alle Mehle wurden nach der ICC-Methode Nr. 115/1 mit Hilfe des Farinographen der Firma Brabender zur Bestimmung der Wasseraufnahme und des Knetverhaltens der Teige untersucht.

3.3.12.2 Texture Analyser

Nach der RVA-Messung (Punkt 3.3.3.2) wurde die Festigkeit der “Gele“ gemessen. Bei dieser Messung wird ein Kunststoffstempel mit einem Durchmesser von 10 mm mit vorgegebener Geschwindigkeit 7 mm ins Gel eingedrückt und dann rausgezogen. Die gemessenen Parameter, positive Kraft (Gelfestigkeit) und negative Kraft (Gelklebrigkeit), sind auszuwerten.

3.3.12.3 Extensograph

Die Dehnungseigenschaften der Teige wurden mit dem Extensographen nach der ICC-Standardmethode Nr. 114/1 mittels Brabender Extensographen durchgeführt. Zur Bestimmung der Dehnungseigenschaften (Dehnwiderstand und Dehnbarkeit) des Klebers wurden Mikrozugversuche am Kleber nach Kieffer gemessen. 10 g Mehl wurde zuerst in einem 10 g Kneter angeteigt. Der Kleber wurde in der Glutomatic mit 2 %iger Kochsalzlösung ausgewaschen. Er wurde dann in einem Reagenzglas mit destilliertem Wasser überdeckt und bei 4000·g für 5 min zentrifugiert. Nach dem Ausschütten des Wassers wurde der Kleber in der Kieffer-Blockform für 45 min bei 32 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 80 % entspannt. Die Messung wurde mit der Kieffer-Zugeinrichtung am Gerät Texture Analyser (TA. XT2) von der Firma stable microsystem (SMS) durchgeführt [84].

3.3.12.4 Glutenaggregationstest

Der Glutenaggregationstest beruht auf dem Aggregationsverhalten des Weizenklebers. Das Aggregationsverhalten einer Mehl/Wasser-Suspension (im Verhältnis 1:1,2) wird über die Stromaufnahme während einer durch Temperaturveränderung begrenzten Zeitdauer untersucht. Der Test misst die Stromaufnahme während des Mixens der Mehl/Wasser-Suspension innerhalb einer Zeit bis zu 1000 s. Die Messwerte werden programmunterstützt in einen Computer übernommen und ausgewer-

tet. Der Testverlauf ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Aggregationszeit ist die Zeit, bei der eine Stromaufnahme von 3 A (Maximum) erreicht wird.

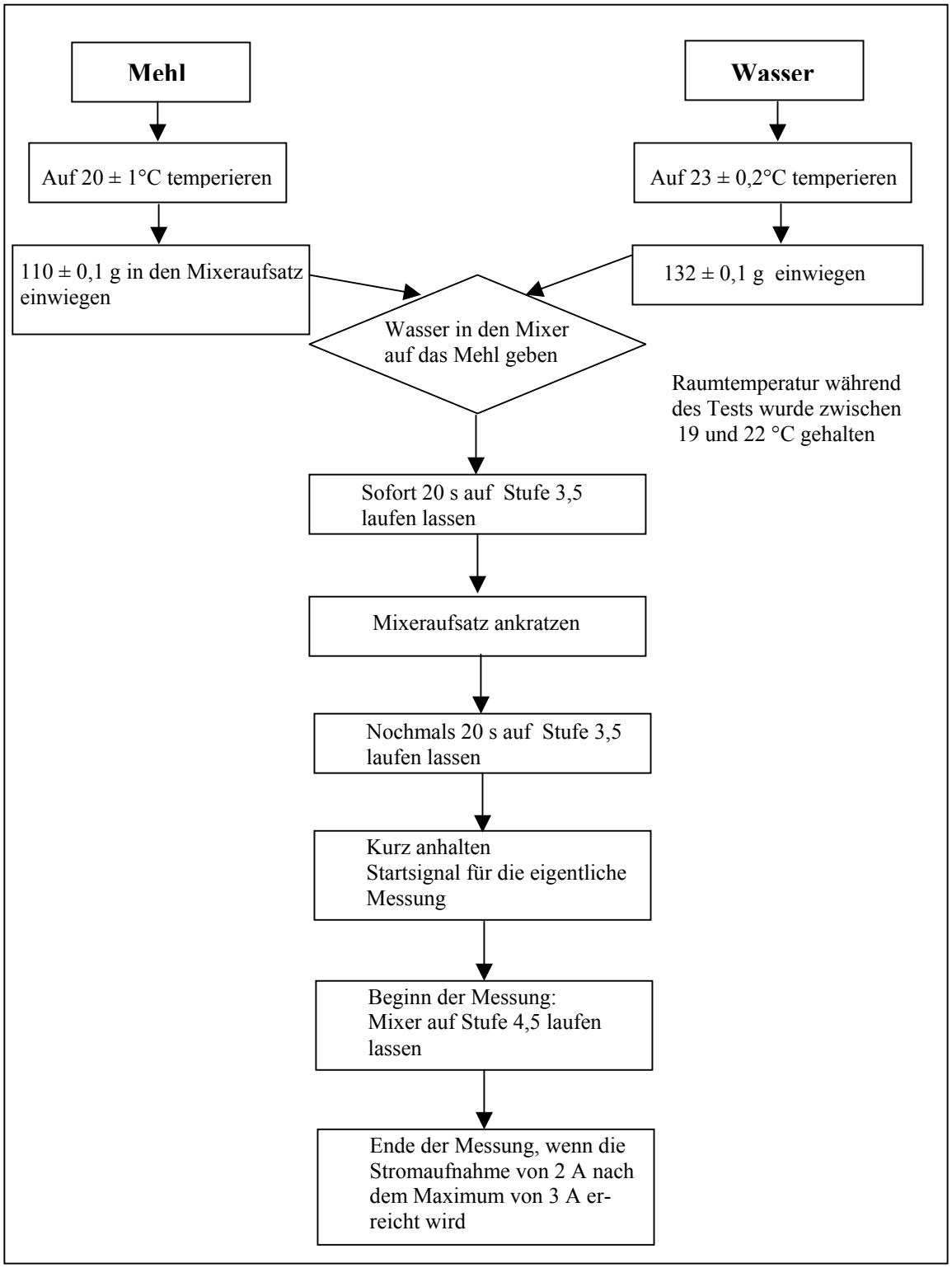


Abb. 17: Glutenaggregationstest [85]

3.3.12.5 Kriech-Erholungstest (Glutograph)

Die Untersuchung von Kleber (Relaxationstest) erfolgte entsprechend der von Pahne beschriebenen Methode für den Einsatz des Brabender-Glutographen [86].

Durchführung:

Der Kleber ist in der Glutomatic ausgewaschen worden, danach wird der Kleberballen zwischen den Fingerspitzen zu einer kleinen Kugel geformt. Nach der Überführung der Kleberkugel in das Zentrifugenglas, werden 10 ml destilliertes Wasser zugeführt (Kleber muss vollständig mit Wasser überschichtet sein). In einer Tischzentrifuge wurde der Kleber genau 1 min bei 4000 U/min zentrifugiert. Danach wird der Kleber im Zentrifugenglas für 9 min ruhen gelassen. Der flüssige Überstand wird dekantiert. Der Kleber wird dem Zentrifugenglas entnommen, und mit einer Schere in zwei etwa gleich große Hälften zerschnitten. Die eine Hälfte wurde mit der Schnittfläche auf eine mit destilliertem Wasser benetzte Glasplatte gelegt. Die andere Hälfte wird unverzüglich mit der Schnittfläche auf die mit destilliertem Wasser benetzte Messplatte des Glutographen gelegt. Die Messbrücke wird durch den Schließhebel geschlossen. Der zwischen den Messplatten seitlich überstehende Kleber wird mit Hilfe des Schneidrings zügig, aber ohne ihn zu verdrehen, abgeschnitten. Der Schneidring ist dann in die Ausgangsstellung zurückzubringen. Die Messung beginnt dann automatisch.

3.3.12.6 Oszillationsmessungen

Der Vorteil der Oszillationsmethode ist die zerstörungsfreie Messung der Dehneigenschaften des Materials. Durch die Oszillationsmessungen lässt sich der native Strukturierungszustand eines Materials in einem Deformationsversuch (Amplitudensweep) oder in einem Frequenzversuch (Frequenzsweep) beschreiben.
Bei diesem Versuch lassen sich der Speichermodul G’ und der Verlustmodul G’’ bestimmen. Während der Speichermodul den elastischen Anteil charakterisiert, beschreibt der Verlustmodul den viskosen Anteil. Der Quotient tan δ (G’’/G’) ist der Phasenverschiebungswinkel und lässt eine Aussage über die η/G-Relativität eines viskoelastischen Materials zu

Bei zu hohen Amplituden können die Oszillationsmessungen signifikante Zerstörungen der Struktur des Materials erzeugen [98].
Die Oszillationsmessungen des Teiges sowie des Klebers wurden in einem Platte-Platte-System durchgeführt. 10 g Mehl (auf 14 % Feuchtebasis) wurden mit destilliertem Wasser angeteigt, die eingesetzte Wassermenge entsprach der Wasseraufnahme im Farinographen. Der Kleber wurde aus 10 g Mehl in der Glutomatic ausgewaschen. Die Kennwerte G', G'' und tan δ wurden während der Messung registriert.

Einstellungsparameter der Oszillationsmessungen

Platte-Durchmesser:	25,0 mm
Spalt:	2,0 mm
Temperatur:	25 °C
A) Amplitudensweep:	
Frequenz:	1 Hz
Initiale Deformation:	0,1 Pa
End-Deformation:	10000 Pa
B) Frequenzsweep	
Deformation:	100 Pa
Initiale Frequenz:	79,0 Hz
End-Frequenz:	0,001 Hz

3.3.13 Backversuche

Zur Beurteilung der Backeigenschaften der Mehlen ist der Rapid-Mix-Test (Brötchen) nach der Standardmethode [56] ohne Zusatz von Chemikalien verwendet worden. Es sind auch Backversuche durchgeführt worden, bei denen Anteile der Versuchsmehle sowie der Mehlfraktion des mit 200 m/s geprallten Mehles zu einem Handelsmehl (Type 550) zugemischt worden. Dabei soll die Auswirkung der veränderten Qualität der geprallten Mehle auf die Teig- und Backeigenschaften des Handelsmehles untersucht werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Mahlergebnisse der prallzerkleinerten Mehle

4.1.1 Granulations- und Oberflächenänderungen

Der massespezifische bzw. der oberflächenbezogene Energiebedarf stieg mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit nahezu linear an und erreichte bei 200 m/s 250 kWh/t_{Mehl} bzw. 1,75 kWh/m^2_{Mehl}. Eine Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit um jeweils 40 m/s führte zu einer Verdoppelung des massebezogenen Energiebedarfs. Während der massebezogene Energiebedarf bei der Umfangsgeschwindigkeit 200 m/s um mehr als das 8-fache höher lag als bei 80 m/s, stieg der für die Bruchvorgänge erforderliche oberflächenspezifische Energiebedarf im gleichen Geschwindigkeitsintervall dagegen nur um etwa das 4-fache (Tab.11 und Abb. 18).
Das mit Walzen ermahlene Mehl (WM) zeigte die größte mittlere Teilchengröße von 117,0 µm und mit 0,15 m²/g die kleinste spezifische Mehloberfläche. Die zunehmende mechanische Beanspruchung bei der Prallzerkleinerung in der Stiftmühle führte zu einer intensiveren Zerstörung der Zellstruktur des Mehlkörpers der Mehle. Die mittlere Teilchengröße des bei 200 m/s prallzerkleinerten Mehles verringerte sich um etwa das Fünffache und die Mehloberfläche vergrößerte sich um ca. den Faktor 3 gegenüber dem Ausgangsmehl.

Tab. 11: Mahlergebnisse der prallzerkleinerten Mehle

Mehl	A_o [m²/g]	d_m [µm]	E_G [kWh/t_{Mehl}]	E_G [kWh/m^2_{Mehl}]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	µ	E_{LL} [kWh/ t_{Mehl}]	T_{Mehl} [°C]
WM	0,15	117,0	-	-	-	-	-	14
NZ80	0,29	80,3	30	0,45	8532	171	24,2	27
NZ120	0,40	35,7	60	0,58	12753	255	50,4	34
NZ160	0,54	24,1	140	1,00	17004	340	107,5	40
NZ200	0,56	20,0	250	1,75	21240	425	234,7	51

- nicht gemessen

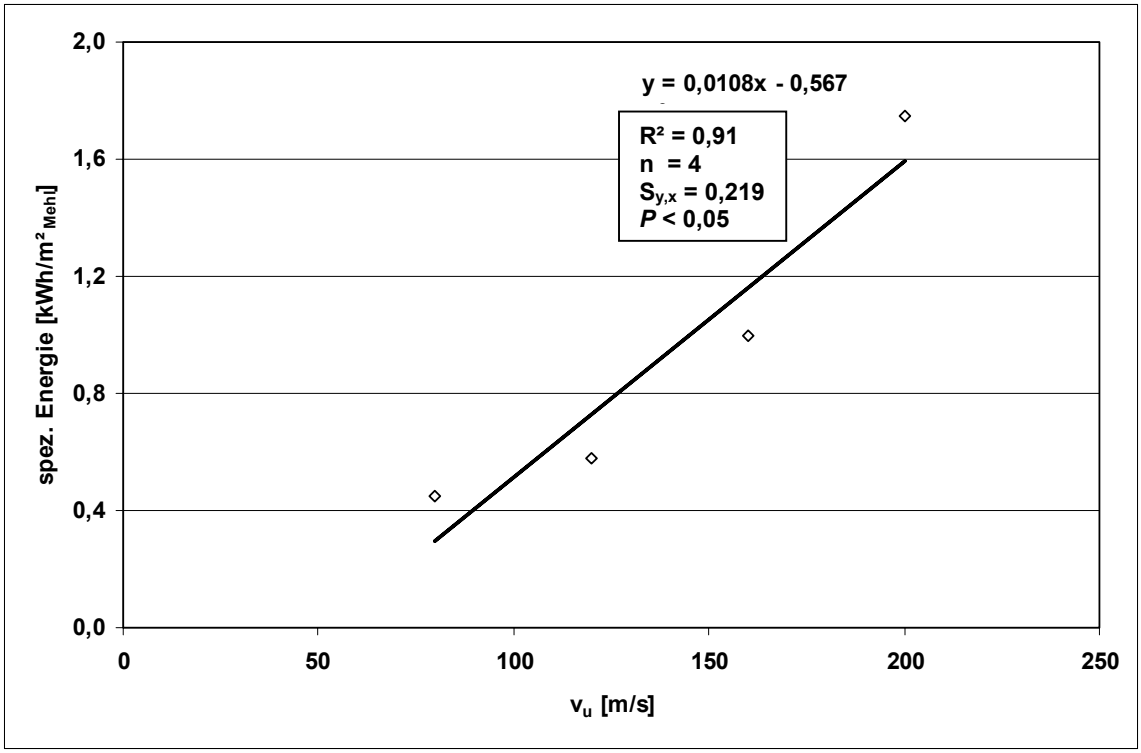


Abb. 18: Energieverbrauch bei der Prallzerkleinerung der Mehle

Der Zusammenhang zwischen der Prallenergie und der Oberflächenzunahme sowie der mittleren Teilchengröße der Mehle ist in Abbildung 19 dargestellt. Im untersuchten Geschwindigkeitsbereich 80 bis 200 m/s stieg die Oberflächenzunahme um etwa den Faktor 3 an und die mittlere Korngröße verringerte sich um den Faktor 4. Mathematisch kann der Zusammenhang zwischen Energie und Oberflächenzuwachs mit der Gleichung 10 sowie zwischen Energie und mittlerer Korngröße mit der Gleichung 11 abgeleitet werden.

$$\Delta A_o = 0{,}027 \cdot (E)^{0{,}51} \qquad \text{Gleichung (10)}$$

$$d_m = 593{,}8 \cdot (E)^{-0{,}64} \qquad \text{Gleichung (11)}$$

Die zunehmende Mehloberfläche ist durch den steigenden Feingutanteil der Mehle verursacht worden.

Der hohe Gesamtenergiebedarf ist bedingt durch den hohen Leerlaufenergiebedarf, der mit wachsender Umfangsgeschwindigkeit stark anstieg. Der Leerlaufenergieverbrauch betrug etwa 80-90 % des Gesamtverbrauches.

Da die Stiftmühle eine hochtourige Maschine ist, entsteht ein starker Luftvolumenstrom. Mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit der Mahlelemente durch die erhöhte Reibung von Luft und Gut in der Mühle ist ein Temperaturanstieg beobachtet worden. Die Temperaturen der Abluft stiegen bis auf 70 °C und die des Mehles bis auf 51 °C bei der Vermahlung mit 200 m/s an. Aufgrund der kurzen Verweildauer (unter 1 s/kg) der Mehlteilchen in der Mühle und des niedrigen Feuchtegehaltes (unter 10 %) ist hier eine Auswirkung der Temperatur auf die qualitativen Eigenschaften der Mehle sowie der Mehlfraktionen nicht zu erwarten.

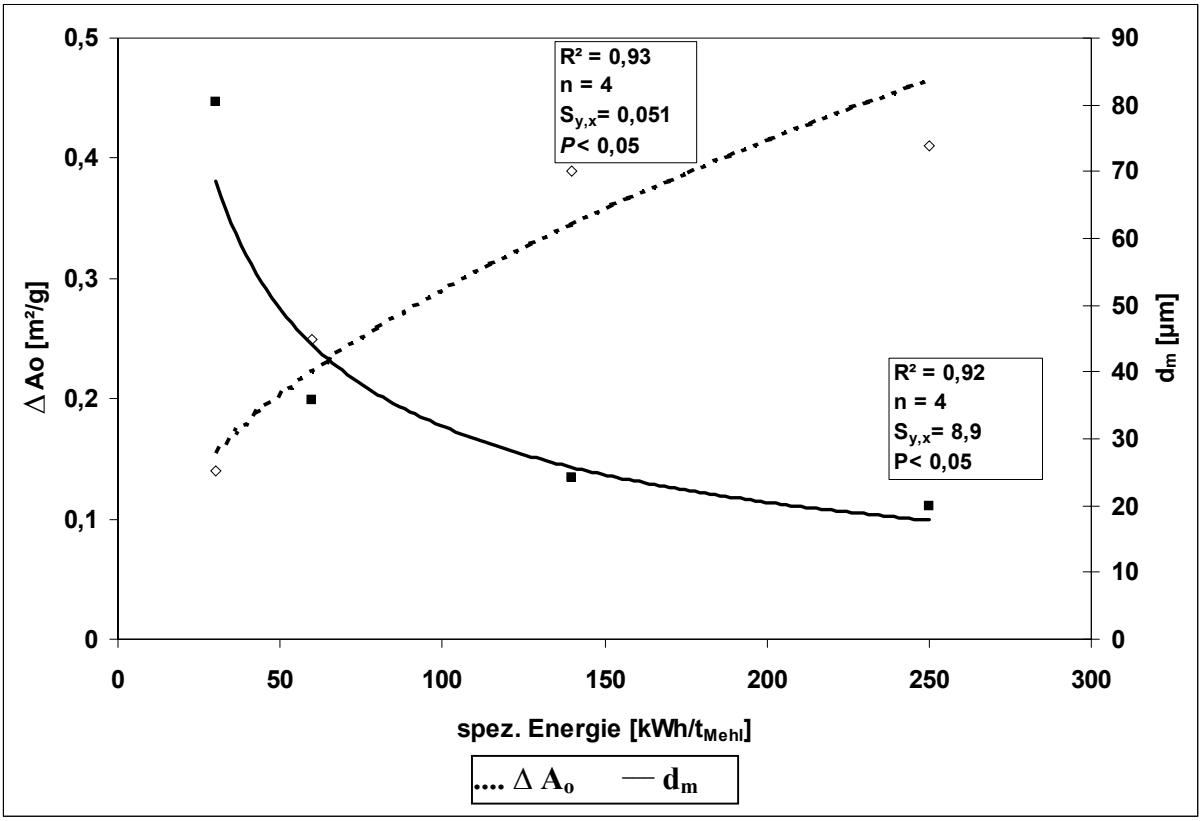


Abb. 19: Oberflächenzunahme und mittlere Teilchengröße der prallzerkleinerten Mehle

Mit dem Anstieg des Feinanteils im Mehl ist eine bessere Stoffverschiebung der beiden Mehlkomponenten Protein und Stärke bei einer Fraktionierung des Mehles nach den Teilchengrößen zu erwarten.

Neben der Charakterisierung der Feinheit der Mehle hat deshalb das Messen der Korngrößenverteilung besondere Bedeutung für die anschließende Windsichtung der Mehle. Dadurch kann der Einfluss der Nachzerkleinerung auf den Feinst- bzw. Feingutanteil im Mehl < 50 µm ermittelt werden. Die Verteilung der Anteile in diesem Kornbereich kennzeichnet das Ausmaß freiliegender Proteinteilchen und Stärkekörner infolge des intensiven Aufbrechens der Mehlkörperzellstruktur in den Mehlen. Das gibt wiederum den Auflösungsgrad des Mehlkörpers an. In Anlehnung an Literaturangaben [39, 66, 68, 71, 75, 91] fallen freie Proteinteilchen sowie kleine Stärkekörner im Korngrößenbereich < 20 µm an, die mittleren und großen Stärkekörner im Bereich 20-50 µm. Die Mehlkörperzellen sowie Zellverbände liegen im Kornbereich > 50 µm.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde ein Anstieg des Anteils der Korngrößen < 50 µm von etwa 25 % im mit Walzen ermahlenen Mehl auf etwa 95 % im bei 200 m/s geprallten Mehl festgestellt.

Aus der Tabelle 12 sind die Masseanteile der Mehlfraktionen < 50 µm und > 50 µm in den Mehlen zu entnehmen. Durch die Prallzerkleinerung in der Stiftmühle fiel bei den höheren Energien, ab der Prallgeschwindigkeit 160 m/s, mehr als die Hälfte des Ausgangsmehles als Feinstgutfraktion (< 20 µm) an, gleichzeitig stieg der Anteil an stärkeangereicherter Fraktion (20-50 µm) um etwa das 3-fache an. Bei 200 m/s betrug der Anteil > 50 µm nur noch etwa 5 %, d.h. hier wurde ein nahezu vollständig aufgelöstes Mehl ermahlen.

Tab. 12: Masseanteile der Fraktionen in den Mehlen

Mehle	Anteil [% TS]		
	< 20 µm	20-50µm	> 50 µm
WM	10,6	13,0	76,4
NZ80	25,5	27,0	47,5
NZ120	40,1	34,3	25,6
NZ160	50,7	38,0	11,3
NZ200	55,7	39,1	5,2

Die Masseanreicherungen der Mehlfraktionen < 20 µm und 20-50 µm ergaben einen relativ gleichmäßigen Strukturauflösungsfaktor von etwa 1,1-2,2 zwischen den Ge-

schwindigkeitsstufen für die Anteile < 50 µm, während der Faktor der Masseabreicherungen für die Anteile > 50 µm etwa 1,6–2,3 betrug.

Durch die Prallzerkleinerung veränderten sich auch die Korngrößenverteilungscharakteristiken der Mehle deutlich. In Abbildung 20 ist erkennbar, dass die Dichteverteilung des Ausgangmehles eine bimodale Verteilung zeigt, die für ein mit Walzen ermahlenes Mehl typisch ist. Die Dichteverteilungen mit höherem Energieeintrag ab 120 m/s der geprallten Mehlen wiesen dagegen eine Normalverteilung auf.

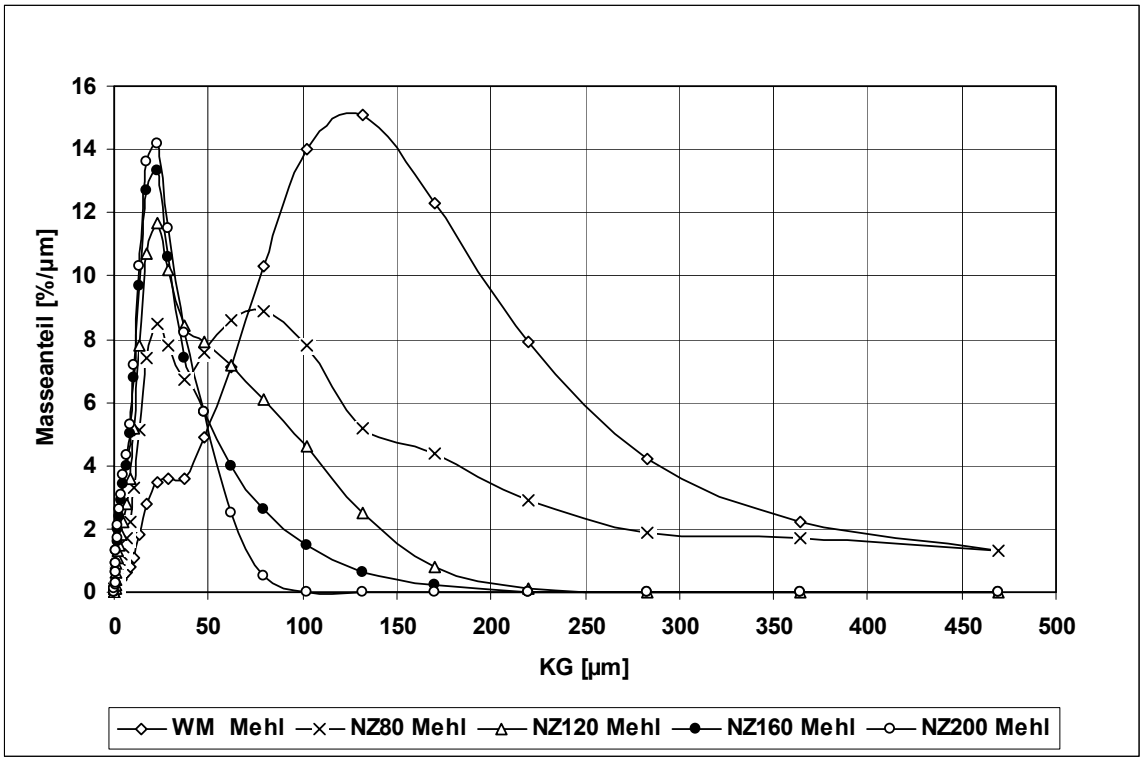


Abb. 20: Korngrößenverteilungsdichten der Mehle

Die Korngrößenverteilungsdichte gibt die Häufigkeit der Mehlteilchen an. Das Ausgangsmehl zeigte zwei maximale Häufigkeiten. Das erste und kleine Maximum befand sich bei der Teilchengröße 25 µm mit einem Anteil von ca. 4 %. Das ausgeprägte zweite Maximum lag mit einem Anteil von ca. 15 % bei der Teilchengröße 130 µm. Mit zunehmender Prallenergie veränderte sich die Verteilungsdichte der Mehle hin zu kleineren Korngrößen. Ab der Umfangsgeschwindigkeit von 120 m/s bildete sich nur noch ein ausgeprägtes Maximum bei etwa 20 µm aus, dessen Anteile mit der Prallenergie anstiegen und bei 200 m/s über 14 % betrugen. In wieweit die nach dem Zer-

Zerkleinern granulometrisch ermittelten Korngrößenanteile tatsächlich in Feinstkornfraktionen getrennt werden können, hängt von der Trennschärfe des Sichters ab.

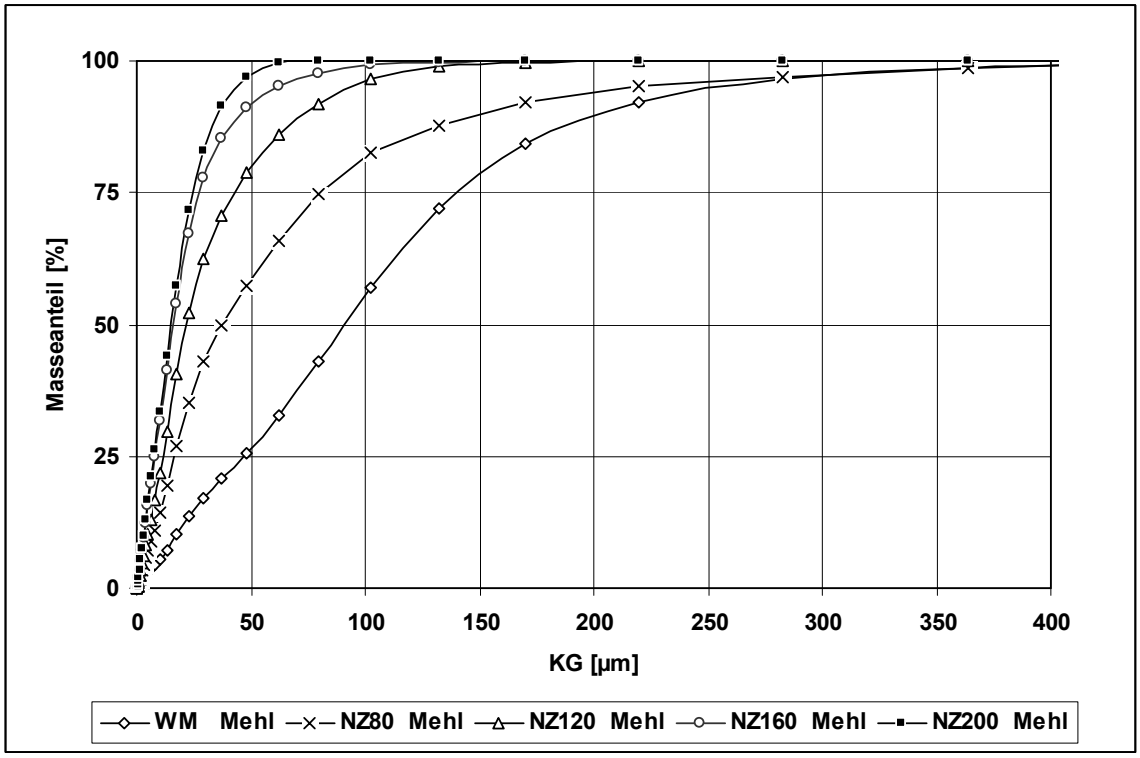


Abb. 21: Korngrößenverteilungsfunktionen der Mehle

In Abbildung 21 ist die Summenverteilungsfunktion der Korngrößen der Mehle dargestellt worden. Während das mit Walzen ermahlene Mehl bei der Teilchengröße < 80 µm einen Massenanteil von 43 % aufweist, zeigte das 200 m/s-Mehl bei dieser Teilchengröße einen Anteil von 100 %.

4.1.2 Ergebnisse der mikroskopischen Aufnahmen

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen veranschaulichen die Mehlstruktur und die Mehlbestandteile. Die Abbildung 22 zeigt die Mehlstruktur des Ausgangsmehles. Eine starke Einbettung der Stärkekörner in der Proteinmasse ist hier deutlich zu erkennen. Infolge dessen besteht das Mehl aus einem geringfügigen Anteil an freiliegenden Stärkekörnern und zum großen Teil aus Agglomeraten (Endospermbruchstücken).

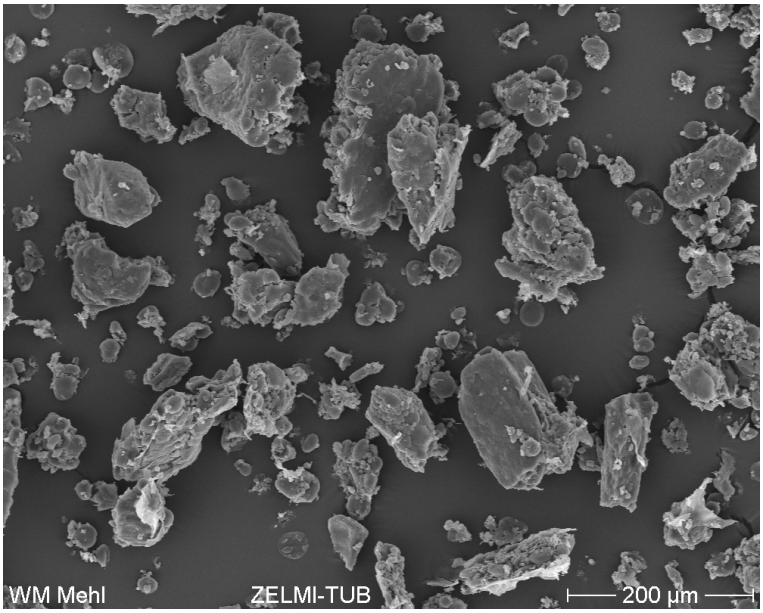


Abb. 22: Walzenmehl unter REM

Das bedeutet, dass bei der Walzenvermahlung des Weizens nur ein kleiner Anteil der Stärke aus der Matrix herausgelöst wurde. Als Ursache ist der starke Zusammenhalt der Inhaltsstoffe im Endosperm des verwendeten Weizens zu nennen, der zu einem geringeren Auflösungsgrad des Mehles führte.

Bei zunehmender Prallenergie lösten sich deutlich mehr Stärkekörner von der Proteinmatrix ab. Bei dem mit 120 m/s geprallten Mehl ist ein größerer Anteil an freiliegenden Stärkekörnern zu beobachten (Abb. 23). Im Bild sind noch Agglomerate des Mehlkörpers zu sehen. Die Beanspruchung des Mehles bei 120 m/s war aufgrund der harten Struktur des Weizens für eine vollständige Abtrennung der Stärkekörner nicht ausreichend.

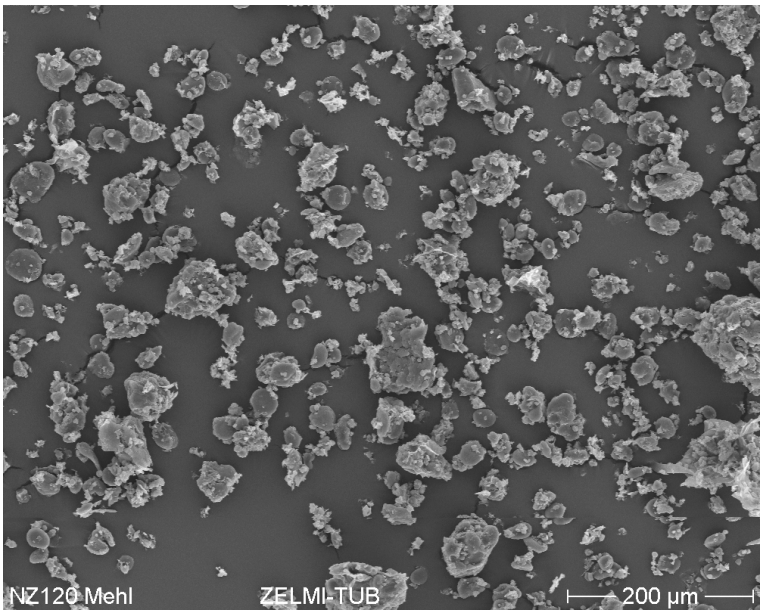


Abb. 23: NZ120-Mehl unter REM

Durch die hohe zugeführte Energie ins Mehl wurden die Stärkekörner intensiv beansprucht, was zu einer höheren Stärkebeschädigung führte (Abb. 24).

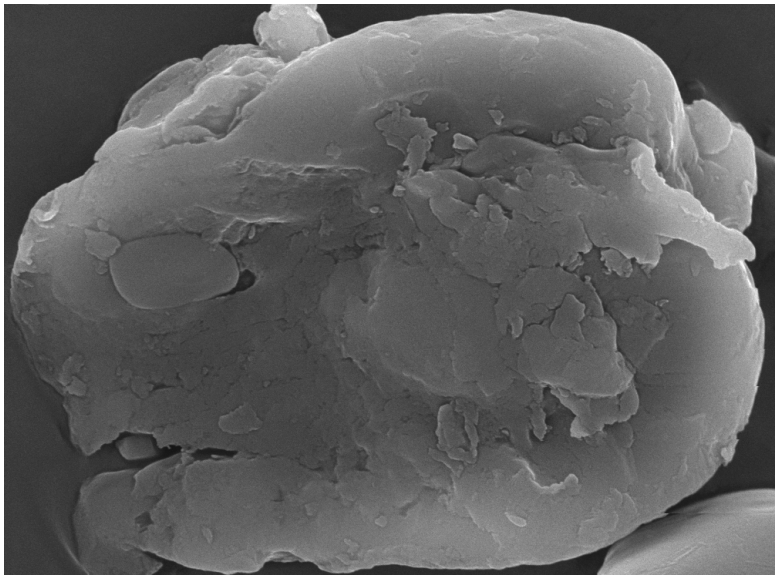


Abb. 24: Mechanisch beschädigtes Stärkekorn

Die Mehlstruktur des bei 200 m/s prallzerkleinerten Mehles ist infolge der intensiveren Beanspruchung stärker verändert worden. Dieses Mehl besteht, wie in Abbil-

dung 25 zu erkennen ist, größtenteils aus freiliegenden Stärkekörnern und Proteinteilchen.

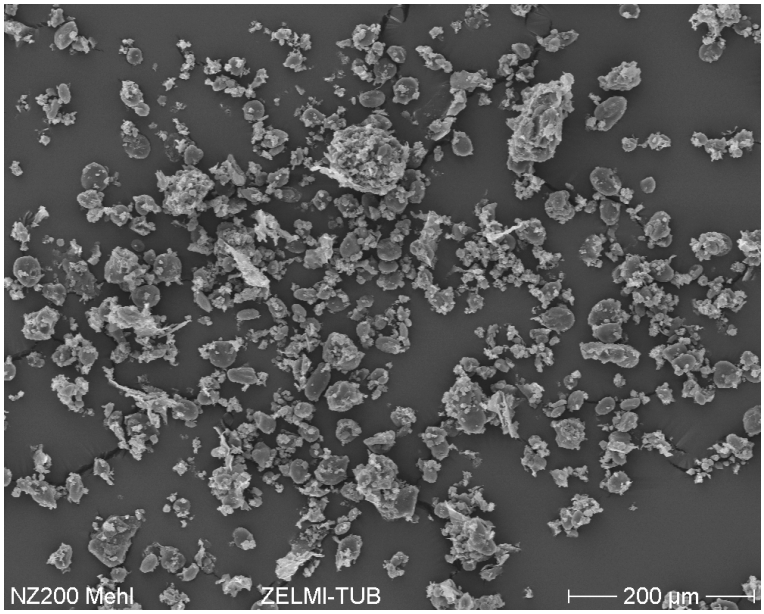


Abb. 25: NZ200-Mehl unter REM

Die höhere Energie bei 200 m/s erhöhte den Auflösungsgrad des Mehles, es liegen mehr Stärkekörner und Proteine in freier Form vor. Die intensivere Beanspruchung des Mehles modifizierte die Stärkekörner stärker (Abb. 26). Wobei die mittleren und großen Stärkekörner intensiver beeinflusst wurden als die kleinen Stärkekörner. Die hohen Beanspruchungen bewirkten somit die Eigenschaften der Mehlkomponente Stärke und Protein.

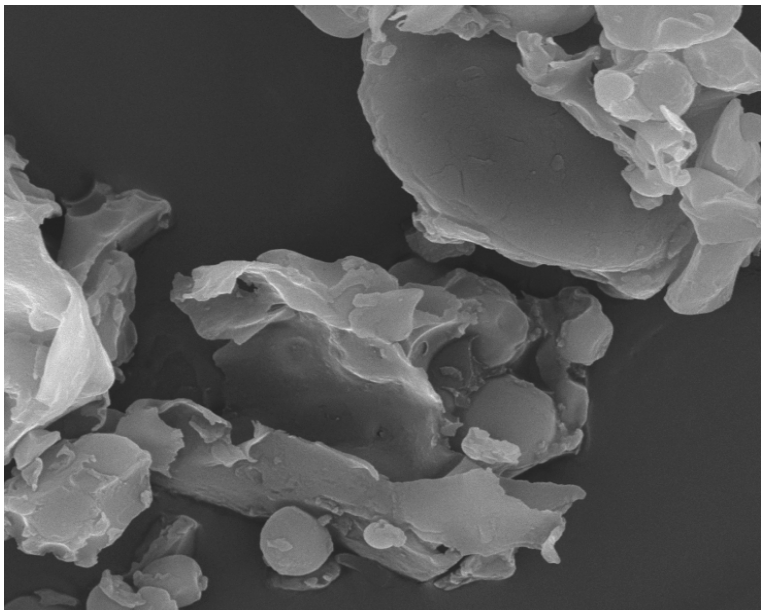


Abb. 26: Stark beschädigtes Stärkekorn

4.1.3 Stoffliche Zusammensetzung und Eigenschaften der Prallmehle

4.1.3.1 Anteile der Inhaltsstoffe

Der Feuchtigkeitsgehalt der prallzerkleinerten Mehle verringerte sich infolge des größeren Luftvolumenstroms und der steigenden Temperatur in der Mühle deutlich. Dabei erfolgte bei gleichzeitiger Vergrößerung der Gutoberfläche eine Abtrocknung der Mehle bis auf 8,3 % bei 200 m/s.

Tab. 13: Inhaltsstoffzusammensetzung der Mehle

Mehle	F [%]	Asche [%TS]	Protein [%TS]	Stärke [%TS]	Pentosane [%TS]	Fett [%TS]	Gluten* [%]	lösl.PR** [%TS]
WM	14,1	0,54	14,3	80,7	1,84	1,06	30,0	20,6
NZ80	12,8	0,54	14,0	81,1	1,77	0,95	30,1	20,5
NZ120	12,7	0,54	13,9	81,4	1,73	0,94	29,9	21,5
NZ160	10,4	0,53	14,0	80,6	1,74	0,72	30,0	19,7
NZ200	8,3	0,52	13,9	79,6	1,71	0,79	29,5	20,0

* Feuchtglutengehalt

** salzwasserlösliche Proteine

Die Untersuchungen der Inhaltsstoffzusammensetzung der prallzerkleinerten Mehle zeigten geringfügige Veränderungen in den Asche-, Rohprotein-, Stärke- und Pentosangehalten (Tab. 13). Diese Ergebnisse waren zu erwarten, da die Prallvermahlung des Ausgangsmehles bei den unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten ohne anschließende Siebung erfolgte. Der Fettgehalt wurde infolge der Nachzerkleinerung herabgesetzt. Diese Abnahme ist wahrscheinlich auf eine Oxidation des Fetts zurückzuführen. Denkbar ist auch, dass die höheren Anteile an Feingut im Mehl durch Agglomerationen die Extrahierbarkeit des Fetts erschweren.
Eine geringfügige Abnahme der salzwasserlöslichen Proteine wurde beobachtet. Die Herabsetzung des Gehaltes an salzwasserlöslichen Proteine kann auf eine Verringerung der Löslichkeit der salzwasserlöslichen Proteine (Albumine und Globuline) durch die Prallzerkleinerung zurückgeführt werden. Ähnliche Ergebnisse sind in der Literatur auch zu finden [4, 43].
Obwohl der Feuchtglutengehalt in den Mehlen fast unverändert blieb, hat der Proteingehalt des gefriergetrockneten Glutens zugenommen. Diese Zunahme kann auf die Abnahme der salzwasserlöslichen Proteine zurückgeführt werden. Bei den Stärke- und Aschegehalten des Glutens ist keine deutliche Tendenz zu erkennen (Tab. 14).

Tab. 14: Zusammensetzung des gefriergetrockneten Glutens

Probe	Feuchte [%]	Protein [% TS]	Stärke [% TS]	Asche [% TS]
WM	7,4	88,3	3,2	0,79
NZ80	6,8	88,3	2,8	0,78
NZ120	6,6	88,5	3,1	0,80
NZ200	6,9	88,8	2,9	0,77

4.1.3.2 Zuckergehalte der Mehle

Durch die Prallzerkleinerung ist in den Mehlen ein Anstieg der Maltosekonzentration festzustellen (Tabelle 15). Dagegen sind bei den anderen Zuckern keine wesentlichen Änderungen zu erkennen.

Tab. 15: Zuckergehalte der Mehle

Mehl	Glucose [%]	Fructose [%]	Saccharose [%]	Maltose [%]	Maltotriose [%]
WM	0,04	0,03	0,15	0,64	0,05
NZ80	0,06	0,03	0,18	0,73	0,05
NZ120	0,03	0,03	0,16	0,77	0,05
NZ200	0,03	0,03	0,15	0,87	0,04

Die Maltosezahl wird als Index des Stärkebeschädigungsgrades angesehen. Die Abbildung 27 stellt die lineare Korrelation (R^2 =0,92) zwischen Maltosegehalt und Stärkebeschädigung dar. Der erhöhte Maltosegehalt wird durch die erhöhte Stärkebeschädigung verursacht. Mit Zunahme des Anteils an beschädigten Stärkekörnern im Mehl steigt die Hydrolyse der Stärke an. Wie die Ergebnisse der Backversuche zeigten (Punkt 4.1.7.1), begünstigt der steigende Maltosegehalt in den Prallmehlen die Hefefermentation im Teig und führte zur Verbesserung des Backverhaltens. Die steigende Gasbildung vergrößerte das Brotvolumen. Ein höherer Zuckergehalt fördert außerdem die Bräunung der Brotkruste, deren Farbtönung durch die Maillardreaktion beim Backprozess entsteht.

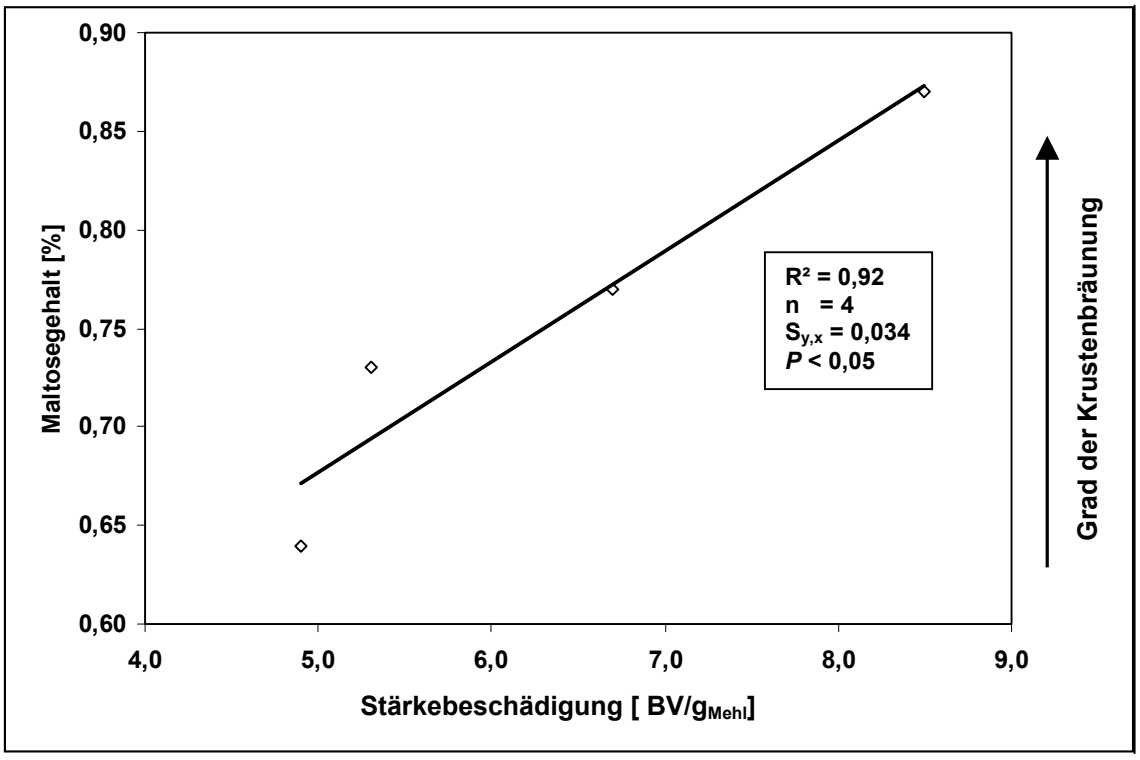


Abb. 27: Einfluss der Stärkebeschädigung bzw. des Maltosegehaltes auf die Brotbräunung

4.1.3.3 Thiolgehalte der Mehle

Etwa 5 % des Gesamtcysteins im Mehl liegen in Thiol (SH-)Form vor und können vom Luftsauerstoff oder von anderen Oxidationsmitteln in Disulfide überführt werden [30]. Es entstehen intra- und intermolekulare SS-Bindungen, die die Festigkeit/Elastizität des Glutens erhöhen (Abb. 28). In der Literatur sind solche Reifungsvorgänge des Glutens durch den pneumatischen Mehltransport oder während des Belüftens des Mehles in Silozellen beschrieben worden. Diese Prozesse sind auch temperaturabhängig [59].
In den Versuchen betrugen die Massenströme der Luft bei der Prallvermahlung für 80m/s $\dot{m}$=8532 kg/h und für 200 m/s sogar $\dot{m}$=21240 kg/h. Der Durchsatz des Mahlgutes wurde mit 50 kg/h konstant gehalten. Daraus errechnet sich eine Luftbeladung des Gutes bei 80 m/s mit μ=171 und für 200 m/s mit μ= 425 (Tab.11). Diese hohen Luftmassen bewirken in Verbindung mit der abnehmenden Teilchengröße eine intensive Umspülung der Mehlteilchen mit der Luft, deren Sauerstoff die SH-Gruppen zu Disulfidbindungen oxidieren kann, wodurch eine Umordnung und Verdichtung (intra- und /oder intermolekular) der Eiweißstruktur erfolgt.

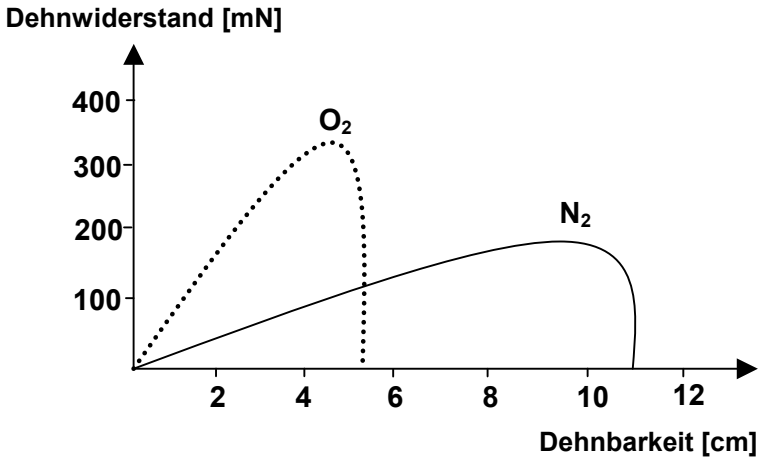


Abb. 28: Verfestigen und Erweichen des Teiges bzw. Glutens bei der Mehlbehandlung mit O_2 sowie N_2 [20, 23]

Die Bestimmung der Thiolgruppen sollte Aufschluss über den Einfluss des Luftsauerstoffs auf den SH-Gehalt in den Prallmehlen und dessen Bedeutung für die rheologischen Teig- und Gluteneigenschaften geben. In Abbildung 29 sind die Thiolgehalte der Mehle dargestellt worden. Es ist zu erkennen, dass der SH-Gruppengehalt mit

steigender Energie zugenommen hat. Diese Zunahme kann auf den hohen Auflösungsgrad der Mehlkörperstruktur zurückgeführt werden, in dem eine größere Anzahl von Thiolgruppen durch die Beanspruchung freigelegt worden ist. Eine Spaltung von SS-Bindungen in SH-Gruppen ist mit der Prallenergie nicht erreichbar [59]. Mit der Prallzerkleinerung bei hohen Energien sind Konformationsänderungen der Kleberproteine vorstellbar.

Aus der Zunahme der Thiolgehalte ist aber nicht erkennbar, ob während der Prallzerkleinerung eine Oxidation durch den Luftsauerstoff stattgefunden hat. Dazu wäre eine vergleichende Bestimmungen der SS-Bindungen im Mehl notwendig.

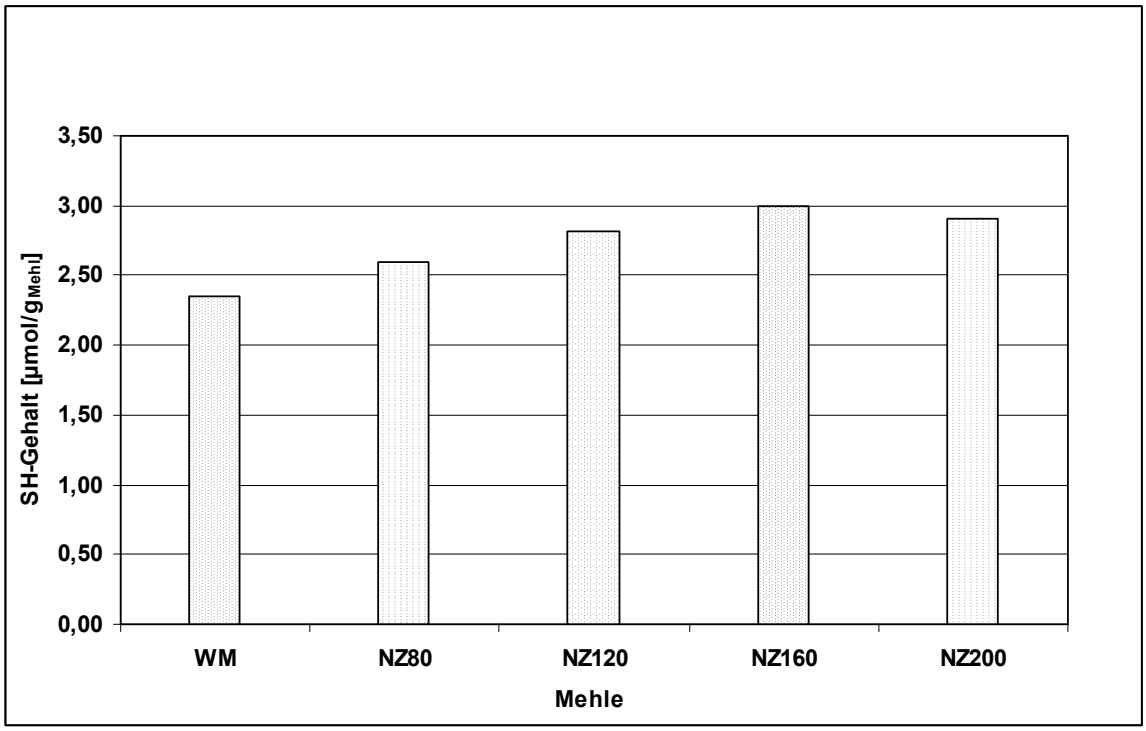


Abb. 29: Thiolgehalte der Mehle

Hinsichtlich der Verarbeitungseigenschaften der Mehle ist die Zunahme der SH-Gruppen positiv zu bewerten, denn je mehr SH-Gruppen im Mehl vorhanden sind, desto mehr SS-Bindungen können durch Oxidationen beim Kneten entstehen, die zur Verbesserung der elastischen Eigenschaften von Kleber und Teig führen.

4.1.3.4 α-Amylase- und Katalaseaktivitäten

Bei der Prallzerkleinerung wirkt sich mit höheren Beanspruchungsenergien neben den mechanischen Kräften auch die durch Reibung entstehende Wärme auf die Eigenschaften der Mehle aus. Enzyme sind Proteine mit katalytischer Aktivität, ihre Veränderungen infolge der Prallvermahlung kann auch auf Veränderungen der Endospermproteine hinweisen.

Bei der Bestimmung der α-Amylaseaktivität wurde ab einer Umfangsgeschwindigkeit von 120m/s eine lineare Abnahme festgestellt. Trotz dieser Abnahme konnte bei den Fallzahluntersuchungen keine Zunahme der Werte infolge der geringerem Enzymaktivität beobachtet werden (Abb. 30). Demzufolge war keine Korrelation zwischen Fallzahl und α-Amylaseaktivität gegeben. Eine Verringerung der α-Amylaseaktivität mit steigendem Energieeintrag wurde festgestellt.
Die geringere α-Amylaseaktivität im 200 m/s-Mehl reichte aber aus, um die Funktionalität der Stärke zu verändern, da ein höherer Anteil an beschädigter und damit leichter angreifbarer Stärke im Mehl vorlag.
Der Katalasetest ergab einen Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Katalaseaktivität (Abb. 30). So nahm die Katalasezahl der Mehle bei den höheren Prallenergien infolge des Temperaturanstieges deutlich ab. Die Gasbildung beim NZ200-Mehl verdrängte etwa 9 ml der Flüssigkeit. Das ist eine fast 50 %-ige Abnahme der Katalasezahl gegenüber dem Ausgangsmehl. Eine Hitzeschädigung der Glutenproteine, trotz des Temperaturanstieges beim NZ200-Mehl auf 51 °C, war anhand der Gluteneigenschaften nicht zu erkennen und kann vermutlich ausgeschlossen werden, da der Feuchtigkeitsgehalt des Mehles bei 200 m/s mit 8,3 % niedrig und die Verweilzeit des Mehles in der Prallmühle bei 200 m/s mit etwa 0,003 s/kg äußert kurz war. Es ist auch zu vermuten, dass ein Teil des bei der Zersetzung des Wasserstoffperoxids gebildeten Sauerstoffes Thiolgruppen im Mehl oxidierte.
Mehleigenschaften und Backergebnis bewiesen, dass keine thermische Schädigung eingetreten war (siehe Pkt. 4.1.6 und 4.1.7).

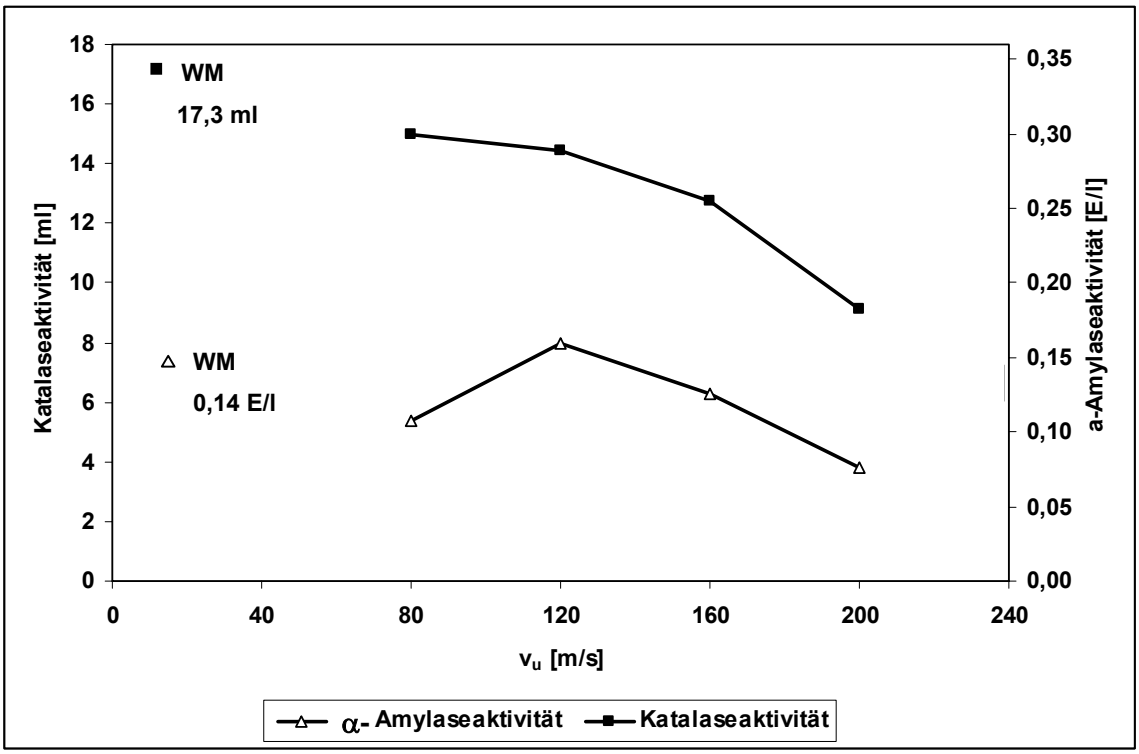


Abb. 30: α-Amylase- und Katalaseaktivität der Mehle

4.1.4 Zustand und Eigenschaften der Stärke geprallter Mehle

Ein Einfluss der Prallzerkleinerung ist auf den Zustand und die funktionellen Eigenschaften der Stärke festgestellt worden (Tab.16). Neben der mechanischen Stärkebeschädigung, den Verkleisterungseigenschaften und der Wasserbindung der Mehle hatten sich auch die Materialkennwerte der verkleisterten Stärke mit der eingetragenen Prallenergie verändert.

Tab. 16: Eigenschaften der Mehlstärke

Mehle	WBV [%]	STB [BV/g_{Mehl}]	VT [°C]	VM [AE]	FZ [s]
WM	80,0	4,9	87,0	1400	405,0
NZ80	81,9	5,3	87,0	1365	388,0
NZ120	83,3	5,9	87,3	1365	354,0
NZ160	87,9	6,7	87,3	1310	347,5
NZ200	99,2	8,5	87,6	1295	363,5

Mit steigender Energie war eine deutliche Zunahme des Wasserbindungsvermögens (WBV) der Mehle festzustellen (Abb. 31). Die vierfache Erhöhung der Prallenergie führte zu einer Erhöhung des Feingutanteils im NZ200-Mehl und somit zu erhöhtem Anteil an freiliegenden Mehlbestandteilen. Gleichzeitig nahm die mechanische Stärkebeschädigung (STB) des NZ200-Mehles um den Faktor 1,7 zu. Der höchste Energieeintrag von 1,75 kWh/m²$_{Mehl}$ führte zu einer Erhöhung des Wasserbindungsvermögens von 19,2 % gegenüber dem Ausgangsmehl.
Das Ausgangsmehl besaß den kleinsten Anteil an beschädigter Stärke und demzufolge das niedrigste Wasserbindungsvermögen.

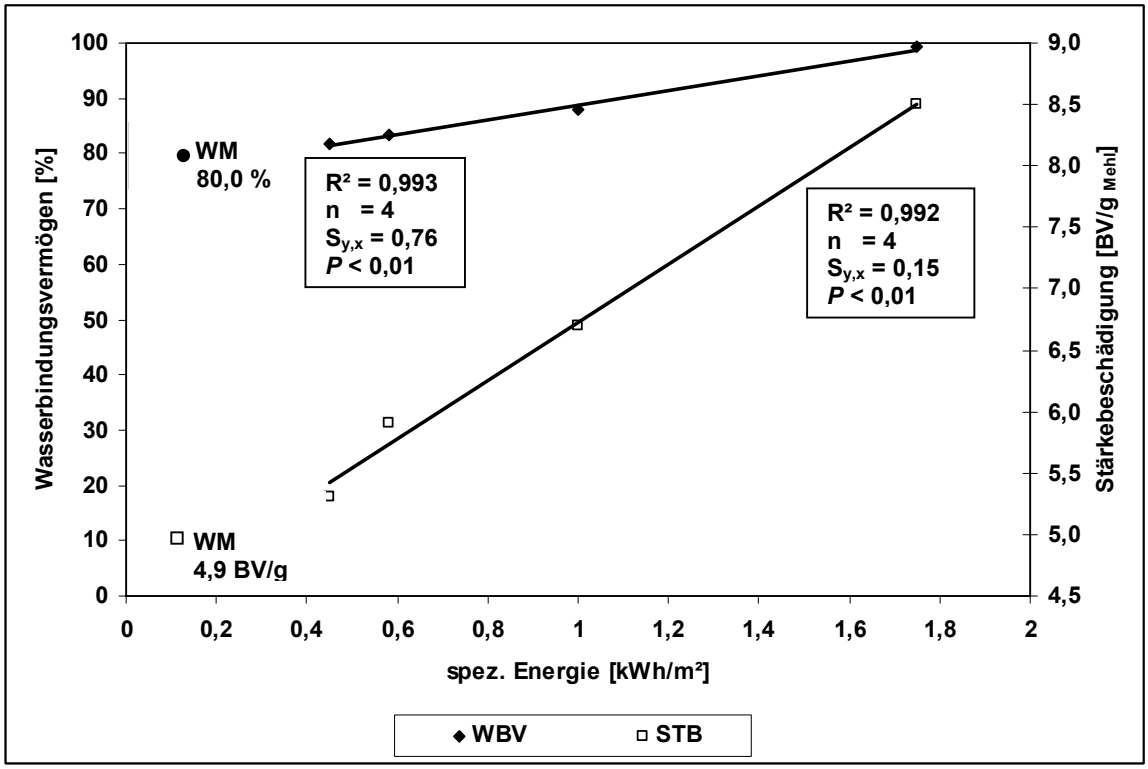


Abb. 31: Wasserbindungsvermögen und Stärkebeschädigung der Mehle in Abhängigkeit von der Zerkleinerungsenergie

Es ist eine bekannte und vielmals nachgewiesene Tatsache, dass sich die Fallzahl mit zunehmender Feinheit des Substrates sowie des Anteils an beschädigter Stärke verringert. Die Enzymsuszeptibilität der Stärke erhöht sich mit zunehmendem Beschädigungsgrad der Stärkekörner. Dadurch kommt es zu einen schnelleren und größeren Abbau der Stärke durch die Amylasen. Infolgedessen verringert sich die Viskosität der verkleisterten Stärke und somit erniedrigt sich die Fallzahl.

Die geprallten Mehle zeigten mit steigender Prallenergie eine Abnahme der Fallzahl (FZ) gegenüber dem Ausgangsmehl (Abb. 32). Diese Herabsetzung der Fallzahlen in Abhängigkeit von der steigender Energie stimmt mit Literaturangaben überein.

Der Vergleich der Fallzahlen der geprallten Mehle miteinander zeigt, dass ab der Prallgeschwindigkeit von 160 m/s sich die Abnahme der Fallzahl verringerte, und bei 200 m/s die Fallzahl wieder zunahm. Ursachen für diesen Verlauf der Fallzahlen können die verringerte α-Amylaseaktivität und der größere viskositätserhöhende Feinanteil sein.

Mit der Änderung des Stärkezustandes durch die Prallenergie geht ebenfalls eine Änderung der Verkleisterungseigenschaften der Stärke im Amylographen einher, mit steigender Prallenergie verringerten sich die Verkleisterungsmaxima (VM) der Mehlstärke. Eine geringfügige Zunahme der Verkleisterungstemperatur um 0,6 °C wurde im Amylographen festgestellt.

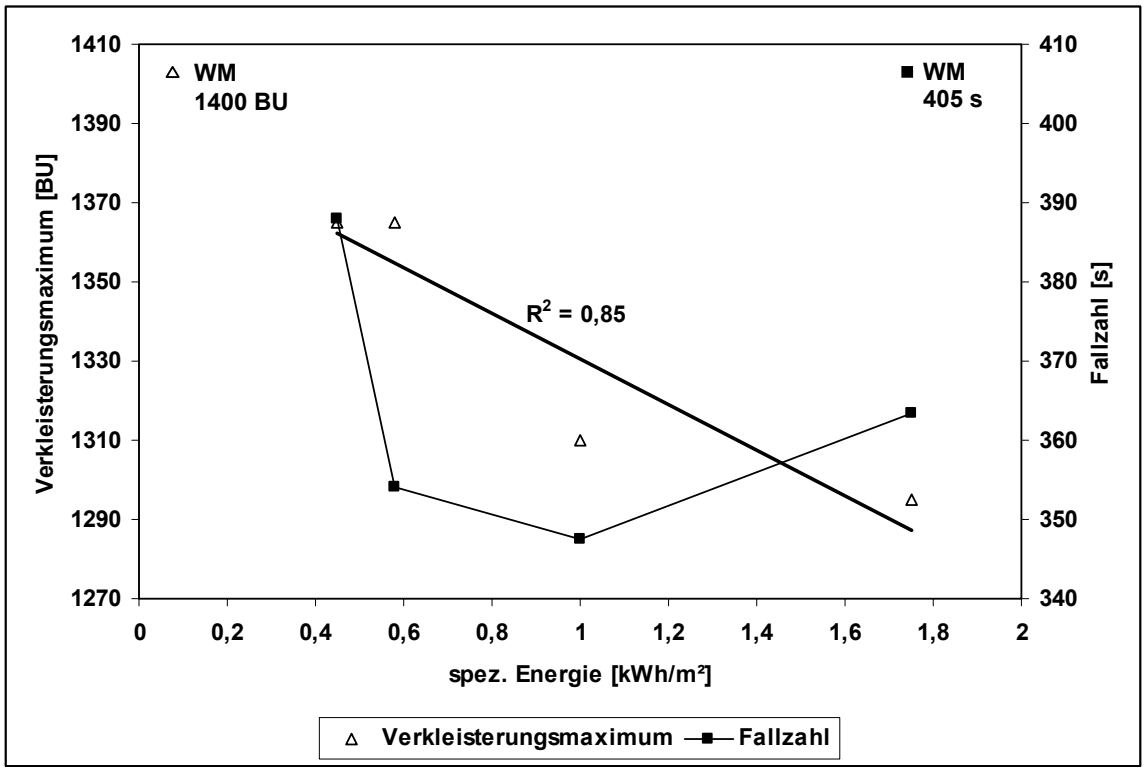


Abb. 32: Verkleisterunsmaxima und Fallzahlen der Mehle in Abhängigkeit von der Zerkleinerungsenergie

Das kann wiederum mit dem Beschädigungsgrad der Stärke sowie dem höheren Feinheitsgrad des Mehles erklärt werden. Diese Veränderungen weisen auf Modifikationen des Stärkezustandes durch die Prallenergie hin.

Zu den wichtigsten Eigenschaften der Stärke zählen die Verkleisterung, Viskositätsausbildung, Retrogradation und die Gelbildung. Die Wasserbindung und der Stärkezustand beeinflussen diese Eigenschaften sehr stark. Untersuchungen der Stärkeeigenschaften wurden ebenfalls im Rapid Visco Analyser (RVA) durchgeführt. Dadurch wurden neben den Heiß- und Kaltviskositäten der Stärke im Mehl auch die Retrogradation und Verkleisterungstemperatur erfasst. Die zunehmenden Stärkebeschädigungen und Wasserbindungen der Mehle infolge der Prallzerkleinerung veränderten die Viskositätseigenschaften der Stärke erheblich.

Tab. 17: Stärkeeigenschaften der Mehle im Rapid Visco Analyser

Probe	Verkl. Z [min]	VT [°C]	VM [RVU]	Visk.-verlust [RVU]	VMN [RVU]	EV [RVU]	Retrograd. [RVU]
WM	2,90	84,1	45,7	16,1	29,6	75,5	45,9
NZ 80	3,00	84,5	42,8	16,5	26,3	70,3	44,0
NZ200	2,93	86,1	35,8	15,4	20,4	59,3	38,9

Verkl. Z Verkleisterungszeit, VT Verkleisterungstemperatur, VM Verkleisterungsmaximum
Visk.-verlust Viskositätsverlust, VMN Verkleisterungsminimum, EV Endviskosität
Retrograd. Retrogradation

Die geprallten Mehle zeigten niedrigere Viskositäten als das mit Walzen ermahlene Mehl. Dies kann mit einem Molekülabbau der Stärke während der Prallzerkleinerung bei hohen Energien zusammenhängen. Die Heiß- und Kaltviskositäten verringerten sich um etwa 28 % beim mit 200 m/s geprallten Mehl gegenüber dem Ausgangsmehl (Tab.17 und Abb. 33). Dies ist auf einen verbesserten Wasserzugang und eine vollständigere Hydratisierung zurückzuführen.

Der Anstieg der Wasserbindung infolge der Stärkebeschädigung im geprallten Mehl erhöht die Quellung der Stärke. Die maximale Viskosität erreichte durch einen früheren Austritt der Amylose aus dem Stärkekorn einen geringeren Wert. Die Stärke der geprallten Mehle beginnt erst bei höherer Temperatur zu verkleistern, was auf den Stärkebeschädigungsgrad zurückgeführt werden kann, der den Wärmetransport erschwert. Die Verkleisterungstemperatur nahm mit der Prallenergie zu und stieg bei 200 m/s um 2 °C. Interessant ist der geringe Viskositätsverlust des mit 200 m/s ge-

prallten Mehles. Das deutet auf eine stabilere Heißviskosität hin. Eine geringe Heißviskosität kann zu einem größeren Brotvolumen und zu besseren Krumeneigenschaften führen, während eine geringe Kaltviskosität des Mehles bei einer hohen Wasserschüttmenge eine Klebrigkeit des Teiges bewirkt. Die Teige der geprallten Mehle wiesen trotz der erhöhten Wassermengen keine Klebrigkeit auf, was auf eine gute Bindung des Wassers im Teig hindeutet.
Die verbesserten Gebäckvolumina der geprallten Mehle können auf die niedrigeren Heißviskositäten zurückgeführt werden. Die geringen Kaltviskositäten der geprallten Mehle beeinflussten die Klebrigkeit nicht.

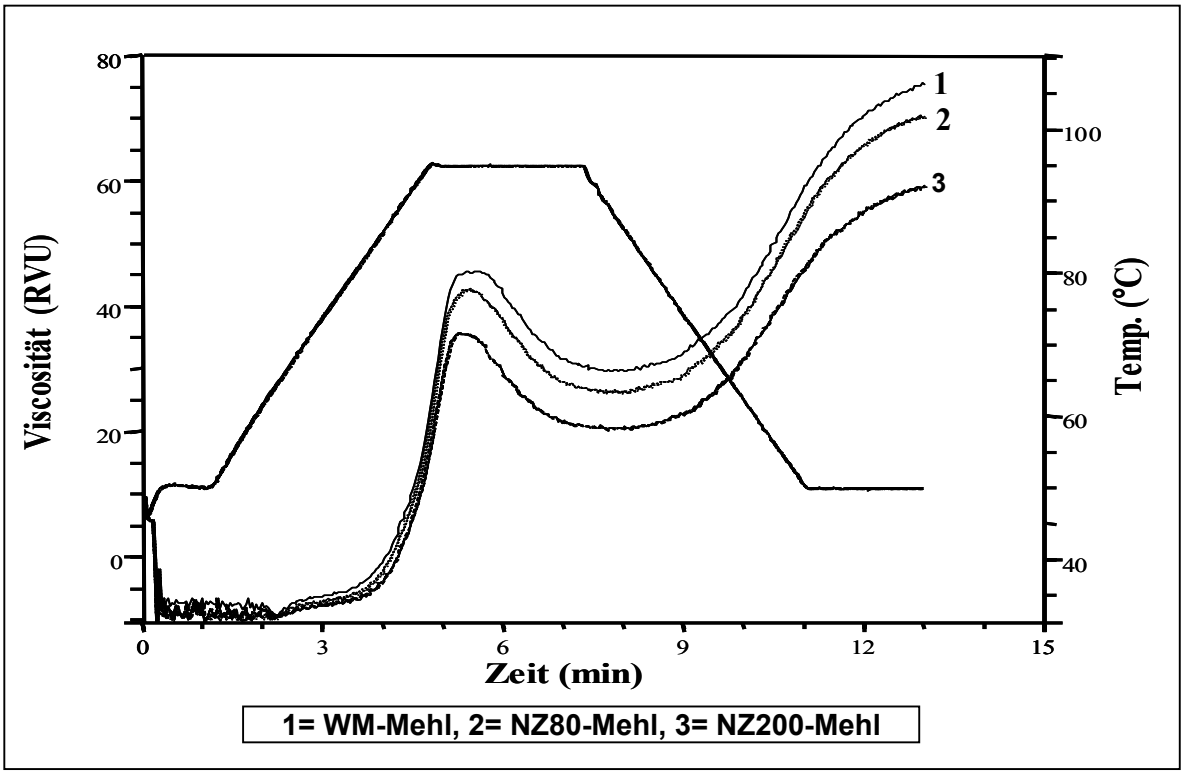


Abb. 33: Verkleisterungsverhalten der Stärke der Mehle im RVA

Des weiteren ist eine geringere Retrogradation mit zunehmender Prallenergie festgestellt worden. So verringerte sich die Retrogradation der Mehlstärke beim mit 200 m/s geprallten Mehl um etwa 15 % gegenüber dem Ausgangsmehl. Eine verringerte Retrogradation der Stärke verzögert das Altbackenwerden des Gebäckes und verlängert damit die Frischhaltung. Darüber hinaus begünstigt eine steigende Wasseraufnahme des Mehles die Frischhaltung des Gebäckes. Durch eine Bestimmung der Krumenfestigkeit bei einer Lagerung des Gebäckes könnte der

der Krumenfestigkeit bei einer Lagerung des Gebäckes könnte der Einfluss der steigenden Wasseraufnahme näher untersucht werden.
Obwohl die rheologischen Veränderungen der Mehlsuspension im RVA in erster Linie auf die Stärkebeschaffenheit der Mehle zurückzuführen sind, können die im Mehl vorhandenen Proteine und anderen Mehlkomponenten die rheologischen Eigenschaften der Mehlsuspension ebenfalls beeinflussen [13,70]

Ergebnisse der Messung der Festigkeit von den gebildeten “Gelen“ ergaben signifikante Unterschiede zur Fähigkeit der Gelbildung (Tab. 18 und Abb. 34).

Tab. 18: Gelfestigkeit

Probe	F1 [g]	F2 [g]
WM	27,6	- 8,5
NZ80	27,1	- 8,1
NZ200	23,0	- 7,2

Mit Erhöhung der Prallintensität wurde eine Verringerung der Gelfestigkeit festgestellt. Eine Abnahme der Bruchkraft (F1) von 5 % ist bei der höchsten Prallgeschwindigkeit (200 m/s) gegenüber dem mit Walzen ermahlenen Mehl ermittelt worden. Diese geringere Gelfestigkeit ist auf eine niedrigere Retrogradation der Stärke im Mehl zurückzuführen.
Die höhere Gelfestigkeit des mit Walzen ermahlenen Mehles deutet darauf hin, dass die Stärke des Mehles das aufgenommene Wasser im Gelzustand fester zu binden vermag und somit ein Austritt des Wassers verhindert wird.
Bei den geprallten Mehlen wird das Wasser im Gel weniger fest gebunden, aber bei einer Teigbereitung mit geprallten Mehlen wird durch die höhere Wasseraufnahmefähigkeit der Glutenproteine dieser Nachteil kompensiert. Durch die Prallvermahlung zeigten die Glutene sowie die Teige verbesserte rheologische Eigenschaften (Punkt 4.1.5 und 4.1.6).
Bei dem mit der höchsten Geschwindigkeit geprallten Mehl wurde die geringste Klebrigkeit (F2) des Gels ermittelt. Das deutet darauf hin, dass die geprallten Mehle nicht zur Bildung von klebrigen Gelen sowie Teigen neigen.

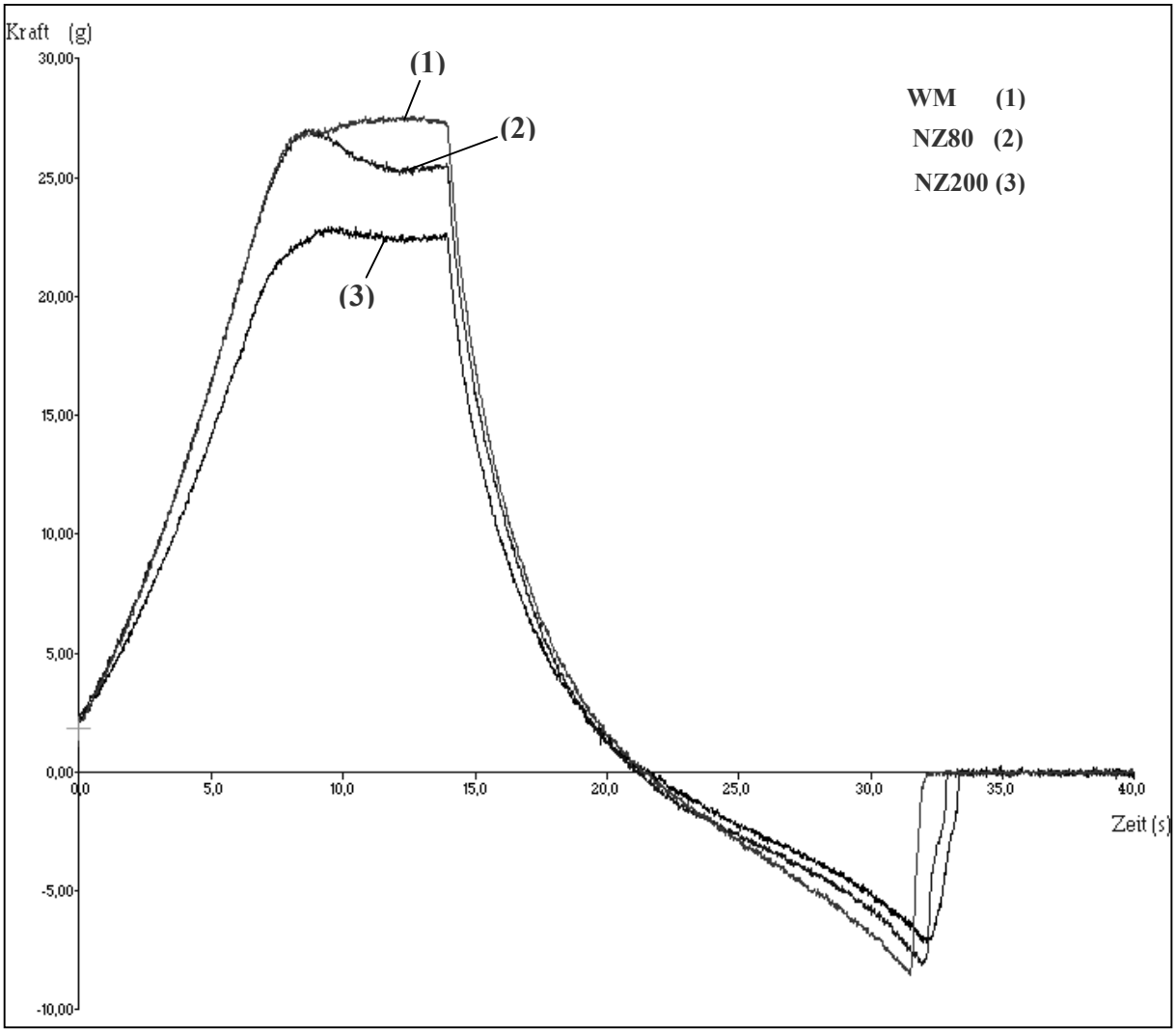


Abb. 34: Festigkeit der Gele aus den Mehlen

4.1.5 Eigenschaften des Glutens der geprallten Mehle

4.1.5.1 Qualität der Glutenproteine

Der Sedimentationswert (SW) des Ausgangsmehles und der geprallten Mehle bei 80 m/ sowie bei 120 m/s charakterisierte mit über 45 ml die sehr gute Qualität der Glutenproteine. Die Sedimentationszeit zur Absetzung der Mehlteilchen war bei den Mehlen NZ160 und NZ200 aufgrund des höheren Feingutanteils unzureichend. Daher wurde das Ergebnis der Feinstmehle nicht ausgewertet. Die Methode ist zur Bestimmung der Quellbarkeit der Proteine bei Feinstmehlen nicht geeignet. Die leichte Abnahme des Werts bei den ersten zwei geprallten Mehlen ist ebenfalls auf die Feinheit der Mehle zurückzuführen.

Tab. 19: Qualität der Glutenproteine

Mehle	SW [ml]	GI [%]
WM	49	86
NZ80	47	87
NZ120	46	86
NZ160	-	85
NZ200	-	76

- nicht bestimmbar

Der Glutenindex (GI) zeigte keine signifikanten Veränderungen, da die Abweichungen im Fehlerbereich der Methode liegen. Der Messfehler beträgt bei dieser Methode 11 % (Tab. 19).

Aufschlüsse über die Qualität der Glutenproteine können die Untersuchungen der rheologischen Teig- sowie Gluteneigenschaften geben.

4.1.5.2 Dehnungseigenschaften (Extensogramme des Glutens)

Die Zugversuche am Gluten zeigten mit zunehmender Prallenergie bis 120 m/s eine Zunahme der Dehnbarkeit sowie des Dehnwiderstandes. Ab der Geschwindigkeit 160 m/s ist eine Abnahme der Dehnbarkeit und eine Zunahme des Dehnwiderstandes festgestellt worden. Eine Erhöhung des Dehnwiderstandes um etwa 0,2 N und ein Rückgang der Dehnbarkeit um etwa 1 cm ist beim mit 200 m/s geprallten Mehl gegenüber dem Ausgangsmehl ermittelt worden (Abb. 35).

Die Änderung des Fließverhaltens infolge der Prallintensität wird durch den höheren Aufschlussgrades der Mehle verursacht. Mit zunehmender Mehloberfläche aufgrund des höheren Anteils an kleinen Teilchen ergeben sich mehr potentielle Bindungsstellen in der Proteinmatrix, der Strukturierungsgrad des Glutennetzwerkes bei der Teigbildung wird erhöht.

Eine Oxidation der SH-Gruppen während der Prallvermahlung konnte anhand der ermittelten SH-Gehalte in den Mehlen nicht nachgewiesen werden. Im Gegenteil, mit zunehmender Prallung ist eine Zunahme des SH-Gehaltes festgestellt worden. Daraus lässt sich schließen, dass das geprallte Mehl über mehr SH-Gruppen verfügt, die beim Anteigen oxidiert werden können.

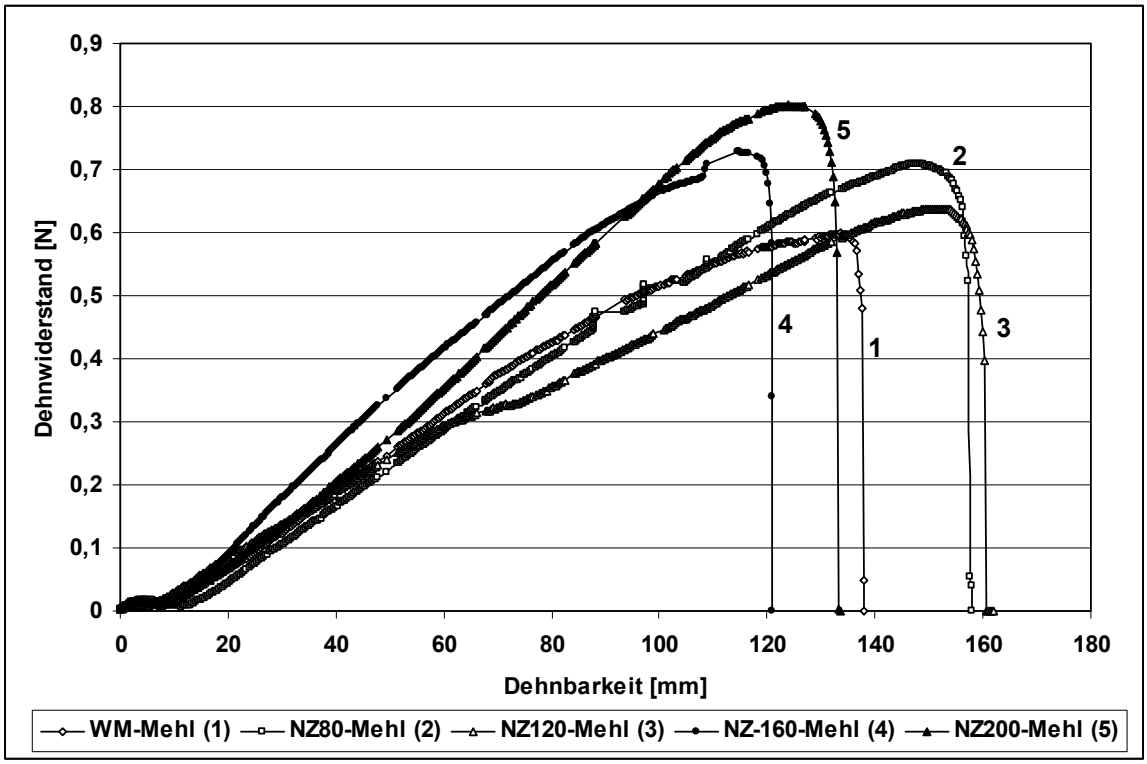


Abb. 35: Glutenextensogramme

Die festgestellten Verfestigungen der Glutene der geprallten Mehle können mit der stärkeren Aggregation durch die größere Vernetzung sowie die Bildung von intra- sowie intermolekulare SS-Bindungen beim Kneten erklärt werden. Eine Abnahme der Löslichkeit der nichtglutenbildenden Proteine Albumine und Globuline kann die Molekulargewichtsverschiebungen der Glutenproteine verursachen. Die Wasserstoffbrückenbindungen können ebenfalls eine Erhöhung der Molekulargewichte der Proteinfraktionen begünstigen.

4.1.5.3 Viskoelastisches Verhalten von Gluten und Teigen

Die Messungen wurden mit den Glutenen sowie mit den Teigen der Mehle durchgeführt. Zuerst erfolgten die dynamischen Deformationsmessungen bei einer konstanten Frequenz von 1 Hz. Die Ergebnisse der Oszillationsmessungen beim Amplitudentest (Deformationstest) ergaben, dass die Module (G' und G'') im Dehnungsbereich 10-100 % einen linear viskoelastischen Bereich aufweisen, in der die Module mit dem Anstieg der dynamischen Dehnung fast unverändert blieben. D.h. in dem linearen viskoelastischen Bereich sind die Module unabhängig von der Deformation.

Die Frequenzmessungen wurden daher bei einer konstanten Belastung von 100 Pa durchgeführt.

Die linearen und nichtlinearen viskoelastischen Bereiche der Glutene sowie Teige während des Deformationstests bei 1 Hz sind in Abbildungen 36 und 38 dargestellt. Der Elastizitätsmodul G' der Glutene fiel nach dem viskoelastischen Bereich erst ab einer Deformation von 5000 Pa ab, bei den Teigen ab 1000 Pa. Die Speichermodule der geprallten Mehle sind deutlich höher als das des mit Walzen ermahlenen mehles. Infolge der steigenden Prallzerkleinerung ist eine Erhöhung des elastischen Anteils des Glutens zu erkennen. Die Glutene sowie die Teige der geprallten Mehle zeigten niedrigere tan δ-Werte als das mit Walzen vermahlene Mehl. Somit lieferten die Glutene sowie die Teige der geprallten Mehle besseres elastisches Verhalten, was zu einer elastischeren Brotkrume führen kann. Obwohl die Erhöhung der Wasseraufnahme eine Verringerung des elastischen Anteils bewirkt, zeigten die Glutene sowie die Teige deutlich höhere elastische Eigenschaften [87, 88, 89]. Aus den Ergebnissen der Oszillationsmessungen lässt sich ableiten, dass eine Verbesserung der elastischen Gluteneigenschaften durch die Prallbeanspruchung stattgefunden hat.

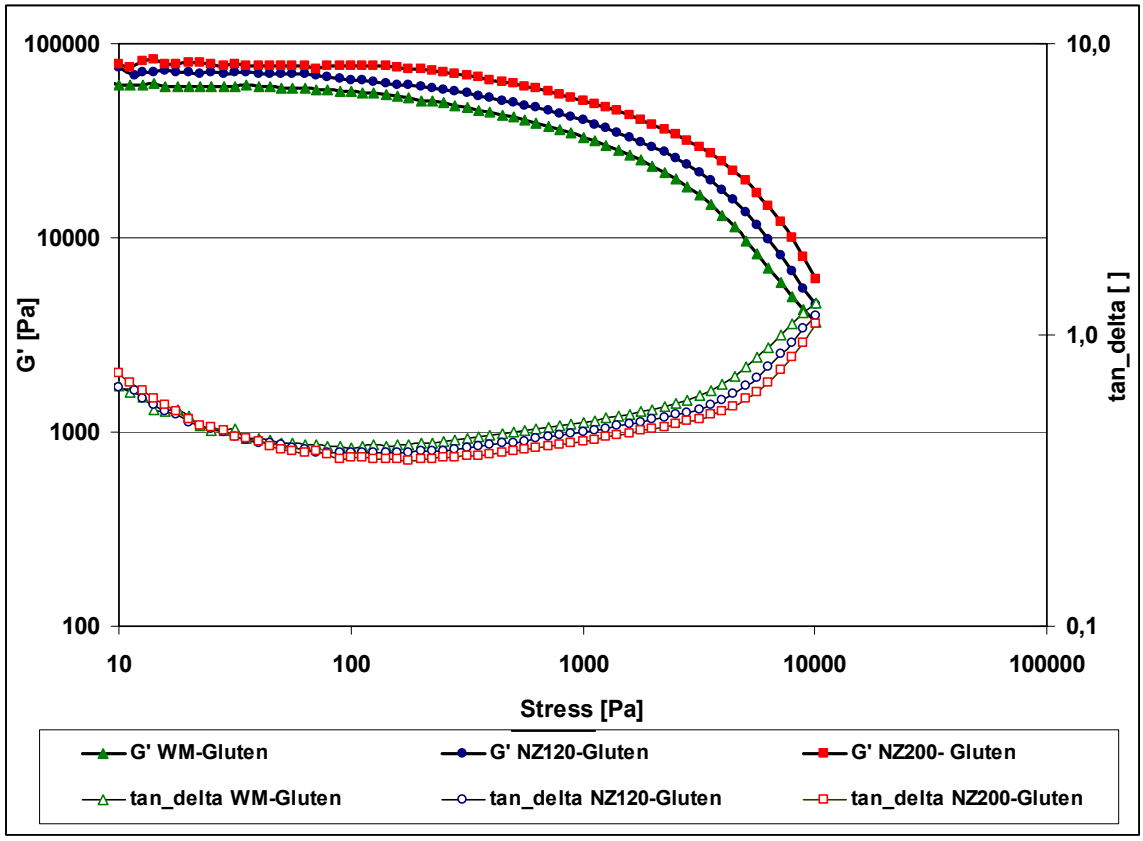


Abb. 36: Amplitudensweep mit WM- sowie NZ200- Glutenen

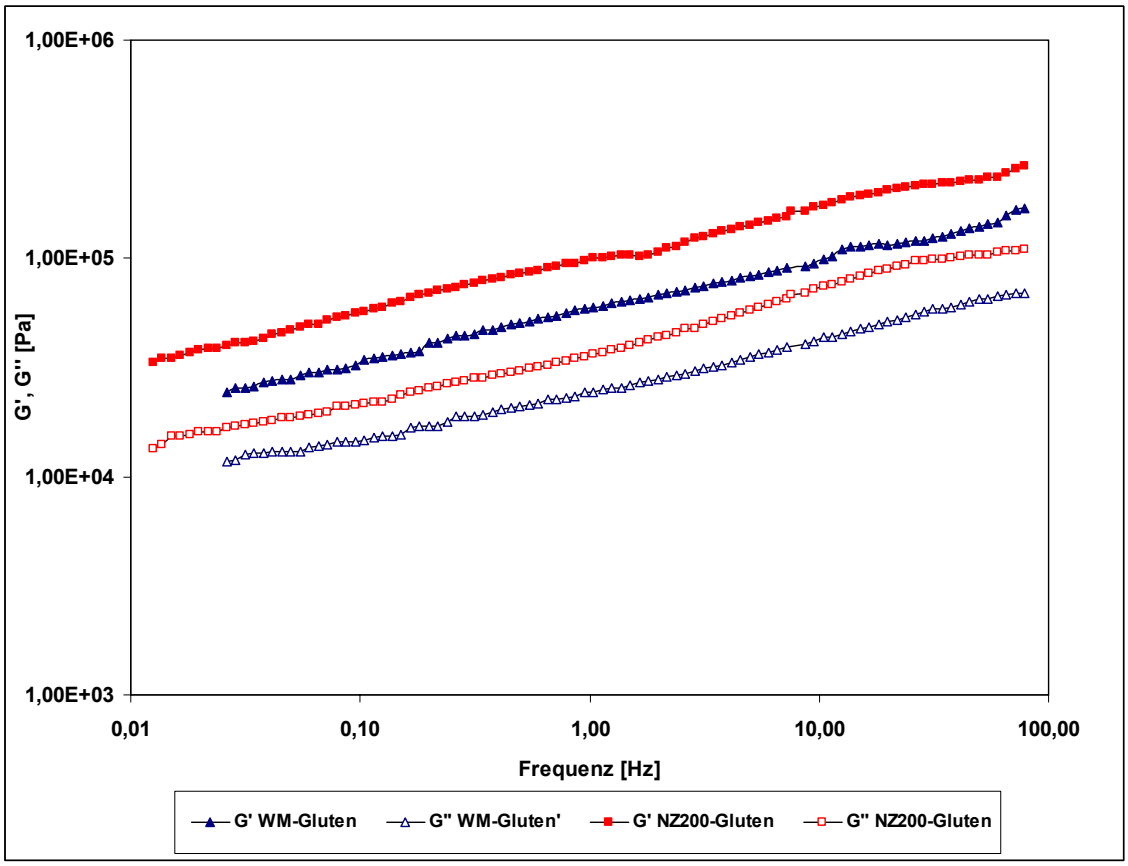


Abb. 37: Frequenzsweep mit WM- sowie NZ200-Glutenen

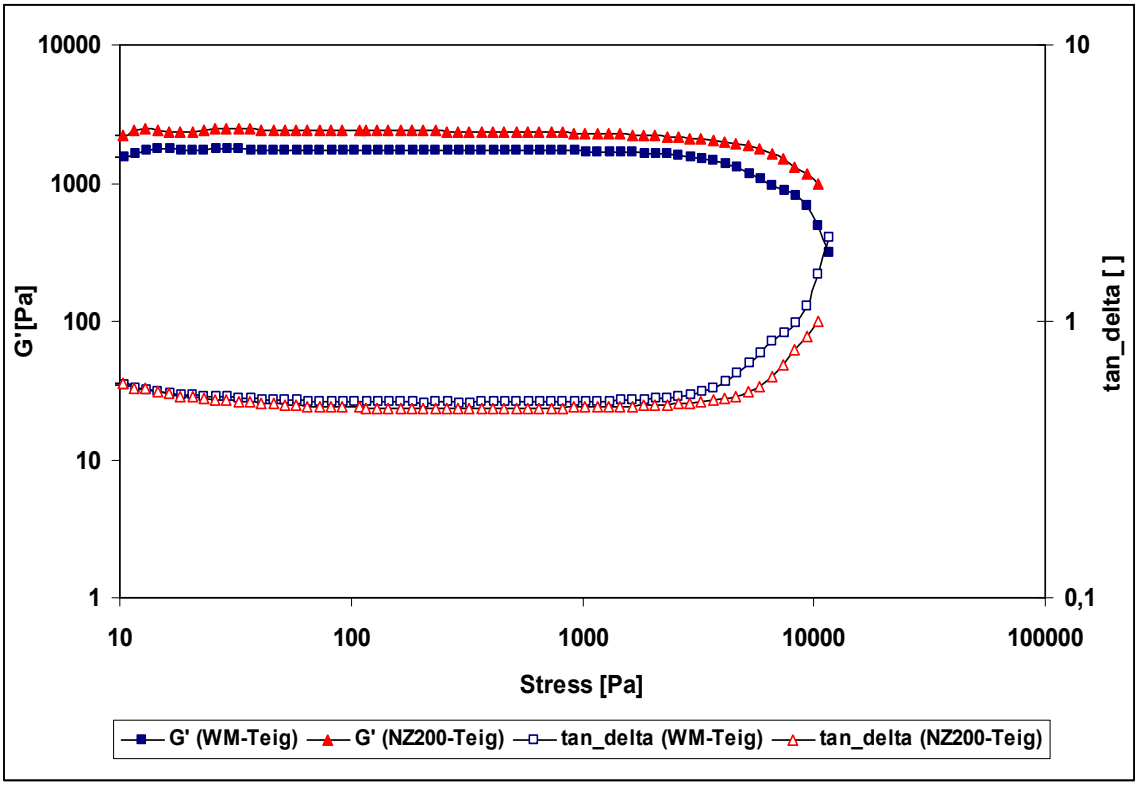


Abb. 38: Amplitudensweep mit WM- sowie NZ200- Teigen

4.1.5.4 Relaxationseigenschaften des Glutens

Obwohl der Glutograph aufgrund der Vereinfachung zur Aufnahme von Kriech-Erholungskurven nur relative Messdaten (Scherzeit, Entspannung) liefert, zeigte die Messung am Gluten der Mehle signifikante Veränderungen der Gluteneigenschaften. Elastische und gut dehnbare Kleber haben kurze Scherzeiten unter 20 Sekunden. Elastische und genügend dehnbare Kleber zeigen Scherzeiten bis 40 Sekunden. Bei nur wenig dehnbaren Klebern werden Scherzeiten bis zu maximal 120 Sekunden erreicht [90]. In der Abbildung 39 ist ersichtlich, dass die Scherzeit des Klebers der geprallten Mehle deutlich größer als die des Ausgangsmehles war. Die Werte der Entspannung stiegen bis NZ160 nicht wesentlich an, erst bei NZ200 war eine deutliche Erhöhung zu erkennen. Anhand dieser Messergebnisse kann festgestellt werden, dass durch die mechanische Beanspruchung der Mehle eine Zunahme der Elastizität des Glutens stattgefunden hat.

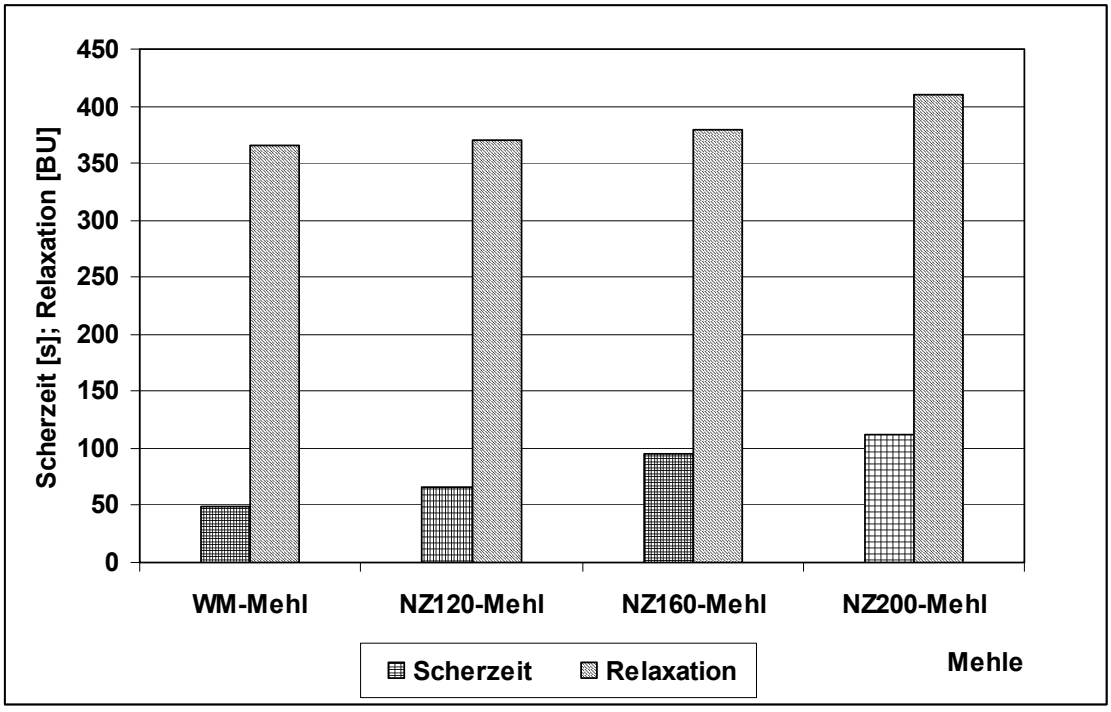


Abb. 39: Relaxationsverhalten des Glutens

4.1.5.5 Gluten-Aggregationsverhalten

Anhand der Untersuchungsergebnisse waren viele Veränderungen des Glutens festzustellen. In der Tabelle 20 sind die erfassten Messdaten aus den Kurvenverläufen (Abb. 40) des Aggregationstests zusammengestellt worden. Die geprallten Mehle lieferten mit steigendem Energieeintrag sehr kurze Aggregationszeiten und sehr große Aggregationsflächen.

Tab. 20: Messdaten des Glutenaggregationstests

Probe	F [%]	AZ [s]	AF [cm²]	mittl. Höhe SA* [A]	Kurve-Max SA [A]	Temp. nach dem Test [°C]	Bemerkung (Teigbildung)
WM	13,9	60	101,2	2,34	4,29	49,7	fest, plastisch
NZ80	13,0	52	106,8	2,28	4,29	50,9	fest, plastisch
NZ120	12,8	43	105,0	2,40	4,38	51,5	fest, plastisch
NZ160	11,5	23	142,2	2,72	4,64	58,1	sehr fest, plastisch
NZ200	9,4	13	171,1	2,86	4,64	57,3	sehr fest, plastisch

*) Mittlere Höhe der Stromaufnahme (SA) für die ersten 20s Testdauer

Die geprallten Mehle zeigten aufgrund des höheren Strukturierungsgrads mit zunehmender Energieintensität größeren Widerstand gegen das Rührorgan. Auch die schnellere Verkleisterung der in den geprallten Mehlen enthaltenen Stärke verursachte einen höheren Widerstand. Dadurch erhöhte sich das Drehmoment des Rührers, was eine Steigerung der Stromaufnahme bewirkte. Beim Erreichen einer Stromaufnahme von 3 A wird die Aggregationszeit ermittelt. Eine schnellere Bildung des Glutennetzes in der Mehlsuspension “Teig“ der geprallten Mehle ist hier deutlich zu erkennen. Mit der schnellerer Bildung verkürzten sich die Aggregationszeiten. Das mit 200 m/s geprallte Mehl benötigte die kürzeste Zeit. Mit steigendem Widerstand sind höhere Scherkräfte erforderlich, die zu größerer Aggregation führt. Als Folge davon nahm die Temperatur in den Proben zu.

Nach dem Erreichen der maximalen Stromaufnahme (Kurvenmaximum) wird die Aggregationsfläche berechnet. Das NZ200-Mehl zeigte die höchste Aggregationsfläche von 171,1 cm² gegenüber dem mit Walzen ermahlenen Mehl mit 101,1 cm². Diese

Zunahme kann auf eine Verfestigung des Glutens durch die Prallmahlung zurückgeführt werden.

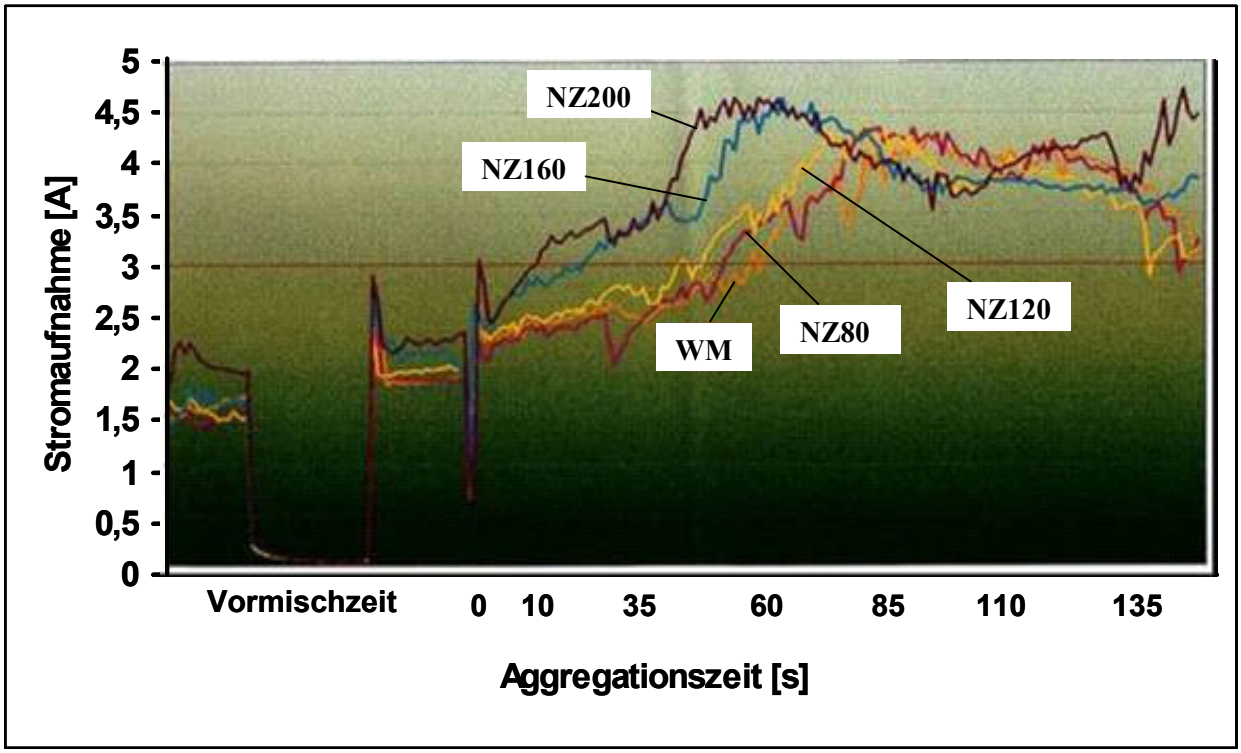


Abb. 40: Aggregationsverhalten der Glutene der Mehle beim Gluten-Aggregationstest

4.1.5.6 Diskussion zur Glutenqualität der geprallten Mehle

Der Glutenindex und der Sedimentationstest wiesen nicht auf eine qualitative Änderung des Glutens hin. Bei der Bestimmung des Proteingehaltes des ausgewaschenen Glutens wurde eine geringe Zunahme mit steigender Prallenergie festgestellt, die mit Veränderungen des Löslichkeitsverhaltens der Proteine erklärbar ist.

Die Extensogramme und Glutogramme (Tab. 21) wiesen auf wesentliche Veränderungen der Dehneigenschaften des Glutens in Abhängigkeit von der Prallzerkleinerung hin. So nahmen die Elastizität (Steigung) und die Bruchfestigkeit zu, die Dehnbarkeit des Glutens nahm bis zur Prallgeschwindigkeit 120 m/s zu und ab 160 m/s ab. Die zunehmende Elastizität sowie Festigkeit der Glutene kann auf Oxidationen an den freigesetzten Thiolgruppen in den Mehlen zurückgeführt werden.

Tab. 21: Extensogramm- und Glutogrammwerte

Mehl	Extensogramm			Glutogramm	
	Elastizität [N/mm²]	Festigkeit [N]	Dehnbarkeit [mm]	Scherzeit [s]	Elastischer Anteil [BU]
WM	52,3 .10^{-4}	0,60	138	49,3	365
NZ80	52,9 .10^{-4}	0,71	157	-	-
NZ120	42,7 .10^{-4}	0,74	160	65,5	370
NZ160	71,4 .10^{-4}	0,73	121	95,0	380
NZ200	76,2 .10^{-4}	0,80	133	112,0	410

Ergebnisse der Oszillationsmessungen am Gluten zeigten ähnliche Tendenzen (Tab. 22). Mit steigender Prallenergie wurden die Glutene elastischer.

Tab. 22: Viskoelastische Eigenschaften des Glutens im dynamischen Rheometer

Mehl	Amplitudensweep (Werte bei 100Pa)			Frequenzsweep (Werte bei 1Hz)		
	Speichermodul [kPa]	Verlustmodul [kPa]	tanδ	Speichermodul [kPa]	Verlustmodul [kPa]	tanδ
WM	56,8	23,4	0,412	59,8	24,4	0,408
NZ80	-	-	-	-	-	-
NZ120	65,2	25,8	0,396	-	-	-
NZ160	-	-	-	-	-	-
NZ200	76,5	29,1	0,380	99,9	36,3	0,363

4.1.6 Rheologische Eigenschaften der Teige

4.1.6.1 Kneteigenschaften der Mehle

Die Teigeigenschaften sind ein Kriterium für die Qualität eines Weizenmehles. Da die höhere Zerkleinerungsenergie nicht nur auf die Mehlstruktur Einfluss hat, sondern auch auf die funktionellen Eigenschaften der Mehlkomponenten, wurden die Mehle im Farinographen angeknetet und dabei die Kneteigenschaften registriert. Auf den Zusatz von Ascorbinsäure wurde verzichtet, um die durch das Prallen verursachten Veränderungen unbeeinflusst zu erfassen.

Tab. 23: Farinogrammdaten der Mehle

Mehle	F [%]	WA [%]	TEZ [min]	TST [min]	TER [FE]
WM	14,1	61,7	3,3	10,6	22
NZ80	12,8	63,5	2,5	10,6	28
NZ120	12,7	64,2	3,2	11,6	19
NZ160	10,4	67,1	3,7	11,0	18
NZ200	8,3	72,2	3,0	12,6	25

Die Ergebnisse der farinographischen Untersuchungen der geprallten Mehle (Tab. 23) zeigten mit intensiverer Zerkleinerung einen stetigen Anstieg der Wasseraufnahme (WA) bei der Teigbereitung. Das bei 200 m/s prallzerkleinerte Mehl hatte mit 72,2 % eine um 10,5 % höhere Wasseraufnahme als das Ausgangsmehl. Die steigende Wasseraufnahme deutet auf höhere Teigausbeuten der geprallten Mehle hin. Die hohen Wasseraufnahmen der geprallten Mehle sind auf eine Erhöhung der Stärkebeschädigung zurückzuführen. Diese Ergebnisse stimmen mit Aussagen in der Literatur überein [61, 71]. Infolge der höheren Wasseraufnahmen der geprallten Mehle kam es zu schnelleren Verkleisterungen der Stärke in den Mehlen. Das kann bessere Krumeneigenschaften und eine verzögerte Alterung des Brotes bewirken. Voraussetzung ist jedoch ein gutes Wasserhaltevermögen des Mehles. Dieses ist von der Qualität des Glutens und der Stärke abhängig. Aus den Farinogrammen (Abb. 41 und 42) ist auch eine Erhöhung der Teigstabilität (TST) von 10,6 min beim WM-Mehl auf 12,6 min beim NZ200-Mehl mit steigender Prallenergie zu erkennen. Dieses Verhalten weist auf eine Verbesserung der Gluteneigenschaften durch die Prallzerkleinerung hin, wie sie auch bei den Elastizitätsuntersuchungen des Glutens beobachtet worden sind. Die Teigentwicklungszeiten (TEZ) und die Teigerweichungen (TER) änderten sich unwesentlich und charakterisieren ebenfalls starke Gluteneigenschaften. Hieraus lässt sich auch ableiten, dass die Gliadine bei der Prallmahlung nicht beeinflusst worden sind. Mit Erhöhung des Anteils an Gliadinen würde die Teigentwicklungszeit abnehmen [22].

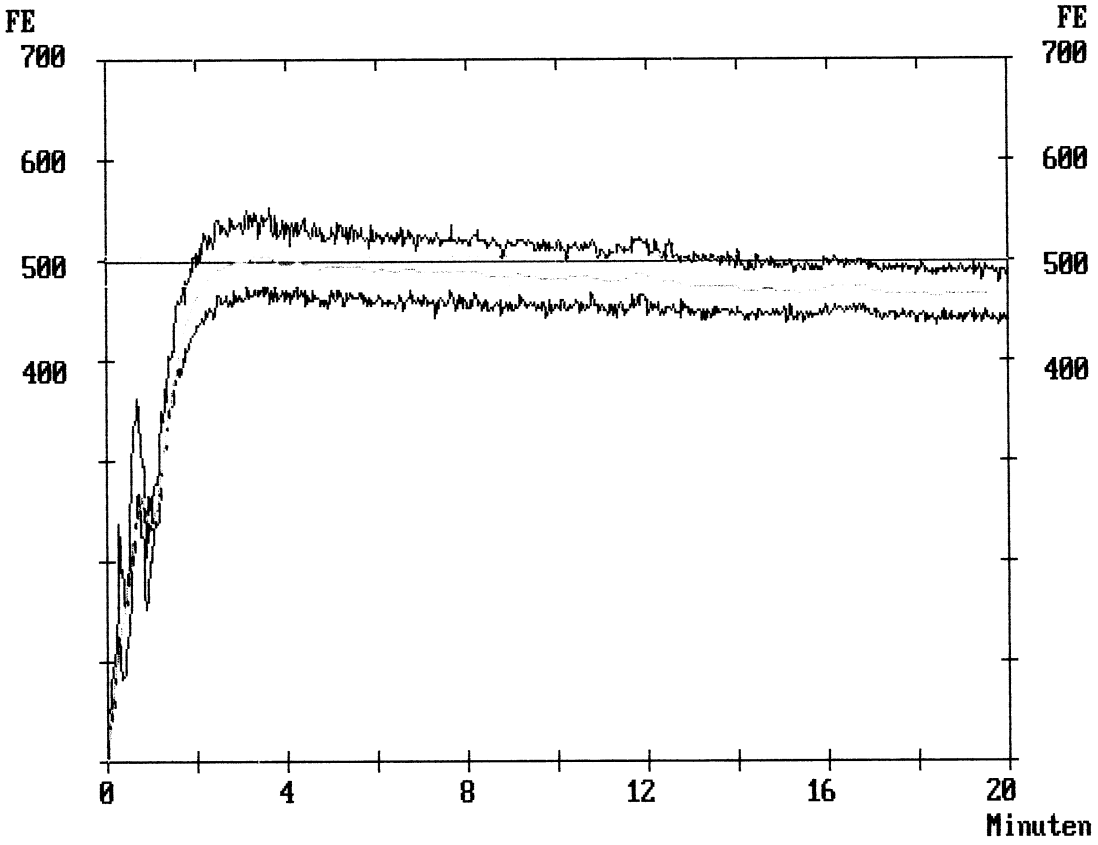


Abb. 41: Farinogramm des Ausgangsmehles (WM)

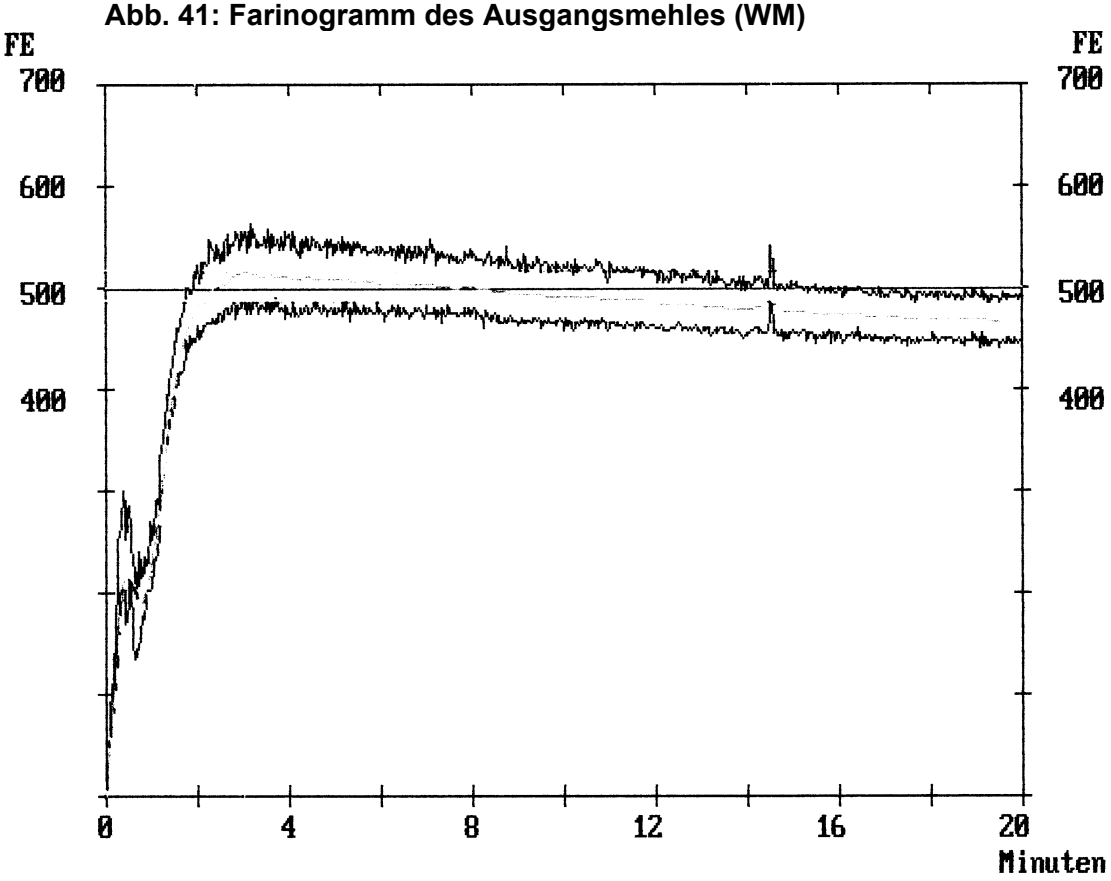


Abb. 42: Farinogramm des NZ200-Mehles

Es wurden weitere Farinogramme aufgenommen, bei denen die Versuchsmehle (WM und NZ200) sowie die feine Mehlfraktion des NZ200 zu einem Handelsmehl Type 550 (hier bezeichnet als Grundmehl) anteilig beigemischt worden sind. Das Ziel dieser Untersuchungen war zu ermitteln, in wieweit sich die veränderten Eigenschaften der prallzerkleinerten Mehle auf die Qualität des Handelsmehles auswirken. Zu dem Handelsmehl wurden Anteile von 15 % beigemischt.
In Abbildungen 43, 44 und 45 sind die aufgezeichneten Knetkurven der Mehle im Farinographen dargestellt. In Tabelle 22 sind alle Messdaten erfasst worden.

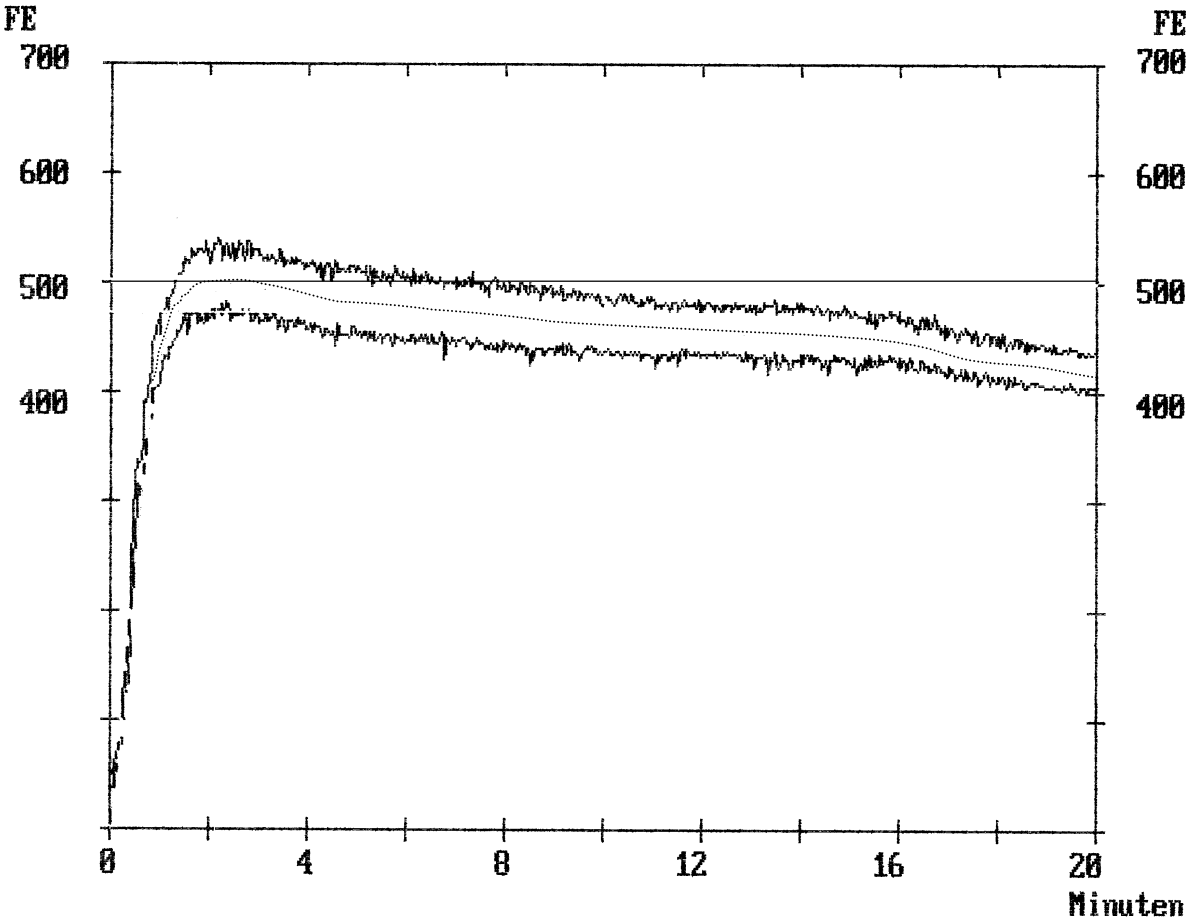


Abb. 43: Farinogramm des Handelsmehles (Grundmehl)

Die zugemischte Mehlmenge bewirkte keine Steigerung, sondern eine Abnahme der Wasseraufnahme. Dagegen sind Verbesserungen der Teigentwicklungszeit, Teigerweichung und Qualitätszahl festgestellt worden. Diese Verbesserungen waren schon beim Zusatz des Ausgangsmehles (WM) zu erkennen. Das ist auf die gute Qualität der verwendeten Weizensorte zurückzuführen (Tab. 24).

Tab. 24: Farinogrammdaten des Handelsmehles mit Mehlanteilen

Mehle	F [%]	WA [%]	TEZ [min]	TST [min]	TER [FE]	QZ
Handelsmehl (Grundmehl)	12,3	59,5	2,1	5,3	42	67
HM + (15% WM)	11,9	57,5	2,7	6,2	42	60
HM + (14,5% NZ200)	7,9	58,4	2,7	8,6	29	86
HM + (14,5% NZ200 <20µm)	8,0	58,6	3,0	10,1	27	101

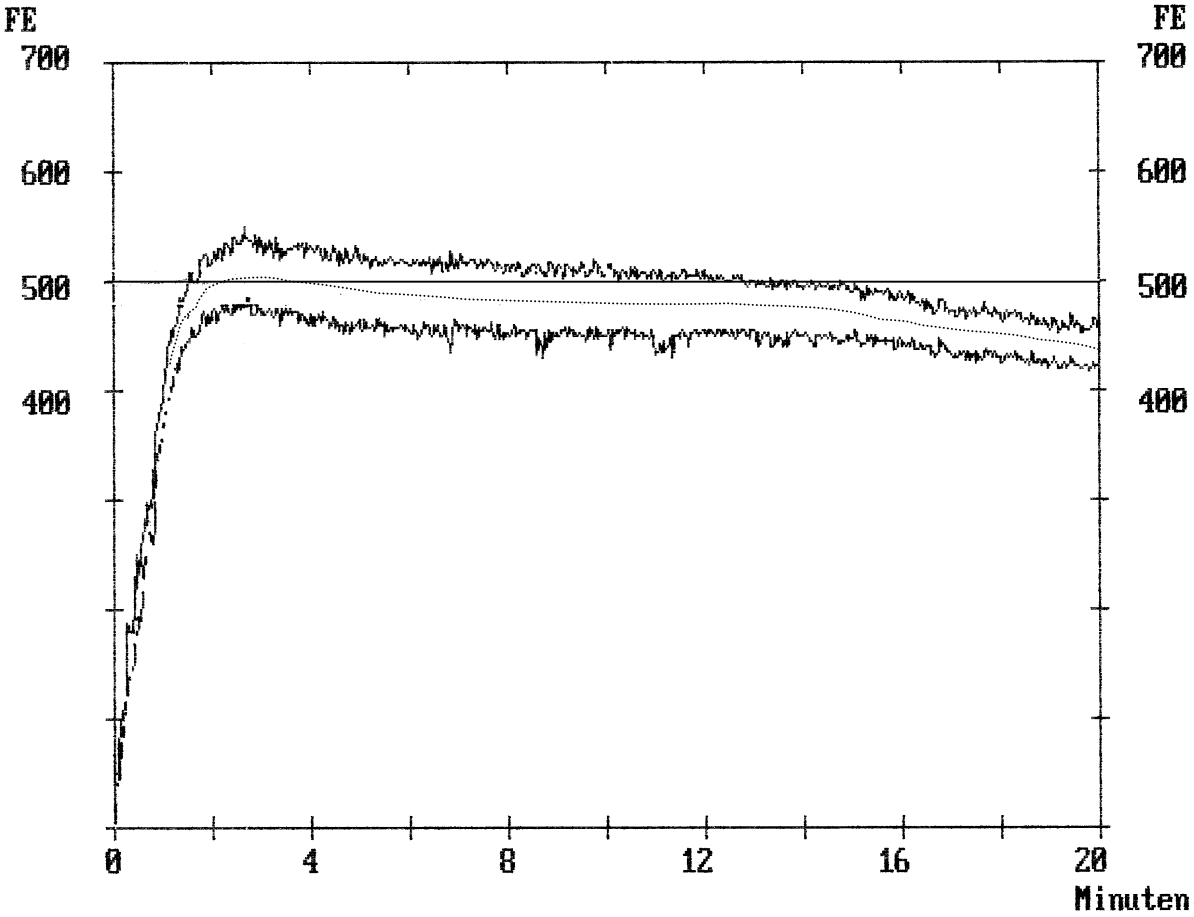


Abb. 44: Farinogramm des Handelsmehles mit NZ200-Mehl

Bei dem Zusatz der feineren Fraktion des 200 m/s-Mehles wurden die Teigeigenschaften des Handelsmehles am stärksten verbessert. Teigentwicklungszeit, Teigstabilität und Qualitätszahl wurden fast verdoppelt. Eine geringfügige Abnahme der Teigerweichung von 15 FE wurde festgestellt (Abb. 45).

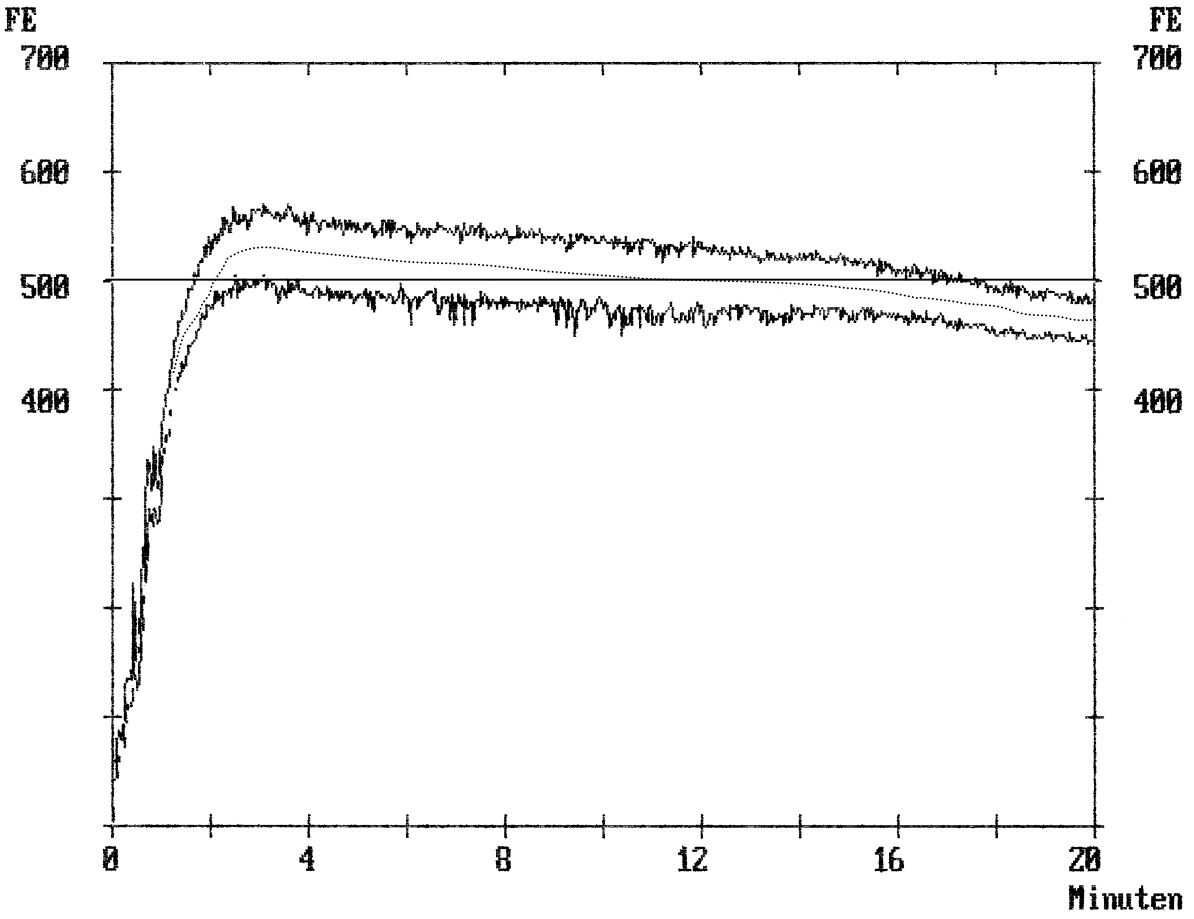


Abb. 45: Farinogramm des Handelsmehles mit NZ200 (<20µm)

4.1.6.2 Dehnungseigenschaften der Teige

Den Einfluss der Prallzerkleinerung auf die Dehnungseigenschaften der Teige zeigen die Extensogrammwerte in Tabelle 25.

Tab. 25: Extensogramme der Mehle nach 135min Gärzeit

Mehle	Db [mm]	Dw_{max} [EE]	DE [cm²]	VZ
WM	161	520	108,9	3,2
NZ80	158	508	107,3	3,2
NZ120	154	530	101,5	3,3
NZ160	157	560	107,2	3,5
NZ200	149	573	108,9	3,8

VZ Verhältniszahl

Mit zunehmender Prallgeschwindigkeit und damit ansteigender Beanspruchungsenergie verringerte sich die Dehnbarkeit, während der Dehnwiderstand anstieg. Die höheren Prallgeschwindigkeiten führten zur Zunahme der Festigkeit des Glutens bzw. des Teiges, was auf die steigende Elastizität des Glutens zurückzuführen ist. Eine positive Beeinflussung der Gluteneigenschaften durch das Prallen war bereits in der Erhöhung der Teigstabilität (Knetkurven) festzustellen.
Die Glutenverbesserung kann, wie bereits in den vorangegangenen Untersuchungen festgestellt, durch den bei der Prallzerkleinerung erhöhten Anteil an Thiolgruppen in den Mehlen verursacht werden. Beim Kneten werden die SH-Gruppen durch die mechanische Einwirkung unter Sauerstoff oxidiert. Die Umsetzung von SS-Bindungen und die neu gebildeten SS-Bindungen führten zur Verfestigung des Glutens [23, 24, 93].

4.1.7 Backeigenschaften

4.1.7.1 Backergebnisse der Versuchsmehle

Bei den Backversuchen wurde ebenfalls auf den Zusatz von Ascorbinsäure verzichtet, um ausschließlich die durch das Prallen hervorgerufenen Veränderungen unbeeinflusst von Chemikalien zu untersuchen.
Die Glutenveränderungen wirkten positiv auf die Backergebnisse (Tab. 26). Durch die Prallzerkleinerung erhöhten sich die Wasseraufnahmen und dadurch die Teigausbeuten. Eine Zunahme des Gebäckvolumens bei den geprallten Mehlen ist festgestellt worden. Interessant ist die Verbesserung der Bräunung der Brote, die ab 120 m/s deutlich war. Diese Erscheinung ist auf die erhöhte Konzentration an Maltose zurückzuführen, die die Maillard- Reaktionen begünstigt (siehe Pkt. 4.1.3.2).

Tab. 26: Backergebnisse der Versuchsmehle

Mehle	TA [%]	VA[ml/100g]	Ausbund	Bräung.	Porung	KE[(a)]
WM	170,0	559,5	n.gut[(b)]	etw.sch.[(c)]	z.glm.[(d)]	gut
NZ80	170,2	598,0	n.gut	etw.sch.	z.glm.	gut
NZ120	171,2	593,0	gut	normal	z.glm.	gut
NZ160	171,9	593,0	gut	normal	glm.	gut
NZ200	173,2	618,0	n.gut	normal	z.glm.	gut

(a) Krumenelastizität
(b) noch gut
(c) etwas schwach
(d) ziemlich gleichmäßig

4.1.7.2 Backergebnisse des Handelsmehles mit den zugemischten Versuchsmehlen

Teigausbeute und Backergebnisse des Handelsmehles sind durch die Versuchsmehle beachtlich verbessert worden. Das Zumischen der Versuchsmehle wurde auch ohne Einsatz von Chemikalien durchgeführt, wobei hier zu erwähnen ist, dass das Handelsmehl mit Ascorbinsäure behandelt worden war.

Bei einem Zusatz der geprallten Mehle NZ120 sowie NZ200 erhöhte sich die Teigausbeute von 157,5 g beim Handelsmehl auf über 158 g bei den Mischmehlen.

Die Gebäckvolumina stiegen ebenfalls von 661 ml beim Handelsmehl auf 675 ml bzw. bis 695 ml mit den zugemischten Prallmehlen an. Bei beiden zeigte sich auch ein breiterer Ausbund sowie eine schnellere Teigreifung, die wahrscheinlich eine Folge der schnelleren Aggregation ist.

Es wurden keine Veränderungen der Krumeneigenschaften wie Porung, Elastizität, Weichheit und Geschmack beobachtet (Tab. 27).

Tab. 27: Backergebnisse nach Zumischen der Versuchsmehle

Probe / Parameter	HM 550	85% HM 550	85% HM 550	85% HM 550
	As behandelt	15% WM	15% NZ120	15% NZ200
Wassergehalt [%]	14,2	13,9	13,3	13
Fallzahl [s]	312	335	335	330
Mehlmenge [g] (14% F)	1000	995	992	989
Zusätze [g]	x	x	x	x
Wassermenge [%]	57,5	58,4	59,0	59,4
Gesamtwasser [ml]	575	584	590	594
Teigausbeute [g]	157,5	157,9	158,2	158,3
Teigtemperatur [°C]	26	26	26	26
PraktischesTeiggewicht [g]	165,5	165,7	166,0	166,0
Teigeinlage [g]	1655	1657	1660	1660
Teigoberfläche	normal	normal	normal	normal
Teigelastizität	normal	normal	normal	normal
Gebäckgewicht [g]	1289	1287	1290	1289
Kleingebäckausbeute [g]	128,9	128,7	129,0	128,9
Gebäckvolumen[cm³]	6610	6700	6750	6950
Volumenausbeute [ml/100g]	661	670	675	695
Gebäckausbund- Note	noch gut	noch gut	befriedigend	befriedigend
Gebäckausbund- Art	etwa breit	etwa breit	breit	breit
Bräunung	normal	normal	normal	normal
Krustenrösche-Note	gut	gut	gut	gut
Porengleichmäßigkeit	z.glm.	z.glm.	z.glm.	z.glm.
Krumenelastizität	gut	gut	gut	gut
Geschmack	einwandfrei	einwandfrei	einwandfrei	einwandfrei

As Ascorbinsäure

x ohne Zusätze

4.1.8 Schlussfolgerungen zum Einfluss der Prallzerkleinerung auf die Mehleigenschaften

Die Nachzerkleinerung eines Weizenmehles der Type 550 in einer Stiftmühle unter ansteigenden kinetischen Energieeintrag bis 250 kWh/t_{Mehl} führte zu einer nahezu vollständigen Auflösung der Endospermzellstruktur in freiliegende Stärkekörner und freiliegende Proteinteilchen. Etwa 95 % der Mehlteilchen haben eine Teilchengröße < 50 µm, die maximale Teilchengröße liegt bei etwa 65 µm. Es ist davon auszugehen, dass mit ansteigendem Feinanteil der Mehle sich auch die mechanischen Ei-

genschaften, insbesondere ihre Fließeigenschaften verändern, die aber nicht untersucht wurden.
Die inhaltsstoffliche Zusammensetzung der Mehle änderte sich durch die Nachzerkleinerung nicht, bis auf den eingetretenen Feuchteverlust und die geringe Abnahme der löslichen Proteine.
Die Zunahme der Oberfläche um das Vierfache begünstigte eine Trocknung der Mehle bei der starken Luftströmung ($\dot{m}$= 21240 kg/h) in der Prallmühle. Das Mehl hatte nach der Vermahlung eine Feuchtigkeit von etwa 8 %. Eine thermische Schädigung des Proteins ist aufgrund des geringen Feuchtigkeitsgehaltes und der kurzen Verweildauer anscheinend nicht eingetreten. Eine Temperaturschädigung des Glutens kann bei Vermahlungen erst ab einer Mehlfeuchte von 20 % und bei langen Vermahlungszeiten von über 1 h erwartet werden [99].

Die mikroskopischen Untersuchungen der Mehle zeigten die feste Einbettung der Stärke in die Proteinmatrix vor allem beim Walzenmehl. Mit der hohen Prallenergie wurde die Endospermstruktur zwar stark aufgelöst, aber diese Energie war für eine vollständige Abtrennung der Stärke vom Protein nicht ausreichend. Es sind Verformungen und Risse in den Stärkekörnern zu erkennen, die zu unterschiedlichen Beschädigungsgraden der Stärkekörner im Mehl geführt haben. Mit der Erhöhung der Energiedissipation wurden die mittleren bis großen Stärkekörner sogar aufgebrochen. Daraus lässt sich schließen, dass neben einer starken Auflösung der Wasserstoffbrückenbindungen ein Molekülabbau der Stärke während der Prallzerkleinerung stattgefunden haben kann, was zu beachtlichen Eigenschaftsänderungen der Stärke führte.

Die geprallten Mehle zeigten unabhängig vom Protein- sowie Stärkegehalt erhöhte Wasserbindungsvermögen, die neben der Stärkebeschädigung zu einem Teil auch auf die erhöhte Benetzbarkeit der Mehle infolge der gestiegenen Oberfläche zurückzuführen sind.

Infolge zunehmender Prallintensität änderten sich die Verkleisterungscharakteristika der Mehle deutlich. Eine Zunahme der Verkleisterungstemperatur der Mehle ist festgestellt worden, ebenso ein Rückgang der Heiß- sowie Kaltviskositäten. Daraus geht hervor, dass die Kleister der geprallten Mehle mit zunehmendem Energieeintrag weniger zur Gelbildung neigen. Der Viskositätsverlust und die Retrogradation des Kleis-

ters sind ebenfalls wichtige Qualitätsmerkmale der Stärke. Sie fallen bei den Mehlen mit der steigenden Zerkleinerungsenergie geringer aus. Niedrigere Viskositätsverluste deuten auf eine bessere Hitzestabilität hin. Die geringeren Retrogradationsgrade können auf eine Degradation der Stärkemoleküle zurückgeführt werden. Sie wird für die Frischhaltung von Backwaren angestrebt. Eine Untersuchung der Frischhaltung von den Gebäcken ist hier zu empfehlen.

Aus den Ergebnissen der Korngrößenzusammensetzung und der Viskositätsänderungen der Feinstmehle lässt sich ableiten, dass die ermittelten Werte bei der Fallzahlbestimmung als auch beim Sedimentationstest durch die Gutfeinheit und die schnellere Verkleisterung der Stärke verfälscht werden können.

In der Literatur wird vermutet, dass die Zufuhr von Luftsauerstoff zum Weizenmehl (Umspülung mit Luftsauerstoff) bei einer intensiven Prallvermahlung zur Bildung von Disulfidgruppen führt, was eine Verfestigung des Glutens bzw. des Teiges verursacht [20,57]. Die Annahme einer Oxidation von Thiolgruppen (SH-Gruppen) zu Disulfidgruppen (SS-Gruppen) während des Prallens konnte in dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Es wurde mit Zunahme der Prallintensität eine Erhöhung der Anzahl der Thiolgruppen festgestellt. Der Anstieg der Thiolgruppen kann mit den höheren Auflösungsgraden der Mehle begründet werden. Diese Thiolgruppen werden beim Kneten infolge des Lufteintrages und der mechanischen Scherkräfte zu SS-Bindungen oxidiert. Somit steigt das Molekulargewicht der Glutenproteine an, das zur Verfestigung des Glutens führt. Eine Oxidation während des Mahlens kann aber nicht ausgeschlossen werden. Die intensive Prallbeanspruchung führt zur Auflösung von Wasserstoffbrückenbindungen, wie bereits bei der Stärke festgestellt worden ist. Aufklärung über mögliche Oxidationen während des Prallens bzw. über eventuelle Spaltung von SS-Bindungen können Untersuchungen über den Gehalt an Disulfidbindungen in den Mehlen vor und nach dem Prallen bringen.

Sowohl die Kneteigenschaften der Teige aus geprallten Mehlen als auch die Dehnungseigenschaften der Glutene sowie der Teige zeigten eine Verbesserung der Gluteneigenschaften. Die geprallten Mehle wiesen höhere Teigstabilitäten, Elastizitäten und größere Gebäckvolumina auf. Bei der farinographischen Messung wäre es interessant, die Mehle mit Cystein zu behandeln. Der Zusatz von Cystein zu den Mehlen kann Hinweise über die vorhandenen Disulfidbindungen geben.

Die rheologischen Untersuchungen des Glutens im Mikroextensographen, im Glutographen als auch die Oszillationmessung und der Aggregationstest lieferten Ergebnisse über den Zustand des Glutens bzw. Teiges. Die Zunahme des elastischen Anteils der mit steigender Prallenergie gemahlenen Mehle wurde sowohl durch die Steigung der Kurven im Zugversuch (von 52.10^{-4} bis auf 76.10^{-4} N/mm²) als auch durch den steigenden Speichermodul G' (von 56,8 auf 76,5 kPa) sowie durch das fallende tan δ im Oszillationstest nachgewiesen. Die beiden Tests sind für die Beschreibung der Glutenqualität geeignet. In weiteren Arbeiten wäre es sinnvoll, sich nur auf zwei Tests zu konzentrieren, auf die Ermittlung von Extensogrammen (Zugversuch) und auf die Oszillationsmessung. Bei Durchführung dieser Methoden ist besonders auf die Messbedingungen zu achten. Beim Zugversuch ist ein sauberes Auswaschen des Glutens und die Einhaltung der Relaxationsbedingungen, z.B. Luftfeuchtigkeit und Zeit, wichtig. Beim Oszillationstest kann eine Messung bei niedrigen Amplituden eventuell bessere Antwortsignale geben. Eine Austrocknung des Materials während der Messung muss vermieden werden.
Interessant ist die verbesserte Bräunung der Gebäcke aus bei hohen Energien geprallten Mehlen. Diese Erscheinung ist dadurch zu begründen, dass die intensive Beanspruchung zum Molekülabbau der Stärkekomponenten Amylose und Amylopektin geführt hat. Ergebnisse der Untersuchungen der Zuckergehalte ergaben deutlich höhere Maltosegehalte in den geprallten Mehlen. Diese Saccharide treten mit freien Aminosäuren in Wechselwirkung. Dabei findet beim Backprozess die nichtenzymatische Bräunung (Maillard-Reaktion) in größerem Umfang statt. Die Frage, ob es während der intensiven Prallbeanspruchung der Mehle zum Abbau von Proteinmolekülen kommt, sollte weiter untersucht werden.

Die Untersuchungsergebnisse bestätigten, dass eine intensive Prallzerkleinerung von Weizenmehl zu Verbesserungen der funktionellen Eigenschaften der Mehle, zur Erhöhung der Teigausbeute und der Gebäckvolumina sowie zu guten Gebäckeigenschaften führt. Diese Wirkungen sind sortenabhängig, daher wird empfohlen, diese Untersuchungen für verschiedene Weizenqualitäten durchzuführen.

4.2 Eigenschaften der windgesichteten Mehlfraktionen

4.2.1 Charakterisierung der Mehlfraktionen

4.2.1.1 Anteile und Granulation

Infolge der unterschiedlichen Prallmahlung des Ausgangsmehles sind bei der Windsichtung Mehlfraktionen mit unterschiedlichen Masseanteilen und Körnungen gewonnen worden. In Tabelle 28 sind die Ergebnisse der Anteile und der Granulation der Mehlfraktionen zusammengefasst dargestellt.

Tab. 28: Anteile und Granulation der Mehlfraktionen

Mehl	Fraktion	Masse [% TS]	mittl. KG [µm]	A_o [m²/g]	häufigste KG	
					[µm]	[%]
WM	< 20µm	21,6	13,9	0,73	18,0	16,0
NZ80		31,3	14,5	0,72	18,0	15,8
NZ120		34,5	11,1	0,90	14,0	15,2
NZ160		46,0	11,6	0,91	15,0	14,0
NZ200		47,2	12,8	0,89	17,0	13,2
WM	20- 50µm	23,7	35,9	0,36	30,0	15,0
NZ80		27,1	35,5	0,33	30,0	17,0
NZ120		36,5	30,7	0,36	25,0	18,3
NZ160		34,7	27,5	0,36	25,0	20,8
NZ200		39,7	25,5	0,36	25,0	22,5
WM	> 50µm	54,7	117,7	0,12	105,5	20,0
NZ80		42,8	97,6	0,14	82,5	21,0
NZ120		29,0	85,3	0,16	62,5	23,5
NZ160		19,3	73,5	0,18	62,5	24,0
NZ200		13,1	74,5	0,18	62,5	22,4

Die Masseanteile der drei gesichteten Fraktionen sind direkt von der Zerkleinerungsenergie bzw. von der Prallgeschwindigkeit abhängig. So verringerten sich mit zunehmendem Energieeintrag die Anteile in der groben Fraktion (> 50 µm) von 55 % bei dem mit Walzen ermahlenen Mehl auf etwa 13 % bei 200 m/s-Mehl, gleichzeitig stiegen die Anteile in der mittleren (20-50 µm) und der feinen Fraktion (< 20 µm)

deutlich an. Der Anteil der feinen Mehlfraktion bei 200 m/s erhöhte sich bis auf etwa 47 % gegenüber 21,6 % beim Ausgangsmehl (Abb. 46).

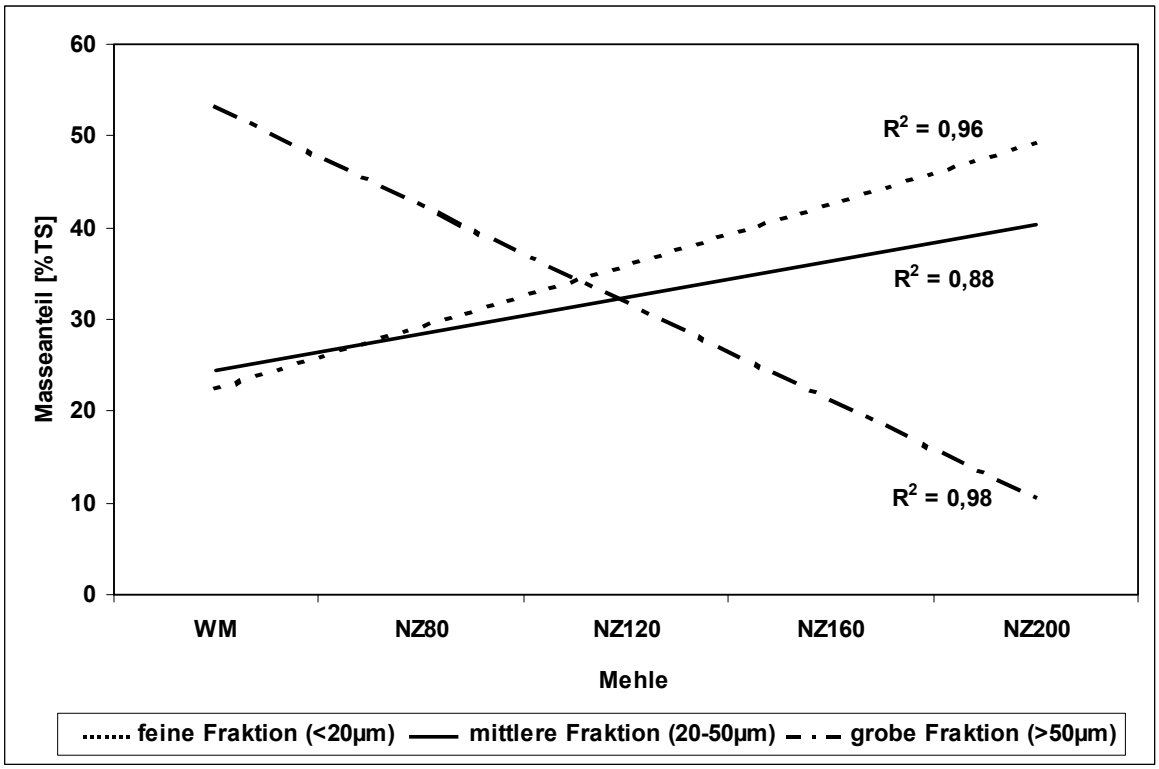


Abb. 46: Masseanteile der Mehlfraktionen

Während sich die mittlere Korngröße der feinen Fraktionen geringfügig verringerte, nahm sie mit steigender Energie bei den mittleren und den groben Fraktionen deutlich ab. Mit Verringerung der Teilchengröße nahm die spezifische Oberfläche in den feinen und in den groben Fraktionen zu, dagegen blieb sie in den mittleren Fraktionen unverändert. Die Zunahme der Oberflächen der feinen und der groben Fraktionen bei den höheren Zerkleinerungsenergien ist auf den größeren Anteil an Feingut zurückzuführen. In den mittleren Fraktionen kommen hauptsächlich freiliegende Stärkekörner vor, die eine relativ einheitliche Kornform haben. Aus den zwei letzten Spalten in der Tabelle 28 ist zu erkennen, dass eine Fraktionierung der Mehle in den entsprechenden Korngrößen zur Verschiebung der Mehlteilchen geführt hat. Bei den höheren Zerkleinerungsenergien sind die häufigsten Teilchen in den feinen Fraktionen mit größeren Anteilen angefallen.

4.2.1.2 Korngrößenzusammensetzung der Mehlfraktionen

Die Korngrößenverteilungsdichten der Fraktionen zeigen, dass mit dem Sichtprozess keine vollständige Abtrennung aller Feingutteilchen bei den jeweiligen Trennschnitten stattgefunden hat. Insbesondere wies die Trennung im Fein- und Grobgutbereich mehr Fehlkornanteile auf. Besonders ausgeprägt ist es am Trennschnitt 20 µm (I. Windsichtung).

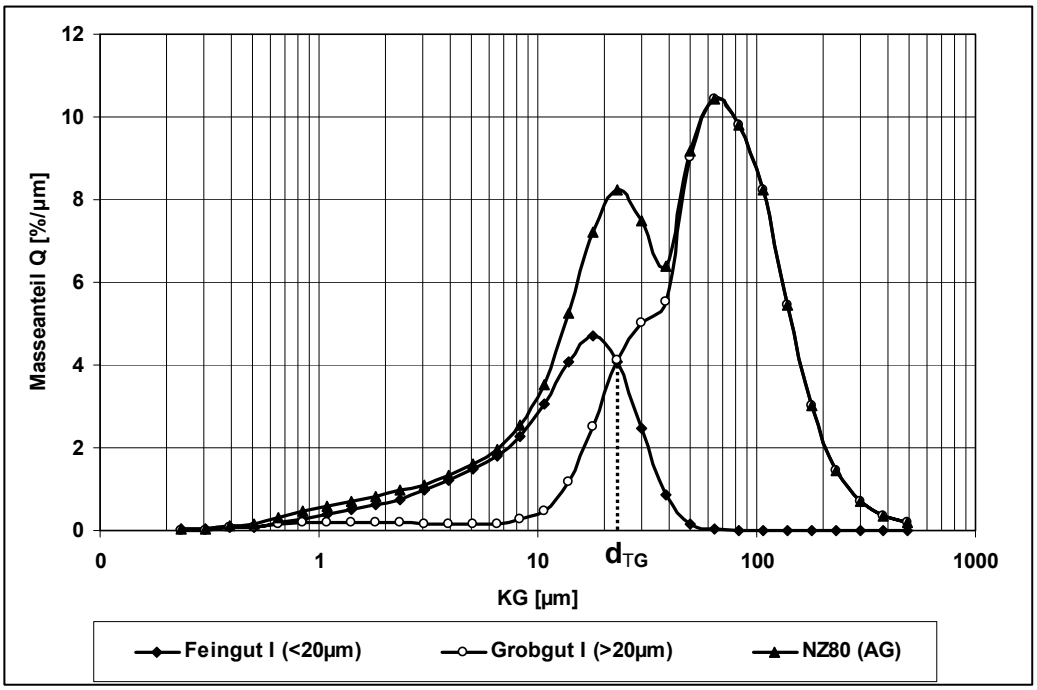


Abb. 47: I. Windsichtung (NZ80 m/s)

Aus den Abbildungen 47 und 48 ist zu erkennen, dass die Trennschnitte bei der Windsichtung der Mehle NZ80 und NZ200 zur Gewinnung der feinen Mehlfraktionen nahezu erreicht worden sind. Während der Trennschnitt bei dem NZ80 etwa 22 µm war, betrug er bei NZ200 19 µm.

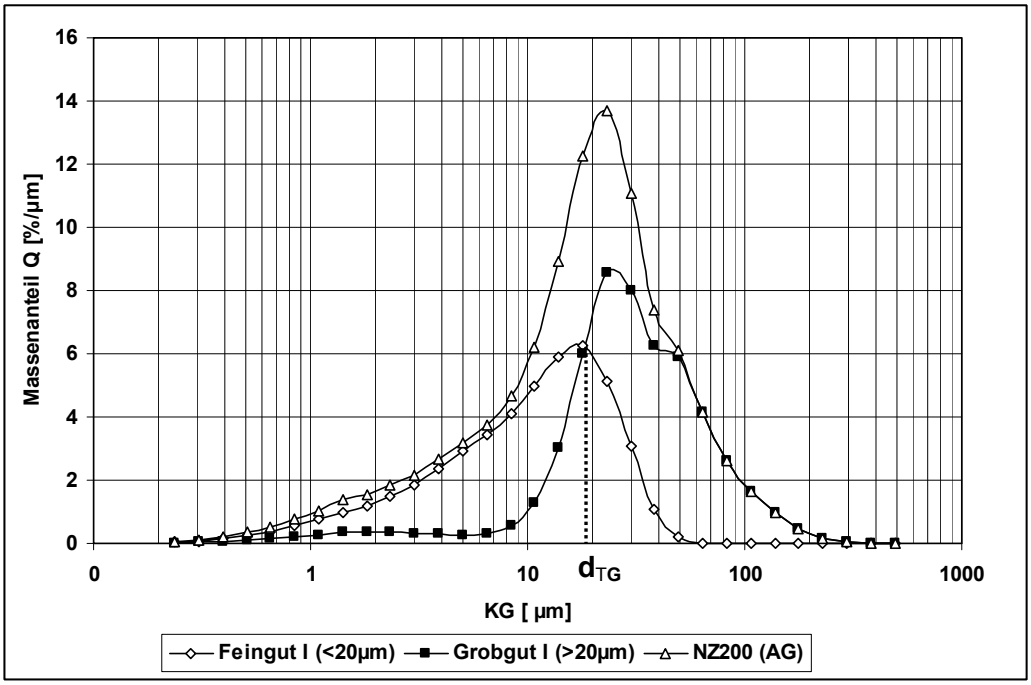


Abb. 48: I. Windsichtung (NZ200 m/s)

Nach der zweiten Windsichtung zur Trennung der mittleren und groben Mehlfraktionen sind geringere Fehlkornanteile im Vergleich zur ersten Trennung festgestellt worden (Abbildungen 49 und 50).

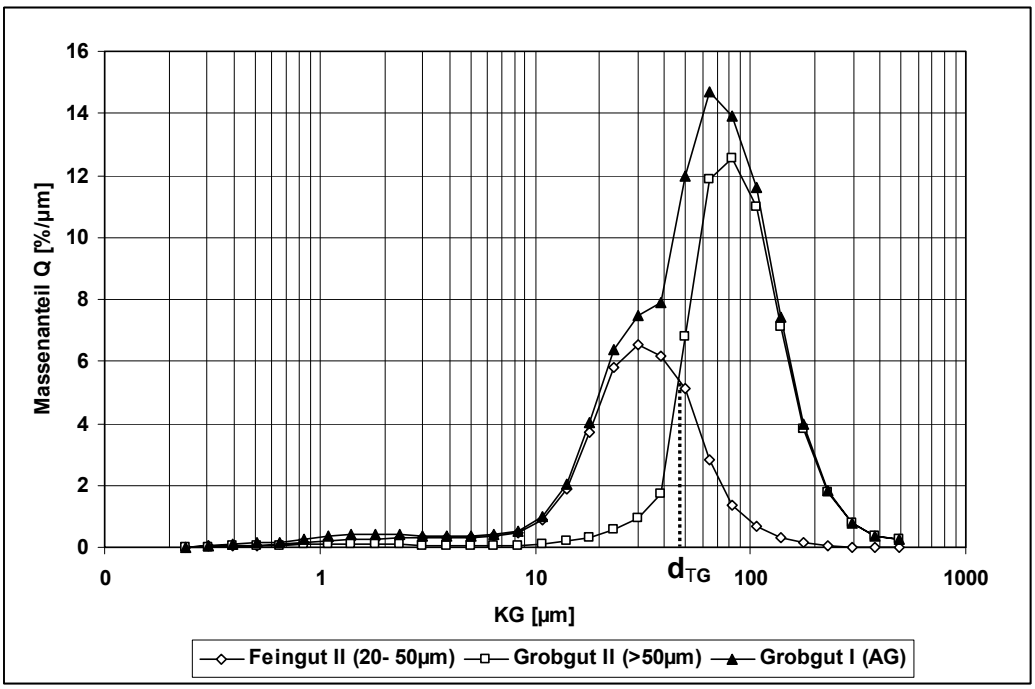


Abb. 49: II. Windsichtung (NZ80 m/s)

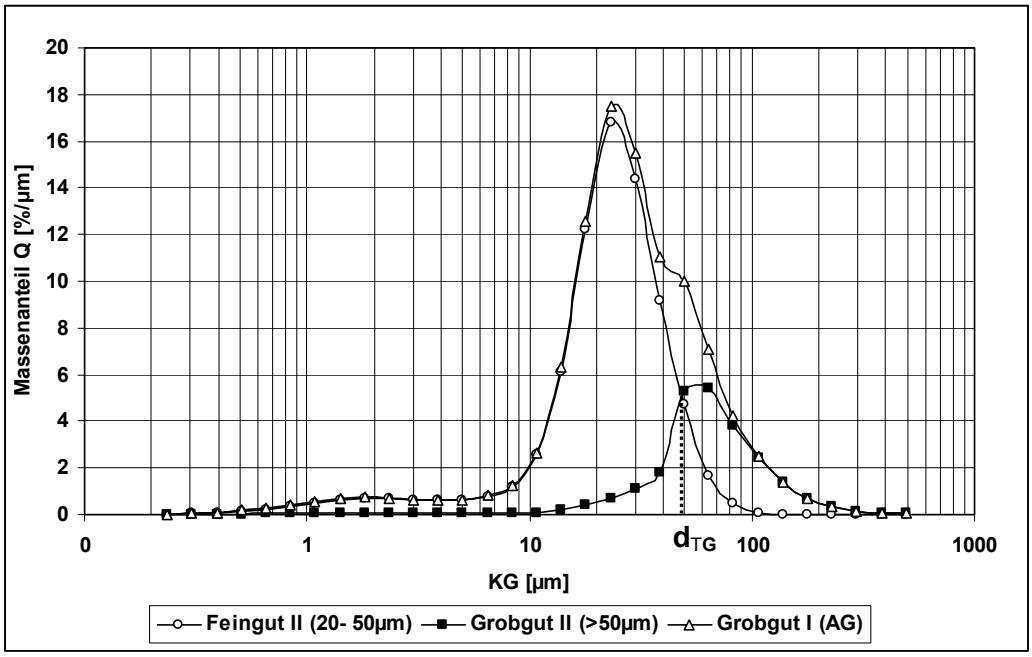


Abb. 50: II. Windsichtung (NZ200 m/s)

4.2.1.3 Trennschärfe bei der Windsichtung

Aus den Tromp'schen Trennkurven (Abb. 51 und 52) wurden die Trennschärfen der Windsichtung ermittelt und in Tabelle 29 zusammengefasst. Wesentlich besser verlief die Trennung am Trennschnitt d_{50} (II. Sichtung). Sie erreichte eine Trennschärfe von 0,67 bei allen Mehlen, die einer technisch realen Trennschärfe entspricht. Dagegen erreichte die I. Sichtung maximal 0,52 und bei dem 200 m/s-Mehl sogar nur 0,33. Es wäre zu untersuchen, ob durch Verwendung eines Luftstrahlsiebes für den Trennschnitt 20 µm anstelle des Sichters höhere Trennschärfen erzielt werden könnten.

Tab. 29: Trennschärfen bei der Windsichtung

Mehle	Trennschärfe (χ)=x_{25}/x_{75}	
	I. Windsichtung	II. Windsichtung
WM	0,40	0,67
NZ80	0,40	0,67
NZ120	0,52	0,67
NZ160	0,42	0,67
NZ200	0,33	0,67

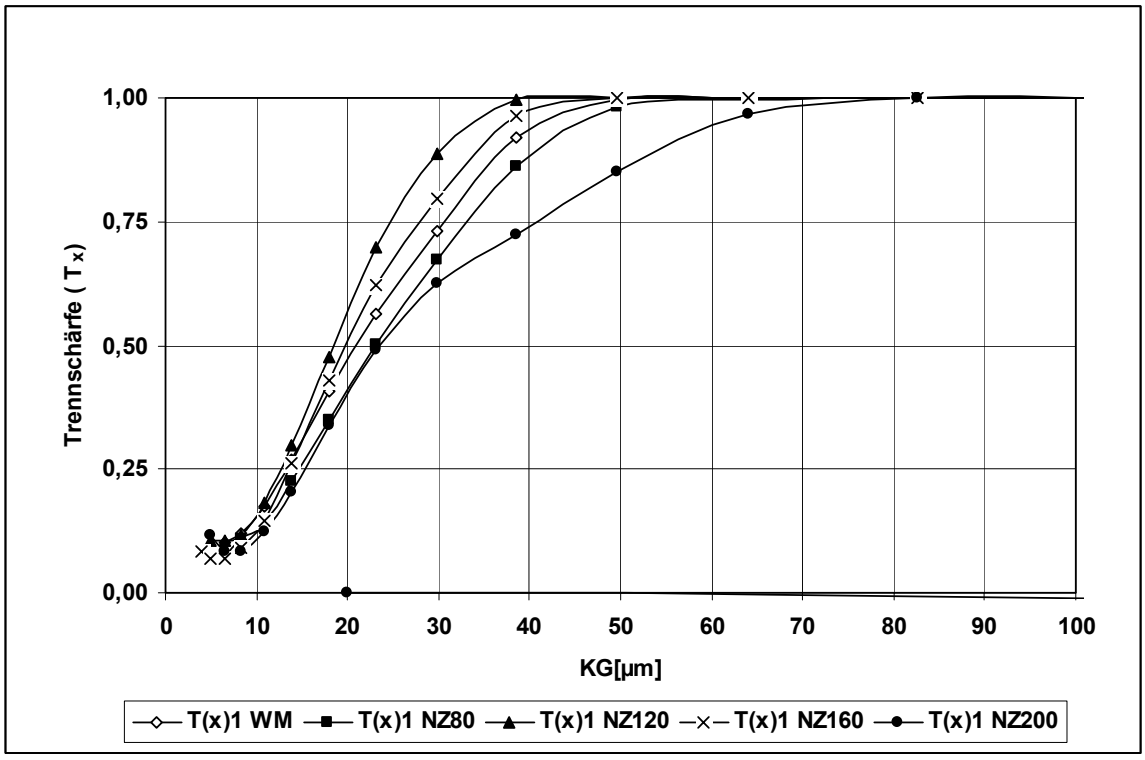


Abb. 51: Trennschärfe bei der I. Windsichtung

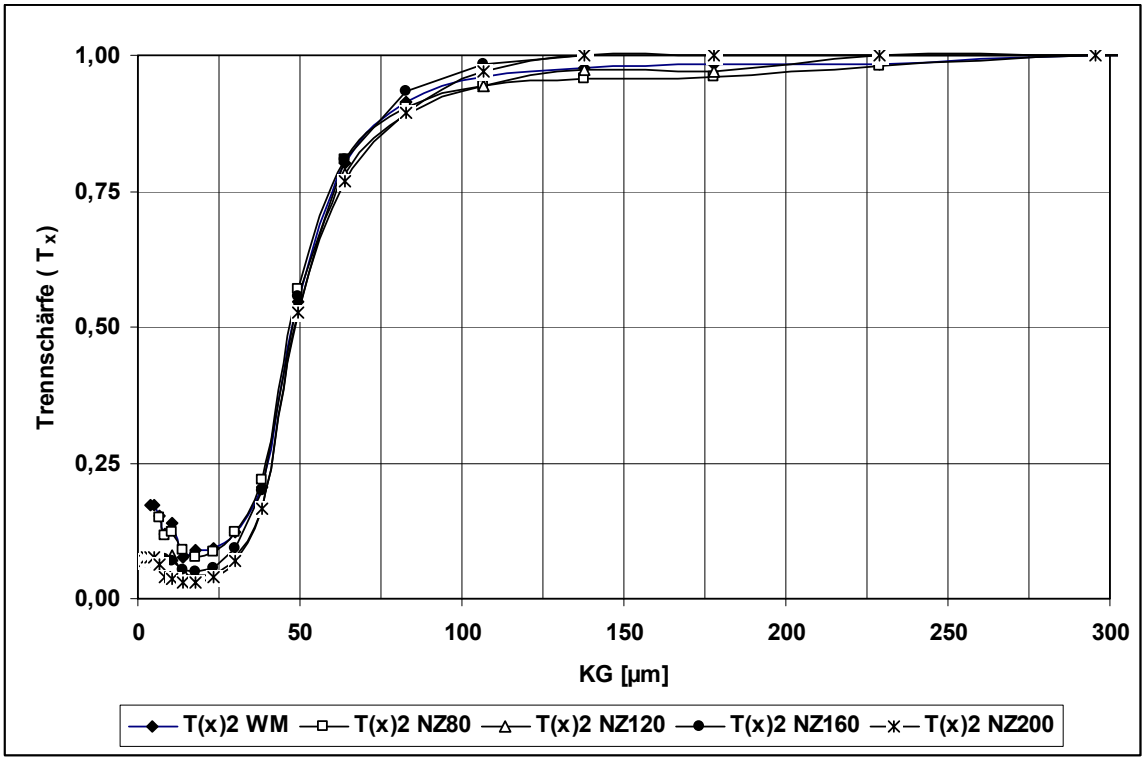


Abb. 52: Trennschärfe bei der II. Windsichtung

In den Tabellen 30a und 30b sind die wiedergefundenen Anteile der Fraktionen in den nach der Windsichtung abgetrennten Fraktionen dargestellt. Die ermittelten Werte unterstützen die Ergebnisse des Trennungsgrads (Trennschärfe). Die Fehlkornausträge in den ersten Fraktionen (fein, mittel) sind groß, so dass eine saubere Abtrennung der Mehlteilchen hier nicht stattgefunden hat. Dagegen ist die Trennung der groben Fraktion wesentlich besser verlaufen.

Tab. 30a: Masseanteile der Teilchengrößen in den gesichteten feinen Fraktionen

Mehl	Anteile nach der I. Windsichtung		
	feine Fraktion (<20µm)		
	<20µm	20- 50µm	>50µm
WM	16,1	5,5	0,0
NZ80	23,0	8,3	0,0
NZ120	30,1	4,4	0,0
NZ160	38,6	7,4	0,0
NZ200	37,0	10,2	0,0

Tab. 30b: Masseanteile der Teilchengrößen in den gesichteten mittleren sowie groben Fraktionen

Mehl	Anteile nach der II. Windsichtung					
	mittlere Fraktion (20- 50µm)			grobe Fraktion (>50µm)		
	<20µm	20- 50µm	>50µm	<20µm	20- 50µm	>50µm
WM	6,5	12,1	5,1	1,3	3,1	50,3
NZ80	6,4	15,3	5,4	1,2	4,0	37,6
NZ120	10,3	21,5	4,7	1,1	3,6	24,3
NZ160	10,6	21,5	2,6	0,9	4,1	14,3
NZ200	12,7	21,4	5,6	0,7	3,2	9,2

Durch die unsaubere Trennung der Fraktionen ist eine ideale Verschiebung der Inhaltsstoffe nicht gegeben. Die hohen Anteile an < 20 µm in den mittleren Fraktionen führten zu ungenügender Anreicherung der Proteine in den feinen Fraktionen, gleichzeitig beeinflusst das die Stärkeanteile in den mittleren Fraktionen.

4.2.1.4 Ergebnisse der mikroskopischen Aufnahmen

Die mikroskopischen Aufnahmen unter dem Rasterelektronenmikroskop der feinen Mehlfraktionen (Abb. 53 und 54) lassen das Herauslösen der kugel- und linsenförmigen Stärkekörner aus den umhüllenden Proteinplättchen im 160 m/s-Mehl gut erkennen. Durch den höheren Energieeintrag ins Mehl bei 200 m/s wurden die Proteinreste fast ganz von der Stärke abgetrennt. Diese Fraktion wies einen höheren Proteingehalt im Vergleich zum mit Walzen ermahlenen Mehl auf.

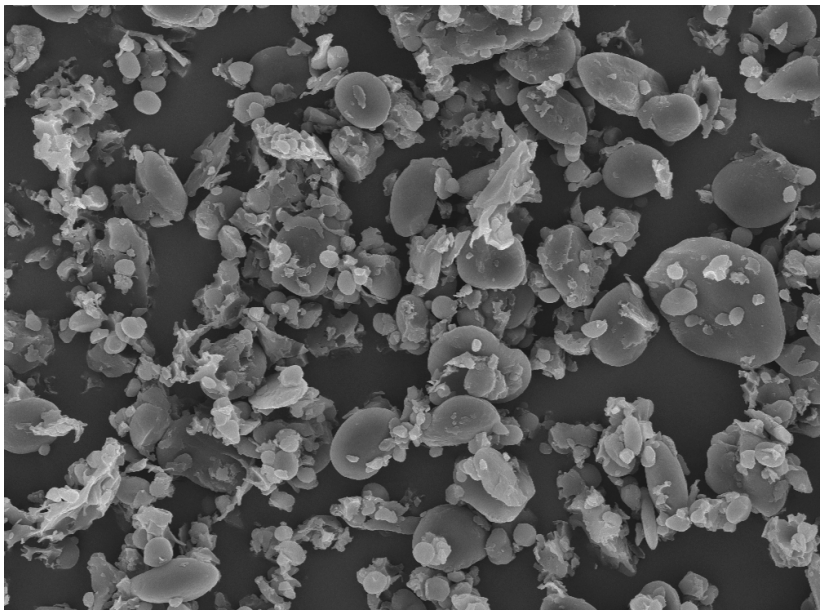


Abb. 53: WM-Fraktion (< 20 µm) unter REM

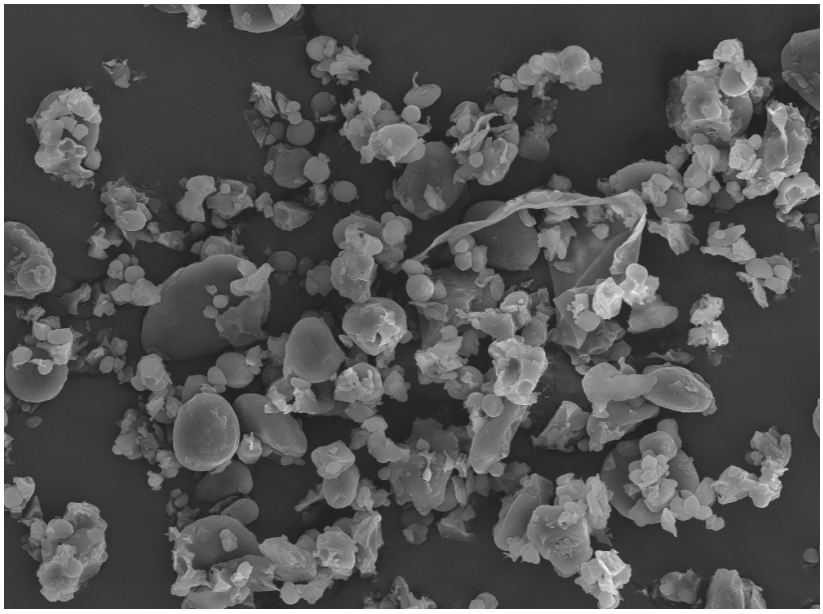


Abb. 54: NZ160-Mehlfraktion (< 20 µm) unter REM

Die Einwirkung der Prallenergie ist in den mittleren Fraktionen deutlicher zu erkennen. Während in Abbildung 55 kleine Agglomerate zu sehen sind, kommen mehr

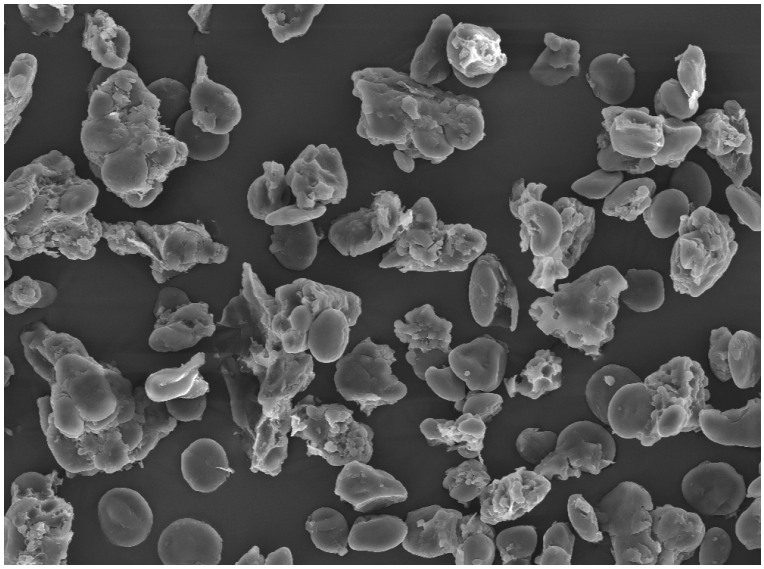


Abb. 55: WM-Fraktion (20-50 µm) unter REM

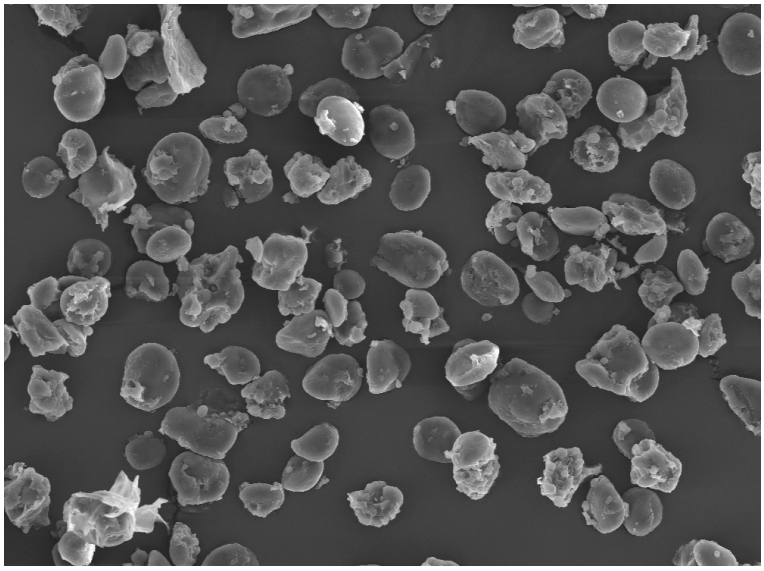


Abb. 56: NZ200-Fraktion (20-50 µm) unter REM

Stärkekörner in der mittleren Fraktion des mit 200 m/s geprallten Mehles in freier Form vor (Abb. 56). Der relative Anteil der Stärkekörner ist größer und der Stärkegehalt in dieser Fraktion stieg an.

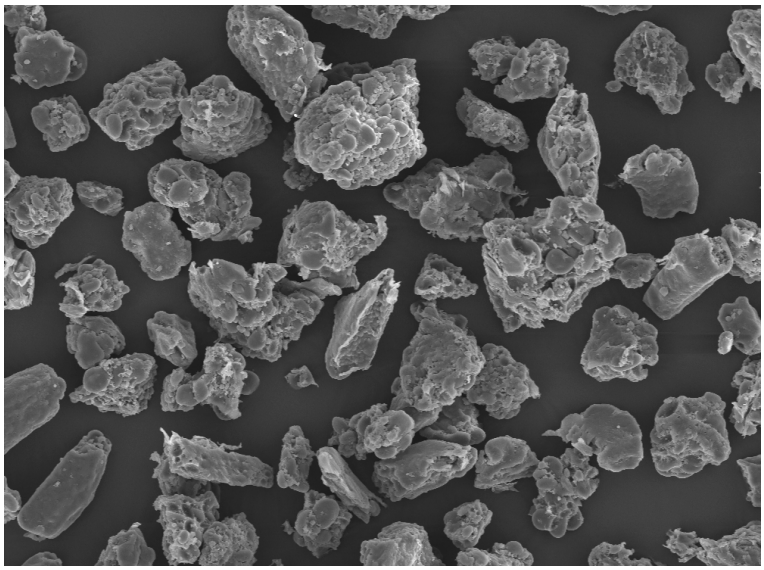


Abb. 57: WM-Fraktion (>50 µm) unter REM

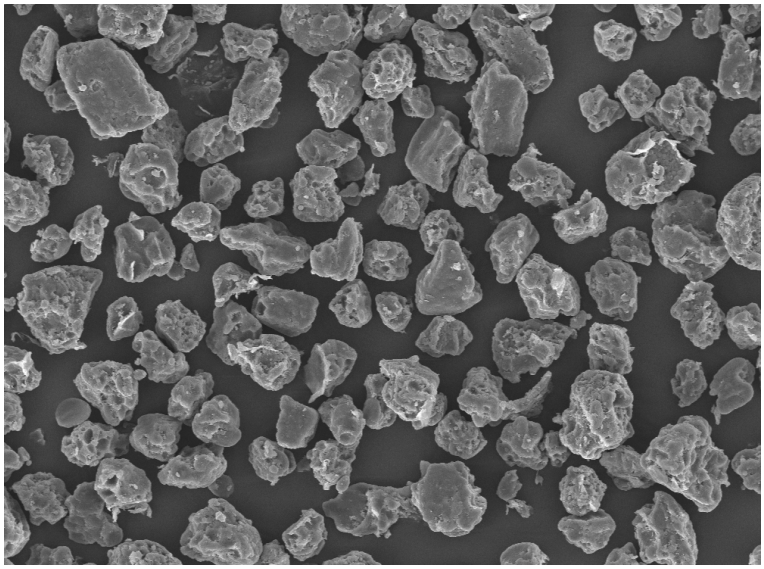


Abb. 58: NZ200-Fraktion (>50 µm) unter REM

In Abbildungen 59 und 60 sind die Zellbruchstücke und Zellverbände in den groben Fraktionen zu erkennen. Die Zellbruchstücke des 200 m/s-Mehles sind kleiner, was auf einen stärkeren Aufschluss des Endosperms bei der höheren Prallenergie hinweist. Demzufolge verringerten sich die mittlere Korngröße und die spezifische Oberfläche der groben Fraktion bei 200 m/s (Tab. 28).

4.2.2 Stoffverschiebungen in den Mehlfraktionen

4.2.2.1 Inhaltsstoffzusammensetzung

Obwohl das Ausgangsmehl und die nachzerkleinerten Mehle fast die gleichen Anteile an Protein- und Glutengehalten aufwiesen, sind durch das Windsichten und infolge der unterschiedlichen Strukturauflösung durch die Prallzerkleinerung beachtliche stoffliche Verschiebungen eingetreten (Tab. 31).

Tab. 31: Inhaltsstoffzusammensetzung der Mehlfraktionen

Probe	Fraktion	Anteil [%TS]	Feuchte [%]	Asche [%TS]	Stärke [%TS]	Pentosane [%TS]	Protein [%TS]	lösl. PR [%TS]	Gluten [%]
WM	feine Fraktion (<20µm)	21,6	11,1	0,63	80,7	1,7	14,5	19,5	32,4
NZ80		31,3	11,5	0,65	80,6	1,7	14,6	20,5	32,2
NZ120		34,5	10,0	0,68	75,7	1,7	16,2	17,6	35,6
NZ160		46,0	8,8	0,70	77,2	1,8	15,9	16,0	33,7
NZ200		47,2	6,6	0,72	74,9	1,7	17,5	17,7	35,2
WM	mittlere Fraktion (20-50µm)	23,7	10,6	0,63	82,7	1,7	12,5	20,9	26,0
NZ80		27,1	9,8	0,59	83,1	1,7	11,7	20,3	24,8
NZ120		36,5	9,9	0,52	83,1	1,7	11,0	25,4	24,1
NZ160		34,7	8,6	0,45	83,9	1,7	10,7	25,5	22,7
NZ200		39,7	7,4	0,41	84,4	1,5	10,0	21,8	20,7
WM	grobe Fraktion (>50µm)	54,7	10,5	0,47	79,7	1,7	13,9	21,1	32,9
NZ80		42,8	10,0	0,44	80,3	1,7	14,0	18,1	32,5
NZ120		29.0	9,7	0,41	77,8	1,7	14,0	18,9	32,6
NZ160		19,3	8,7	0,42	78,6	1,7	14,0	16,3	33,4
NZ200		13,1	7,7	0,41	77,1	1,7	14,1	19,3	32,6

Durch die Prallzerkleinerung in Kombination mit der Windsichtung kam es zu einem starken Wasserentzug in den gesichteten Mehlfraktionen bis auf etwa 7 %. Die Stärke- und Proteingehalte der gesichteten Fraktionen verhalten sich in etwa wie aus der Literatur bekannt.

In den Fraktionen 20-50 µm, in denen die Hauptmenge an freiliegenden Stärkekörnern zu erwarten ist, stieg der Stärkegehalt infolge der zunehmenden Strukturauflösung mit intensiverer Zerkleinerung um über 4 %. Diese Fraktionen wiesen die höchsten Stärkegehalte auf. Die feinen Fraktionen < 20 µm, in denen auch kleine

Stärkekörner abgeschieden werden, hatten dagegen die niedrigsten Stärkegehalte mit einer Abreicherung bei 200 m/s um etwa 5 % gegenüber dem Ausgangsmehl. In den groben Fraktionen > 50 µm verringerten sich die Stärkegehalte geringfügig (Tab. 31).

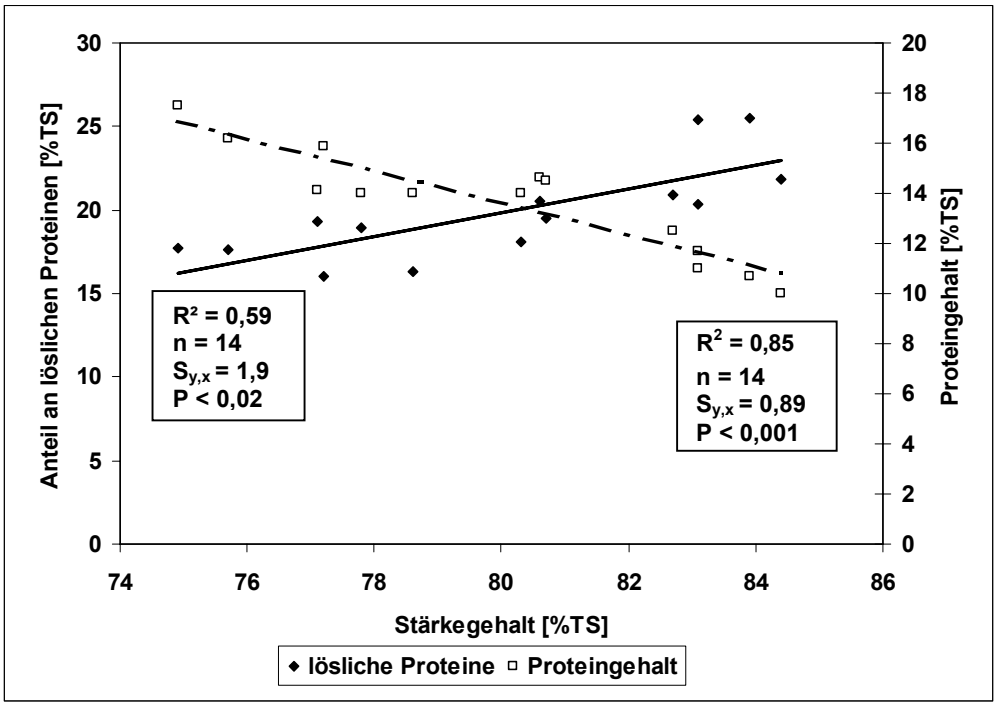


Abb. 59: Abhängigkeit der Proteinanteile vom Stärkegehalt

Aus dem Ausgangsmehl, das bei der Windsichtung einen etwa 24 %igen Anteil an stärkeangereicherter mittlerer Fraktion mit ca. 83 % TS Stärke lieferte, konnte durch die Prallzerkleinerung bei 200 m/s ein 40 %iger Anteil an stärkeangereichter mittlerer Fraktion mit 84,4 % TS gewonnen werden. Gleichzeitig verringerte sich der Glutengehalt von 26 % TS auf etwa 21 % TS infolge einer Abnahme des Proteingehaltes von 2,5 % TS. Das ergibt eine Glutenabreicherung gegenüber dem Glutengehalt des Ausgangsmehles von etwa 9 %.

Mit der intensiveren Zerkleinerung werden auch größere Mengen der Zwickelproteine ermahlen und aus der Stärke-Protein-Matrix herausgelöst. Sie fallen als Feingut vor allem in den feinen Fraktionen < 20 µm an. Demzufolge sind Protein- und Glutengehalte dieser Fraktionen besonders hoch, sie reicherten sich mit zunehmender Prallenergie bis 200 m/s um 5 % an. Bei der Prallzerkleinerung bei 200 m/s ist eine feine Fraktion (< 20 µm) mit etwa 47 % TS Masseanteil, über 17 % TS Proteingehalt sowie über 35 % TS Glutengehalt gewonnen worden.

Die groben Fraktionen (> 50 µm) zeigten keine großen Veränderungen der Protein- und Glutengehalte in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Die Werte der Inhaltsstoffe näherten sich den Werten der ungesichteten Mehle an.

Der Zusammenhang zwischen dem Stärkegehalt und dem Proteingehalt sowie dem Anteil der löslichen Proteine in den Fraktionen ist in Abbildung 59 dargestellt. Es konnte nur eine geringe positive Korrelation (r^2=0,59) zwischen dem Stärkegehalt und dem Anteil der löslichen Proteine ermittelt werden, die auf die Haftproteine der Stärke zurückzuführen ist. Die an der Stärke haftenden Proteine sind hauptsächlich Albumine [70].

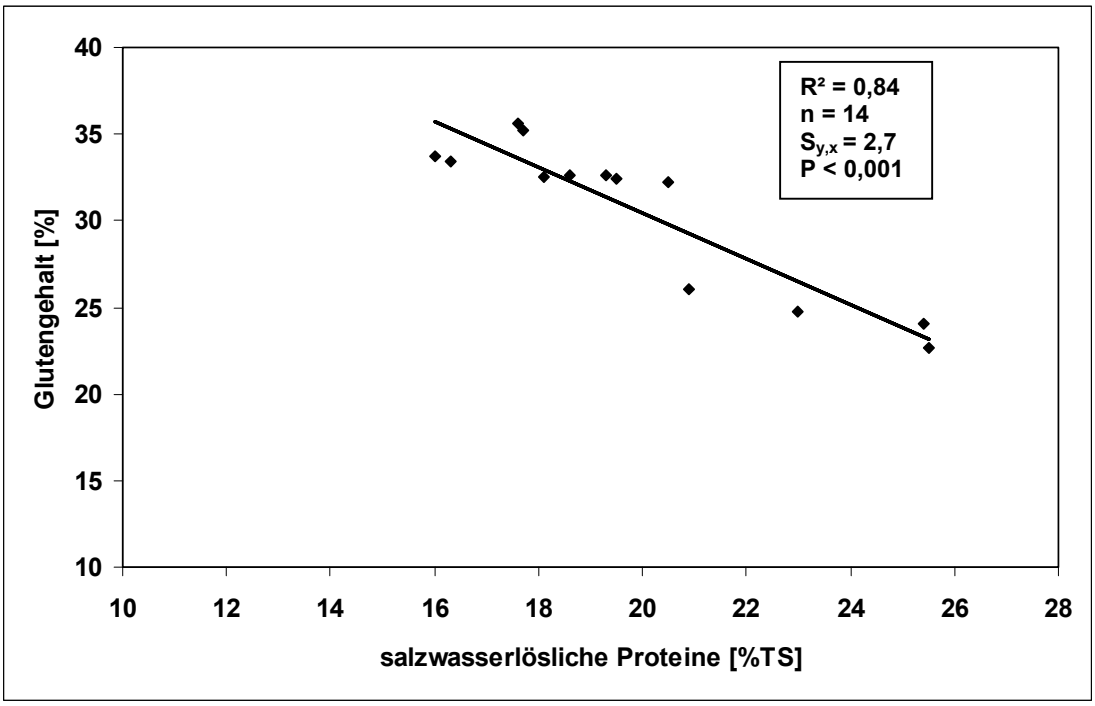


Abb. 60: Korrelation zwischen Glutengehalt und löslichen Proteinen

Eine geringfügige Abnahme der Anteile an löslichen Proteine ist in den Ausgangsmehlen beobachtet worden. Durch die Windsichtung veränderten sich diese Anteile in den Mehlfraktionen deutlich. In den proteinangereicherten Fraktionen (< 20 µm) wurde eine Abnahme der löslichen Proteine um bis zu 3 % mit steigender Zerkleinerung festgestellt, dagegen nahmen sie in den stärkeangereicherten Fraktionen (20-50 µm) um etwa 5 % zu. Die Werte der löslichen Proteine sind in den mittleren proteinarmen Fraktionen deutlich höher als die in den feinen Fraktionen. Interessant ist der Zusammenhang zwischen dem Anteil an löslichen Proteinen und dem Glutengehalt der feinen Mehlfraktionen (Abb. 60). Mit zunehmendem Gehalt an löslichen Proteinen verringerte sich der Glutengehalt. Das weist darauf hin, dass die

teinen verringerte sich der Glutengehalt. Das weist darauf hin, dass die Abnahme der Löslichkeit der nichtglutenbildenden Proteine durch die Prallzerkleinerung zu einer Zunahme des Molekulargewichtes der Glutenproteine geführt hat. Eine Abhängigkeit der Anteile der löslichen Proteine vom Aschegehalt der Mehlfraktionen ist hier nicht zu erkennen (Tab. 31).

Die Aschegehalte der Mehlfraktionen korrelierten gut mit den Proteingehalten, weil sie vorrangig innerhalb der Endospermzellen in der Proteinmatrix lokalisiert sind. So wiesen die feinen Fraktionen (< 20 µm) die höchsten Aschegehalte auf, die analog zu den Proteingehalten mit einer zunehmenden Prallgeschwindigkeit anstiegen und bei 200 m/s 0,72 % TS erreichen. Die mittleren Fraktionen (20-50 µm) wiesen infolge des abnehmenden Proteingehalts eine Abnahme der Aschegehalte bis auf 0,41 % auf.

Die Pentosangehalte der Mehlfraktionen zeigten wie bei den Ausgangsmehlen keine Veränderungen, sie blieben mit 1,7 % TS konstant.

4.2.2.2 Ergebnisse des Schweresinkverfahrens

Bei diesen Untersuchungen wurde die Sedimentierbarkeit der freiliegenden Protein- und Stärketeile bestimmt. Da diese Methode durch verschiedene variable Größen, wie Temperatur, Anzahl der Auswaschvorgänge, beeinflusst wird, sind die Ergebnisse nicht gut reproduzierbar. Die Ergebnisse zeigten aber die Tendenz, dass eine Inhaltsstoffverschiebung der Proteine und Stärke in den Mehlen infolge der Prallzerkleinerung sattfand. Die Ausbeute und Stoffzusammensetzung der getrennten Fraktionen hingen vom Zerkleinerungsgrad der Mehle und der Endospermhärte des Weizens ab [68]. Nach Hess und Rohrlich kann das Schweresinkverfahren Hinweise über die Eignung eines Mehles zum Sichten geben [17, 81, 94-98].

4.2.2.2.1 Sedimentierbarkeit der Versuchsmehle

Die Tabelle 32 zeigt die Materialbilanz und die Zusammensetzung der Mehlkomponenten bei der Fraktionierung durch die Sedimentation der drei Mehlen WM, NZ120 und NZ200.

Alle Werte beziehen sich auf die Trockensubstanz der Proben. Der Überstand sind die Mehlbestandteile, die während der Sedimentation aufschwammen oder im Sedi-

mentationsgemisch in Schwebe blieben. Der Überstand soll vorwiegend die freien Proteine enthalten, aber auch kleine Endospermbruchstücke. Im Sediment soll sich hauptsächlich die freie Stärke befinden. Große Endospermteile fallen auch im Sediment an.

Der Einfluss der Prallzerkleinerung auf die Körnung der Mehle wurde bereits in Punkt 4.1.1 beschrieben. Durch das Prallen der Mehle ist eine Steigerung des Proteingehaltes im Überstand festgestellt worden. Der Proteingehalt im abgetrennten Überstand der nachzerkleinerten Mehle hat sich gegenüber dem WM fast verdoppelt. Gleichzeitig verringerte sich der Stärkegehalt in dieser Fraktion relativ um etwa 30 %. Die Stärkefraktionen im Sediment zeichneten sich durch hohe Proteingehalte aus, was auf eine mangelhafte Sedimentation zurückzuführen ist.

Die prallzerkleinerten Mehle wiesen infolge des höheren Auflösungsgrades höhere Proteingehalte und niedrige Stärkegehalte in den abgetrennten Fraktionen auf. Diese Trennung lieferte im Vergleich zu der Windsichtung deutlich geringere Masseanteile.

Tab. 32: Freie Protein- und Stärkeanteile der Mehle

Probe	Feuchte [%]	Einwaage [g]	Anteil [% TS]	Feuchte [%]	Protein [%TS]	Stärke [%TS]
WM Mehl	14,0	19,9			**13,1**[b]	
Überstand			19,8		16,1	75,3[b]
Sediment			80,2	12,7	12,4	82,1
NZ120 Mehl	13,0	19,5			**13,7**[b]	
Überstand			11,1		29,1	64,6[b]
Sediment			88,9	13,6	11,3	83,5
NZ200 Mehl	9,0	18,9			**13,5**[b]	
Überstand			16,2		29,8	55,8[b]
Sediment			83,8	12,5	10,4	84,2

b = berechnet

4.2.2.2.2 Sedimentierbarkeit der Mehlfraktionen

Analog zu den Mehlen wurde die Sedimentierbarkeit der Mehlfraktionen untersucht. Im Gegensatz zu den ermittelten Proteingehalten (Tab. 31) wurden durch die Sedimentation Mengenanteile mit höheren Proteingehalten bis zu 70 % im Überstand gewonnen. Eine leichte Erhöhung der Ausbeuten mit steigender Prallenergie wurde auch beobachtet.

In den mittleren Mehlfraktionen sind die Stoffverschiebungen deutlicher. So verringerte sich der Stärkegehalt im Sediment um fast 60 % beim NZ200-Mehl gegenüber dem mit Walzen ermahlenen Mehl.

Bemerkenswert sind auch die erhöhten Ausbeuten der Stärke bei 200 m/s. Während sich der Proteinanteil um etwa 33 % verringert hat, erhöhte sich der Stärkeanteil um 13 % (Tab. 33).

Obwohl die Proteingehalte in den mittleren Sichtfraktionen abnahmen, erhöhten sich die Anteile an salzwasserlöslichen Proteinen mit steigender Prallenergie (Tab. 31). Die Proteingehalte im Überstand der Sedimentation zeigten aber keine signifikanten Veränderungen. Diese interessante Beobachtung weist darauf hin, dass das an der Stärke haftende Protein kein kleberbildendes Protein ist.

Tab. 33: Protein- und Stärkeanteile der Mehlfraktionen

Probe	Feuchte [%]	Einwaage [g]	Anteil [%TS]	Feuchte [%]	Protein [%TS]	Stärke [%TS]
WM <20	11,0	19,3			**14,7**[b]	
Überstand			7,6		67,1	58,8[b]
Sediment			92,4	13,4	10,4	82,5
NZ120 <20	10,0	19,1			**14,7**[b]	
Überstand			7,4		59,8	xxx
Sediment			92,6	13,2	11,1	82,3
NZ200 <20	7,0	18,5			**15,8**[b]	
Überstand			8,3		70,1	xxx
Sediment			91,7	13,1	10,9	82,5
WM 20-50	10,6	20			**11,1**[b]	
Überstand			16,3		17,1	72,9[b]
Sediment			83,7	12,7	9,9	84,6
NZ120 20-50	10,0	20			**11**[b]	
Überstand			16,3		20,3	69,2[b]
Sediment			83,7	13	9,2	85,8
NZ200 20-50	7,0	20			**8,6**[b]	
Überstand			5,4		17,9[b]	28,3[b]
Sediment			94,6	12,9	8,1	87,6

b = berechnet

Aus den Sedimentationsergebnissen der Mehle bzw. Mehlfraktionen lässt sich ableiten, dass durch die Prallzerkleinerung Anteile mit höheren Proteingehalten bis ca. 30 % TS bei den Mehlen und bis ca. 70 % TS bei den feinen Mehlfraktionen gewonnen werden können. Gleichzeitig fallen Anteile mit niedrigen Stärkegehalten bis ca. 56 % TS in den Mehlen und unter 58 % TS in den Mehlfraktionen an. Die Ausbeuten

an proteinreichen Fraktionen sind im Vergleich zur Windsichtung viel geringer. Die abgetrennten Stärkefraktionen haben trotz Prallzerkleinerung noch einen relativ hohen Proteingehalt von etwa 10 %, was auf eine feste Bindung des Proteins an der Stärke schließen lässt.
Die rheologischen Untersuchungen sollen nähere Erkenntnisse über die Klebereigenschaften der Mehlfraktionen liefern.

4.2.3 Funktionelle Eigenschaften der gesichteten Mehlfraktionen

Die Änderungen der Eigenschaften der Mehlfraktionen durch die steigende Prallbeanspruchung sind in Tabelle 32 zusammengefasst worden.
Eine mechanische Beschädigung der Stärke bei der Zerkleinerung tritt hauptsächlich an den freiliegenden Stärkekörnern auf. Das Ausmaß der Stärkeschädigung ist abhängig von der Stärkekorngröße und dem Haftprotein. Die kleinen Stärkekörner leisten den größeren Widerstand gegenüber der Zerkleinerung und werden darüber hinaus durch das anhaftende Protein geschützt. Alle drei gesichteten Mehlfraktionen zeigten aufgrund dessen unterschiedliche Beschädigungsgrade der Stärke. Die ermittelten Werte der mechanischen Stärkebeschädigung in den feinen Fraktionen waren kleiner als die der mittleren Fraktionen. Sie sind aber für eine stärkeabgereicherte Mehlfraktion relativ hoch, was auf den hohen Anteil an mittleren Stärkekörnern in den feinen Mehlfraktionen (Tab. 30a) zurückzuführen ist.
In den abgetrennten Fraktionen 20-50 µm sind die freiliegenden mittleren und großen Stärkekörner angereichert, die bei der Zerkleinerung stärker beansprucht werden, was zu den höheren Stärkebeschädigungen geführt hat. Die Stärkebeschädigung erreichte hier mit etwa 9 BV/g_{Mehl} den höchsten Wert. In den groben Fraktionen treten Endospermzellen, Zellbruchstücke und Zellverbände auf, jedoch kaum freiliegende Stärkekörner. Die Stärkebeschädigung war hier am niedrigsten. Die Werte erreichten nur 50-60 % des Beschädigungsgrades der Ausgangsmehle.

Tab. 34: Eigenschaften der Mehlfraktionen

Probe	Fraktion	A_o [m²/g]	mittl.KG [µm]	STB [BV/g]	WBV [%]
WM	feine Fraktion (<20µm)	0,73	13,9	6,8	99,2
NZ80		0,72	14,5	6,9	102,0
NZ120		0,90	11,1	5,9	103,0
NZ160		0,91	11,6	7,0	109,0
NZ200		0,89	12,8	6,9	118,6
WM	mittlere Fraktion (20-50µm)	0,36	35,9	7,2	86,3
NZ80		0,33	35,5	6,2	85,3
NZ120		0,36	30,7	7,0	79,7
NZ160		0,36	27,5	7,9	78,1
NZ200		0,36	25,5	9,3	81,4
WM	grobe Fraktion (>50µm)	0,12	117,7	3,2	82,2
NZ80		0,14	97,6	3,0	75,1
NZ120		0,16	85,3	3,7	78,3
NZ160		0,18	73,5	4,2	87,0
NZ200		0,18	74,5	4,3	83,3

WBV bezogen auf 14% Feuchte

Interessant ist der unterschiedliche Einfluss von Gutfeinheit, Protein- bzw. Glutengehalt und Stärkebeschädigung auf das Wasserbindungsvermögen (WBV) der Mehlfraktionen. Das höchste Wasserbindungsvermögen haben die feinen Fraktionen < 20 µm, das mit zunehmender Zerkleinerungsbeanspruchung von etwa 100 % bis auf 118 % bei nahezu konstanter Stärkebeschädigung angestiegen ist. Den Haupteinfluss haben hier die stetig steigenden Proteingehalte (Tab. 31), denn die spezifischen Gutoberflächen sowie die Stärkebeschädigungen veränderten sich ab 120 m/s nicht mehr. Das Wasserbindungsvermögen der stärkeangereicherten mittleren Fraktionen wies trotz der höchsten Stärkebeschädigungswerte eine abnehmende Tendenz der Wasserbindung bei ansteigender Prallgeschwindigkeit auf. Hier sind die niedrigsten Werte des Wasserbindungsvermögens ermittelt worden. Sie liegen um etwa 15-35 % unter den WBV-Werten der proteinangereicherten Fraktionen. Als Ursache können die sich stetig verringernden Gehalte an Protein und Gluten auf 8 % bzw. auf 15 % angesehen werden sowie die um etwa 60 % kleineren spezifischen Oberflächen gegenüber den Feingutfraktionen.

Die groben Mehlfraktionen > 50 µm zeigten eine mit der Prallgeschwindigkeit ansteigende Tendenz im Wasserbindevermögen. Sie erreichten bei etwa konstanter Gutoberfläche sowie bei höheren konstanten Protein- und Glutengehalten infolge einer gering zunehmenden Stärkebeschädigung höhere Wasserbindungswerte als die mittleren Fraktionen mit der höchsten Stärkebeschädigung (Tab.34).
Die Untersuchungsergebnisse belegen, dass das Wasserbindungsvermögen der unterschiedlich stofflich zusammengesetzten gesichteten Fraktionen vorrangig vom Protein- bzw. Glutengehalt abhängen und dabei die Höhe der Stärkebeschädigung eine untergeordnete Rolle spielt. Eine höhere Stärkebeschädigung bewirkte nur bei den Mehlen mit nahezu konstantem Protein- und Glutengehalt sowie zunehmender Gutoberfläche einen Anstieg im Wasserbindungsvermögen.

4.2.3.1 Viskosität und Gelfestigkeit der Stärke der Mehlfraktionen

Da durch die Prallzerkleinerung und Windsichtung der Mehle Stoffverschiebungen wesentlich in den feinen und mittleren Mehlfraktionen stattgefunden haben, wurde analog zu den Mehlen die Viskosität der Stärke dieser Mehlfraktionen im RVA untersucht.
In Abbildung 61 sind die Kurvenverläufe der beiden Mehlfraktionen dargestellt. Es zeigte sich, dass die Stärke der mittleren Fraktionen deutlich höhere Viskositäten aufweist als die der feinen Fraktionen. Dabei liegen die Viskositätsmaxima der Prallmehle über dem mit Walzen ermahlenen Mehl. Sie nahmen mit steigender Prallgeschwindigkeit signifikant zu. Die hohen Viskositäten sind auf den höheren Stärkegehalt zurückzuführen. Somit können durch Prallzerkleinerung und Windsichtung eines Mehles Mehlfraktionen unterschiedlicher Viskositäten gewonnen werden und in breiten Anwendungsgebieten eingesetzt werden (Tab. 35).

Tab. 35: Stärkeeigenschaften der Mehlfraktionen im RVA

Probe	Verkl. Z [min]	VT [°C]	VM [RVU]	Visk.-verlust [RVU]	VMN [RVU]	EV [RVU]	Retrograd. [RVU]
WM (20-50µm)	2,97	73,50	87,3	31,3	56,0	127,7	71,7
NZ120 (20-50µm)	2,97	73,50	93,2	33,2	60,0	134,2	74,2
NZ200 (20-50µm)	3,00	73,95	102,2	35,1	67,1	145,2	78,1
NZ80 (<20µm)	2,70	70,30	35,0	17,3	17,7	53,5	35,8
NZ200 (<20µm)	2,67	70,00	27,6	14,3	13,3	46,9	33,6

Verkl. Z Verkleisterungszeit, VT Verkleisterungstemperatur, VM Verkleisterungsmaximum
Visk.-verlust Viskositätsverlust, VMN Verkleisterungsminimum, EV Endviskosität
Retrograd. Retrogradation

Aufgrund der höheren Anteile an freiliegenden Stärken in den mittleren Fraktionen der geprallten Mehle nahmen die Heiß- und Kaltviskositäten der Stärke stetig zu. Dagegen nahmen sie bei den feinen Fraktionen ab. Diese Abnahme ist eine Folge des abnehmenden Stärkegehaltes. Höhere Kaltviskositäten ergeben optimale Hafteigenschaften von Mehlen. Diese Eigenschaft ist bedeutsam für Panierprodukte, z.B. Nasspanaden. Die Viskosität kann aber auch durch einen hohen Proteingehalt verringert werden [70].

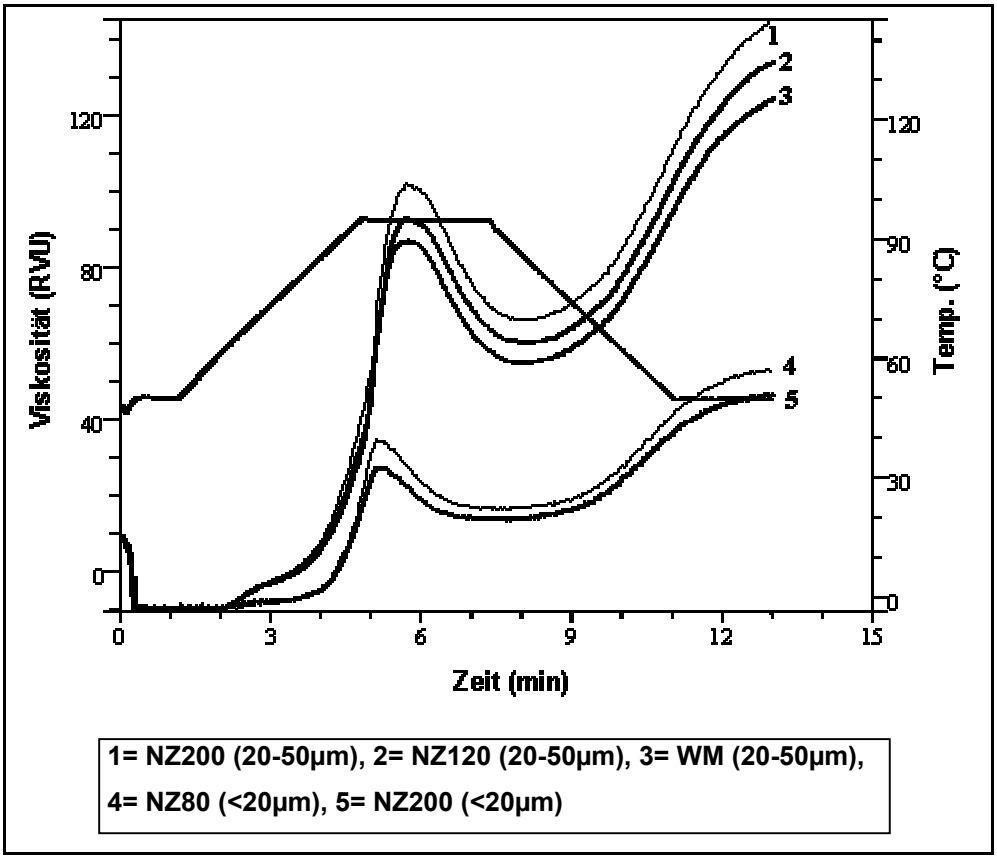


Abb. 61: Verkleisterungsverhalten der Stärke der feinen sowie der mittleren Mehlfraktionen im RVA

Mit dem höheren Viskositätsverlust wiesen die mittleren Fraktionen weniger stabile Heißviskositäten auf als die feinen Fraktionen. Des weiteren nahm die Strukturstabilität der Heißviskosität mit der Prallenergie zu. Die mittleren Mehlfraktionen zeigten höherere Retrogradationsgrade als die Mehle und die feinen Mehlfraktionen.

Vergleicht man die mittleren Mehlfraktionen mit den Ausgangsmehlen (Abb. 62), so stellt man fest, dass die Viskositäten dieser Fraktionen deutlich höher sind. Diese Zunahme ist auf die höheren Anteile der freiliegenden Stärken zurückzuführen. Die zunehmende Prallenergie verursachte bei den Mehlen steigende Stärkebeschädigung bei gleichbleibenden Stärkegehalten sowie eine Abnahme der Viskosität. Die Werte der Viskositätsverluste bei den feinen Mehlfraktionen ähneln denen der Ausgangsmehle, was mit den geringen “Viskositäten“ erklärt werden kann.

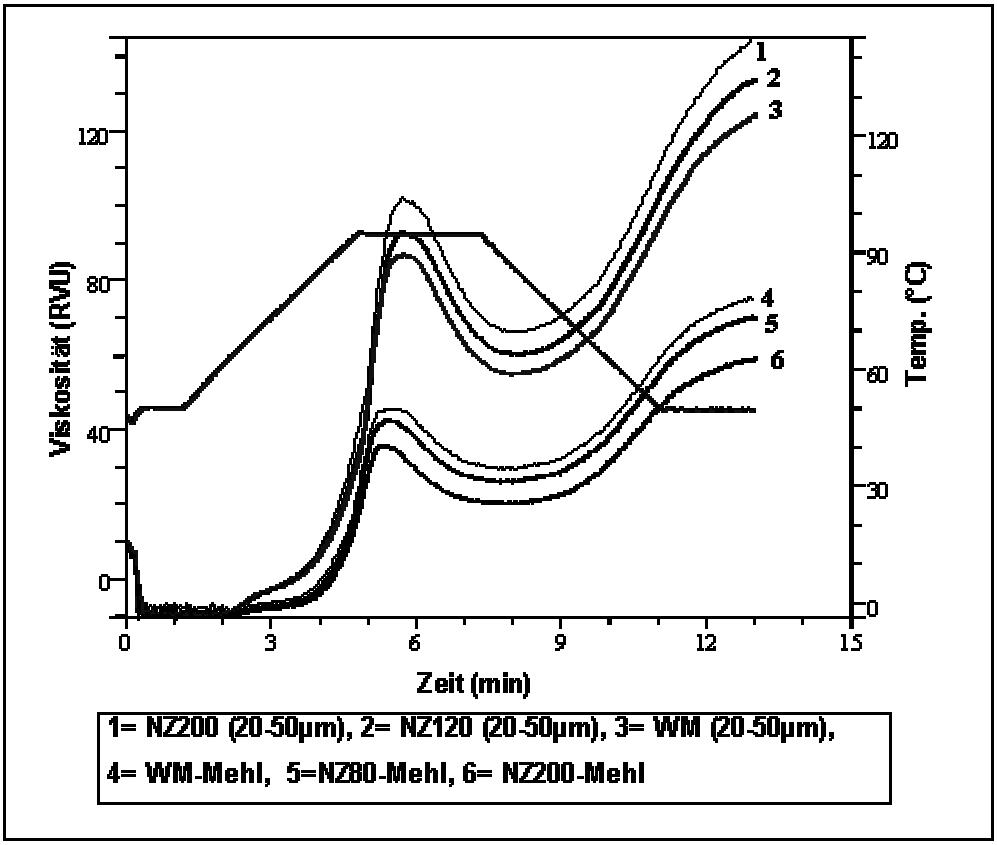


Abb. 62: Verkleisterungsverhalten der Stärke der mittleren Mehlfraktionen sowie der Mehle im RVA

Analog zu den Viskositäten haben sich die “Gele“ der mittleren Mehlfraktionen verhalten. So zeigte das Gel der mittleren Fraktion aus dem bei 200 m/s geprallten Mehl die höchste Festigkeit. Die erreichten Werte lagen gegenüber den Mehlen etwa um den Faktor 2 und gegenüber den feinen Fraktionen um etwa den Faktor 4 höher (Abbildungen 63 und 64). Die hohe Gelfestigkeit hängt mit dem Retrogradationsgrad der Stärke im Mehl bei der Verkleisterung zusammen.

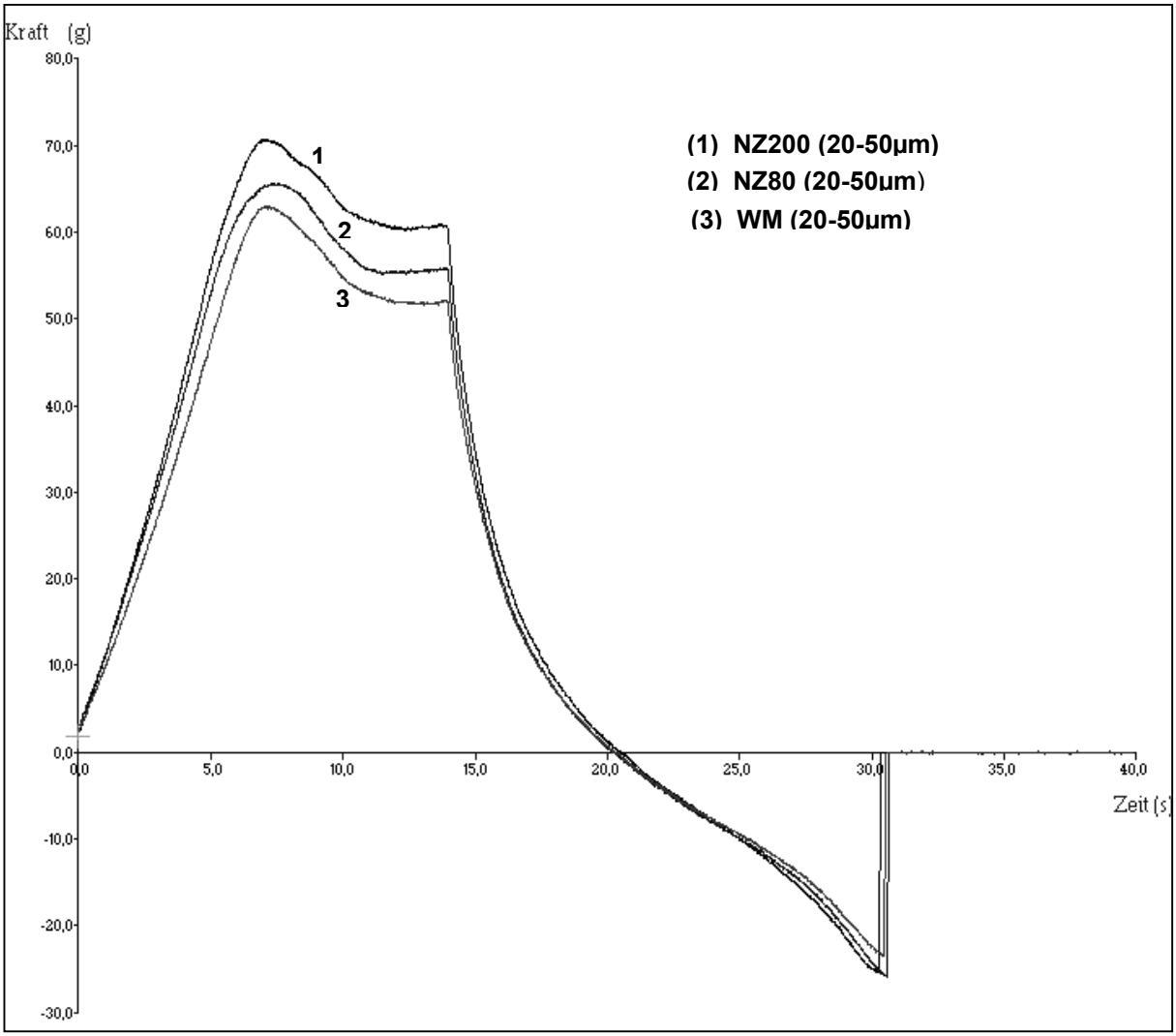


Abb. 63: Festigkeit der “Gele“ aus den mittleren Mehlfraktionen

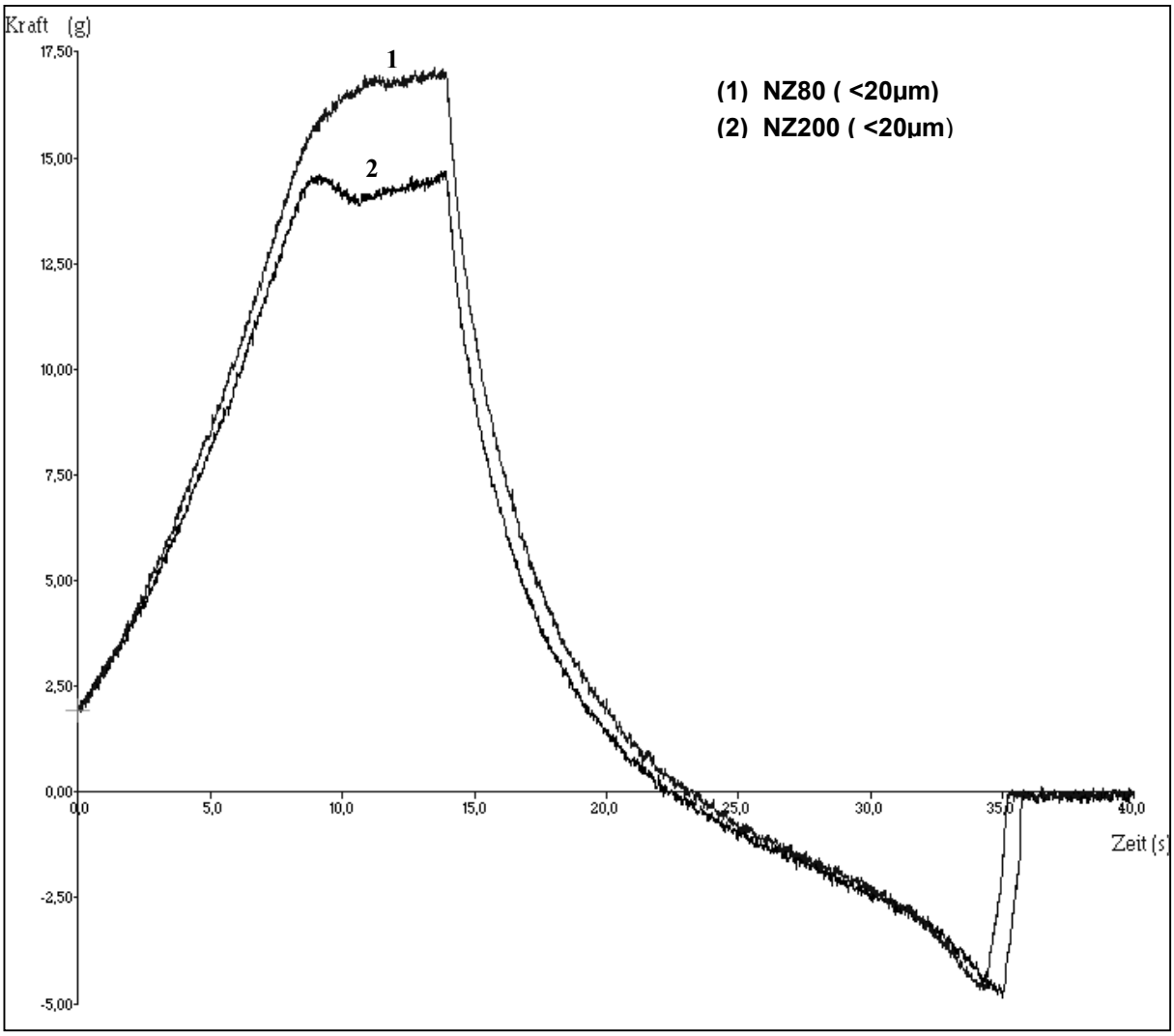


Abb. 64: Festigkeit der "Gele" aus den feinen Mehlfraktionen

4.2.4 Rheologische Eigenschaften von Gluten und Teigen

4.2.4.1 Dehnungseigenschaften des Glutens

Bei der Bestimmung der Dehnungseigenschaften der Glutene aus den feinen Mehlfraktionen ließ sich feststellen, dass sich der Dehnwiderstand des Glutens mit der zunehmenden Prallenergie nur leicht verringert hat, die Dehnbarkeit nahm deutlich ab (Abb. 65). Die Elastizität der Glutene nahm aber mit der Energie signifikant zu. Eine Steigerung der Elastizität von 66.10^{-4} auf 76.10^{-4} N/mm² bei 200 m/s wurde ermittelt. Diese Zunahme ist durch den erhöhten Anteil an freien Thiolgruppen bei der Prallvermahlung erklärbar. Trotz der Erhöhung des Proteingehaltes sowie des Glutengehaltes der feinen Mehlfraktionen infolge der Prallenergie sind diese Verände-

rungen vor allem auf Verschiebungen von Proteingruppen zurückzuführen. Bei der Prallung und Windsichtung ändert sich die Proteinverteilung der Osborne-Fraktionen. Die Abnahme der Dehnbarkeit ist vermutlich durch einen erhöhten Strukturierungsgrad der feinen Teilchen hervorgerufen worden.

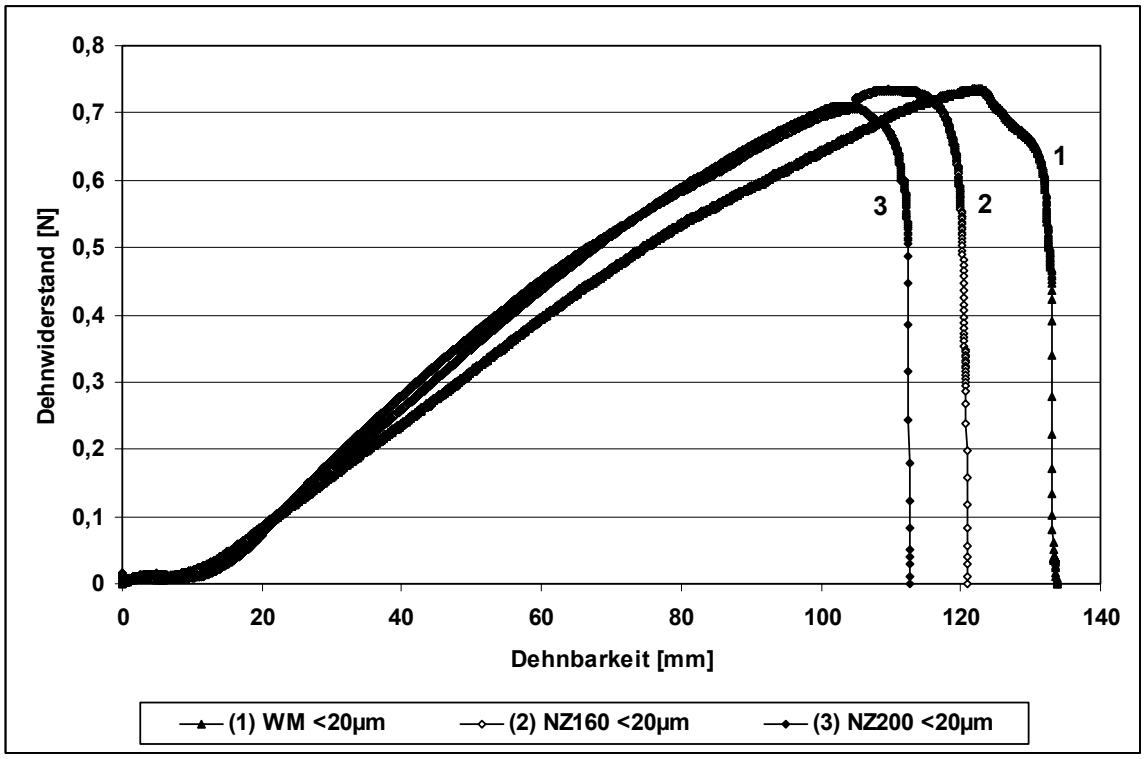


Abb. 65: Mikroextensogramme am Gluten der feinen Mehlfraktionen

Bemerkenswert ist das Verhalten der Glutene der groben Mehlfraktionen. Hier nahmen der Dehnwiderstand und die Dehnbarkeit des Glutens mit der Prallenergie deutlich ab (Abb. 66). Ebenso ist eine geringfügige Abnahme der Elastizität mit der Prallung von 70.10^{-4} auf 68.10^{-4} N/mm² zu erkennen. Obwohl die groben Fraktionen die gleiche Protein- und Glutengehalte aufwiesen (Tab. 31), änderten sich die Dehneigenschaften beträchtlich.

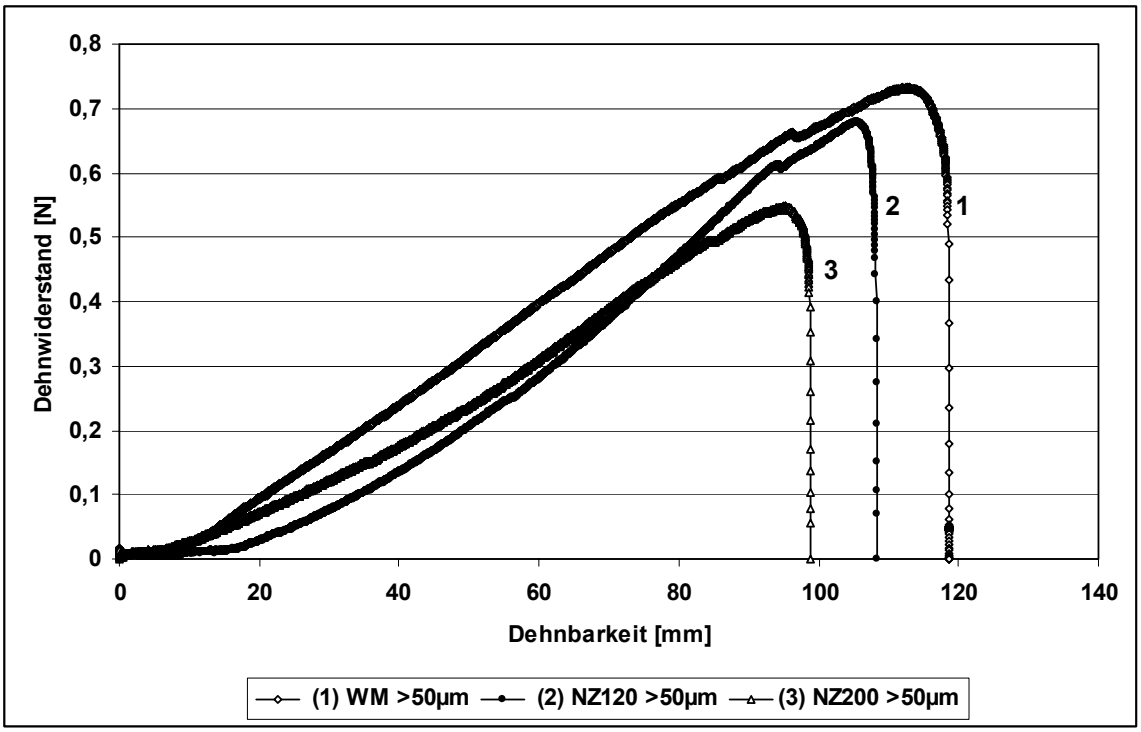


Abb. 66: Mikroextensogramme am Gluten der groben Mehlfraktionen

4.2.4.2 Viskoelastisches Verhalten von Gluten der Mehlfraktionen

In den Abbildungen 67 und 68 ist die Deformationsmessung der Glutene aus den feinen Mehlfraktionen des Walzenmehles und des mit 200m/s geprallten Mehles dargestellt. Es ist hier auch zu erkennen, dass der Elastizitätsmodul nach der Prallzerkleinerung gesunken ist. Diese Beobachtung stimmt mit dem Ergebnis des Zugversuches überein (Abb. 65).

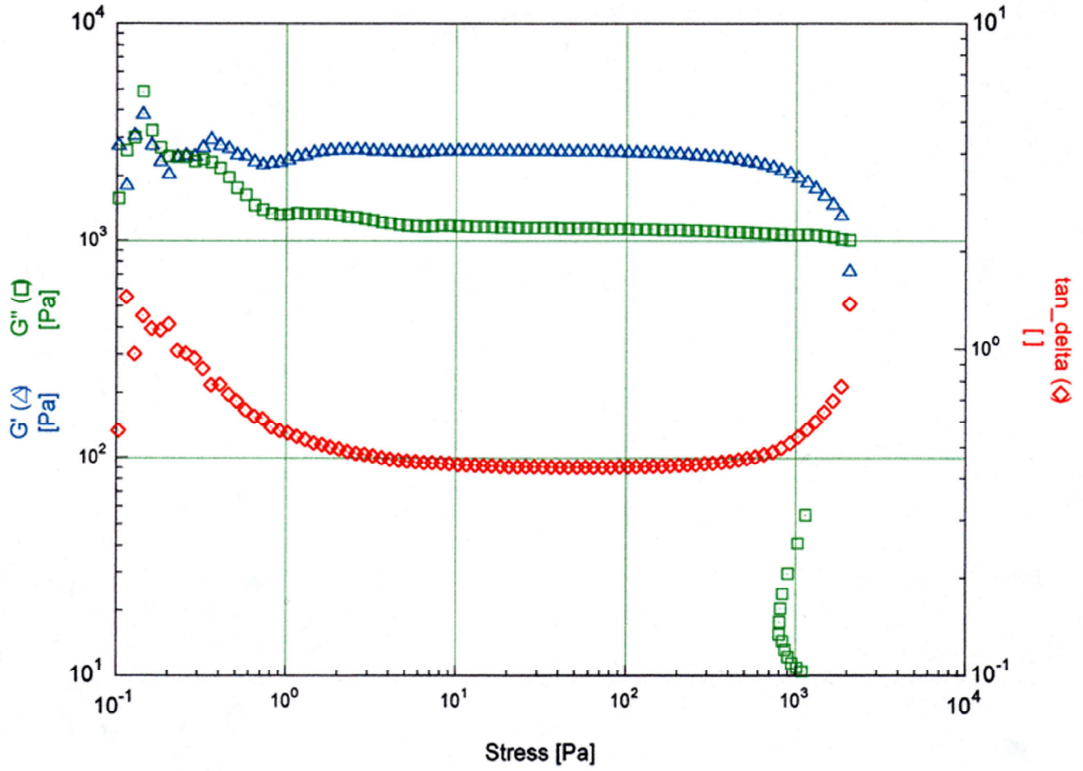


Abb. 67: Amplitudensweep am WM(<20 µm)-Gluten

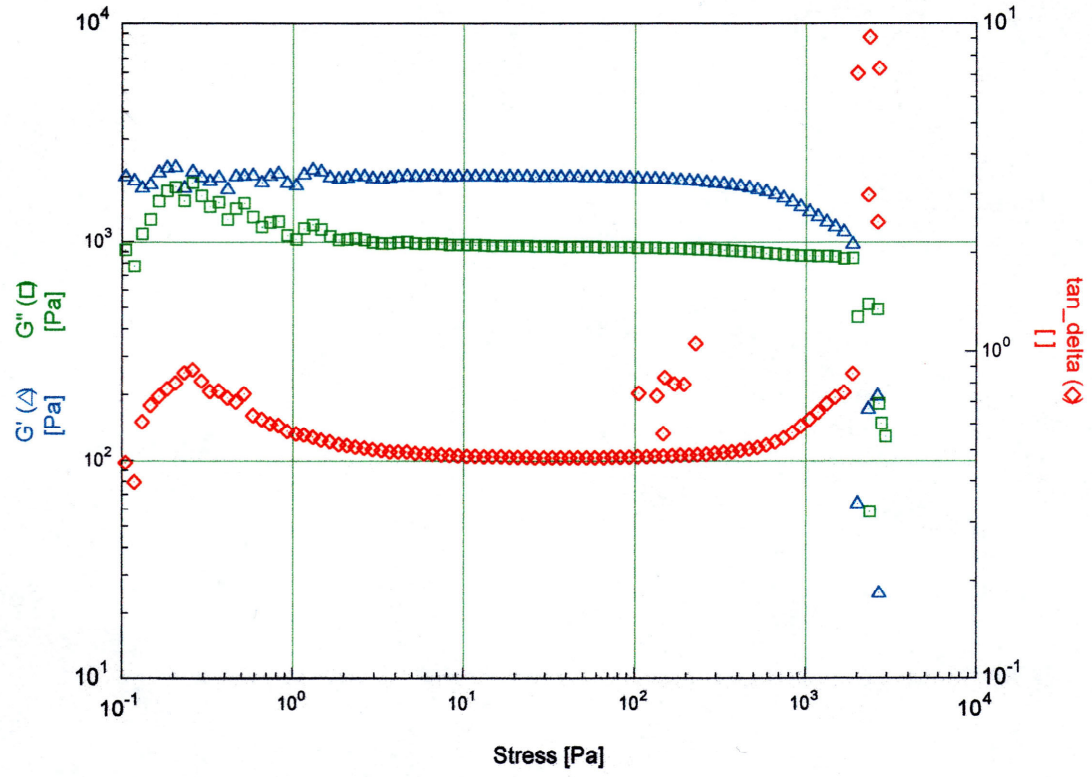


Abb. 68: Amplitudensweep am NZ200 (<20 µm)- Gluten

4.2.5 Schlussfolgerungen zu den Eigenschaften der windgesichteten Mehlfraktionen

Die durch die Prallvermahlung freigelegten Stoffe Protein und Stärke wurden mittels Windsichtung in Abhängigkeit von ihrer Korngröße und Dichte in unterschiedlichen Fraktionen an- und abgereichert. Bei der Abtrennung der Mehlteilchen konnte aus dem NZ200-Mehl der höchste Anteil an feiner Fraktion (< 20 µm) gewonnen werden. In der feinen Fraktion des mit 200 m/s geprallten Mehles konnte eine Anreicherung von +14 % vom Gesamtprotein sowie eine Abreicherung –13,6 % der Stärke vom Gesamtstärkeanteil erreicht werden. Bei dem mit Walzen ermahlenen Mehl fand dagegen in der feinen Fraktion mit Werten von +0,35 % sowie ±0 % fast keine Inhaltsstoffverschiebung statt. Durch die Proteinabtrennung reicherte sich in den mittleren Fraktionen vor allem die Stärke an. Im mit 200 m/s geprallten Mehl nahm der Stärkegehalt um +12 % zu, im Walzenmehl um +3 %. Damit wird deutlich, dass mit Walzen ermahlene Mehle aus harten Weichweizen einen zu geringen Auflösungsgrad für eine Windsichtung und Proteinverschiebung besitzen und eine Mehlnachzerkleinerung sinnvoll ist.

Bemerkenswert ist die Verschiebung der Anteile an salzwasserlöslichen Proteinen (nichtglutenbildende Proteine) in den mittleren Fraktionen. Sie stiegen mit Erhöhung der Prallintensität um bis zu 5 % deutlich an. Es ist ein weiterer Beleg dafür, dass diese Proteine im Endosperm hauptsächlich an der Stärke haften (Haftproteine).

Die Ergebnisse der Fraktionierung von Mehlen nach dem Schweresinkverfahren zeigten bessere Abtrennungen der Mehlkomponenten Protein und Stärke infolge zunehmender Prallbeanspruchung. Mit dem Schweresinkverfahren konnten Fraktionen aus den Mehlen mit maximal 30 % Protein sowie bis zu 56 % im Minimum Stärke erreicht werden. Diese Methode ist aber aufgrund der Arbeitsaufwendigkeit und der schlechten Reproduzierbarkeit der Messwerte ungeeignet. Des weiteren ist der Produktanfall im Vergleich zur Windsichtung sehr gering. Dadurch findet nur eine geringe relative Verschiebung der Stoffe statt. Die Abtrennungen der Mehlkomponenten Protein und Stärke aus den Mehlfraktionen mit dem Schweresinkverfahren war weniger effektiv als die Windsichtung. Hier wurden zwar höhere Protein- und Stärkegehalte abgetrennt, jedoch fielen die Produktanteile gering aus. Anteile von maximal 8 % konnten gewonnen werden.

Die REM-Aufnahmen der Mehlfraktionen ermöglichten Einblicke in die Struktur und Verteilung der Inhaltsstoffe. Die mittleren Fraktionen besaßen höhere Anteile an mittel bis großen Stärkekörnern. Damit wiesen diese Fraktionen nicht nur höhere Stärkegehalte auf, sondern besitzen auch andere Verkleisterungscharakteristika.
Im Gegensatz zu den Mehlen ist eine positive Korrelation zwischen dem Wasserbindungsvermögen und dem Proteingehalt bei den Mehlfraktionen ermittelt worden. Das Wasserbindungsvermögen der proteinreichen Mehlfraktion stieg um bis zu 18 % gegenüber dem Wasserbindungsvermögen des mit Walzen ermahlenen Mehles bei gleicher Stärkebeschädigung.

Das Verkleisterungsverhalten der feinen Mehlfraktionen ähnelte denen der Mehle. Durch die Verschiebung des Verhältnisses der Mehlkomponenten Protein und Stärke sowie des Anteils beschädigter Stärkekörner in den mittleren Fraktionen stiegen die Viskositäten deutlich an. Während des Abkühlens des Kleisters ist ein stetiger Anstieg der Konsistenz im Viskogramm zu beobachten, der in Abhängigkeit von der Beanspruchung unterschiedlich verlief. Während der Konsistenzanstieg der feinen Fraktionen geringer ausfiel, ist der Anstieg bei den mittleren Fraktionen wesentlich größer. Darüber hinaus zeigten die mittleren Fraktionen mit steigender Energie eine starke Neigung zur “Gelbildung“ im Gegensatz zu den Mehlen und Mehlfraktionen. Inwieweit der Einsatz der mittleren Fraktionen zur Verbesserung der Frischhaltung von Broten beitragen kann, sollte in weiteren Arbeiten untersucht werden.
Die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen am Gluten der feinen und groben Fraktionen zeigten die starke Wirkung der Verschiebung von Proteinfraktionen. Die Extensogrammwerte und die Ergebnisse der Oszillastionsmessungen wiesen auf die unterschiedliche Dehnungseigenschaften des Glutens dieser Fraktionen hin. Die feinen Mehlfraktionen bilden elastischere und festere Glutene aus. Der Einsatz der feinen Fraktion des mit 200 m/s geprallten Mehles zum Handelsmehl ergab eine Verbesserung der Teigeigenschaften.

5 Zusammenfassung

Die Prozesseigenschaften eines Weizenmehles hängen nicht nur von der Qualität des verwendeten Weizens, sondern auch von den technologischen Eigenschaften seiner Inhaltsstoffe ab, wobei die Hauptkomponenten Stärke und Protein die größte Bedeutung haben. Die Mühlen sind neben der Herstellung von Typenmehlen für die Produktion von Backwaren bestrebt, Mehle mit unterschiedlichen Eigenschaftsprofilen zu gewinnen. Die Anwendung neuer Verfahren, z.B. chemische, thermische und/oder hydrothermische Behandlungen von Mehlen, aber auch die Prallmahlung und Windsichtung ermöglichen die Herstellung von Mahlprodukten bzw. Mehlen für spezielle Einsatzmöglichkeiten. Diese Produkte können bei der Herstellung von Lebensmitteln (Panaden, Suppen, TK-Produkten), aber auch bei der Herstellung von Verpackungsmitteln und Klebstoffen verwendet werden.
Die konventionelle Vermahlung von Weizen mit Walzenstühlen ergibt Mehle mit geringem Auflösungsgrad. Durch eine zusätzliche Prallzerkleinerung des Mehles wird der Auflösungsgrad erhöht. Dabei verändern sich die funktionellen Eigenschaften der Inhaltsstoffe.

In der Arbeit wird der Einfluss hoher Energiedichten bei der Nachzerkleinerung von Mehlen in einer Stiftmühle auf die Stoffzusammensetzung und die Eigenschaften der Mahlprodukte untersucht. Dabei sollen Erkenntnisse über die Mehle und die Veränderungen der Eigenschaften des Glutens sowie der Stärke sowie deren Auswirkungen auf die Teig- und Backeigenschaften gewonnen werden.

Für die Untersuchungen wurde die Elite-Weizensorte „Alidos“ verwendet, ein Weichweizen mit harter Endospermstruktur und hohem Proteingehalt. Aus dem Weizen wurde mittels Mahlautomat ein Mehl mit 0,54 % TS Asche, 14,3 % TS Protein sowie 30 % TS Gluten ermahlen, in einer Stiftmühle mit Rotorgeschwindigkeiten von 80-200 m/s nachzerkleinert und anschließend in die Fraktionen < 20 µm, 20-50 µm sowie > 50 µm gesichtet. Infolge der hohen Zerkleinerungsintensitäten wurde bei 200 m/s ein Auflösungsgrad der Mehlkörperstruktur von 95 % erreicht. Der Feingutanteil stieg im Mehl um das 5-fache auf ca. 56 % gegenüber dem mit Walzen ermahlenen Mehl an. Die dabei eingetretenen Verbesserungen der Gluteneigenschaften, wie höhere Teigstabilität, Zunahme der Elastizität und der Gebäckvolumina, können mit Oxidationsvorgängen während der Teigherstellung erklärt werden, die durch eine

erhöhte Anzahl freier Thiolgruppen (SH-Gruppen) bei der Vermahlung begünstigt werden. Inwieweit bei der Prallzerkleinerung eine Oxidation stattgefunden hat, konnte nicht geklärt werden.

Die höheren Wasseraufnahmen der Mehle sind aufgrund der erhöhten Stärkebeschädigungsgrade erreicht worden. Des weiteren zeigte die Stärke der geprallten Mehle niedrigere Viskositäten und geringere Retrogradationen.

Das Windsichten ergab auch bei dem relativ harten Weizen die erwarteten An- und Abreicherungen an Stärke bzw. Protein in den Fraktionen unter 50 µm. Die erzielten Trennschärfen am Trennschnitt 20 µm betrugen nur ca. 40 %, d.h. weniger als die Hälfte der vorhandenen Feinstgutteilchen < 20 µm konnte abgetrennt werden. Die Proteinanreicherungen in den feinen Fraktionen und die Stärkeanreicherungen in den mittleren Fraktionen nahmen mit der Strukturauflösung zu. Die gewonnen Feinstgutfraktionen hatten einen maximalen Masseanteil von etwa 47 % mit über 17 % Protein sowie über 35 % Gluten. Das ergibt eine relative Anreicherung von etwa +14 % Protein sowie etwa +11 % Gluten. Die stärkeangereicherten Fraktionen erreichten einen Masseanteil von 35-40 % mit einer maximalen Glutenabreicherung um etwa 9 % auf 21 %. Daraus resultiert eine Abreicherung von ca. 18 % vom Gesamtglutengehalt. Protein- und Stärkeverschiebungen, wie sie vom Windsichten weicherer Weizen bekannt sind, konnten mit dem Elite-Weizen nicht erzielt werden. Als Ursache kann der höhere Haftproteinanteil der Stärkekörner angesehen werden. Mit den Proteinveränderungen wurden auch zunehmende Anreicherungen der löslichen Proteine in den stärkeangereicherten Fraktionen festgestellt. Von der Wahl des Trennschnittes hängen Masseanfall und stoffliche Anreicherung der jeweiligen Fraktion ab. Eine Verschiebung des Trennschnittes, z.B. der Feinstgutfraktion von d_{TG}=20 µm auf d_{TG}=15 µm erhöht den Protein- und Glutengehalt bei Abnahme des Masseanteils. Analoges trifft für die Stärkeanreicherung bei einer Verschiebung des Trennschnittes von 50 µm auf 30 µm zu. Demzufolge ist der Trennschnitt in Abhängigkeit von Inhaltsstoffverschiebung zu wählen.

Die mechanische Stärkebeschädigung hat auf das Wasserbindevermögen gegenüber dem Protein- und Glutengehalt in den Fraktionen unter 50 µm eine untergeordnete Bedeutung. So wurden in den proteinangereicherten Fraktionen WBV-Werte von über 100 % erreicht, dagegen haben die stärkeangereicherten Fraktionen mit den höchsten Anteilen an beschädigter Stärke nur ein Wasserbindevermögen von etwa 80 %. Die Stärken der mittleren Fraktionen zeigten deutlich höhere Viskositäten

und Retrogradationen gegenüber den feinen Fraktionen, aber auch im Vergleich zu den Ausgangsmehlen. Die Werte lagen 3-fach bzw. 4-fach höher.

1. Schlauri, M. Mehlqualitätsveränderung durch thermische Behandlung
Getreide Mehl und Brot 53 (1999) 5, S. 308-309

2. Erling, B. J./ Mehle mit Funktion
Sonderdruck aus Lebensmitteltechnik
Heft 7-8 (2002), S. 32-34

3. Handreck, B./ Pötschke, L. Einfluss unterschiedlicher Zerkleinerungsbedingungen in Prallmühlen auf das Vermahlen von Weizengrieß
Getreide Mehl und Brot 49 (1995) 4, S. 202-207

4. Pamuk, S. Untersuchungen der Inhaltsstoffzusammensetzung und Backverhalten prallgemahlener Weizenmehle
Diplomarbeit (1999), TU-Berlin

5. Willm, C. Stand der Windsichtung in Frankreich
Getreide Mehl und Brot 38 (1984) 7, S. 215-218

6. Müller, U./ Schneeweiß, V. Optimierte Mehle – Teil 1
Brot und Backwaren (2001) 11, S. 32-34

7. Belitz, H.-D/ Grosch, W. Lehrbuch der Lebensmittelchemie
Springer- Verlag, 3. Auflage (1987)

8. FAO http:\\ www.fao.org
World crops production
statistics 2002

9. Moosbaum GmbH www.moosbaum.de
Kalender-Motive 2003

10. Schäfer, W. Das Getreide
Eine Waren- und Sortenkunde
Verlag Alfred Strothe, 5. Auflage (1985)

11. Pomeranz, Y. Wheat
Chemistry and Technology
Vol. 1 und 2
AACC, 1988

12. Pawelzik, E. Inhaltsstoffe des Getreides
1. Lehrbrief, 1991
Humboldt-Universität zu Berlin

13. Klingler, R. W. Grundlagen der Getreidetechnologie
Behr's Verlag Hamburg, 1995

14. Weipert, D. Rheologische Probleme zur Charakterisierung von Roggen- und Weizenteigen
Mühle und Mischfuttertechnik 115 (1978) 20, S. 281-287

15. Wrigley, C. W./ Bietz, J. A Proteins and amino acids
Wheat Chemistry and Technology
AACC (Pomeranz, Y. 1988), S. 159-275

16. Hübner, F. R. Wheat Flour Proteins and Their Functionality in Baking
Baker Digest. 51(1977) 5, S. 25-28, 30-31 and 154

17. Rohrlich, M. Wege und Umwege zur Klärung der Kleberproteinstruktur
Getreide Mehl und Brot 27 (1973) 11, S. 337-342

18. Köhler, P./ Großberger, A./ Schieberle, P. Fraktionierung und Rekombination von Weizenmehl-Einfluss auf Teigrheologie und Backverhalten
Getreide Mehl und Brot 53 (1990) 1, S. 16-19

19. Dexter, J. E./ et. al. The Effect of Protein Content and Starch Damage on the Physical Dough Properties and Bread Making Quality of Canadian Durum Wheat
J. Cereal Sci 10 (1994) S. 139-151

20. Antes, S./ Wieser, H. Quantifizierung und Lokalisierung proteingebundener Thiolgrupen in Weizenmehl
Getreide Mehl und Brot 54 (2000) 5, S. 290-294

21. Grosch, W./ Wieser, H. Redox reactions in wheat dough as affected by ascorbic acid
J Cereal Sci 29 (1999) 1, S. 1-16

22. Kim, J.-J./ Kieffer, R./ Belitz, H.-D Rheologische Eigenschaften von rekonstituierten Weizenklebern mit variierenden Anteilen an Prolaminfraktionen verschiedenen Getreidearten
Z. Lebensm Unters Forsch (1988) 186, S. 16-21

23. Dirndorfer, M./ Kieffer, R./ Belitz, H.-D Veränderungen an Kleber verschiedener Weizensorten durch Oxidation
Z. Lebensm Unters Forsch 183 (1986) S. 33-38

24. Nierle, W./ Kersting, H.-J. Einflussfaktoren auf Stärke/Proteintrennung
Getreide Mehl und Brot 53 (1995) 1, S. 20-26

25. Weegels, P. L./ Hamer, R. J./ Schonfield, J. D. Functional Properties of Wheat Glutenin J. Cereal Sci. 23 (1996) S. 1-18

26. Kasarda, D. D. Glutenin Structure in Relation to Wheat Quality Wheat is Unique AACC (Pomeranz, Y. 1989), S. 277- 302

27. Southan, M./ Mac Ritchie, F. Molecular Weight Distribution of Wheat Proteins Cereal Chem 78 (1999), S. 827-836

28. Wieser, H./ Seilmeier, W./ Belitz, H.-D. Relationship between the amount of gluten protein types and the rheological properties of different wheat cultivar: In Gluten Proteins (1993), AACC, S. 141-150

29. Wieser, H./ Kieffer, R. Correlations of the amounts of gluten proteins with technological properties of wheat flours determined on a micro- scale J Cereal Sci 34 (2001) S. 19-27

30. Wieser, H./ Zimmermann, G. Importance of amounts and properties of high molecular weight subunits of glutenin for wheat quality Eur Food Res Technol 210 (2000) S. 324-330

31. Hoseney, R.C. Einflussgrößen beim Backversuch von Weizenmehlen Getreide Mehl und Brot 47 (1993) 3, S. 22-24

32. D'Appolonia, B. L./ Gilles, K. A. Pentosans Associated with Gluten Cereal Chem 48 (1971), S. 427

33. Jelaca, S. L. / Hlynka, I. Effect of Wheat- Flour Pentosans in Dough, Gluten and Bread Cereal Chem 49 (1972) , S. 489

34. D'Appolonia, B. L./ Kim, S. K. Wheat Flour Pentosans The Bakers Digest 50 (1976) 6, S. 45-49

35. Meuser, F./ Reimers, H./ Fischer, G. Physikalische und chemische Untersuchungen an Mehlen aus unterschiedlich vermahlenem Weizen im Hinblick auf deren Qualität Mühle und Mischfuttertechnik 114 (1977) 13, S.180-187

36. Seib, P. A. Wheat Starch: Isolation, Structure and Properties Oyo Toshitsu Kagaku, Vol. 4, No. 1 (1994), S. 49-69

37. Hoseney, R. C. Principles of Cereal, Science and Technology
AACC, Second Edition, 1994

38. Klingler, R. W./ Meuser, F./ Niediek, E. A. Einfluss der Art der Energieübertragung auf strukturelle und funktionelle Merkmale von Stärke
starch /Stärke 38 (1986) 2, S. 40-44

39. Pelshenke, P. F./ Seibel, W./ Zwingelberg, H. Zerkleinerung, Windsichtung und Stärkebeschädigung
Die Mühle 28 (1961) 44, S. 573-578

40. Farrand, E. A. The Influence of Particle Size and Starch Damage on the Characteristic of Bread Flour
The bakers Digest, February 1972, S. 22-26

41. Stoich, A. Einfluss der Prallzerkleinerung auf die mechanische Stärkebeschädigung, Teig- und Backeigenschaften von Weizenmehl
Diplomarbeit (1994), TU-Berlin

42. Casier, J./ Stephan, H. De Paepe, G. Einfluss der wasserlöslichen Endospermpentosane auf die Teig- und Gebäckeigenschaften bei der Verarbeitung von Weichweizen
Brot und Gebäck 12 (1969) 12, S. 231-235

43. Mac Arthur, I. A./ D'Appolonia, B. L. The Carbohydrates of Various Pin Milled and Air-Classified Flour Streams. II. Starch and Pentosans
Cereal Chem 54 (1977), S. 669

44. Simmonds, D.-H./ et al. The effect of lipid on the solubility and molecular weight range of wheat gluten and storage proteins
Cereal Chem 48 (1972) S. 317

45. Vorweck, K. Möglichkeiten der Prallzerkleinerung in der Müllerei
Mühle und Mischfuttertechnik 114 (1977) 1, S. 9-13

46. Pötschke, L. Technologisches Praktikum
1. Lehrbrief
Humboldt- Universität zu Berlin, 1981

47. Handreck, B./ Pötschke, L. Vermahlung von Weizengrieß erster Qualitätsstufe in Prallmühlen unterschiedlicher Wirkprinzipien
Mühle und Mischfuttertechnik 132 (1995) 29, S. 479-483

48. Zwingelberg, H. Prallzerkleinerung und Windsichtung integriert in ein Vermahlungssystem
Getreide Mehl und Brot 52 (1998) 1, S. 18-23

49. Zwingelberg, H. Die Stiftmühle in der Weizenvermahlung; 1. Mitteilung: Zerkleinerung von Grießen und Dunsten
Mühle und Mischfuttertechnik 131 (1994) 34, S. 443 – 445

50. Zeuke, A. Einfluss der Prallzerkleinerung auf die Mehlqualität, Teig- und Backeigenschaften
Diplomarbeit (1996), TU-Berlin

51. Friedrich, H. P./ Handreck, B Einsatz von Stiftmühlen im Vermahlungsdiagramm von Weizen
Die Mühle + Mischfuttertechnik 127 (1990) 5, S. 273-275

52. Handreck, B./ Pötschke, L Mahlergebnisse und Mehlqualität prallzerkleinerter Dunste aus unterschiedlichen Weizensorten
Mühle + Mischfuttertechnik 133 (1996) 23, S. 365-370

53. Zwingelberg, H. Zweifachzerkleinerung- Walzenstuhl und/oder Stiftmühle
Mühle und Mischfuttertechnik 131 (1994) 38, S. 443-445

54. Handreck, B./ Pötschke, L. Mahlergebnisse und Mehlqualität prallzerkleinerter Dunste aus verschiedenen Weizensorten
Mühle und Mischfuttertechnik 133 (1996) 23, S. 365-370

55. Schulz, O. Einfluss von Vermahlungsparametern auf mechanolytische Effekte an Weizenmehlproteinen
Diplomarbeit (1993), TU-Berlin

56. Pelshenke, P.F. et.al. Rapid-Mix-Test
Standard-Backmethode für Brötchen
Arbeitsgemeinschaft für Getreideforschung e.V.
Detmold (1978)

57. Delgado, E. Einfluss der Prallzerkleinerung auf die Änderung der Mehleigenschaften und die mechanische Modifizierung der Weizenproteine
Dissertation (1995), TU-Berlin

58. Greene, F. C. / Kasarda, D. D. A polar interactions of alpha-gliadin
Cereal Chem 48 (1971), S. 601-608

59. Wieser, H./ Kieffer, R. Einfluss unterschiedlicher Vermahlungsintensitäten bei Weizen auf Teig und Kleber
Deutsche Forschungsanstalt- Bericht 1995

60. Quabs, M. Untersuchungen zur Prallvermahlung von Weizengrieß
Diplomarbeit (1994), TU-Berlin

61. Banafa, W. Einfluss der Prallvermahlung auf die Veränderung der Proteine bei der Weizendunstvermahlung
Diplomarbeit (1995), TU-Berlin

62. Ritter, H. Untersuchungen zur Weizendunstvermahlung mit Prallbeanspruchung
Diplomarbeit (1993), TU-Berlin

63. Redemann, E. Wirkung verschiedener Zerkleinerungsprinzipien auf die mechanische Beschädigung der Stärke in unterschiedlichen Mehlfraktionen
Diplomarbeit (1993), TU-Berlin

64. Schulze, M./ Draheim, L./ Faustmann, S. Prallzerkleinerung erhöht Durchsatz und senkt Energieaufwand
Getreidewirtschaft 19 (1985) 12, S. 282-286

65. Hanssen, N. 3. Internationaler Brotkongress in Hamburg
Jg. 1955, S.184

66. Cleve, H. Analytische Befunde an windgesichtetem Mehl
Getreide und Mehl (1959) 8, S. 81-86

67. Koch, I. Einfluss der Prallzerkleinerung auf die Trennung und mechanolytische Veränderung der Inhaltsstoffe Stärke und Protein bei der Feinzerkleinerung von Weizenmahlprodukten
Diplomarbeit (1995), TU-Berlin

68. Meuser, F./ Rajani, Ch./ Juretko, A. Zur Problematik der mechanischen Trennung des Weizenendosperms in Stärke und Protein
Getreide Mehl und Brot 31(1977) 8, S. 199-204

69. Kurimoto, Y./ Shelton, D. R. The effect of Flour Particle Size on Baking Quality and other Flour Attributes
Cereal Foods World 33 (1988) 5, S. 429- 433

70. Rohrlich, M./ Müller, V. Freies Protein und Freie Stärke in Weizen – und Roggenmehl
Die Stärke (1969) 21, S. 29-38

71. Zwingelberg, H. Prallzerkleinerung und Windsichtung: Weizeneigenschaften und Mehlqualität
Mühle und Mischfuttertechnik 134 (1997) 12, S. 354-358

72. Black, H. C./ Williams, P. C. — A laboratory Air- Classifier
Cereal Science Today 14 (1969) 11, S. 358-365

73. Dick, J. W./ Shuey, W. C./ Banasik, O. J. — Adjustment of Rheological Properties of Flours by Fine Grinding and Air Classification
Cereal Chem. 54 (1977), S. 246

74. Nowakowski, D. M./ Susuluski, F. W./ Reichert, R. D. — Air Classification of pin milled break and middling Flours from Hard Red Spring Wheat
Cereal Chem 64 (1987) 6, S. 363-369

75. Nenninger, E. — Windsichtung von Weizenmehlen
Die Mühle 96 (1959) 17, S. 214-217

76. Skalli, A. — Stoffliche Zusammensetzung und funktionelle Eigenschaften prallzerkleinerter und windgesichteter Weizenmehle
Diplomarbeit (2001), TU-Berlin

77. ICC-Standard Methoden — Arbeitsgemeinschaft für Getreideforschung
Standard- Methoden für Getreide, Mehl und Brot
6. erweiterte Auflage
Verlag Moritz-Schäfer, Detmold 1978

78. MC Dermott, E. E. — The rapid nonenzymatic determination of damaged starch in flour
J. Sci. Food Agriculture 31 (1980) 4, S. 404-413

79. Rapid visco Analyser — RVA- Methods
Newport Scientific, 1998

80. Täufel, A./ Gabor, R./ Emmer, I. — Bestimmung der α- Amylaseaktivität
Lebensmittelindustrie 33 (1986) 2, S. 65-66

81. Hess, K. — Protein, Kleber und Lipoid in Weizenkorn und Mehl
Kolloid-Zeitschrift (1954) Band 136, Heft 2/3, S. 84-98

82. Nierle, W. — Extraktionsverhalten von Weizenproteinen
Getreide Mehl und Brot 44 (1990)10, S. 294-299

83. Dörfer, J./ Berthold, H. — Prüfung von Getreide und Mehl auf Überhitzung -Katalaseaktivität-
Bäcker und Konditor (1980) 10, S. 313-315

84. Kieffer, R./ Kim, J.-J / Belitz, H.-D. Zugversuche mit Weizenkleber im Mikromaßstab Z. Lebensm. Unters. Forsch, 172 (1981) S. 190-192

85. Gluzczynski, M./ Brümmer, J. M./ Lindhauer, M. G. Glutenaggregationstest Weizentypenmehle für die Flachwaffelherstellung Merkblatt der Arbeitsgemeinschaft Getreideforschung e.V. Detmold, Juni 2001

86. Pahne, N. Charakterisierung von Weizen-Trockenkleber Brabender Glutograph Methode 2.2, Fassung Nr. 2 TU-Berlin, Getreidetechnolgie, 10.1994

87. Safari- Ardi, M./ Thien, N. H. Stress Relaxation and Oscillatory Tests to Distinguish Between Doughs Prepared from Wheat of Different Varietal Origin Cereal Chem 75 (1998) 1, S. 80-84

88. Danilo, T./ et al. Rheological Behavior of Undeveloped and Developed Wheat Dough Cereal Chem 74 (1997) 4, S. 489-493

89. Edwards, N. M./ et al. Relationship of Creep- Recovery and Dynamic Oscillatory Measurements to Durum Wheat Physical Dough Properties Cereal Chem 76 (1999) 5, S. 638-645

90. Sietz, W./ Dörfner, H.H. Prüfung der Kleberqualität -eine neue Methode Getreide Mehl und Brot 41(1987) S. 16-19

91. Battail, J./ Audidier, Y. Windgesichtete Mehle, Hilfsmittel der Zwiebackindustrie- Anwendungen Getreide und Mehl 19 (1969) 6, S. 41-47 und S. 52-54

92. Evers, A. D./ Lindley, J. The particle-size distribution in wheat endosperm starch J. Sci. Food Agric. (1977) 28, S. 98-102

93. Antes, S./ Wieser, H. Modelluntersuchungen zum Reoxidationsverhalten von Glutelin aus Weizen und Roggen Getreide Mehl und Brot 53 (1999) 5, S. 291-295

94. Rohrlich, M./ et al. Isolierung und Charakterisierung der Endospermproteine des Weizens: Ein Beitrag zur Erklärung der Kleberbildung Z. Lebens. Unters. Forsch. 147(1972) S. 319

95. Rohrlich, M./ Niederauer, Th. Windsichteffekt und Proteintrennung durch Sedimentation nach K. Hess
Die Mühle 102 (1965) 37, S. 699-701

96. Rohrlich, M./ Friedel, K. Über Haftprotein-Stärke, Freie Stärke und Windsichtung von Weizenmehl
Chem. Mikrobiol. Technol. Lebensm. (1973) 2, S. 165-170

97. Rohrlich, M./ Niederauer, Th. Über die Mahlproteintrennung nach K. Hess
Die Mühle 100 (1963) 63, S. 385-387

98. Rohrlich, M./ Müller, V. / Zwickelprotein und Haftprotein in neuer Sicht
Die Mühle 106 (1969) 22, S. 385- 386 und 400-402

99. Weegel, P.L./ et. al Effect on Gluten of Heating at Different Moisture Contents
I. Changes in Functional Properties
II. Changes in Physico-Chemical Properties and Secondary Structure
J. Cereal Sci. 10 (1994) S. 31-47

Abb.1: Weltgetreideproduktion, Jahr 2002 4
Abb. 2: Aufbau des Weizenkorns 5
Abb. 3: Gluten und seine Komponenten 10
Abb. 4: Mikroskopische Aufnahme von isolierter Weizenstärke 14
Abb. 5: Anordnung der Schlagstifte in Stiftmühle zweier Stiftkreise 17
Abb. 6: Korngrößenverteilungsdichten von Mehlen bei unterschiedlichen Vermahlungsbedingungen 18
Abb. 7: Wirkprinzip des Schwerkraft- Windsichters 19
Abb. 8: Technischer Versuchsablauf zur Gewinnung der Mahlprodukte 30
Abb. 9: Wirkprinzip der Stiftmühle 31
Abb. 10: Alpine Multi-Prozessanlage mit dem System 50 ATP Feinstsichter 32
Abb. 11: Innenraum des 50 ATP Windsichters 33
Abb. 12: Sichtraddrehzahlen und Trenngrenzen 34
Abb. 13: Kalibrierungsgerade der α-Amylaseaktivität (E/l) 39
Abb. 14: Extraktionsschema der salzwasserlöslichen Proteine 42
Abb. 15: Apparatur zur Bestimmung der Katalaseaktivität 43
Abb. 16: Kalibrierungsgerade zur Bestimmung des Thiolgehaltes 45
Abb. 17: Glutenaggregationstest 47
Abb. 18: Energieverbrauch bei der Prallzerkleinerung der Mehle 51
Abb. 19: Oberflächenzunahme und mittlere Teilchengröße der prallzerkleinerten Mehle 52
Abb. 20: Korngrößenverteilungsdichten der Mehle 54
Abb. 21: Korngrößenverteilungsfunktionen der Mehle 55
Abb. 22: Walzenmehl unter REM 56
Abb. 23: NZ120-Mehl unter REM 57
Abb. 24: Mechanisch beschädigtes Stärkekorn 57
Abb. 25: NZ200-Mehl unter REM 58
Abb. 26: Stark beschädigtes Stärkekorn 59
Abb. 27: Einfluss der Stärkebeschädigung bzw. des Maltosegehaltes auf die Brotbräunung 61
Abb. 28: Verfestigen und Erweichen des Teiges bzw. Glutens bei der Mehlbehandlung mit O_2 sowie N_2 62
Abb. 29: Thiolgehalte der Mehle 63
Abb. 30: α-Amylase- und Katalaseaktivität der Mehle 65

Abb. 31: Wasserbindungsvermögen und Stärkebeschädigung der Mehle in Abhängigkeit von der Zerkleinerungsenergie 66
Abb. 32: Verkleisterunsmaxima und Fallzahlen der Mehle in Abhängigkeit von der Zerkleinerungsenergie 67
Abb. 33: Verkleisterungsverhalten der Stärke der Mehle im RVA 69
Abb. 34: Festigkeit der Gele aus den Mehlen 71
Abb. 35: Glutenextensogramme 73
Abb. 36: Amplitudensweep mit WM- sowie NZ200-Glutenen 74
Abb. 37: Frequenzsweep mit WM- sowie NZ200-Glutenen 75
Abb. 38: Amplitudensweep mit WM- sowie NZ200-Teigen 75
Abb. 39: Relaxationsverhalten des Glutens 76
Abb. 40: Aggregationsverhalten der Glutene der Mehle beim Gluten-AT 78
Abb. 41: Farinogramm des Ausgangsmehles (WM) 81
Abb. 42: Farinogramm des NZ200-Mehles 81
Abb. 43: Farinogramm des Handelsmehles(Grundmehl) 82
Abb. 44: Farinogramm des Handelsmehles mit NZ200-Mehl 83
Abb. 45: Farinogramm des Handelsmehles mit NZ200 (< 20 µm) 84
Abb. 46: Masseanteile der Mehlfraktionen 92
Abb. 47: I. Windsichtung (NZ80 m/s) 93
Abb. 48: I. Windsichtung (NZ200 m/s) 94
Abb. 49: II. Windsichtung (NZ80 m/s) 94
Abb. 50: II. Windsichtung (NZ200 m/s) 95
Abb. 51: Trennschärfe bei der I. Windsichtung 96
Abb. 52: Trennschärfe bei der II. Windsichtung 96
Abb. 53: WM-Mehlfraktion (< 20 µm) unter REM 98
Abb. 54: NZ160-Mehlfraktion (< 20 µm) unter REM 98
Abb. 55: WM-Fraktion (20-50 µm) unter REM 99
Abb. 56: NZ200-Fraktion (20-50 µm) unter REM 99
Abb. 57: WM-Fraktion (> 50 µm) unter REM 100
Abb. 58: NZ200-Fraktion (> 50 µm) unter REM 100
Abb. 59: Abhängigkeit der Proteinanteile vom Stärkegehalt 102
Abb. 60: Korrelation zwischen Glutengehalt und löslichen Proteinen 103
Abb. 61: Verkleisterungsverhalten der Stärke der feinen sowie der mittleren Mehlfraktionen 111

Abb. 62: Verkleisterungsverhalten der Stärke der mittleren Mehlfraktionen sowie der Mehle....112
Abb. 63: Festigkeit der Gele aus den mittleren Mehlfraktionen 113
Abb. 64: Festigkeit der Gele aus den feinen Mehlfraktionen 114
Abb. 65: Mikroextensogramme am Gluten der feinen Mehlfraktionen 115
Abb. 66: Mikroextensogramme am Gluten der groben Mehlfraktionen....116
Abb. 67: Amplitudensweep am WM(< 20 µm)-Gluten 117
Abb. 68: Amplitudensweep am NZ200 (< 20 µm)-Gluten 117

Tab. 1: Zusammensetzung des Weizenkorns 5
Tab. 2: Anteile und Löslichkeit der Weizenproteine 8
Tab. 3: Weizenmehl, Bestandteile und Teilchengrößen 24
Tab. 4: Kennzahlen der untersuchten Weizensorte Alidos 28
Tab. 5: Drehzahlen und Umfangsgeschwindigkeiten der Stiftmühle.....32
Tab. 6: Standardmethoden 35
Tab. 7: Programm des Rapid Visco Analyser 37
Tab. 8: Arbeitsvorschrift zur Bestimmung der α- Amylaseaktivität.....37
Tab. 9: HPLC-Analyse der Zucker.....40
Tab. 10: Dichten der Stärke und des Proteins.....41
Tab. 11: Mahlergebnisse der prallzerkleinerten Mehle 50
Tab. 12: Masseanteile der Fraktionen in den Mehlen.....53
Tab. 13: Inhaltsstoffzusammensetzung der Mehle 59
Tab. 14: Zusammensetzung des gefriergetrockneten Glutens 60
Tab. 15: Zuckergehalte der Mehle.....61
Tab. 16: Eigenschaften der Mehlstärke 65
Tab. 17: Stärkeeigenschaften der Mehle im Rapid Visco Analyser 68
Tab. 18: Gelfestigkeiten.....70
Tab. 19: Qualität der Glutenproteine 72
Tab. 20: Messdaten des Glutenaggregationstests 77
Tab. 21: Extensogramm- und Glutogrammwerte.....79
Tab. 22: Viskoelastische Eigenschaften des Glutens im dynamischen .....
Rheometer.....79
Tab. 23: Farinogrammdaten der Mehle 80
Tab. 24: Farinogrammdaten des Handelsmehles mit Mehlanteilen.....83
Tab. 25: Extensogramme der Mehle nach 135 min Gärzeit 84
Tab. 26: Backergebnisse der Versuchsmehle 86
Tab. 27: Backergebnisse nach Zumischen der Versuchsmehle.....87
Tab. 28: Anteile und Granulation der Mehlfraktionen 91
Tab. 29: Trennschärfen bei der Windsichtung.....95
Tab. 30a: Masseanteile der Teilchengrößen in den gesichteten .....
feinen Fraktionen.....97
Tab. 30b: Masseanteile der Teilchengrößen in den gesichteten .....
mittleren sowie groben Fraktionen.....97

Tab. 31: Inhaltsstoffzusammensetzung der Mehlfraktionen 101
Tab. 32: Freie Protein- und Stärkeanteile der Mehle 105
Tab. 33: Protein- und Stärkeanteile der Mehlfraktionen 106
Tab. 34: Eigenschaften der Mehlfraktionen 108
Tab. 35: Stärkeeigenschaften der Mehlfraktionen im RVA 110

9.1 Aschegehalte der Mehle

Mehl	F [%]	Einwaage [g]	Rückwaage [g]	Aschegehalt [% TS]	MW [% TS]	s
WM	14,1	3,59	0,0163	0,53	**0,54**	0,015
	14,1	3,11	0,0148	0,55		
	14,1	3,80	0,0172	0,53		
NZ80	12,8	3,93	0,0182	0,53	**0,54**	0,005
	12,8	3,82	0,0180	0,54		
	12,8	3,98	0,0186	0,54		
NZ120	12,7	3,60	0,0168	0,53	**0,54**	0,005
	12,7	4,18	0,0198	0,54		
	12,7	4,07	0,0191	0,54		
NZ160	10,4	4,10	0,0191	0,52	**0,53**	0,010
	10,4	4,08	0,0197	0,54		
NZ200	8,3	3,47	0,0166	0,52	**0,52**	0,004
	8,3	3,58	0,0171	0,52		
	8,3	3,43	0,0166	0,53		

9.2 Aschegehalte der Mehlfraktionen

Mehlfraktion	F [%]	Einwaage [g]	Rückwaage [g]	Aschegehalt [% TS]	MW [% TS]	s
WM <20µm	11,1	3,02	0,0168	0,63	**0,63**	0,005
	11,1	4,32	0,0243	0,63		
	11,1	3,17	0,0179	0,64		
WM 20-50µm	10,6	4,08	0,0229	0,63	**0,63**	0,006
	10,6	5,32	0,0304	0,64		
	10,6	4,53	0,0255	0,63		
WM >50µm	10,5	5,83	0,0246	0,47	**0,47**	0,002
	10,5	5,14	0,0216	0,47		
	10,5	5,69	0,0241	0,47		
NZ80 <20µm	11,5	4,16	0,0243	0,66	**0,65**	0,006
	11,5	3,88	0,0224	0,65		
	11,5	4,05	0,0232	0,65		
NZ80 20-50µm	9,8	5,44	0,0291	0,59	**0,59**	0,002
	9,8	5,52	0,0296	0,59		
	9,8	5,95	0,0320	0,60		
NZ80 >50µm	10,0	6,06	0,0240	0,44	**0,44**	0,001
	10,0	6,17	0,0245	0,44		
NZ120 <20µm	10,0	3,91	0,0239	0,68	**0,68**	0,079
	10,0	4,35	0,0269	0,69		
	10,0	3,68	0,0225	0,68		
NZ120 20-50µm	9,9	5,51	0,0260	0,52	**0,52**	0,002
	9,9	5,12	0,0243	0,53		
	9,9	4,95	0,0233	0,52		
NZ120 >50µm	9,7	5,83	0,0217	0,41	**0,41**	0,004
	9,7	7,09	0,0268	0,42		
	9,7	6,12	0,0228	0,41		
NZ160 <20µm	8,8	3,49	0,0221	0,69	**0,70**	0,009
	8,8	4,17	0,0270	0,71		
	8,8	3,97	0,0257	0,71		

NZ160 20-50µm	8,6	6,08	0,0253	0,46	**0,45**	0,004
	8,6	5,31	0,0217	0,45		
	8,6	4,69	0,0193	0,45		
NZ160 >50µm	8,7	4,42	0,0168	0,42	**0,42**	0,002
	8,7	4,12	0,0157	0,42		
	8,7	3,76	0,0144	0,42		
NZ200 <20µm	6,6	3,43	0,0229	0,71	**0,72**	0,001
	6,6	4,27	0,0286	0,72		
	6,6	3,80	0,0254	0,72		
NZ200 20-50µm	7,4	6,29	0,0238	0,41	**0,41**	0,001
	7,4	5,62	0,0214	0,41		
	7,4	6,36	0,0241	0,41		
NZ200 >50µm	7,7	4,66	0,0177	0,41	**0,41**	0,003
	7,7	3,56	0,0135	0,41		
	7,7	3,56	0,0137	0,42		

9.3 Proteingehalte der Mehle

Mehl	F [%]	Einwaage [g]	NaOH [ml]	NaOH-BW [ml]	H_2SO_4 [ml]	Diff. [ml]	Proteingehalt [% TS]	MW [% TS]	s
WM	14,1	0,5040	2,64	2,22	10	7,78	14,35	**14,3**	0,08
	14,1	0,5016	2,70	2,32	10	7,68	14,23		
NZ80	12,8	0,5026	2,66	2,28	10	7,72	14,06	**14,0**	0,06
	12,8	0,5030	2,72	2,32	10	7,68	13,98		
NZ120	12,7	0,5031	2,62	2,32	10	7,68	13,96	**13,9**	0,10
	12,7	0,5029	2,70	2,40	10	7,60	13,82		
NZ160	10,4	0,5019	2,36	2,06	10	7,94	14,10	**14,0**	0,09
	10,4	0,5015	2,46	2,14	10	7,86	13,97		
NZ200	8,3	0,5006	2,26	1,96	10	8,04	13,98	**13,9**	0,13
	8,3	0,5012	2,36	2,06	10	7,94	13,79		

Diff. Auflage – Verbrauch
BW Blindwert

9.4 Proteingehalte der Mehlfraktionen

Mehlfraktion	F [%]	Einwaage [g]	NaOH [ml]	NaOH-BW [ml]	H_2SO_4 [ml]	Diff. [ml]	Proteingehalt [% TS]	MW [% TS]	s
WM <20µm	11,1	0,5040	12,80	11,88	20	8,12	14,47	**14,5**	0,01
	11,1	0,5023	12,20	11,90	20	8,10	14,48		
WM 20-50µm	10,6	0,5036	13,18	12,88	20	7,12	12,63	**12,5**	0,16
	10,6	0,5013	13,34	13,04	20	6,96	12,40		
WM >50µm	10,5	0,5029	2,48	2,18	10	7,82	13,87	**13,9**	0,08
	10,5	0,5014	2,44	2,14	10	7,86	13,99		
NZ80 <20µm	11,5	0,5000	12,20	11,90	20	8,10	14,62	**14,6**	0,06
	11,5	0,5018	12,22	11,92	20	8,08	14,53		
NZ80 20-50µm	9,8	0,5016	13,60	13,30	20	6,70	11,82	**11,7**	0,15
	9,8	0,5003	13,74	13,44	20	6,56	11,61		
NZ80 >50µm	10,0	0,5002	2,46	2,16	10	7,84	13,91	**14,0**	0,07
	10,0	0,5006	2,40	2,10	10	7,90	14,00		
NZ120 <20µm	10,0	0,5028	11,14	10,84	20	9,16	16,16	**16,2**	0,12
	10,0	0,5041	11,02	10,72	20	9,28	16,33		
NZ120 20-50µm	9,9	0,5040	14,26	13,96	20	6,04	10,62	**11,0**	0,48
	9,9	0,5019	13,90	13,60	20	6,40	11,30		
NZ120 >50µm	9,7	0,5018	2,40	2,10	10	7,90	13,92	**14,0**	0,17
	9,7	0,5032	2,24	1,94	10	8,06	14,16		
NZ160 <20µm	8,8	0,5030	11,24	10,94	20	9,06	15,77	**15,9**	0,16
	8,8	0,5001	11,16	10,86	20	9,14	16,00		
NZ160 20-50µm	8,6	0,5016	14,26	13,96	20	6,04	10,52	**10,7**	0,23
	8,6	0,5027	14,06	13,76	20	6,24	10,84		
NZ160 >50µm	8,7	0,5003	2,34	2,04	10	7,96	13,91	**14,0**	0,08
	8,7	0,5014	2,26	1,96	10	8,04	14,02		
NZ200 <20µm	6,6	0,5023	10,04	9,74	20	10,26	17,46	**17,5**	0,04
	6,6	0,5007	10,04	9,74	20	10,26	17,52		
NZ200 20-50µm	7,4	0,5016	14,46	14,16	20	5,84	10,04	**10,0**	0,02
	7,4	0,5024	14,47	14,17	20	5,83	10,01		
NZ200 >50µm	7,7	0,5011	2,14	1,84	10	8,16	14,09	**14,1**	0,07
	7,7	0,5015	2,08	1,78	10	8,22	14,18		

Diff. Auflage – Verbrauch
BW Blindwert

9.5 Stärkegehalte der Mehle

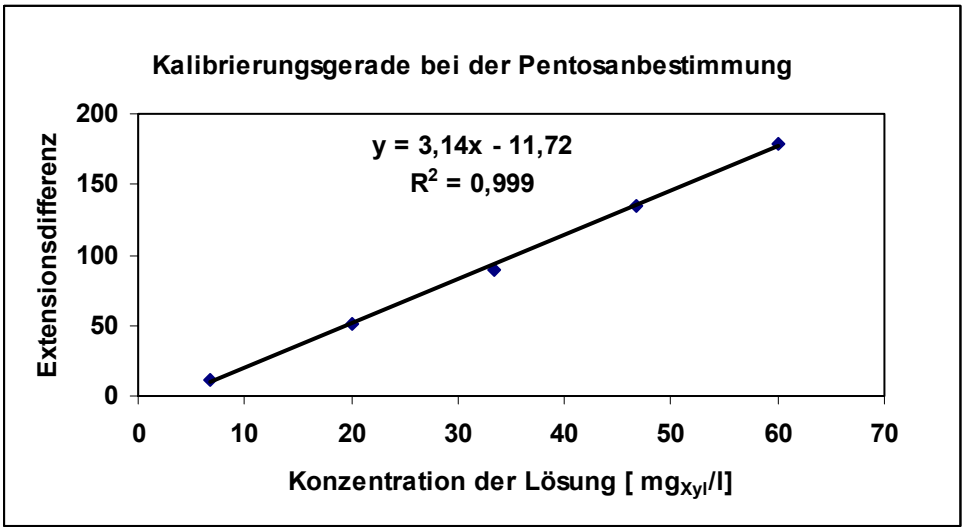
Mehl	F [%]	Einwaage [g]	Ao [°]	Stärkegehalt [% TS]	MW [% TS]	s
WM	14,1	3,0	7,65	80,9	**80,7**	0,23
	14,1	3,0	7,62	80,6		
NZ80	12,8	3,0	7,68	80,9	**81,1**	0,23
	12,8	3,0	7,71	81,2		
NZ120	12,7	3,0	7,78	81,6	**81,4**	0,30
	12,7	3,0	7,74	81,2		
NZ160	10,4	3,0	7,85	80,6	**80,6**	0,00
	10,4	3,0	7,85	80,6		
NZ200	8,3	3,0	8,00	79,4	**79,6**	0,21
	8,3	3,0	8,03	79,7		

9.6 Stärkegehalte der Mehlfraktionen

Mehlfraktion	F [%]	Einwaage [g]	Ao [°]	Stärkegehalt [% TS]	MW [% TS]	s
WM <20µm	11,1	3,00	7,87	80,8	**80,7**	0,16
	11,1	3,00	7,85	80,6		
WM 20-50µm	10,6	3,01	8,15	82,8	**82,7**	0,02
	10,6	3,01	8,12	82,7		
WM >50µm	10,5	3,01	7,79	79,2	**79,7**	0,73
	10,5	3,00	7,88	80,3		
NZ80 <20µm	11,5	3,01	7,89	80,8	**80,6**	0,28
	11,5	3,00	7,76	80,4		
NZ80 20-50µm	9,8	3,00	8,26	83,4	**83,1**	0,47
	9,8	3,00	8,19	82,7		
NZ80 >50µm	10,0	3,00	8,03	81,2	**80,3**	1,27
	10,0	3,00	7,82	79,4		
NZ120 <20µm	10,0	3,00	7,48	75,7	**75,7**	0,10
	10,0	3,00	7,46	75,6		
NZ120 20-50µm	9,9	3,01	8,26	83,4	**83,1**	0,42
	9,9	3,00	8,18	82,8		
NZ120 >50µm	9,7	3,00	7,69	77,7	**77,8**	0,15
	9,7	3,01	7,73	77,9		
NZ160 <20µm	8,8	3,01	7,79	77,8	**77,2**	0,82
	8,8	3,00	7,66	76,6		
NZ160 20-50µm	8,6	3,00	8,42	83,8	**83,9**	0,14
	8,6	3,00	8,40	84,0		
NZ160 >50µm	8,7	3,00	7,87	78,6	**78,6**	0,03
	8,7	3,00	7,86	78,6		
NZ200 <20µm	6,6	3,01	7,65	74,6	**74,9**	0,42
	6,6	3,00	7,71	75,2		
NZ200 20-50µm	7,4	3,00	8,57	84,4	**84,4**	0,00
	7,4	3,00	8,57	84,4		
NZ200 >50µm	7,7	3,01	7,95	78,4	**77,1**	1,85
	7,7	3,00	7,68	75,7		

9.7 Kalibrierungslösung zur Pentosanbestimmung

Xylose [mg/l]	Messung1	Messung2	MW	s
6,67	11,00	10,50	**10,75**	0,35
20,00	52,50	51,00	**51,75**	1,06
33,33	88,00	90,00	**89,00**	1,41
46,66	135,00	135,50	**135,25**	0,35
59,99	177,50	179,50	**178,50**	1,41



9.8 Pentosangehalte der Mehle

Mehl	F [%]	Einwaage [mg]	E_x2-E_x1	Xp [mg/l]	m_p	Pentosangehalt [% TS]	MW [% TS]	s
WM	14,1	51,1	4,4	5,124	241,04	1,87	**1,84**	0,045
	14,1	50,6	3,7	4,901	238,68	1,81		
NZ80	12,8	51,6	4,0	4,997	248,27	1,77	**1,77**	0,002
	12,8	51,7	4,0	4,997	248,75	1,77		
NZ120	12,7	51,1	3,3	4,774	247,00	1,70	**1,73**	0,037
	12,7	51,9	4,0	4,997	250,87	1,75		
NZ160	10,4	50,7	4,0	4,997	253,52	1,73	**1,74**	0,012
	10,4	51,8	4,5	5,156	259,02	1,75		
NZ200	8,3	51,0	4,3	5,092	260,40	1,72	**1,71**	0,009
	8,3	50,4	4,0	4,997	257,34	1,71		

9.9 Pentosangehalte der Mehlfraktionen

Mehlfraktion	F [%]	Einwaage [mg]	E_x2-E_x1	Xp [mg/l]	m_p	Pentosangehalt [% TS]	MW [% TS]	s
WM <20µm	11,1	50,5	3,10	4,710	249,15	1,7	**1,7**	0,014
	11,1	52,4	3,00	4,679	250,53	1,6		
WM 20-50µm	10,6	51,7	3,30	4,774	256,80	1,6	**1,7**	0,066
	10,6	50,2	3,70	4,901	249,35	1,7		
WM >50µm	10,5	51,7	4,20	5,060	257,08	1,7	**1,7**	0,016
	10,5	50,0	4,00	4,997	250,63	1,8		
NZ80 <20µm	11,5	53,1	3,50	4,838	258,05	1,6	**1,7**	0,025
	11,5	50,8	3,50	4,838	252,61	1,7		
NZ80 20-50µm	9,8	52,0	4,00	4,997	260,60	1,7	**1,7**	0,036
	9,8	52,4	4,60	5,188	262,60	1,7		
NZ80 >50µm	10,0	52,1	4,20	5,060	260,81	1,7	**1,7**	0,005
	10,0	51,9	4,20	5,060	259,81	1,7		
NZ120 <20µm	10,0	51,7	4,20	5,060	258,52	1,7	**1,7**	0,020
	10,0	51,9	4,00	4,997	259,52	1,7		
NZ120 20-50µm	9,9	50,3	4,20	5,060	259,00	1,7	**1,7**	0,000
	9,9	50,2	4,20	5,060	259,00	1,7		
NZ120 >50µm	9,7	50,8	4,00	4,997	254,58	1,7	**1,7**	0,049
	9,7	51,9	3,70	4,901	260,10	1,7		
NZ160 <20µm	8,8	51,8	4,90	5,283	262,76	1,8	**1,8**	0,008
	8,8	51,5	4,70	5,220	261,24	1,8		
NZ160 20-50µm	8,6	53,0	4,00	4,997	263,84	1,7	**1,7**	0,021
	8,6	53,6	3,90	4,965	266,83	1,6		
NZ160 >50µm	8,7	52,5	4,80	5,251	266,31	1,7	**1,7**	0,008
	8,7	50,4	4,30	5,092	256,60	1,7		
NZ200 <20µm	6,6	52,1	4,70	5,220	270,65	1,7	**1,7**	0,041
	6,6	52,3	4,20	5,060	271,69	1,6		
NZ200 20-50µm	7,4	51,8	2,90	4,647	266,50	1,5	**1,5**	0,002
	7,4	52,4	3,10	4,710	269,59	1,5		
NZ200 >50µm	7,7	50,6	4,30	5,092	259,77	1,7	**1,7**	0,015
	7,7	50,6	4,10	5,029	259,77	1,7		

9.10 Anteil löslicher Proteine der Mehle

Mehl	F [%]	Einwaage [g]	NaOH [ml]	NaOH-BW [ml]	H_2SO_4 [ml]	Diff. [ml]	Proteingehalt [% TS]	MW [% TS]	s	Anteil lösl. PR [% TS]
WM	1,1	0,2067	8,35	8,07	10	1,93	7,54	**7,5**	0,12	**20,6**
	1,1	0,2058	8,40	8,12	10	1,88	7,38			
NZ80	1,5	0,2052	8,45	8,17	10	1,83	7,23	**7,2**	0,01	**20,5**
	1,5	0,2056	8,45	8,17	10	1,83	7,22			
NZ120	1,6	0,2060	8,45	8,17	10	1,83	7,21	**7,3**	0,08	**21,5**
	1,6	0,2027	8,50	8,17	10	1,83	7,33			
NZ160	1,5	0,2063	8,50	8,22	10	1,78	6,99	**7,0**	0,01	**19,7**
	1,5	0,2067	8,50	8,22	10	1,78	6,98			
NZ200	1,5	0,2026	8,50	8,22	10	1,78	7,12	**7,1**	0,02	**20,0**
	1,5	0,2035	8,50	8,22	10	1,78	7,09			

Diff. Auflage – Verbrauch
BW Blindwert
PR Protein

9.11 Anteil löslicher Proteine der Mehlfraktionen

Mehlfraktion	F [%]	Einwaage [g]	NaOH [ml]	NaOH-BW [ml]	H_2SO_4 [ml]	Diff. [ml]	Proteingehalt [% TS]	MW [% TS]	s	Anteil lös. PR [% TS]
WM <20µm	1,4	0,2058	8,50	8,22	10	1,78	7,00	**6,8**	0,23	**19,5**
	1,4	0,2035	8,60	8,32	10	1,68	6,69			
WM 20-50µm	0,8	0,2030	8,4	8,12	10	1,88	7,45	**7,3**	0,27	**20,9**
	0,8	0,2027	8,50	8,22	10	1,78	7,07			
WM >50µm	1,3	0,2032	8,40	8,12	10	1,88	7,48	**7,2**	0,40	**21,1**
	1,3	0,2022	8,55	8,27	10	1,73	6,92			
NZ80 <20µm	0,9	0,2059	8,45	8,17	10	1,83	7,16	**7,2**	0,00	**20,5**
	0,9	0,2001	8,50	8,22	10	1,78	7,17			
NZ80 20-50µm	1,0	0,2064	8,55	8,55	10	1,45	5,67	**5,9**	0,38	**20,3**
	1,0	0,2056	8,70	8,42	10	1,58	6,20			
NZ80 >50µm	0,9	0,2062	8,65	8,37	10	1,63	6,37	**6,2**	0,28	**18,1**
	0,9	0,2064	8,75	8,47	10	1,53	5,97			
NZ120 <20µm	1,3	0,2023	8,60	8,32	10	1,68	6,72	**6,8**	0,18	**17,6**
	1,3	0,2007	8,55	8,27	10	1,73	6,97			
NZ120 20-50µm	1,7	0,2030	8,55	8,27	10	1,73	6,92	**6,9**	0,08	**25,4**
	1,7	0,2063	8,50	8,27	10	1,73	6,81			
NZ120 >50µm	1,3	0,2033	8,65	8,37	10	1,63	6,49	**6,5**	0,02	**18,9**
	1,3	0,2041	8,65	8,37	10	1,63	6,46			
NZ160 <20µm	1,3	0,2041	8,75	8,47	10	1,53	6,06	**6,0**	0,14	**16,0**
	1,3	0,2043	8,80	8,52	10	1,48	5,86			
NZ160 20-50µm	2,0	0,2012	8,60	8,32	10	1,68	6,80	**6,9**	0,07	**25,5**
	2,0	0,2043	8,55	8,27	10	1,73	6,90			
NZ160 >50µm	1,7	0,2038	8,70	8,42	10	1,58	6,29	**6,2**	0,11	**16,3**
	1,7	0,2023	8,75	8,47	10	1,53	6,14			
NZ200 <20µm	2,4	0,2050	8,40	8,12	10	1,88	7,50	**7,4**	0,15	**17,7**
	2,4	0,2053	8,45	8,17	10	1,83	7,29			
NZ200 20-50µm	1,5	0,2028	8,85	8,57	10	1,43	5,72	**5,6**	0,16	**21,8**
	1,5	0,2039	8,90	8,62	10	1,38	5,49			
NZ200 >50µm	2,2	0,2035	8,60	8,32	10	1,68	6,74	**6,8**	0,04	**19,3**
	2,2	0,2017	8,60	8,32	10	1,68	6,80			

Diff. Auflage – Verbrauch
BW Blindwert
PR Protein

9.12 Feuchtglutengehalte der Mehle

Mehl	F [%]	FGG [g]	FGG [%]	korr. FGG [auf 14%F]	MW [%]	s
WM	14,1	3,00	30,0	30,0	**30,0**	0,00
	14,1	3,00	30,0	30,0		
NZ80	12,8	3,06	30,6	30,2	**30,1**	0,14
	12,8	3,04	30,4	30,0		
NZ120	12,7	3,00	30,0	29,6	**29,9**	0,56
	12,7	3,08	30,8	30,3		
NZ160	10,4	3,07	30,7	29,5	**30,0**	0,81
	10,4	3,19	31,9	30,6		
NZ200	8,3	3,16	31,6	29,6	**29,5**	0,13
	8,3	3,14	31,4	29,4		

9.13 Feuchtglutengehalte der Mehlfraktionen

Mehl	F [%]	FGG [g]	FGG [%]	korr. FGG [auf 14%F]	MW [%]	s
WM <20µm	11,1	1,70	34,0	32,9	**32,4**	0,68
	11,1	1,65	33,0	31,9		
WM 20-50µm	10,6	1,35	27,0	26,0	**26,0**	0,00
	10,6	1,35	27,0	26,0		
WM >50µm	10,5	3,45	34,5	33,2	**32,9**	0,34
	10,5	3,40	34,0	32,7		
NZ80 <20µm	11,5	1,67	33,4	32,5	**32,2**	0,41
	11,5	1,64	32,8	31,9		
NZ80 20-50µm	9,8	1,30	26,0	24,8	**24,8**	0,00
	9,8	1,30	26,0	24,8		
NZ80 >50µm	10,0	3,40	34,0	32,5	**32,5**	0,00
	10,0	3,40	34,0	32,5		
NZ120 <20µm	10,0	3,70	37,0	35,4	**35,6**	0,34
	10,0	3,75	37,5	35,8		
NZ120 20-50µm	9,9	2,55	25,5	24,3	**24,1**	0,34
	9,9	2,50	25,0	23,9		
NZ120 >50µm	9,7	3,40	34,0	32,4	**32,6**	0,34
	9,7	3,45	34,5	32,9		
NZ160 <20µm	8,8	3,55	35,5	33,5	**33,7**	0,33
	8,8	3,60	36,0	33,9		
NZ160 20-50µm	8,6	2,45	24,5	23,1	**22,7**	0,47
	8,6	2,38	23,8	22,4		
NZ160 >50µm	8,7	1,80	36,0	33,9	**33,4**	0,67
	8,7	1,75	35,0	33,0		
NZ200 <20µm	6,6	3,85	38,5	35,4	**35,2**	0,33
	6,6	3,80	38,0	35,0		
NZ200 20-50µm	7,4	2,25	22,5	20,9	**20,7**	0,33
	7,4	2,20	22,0	20,4		
NZ200 >50µm	7,7	1,75	35,0	32,6	**32,6**	0,00
	7,7	1,75	35,0	32,6		

9.14 Stärkebeschädigung der Mehle

Mehl	F [%]	Blindwert	Absorptionswert	STB [BV/g_{Mehl}]	MW [BV/g_{Mehl} TS]	s
WM	14,1	0,043	0,254	4,22	**4,9**	0,042
	14,1	0,043	0,257	4,28		
NZ80	12,8	0,043	0,274	4,62	**5,3**	0,028
	12,8	0,043	0,276	4,66		
NZ120	12,7	0,046	0,298	5,04	**5,9**	0,212
	12,7	0,046	0,313	5,34		
NZ160	10,4	0,041	0,342	6,02	**6,7**	0,057
	10,4	0,044	0,341	5,94		
NZ200	8,3	0,036	0,418	7,64	**8,5**	0,255
	8,3	0,036	0,436	8,00		

9.15 Stärkebeschädigung der Mehlfraktionen

Mehl	F [%]	Blindwert	Absorptionswert	STB [BV/g_{Mehl}]	MW [BV/g_{Mehl} TS]	s
WM <20µm	11,1	0,046	0,350	6,08	**6,8**	0,071
	11,1	0,046	0,345	5,98		
WM 20-50µm	10,6	0,036	0,359	6,46	**7,2**	0,028
	10,6	0,036	0,357	6,42		
WM >50µm	10,5	0,046	0,186	2,80	**3,2**	0,057
	10,5	0,046	0,190	2,88		
NZ80 <20µm	11,5	0,041	0,349	6,16	**6,9**	0,014
	11,5	0,041	0,348	6,14		
NZ80 20-50µm	9,8	0,045	0,325	5,60	**6,2**	0,042
	9,8	0,045	0,328	5,66		
NZ80 >50µm	10,0	0,045	0,184	2,78	**3,0**	0,071
	10,0	0,045	0,179	2,68		
NZ120 <20µm	10,0	0,046	0,304	5,16	**5,9**	0,212
	10,0	0,046	0,319	5,46		
NZ120 20-50µm	9,9	0,046	0,362	6,32	**7,0**	0,042
	9,9	0,046	0,359	6,26		
NZ120 >50µm	9,7	0,038	0,204	3,32	**3,7**	0,000
	9,7	0,038	0,204	3,32		
NZ160 <20µm	8,8	0,032	0,348	6,32	**7,0**	0,057
	8,8	0,032	0,352	6,40		
NZ160 20-50µm	8,6	0,038	0,400	7,24	**7,9**	0,014
	8,6	0,038	0,399	7,22		
NZ160 >50µm	8,7	0,036	0,226	3,80	**4,2**	0,000
	8,7	0,036	0,226	3,80		
NZ200 <20µm	6,6	0,041	0,367	6,52	**6,9**	0,085
	6,6	0,041	0,361	6,40		
NZ200 20-50µm	7,4	0,045	0,515	9,40	**10,1**	0,085
	7,4	0,045	0,509	9,28		
NZ200 >50µm	7,7	0,045	0,247	4,04	**4,3**	0,113
	7,7	0,045	0,239	3,88		

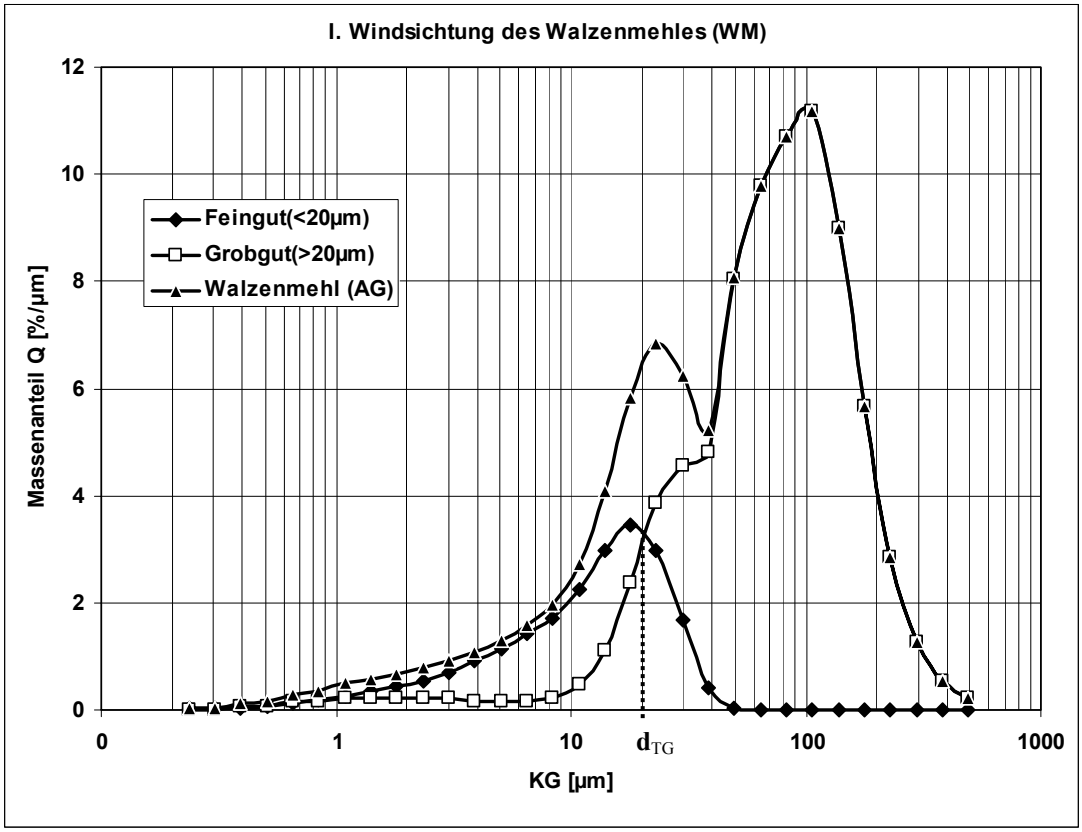
9.16 Wasserbindungsvermögen der Mehle

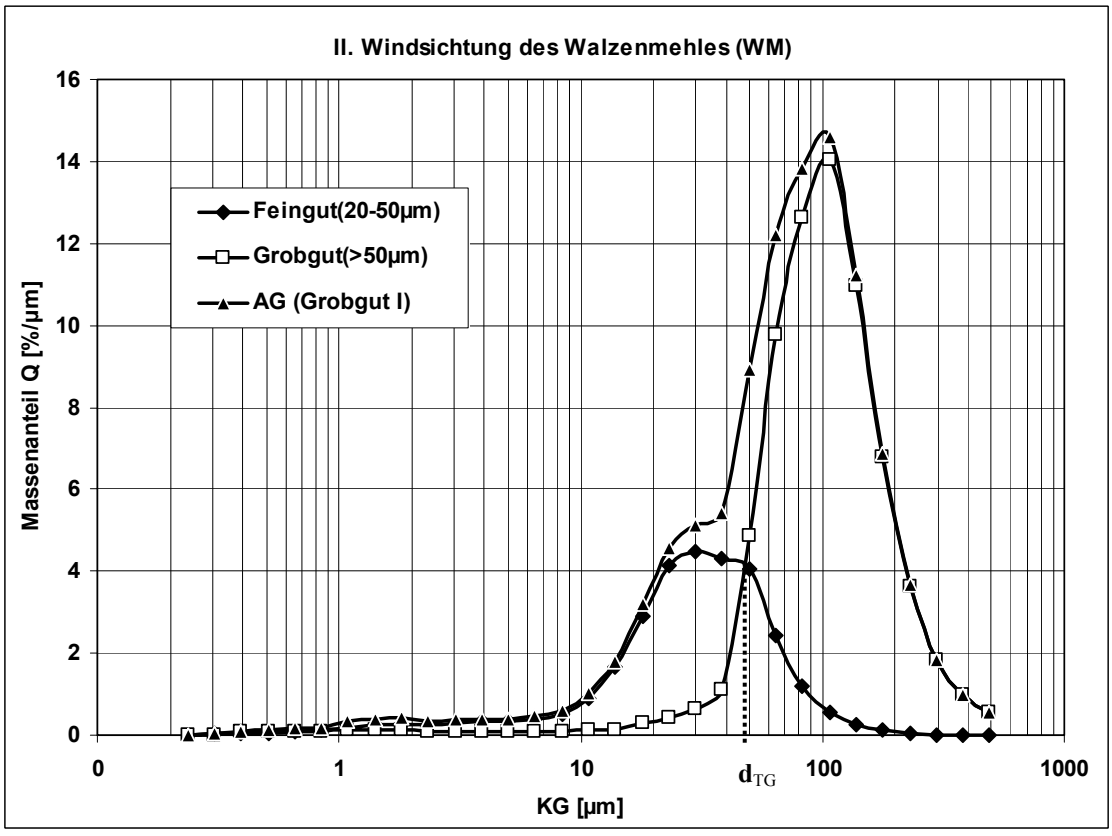
Mehl	F [%]	m [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	WBV [g/g]	WBV [%]	MW [%]	s
WM	14,1	17,1842	18,1855	18,9791	0,7926	79,26	**80,0**	1,10
	14,1	15,9850	16,9864	17,7956	0,8081	80,81		
NZ80	12,8	15,8945	16,8811	17,6837	0,8135	81,35	**81,9**	0,78
	12,8	15,6802	16,6654	17,4777	0,8245	82,45		
NZ120	12,7	14,5706	15,5554	16,3735	0,8307	83,07	**83,3**	0,27
	12,7	15,4146	16,4007	17,2237	0,8346	83,46		
NZ160	10,4	15,7921	16,7519	17,5877	0,8708	87,08	**87,9**	1,19
	10,4	14,9087	15,8685	16,7205	0,8877	88,77		
NZ200	8,3	15,8380	16,7771	17,7117	0,9952	99,52	**99,2**	0,44
	8,3	17,1835	18,1224	19,0509	0,9889	98,89		

9.17 Wasserbindungsvermögen der Mehlfraktionen

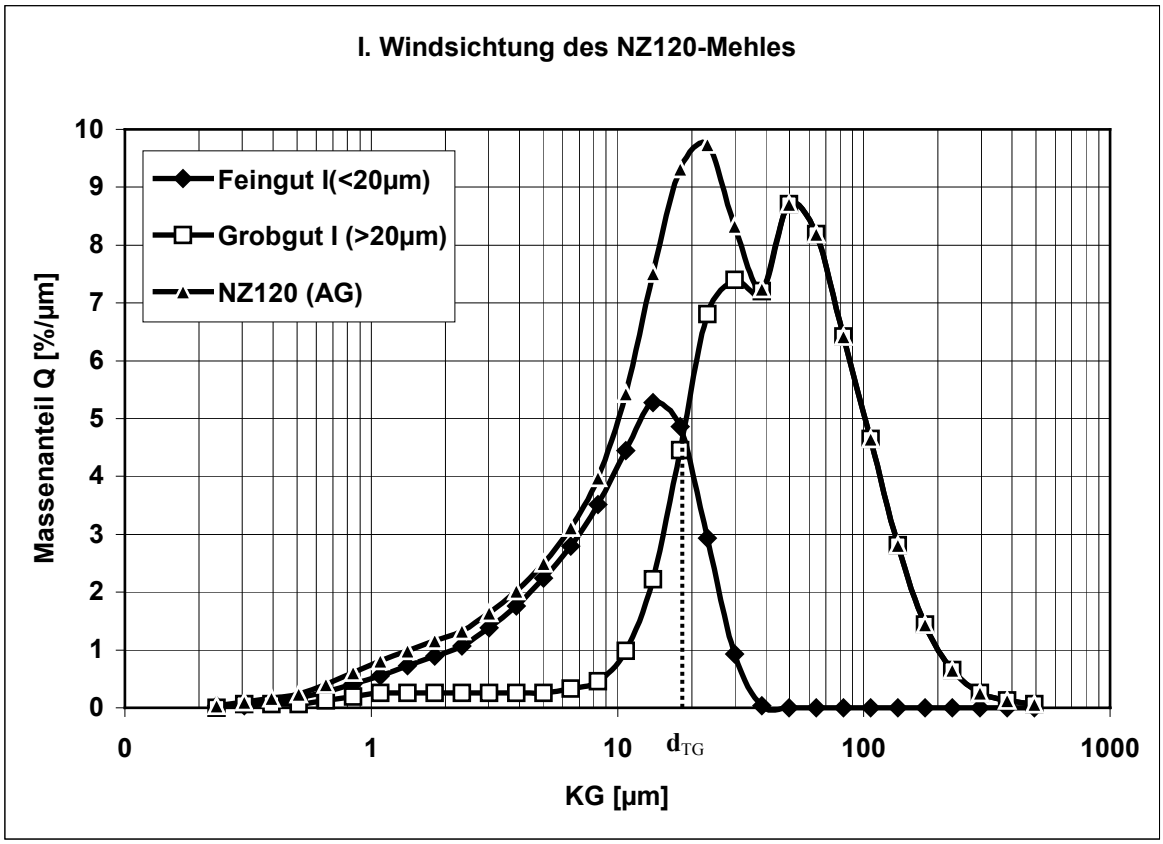
Mehl	F [%]	m [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	WBV [g/g]	WBV [%]	MW [%]	s
WM <20µm	11,1	5,1738	6,1411	7,0820	0,9727	97,27	**99,2**	2,8
	11,1	5,2426	6,1950	7,1586	1,0118	101,18		
WM 20-50µm	10,6	5,1775	6,1378	6,9517	0,8475	84,75	**86,3**	2,2
	10,6	5,2328	6,1852	7,0215	0,8781	87,81		
WM >50µm	10,5	14,5703	15,5323	16,3439	0,8437	84,37	**82,2**	3,1
	10,5	14,5237	15,4860	16,2555	0,7996	79,96		
NZ80 <20µm	11,5	5,2142	6,1745	7,1604	1,0267	102,67	**102,2**	0,7
	11,5	5,1702	6,1301	7,1064	1,0171	101,71		
NZ80 20-50µm	9,8	5,1839	6,1359	6,9401	0,8447	84,47	**85,3**	1,1
	9,8	5,2304	6,1790	6,9952	0,8604	86,04		
NZ80 >50µm	10,0	5,1791	6,1320	6,8415	0,7446	74,46	**75,1**	0,8
	10,0	5,1855	6,1356	6,8544	0,7566	75,66		
NZ120 <20µm	10,0	5,1780	6,1332	7,1220	1,0352	103,52	**103,0**	0,8
	10,0	15,6802	16,6369	17,6170	1,0245	102,45		
NZ120 20-50µm	9,9	5,1837	6,1304	6,8821	0,7940	79,40	**79,7**	0,4
	9,9	5,2517	6,2054	6,9675	0,7991	79,91		
NZ120 >50µm	9,7	5,2413	6,1419	6,8500	0,7863	78,63	**78,3**	0,4
	9,7	5,2315	6,1700	6,9020	0,7800	78,00		
NZ160 <20µm	8,8	5,1839	6,1237	7,1341	1,0751	107,51	**109,0**	2,2
	8,8	5,2272	6,1680	7,2083	1,1058	110,58		
NZ160 20-50µm	8,6	17,1838	18,1381	18,8816	0,7791	77,91	**78,1**	0,3
	8,6	15,4150	16,3694	17,1171	0,7834	78,34		
NZ160 >50µm	8,7	5,1750	6,1165	6,9190	0,8524	85,24	**87,0**	2,5
	8,7	5,2280	6,1648	6,9960	0,8873	88,73		
NZ200 <20µm	6,6	15,2318	16,1529	17,2249	1,1638	116,38	**118,6**	3,1
	6,6	16,3159	17,2363	18,3479	1,2077	120,77		
NZ200 20-50µm	7,4	14,7588	15,6871	16,4441	0,8155	81,55	**81,4**	0,3
	7,4	15,7924	16,7209	17,4746	0,8117	81,17		
NZ200 >50µm	7,7	14,5705	15,4995	16,2805	0,8407	84,07	**83,3**	1,1
	7,7	14,5236	15,4521	16,2183	0,8252	82,52		

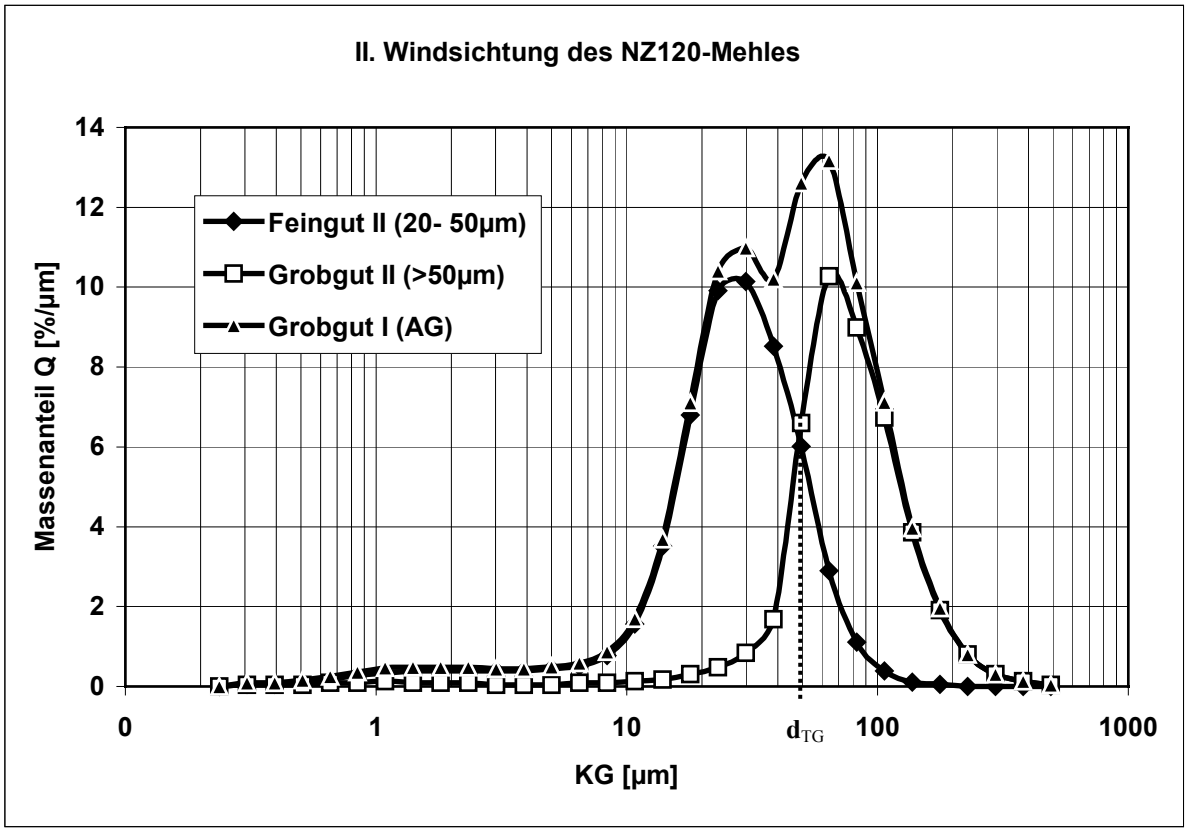
9.18 Trennschnitte bei der Windsichtung des Walzenmehles



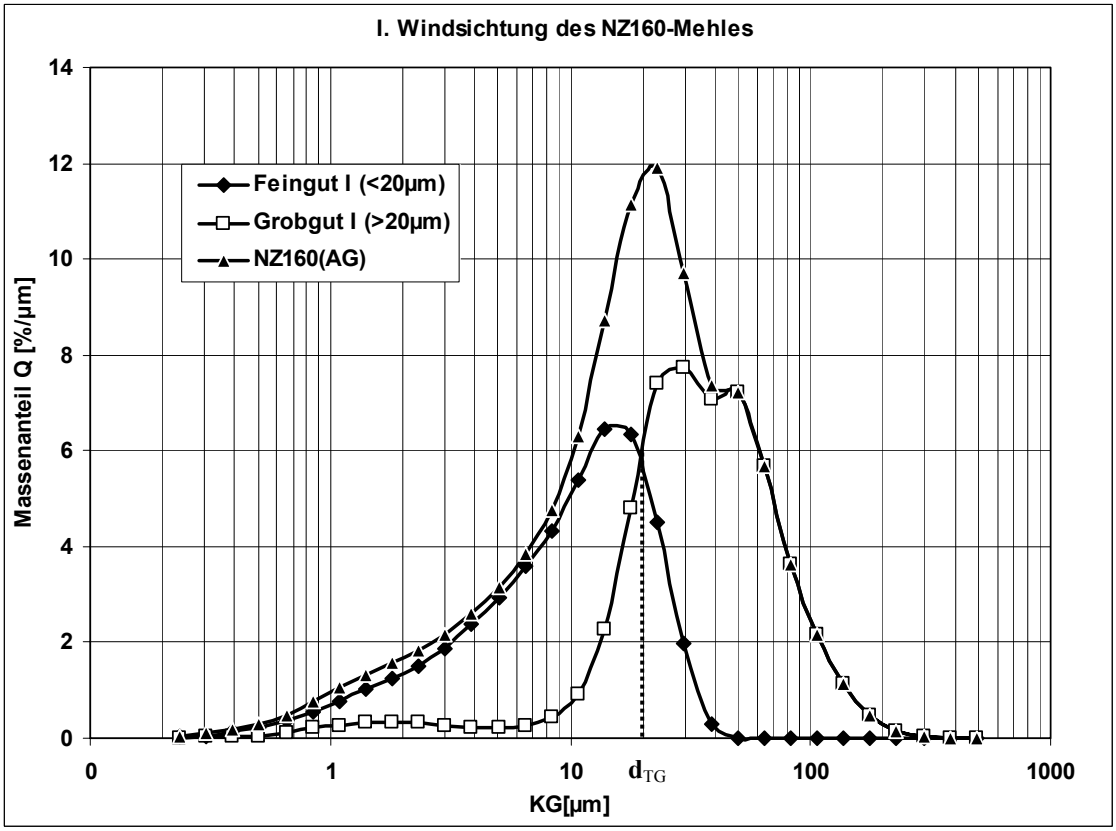


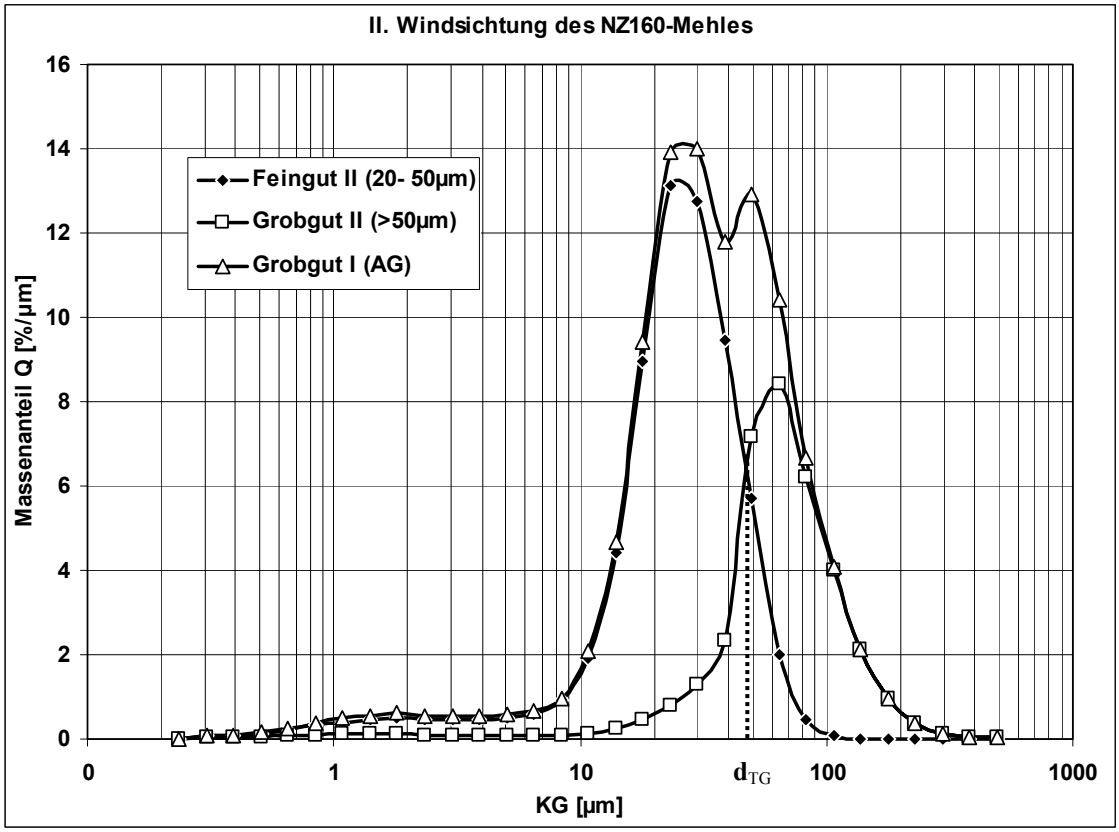
9.19 Trennschnitte bei der Windsichtung des NZ120-Mehles



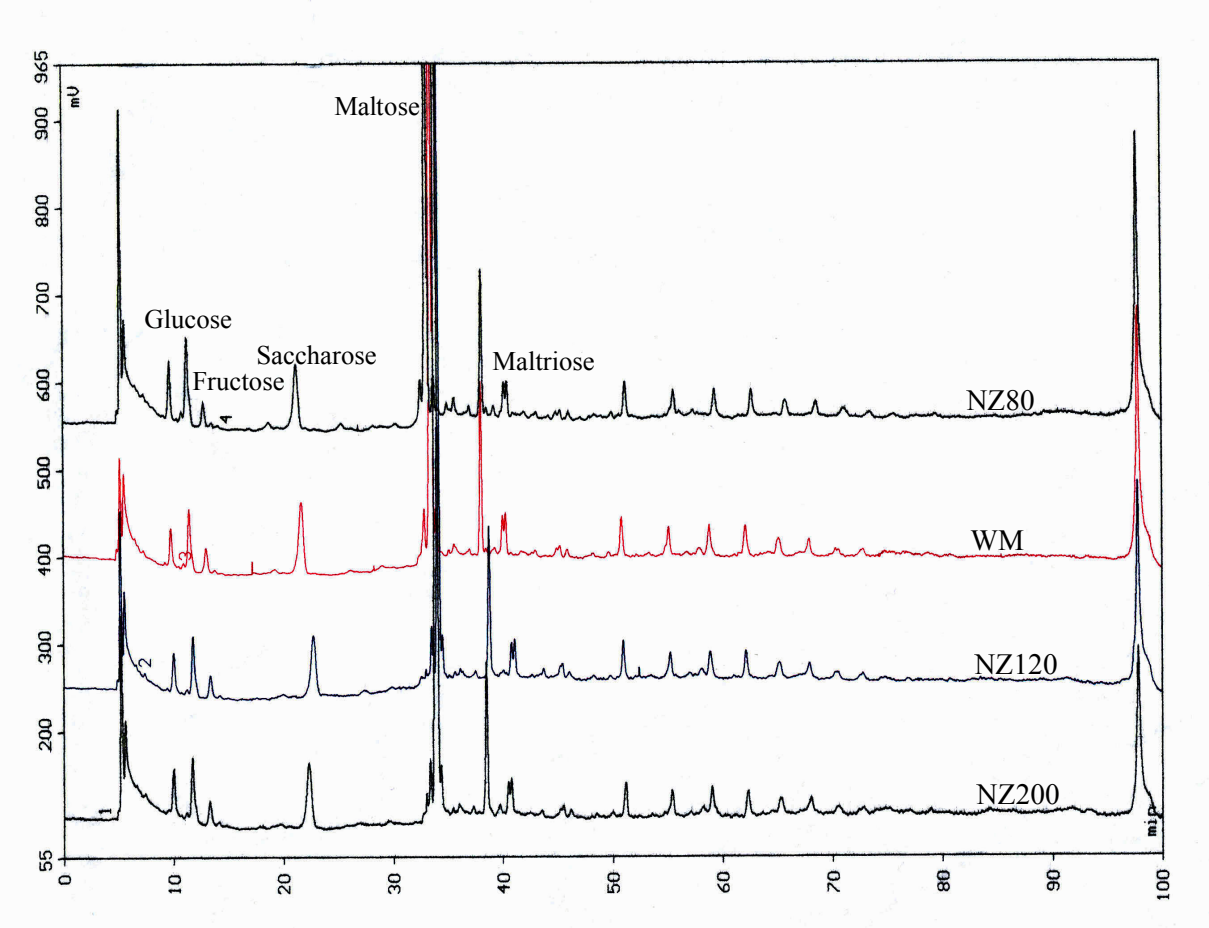


9.20 Trennschnitte bei der Windsichtung des NZ160-Mehles

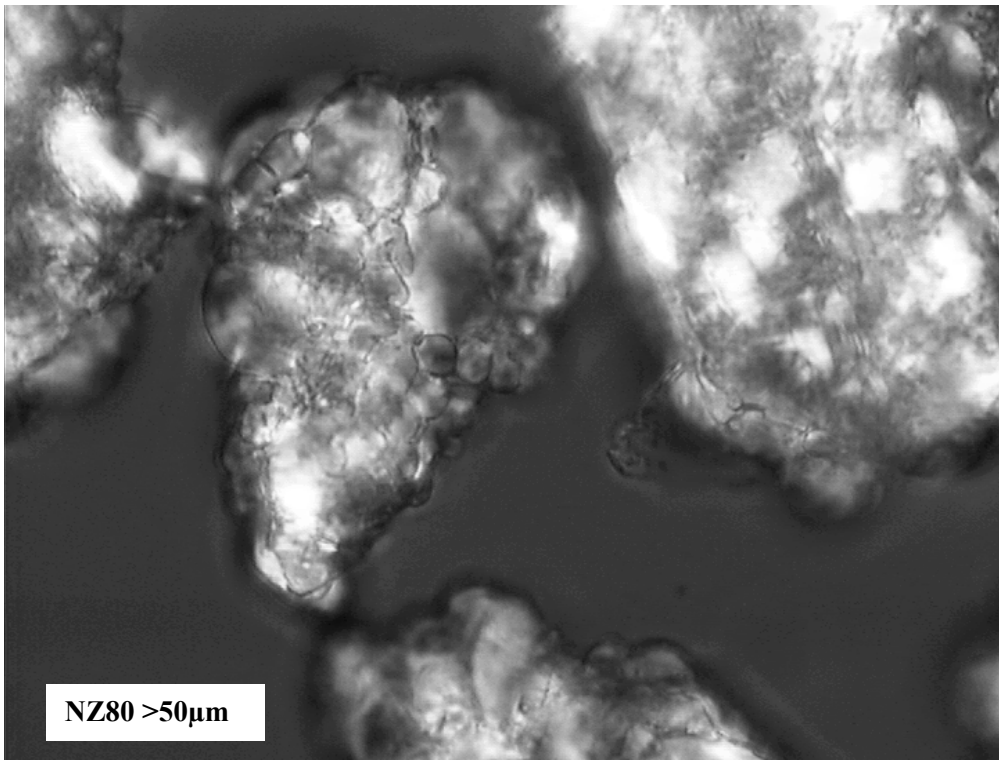


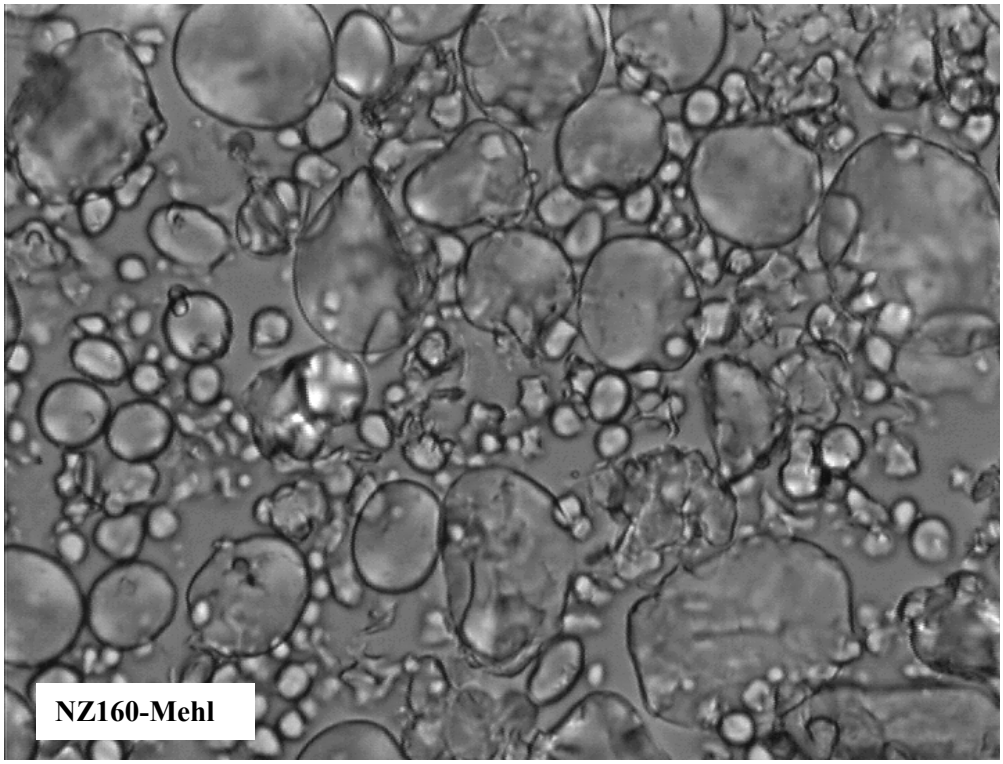


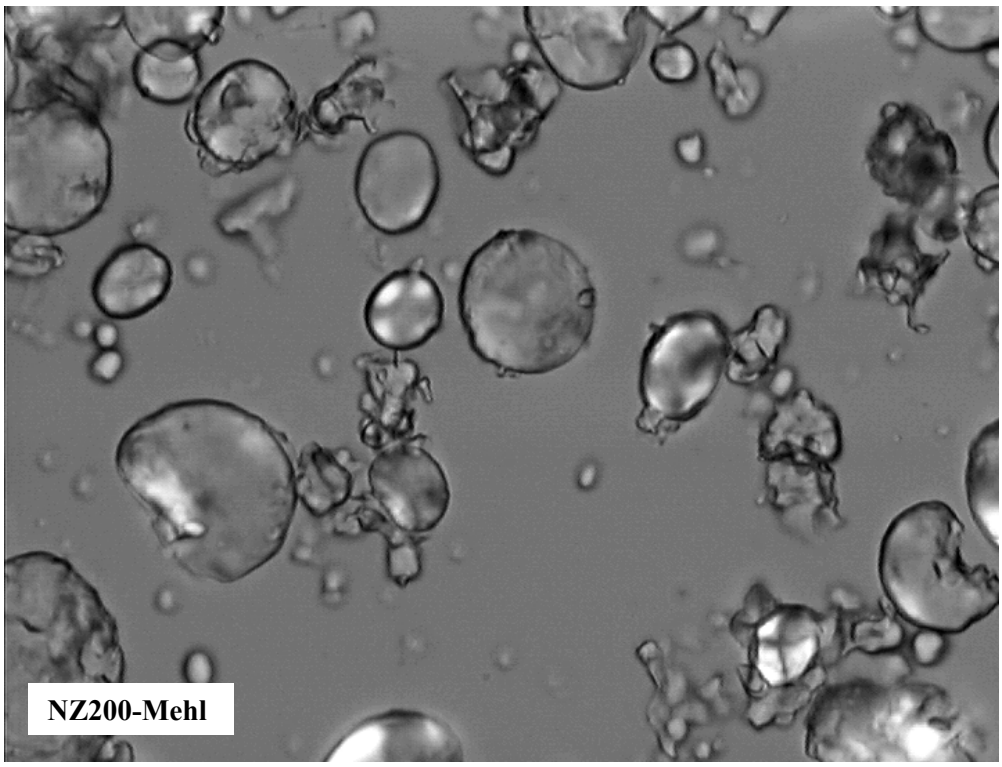
9.21 Chromatogramme der Zuckergehaltbestimmung der Mehle

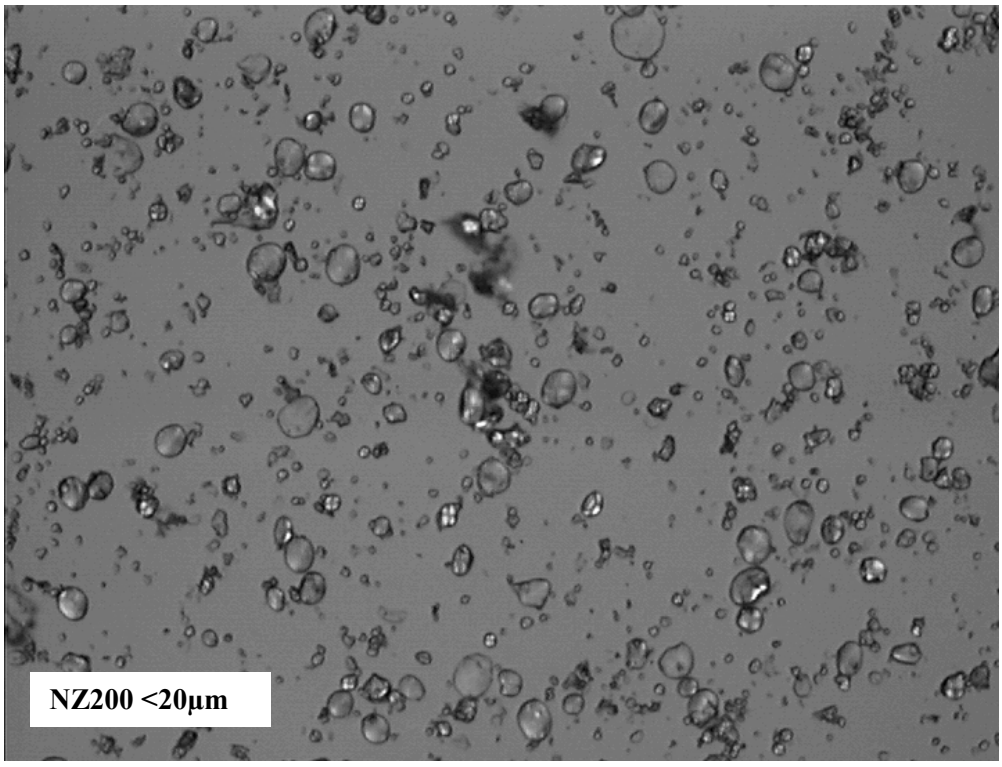


9.22 Lichtmikroskopische Aufnahmen von Mehlen und Mehlfraktionen




NZ160-Mehl


NZ200-Mehl


NZ200 <20µm

Persönliche Daten:

Walid Banafa
Geboren am 17.12.1969 in Shabowah, Jemen

Schulbildung:

1975 - 1981	Grundschule in Jemen
1982 - 1984	Oberschule in Jemen
1985 - 1987	Sekundärschule in Jemen, Abschluss: Abitur

Studium:

10.1988 - 08.1989	Sprachkurs (Deutsch)
10.1989 - 09.1992	Lebensmitteltechnologie an der Humboldt Universität zu Berlin
10.1992 - 02.1995	Lebensmitteltechnologie an der Technischen Universität Berlin Spezialisierungsrichtungen Obst-Gemüse-Technologie und Getreidetechnologie Abschluss: Dipl.- Ing. für Lebensmitteltechnologie

Beruflicher Werdegang:

08.1996 - 10.1996	Institut für Genbiologische Forschung Berlin
01.1997 - 01.1998	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Landwirtschaft der Universität Thamar (Jemen)
seit August 2002	Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Firma Planttec Biotechnologie (a group of Bayer CropScience)

Berlin, 09.02.2004