Mechanische Modifizierung prallgemahlener und windgesichteter Mehle unterschiedlicher Weizensorten

vorgelegt von
Diplom-Ingenieurin
Petya Ivanova
aus Yambol, Bulgarien

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. Bernhard Senge
1. Berichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernd Handreck
2. Berichter:	Dir. u. Prof. Dr. rer.nat. Meinolf G. Lindhauer

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 13. März. 2006

Berlin 2006
D 83

Meinen Eltern gewidmet

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand an der Bundesforschungsanstalt für Ernährung und Lebensmittel in Detmold, am Institut für Getreide-, Kartoffel- und Stärketechnologie, in Verbindung mit dem Institut für Lebensmitteltechnologie – Fachgebiet Aufbereitungstechnologie der Technischen Universität Berlin.

Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Bernd Handreck gilt mein herzlicher Dank für die mir gebotene Möglichkeit in seinem Arbeitskreis zu promovieren sowie für die zahlreiche fachliche Betreuung und Unterstützung, für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die menschliche Hilfe in schwierigen für mich Situationen.

Herrn Direktor und Professor Dr. Meinolf G. Lindhauer und Herrn Dr. Klaus Münzing danke ich für die gegebene Möglichkeit, die experimentelle Teil dieser Arbeit an der Bundesforschungsanstalt für Ernährung und Lebensmittel in Detmold durchführen zu können sowie für die Betreuung bei der Anfertigung meiner Dissertation.

Frau Assoc. Prof. Dr. Ana Krasteva (Universität für Lebensmitteltechnologie Plovdiv, Bulgarien) danke ich für die überlassene Möglichkeit der Verbindung mit der Technischen Universität Berlin.

Bei Herrn Prof. Dr. Joachim Kunert und Frau Dipl. Stat. Nadine Henkenjohann, Universität Dortmund bedanke ich mich für die statistischen Beratung. Herrn Dr. Horst Neve, Bundesforschungsanstalt für Ernährung und Lebensmittel in Kiel möchte ich für die Durchführung der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen danken.

Mein besonderer Dank gilt allen aktiven und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen an der Bundesforschungsanstalt für Ernährung und Lebensmittel in Detmold und dem Fachgebiet Aufbereitungstechnologie am Institut für Lebensmitteltechnologie der Technischen Universität Berlin für die fachliche Betreuung und persönliche Unterstützung.

Besonders möchte ich Dr. Manol Roussev für seine Freundschaft, seine ständige Hilfsbereitschaft und die uneigennützige Unterstützung in vielen für mich schwierigen Situationen danken.

Herzlich danke ich meinem Freund Yosif Marov, der in schwierigen Momenten für mich da war und mich moralisch immer unterstützt hat.

Meinen Eltern verdanke ich diese akademische Ausbildung. Ihnen gilt mein herzlicher Dank für das Vertrauen und den grenzlosen Beistand.

1 Einleitung 1

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung 3

3 Theoretischer Teil 4

3.1 Das Weizenkorn 4

3.1.1 Morphologischer Aufbau und grobchemische Zusammensetzung 4

3.1.2 Kornhärte 6

3.1.3 Weizenstärke 8

3.1.4 Weizenproteine 9

3.1.5 Qualität von Weizen 12

3.2 Stand des Wissens zur mechanischen Modifizierung von Weizenmehlen 13

3.2.1 Rührwerkskugelmühle 13

3.2.2 Prallmühle 15

3.2.2.1 Stiftmühle 15

3.2.3 Windsichtung 18

3.2.3.1 Windsichtung von Walzenmehlen 18

3.2.3.2 Windsichtung von Prallmehlen 20

4 Material und Methoden 22

4.1 Versuchsmaterial 22

4.2 Technischer Versuchsablauf 23

4.2.1 Konditionieren 23

4.2.2 Vermahlen 24

4.2.2.1 Mahlautomat 24

4.2.2.2 Sichtermühle 50 ZPS 24

4.2.3 Fraktionieren 27

4.3 Analytische Methoden 28

4.3.1 Korngrößenzusammensetzung 28

4.3.2 Feuchtigkeitsgehalt 28

4.3.3 Mineralstoffgehalt 29

4.3.4 Methoden zur Stärkecharakterisierung 29

4.3.4.1 Stärkegehalt 29

4.3.4.2 Bestimmung der mechanischen Stärkebeschädigung 29

4.3.4.3 Wasserbindevermögen 29

4.3.4.4 Bestimmung der Viskositäts – Eigenschaften 30

4.3.4.5 Bestimmung der Desintegrationswärme der Stärke im Mehl 31
4.3.5 Methoden zur Protein- und Kleber-Charakterisierung 34
4.3.5.1 Bestimmung des Rohproteingehaltes 34
4.3.5.2 Bestimmung des löslichen Proteingehaltes 35
4.3.5.3 Bestimmung des Feuchtglutengehaltes der Prallmehle 35
4.3.5.4 Bestimmung des Feuchtglutengehaltes der windgesichteten Mehlfraktionen 35
4.3.5.5 Bestimmung des Sedimentationswertes der Prallmehle 35
4.3.5.6 Bestimmung des Sedimentationswertes der windgesichteten Mehlfraktionen 36
4.3.5.7 Kriecherholungsmessung von Kleber 36
4.3.5.8 Rheologische Untersuchungen 37
4.3.5.8.1 Farinograph 37
4.3.5.8.2 Extensograph 38
4.3.5.9 Backversuche 38
4.3.6 Mikroskopische Untersuchungen 38
4.4 Statistische Methoden 38
4.4.1 Statistische Versuchspläne 38
4.4.2 Statistische Auswertung 39

5 Ergebnisse und Diskussion 41
5.1 Ergebnisse der Untersuchungen zu geprallten Mehle 41
5.1.1 Verfahrensdaten der Prallzerkleinerung 41
5.1.1.1 Durchsatz 41
5.1.1.2 Temperatur des Mehles 43
5.1.2 Physikalische Eigenschaften 46
5.1.2.1 Granulation und Oberfläche 46
5.1.2.2 Mikroskopische Aufnahmen 56
5.1.3 Stoffliche Zusammensetzung der Prallmehle 63
5.1.3.1 Feuchtigkeitsgehalt 63
5.1.3.2 Mineralstoffgehalt 66
5.1.3.3 Gesamt- und salzwasserlösliches Protein 66
5.1.3.4 Stärkegehalt 68
5.1.4 Funktionelle Eigenschaften 69

5.1.4.1 Eigenschaften der Stärke der Prallmehle 69
5.1.4.1.1 Stärkebeschädigung 69
5.1.4.1.2 Wasserbindevermögen 71
5.1.4.1.3 Viskositäts – Eigenschaften 73
5.1.4.1.4 Desintegrationswärme der Stärke im Mehl 76
5.1.4.2 Eigenschaften und Qualität des Glutens der Prallmehle 81
5.1.4.2.1 Feuchtglutengehalt 81
5.1.4.2.2 Sedimentationswert 84
5.1.4.2.3 Viskoelastisches Verhalten von Gluten 86
5.1.4.3 Rheologische Eigenschaften der Teige 90
5.1.4.3.1 Farinogramme der Prallmehle 90
5.1.4.3.2 Extensogramme der Teige der Prallmehle 97
5.1.4.4 Backeigenschaften 101
5.1.5 Schlussfolgerungen zum Einfluss der Prallzerkleinerung auf die Weizenmehleigenschaften 103
5.2 Ergebnisse der Untersuchungen zu windgesichteten Mehlfraktionen 106
5.2.1 Ermittlung der Sichtraddrehzahlen für die Mehlfraktionierung 106
5.2.2 Physikalische Eigenschaften der Mehlfraktionen 109
5.2.2.1 Massenanteile, Granulation und Oberfläche 109
5.2.2.2 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen 113
5.2.3 Änderung der stofflichen Zusammensetzung der Mehlfraktionen 119
5.2.4 Funktionelle Eigenschaften der windgesichteten Mehlfraktionen 123
5.2.4.1 Stärkebeschädigung 123
5.2.4.2 Wasserbindevermögen 125
5.2.4.3 Viskositäts – Eigenschaften 126
5.2.4.4 Sedimentationswert 128
5.2.4.5 Rheologische Eigenschaften des Glutens 129
5.2.5 Schlussfolgerungen zu den Eigenschaften der windgesichteten Mehlfraktionen 132

6 Zusammenfassung 134

7 Literaturverzeichnis 137

8 Anhang 151

8.1 Statistische Versuchspläne 151
8.2 Analytische Daten 152
8.3 Statistische Auswertung 160
8.4 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis 164

9 Lebenslauf 166

1 Einleitung

Aus betriebsspezifischen und wirtschaftlichen Erwägungen sind neue Techniken und Technologien der Mehlherstellung gefragt, die mit herkömmlichen Produkt- und Prozesseigenschaften der Mehlerzeugnisse nicht mehr vergleichbar sind.

Bei der konventionellen Vermahlung werden qualitativ, d.h. über die Struktur- und Funktionseigenschaften sowie die Zusammensetzung, definierte Weizenpartien zu Typenmehlen verarbeitet. Hauptsächlich resultieren unterschiedliche Vermahlungsmischungen, variable Protein- und Feuchtklebergehalte, Kleberqualitäten, Sedimentationswerte und Wasseraufnahmen, die letztlich die Teigeigenschaften und das Backverhalten bestimmen. Durch die Selektierung einzelner Passagenmehle können zusätzlich zu den Mineralstoffgehalten, der Korngrößenverteilung sowie der Helligkeit und Farbe ebenfalls die Eigenschaften bei der Weiterverarbeitung zu Lebensmitteln beeinflusst werden. Beide Einflussgrößen (Sortenauswahl und Mahltechnik) haben in Bezug auf die Sicherstellung kundenspezifischer Anforderungsprofile ihre Grenzen in den Verarbeitungseigenschaften und der Verwendbarkeit des Rohstoffs (Müller u. Schneeweiß, 2001).

Werden in Ergänzung zur konventionellen Vermahlung thermische und hydrothermische Behandlungen sowie spezielle mechanische Modifizierungen mittels Kugel- oder Prallmühlen durchgeführt, kann in weiterem Umfang auf strukturelle und funktionelle Mehleigenschaften sowie auf die Zusammensetzung Einfluss genommen werden. So erlauben Verfahren zur Veränderung der Korngrößenverteilung sowie der spezifischen Funktionseigenschaften der Mehle, z.B. Kleberaggregation, Stärkekornbeschädigung und Wasseraufnahme, heiß-/kaltrheologische Teigeigenschaften, Einsatzmöglichkeiten, die über den klassischen Verwendungszweck hinausgehen. So finden die mechanisch modifizierten Mehle und deren durch Klassierung gewonnenen Fraktionen Verwendung, beispielsweise bei der Herstellung von Waffeln und Oblaten, Keksen, Panaden, in der Suppenindustrie, als Aromaträgerstoff für Getränke oder als Haftmehle für unterschiedliche Lebensmittel (Schlauri, 1999; Erling, 2002; Banafa, 2004).

Lösungswege für die Erlangung spezieller Struktur- und Funktionseigenschaften sind in der Prallbehandlung und der ergänzenden Windsichtung zu sehen. Da dies auf dem trockenen Weg geschieht, können sich zusätzlich wirtschaftliche Vorteile gegenüber der nasstechnischen Stärkegewinnung ergeben. Da auf der Zutatenliste von

Lebensmitteln die mechanische Mehlbehandlung nicht hervorgehoben werden muss (im Gegensatz zur Stärke), ergeben sich auch Vorteile, die das Image eines Lebensmittels verbessern.

Durch Prallzerkleinerung wird im Allgemeinen eine höhere kinetische Energie in das Gut eingetragen als mit der Walzenzerkleinerung. Werden nach klassischem Verfahren gewonnene Mehle mechanisch behandelt, führt dies zu einem erhöhten Zerkleinerungseffekt mit weitestgehender Strukturauflösung der Mehlkörper in Protein und Stärke bzw. zu einem hohen Feingutanteil (Degant, 1996). Diese mechanische Modifikation verändert das ursprüngliche sortenabhängige Profil der Stärke- und Gluteneigenschaften. Bei der Feinsttrennung wird das geprallte Mehl in mindestens zwei Fraktionen mit unterschiedlicher Korngröße getrennt. Ein wesentliches Ziel des Prallens und Windsichtens besteht darin, die Ausgangsmehle in eine feine Fraktion mit möglichst hohem Proteingehalt und eine grobe Fraktion mit möglichst niedrigem Proteingehalt zu separieren. Die Kombination der ergänzenden Prallzerkleinerung und Partikeltrennung von Mehlen beeinflusst sowohl die stoffliche Zusammensetzung der Fraktionen als auch deren funktionellen Eigenschaften, wenn auch die genotypischen Eigenschaften der Weizensorte nicht vernachlässigt werden dürfen (Zwingelberg, 1997).

Mechanisch nachbehandelte Mehle weisen in Abhängigkeit von der Weizensorte und dem Mahlverfahren höhere Stärkekornbeschädigungsgrade, Wasseraufnahme- und Wasserbindungsfähigkeit sowie niedrigere Viskositäten als die Ausgangsmehle auf. Die Veränderung der Löslichkeit der Proteine sowie die Verschiebung von Proteingruppen durch eine nachfolgende Windsichtung haben veränderte Feuchtglutengehalte und Glutenqualitäten zur Folge. Mit steigender Prallintensität und in Abhängigkeit von der Stoffzusammensetzung des Ausgangsmaterials verändern sich die technologischen Teig- und Backeigenschaften unterschiedlich.

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, den Einfluss der mechanischen Modifikation durch Prallzerkleinerung auf die stoffliche Zusammensetzung und die funktionellen Eigenschaften der Weizenmehle bzw. der daraus windgesichteten Fraktionen zu untersuchen.

Für die Untersuchungen wurden Weizenmehle aus den Sorten „Contra“, „Tarso“ und „Akratos“ mit einem Aschegehalt von 0,55 % ermahlen.

Um Sorteneinflüsse darstellen zu können, sind die sortenreinen Typenmehle nachfolgend ein- und zweistufig geprallt worden. Dazu wurde in einer Sichtermühle 50 ZPS mit ausgewählten und statistisch variierten Dosierschnecken-Drehzahlen, Sichtrad-Drehzahlen und Umfangsgeschwindigkeiten gearbeitet. Um die Pralleffekte deutlich herauszustellen, sind stets die zweistufig geprallten Weizenmehle im Windsichter 50 ATP in feine und grobe Fraktionen klassiert worden. Die geprallten Mehle und die gesichteten Mehlfraktionen wurden auf ihre stoffliche Zusammensetzung und auf ihre funktionellen Eigenschaften untersucht.

3 Theoretischer Teil

3.1 Das Weizenkorn

3.1.1 Morphologischer Aufbau und grobchemische Zusammensetzung

Das Weizenkorn besteht aus zusammengewachsener Frucht- und Samenschale, Keimling und Endosperm (Aleuronschicht und Mehlkörper) (Abb. 1). Das Endosperm wird von der Aleuronschicht nach außen begrenzt.

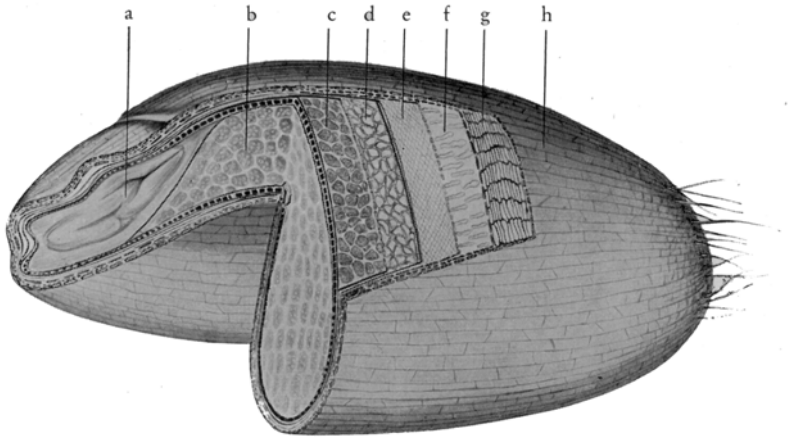


Abb. 1: Morphlogischer Aufbau des Weizenkornes
a: Keimling, b:Mehlkörper, c: Aleuronzellen, d: Hyaline Schicht, e: Samenschale, f: Schlauchzellen, g: Querzellen, h: Längszellen (Rohrlich u. Brückner, 1966)

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

Tabelle 1: Stoffliche Zusammensetzung des ganzen Weizenkorns und seiner Hauptkomponenten (in % i.Tr.) (Lindhauer, 2003)

	Ganzes Korn	Mehlkörper	Schale (Kleie)	Keimling
Eiweiß	16	13	16	22
Fett	2	1,5	5	7
Kohlenhydrate	68	82	16	40
Ballaststoffe	11	1,5	53	25
Mineralstoffe (Asche)	1,8	0,5	7,2	4,5
Sonstiges	1,2	1,5	2,8	1,5

Die Schalen des Weizenkorns (15 Prozent des Korngewichts) enthalten Ballaststoffe, Mineralstoffe, Farbstoffe, dazu viel Eiweiß und Vitamine. Beim Mahlen werden die Schaleschichten als Kleie abgetrennt, außer im Vollkornmehl, das eine Ausmahlung von 98% besitzt, das heißt 98% des Weizenkorns werden vermahlen (Lindhauer, 2003).

Der Keimling (2,5% des Korngewichts) ist eine komplette Miniaturpflanze, die aus Wurzel-, Spross- und Blattanlage besteht. Sie entwickeln sich nach der Saat zur neuen Weizenpflanze. Der Keimling ist eiweißreich und enthält den größten Teil des im Weizenkorn gespeicherten Fettes sowie Vitamine. Je nach Vermahlungsdiagramm werden Keimling, äußere und innere Fruchtschale sowie die Aleuronschicht der Kleie zugeführt.

Die Masse des Weizenkornes besteht hauptsächlich aus dem stärkehaltigen Mehlkörper, welcher der Mehlherstellung dient. Der Mehlkörper (82,5 Prozent des Korngewichts) enthält vor allem Kohlenhydrate, größtenteils Stärke, und Protein. Er besteht aus großen dünnwandigen Zellen, in denen sich die Stärkekörner und als Einbettungssubstanz das Protein befinden. Die Wandstärke der Mehlkörperzellen hat Einfluss auf die Mahleigenschaften von Weizen. Zwischen der Wandstärke dieser Endospermzellen und der Mehlausbeute besteht eine gute Korrelation (Rohrlich u. Brückner, 1966).

Das Speichereiweiß besteht zu 85% aus den so genannten Klebereiweißen Gliadin und Glutenin, die visko - elastische Eigenschaften besitzen und somit die Grundlage der Teigbildungseignung und Backfähigkeit des Weizens ausmachen. In Abhängig-

keit von Sorte, Düngung und Standortbedingungen kommt es zu Verschiebungen im Verhältnis Kohlenhydrat/Eiweiß. So kann beispielsweise der Eiweißgehalt zwischen 8 und 20% variieren.
Der Mehlkörper enthält neben Stärke und Eiweiß auch Zucker, Mineralien und wenige Vitamine.

3.1.2 Kornhärte

Die „Kornhärte“ ist eine wichtige physikalische Eigenschaft der Korngewebestruktur sowohl des als Hartweizen bezeichneten Durum-Weizens als auch des Brot- oder Aestivum-Weizens (Weichweizen) (Lindhauer, 2003).
Die Kornhärte des Weizens ist ein charakteristisches Sortenmerkmal, das in seiner Ausprägung von genetischen Faktoren und klimatischen Bedingungen sowie von Boden und Düngung beeinflusst wird (Wrigley, 1972; Meuser at al., 1977).
Die Härte des Kornes steht in erster Linie mit dem Proteingehalt im Zusammenhang und ist dafür verantwortlich, wie Eiweiß und Stärkekörner im Endospermgewebe strukturell miteinander in Verbindung stehen. Während der Stärkekorn- und Proteinsynthese sowie der nachwachsenden Austrocknung wird in die Endospermzellen eine bestimmte Packungsdichte erreicht, die auch von der Verteilung der Stärkekorngröße beeinflusst wird. Bei einer vorgegebenen Gesamtmasse wird die Packungsdichte um so größer sein, je kleiner die Stärkekörner sind. Da gleichzeitig bei kleiner werdendem Durchmesser der Körner ihre Gesamtoberfläche wächst, kann die Proteinablagerung gleichmäßiger erfolgen. Dadurch werden die Stärkekörner vollständiger eingebettet, womit auch bessere Voraussetzungen für eine festere Proteinbindung an die Stärke gegeben sind (Meuser at al., 1977). So zeichnen sich härtere Weizen, also solche mit härterem Endosperm, durch höhere Proteingehalte aus, und neben vorhandenen Proteinkörpern sind die Lücken der Stärkekörner mit Eiweißfilmen, die sich auch über die Stärkekornoberflächen hinziehen, ausgefüllt. Weichere Formen des Weichweizens sind oft proteinärmer. Zwischen den Stärkekörnern im Endosperm bestehen luftgefüllte Lücken, und Eiweiß ist zwischendrin in Form von Proteinkörpern eingebettet. (Belderok et al., 2000).
Im Endosperm von Weizen mit harter Kornstruktur liegen die Stärkekörner sehr kompakt eingebettet in der Proteinmatrix (Abb. 2a und 2b). Dabei sind die Stärkekörner mit dem umgebenden Eiweiß nicht nur strukturell eng verbunden, sondern durch

chemische Bindungen auch eng miteinander verknüpft (Barlow et al., 1973). Demgegenüber zeigt das Endosperm weicher Weizen eine aufgelockertere Struktur (Abb. 2c und 2d). Das Eiweiß bildet keine geschlossene Matrix und besteht in höherem Maße aus einzelnen Partikeln, die mit den Stärkekörnern in weniger fester Verbindung stehen. Zwischen den überwiegend frei liegenden Stärkekörnern befinden sich mikroskopisch kleine Hohlräume, die dem Endosperm das mehlige Aussehen verleihen (Meyer u. Zwingelberg, 1998).

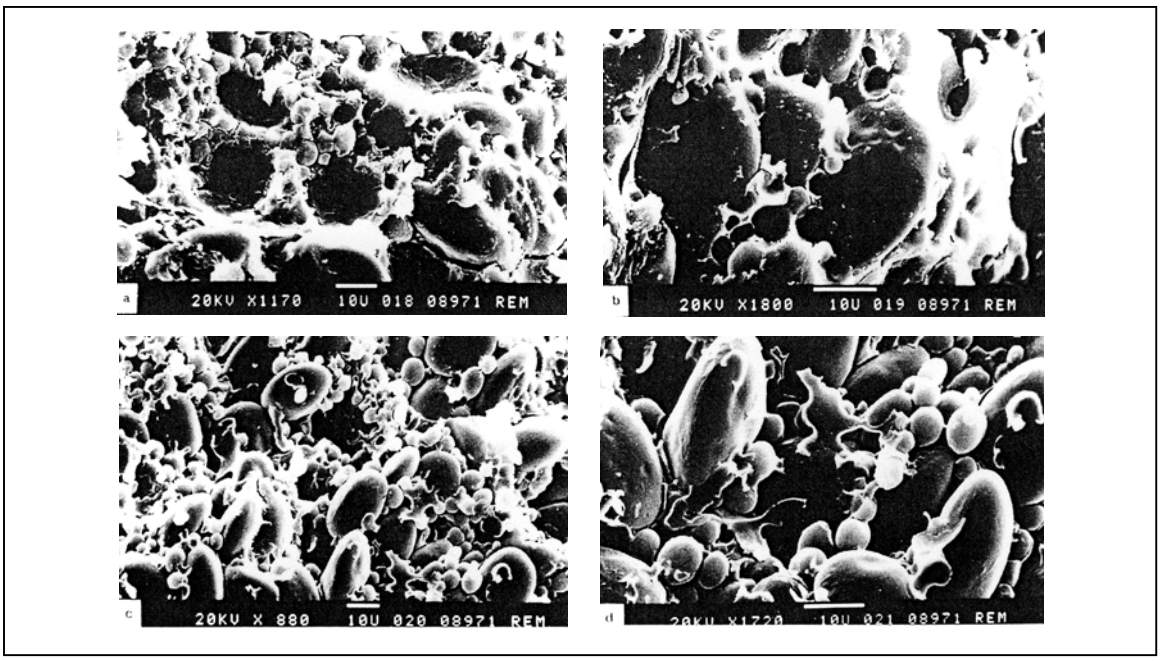


Abb. 2: Rastelektronenmikroskopische Aufnahmen des Emdosperms von Weizen mit harter (a und b) sowie weicher (c und d) Kornstruktur (Meyer u. Zwingelberg, 1998)

Optisch wirken härtere Endosperme dunkel bis gläsern glänzend. Aus Sicht der Vermahlung fällt aus einem weicheren Endosperm das Mehl leichter an; die Stärke ist weniger beschädigt und solche Mehle eignen sich besonders für die Stärkegewinnung und die Keks- und Waffelherstellung (Bonjean u. Angus, 2001). Aus Weizen mit härterer Kornstruktur ermahlen sich Mehle mit größerer Stärkebeschädigung, eine Eigenschaft, die wegen der erhöhten Wasseraufnahme neben dem höheren Proteingehalt bei der Herstellung von Brot und hefegelockerten Backwaren erwünscht ist.

3.1.3 Weizenstärke

Die Stärke ist das bedeutendste und am weitesten verbreitete Reservekohlenhydrat. Sie ist im Weizenkorn ausschließlich im Mehlkörper lokalisiert. Bezogen auf ihren Massenanteil ist Stärke der bedeutendste Inhaltsstoff des Weizens. Das Stärkekorn ist ein uneinheitlich organisch gewachsenes, komplex strukturiertes Gebilde. Es besteht aus etwa 25% linearkettiger Amylose und aus etwa 75% verzweigtem Amylopektin. Es enthält weiterhin kleine Mengen an Lipiden, Proteinen sowie Mineralstoffen (Becker u. Acker, 1976; Schäfer, 1985).

Weizenstärke kommt in Form von rundlichen Körnern vor, die in einer Proteinmatrix eingebettet sind. Die größeren Körner haben eine linsenartige Form und besitzen einen Durchmesser von ca. 15-30 µm. Sie machen etwa 60-70 % des Gesamtanteils der Weizenstärke aus. Die kleineren Körner sind kugelförmig und ca. 1-10 µm groß. Der Trockenmassenanteil der Stärkekörner im Weizenmehl beträgt ca. 80 %. Der Anteil an Stärkekörnern < 10 µm macht etwa 20 % aus. Die Anzahl an Stärkekörnern in einem Weizenkorn beträgt ca. $7 \cdot 10^8$; sie nehmen eine Oberfläche von etwa 350 cm^2 ein (Evers u. Lindley, 1977; Stevens u. Evers, 1983; Seib, 1994).

Die funktionellen Eigenschaften der Weizenstärke im 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 Quellung, Verkleisterung, Viskositäts-Ausbildung und Retrogradation. Diese Eigenschaften werden von mehreren Faktoren beeinflusst. Unter anderem kann die Art und der Umfang der Stärkebeschädigung durch die Vermahlung beeinflusst werden. Durch Prallvermahlung können höhere Anteile an Stärkekörnern aus der verkitteten Proteinmatrix herausgelöst werden. Dabei werden die Stärkekörner mehr oder weniger stark deformiert (Zwingelberg 1997). Das native Stärkekorn ist praktisch mit den Mitteln der Prallzerkleinerung nicht weiter zerkleinerbar. Stärkekörner verhalten sich bei der Prallzerkleinerung wie hochelastische Mikrokugeln (Lauer, 1983).

Die mechanische Beschädigung beim Prallen besteht im Unterschied zu früheren Auffassungen nicht nur in einer äußerlichen Beschädigung der Stärkekörner, sondern teilweise auch in einer Veränderung der präexistierenden inneren übermolekularen Struktur. Die bei der mechanischen Beanspruchung zugeführte Energie bewirkt neben der plastischen Verformung der Stärkekörner auch eine Modifikation der ü-

bermolekularen Struktur der Stärke (Rabe u. Meyer, 1997). Dabei nimmt die Zahl der Wasserstoffbrückenbindungen durch Auflösung der Nebenvalenzbindungen stark ab. Dies führt zu einer Desintegration der gewachsenen Stärkekornstruktur und zu einer Abnahme der kristallinen Bereiche. Daneben erfolgt auch ein Molekülabbau, wobei aber weniger die Amylosemoleküle, sondern zunächst die größeren Amylopektinmoleküle abgebaut werden. Durch die Abnahme der kristallinen Bereiche werden diese in einen ungeordneten amorphen Zustand überführt. Deshalb wurde der Vorschlag gemacht, den Begriff „beschädigte Stärke“ zutreffender durch „deformierte Stärke“ zu ersetzen (Meuser et al., 1978; Morrison et al., 1994). Die Deformierung umfasst somit nicht immer das ganze Stärkekorn, sondern kann sich auch auf einen Teil der inneren Sequenzen beziehen.

Mit dem Anteil mechanisch beschädigter Stärkekörner korreliert die Wasseraufnahme positiv. Ein hoher Beschädigungsgrad führt zu einer höheren Wasseraufnahme. Das Quell- und Verkleisterungsvermögen der Stärke werden mit steigender Stärkebeschädigung verringert (Klingler et al., 1986).

An der Veränderung der Eigenschaften der nativen Weizenstärken besteht sowohl ein großes wissenschaftliches als auch technisches Interesse, da die physikalische Modifizierung den Einsatzbereich der Stärke erweitert kann und neuen Anwendungszwecken zugeführt werden können. Durch die mechanische Modifizierung können die Stärkeeigenschaften verändert werden, wobei einzelne Eigenschaften hervorgehoben oder abgeschwächt werden. Es ist auch möglich, neue Stärkeeigenschaften zu erzeugen. Die Veränderungen hängen vom Verfahren und den Verfahrensbedingungen ab.

3.1.4 Weizenproteine

Proteine sind in allen Teilen des Weizenkorns enthalten. Die Aleuronschicht und der Keimling besitzen den jeweils relativ höchsten Proteingehalt, jedoch enthält der Mehlkörper wegen seines hohen Anteils am Gesamtkorn die Hauptmasse des Gesamtproteins mit etwa 70 %.

Der Proteingehalt kann bei Weizen in hohem Maße durch die Stickstoffdüngung beeinflusst werden. Es bestehen jedoch auch sortenspezifische Unterschiede im Proteinbildungsvermögen. Steigende Proteingehalte wirken sich in der Tendenz positiv auf

das Backverhalten bei der Brotherstellung aus, weil sich mit dem Proteinanstieg auch der Anteil der Klebereiweiße erhöht. Für die Keksherstellung werden Sorten mit niedrigeren Protein- und Klebergehalten bevorzugt (Dexter et al., 1994; Bundessortenamt, 2003).

Die Proteine weisen in Abhängigkeit von Art und Anzahl ihrer funktionellen Gruppen sowohl hydrophobe als auch hydrophile Eigenschaften auf. Versetzt man einen Weizenteig mit größeren Mengen Wasser, so dass die wasserlöslichen Bestandteile und die Stärke ausgespült werden, bleibt ein viskoelastischer, eiweißreicher Stoff zurück, den man als Weizenkleber oder auch Weizengluten bezeichnet. Diesem Kleber schreibt man bei der Backwarenherstellung wichtige technologische Eigenschaften zu. Seine Menge und seine rheologischen Eigenschaften sind wichtige Qualitätsparameter bei der Beschreibung eines Weizenmehles.

Die wasser- sowie salzwasserlöslichen Proteine (Albumin, Globulin) sind nichtgliutenbildende Proteine. Sie befinden sich hauptsächlich im Keim und in der Aleuronschicht, sie sind aber auch im Endosperm lokalisiert. Diese Proteine gelten aufgrund ihrer biologischen Funktion als ernährungsphysiologische Proteine. Qualitativ bessere Weizenmehle haben im allgemeinen einen höheren Anteil an salzwasserlöslichen Proteinen als schwache Mehle (Klingler, 1995).

Die Glutenproteine sind die beiden quellfähigen Speicherproteine Gliadin und Glutenin. Sie bilden den Proteinkomplex Gluten. Beim Kneten bilden sich Aggregate von niedermolekularen Gliadinkomponenten mit höchsten Molekulargewichtsanteilen, und diese Aggregation wird durch Lipidkomponenten vermittelt. Es wird von Weipert (1978) und Bushuk et al. (1985) gezeigt, dass spezifische Kohlenhydrate mit spezifischen Proteinen des Klebers zusammenwirken und dabei große Aggregate bilden. Derartige Aggregate tragen wesentlich zu den rheologischen Eigenschaften des Klebers bei.

Die niedermolekularen löslichen Proteine (vorwiegend Gliadine) liegen überwiegend monomer vor ($M_r \approx$ 30-60 kDa). Sie setzen die Knetzeit herab und sind für die Dehnbarkeit wichtig. Sie erniedrigen den Dehnwiderstand und erhöhen die Dehnbarkeit. Die höhermolekularen Glutenine sind über Disulfidbindungen und nichtkovalente Bindungen zu Aggregaten mit einem sehr breiten Molekulargewichtsbereich ($M_r \approx$ 100 kDa – 20000 kDa) verbunden und kontrollieren dagegen den Dehnwiderstand (Rohrlich, 1973; Kim et al., 1988; Wrigley u. Bietz, 1988).

Sorten- und anbaubedingte Unterschiede in den Teigeigenschaften von Weizenmehl werden auf unterschiedliche Strukturen einzelner Kleberproteine wie auch auf ihre Mengen und Mengenverhältnisse im Mehl zurückgeführt. 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 einen sehr wichtigen Faktor für die Proteinqualität darstellt (Kasarda, 1989; Weegel et al., 1996; Southan u. Mac Ritchie,1999).

Die quantitative Bestimmung einzelner Kleberproteintypen und die rheologischen Untersuchungen zeigen, dass die Festigkeit des Klebers wesentlich von der Menge der Gluteninuntereinheiten sowie vom Verhältnis Gliadin/Glutenin bestimmt wird. Für die Kleberqualität spielen neben dem Proteingehalt des Mehles die Struktur und die Menge der HMW-Untereinheiten eine große Rolle (Wieser et al., 1993; Wieser u. Zimmermann, 2000).

Die rheologische Eigenschaften des Klebers reagieren bekannterweise sehr empfindlich gegenüber Oxydation. Oxydationsmittel, wie z.B. Luft, führen im allgemeinen zu Kleberverfestigung. Luftsauerstoff bewirkt beim Kleber eine Molekulargewichtsverschiebung zugunsten sehr hochmolekularer Proteine, deren Ausmaß allerdings stark von der Weizensorte abhängt. Diese Effekte führen zu verschiedenen Hypothesen über die Bedeutung von Thiol- und Disulfidgruppen für die Struktur der Kleberproteine, die u.a. von Bloksma (1975) und Ewart (1977; 1978) zusammengefasst werden.

Der Effekt von Luftsauerstoff wird nicht vorwiegend mit einer Molekulargewichtserhöhung durch Knüpfung neuer intermolekularer Disulfidbindungen zwischen Proteinmolekülen in Verbindung gebracht, sondern mit der Oxydation niedermolekularer Thiole zu den entsprechenden Disulfiden, d.h. mit einer Verhinderung von Molekulargewichtserniedrigung durch Thiol-Disulfidaustauschreaktion zwischen hochmolekularen Proteinen und niedermolekularen Thiolen (Mair u. Grosch, 1979; Dirndorfer et al., 1986; Grosch u. Wieser, 1999).

Es wird von Pawelzik (1991) berichtet, dass die Disulfidbindungen (SS-Bindungen) signifikant für die Teigstruktur und verantwortlich für das dominant elastische Verhalten des viskoelastischen Systems Teig sind. Rheologische Eigenschaften von Teigen werden auf Wechselwirkungen zwischen den SS-Gruppen und SH-Gruppen zurückgeführt.

Die Tatsache, dass die Stärke und Kleber im Teigsystem in Wechselwirkung treten, ist zur Erklärung der Mehlqualität wichtig. Qualitativ schlechter Kleber scheint intensiver mit Stärke in Wechselwirkung zu treten. Die Wasserstoffbrückenbindungen können beim Anteigen des Mehles Assoziationen zwischen Stärke und Proteinen begünstigen (D´Appolonia u. Kim, 1976; Pomeranz, 1988; Hoseney, 1993).
Weizenkleber ist ein Lebensmittel gemäß Deutschem Lebensmittelrecht, sofern er die Mindestanforderungen gemäß den Richtlinien für Stärke und bestimmte Stärkeerzeugnisse mit max. 12 % Feuchtigkeit und mindestens 80 % Protein in der Trockensubstanz erfüllt. Der industriell hergestellte Weizenkleber findet in der Futtermittel- und Nahrungsmittelindustrie hauptsächlich Anwendung. In der Nahrungsmittelindustrie findet das Weizenprotein zum größten Teil seine Anwendung in der Mühlen- und bei der Backwarenproduktion. Bei der heutigen Marktsituation verlangt das backende Gewerbe von einer Mühle Weizenmehle mit gleichbleibenden Qualitäten. Da der Rohstoff Weizen naturgemäß Schwankungen unterworfen ist, bietet sich dem Müller über einen Zusatz von Kleber die Möglichkeit, Schwankungen im Protein- und Klebergehalt des Mehles auszugleichen und dadurch die Verarbeitungseigenschaften seines Produktes, besonders in Bezug auf Teigstabilität, Wasserbindung und Volumenausbeute, zu optimieren.

3.1.5 Qualität von Weizen

Die Einstufung der Weizensorten in so genannte Qualitätsgruppen erfolgt in Deutschland durch das Bundessortenamt auf der Grundlage von definierten Mindestanforderungen der wichtigsten Qualitätseigenschaften – wie Rohproteingehalt, Sedimentationswert, Wasseraufnahme, Teigelastizität, Volumenausbeute, Mehlausbeute - nach dreijähriger Prüfung. Damit soll gewährleistet werden, dass nur Sorten mit einer insgesamt ausgewogenen Qualität auch der entsprechend höheren Qualitätsgruppe zugeordnet werden (Bundessortenamt, 2005).

Tab. 2: Qualitätsgruppen deutscher Weizen (Lindhauer, 2003)

Eliteweizen	(E)	-	Sorten mit hoher Back- und Aufmischqualität
Aufmischweizen	(A)	-	Sorten mit guter Backqualität
Brotweizen	(B)	-	Sorten mit mittlerer Backqualität; bedürfen ggf. der Aufmischung
Sonstige	(C)	-	Sorten mit niedriger Backqualität; für spezielle Anwendungen oder Tierfutter

3.2 Stand des Wissens zur mechanischen Modifizierung von Weizenmehlen

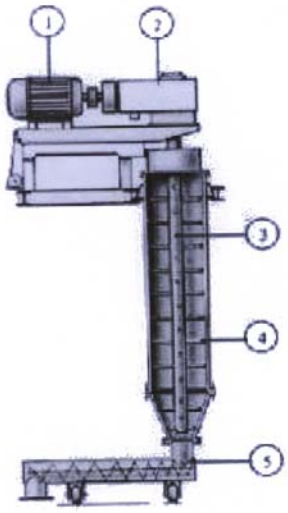
3.2.1 Rührwerkskugelmühle

Zur mechanischen Modifizierung von Weizenmehlen werden Mühlen benötigt, die einen hohen Energieeintrag in das Gut eintragen. Geeignet sind Rührwerkskugelmühlen und Prallmühlen, z.B. Stiftmühlen.

Der Aufschluss eines heterogenen verwachsenen Konglomerates (z.B. das Getreidekorn) bedeutet, dass die Bindekräfte zwischen Primärpartikeln in einer Matrix aufgebrochen werden, ohne sie selber zu zerstören. Unterschiedliches Bruchverhalten, z.B. zwischen Schale und Mehlkörper, ist die Voraussetzung für eine Aufschlussmahlung. Die klassischen Beanspruchungsformen sind Prall, Schlag, Druck, Reibung, Schub, Scherung, Schneiden, Spalten, Biegen. In Zerkleinerungsmaschinen liegen diese Beanspruchungen nie allein und eindeutig vor, auch wenn meist eine der Beanspruchungsformen überwiegt, z.B. im Walzenstuhl: Druck, Schub, Scherung, Reibung (Schwechten u. Degant, 2001).

Für eine weitergehende Aufschlussmahlung versucht man Brüche auszulösen, die möglichst gezielt entlang der Oberflächen der Stärkekörner laufen. Diese Art Brüche sind durch eine Kombination aus Druck und Schub zu erzielen. Diese Beanspruchung wird üblicherweise mit dem Begriff „Attritionsmahlung“ bezeichnet. Die Zerkleinerungstechnik hält eine Reihe von Maschinen bereit, die dies bewerkstelligen. Eine davon ist die Rührwerkskugelmühle.

Die vertikale Rührwerkskugelmühle ist eine kontinuierliche, trocken arbeitende Rührwerksmühle (Abb. 3). Das vertikale Mahlgefäß wird von Mahlgut und Mahlperlen gleichmäßig durchströmt, wobei eine unter dem Mahlgefäß am Auslass angeordnete horizontale Austragsschnecke für den kontrollierten Abzug von Gut und Mahlperlen sorgt. Damit ist also die Verweilzeit des Gutes in der Mühle bestimmt. Die Mahlperlen werden im Kreislauf geführt. Die Drehzahl der Schnecke ist variabel, so dass der Durchsatz in weiten Bereichen einstellbar ist. Gleichzeitig ist die Rührerdrehzahl regelbar. Die Beanspruchung der Mahlgutpartikel in der Rührwerkskugelmühle erfolgt durch Druck, Schlag, Schub und Scherung zwischen den Mahlperlen. Diese haben eine Größe bis 7 mm, meist 1 bis 5 mm (Bode et al., 2001; Lange u. Bode, 2003).



1 regelbarer Antrieb
2 Winkelgetriebe
3 Rührwelle
4 Rührelemente
5 Austragsschnecke

Abb. 3: Rührwerkskugelmühle ATR (Bode et al., 2001)

Zu mehr als 95% wird die bei der Attritionsbehandlung eingebrachte Energie zu Wärme ungesetzt, die zum größeren Teil mit der Mahlgutmischung abgeführt, zum kleineren Teil abgestrahlt wird. Im Bereich höherer Energieeinträge steigt die Mahlguttemperatur im unteren Bereich des Mahlraumes auf Temperaturen um 50°C. Dies entspricht der Vorhersage aufgrund einer energetischen Betrachtung unter Berücksichtigung der spezifischen Wärme der Mahlgutmischung. Allerdings muss den umlaufenden Mahlperlen ausreichend Zeit gegeben werden, sich in einem Reservoir abzukühlen. Dabei können die Temperaturen des behandelten Mehls sicher unter 40°C gehalten werden, so dass thermische Schädigungen des Weizenproteins und ggf. anderer Inhaltstoffe ausgeschlossen sind.

In den Versuchen von Bode et al., 2001 wurde durch Behandlung von Weizenmehl mit einer Rührwerkskugelmühle ATR eine Erhöhung der Farinogramm-Wasseraufnahme um bis zu 29 % erreicht. Diese korreliert sehr gut positiv mit der über Mahlperlen eingetragenen spezifische Energie. Die erhöhte Wasseraufnahme des Mehles ist auf einen etwa zweifachen Anstieg der Stärkebeschädigung zurückzuführen. Eine deutliche negative Korrelation besteht zwischen der Höhe des Viskositätsmaximums aus einem RVA-Viskogramm und der spezifischen Energie.
Das Hauptziel der Verwendung einer derartigen Rührwerkskugelmühle ist eine hohe Stärkebeschädigung mit der Folge einer möglichst hohen Wasseraufnahme. Dies erlaubt verschiedene Einsatzmöglichkeiten der behandelten Mehle. Als Beispiele sind zu nennen:

- Free Flowing Mehle
- Proteinan- und abgereicherte Mehle mit hohen spezifischen Oberflächen für spezielle Mischungen unterschiedlicher Qualitäten
- Funktional Food, z.B. Anreicherung von Polyosen (Hemizellulose)
- Native Stärkeprodukte für den industriellen Bereich, wie Binder, Kleber, Füller, Bio-Polymere

3.2.2 Prallmühle

3.2.2.1 Stiftmühle

Während bei der Zerkleinerung im Walzenstuhl Druck- und Schubkräfte wirken, werden die Teilchen in einer Prallmühle durch Prall 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 so gegen andere Teilchen oder feststehende Prallplatten prallen (Schultze et al., 1985).
Die erste Aufgabe der Zerkleinerungstechnik besteht zunächst darin, durch einen geeigneten Beanspruchungsmechanismus dem Feststoff die Energie zuzuführen, die zur Ausbildung einer Bruchfläche und zur Trennung der Bruchstücke notwendig ist (Lauer, 1983). Das einzelne Teilchen kann dabei für seine Zerkleinerung nur soviel Energie nutzen, wie es selbst kinetische (Bewegungs-) Energie vor dem Aufprall be-

sitzt. Da die kinetische Energie (E) des Teilchens von seiner Masse (m) und seiner Geschwindigkeit (v) abhängt

$$E = \frac{m \cdot v^2}{2}$$ Gleichung [1]

müssen die Geschwindigkeiten der Prallorgane, wenn eine Zerkleinerung erreicht werden soll, um so höher sein, je feiner die Kornstrukturen des Aufgabegutes sind.
Beim Aufprall eines Teilchens auf eine Prallfläche wird die gesamte kinetische Energie in Bruch- und in Verformungsenergie umgewandelt.
Rumpf (1975) weist aber nach, dass von der Verformungsenergie nur ein Teil zum Zerkleinern benötigt wird, und zwar zur Erzielung des Sprödbruches. Der andere Teil dient zur plastischen und elastischen Verformung des Teilchens. Als spezifisches Merkmal der Prallzerkleinerung, Körper im freien Flug zu prallen und aus dem freien Flug aufprallen zu lassen, wird der Zweierstoß angesehen (Rumpf, 1965). Untersuchungen erlauben die Annahmen, dass Bruchvorgänge im Getreidekorn bei Prallbeanspruchung ähnlich ablaufen. An der Aufprallstelle des Gutes entsteht ein Feingutkegel, in dem eine starke Zerkleinerung von Endosperm erfolgt (Handreck u. Pötschke, 1995). Das native Stärkekorn ist praktisch mit den Mitteln der Prallzerkleinerung nicht weiter zerkleinerbar. Stärkekörner verhalten sich bei der Prallzerkleinerung wie hochelastische Mikrokugeln.
Stiftmühlen und anderen Prallmühlen sind sehr effektive Mühlen, die dazu geeignet sind, Mehlteilchen in Stärkekörner und Proteinkomponenten zu zerlegen und durch irreversible Verformung an Stärkekörnern eine Beschädigung zu verursachen.
In einer Stiftmühle wird das Produkt zwischen ineinandergreifenden Stiftreihen einer feststehenden und einer umlaufenden Mahlscheibe ohne Siebeinsätze prallzerkleinert (Abb. 4). Ein Teilchen muss also nacheinander diese Reihen passieren, wobei es eine Anzahl von Prallungen zu überstehen hat (Lauer, 1983). Haupteinflussgröße bei der Mahlung in einer Stiftmühle ist die relative Umfangsgeschwindigkeit der äußersten Stiftreihe. Die Stiftmühle benötigt immer einen geringeren Energiebedarf im Vergleich z.B. zur Sichtermühle.

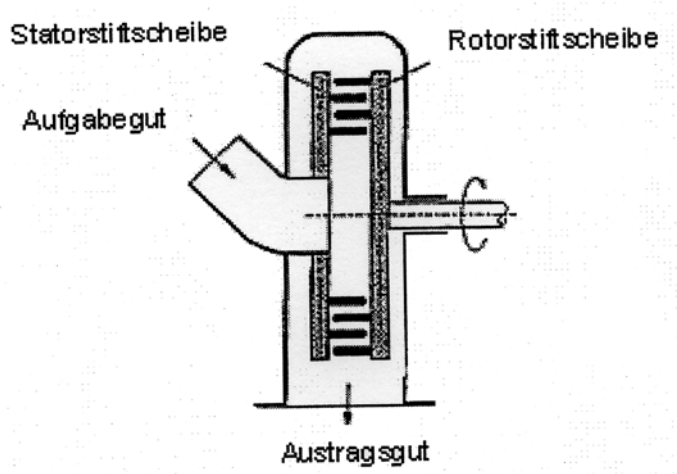


Abb. 4: Wirkprinzip der Stiftmühle (Handreck u. Pötschke, 1995)

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%. Bei der Prallzerkleinerung von Weizenmehlen sind ein höherer Mehlanfall und eine feinere Granulation der Mehle gegenüber dem mit Walzen ermahlenen Mehl charakteristisch (Vorweck, 1977; Friedrich u. Handreck, 1990; Zeuke, 1996).

Aufnahmen der Rasterelektronenmikroskopie zeigen, dass die Prallzerkleinerung von Weich- und Hartweizen 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 Stoffe neben Proteinen verursacht worden (Meuser et al. 1977).

Versuche von Banafa (2004) beschreiben, dass nach der Prallung von Weizenmehl in einer Stiftmühle etwa 95 % der Mehlteilchen eine Teilchengröße < 50 µm besitzen. Die gepprallten Mehle zeigen mit steigender Prallenergie eine etwa zweifache Erhöhung des Stärkebeschädigungsgrades und niedrigere Viskositäten gegenüber dem Walzenmehl. Die durchgeführten Extensogramme des Glutens weisen auf wesentliche Veränderungen der Dehneigenschaften des Glutens hin. So nimmt die Elastizität von 52,3 10^{-4} N/mm^2 beim Ausgangsmehl bis auf 76,2 10^{-4} N/mm^2 bei den Prallmehlen zu und die Festigkeit des Glutens erhöht sich von 0,60 N bis auf 0,80 N.

Die Stiftmühlenmehle weisen Verschiebungen der Teig- und Backeigenschaften im Vergleich zu den Ausgangsmehlen auf. Die Ergebnisse der farinographischen Untersuchungen der geprallten Mehle zeigen mit 72,2 % eine um 10,5 % höhere Wasseraufnahme als das Ausgangsmehl. Die Zunahme der Wasseraufnahmefähigkeit ist auf das größere Wasserbindungsvermögen des freiliegenden Proteins im Mehlkörper zurückzuführen. Weiterhin trägt die erhöhte Stärkebeschädigung im Mehl ebenfalls zur Zunahme der Wasseraufnahme bei. Prallzerkleinerte Mehle aus harten Weizen zeigen höhere Stärkebeschädigungsgrade, bzw. eine höhere Wasseraufnahmefähigkeit als solche aus weichen Weizen (Zwingelberg, 1997). Die steigende Wasseraufnahme deutet auf eine höhere Teigausbeute, ein höheres Gebäckvolumen und eine verbesserte Bräunung der Brote der geprallten Mehle hin.

3.2.3 Windsichtung

3.2.3.1 Windsichtung von Walzenmehlen

Durch Windsichtung von Weizenmehlen wird eine Trennung in zwei Fraktionen unterschiedlicher Korngröße (Feingut und Grobgut) erzielt. Durch die hohe Trennschärfe des Windsichters wird z.B. eine Proteinverschiebung bei Weizenmehl erreicht, so dass proteinreiche und proteinarme Mehlfraktionen gewonnen werden können. Das Grobgut der Sichtung stellt die proteinarme, aber stärkereiche Mehlfraktion dar. In der feinen Fraktion ist der Proteingehalt annähernd doppelt so hoch wie im Aufgabegut (Dambroth, 1986; Heideker u. Schubert, 1991; Spänkuch u. Fass, 1994).
Bei einem Zentrifugalwindsichter vom Typ ATP-Windsichter wird die Trennung in einem Wirbelfeld vorgenommen (Abb. 5). Bei diesem Funktionsprinzip wird ein „erzwungener Wirbel“ benutzt, wobei die Luft mit Hilfe eines außerhalb angebrachten Gebläses durch das Rad von außen nach innen gesaugt wird. Die Zuführung des Aufgabematerials erfolgt von oben. Das Feingut passiert zusammen mit der Luft das Rad und wird herausgeführt. Das Grobgut verlässt über eine Zellenschleuse den Trennraum nach unten.

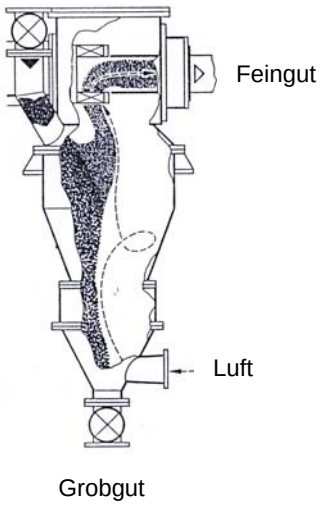


Abb. 5: ATP Windsichter (Lauer, 1983)

Eine Proteinverschiebung ist bekanntlich nur dann möglich, wenn das Protein nicht gleichmäßig über alle Korngrößen verteilt ist. Bei Weizenmehl besitzen die Teilchen kleiner als 15 µm einen deutlich höheren Proteingehalt als dem Durchschnitt entspricht, die Teilchen zwischen 15 und 40 µm einen viel geringeren.

Ein weicher proteinarmer Weizen lässt sich durch Windsichtung besser trennen als ein härterer proteinreicher Weizen. Mehle aus weichen Weizen besitzen einen wesentlich höheren Anteil an Partikeln unter 20 µm. Allein durch Windsichtung von Walzenmehlen wird in den Versuchen von Zwingelberg (1997) und Meyer u. Zwingelberg (1998) ein Feinanteil erzielt, der nahezu doppelt so hoch liegt wie bei den Mehlen aus Weizen mit harter Kornstruktur. In der Korngrößenverteilung weisen die groben Sichtfraktionen bei beiden Sorten nur eine geringfügige Verschiebung gegenüber den Ausgangsmehlen auf. In den feinen Fraktionen fallen bei den harten und weichen Sorten mit 10% bzw. 18% unterschiedlich hohe Mengen an. Die mikroskopische Struktur der groben Fraktionen der windgesichteten Walzenmehle ist fast identisch mit der der Ausgangsmehle. Die feinen Fraktionen stellen schon ein relativ homogenes Produkt dar. Der in der Feinfraktion aus weichem Weizen gemessene Proteingehalt mit 19,3 % liegt deutlich höher als bei dem Mehl aus hartem Weizen (14,5 %). In den Gehalten weiterer Inhaltstoffe, beispielsweise löslicher Proteine oder vorhandener Mineralstoffe, werden in den feinen Fraktionen deutliche Anstiege ermittelt. In den groben Fraktionen der Windsichtung werden die angestrebten Veränderungen bei der weich strukturierten Sorte leichter erreicht. Die höchsten Stärkegehalte, die

bis zu 83,8% betragen, weisen die groben Fraktionen des weichen Weizens auf. Während die Stärkebeschädigung der groben Fraktionen etwa auf gleicher Höhe wie im Ausgangsmehl liegt, wird der Anteil beschädigter Stärke in den feinen Fraktionen besonders bei den Mehlen der hart strukturierten Sorte deutlich erhöht.

3.2.3.2 Windsichtung von Prallmehlen

Die Nachbehandlung von Weizenmehlen durch Prallzerkleinerung und Windsichtung verändert die Struktur sowie die Inhaltstoffzusammensetzung der Mehle, und ermöglicht die Herstellung von Mehlen oder Mehlfraktionen mit spezifischen Verarbeitungseigenschaften (Rohrlich u. Müller, 1969; Kurimoto u. Shelton, 1988; Zwingelberg, 1998; Banafa, 2004). In den Versuchen von Meyer u. Zwingelberg (1998) wird festgestellt, dass die vorgeschaltete Prallung besonders bei Mehlen aus härterem Weizen einen zusätzlichen Effekt auf den Zerkleinerungsgrad und die Zusammensetzung hat. In den Korngrößenverteilungen der groben und feinen Fraktion sind wesentliche Verschiebungen zu erkennen. Der Feinanteil unter 20 µm kann bei der harten Sorte durch die Prallzerkleinerung noch deutlich erhöht werden. Dabei steigt der Anteil freiliegender Stärke gegenüber der Grobfraktion des windgesichteten Walzenmehles maßgeblich. Bei den Mehlen der weichen Sorte ist in der Korngrößenverteilung der groben und feinen Fraktion ein zusätzlicher signifikanter Effekt zu beobachten (Cleve, 1959). Die grobe Fraktion der weich strukturierten Weizen besteht nach fast vollkommender Auflösung der Zellverbände zu einem hohen Anteil aus freiliegender, großkörniger Stärke. Die feine Fraktion der windgesichteten Mehle der weichen Sorte weist im Vergleich zur harten Sorte höhere Anteile kleinkörniger Stärken und feiner Proteinpartikel auf.

In den Proteingehalten werden in Abhängigkeit von der Kornhärte deutliche Unterschiede festgestellt. Der Proteingehalt der groben Fraktion der harten Sorten kann von 12,3% im Ausgangsmehl auf 10,3% gesenkt werden, der weichen Sorten von 11,3% auf 7,7%. In der feinen Fraktion kommt es bei der weichen Sorte nach der Windsichtung zu einer deutlichen Anreichung auf 19,8%. Neben der Steigerung im Proteingehalt werden in den feinen Fraktionen auch höhere Anteile an löslichen Proteinen ermittelt. Einhergehend mit den Unterschieden in den Proteingehalten werden entsprechende Veränderungen in den Stärkegehalten gemessen. Die höchsten Ge-

halte, die 87% erreichen können, weisen die groben Fraktionen der weichen Sorte auf.

Auch im Mineralstoffgehalt der feinen Mehlfraktionen wird bei den Mehlen aus den harten Weizen ein hoher Mineralstoffgehalt (1,17%) gemessen. Die Feuchtglutengehaltsbestimmung in der Glutomatik ist starken Schwankungen unterworfen. In den qualitätsbeschreibenden Parametern Mineralstoff- und Feuchtklebergehalt der groben Fraktionen werden die angestrebten Proteinabreichungen festgestellt (Zwingelberg, 1997; Handreck u. Banafa, 2003).

Die windgesichteten Mehlfraktionen finden unterschiedliche Verwendungsmöglichkeiten in der Lebensmittelindustrie:

- Statt Zugabe von Ascorbinsäure: Zur Verbesserung der Backeigenschaften eines Mehles besteht die Möglichkeit der Zugabe von eiweißreichen, windgesichteten Mehlen.
- Trockenkräcker (Biskuits): Sie werden meist aus eiweißarmen Mehlen hergestellt. Für Kekse benötigt man Mehle mit einem Proteingehalt von 8 bis 8,5%. Für Waffeln kann man die mittlere und die grobe Fraktion einsetzen.
- Backwaren aus Hefefeinteigen: Für Hefeteige kann man die feine Fraktion, für Eierteigwaren die proteinarme Fraktion einsetzen, da die Eier einen entsprechend hohen Proteingehalt haben.
- Zwieback: Hier verwendet man die feine Fraktion mit hohem Proteingehalt. Die grobe Fraktion kann das Verhalten des Teiges während des Knetens verbessern.
- Haushaltsmehl: Mit der groben Fraktion bietet man ein nichtklumpendes Mehl an, das sich gut verarbeiten lässt.

Jedenfalls ist die windgesichtete proteinreiche Fraktion zum Verbessern von Mehlen schlechter Qualität gut geeignet (Willm, 1985; Müller u. Schneeweiß, 2001).

4 Material und Methoden

4.1 Versuchsmaterial

Für die Untersuchungen des ein- und zweistufig geprallten Mehles wurden die Weizensorten „Contra“ und „Tarso“ aus der Ernte 2003 sowie die Weizensorte „Akratos“ aus der Ernte 2004 verwendet. Zur Durchführung der Versuche der Windsichtung wurden die Weizensorten „Contra“, „Tarso“ und „Akratos“ aus der Ernte 2004 verwendet.

Die Weizensorten wurden nach ihrer genotypisch verankerten Struktur oder Härte und Glutenqualität ausgewählt (Tab. 3). Die Proteinqualität ist eine Determinante, die für die Kornhärte und Ausbildung der Glutenqualität vorausgesetzt werden muss. Die Sorte „Contra“ ist ein Winterweichweizen aus der Qualitätsgruppe „C“, mit weicher Kornstruktur (2003 - 48%; 2004 – 50%) und vergleichsweise niedrigem Proteingehalt (2003 – 12,1%; 2004 – 11,3%). Die Sorte „Tarso“ ist ein Winterweichweizen aus der Qualitätsgruppe „A“ mit harter Kornstruktur (2003 - 57%; 2004 – 58 %) und hohem Proteingehalt (2003 – 14,1%; 2004 – 13,4%). Die Sorte Akratos ist ein Winterweichweizen aus der Qualitätsgruppe „A“, mit harter Kornstruktur (58%). Hier stand ein vergleichsweise niedriger Proteingehalt (12,4 %) zur Verfügung.

Tab. 3: Angaben zu den untersuchten Weizensorten

Weizensorte	Erntejahr					
	2003			2004		
	Qualitätsgruppe	Kornhärte, %	Proteingehalt, %	Qualitätsgruppe	Kornhärte, %	Proteingehalt, %
Contra	C	48	12,1	C	50	11,3
Tarso	A	57	14,1	A	58	13,4
Akratos	-	-	-	A	58	12,4

4.2 Technischer Versuchsablauf

Die Gewinnung der Mehle sowie von deren Fraktionen verlief in verschiedenen Abschnitten. Das Fließbild in Abbildung 6 veranschaulicht den technischen Arbeitsverlauf.

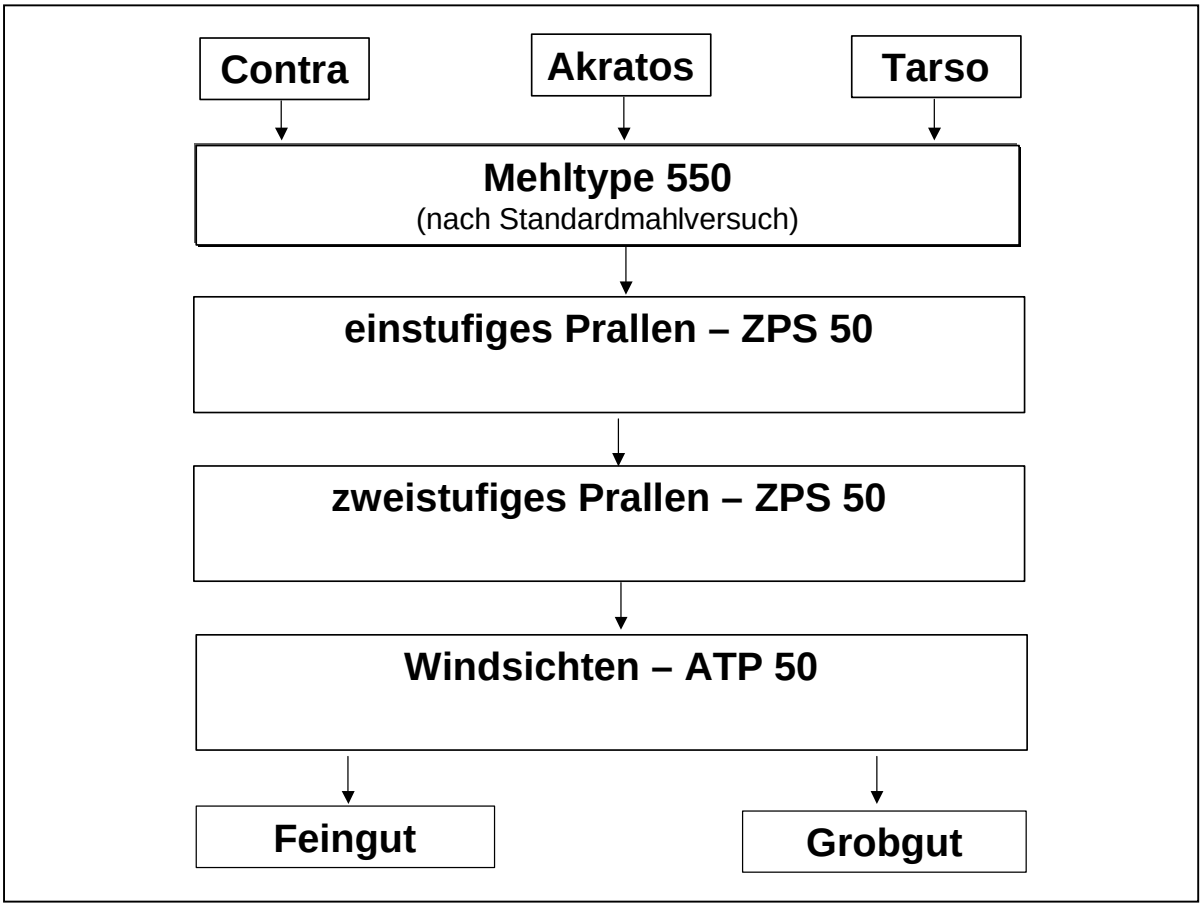


Abb. 6: Technischer Versuchsablauf zur Gewinnung der Mahlprodukte

4.2.1 Konditionieren

Die Kornhärte ist ein Maß für die Höhe der Vermahlungsfeuchtigkeit und Abstehzeit. Je nach Kornstruktur und Ausgangsfeuchte des Weizens wurde die Netzwasserzugabe W in % nach folgender Formel berechnet:

$$W = \frac{100 \cdot (F_2 - F_1)}{100 - F_2}$$ Gleichung [2]

W – Wasserzugabe [%]
F_1 – Anfangsfeuchtigkeit des Getreides [%]
F_2 – Vermahlungsfeuchtigkeit des Getreides [%]

Die Vermahlungsprobe wurde anschließend unter intensivem Mischen in einem Labormischer auf die Vermahlungsfeuchtigkeit genetzt. Das Weizenmuster blieb während der Abstehzeit in einem verschlossenen Behälter bei Raumtemperatur stehen.

4.2.2 Vermahlen

4.2.2.1 Mahlautomat

Der genetzte Weizen aus den Sorten Contra, Akratos und Tarso wurde mit dem Bühler-Mahlautomat vermahlen. Es wurden sortenreine Mehle der Type 550 (Aschegehalt 0,55% i.Tr.) hergestellt.

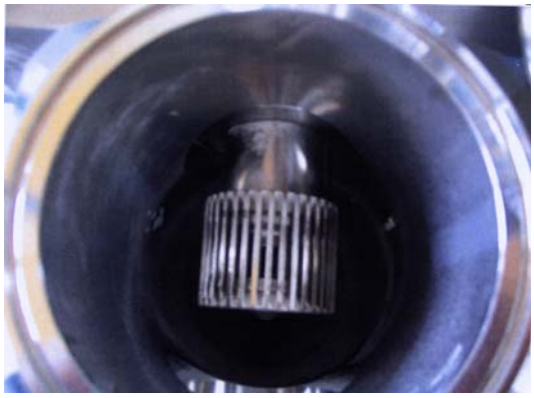
4.2.2.2 Sichtermühle 50 ZPS

Die sortenreinen Typenmehle wurden nachfolgend zur Herstellung der ein- und zweistufig geprallten Mehle in der Sichtermühle 50 ZPS der Fa. Alpine mit in dieser Arbeit ausgewählten und statistisch variierten minimalen, mittleren und maximalen Einstellungen der Dosierschnecken-Drehzahl, Schlägerwerk-Drehzahl (Umfangsgeschwindigkeit) und Sichtrad-Drehzahl behandelt (Tab. 12, Anhang). Die entsprechenden Drehzahlen sind in Tabelle 4 dargestellt. Die mit den mittleren Maschineneinstellungen einstufig geprallten Mehle wurden weiter für die zweistufige Nachzerkleinerung verwendet.
Das Produkt wurde in einen Behälter eingefüllt, lief dann über eine Dosierschnecke, vorbei an dem Sichterrad in die Mahlkammer der ZPS–Mühle und wurde geprallt (Abb. 7a). Die Abbildung 7b zeigt das Mühleninnere. Das einlaufende Produkt fiel auf eine schnell rotierende Scheibe, auf der zwei Nocken sitzen, und wurde durch die

Zentrifugalkraft gegen einen Prallring geschleudert (geworfen). Der Luftstrom führte die Feinanteile durch das rotierende Sichtrad (Abb. 7c) der Mühle über ein Förderrohr in einen Auffangbehälter heraus. Die Grobanteile wurden vom Sichtrad abgewiesen und so lange vom Schlägerwerk zerkleinert, bis sie das Sichtrad passieren konnten und damit den durch die Sichtrad-Drehzahl vorgegebenen Feinheitsforderungen entsprachen. Die Abluft ging über einen Zyklon in den Filter.

a

b



c

Abb. 7: Sichtermühle 50 ZPS: a – Kompletansicht ; b – Innerraum der Mühle ZPS; c – Sichtrad

Tab. 4: Maschineneinstellungen

Maschinenparameter [min^{-1}]	Einstellung		
	minimale	mittlere	maximale
Dosierschnecken-Drehzahl	20	110	200
Sichtrad-Drehzahl	2 000	2 500	3 000
Schlägerwerk-Drehzahl	12 068	17 097	22 125

Die entsprechenden Umfangsgeschwindigkeiten für die einzustellenden Schlägerwerk-Drehzahlen sind der Tabelle 5 zu entnehmen. Ihre Berechnung erfolgte nach der Gleichung 3

$$v = \frac{d \cdot \pi \cdot n}{60}$$ Gleichung [3]

v – Umfangsgeschwindigkeit [m/s]

d – Außendurchmesser der Schlägerscheibe [95 mm]

n - Schlägerwerk-Drehzahl [min^{-1}]

Tab. 5: Drehzahlen und Umfangsgeschwindigkeiten der Sichtermühle

Schlägerwerk-Drehzahl [min^{-1}]	Umfangsgeschwindigkeit [m/s]
12 068	60
17 097	85
22 125	110

Während der Vermahlung in der Sichtermühle wurde die Temperatur des Prallmehles nach dem Sichtrad gemessen.

4.2.3 Fraktionieren

Die zweistufig geprallten Weizenmehle der Sorten Contra, Akratos und Tarso wurden anschließend im Windsichter 50 ATP der Fa. Alpine (Abb. 8) fraktioniert. Dabei wurden eine feine und eine grobe Fraktion gewonnen.
In diesem Sichter wurden die Mehlpartikel an einem Sichtrad mit regelbarer Drehzahl nach ihrer Größe getrennt. Eine Dosierschnecke förderte das Aufgabegut in den Sichter. Dort erfasste es die Sichtluft, transportierte es zum Sichtrad und führte es heraus. Bei konstantem Volumenstrom der Luft hing die Trenngrenze des Sichters von der Sichtraddrehzahl ab. Je höher die Sichtrad-Drehzahl war, umso kleiner wurde der Trennkorndurchmesser. Das ausgezogene Feingut gelangte über die Abscheider (Zyklon und Filter) in die Auffangbehälter. Das abgewiesene Grobgut floss an der Innenwand des Sichtergehäuses nach unten und fiel in einen weiteren Behälter.

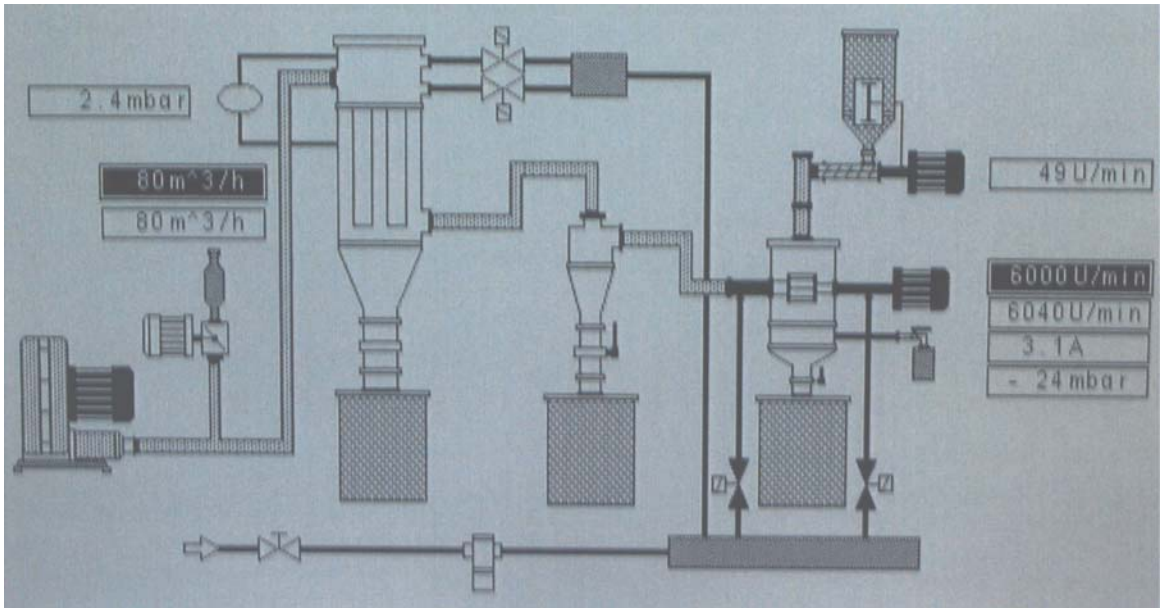


Abb. 8: Alpine Sichtanlage 50 ATP - Betriebssystem

Das Ziel der Windsichtung bestand in der Gewinnung einer feinen Fraktion mit möglichst hohem und einer groben Fraktion mit möglichst niedrigem Proteingehalt. Für das Fraktionieren der Mehle war die Erstellung einer Kalibriergeraden für die Sicht-

rad-Drehzahl notwendig, um die geeignete Trenngrenze erreichen zu können. Die Trenngrenze konnte nach der Gleichung 4 rechnerisch ermittelt werden.

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

d_{TG} – Trenngrenze [µm]
n – Sichtrad-Drehzahl [min^{-1}]

Die Windsichtung der Prallmehle wurde mit folgenden Betriebseinstellungen durchgeführt: Dosierschnecken-Drehzahl 70 min^{-1}, Sichtrad-Drehzahl 15 000 min^{-1} und Luftgesamtvolumenstrom 80 m^3/h.

4.3 Analytische Methoden

4.3.1 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 einer 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. Durch eine computergestützte Datenverarbeitung erfolgte eine statistische Analyse der Korngrößenverteilung, der Volumenanteile sowie der spezifischen Oberfläche der Probe.

4.3.2 Feuchtigkeitsgehalt

Der Feuchtigkeitsgehalt der Proben wurde entsprechend dem ICC-Standard Nr. 110/1 als Masseverlust nach dem Trocknen bei 130°C bestimmt (ICC, 2001).

4.3.3 Mineralstoffgehalt

Die Bestimmung des Mineralstoffgehalts erfolgte nach dem ICC-Standard Nr. 104/1 durch Veraschen der Probe bei 900°C (ICC, 2001).

4.3.4 Methoden zur Stärkecharakterisierung

4.3.4.1 Stärkegehalt

Die Bestimmung des Stärkegehalts erfolgte nach dem abgewandelten polarimetrischen Ewers-Verfahren (EU-VO 228/67, 1967).

4.3.4.2 Bestimmung der mechanischen Stärkebeschädigung

Der Gehalt an beschädigter mechanisch modifizierter Stärke wurde entsprechend dem ICC-Standard Nr. 164 mit Hilfe des Enzym-Kits der Firma Megazyme bestimmt (ICC, 2001).

4.3.4.3 Wasserbindevermögen

Das Wasserbindevermögen (WBV) wurde vom Massenanteil der jeweiligen Mehlinhaltsstoffe wie Stärke, Protein und Pentosane sowie von der Funktionseigenschaft „Wasserbindung“ unter Wasserüberschuss bestimmt.

5g Weizenmehl (± 0,01) wird in ein ausgewogenes Zentrifugenglas (Durchmesser von ca. 34 mm) eingewogen. Das Weizenmehl wird mit 25 ml dest. Wasser (Pipette) versetzt und mit einem Glasstab gut verrührt (auf Klumpenbildung und nicht benetztes Probenmaterial am Boden des Zentrifugenglases achten). Der Glasstab wird mit weiteren 25 ml dest. Wasser abgespült. Die Zentrifugengläser werden mit Stopfen verschlossen und anschließend in folgenden Abständen von Hand waagerecht geschüttelt:

- 20 mal schütteln, 5 min ruhen.
- 10 mal schütteln, 5 min ruhen.
- 10 mal schütteln, 5 min ruhen.
- 10 mal schütteln, 5 min ruhen.

Nach diesen 20 min werden die Stopfen abgenommen und das anhaftende Material so gut wie möglich am Zentrifugenglas abgestrichen. Das Abspülen mit dest. Wasser mittels einer Spritzflasche wird nicht durchgeführt, da dann die Tarierung der Zentrifugengläser nicht mehr gewährleistet ist. Die Zentrifugengläser werden in die Zentrifuge überführt und es wird für 15 min bei 435g zentrifugiert. Je nach verwendeten Zentrifugentyp ergeben sich unterschiedliche min^{-1}:

Tischzentrifuge: 1800 min^{-1}

Heraeus-Christ-Zentrifuge: 1903 min^{-1}

Nach dem Zentrifugieren wird das überschüssige Wasser vorsichtig abdekantiert und das Restwasser 10 min bei einer Neigung der Zentrifugengläser von 10 - 15° durch Ablaufenlassen eliminiert (Standardmethode).

Eine Standardabweichung bis 1 % wird akzeptiert.

Das Zentrifugenglas wird zurückgewogen.

Berechnung der WRC in i.Tr.:

$$WRC(\%) = \frac{100\% \cdot (Auswaage - Einwaage)}{Einwaage}$$ Gleichung [5]

4.3.4.4 Bestimmung der Viskositäts-Eigenschaften

Zur Bestimmung der Viskositätseigenschaften der Mehle wurde der Rapid Visco Analyser (RVA) angewandt. Der Rapid Visco Analyser ist ein registrierendes Viskosimeter, das die Verkleisterungseigenschaften der Stärke und die Wirkung der alpha-Amylase in einer Mehl–Wasser–Suspension im Verlaufe der Erhitzung und Kühlung beschreibt. Das Viskositätsmaximum ist definiert als die höchste Viskosität, die vor dem Beginn der Kühlphase erreicht wird. Die Finalviskosität ist die Viskosität, die am Ende des Tests festgestellt wird.

Prinzip der Methode

Eine Mehl–Wasser–Suspension wird zunächst durch das schnelle Rotieren des Meßrührers in der Zeit von 10 s homogenisiert und anschließend werden bei niedrigerer konstanter Geschwindigkeit die Viskositätseigenschaften im Verlaufe der Erhitzung und Kühlung gemessen. Die Viskositätsveränderungen der verkleisterten Stärke werden durch den Anstieg und das Absenken der Temperatur, die mechanische Wirkung des Rührens und durch die verflüssigende Wirkung der vorhandenen alpha–Amylase hervorgerufen.
Die Veränderungen der Viskositäts-Eigenschaften der Stärke in den untersuchten Mehlfraktionen werden nach dem folgenden Testprogramm gemessen:

Zeit	Kriterium	Einstellwert
00:00:00	Temperatur [°C]	30
00:00:00	Drehzahl [min^{-1}]	960
00:00:10	Drehzahl [min^{-1}]	160
00:01:00	Temperatur [°C]	30
00:06:00	Temperatur [°C]	95
00:21:00	Temperatur [°C]	95
00:26:00	Temperatur [°C]	30
00:36:00	Temperatur [°C]	30

4.3.4.5 Bestimmung der Desintegrationswärme der Stärke im Mehl

Die Verarbeitungseigenschaften von Getreide und die Qualität der Getreideerzeugnisse werden durch den Hauptinhaltsstoff Stärke beeinflusst. Die physikalisch-funktionellen Eigenschaften der Stärke variieren infolge der Metastabilität des Stoffsystems, sie werden aber vor allem durch den Einfluss von Wasser bei verschiedenen Behandlungstemperaturen geprägt (Münzing, 1992).
Stärken unterschiedlicher Herkunft unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer molekularen Zusammensetzung, sondern auch in der räumlichen Anordnung der Moleküle und der strukturellen Organisation des Stärkekorns.

Native Getreidestärkekörner sind semikristallin aufgebaut, d.h. sie besitzen amorphe (ungeordnete) und quasi kristalline (geordnete) Sequenzen, bei denen benachbarte Polymerketten direkt über Wasserstoffbrücken assoziiert sind (Abb. 9). Beide Organisationstypen liegen im nativen Stärkekorn gleichzeitig vor, wobei die Bereiche mit höherem Orientierungsgrad in der amorphen Matrix eingebettet sind. Die Desintegration der Stärkekristallite ist als ein thermisches Ereignis in den Stärkekörnern feststellbar. Je ausgeprägter die inter- und intramolekulare Assoziation der Stärkeketten ist, umso geringer werden die Molekülbeweglichkeit in der Stärke und die Sorptionsbereitschaft, bzw. Wasserbindung, und umso höher wird die thermische Stabilität sein.

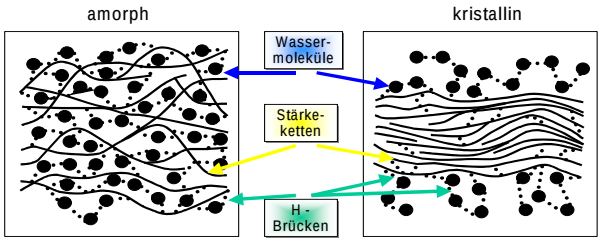


Abb. 9: Weizen-Stärkestruktur: Modell des übermolekularen Aufbaus (Münzing, 1992)

In den letzten Jahrzehnten hat in zunehmendem Maße auch die Differential- Scanning-Calorimetry (DSC) zur Beschreibung der Stärkefunktionseigenschaften Eingang gefunden. DSC ist besonders geeignet zur Untersuchung von Phasenübergängen, wie sie auch bei der Verkleisterung und der Retrogradation von Stärke vorliegen (Eberstein et al., 1980; Höhne, 1984).

DSC ist eine Variante der Differenz- Thermoanalyse. Hierbei wird eine zu charakterisierende Substanz in einem abgeschlossenen System einer definierten Temperaturänderung unterworfen. Die dabei freigesetzte bzw. verbrauchte Energie [J] oder Wärme (ΔQ) einer exothermen oder endothermen Reaktion wird gemessen.

Die Wärmeänderung beruht auf einer internen Phasenumwandlung der Stärke in einen anderen Aggregatzustand oder in eine andere Strukturform. Die Differenz der Thermospannung wird ermittelt zu einer Referenzsubstanz, z.B. Al_2O_3, von der bekannt ist, dass sie im durchlaufenden Temperaturintervall keinerlei Phasenumwand-

lungen durchmacht, also von der zugeführten Energie in Form von Wärme nichts verbraucht oder nichts zusätzlich freigesetzt wird.
Jeder Stoff benötigt für seine Desintegration oder Phasenumwandlung eine charakteristische Wärmemenge, die aufgrund der endothermen Umwandlungswärme erforderlich ist. Außerdem liegt der Beginn dieser Umwandlung bei einer stoffspezifischen Temperatur, der Peak-onset-Temperatur. Somit werden zwei Parameter messbar: die Umwandlungswärme ΔQ [J/g] und die Peak-onset-Temperatur [°C].

Prinzip der Methode

Für die Messung werden 5 mg Mehl mit der vierfachen Wassermenge versetzt (in Wasserüberschuss) in einem geschlossenem Aluminiumtiegel gegen die Referenzsubstanz – Al_2O_3 untersucht.
Die Umwandlungswärmen der Stärke in den untersuchten Mehlfraktionen werden nach einem Temperaturprogramm von 25°C bis 95°C mit einer Aufheizrate von 5°C/min gemessen und zueinander in Relation gestellt.

Mittels Differential Scanning Calorimetry kann thermoanalytisch die durch Prallwirkung induzierte, mechanisch modifizierte Stärke in Mehl charakterisiert werden. Als Maß dient die beim Aufheizen verbrauchte endotherme Desintegrationswärme (ΔQ) (Verkleisterungswärme) der im Mehl vorhandenen Stärkekristallite, vor und nach dem Prallen.

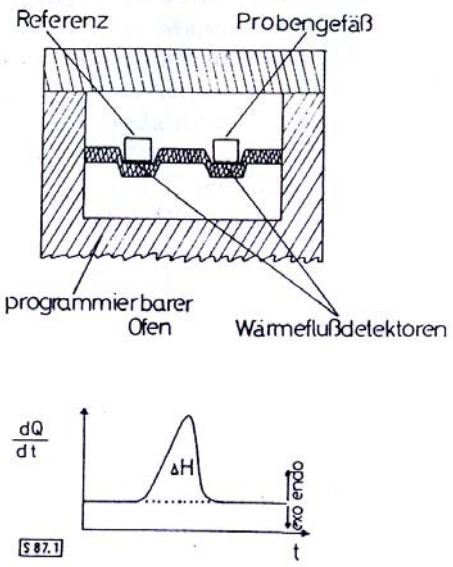


Abb.10: Schema eines Differential Scanning–Kalorimeters (oben); Verlauf eines DSC-Thermogramms (unten) (Eberstein 1980)

Die Anordnung eines Differential Scanning–Kalorimeters ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Die zu messende Mehlprobe wird gleichzeitig mit einer inerten Referenzsubstanz in einem exakt regelbaren Ofen zeitlinear erwärmt. Der Unterschied im Wärmefluss zwischen dem Ofen und der Probe auf der einen Seite und zwischen Ofen und Referenz auf der anderen Seite wird mit Hilfe von Thermofühlern erfasst. Tritt in der Probe eine Umwandlung ein, welche von einer Enthalpieänderung begleitet ist, so ändert sich die Differenz des Wärmeflusses. Die Fläche unter der entstehenden Kurve ist ein Maß für die Enthalpie oder Wärmemenge, die in Relation zur Umwandlung steht.

4.3.5 Methoden zur Protein- und Kleber-Charakterisierung

4.3.5.1 Bestimmung des Rohproteingehaltes

Der Rohproteingehalt wurde gemäß ICC-Standard Nr. 105/2 nach dem Kjeldahl – Verfahren bestimmt (ICC, 2001).

4.3.5.2 Bestimmung des löslichen Proteingehaltes

10g Weizenmehl wurden in einen 250 ml Messkolben eingewogen, 200 ml dest. Wasser wurden zugefügt und kräftig geschüttelt, um Klumpenbildung zu vermeiden. Die Probe wurde eine Stunde bei Raumtemperatur stehen gelassen und dabei gelegentlich umgeschwenkt.
Der Kolben wurde mit dest. Wasser bis zur Marke aufgefüllt und die Aufschlämmung wurde durch ein Faltenfilter filtriert. Die ersten Tropfen wurden wieder auf das Filter zurückgegeben.
5 ml Filtrat wurden mit einer Pipette abgenommen und in einen Kjeldahlkolben überführt. Der Gehalt an löslichem Protein wurde gemäß ICC-Standard Nr. 105/2 nach dem Kjeldahl–Verfahren bestimmt (ICC, 2001).

4.3.5.3 Bestimmung des Feuchtglutengehaltes der Prallmehle

Die mechanische Bestimmung des Feuchtglutengehaltes in Weizenmehl wurde entsprechend ICC-Standard Nr. 137/1 mit Hilfe der Glutomatic bestimmt (ICC, 2001).

4.3.5.4 Bestimmung des Feuchtglutengehaltes der windgesichteten Mehlfraktionen

10 g windgesichtetes Prallmehl wurden geknetet und 5 min per Hand ausgewaschen. Der noch viel Stärke enthaltende gebildete Gluten wurde mechanisch mit Hilfe der Glutomatic entsprechend ICC-Standard Nr. 137/1 zur Bestimmung des Feuchtglutengehaltes weiter ausgewaschen (ICC, 2001).

4.3.5.5 Bestimmung des Sedimentationswertes der Prallmehle

Der Sedimentationstest wurde gemäß ICC-Standard Nr. 116/1 (nach Zeleny) zur orientierenden Bestimmung der Backqualität bestimmt (ICC, 2001).

4.3.5.6 Bestimmung des Sedimentationswertes der windgesichteten Mehlfraktionen

Der Sedimentationswert der windgesichteten Prallmehle wurde gemäß der modifizierten ICC-Standard Methode Nr. 116/1 (nach Zeleny) zur orientierenden Bestimmung der Backqualität bestimmt (ICC, 2001). Die Werte wurden statt nach 5 min nach 10 min Sedimentation abgelesen. Diese Abweichung von der Standardmethode war erforderlich, da die Feinpartikel ein anderes Sedimentationsverhalten zeigten.

4.3.5.7 Kriecherholungsmessung von Kleber

Viskosität und Elastizität sind zwei Eigenschaften einer Substanz, die als Reaktion auf einwirkende Normal- oder Schubspannungen erkennbar werden.
Beim Kriecherholungsversuch wird das viskoelastische Verhalten über zwei Schubspannungssprünge untersucht.
Mit dieser Testmethode prüft man meist chemisch unvernetzte und ungefüllte Polymere in Form von Schmelzen und Lösungen; sie eignet sich aber auch zur Bestimmung des Verhaltens von chemisch vernetzten Polymeren, Gelen und Dispersionen mit einem physikalisch Kräftenetzwerk.
Der Vorteil dieser Methode liegt in geringen Scherraten und hohen Empfindlichkeiten, welche auf das zu untersuchende Material einwirken, sowie in Simulationsmöglichkeiten realer Bedingungen durch Verknüpfung von Kaskaden verschiedener Belastungs- und Entlastungsvorgänge bei unterschiedlichsten Parametern (Schramm, 1995; Menard, 1999).
Im Vergleich zu den Normalkraftmessungen, die die Abhängigkeit von Viskosität und Elastizität vom Geschwindigkeitsgefälle aufzeigen, wird auf der Basis von Kriechen und Rückerholung ein zusätzlicher Parameter in die Messungen eingeführt. Dieser kennzeichnet zusätzlich die Reaktionszeit, mit der die viskosen und elastischen Eigenschaften von Festkörpern und Flüssigkeiten auf eine Scherung reagieren.
Die Theorie des Kriechens und der folgenden Rückerholung von viskoelastischen Fluiden und ihre mathematische Behandlung basiert auf der gedanklichen Verwendung von Modellkörpern wie Spiralfedern und Stoßdämpfern, entweder einzeln oder

in Kombination, an denen die Reaktion von vorgegebener Belastung und der resultierenden transienten Deformation studiert werden kann (Schramm, 1995).

Prinzip der Methode und Durchführung

Während des Kriech–Erholungsversuchs wurde die max. Deformation des Klebers der Fraktionen von sortenreinen Weizenmehlen der Type 550 bestimmt. Durch die gemessene max. Deformation wurden die spezifischen Klebereigenschaften der Mehlfraktionen charakterisiert, so dass auch Änderungen der elastischen Eigenschaften vom Kleber gemessen wurden.

10 g ausgewaschener Kleber wurden in die Messgeometrie des Rheometers eingebracht.
Der Messkopf (Stempel) wird auf einen Spalt von 3 mm heruntergefahren. Der Teig erfährt nun für 150 s eine Belastung von 200 Pa. Die Entlastungsphase beträgt 350 s, so dass die Gesamtmessdauer von 500 s erreicht wird. Während des gesamten Messvorganges wird die Temperatur konstant auf 20 °C gehalten. Nach erfolgten Messungen wurden aus den Einzelmessungen Mittelwerte gebildet, die wiederum zur Auswertung und Berechnung dienten. Mittels der Auswertungssoftware konnte die max. Deformation [%] bestimmt werden.

Probe – Vorbereitung

Der untersuchte Kleber der verschiedenen Mehlfraktionen wurde nach dem ICC-Standard Methode Nr. 137 mit Hilfe der Glutomatic ausgewaschen (ICC, 2001).

4.3.5.8 Rheologische Untersuchungen

4.3.5.8.1 Farinograph

Die Prallmehle 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.

4.3.5.8.2 Extensograph

Die Dehnungseigenschaften der Teige der Prallmehle wurden mit dem Extensographen nach der ICC-Standardmethode Nr. 114/1 mittels Brabender Extensographen untersucht. Die Versuche wurden ohne Zusatz von Ascorbinsäure durchgeführt.

4.3.5.9 Backversuche

Zur Beurteilung der Backeigenschaften der Mehle ist der Rapid-Mix-Test (Brötchen) (RMT) nach der Standardmethode (Pelshenke et al., 1978) verwendet worden.

4.3.6 Mikroskopische Untersuchungen

Von den geprallten Mehlen sowie deren windgesichteten Fraktionen wurden mikroskopischen Aufnahmen mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM–Aufnahmen) angefertigt. Die Bilder sollten die durch die Prallwirkung veränderten Mehlstrukturen visuell darstellen sowie Hinweise über den Zustand der Mehlkomponenten geben.

4.4 Statistische Methoden

4.4.1 Statistische Versuchspläne

Zur Untersuchung der Wirkung des ein- und zweistufigen Prallens in der Sichter-Mühle auf die stoffliche Zusammensetzung und funktionellen Eigenschaften der Mehle aus den Sorten Contra und Tarso wurden die Prallversuche nach statistischen Versuchsplänen 1. Ordnung mit acht Versuchen durchgeführt (Tab. 12, Anhang). Die verwendeten Versuchspläne gehören zur Klasse der fraktioniert faktoriellen Versuchspläne. Um zu beobachten, ob die Prozessfaktoren eine lineare oder nichtlineare Wirkung besitzen, wurde eine Erweiterung der Pläne um eine mittlere Einstellung der Faktoren durchgeführt. Diese Einstellung wurde im Gegensatz zu den anderen

Versuchspunkten 4 mal wiederholt. Als Einflussgrößen (Faktoren) wurden die Maschineneinstellungen der Dosierschnecken-Drehzahl (DD), der Sichtrad- Drehzahl (SD) und der Umfangsgeschwindigkeit (UG) sowie die Weizensorte (WS) variiert. Zur Untersuchung der Wirkung der Dosierschnecken-Drehzahl (DD), der Sichtrad-Drehzahl (SD) und der Umfangsgeschwindigkeit (UG) auf die stoffliche Zusammensetzung und funktionellen Eigenschaften der Mehle aus der Sorte Akratos beim zweistufigen Prallen wurde ein statistischer Versuchsplan 1. Ordnung mit vier Versuchen und einem Lauf im Nullpunkt ausgewählt (Tab. 12, Anhang).

4.4.2 Statistische Auswertung

Um die Wirkung der Einfluss-Variablen auf die Zielgröße darzustellen, wurde eine varianzanalytische Auswertung durchgeführt. Dabei wurde die Wirkung der Einfluss-Faktoren nach folgenden Kriterien überprüft:

- Regressionskoeffizienten:

  Mit Hilfe der Regressionsanalyse wurde ein mathematisches Modell für den Zusammenhang zwischen Einflussgröße und Zielgröße für vorhandene Daten geschätzt. Bei Verwendung von faktoriellen Versuchsplänen gaben die Regressionskoeffizienten die Differenzen der Mittelwerte der abhängigen Variable (Zielgröße) für die untere und die obere Einstellung der entsprechenden Faktoren an. Sie schätzten somit den Einfluss des jeweiligen Faktors auf die Zielgröße.

- Standardfehler der Parameterschätzung (p-Wert):

  Um einen Faktor auf Signifikanz zu überprüfen, wird ein statistischer Test durchgeführt. Er überprüft die Annahme, dass dieser Faktor keinen Effekt hat. Der p-Wert gibt dabei die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Faktor als signifikant erkannt wird, obwohl er es in Wahrheit nicht ist. Je kleiner also der p-Wert, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Faktor wirklich signifikant ist. In der Praxis werden Faktoren häufig als signifikant identifiziert, wenn der p-Wert kleiner als 0.1 ist. In dem Fall ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Faktor fälschlicherweise als signifikant erkannt wird, also kleiner 10 %.

- Interaktion von Wechselwirkungen:

Eine Wechselwirkung zwischen zwei Faktoren bedeutet, dass der Effekt des einen Faktors davon abhängt, welchen Wert der andere Faktor hat. Sind nur die Effekte der Faktoren selbst signifikant, so können die Faktoren getrennt betrachtet werden. Sollte eine Wechselwirkung signifikant sein, so bedeutet dies, dass der Effekt eines Faktors davon abhängt, welche Faktorstufenkombinationen des anderen Faktors gerade betrachtet werden. Ist der Effekt der Wechselwirkung zwischen zwei Faktoren signifikant, so müssen diese beiden Faktoren immer gemeinsam betrachtet werden.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Ergebnisse der Untersuchungen zu geprallten Mehle

5.1.1 Verfahrensdaten der Prallzerkleinerung

5.1.1.1 Durchsatz

Im Laufe der Prallversuche wurde der Durchsatz der Mühle gemessen. Um die Wirkung der Einfluss-Variablen auf den Durchsatz darzustellen, wurde eine varianzanalytische Auswertung durchgeführt. Die Ergebnisse wiesen einen Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl und der Weizensorte auf den Durchsatz vom einstufigen Prallen auf (Tab. 13, Anhang). Es wurde eine Erhöhung des Durchsatzes mit der steigenden Dosierschnecken-Drehzahl beobachtet. Interessant ist die Abhängigkeit des Durchsatzes von der Weizensorte. Die Ergebnisse belegen, dass bei den Sorten Tarso und Akratos ein höherer Durchsatz als bei der Sorte Contra erzielt wurde. Ursache war die Kornhärte bzw. die Feinheit des Mehles. Das bedeutet, dass Mehl aus hartem Weizen mit entsprechend höherer Griffigkeit und geringerer Feinheit, wegen seiner besseren Fließeigenschaften, wesentlich schneller dosiert werden konnte als ein Mehl aus weichem Weizen. Dieser Zusammenhang wurde von einer Wechselwirkung zwischen den beiden Einflussgrößen Dosierschnecken-Drehzahl und Weizensorte bei der statistischen Untersuchung vom einstufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso bestätigt (Abb. 11). Der positive Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl war bei der Weizensorte Tarso stärker als bei der Weizensorte Contra. Für Tarso wurden bei gleichen Dosierschnecken-Drehzahlen immer höhere Werte des Durchsatzes beobachtet als für Contra.

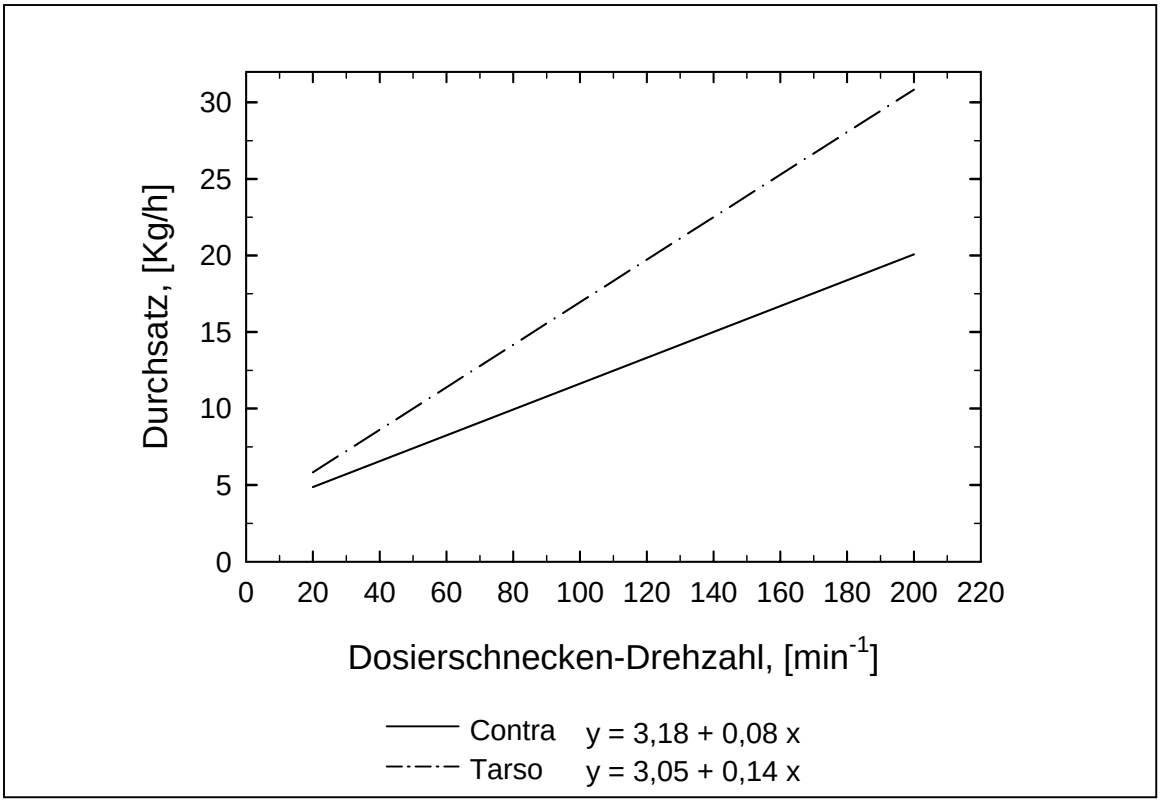


Abb. 11: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf den Durchsatz der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Trotz der ähnlichen Kornstruktur wie bei der Sorte Tarso wies die Sorte Akratos nach der einstufigen Prallzerkleinerung einen höheren Durchsatz gegenüber dem entsprechenden mit mittleren Maschineneinstellungen einstufig geprallten Tarso-Mehl auf. Es wurde ebenfalls eine wesentlich schnellere Dosierung im Vergleich zur Sorte Contra festgestellt (Tab. 13, Anhang).

Beim zweistufigen Prallen sind, wegen der erhöhten Mehlfeinheit, geringere Durchsatzwerte als nach dem einstufigen Prallen beobachtet worden. Die Kurvenanstiege der Tarso- und Akratos- Mehle verlaufen flacher und entsprechen etwa der Anstieg des Contra-Mehles (Abb.12).

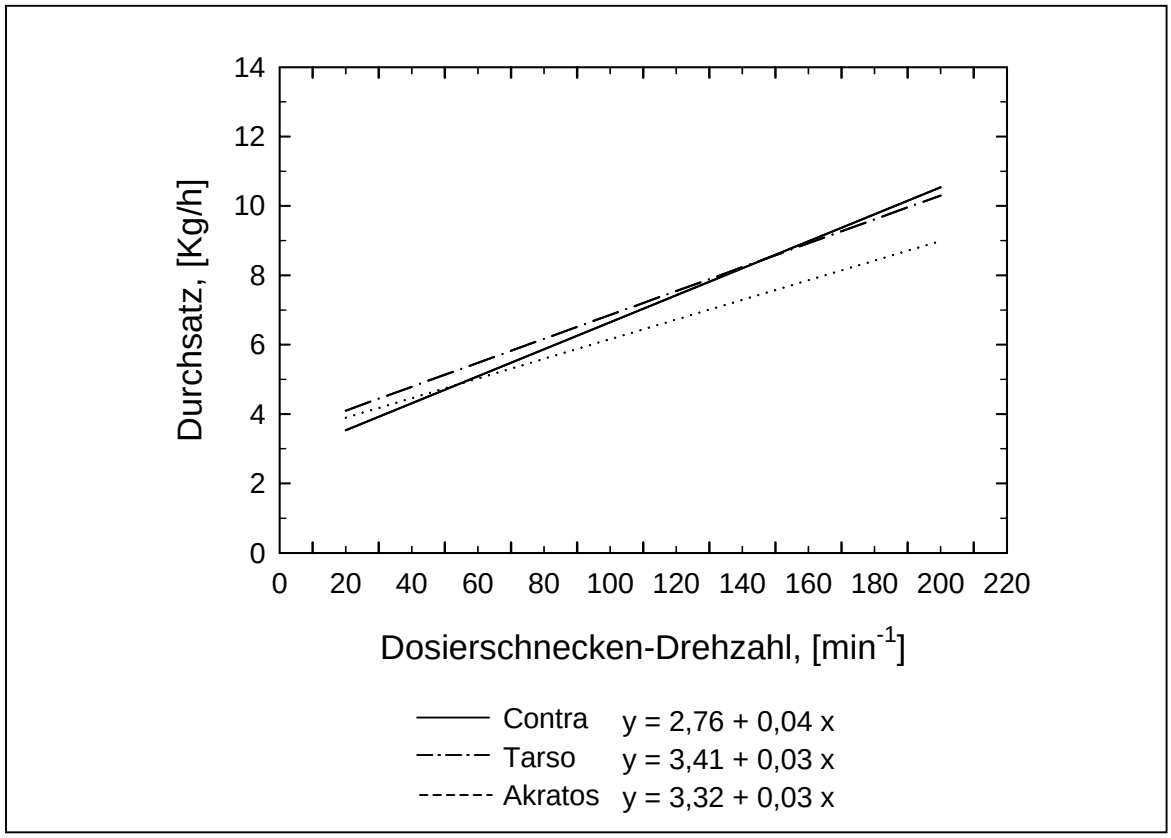


Abb. 12: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf den Durchsatz der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos

Aus der Grafik kann abgeleitet werden, dass eine höhere Dosierung einen höheren Durchsatz in der Prallmühle erlaubt.

5.1.1.2 Temperatur des Mehles

Bei der varianzanalytischen Auswertung des einstufigen Prallens der Weizenmehle Contra und Tarso wurde eine Hauptwirkung der Prallgeschwindigkeit auf die gemessene Temperatur des Mehles während des einstufigen Prallens festgestellt (Tab. 22, Anhang). Die Temperatur der nachzerkleinerten Mehle erhöhte sich mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit des Rotors (Abb.13).

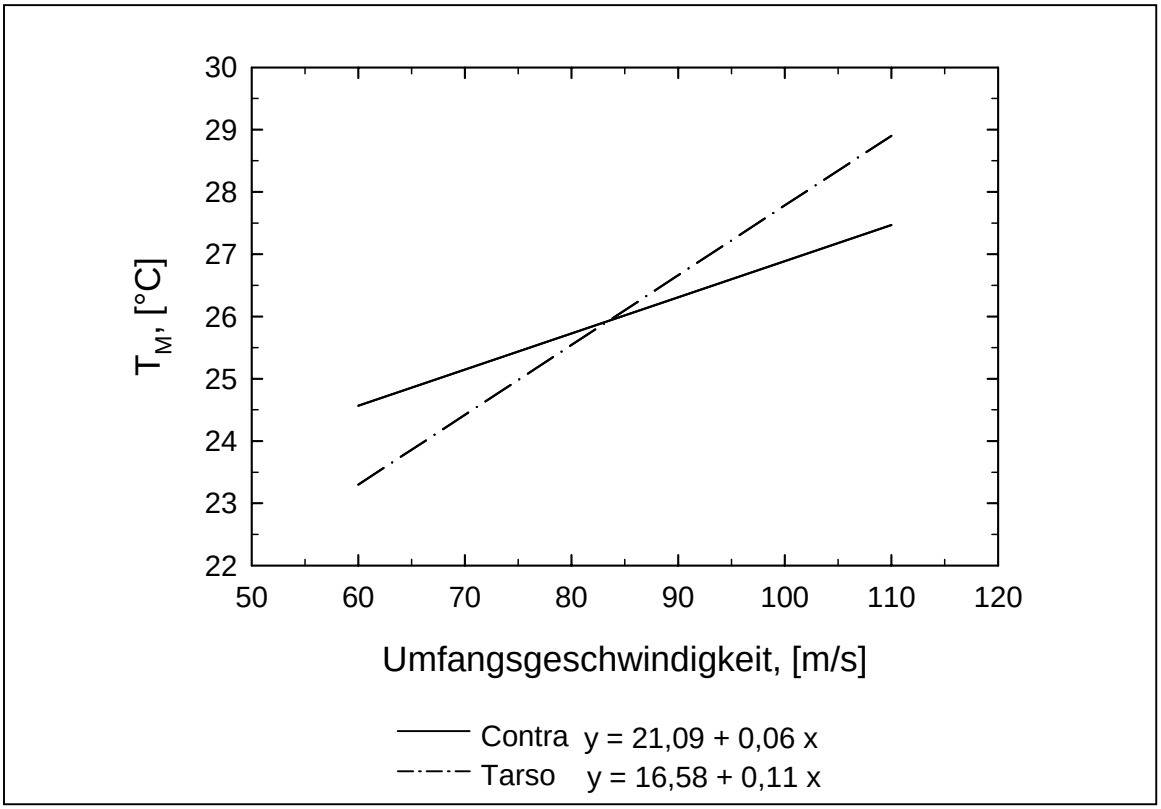


Abb.13: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die Mehltemperatur (T_M) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Aufgrund der härteren Struktur und der damit erforderlichen intensiveren Prallarbeit erreichten die Mehle der Weizensorte Tarso mit zunehmender Prallgeschwindigkeit eine höhere Temperatur (etwa 29°C) im Vergleich zu den Mehlen aus der weich strukturierten Weizensorte Contra (etwa 27°C).

Eine steigende Produktmenge in der Mühle bewirkte ebenfalls einen Anstieg der Mehltemperatur. Der Luftstrom übernahm als Kühlungsmittel und als Schutz gegen übermäßige Erwärmung des Mahlgutes eine nicht zu unterschätzende Aufgabe. Der hohe Luftvolumenstrom während des Prallvorgangs von 80 m^3/s verhinderte eine weitere Erwärmung des Mehles. Infolge der niedrigen Produktmenge in der Mühle bei geringer Dosierung wurde eine höhere Temperatur des Mehles nur bei hoher Prallgeschwindigkeit erreicht. Bei einer höheren Dosierung erwärmte sich das Mehl schon bei niedrigerer Prallgeschwindigkeit (Abb. 14).

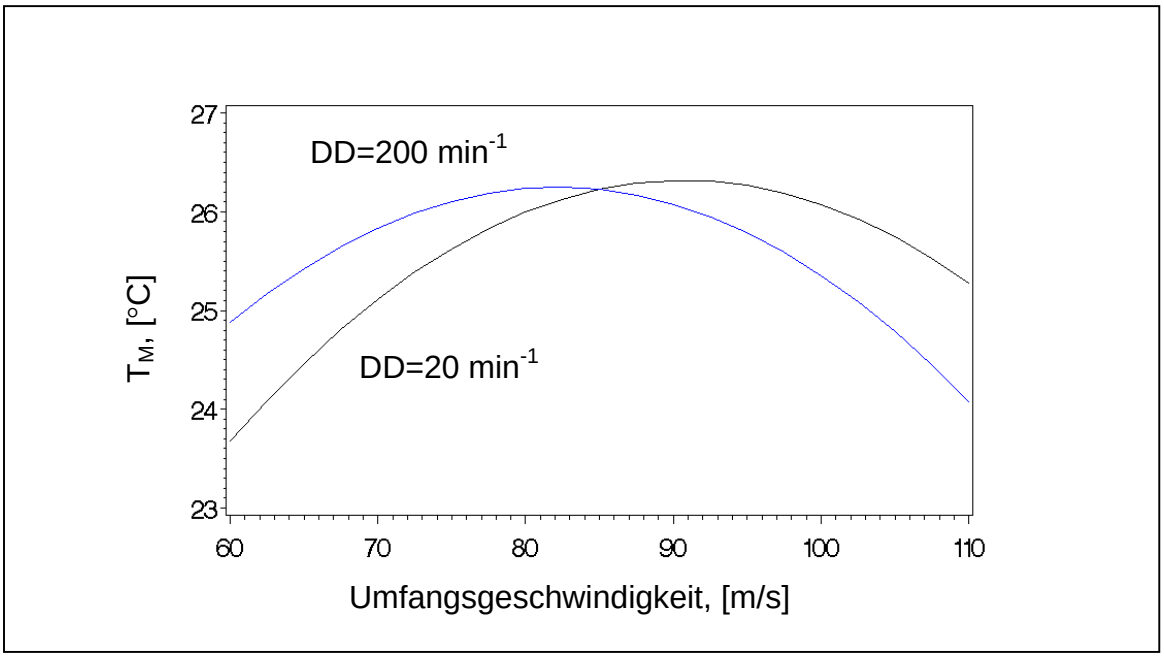


Abb. 14: Einfluss der Wechselwirkung zwischen Umfangsgeschwindigkeit und Dosierschnecken-Drehzahl (DD) auf die Mehltemperatur (T_M) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Eine intensive Feinstzerkleinerung der Weizensorte Akratos während des einstufigen Prallens verursachte einen Anstieg der Mehltemperatur auf etwa 28°C.
Weizensorte und Prallgeschwindigkeit hatten auf die Temperatur des Mehles beim zweistufigen Prallen der Contra-, Tarso- und Akratos-Mehle ebenfalls einen Einfluss. Aufgrund der intensiveren Zerkleinerung beim zweistufigen Prallen deuteten die Untersuchungsergebnisse der Mehle der hart strukturierten Sorten Tarso und Akratos eine höhere Temperatur (etwa 29°C) im Vergleich zu denen aus der Weizensorte Contra (etwa 27°C) an. Insgesamt erreichten die Mehle aller drei Weizensorten eine höhere Temperatur mit steigender Prallgeschwindigkeit, die ähnlich wie beim einstufigen Prallen war (Abb. 15).

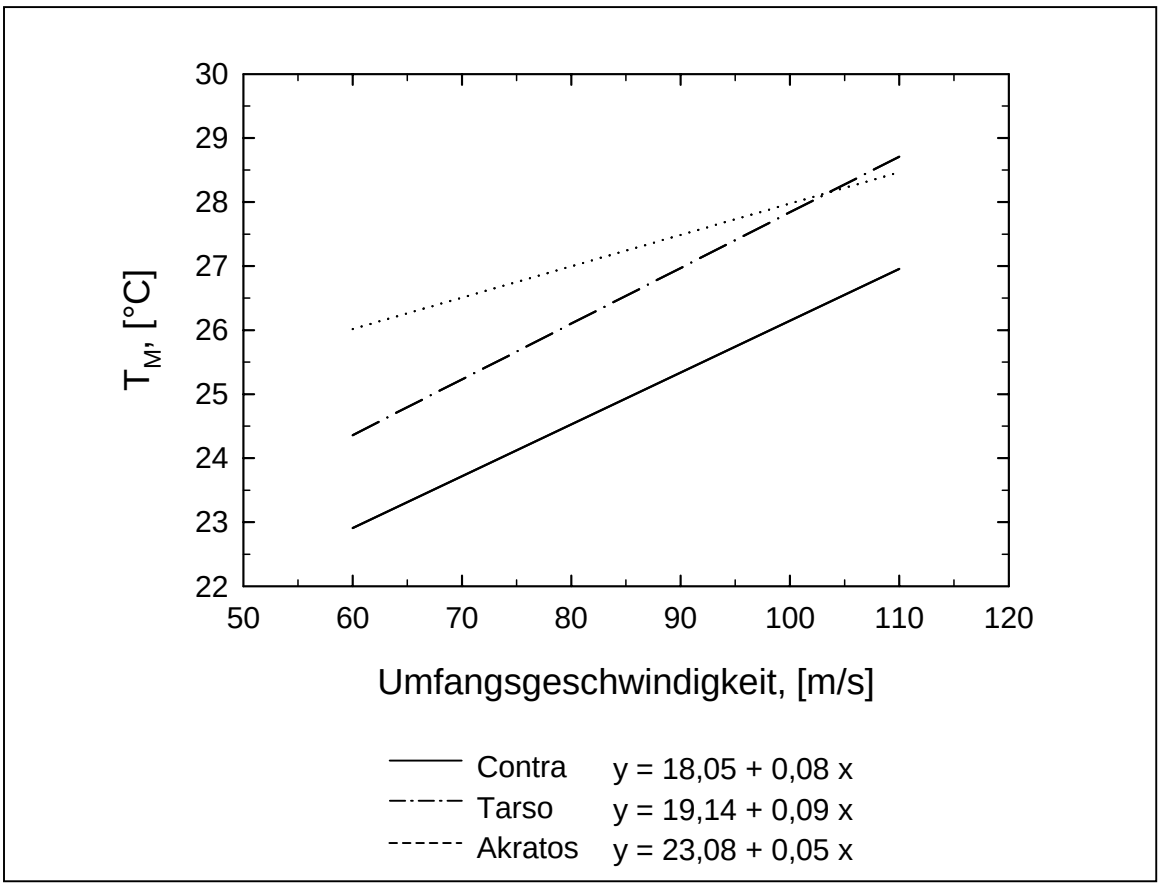


Abb. 15: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die Mehltemperatur (T_M) der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos

5.1.2 Physikalische Eigenschaften

5.1.2.1 Granulation und Oberfläche

Die Prallzerkleinerung in der ZPS-Mühle führte zu einer ausgeprägteren zellularen Desintegration des Endosperms bis auf die subzellulare Ebene. Durch Prallen mit hoher Umfangsgeschwindigkeit konnte eine höhere kinetische Energie in das Gut eingetragen werden als mit der Walzenzerkleinerung. Das führte zu einem intensiven Zerkleinerungseffekt und hohem Feingutanteil. Kennzeichnend für die ausgeprägte subzellulare Auflösung waren die Senkung des d_{50}-Wertes des Mahlgutes und die Erhöhung des Anteils an Partikeln kleiner 10 µm der geprallten Mehle gegenüber den Werten der Ausgangsmehle. Das zeigte, dass die Anteile freigelegter Zwickelproteinteilchen < 10 µm bei den Prallmehlen bedeutend höher waren als beim Walzenstuhlmehl, bei dem die Stärkeproteinmatrix weniger aufgeschlossen wurde.

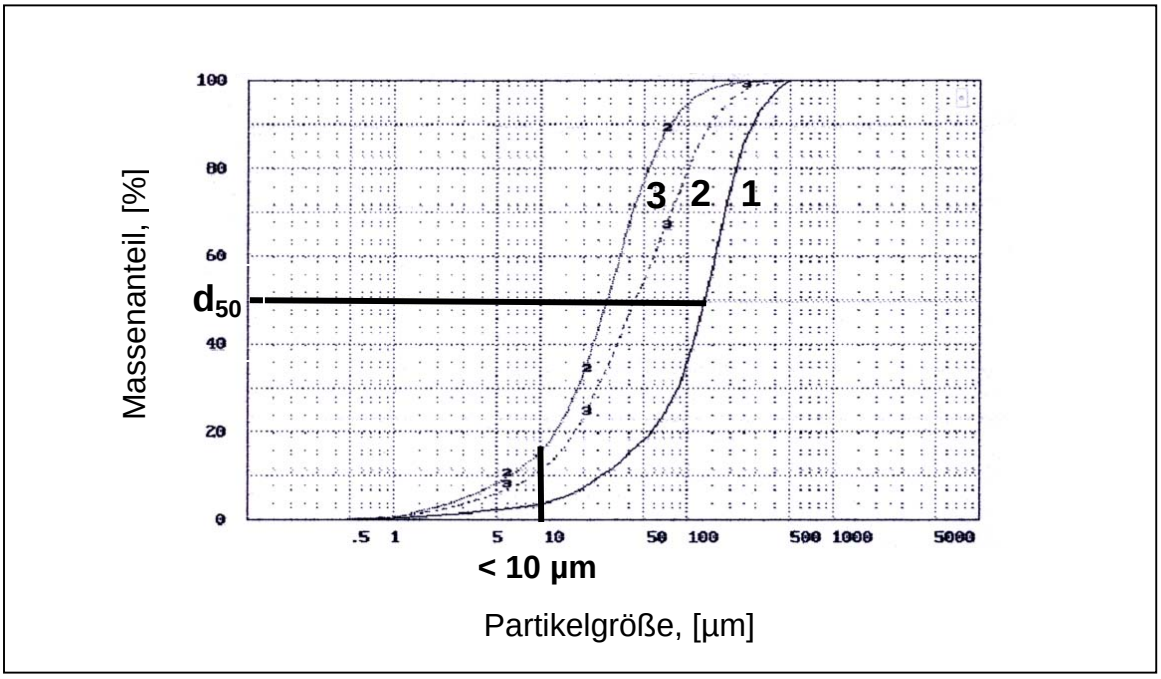
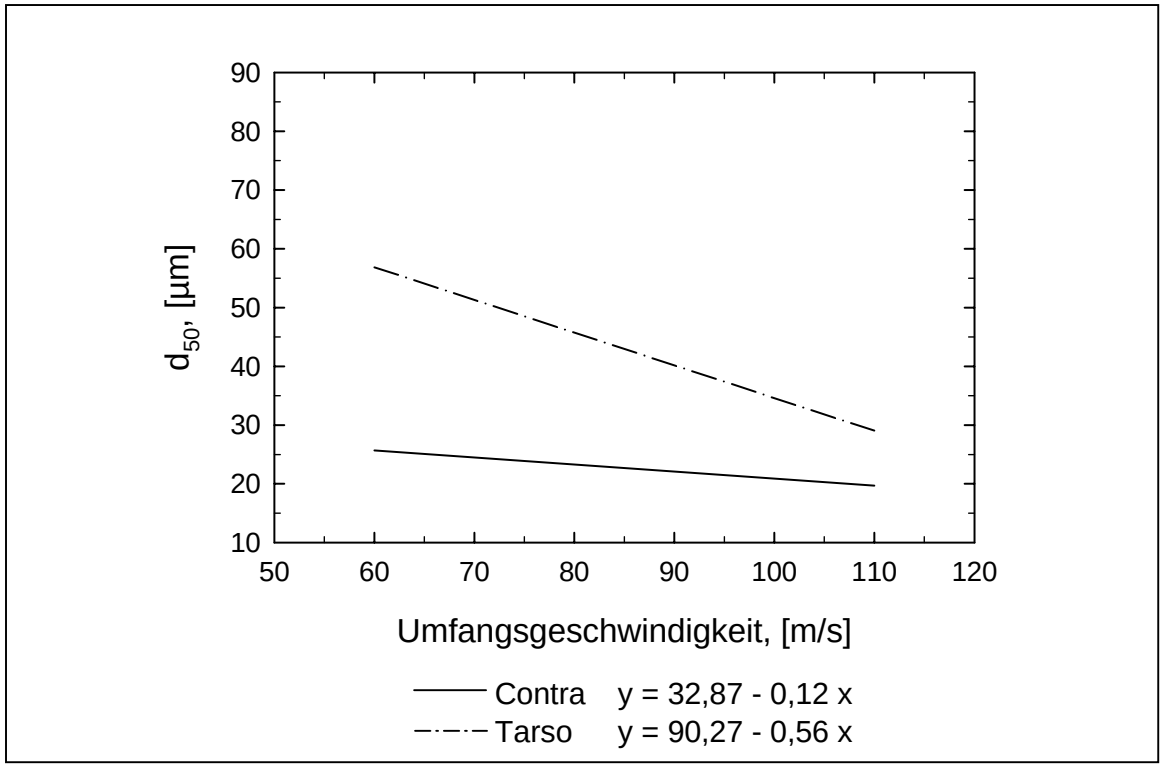


Abb. 16: Korngrößenverteilungsfunktionen von Ausgangsmehl (1), ein- (2) und zweistufig (3) geprallten Mehlen der Sorte Akratos, exemplarisch dargestellt für alle Sorten

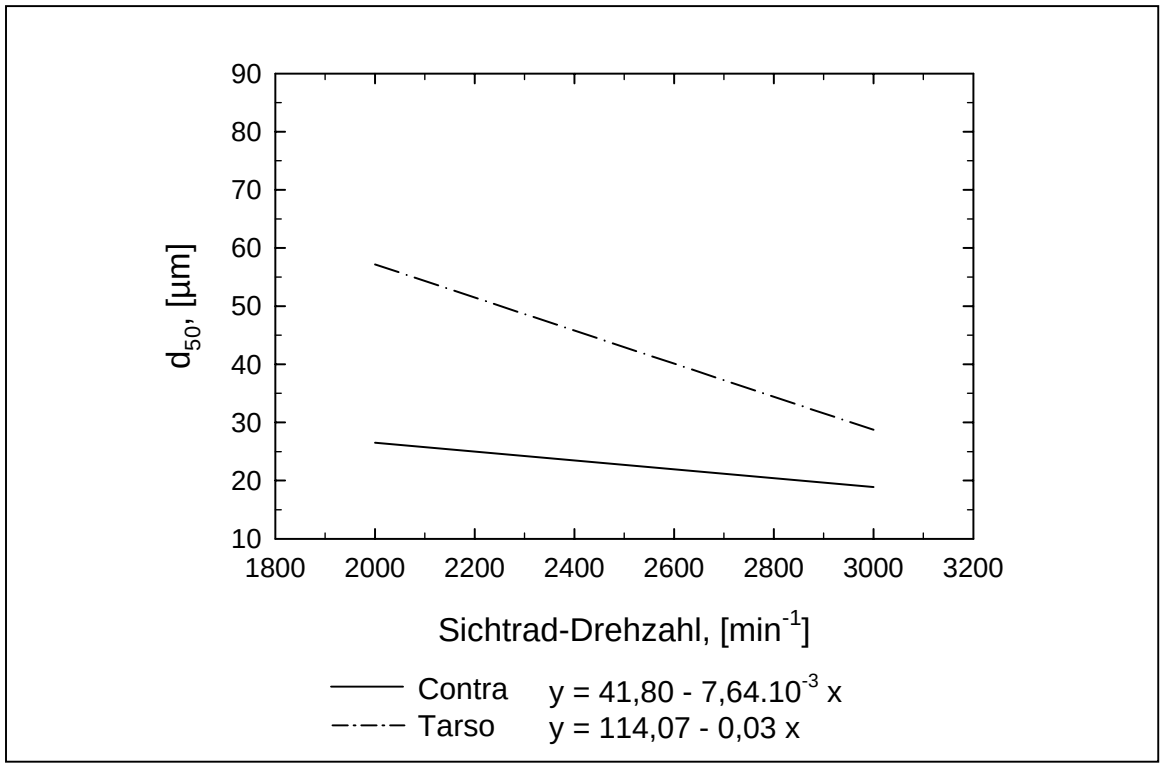
In Abbildung 16 sind beispielhaft drei Korngrößenverteilungsfunktionen von Ausgangsmehl sowie ein- und zweistufig geprallten Mehlen mit ausgeprägten Effekten dargestellt. Die ein- und zweistufige Prallbehandlung führte zur Senkung des Median-Wertes (d_{50}) und zur Erhöhung des Anteils an Partikeln unter 10 µm der geprallten Mehle (Kurven 2 und 3) gegenüber den Ausgangsmehlen (Kurve 1).

Wie aus der Literatur bekannt (Handreck u. Pötschke, 1996; Zwingelberg, 1997), hängt der Zerkleinerungsgrad der Mehle von der Kornhärte der Weizensorten ab. Die Ergebnisse bestätigten, dass Mehle aus hartem Weizen bereits bei der Vermahlung auf Walzen weniger feine Mehlpartikel liefern als solche aus weichem Weizen.

Die Regressionskoeffizienten und die p-Werte der durchgeführten varianzanalytischen Auswertung nach dem einstufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso wiesen einen Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit und der Sichterrad-Drehzahl auf die Mehlfeinheit auf (Tab. 22, Anhang). Die Zunahme der Umfangsgeschwindigkeit und der Sichterrad-Drehzahl verursachte eine Senkung der d_{50}-Werte der geprallten Mehle (Abb. 17 und 18).



Tab. 17: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die mittlere Teilchengröße (d_{50}) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso



Tab. 18: Einfluss der Sichtrad-Drehzahl auf die mittlere Teilchengröße (d_{50}) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Die zunehmenden Umfangsgeschwindigkeit und Sichterrad-Drehzahl bewirkten einen Anstieg des Anteils an Partikeln unter 10 µm der geprallten Mehle (Abb. 19 und 20). Obwohl dieser Effekt bei der Sorte Tarso höher ausgeprägt war, wiesen die Tarso-Prallmehle nach dem einstufigen Prallen wieder gröbere Granulation im Vergleich zu den Contra-Prallmehlen auf.

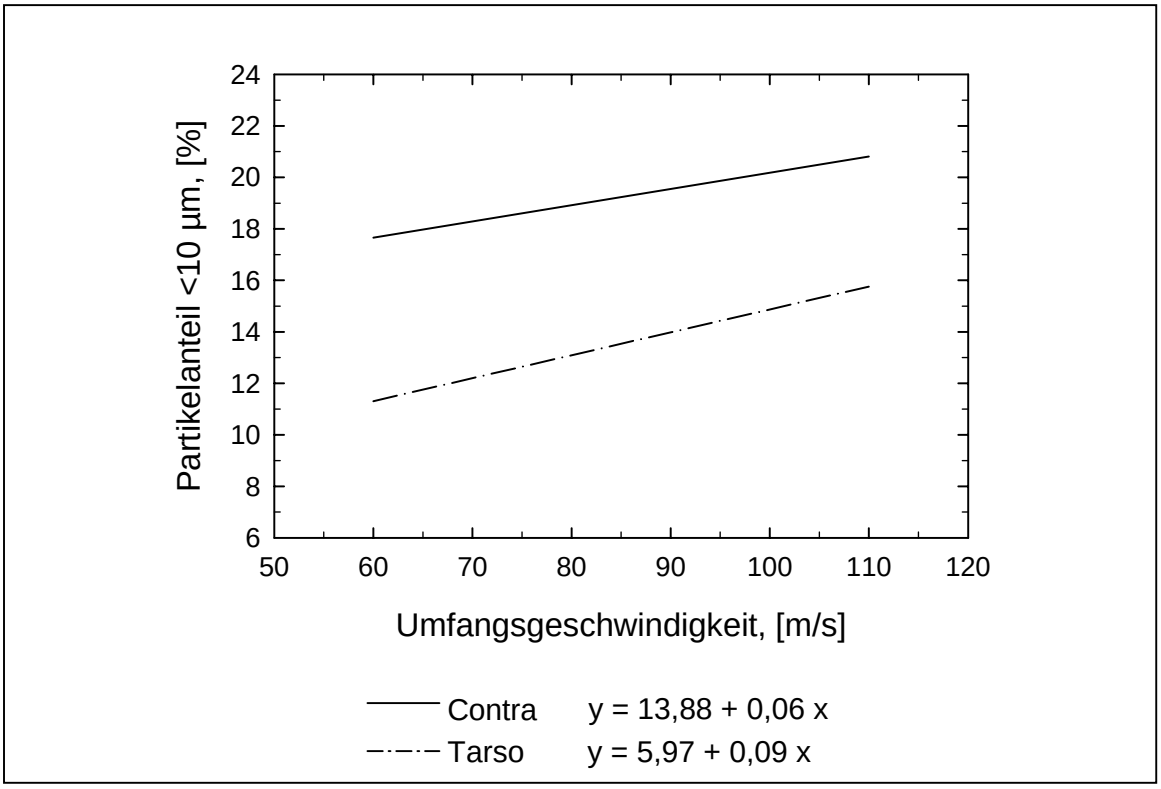


Abb. 19: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf den Partikelanteil unter 10 µm der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

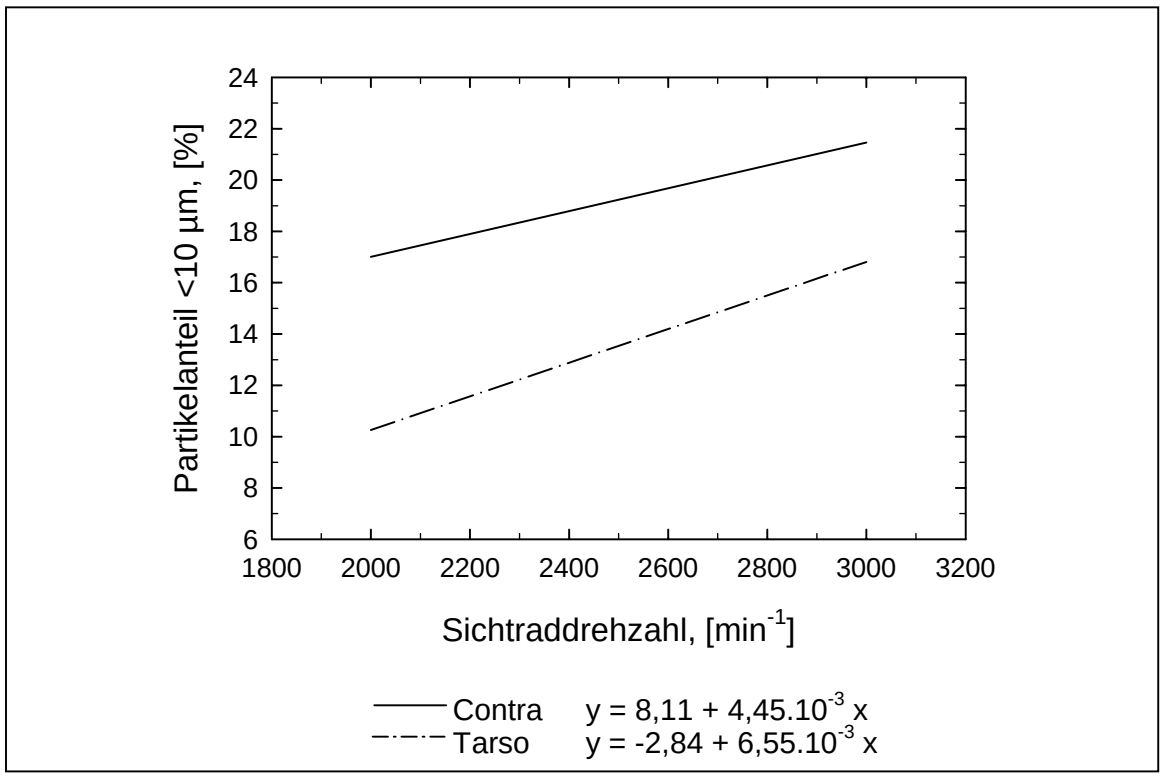


Abb. 20: Einfluss der Sichtrad-Drehzahl auf den Partikelanteil unter 10 µm der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Das Akratos-Mehl wies nach dem einstufigen Prallen ebenfalls eine wesentliche Senkung des Median-Wertes (d_{50}) auf ca. 44% und einen Anstieg des Anteiles an Partikeln unter 10 µm auf ca. 11% gegenüber dem Ausgangmehl auf (Tab. 14, Anhang).

Da die Strukturauflösung des Endosperms weich strukturierter Weizensorten ausgeprägter war als bei hart strukturierten, fielen bei der einstufigen Prallung wesentlich höhere Feingutanteile bei der Sorte Contra an. Mehle aus weich strukturiertem Weizen hatten einen wesentlich niedrigeren Median-Wert (d_{50}) und einen höheren Anteil an Partikeln unter 10 µm als solche aus hartem Weizen. Mit der erhöhten Feinheit der Mehle vergrößerte sich ihre massenspezifische Oberfläche (Ao). Die varianzanalytische Auswertung nach dem einstufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso wies ebenfalls einen positiven Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit und der Sichtrad-Drehzahl auf die spezifische Mehloberfläche auf (Abb. 21 und 22).

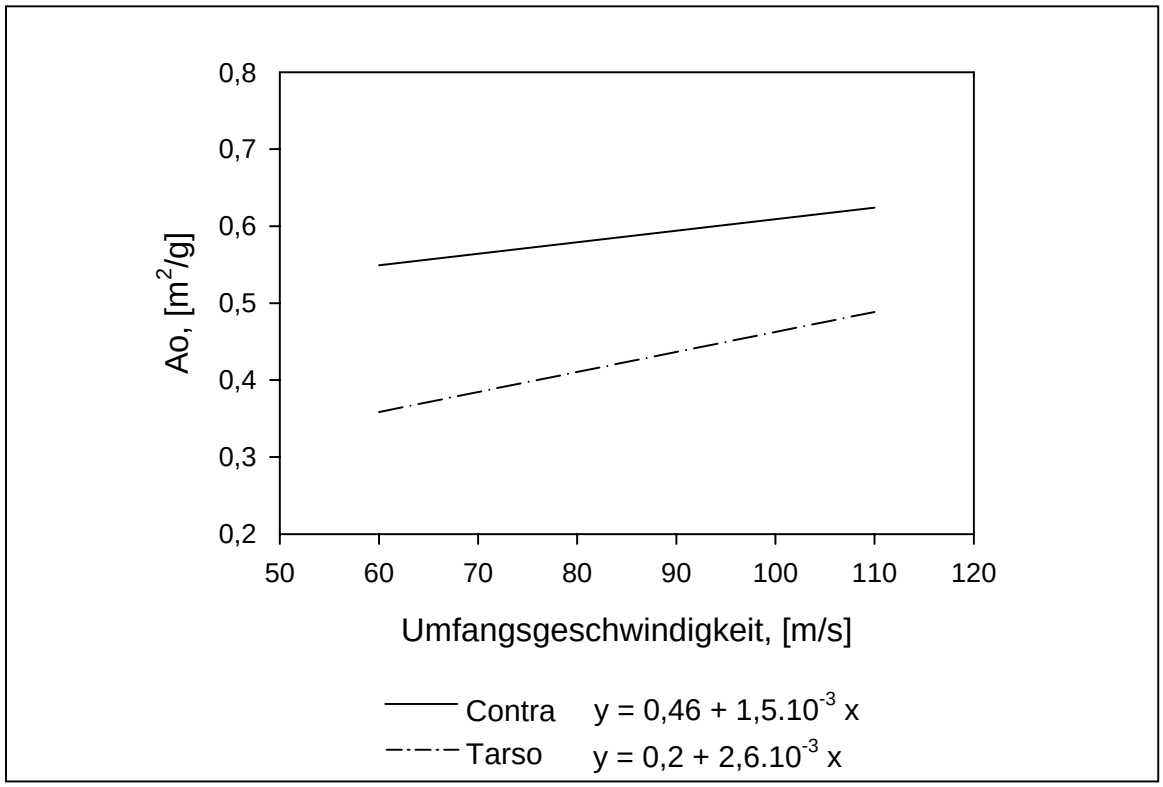


Abb. 21: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die massenspezifische Mehloberfläche (Ao) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

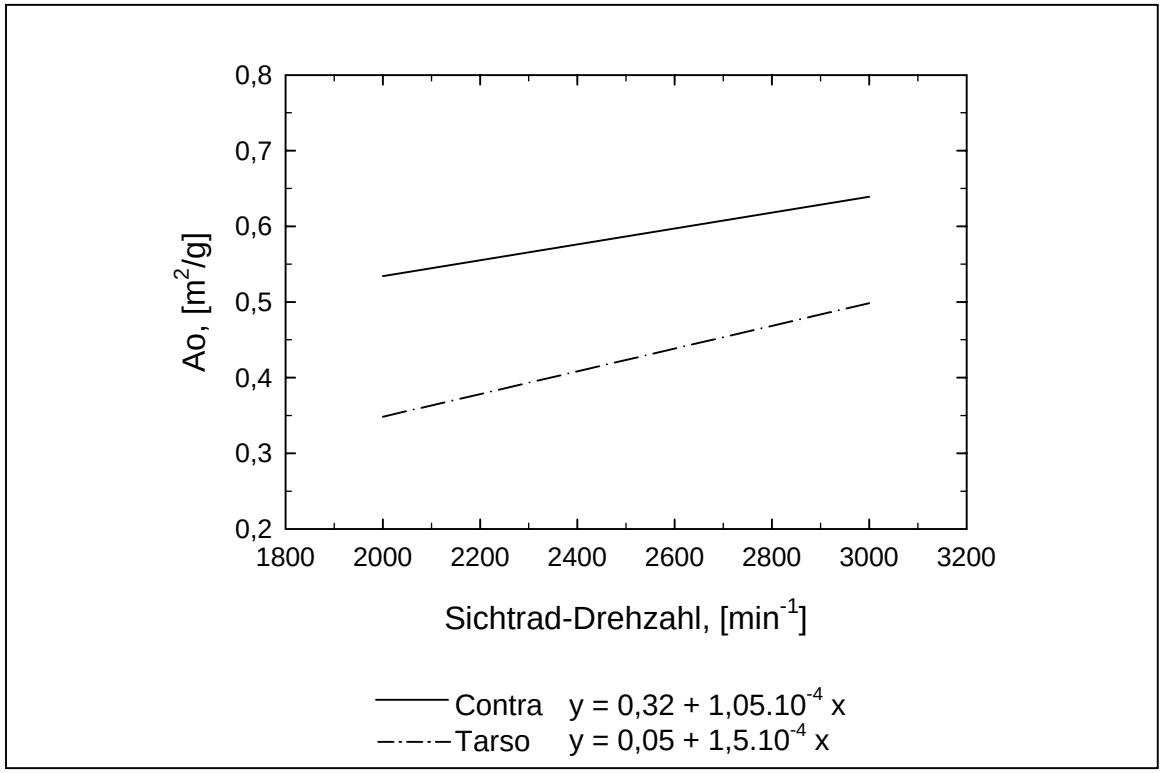


Abb. 22: Einfluss der Sichtrad-Drehzahl auf die massenspezifische Mehloberfläche (Ao) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Die spezifische Oberfläche des Akratos-Mehles nach dem einstufigen Prallen stieg ebenfalls parallel mit der erhöhten Feinheit an (Tab. 14, Anhang).

Infolge des höheren Energieeintrages bei zweistufiger Prallzerkleinerung der Weizensorten Contra und Tarso wurde eine weitere Zunahme des Feingutanteils der Mehle und eine Angleichung der Strukturauflösung der Mehlkörper zwischen hartem und weichem Weizen festgestellt.

Die Drehzahl der Dosierschnecke hatte über die zeitliche Gutkonzentration in der Mühle Einfluss auf Zerkleinerungs- und Feinheitsgrad. Mit ansteigender Drehzahl und damit höherer Gutkonzentration nahmen die Bruchvorgänge ab. Die Abbildung 23 zeigt die Wirkung der Dosierschnecken-Drehzahl auf die mittlere Teilchengröße (d_{50}) der Mehle beim zweistufigen Prallen der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos. Mit abnehmender Drehzahl und damit niedrigerer Gutkonzentration sanken die d_{50}-Werte.

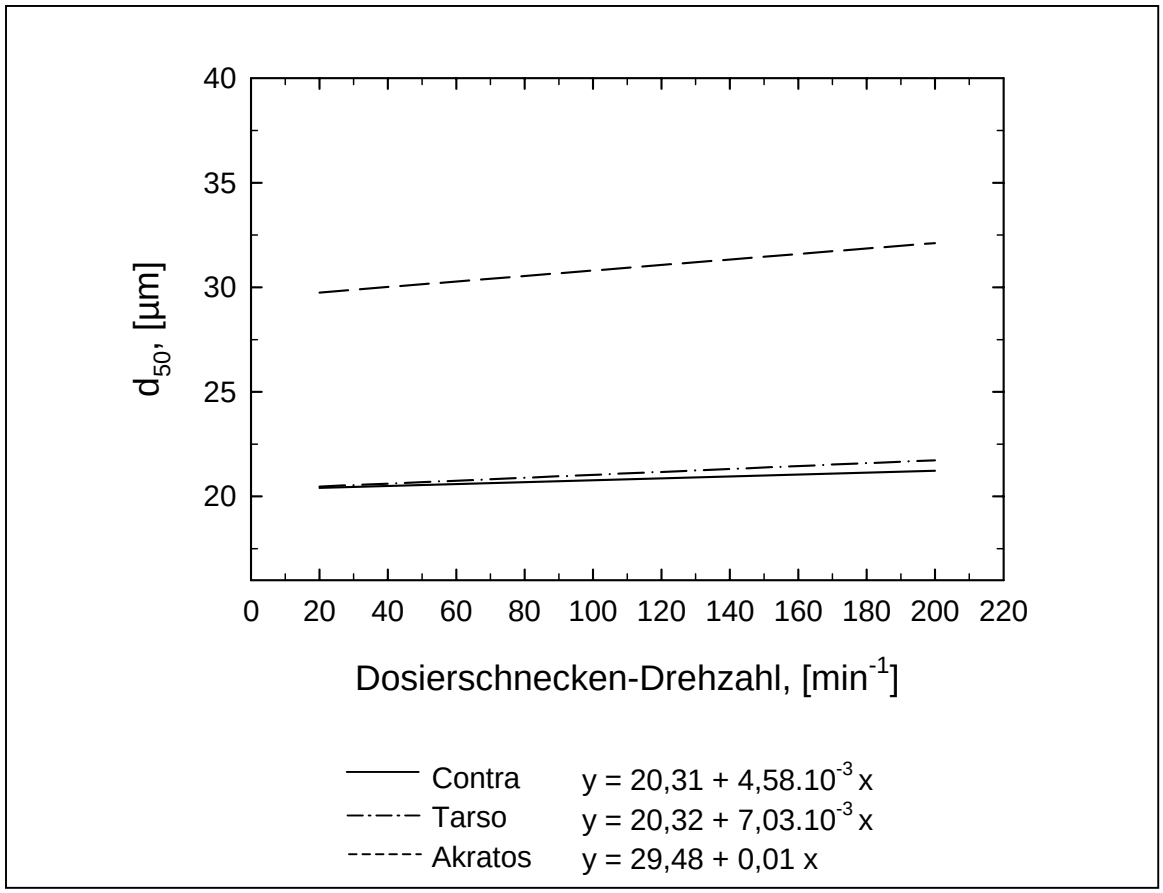


Abb. 23: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf die mittlere Teilchengröße (d_{50}) der zweistufig geprallten der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos

Mit abnehmenden Median-Wert wurde einen Anstieg des Anteils an Partikeln unter 10 µm beim zweistufigen Prallen gegenüber den Ausgangsmehlen und den einstufig geprallten Mehlen beobachtet.

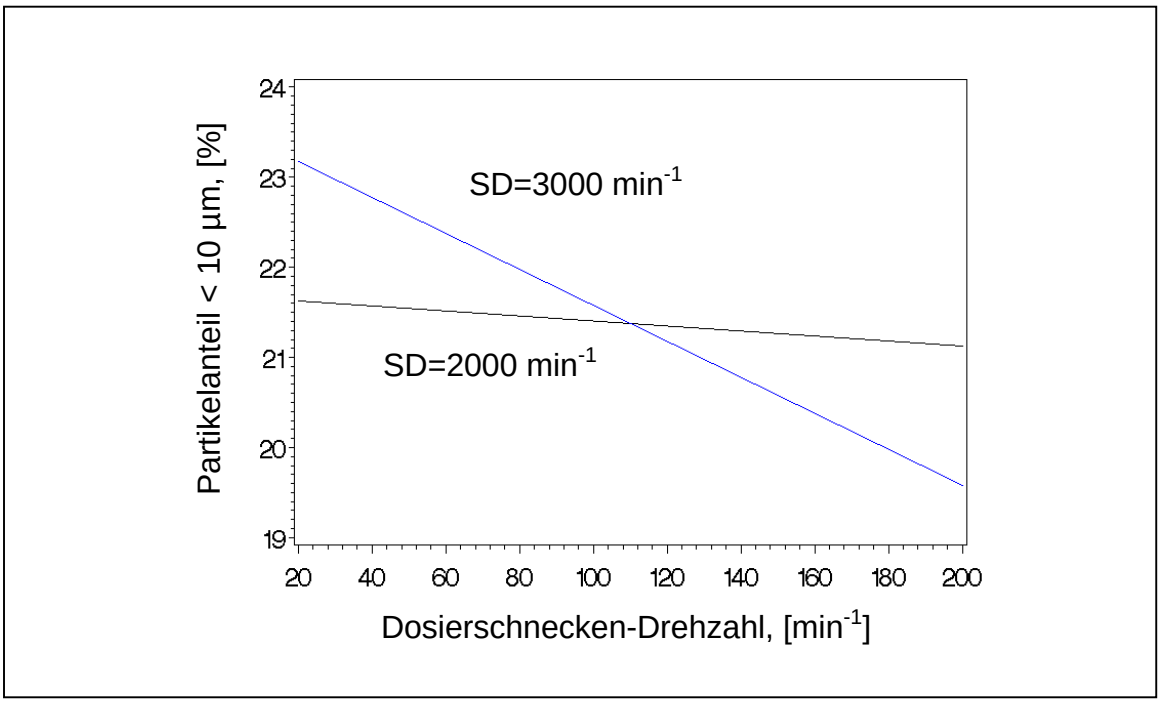


Abb. 24: Einfluss der Wechselwirkung zwischen Dosierschnecken-Drehzahl und Sichtrad-Drehzahl auf den Partikelanteil unter 10 µm der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Abbildung 24 zeigt besonders ausgeprägt die Abnahme der Zerkleinerungswirkung bei hoher Sichtrad- und Dosierschnecken-Drehzahl. Wegen des geringen Guteintrages bei schmaler Spaltbreite wuchs die Gutmenge im Mahlraum mit größerer Drehzahl der Dosierschnecke enorm an. Dagegen begünstigten eine niedrigere Sichtrad-Drehzahl und geringere Mehlspeisung eine höhere Mehlfeinheit. Ein besonderes Merkmal der Sichtermühle ist der hohe Luftdurchsatz während der Zerkleinerung. Der integrierte Sichter arbeitet als Schaufelradsichter gegen den Luftstrom der angeschlossenen Absauganlage. So wurde von Spänkuch u. Fass (1994) auch festgestellt, dass sich die Feinheit des erzielten Endproduktes mit steigender Sichterdrehzahl erhöht.

Analog zu den Versuchen der Prallmehle Contra und Tarso wurde bei der zweistufigen Prallung der Mehle der Sorte Akratos wieder ein Einfluss der Dosierschnecken-

Drehzahl auf die Feinheit der Mehle festgestellt. Die varianzanalytische Auswertung zeigte, dass die Senkung der Dosierschnecken-Drehzahl zu einem Anstieg der Anteile an Partikeln unter 10 µm führte. Abbildung 25 stellt die Regression zwischen dem Anteil an Partikeln unter 10 µm und der Dosierschnecken-Drehzahl nach dem zweistufigen Prallen der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos dar.

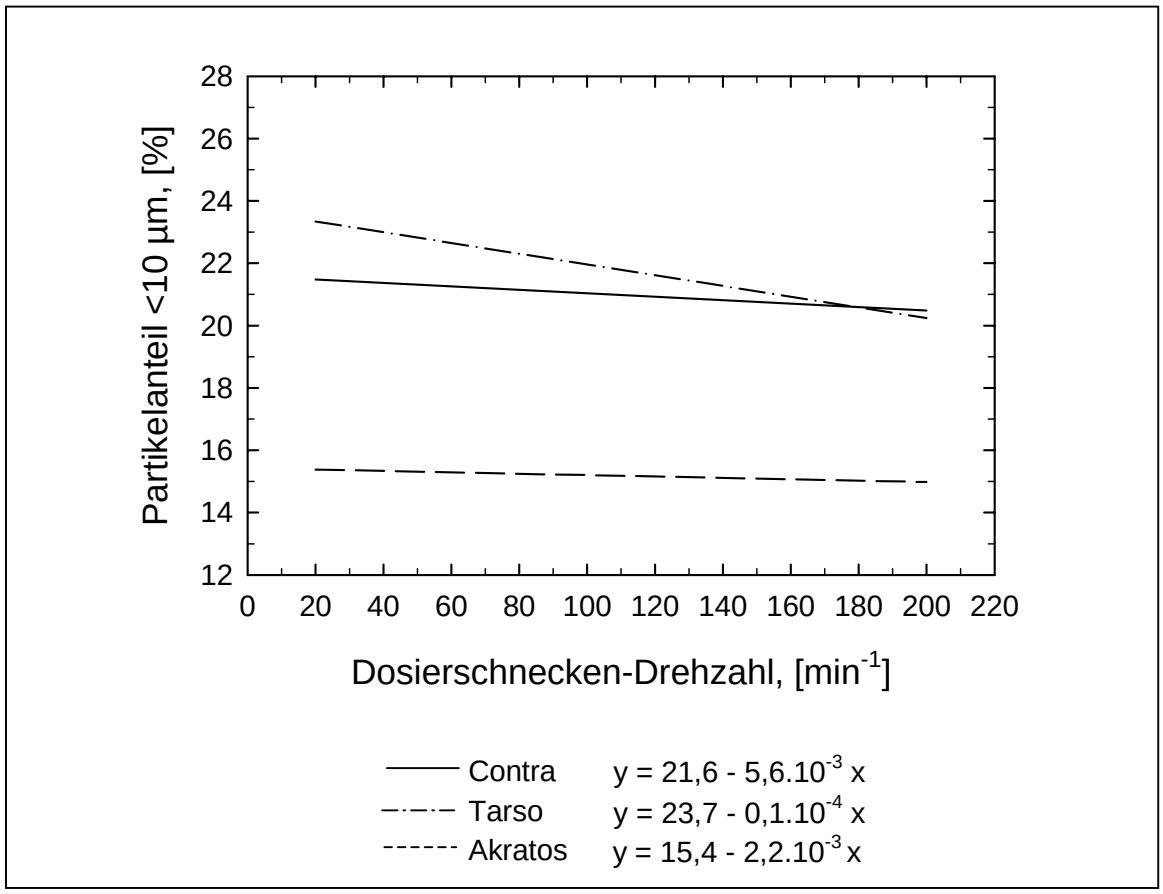


Abb. 25: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf den Partikelanteil unter 10 µm der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos

Nach dem zweistufigen Prallen wiesen die Sorten Contra und Tarso parallel mit der zunehmenden Feinheit einen weiteren Anstieg der Mehloberfläche gegenüber den Walzenmehlen und den einstufig geprallten Mehlen auf. Aufgrund der ähnlichen Granulation der Contra- und Tarso-Mehle nach dem zweistufigen Prallen wurde auch eine Angleichung der massenspezifischen Oberfläche bei etwa 60-67 m^2/g beobachtet (Tab. 14, Anhang). Dagegen erreichten die Akratos-Mehle, infolge der gröberen Granulation, niedrigere Werte der Mehloberfläche bei etwa 43-54 m^2/g.

Insgesamt wiesen die Prallmehle der Sorte Akratos höhere d_{50} –Werte als die Prallmehle aus den Sorten Tarso und Contra auf. Somit lagen die Untersuchungswerte der Partikel unter 10 µm und diejenigen der massenspezifischen Mehloberflächen der Sorte Akratos etwas niedriger.

5.1.2.2 Mikroskopische Aufnahmen

Die veränderte Struktur der Prallmehle lässt sich mittels Raster-Elektronenmikroskop visuell darstellen. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Mehle geben Hinweise auf die Beschaffenheit der Mehle.

Das Endosperm weicher Weizen, dargestellt am Beispiel der Sorte Contra, zeigt eine aufgelockertere Struktur als harter Weizen (Abb. 26). Das Eiweiß bildet keine geschlossene Matrix und besteht in höherem Maß aus einzelnen Partikeln, die mit den Stärkekörnern in weniger fester Verbindung stehen. Zwischen den überwiegend frei liegenden Stärkekörnern befinden sich mikroskopisch kleine Hohlräume, die dem Endosperm das mehlige Aussehen verleihen (Meyer u. Zwingelberg, 1998). Demgegenüber im Endosperm von Weizen mit harter Kornstruktur, wie z.B. der Sorten Tarso und Akratos, liegen die Stärkekörner sehr kompakt in der Proteinmatrix eingebettet (Abb. 27 und 28). Dabei sind die Stärkekörner mit dem umgebenden Eiweiß nicht nur strukturell eng verbunden, sondern durch chemische Bindungen auch eng miteinander verknüpft (Barlow et al., 1973).

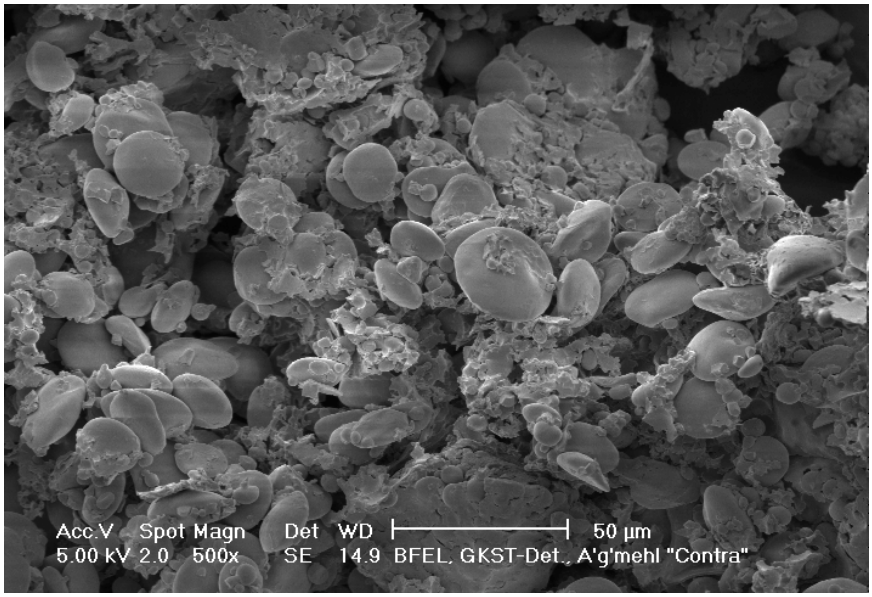


Abb. 26: Walzenmehl der Sorte Contra

Das Ausgangsmehl der weich strukturierten Sorte Contra enthielt im Vergleich zu den hart strukturierten Sorten Tarso und Akratos höhere Anteile feiner Mehlpartikel

und freiliegender Stärke. Die Mehlteilchen waren weniger von Zellwänden umgeben, da der Bruch bei der Vermahlung vermehrt durch die Zellen verläuft (Abb. 26). Darauf ist u.a. der schliffige Charakter der Mehle zurückzuführen, welche veränderte Fließeigenschaften zeigten.

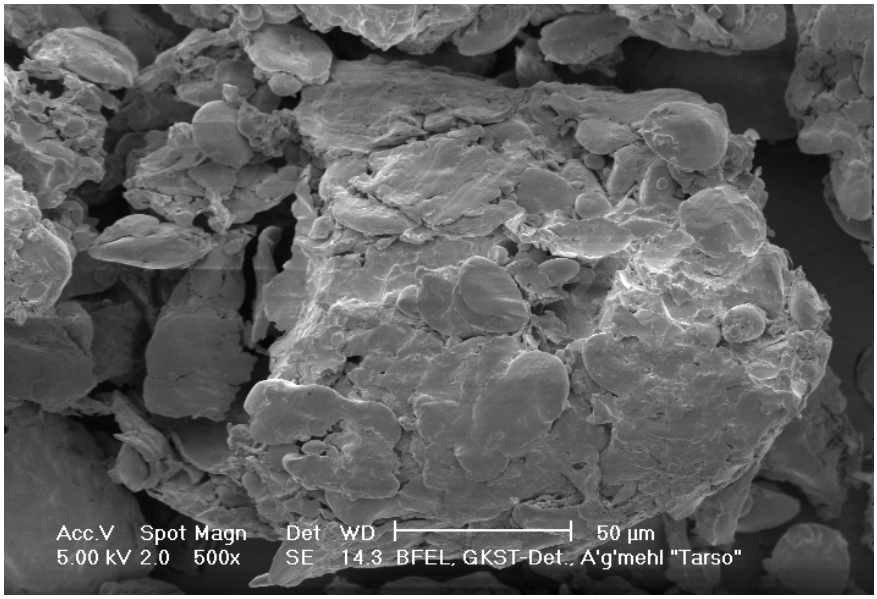


Abb. 27: Walzenmehl der Sorte Tarso

Das Ausgangsmehl der hart strukturierten Sorte Tarso bestand überwiegend aus größeren Teilchen und verhältnismäßig geringen Anteilen feiner Mehlpartikel sowie freiliegender Stärke (Abb. 27). Für Mehle aus härterem Weizen ist charakteristisch, dass ein höherer Anteil der Partikel noch im engen Verbund mit den Endospermzellwänden steht, da die Bruchstellen bei der Vermahlung häufig entlang der Zellwände verlaufen.

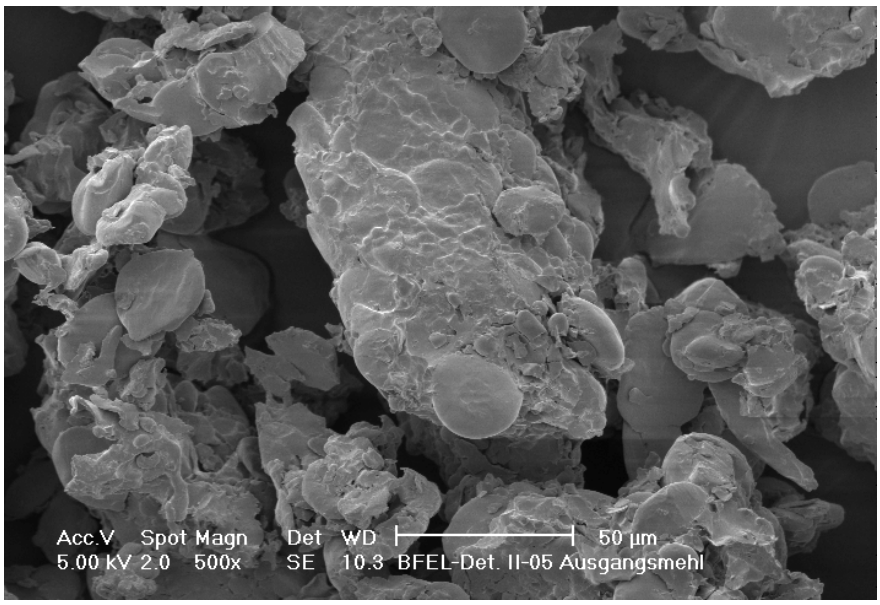


Abb. 28: Walzenmehl der Sorte Akratos

Ähnlich wie bei der hart strukturierten Sorte Tarso bestand das Ausgangsmehl der Sorte Akratos überwiegend aus größeren Teilchen bei verhältnismäßig geringen Anteilen an Feinpartikeln sowie freiliegender Stärke (Abb. 28). Hier war auch zu erkennen, dass die größeren Teilchen etwas größer als die des Tarso-Mehles waren.

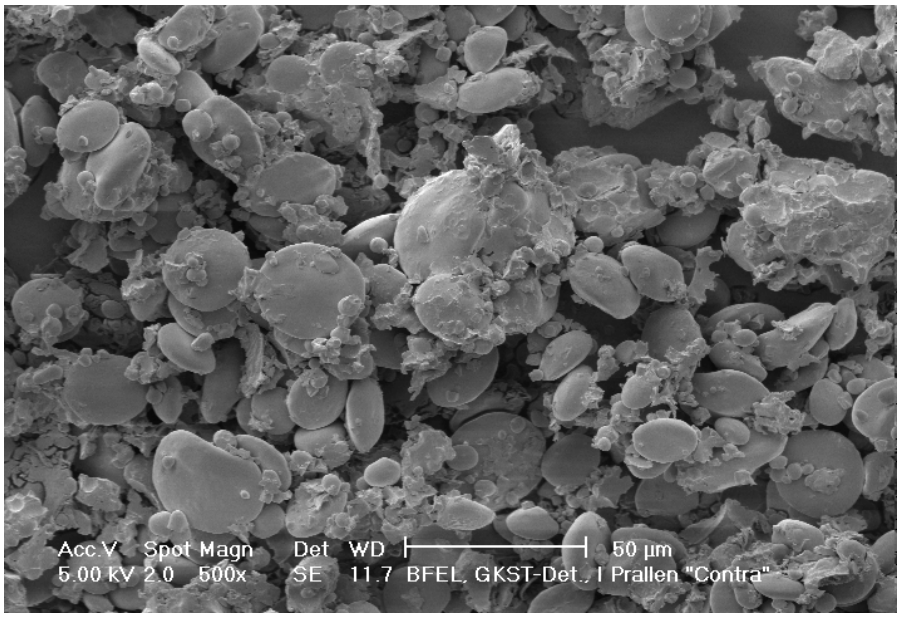


Abb. 29: Einstufig gepralltes Mehl der Sorte Contra

Bei der einstufigen Prallung der Mehle aus der Sorte Contra lösten sich deutlich große Anteile der Stärkekörner von der Proteinmatrix ab. Die Prallmehle bestanden nach fast vollkommener Auflösung der Zellverbände zu einem hohen Anteil aus freiliegender, großkörniger Stärke. Im Bild sind Aggregate aus Stärkekörnern, Proteinmatrix und Zellwandbestandteilen kaum zu sehen (Abb. 29).

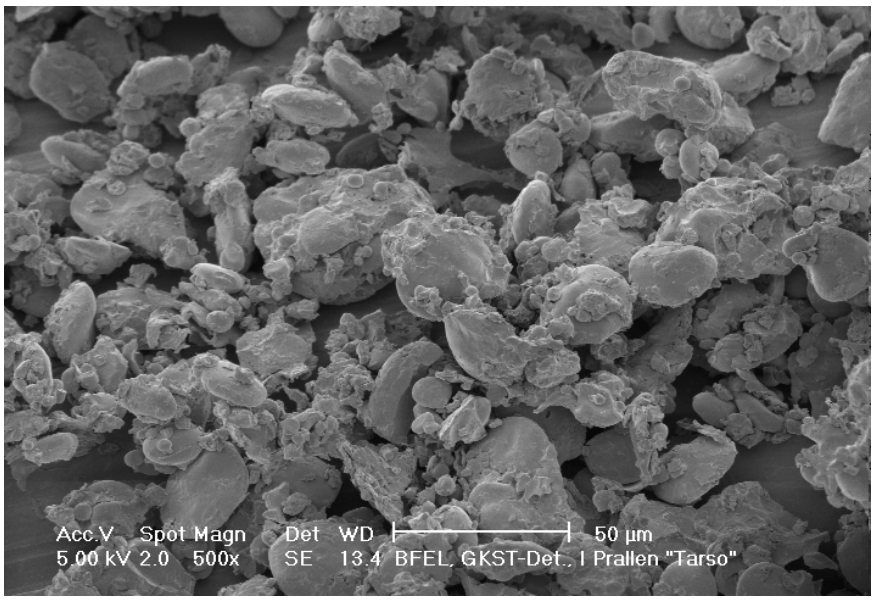


Abb. 30: Einstufig gepralltes Mehl der Sorte Tarso

Die einstufige Prallzerkleinerung hatte besonders bei Mehlen aus hartem Weizen einen zusätzlichen Effekt auf den Zerkleinerungsgrad und die Zusammensetzung. Die Prallmehle der Sorte Tarso enthielten einen wesentlich niedrigeren Anteil an Zellverbänden, die eine charakteristische abgerundete Form aufwiesen. Dabei hatte sich der Anteil freiliegender Stärke maßgeblich erhöht. Aufgrund der harten Struktur des Weizens wurde eine vollständige Abtrennung der Stärkekörner aus der Proteinmatrix nicht erreicht (Abb. 30).

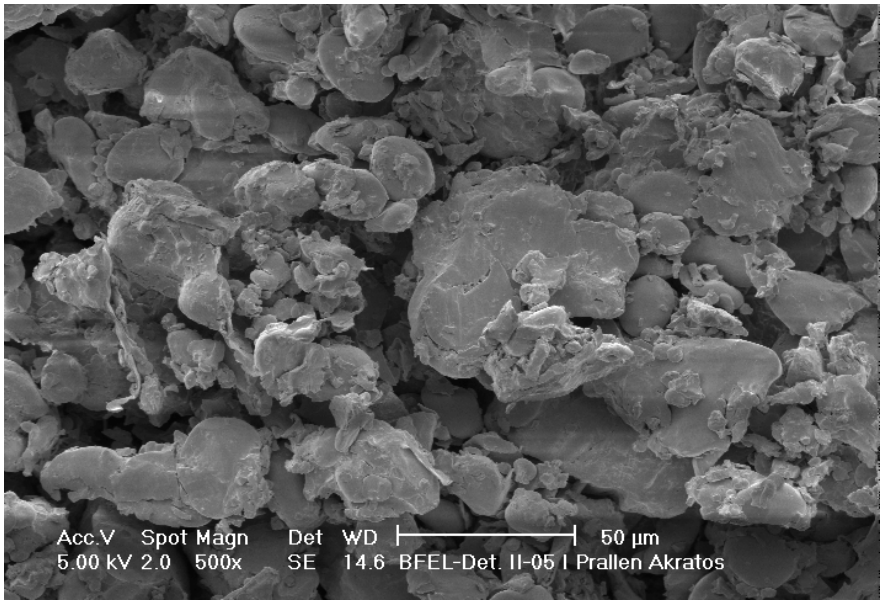


Abb. 31: Einstufig gepralltes Mehl der Sorte Akratos

Nach dem einstufigen Prallen enthielten die Prallmehle der Sorte Akratos einen wesentlich niedrigeren Anteil an Zellverbänden, die eine charakteristische abgerundete Form wie bei Tarso aufwiesen. Dabei hatte sich auch der Anteil freiliegender Stärke erhöht. Im Vergleich zu der Sorte Tarso waren beim Prallmehl der Sorte Akratos immer noch größere Konglomerate zu sehen (Abb. 31). Aufgrund der harten Struktur des Weizens wurde keine vollständige Abtrennung der Stärkekörner aus der Proteinmatrix erreicht.

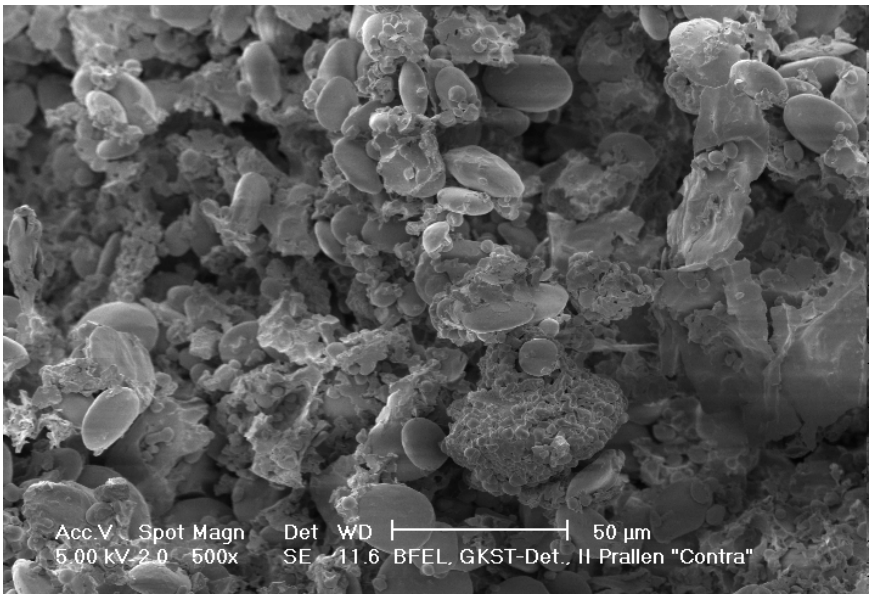


Abb. 32: Zweistufig gepralltes Mehl der Sorte Contra

Aufgrund der weichen Kornstruktur und fast vollständiger Auflösung des Mehlkörpers nach dem einstufigen Prallen wurde nach der zweistufigen Prallzerkleinerung der weichen Sorte Contra nur eine geringe Veränderung in der Strukturauflösung des Mehlkörpers festgestellt (Abb. 32).

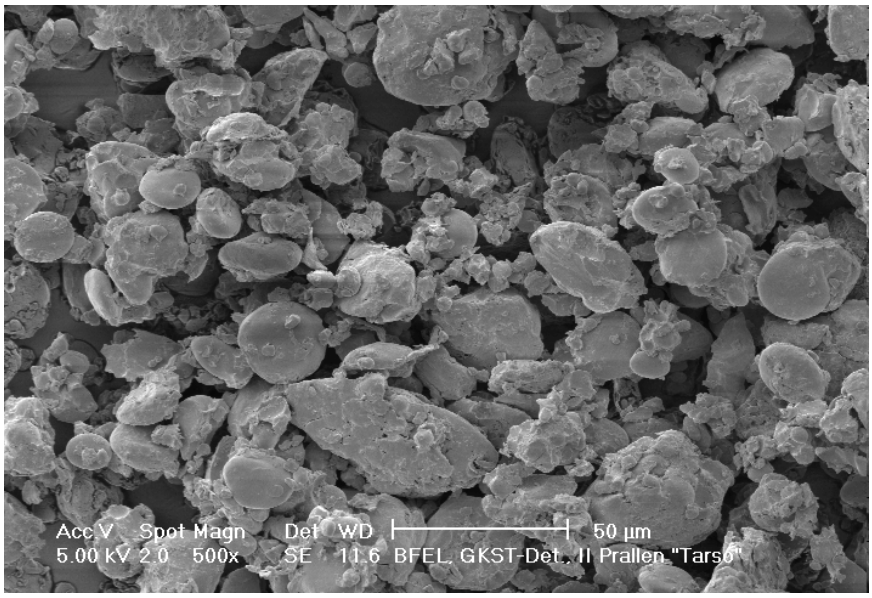


Abb. 33: Zweistufig gepralltes Mehl der Sorte Tarso

Die Mehlstruktur der zweistufig prallzerkleinerten Mehle aus der härteren Sorte Tarso ist infolge der weiteren intensiven Beanspruchung stärker verändert worden (Abb. 33). Diese Mehle bestanden größtenteils aus freiliegenden Stärkekörnern und Proteinteilchen. Aufgrund der harten Struktur des Weizens bzw. der starken Verkittung der Stärkekörner mit der Proteinmatrix wurde auch beim zweistufigen Prallen keine vollständige Abtrennung der Stärkekörner aus der Proteinmatrix erreicht.

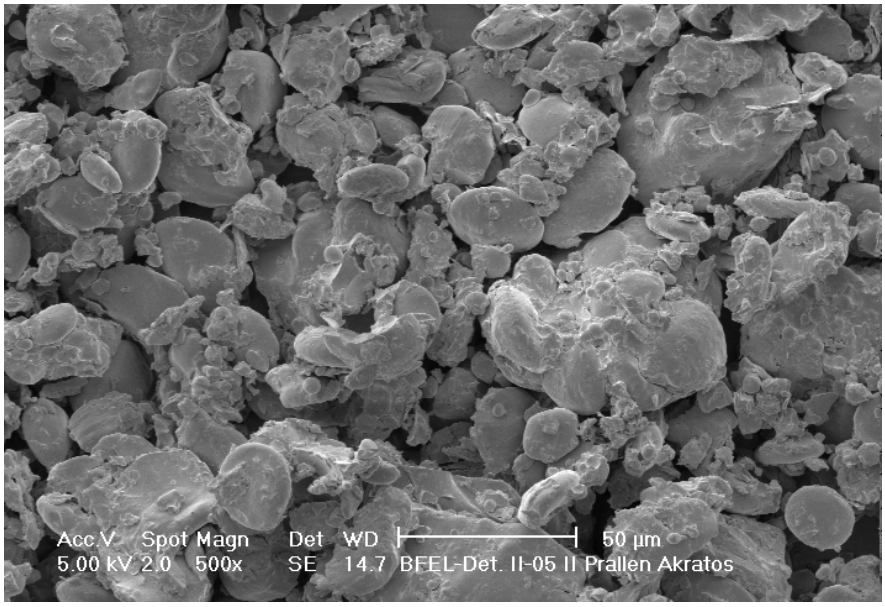


Abb. 34: Zweistufig gepralltes Mehl der Sorte Akratos

Die zweistufig prallzerkleinerten Mehle aus der hart strukturierten Sorte Akratos bestanden infolge der weiteren intensiven Beanspruchung größtenteils aus freiliegenden Stärkekörnern und Proteinteilchen (Abb. 34). Aufgrund der harten Struktur des Weizens wurde beim zweistufigen Prallen ebenfalls keine vollständige Abtrennung der Stärkekörner aus der Proteinmatrix erreicht. Es waren immer noch gröbere Teilchen als bei den Prallmehlen aus der Sorte Tarso festzustellen.

Durch die hohe Energiezufuhr ins Mehl beim zweistufigen Prallen wurden die Stärkekörner intensiver beansprucht. Wobei die mittleren und großen Stärkekörner intensiver beeinflusst wurden als die kleinen Stärkekörner.

Die hohe Beanspruchung bei dem ein- und zweistufigen Prallen bestimmte die Eigenschaften der Mehlkomponenten Stärke und Protein.

5.1.3 Stoffliche Zusammensetzung der Prallmehle

5.1.3.1 Feuchtigkeitsgehalt

Die ursprüngliche Feuchtigkeit der Mehle der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos nahm während der einstufigen Prallung mit etwa 2 % ab (Tab.15, Anhang).
Aus der statistisch ausgewerteten Wirkung der Einflussvariablen auf die Feuchtigkeitsgehalte der Contra- und Tarso-Mehle wurde ein Einfluss aller Maschinenparameter festgestellt. Mit abnehmender Dosierschnecken-Drehzahl und damit geringerer Gutmenge im Mahlraum folgte ein höherer Feuchtigkeitsentzug der Mehle (Abb. 35).

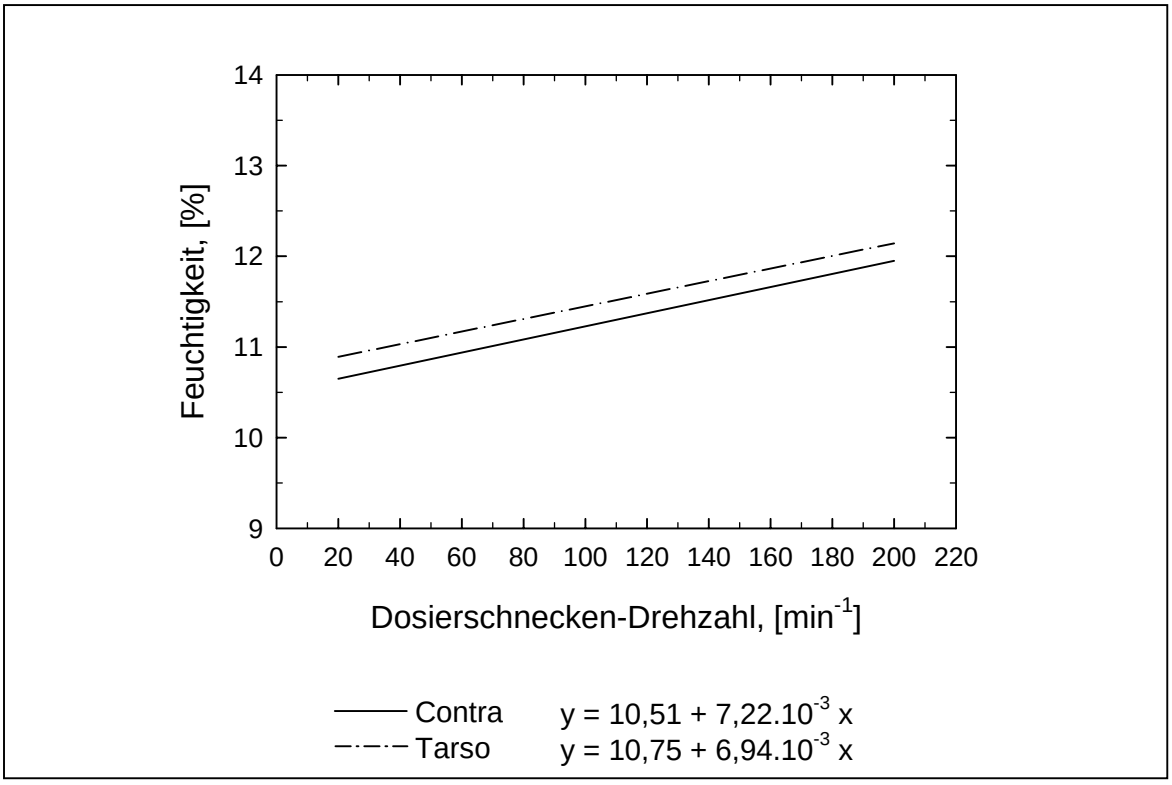


Abb. 35: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Feuchtigkeit der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Eine zunehmende Umfangsgeschwindigkeit bewirkte eine Temperaturerhöhung im Mahlraum, eine Vergrößerung der Gutoberfläche (Tab. 14, Anhang) und führte damit zur Abnahme der Mehlfeuchtigkeit (Abb. 36).

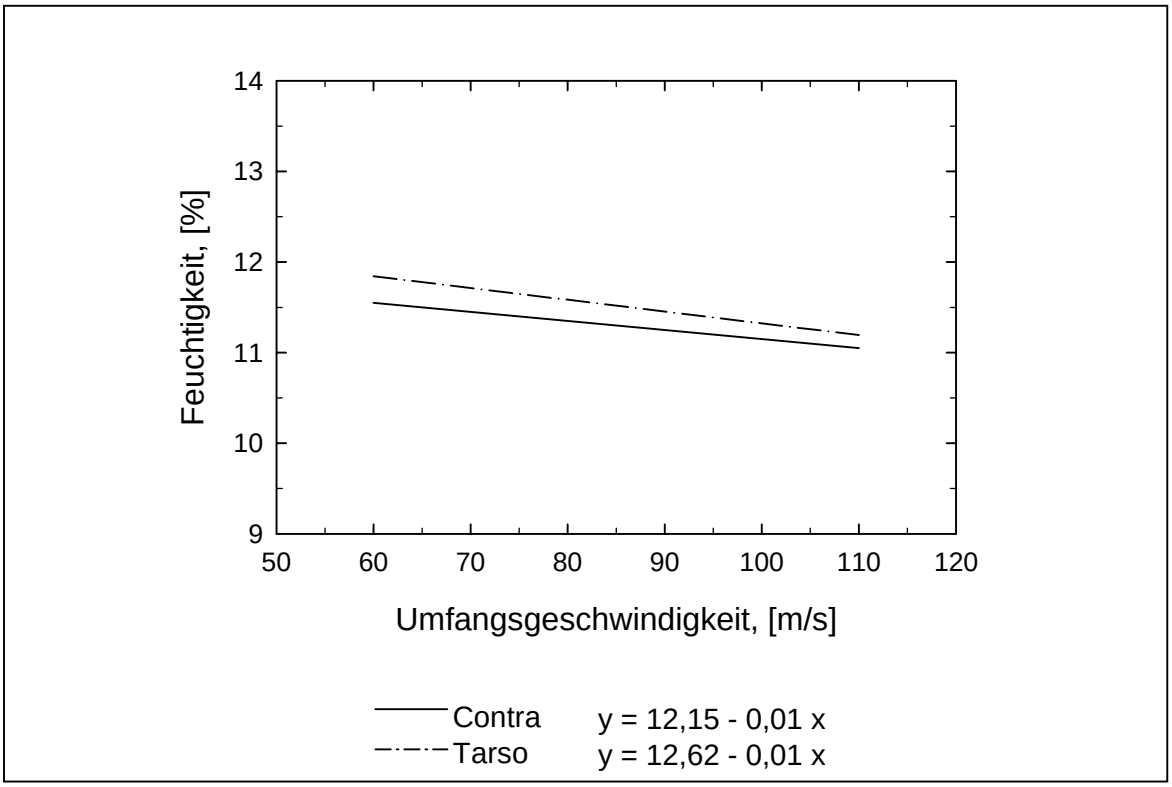


Abb. 36: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die Feuchtigkeit der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Bei der Wirkung der Sichtrad-Drehzahl auf die Feuchtigkeit der Contra- und Tarso-Mehle beim einstufigen Prallen wurde ein negativer Regressionskoeffizient beobachtet (Tab. 22, Anhang). Eine höhere Sichtrad-Drehzahl hatte einen längeren Aufenthalt des Mehles im Mahlraum bzw. Feuchtigkeitsentzug zur Folge (Abb. 37).

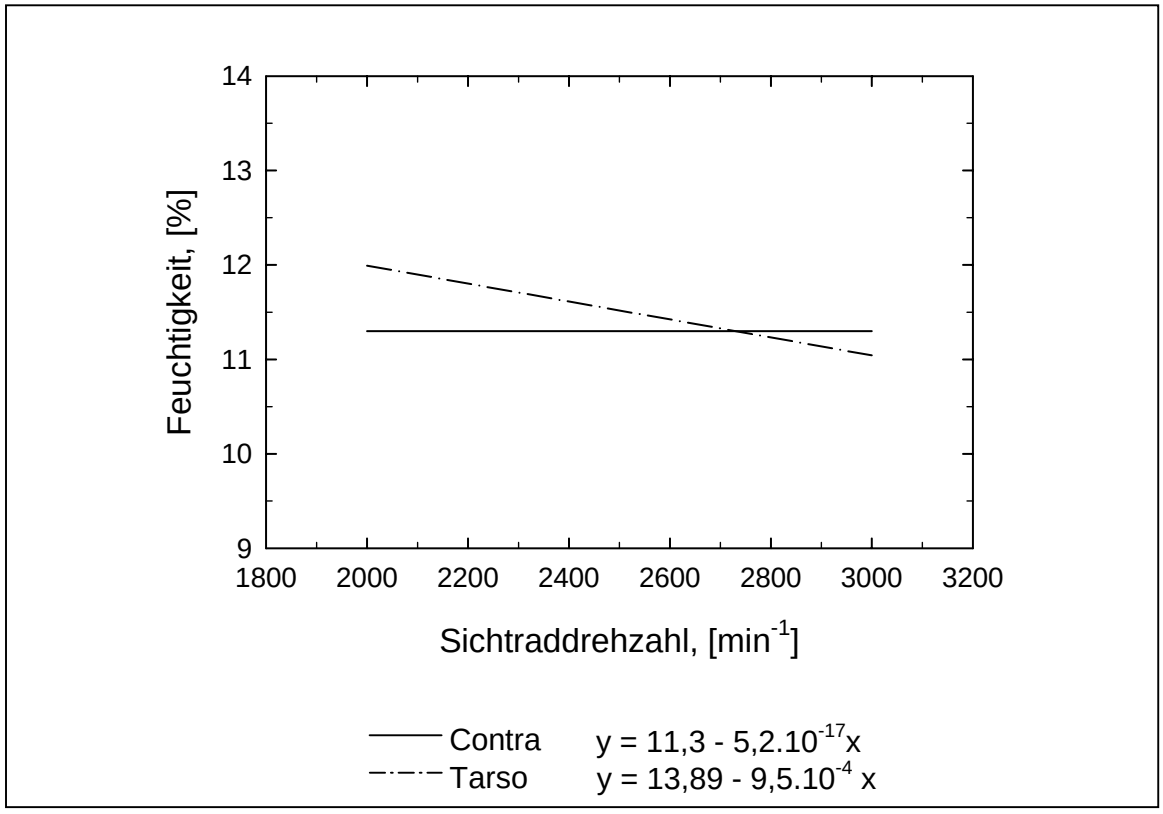


Abb. 37: Einfluss der Sichtrad-Drehzahl auf die Feuchtigkeit der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra- und Tarso

Alle diese Einflüsse der Variablen in Kombination mit einem relativ hohen Luftvolumenstrom beim Prallen führten eindeutig zu einem Feuchtigkeitsverlust der Mehle.
Dieser Zusammenhang galt ebenfalls für die zweistufig geprallten Mehle. Ausgehend von der ursprünglichen Feuchtigkeit und den Feuchtigkeitsverlusten nach dem einstufigen Prallen, wurde eine weitere Senkung der Feuchtigkeit der sortenreinen Mehle auch nach dem zweistufigen Prallen mit etwa 1-2 % beobachtet. Bei der Weizensorte Tarso war diese Abnahme stärker ausgeprägt.
Abbildung 38 zeigt die Senkung der Feuchtigkeit der Contra-, Tarso- und Akratos-Mehle mit abnehmender Dosierschnecken-Drehzahl.

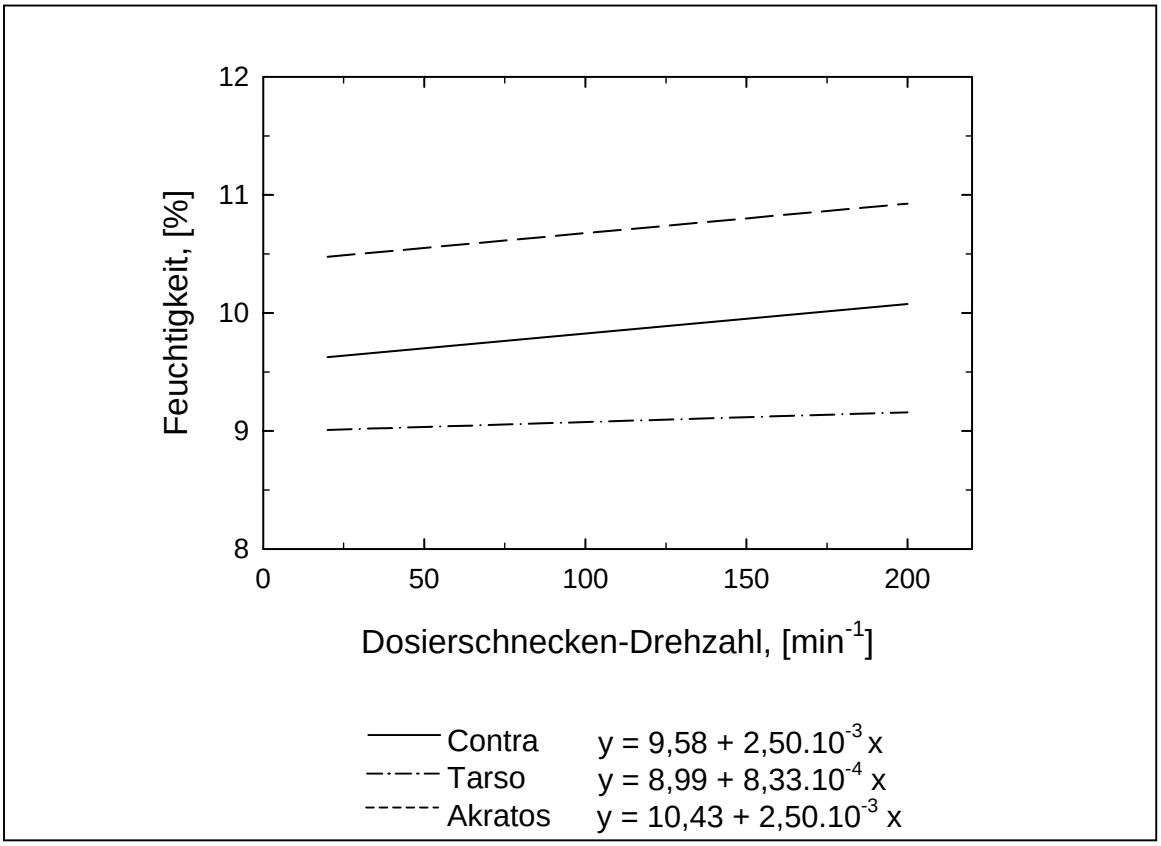


Abb. 38: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Feuchtigkeit der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos

5.1.3.2 Mineralstoffgehalt

Wie zu erwarten war, zeigten die Prallmehle der Contra-, Tarso- und Akratos- Sorten nach dem ein- und zweistufigen Prallen keine Veränderungen der Mineralstoffgehalte (Tab. 15, Anhang).

5.1.3.3 Gesamt- und salzwasserlösliches Protein

Die Gehalte der Gesamt-Proteine und der salzwasserlöslichen Proteine der Prallmehle nach dem einstufigen Prallen waren von der Weizensorte abhängig. Aufgrund des höheren Rohprotein- und löslichen Proteingehaltes der Weizensorte Tarso wiesen auch die Prallmehle dieser Sorte höhere Werte im Vergleich zu den Sorten Contra und Akratos auf (Tab. 15, Anhang). Sie zeigten keine Abhängigkeit von den Maschinenparametern im Laufe der mechanischen Behandlung.

Der Gesamtproteingehalt und der Gehalt des löslichen Proteins der zweistufig geprallten Mehle waren wie beim einstufigen Prallen ebenfalls in erster Linie von der Weizensorte abhängig, wobei die Weizensorte Tarso wieder die höchste Werte im Vergleich zu den Weizensorten Contra und Akratos aufwies. Eine geringfügige Absenkung des Gehaltes an salzwasserlöslichen Proteinen kann auf eine Verringerung der Lösbarkeit der salzwasserlöslichen Proteine (Albumine und Globuline) durch die Prallzerkleinerung zurückgeführt werden. Ähnliche Ergebnisse sind auch in der Literatur zu finden (Mac Arthur u. D'Appolonia, 1977; Schulz, 1993; Pamuk, 1999). Dieser Zusammenhang wurde durch die lineare Abhängigkeit des löslichen Proteins der Contra-, Tarso- und Akratos-Mehle von der Prallgeschwindigkeit nach dem zweistufigen Prallen dargestellt (Abb. 39). Bei den Akratos–Mehlen war diese Abnahme höher ausgeprägt.

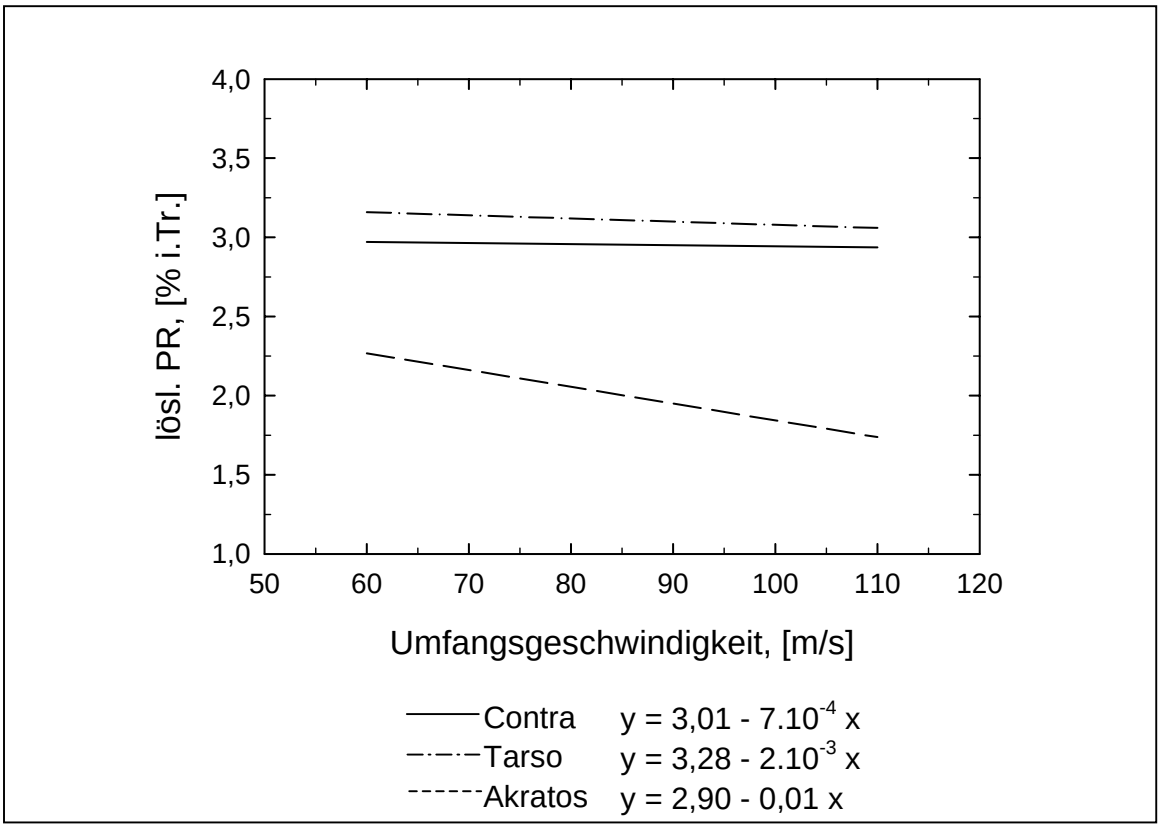


Abb. 39: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die löslichen Proteine der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos

5.1.3.4 Stärkegehalt

Bedingt durch das Stickstoffangebot während des Kornfüllungsphase verhalten sich die Stärke- und die Proteinspeicherung gegenläufig. Bei hoher N-Aufnahme werden mehr Assimilate in die Proteinspeicherung gelenkt, bei niedriger in die Stärkespeicherung. Somit haben Körner mit höherem Proteingehalt einen geringeren Stärkegehalt und solche mit niedrigem Proteingehalt höhere Stärkegehalte. Das erklärt vom Rohstoff her, dass die Sorten Contra und Akratos höhere Werte des Stärkegehaltes nach dem ein- und zweistufigen Prallen im Vergleich zur Sorte Tarso aufwiesen (Tab. 15, Anhang).

Die Schwankungen der Messwerte der stofflichen Zusammensetzung beruhten auf unterschiedlich hohen Mehlfeinheiten nach der Prallzerkleinerung, was die Analytik besonders erschwerte.

5.1.4 Funktionelle Eigenschaften

5.1.4.1 Eigenschaften der Stärke der Prallmehle

5.1.4.1.1 Stärkebeschädigung

Das Prallverfahren hatte auch Einfluss auf die funktionellen Eigenschaften der Stärke.

Die statistische Untersuchung des Prallens der Weizenmehle Contra und Tarso nach dem einstufigen Prallen ergab bei beiden Sorten einen geringen Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Stärkebeschädigung (Abb. 40).

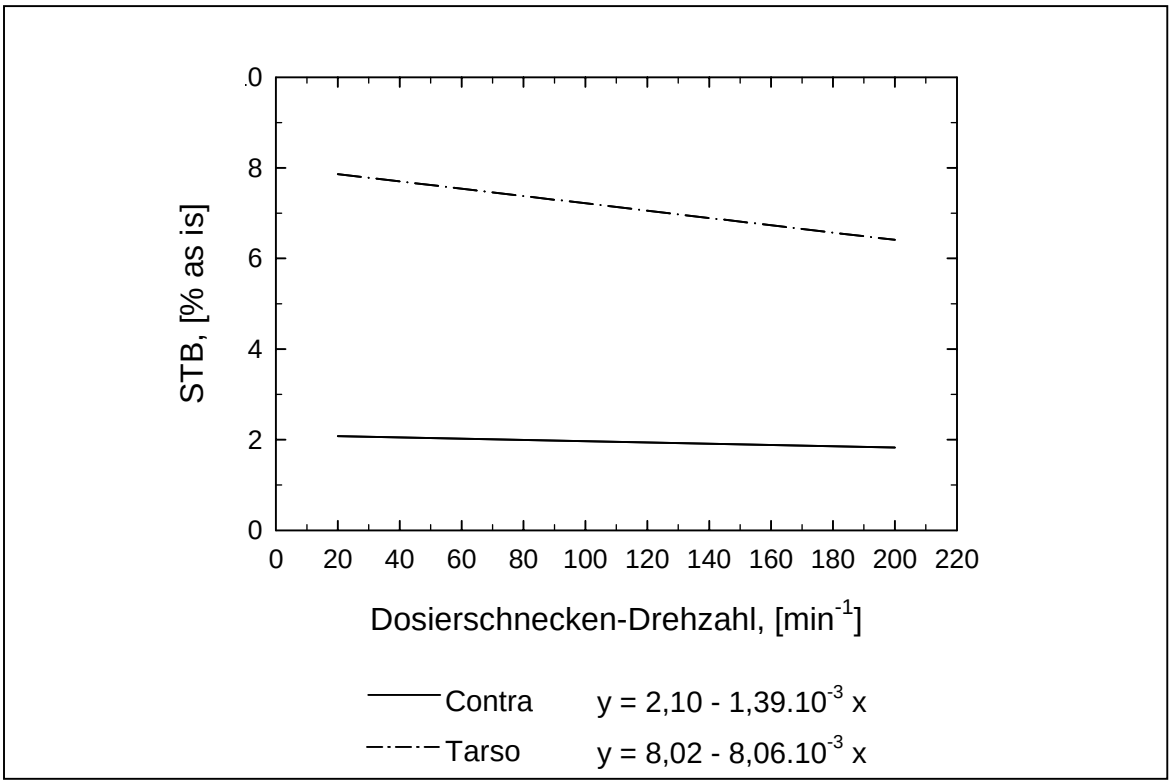


Abb. 40: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Stärkebeschädigung (STB) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Die Grafik zeigt aber, dass durch mechanische Einwirkung der Prallorgane mit dem Ziel, Stärkekörner aus der Proteinmatrix herauszulösen, besonders bei Weizen harter Kornstruktur eine deutlich höhere Stärkebeschädigung erreicht wurde. Die Dosierung korrelierte negativ mit der Stärkebeschädigung, d.h. je langsamer das Mehl dosiert

wurde, desto geringer war die zeitliche Mehlkonzentration im Prallraum und desto höher war der Grad der Stärkebeschädigung.

Erwartungsgemäß wurde bei der hart strukturierten Sorte Akratos mit zunehmender Prallintensität auch eine wesentliche Erhöhung des Stärkebeschädigungsgrades beobachtet (Tab. 16, Anhang). Trotz ähnlicher Kornhärten von Tarso und Akratos wiesen die Mehle aus der Sorte Akratos höhere Werte der Stärkebeschädigung als diejenigen aus der Sorte Tarso auf. Nach dem einstufigen Prallen war die Stärkebeschädigung um etwa 2% erhöht.

Viele Untersuchungen in der Literatur belegen, dass normalerweise der Stärkebeschädigungsgrad mit zunehmender Prallgeschwindigkeit steigt (Freund u. Handreck, 1991; Banafa, 2004). Der Zerkleinerungseffekt in einer Prallmühle ist aber, wie von Schultze et al. (1985) festgestellt, nicht nur vom Zustand des Mahlgutes und von der Geschwindigkeit der Prallorgane abhängig, sondern auch von der Art und Anzahl der Prallorgane, vom Durchsatz, von der Luftreibung und der Verweilzeit des Gutes in der Maschine.

Nach dem ausgewählten statistischen Versuchsplan wurden die verschiedenen Einstellungswerte der Prallgeschwindigkeit zusammen mit unterschiedlichen Einstellungen der Dosierung variiert (Tab. 12, Anhang). Die Ergebnisse der durchgeführten statistischen Auswertung nach dem einstufigen Prallen belegen, dass der Durchsatz (Dosierung) die größte Bedeutung für den Stärkebeschädigungsgrad in der ZPS-Mühle hat (Tab. 22, Anhang). Eine geringere Produktmenge bewirkt einen längeren freien Flug der Teilchen bis zum Aufprallen und damit eine höhere Energieausnutzung, die zu einer höheren Stärkebeschädigung führt. Eine höhere Gutkonzentration führt dagegen zu einer Zunahme der gegenseitigen Teilchenzusammenstöße mit geringerer Energieausnutzung und geringerer Stärkebeschädigung (Rumpf, 1965).

Obwohl statistisch keine signifikanten Effekte der Maschinenparameter festgestellt werden konnten, ist mit der zweistufigen Prallbehandlung der Mehle ein weiterer Anstieg der Stärkebeschädigung, die von der Kornhärte der Weizensorte abhängig ist, erzielt worden. Die weiche Sorte Contra erreichte nur eine geringfügige Erhöhung der Stärkebeschädigung auf 2,0 % (Tab. 16, Anhang). Im Gegensatz dazu wiesen die Mehle der härteren Sorte Tarso eine Stärkebeschädigung bis zu 8,5 % auf.

Die statistische Untersuchung nach dem zweistufigen Prallen der Weizensorte Akratos ergab eine steile Zunahme der Stärkebeschädigung in Abhängigkeit von der Sichtrad-Drehzahl (Abb. 41).

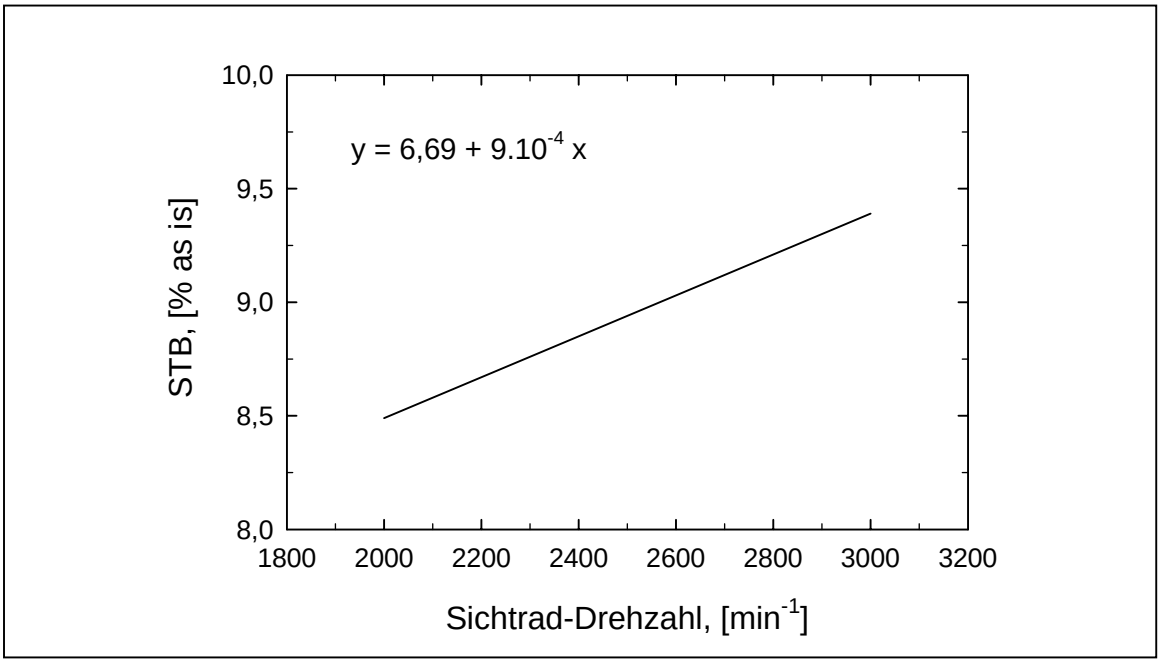


Abb. 41: Einfluss der Sichtrad-Drehzahl auf die Stärkebeschädigung (STB) der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorte Akratos

5.1.4.1.2 Wasserbindevermögen

Das Wasserbindevermögen eines Weizenmehles wird von seinem Proteingehalt und dem Grad der Stärkebeschädigung beeinflusst. Da die Mehle der harten Sorten Tarso und Akratos einen höheren Proteingehalt und eine deutlich höhere Stärkebeschädigung (ca. vier- bis fünffach) als die Contra-Mehle besitzen, liegt ihr Wasserbindevermögen gegenüber den Contra-Mehlen um ca. 20-30 % höher (Tab. 16, Anhang).
Die statistische Auswertung nach dem ein- und zweistufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso wies keine Wirkung der variierten Maschinenparameter auf das Wasserbindevermögen aus.
Nach dem zweistufigen Prallen der Sorte Akratos wurde statistisch festgestellt, dass das Wasserbindevermögen bei konstantem Proteingehalt von den Prozessgrößen Dosierschnecken-Drehzahl und Sichtrad-Drehzahl beeinflusst wird (Abb. 42 und 43).

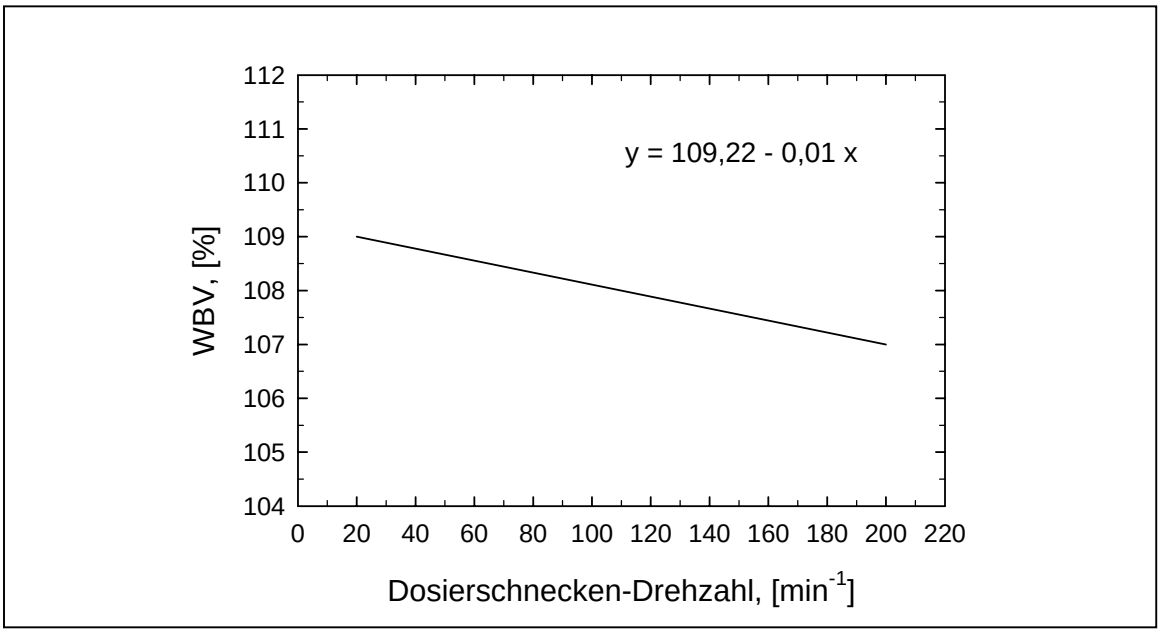


Abb. 42: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf das Wasserbindevermögen (WBV) der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorte Akratos

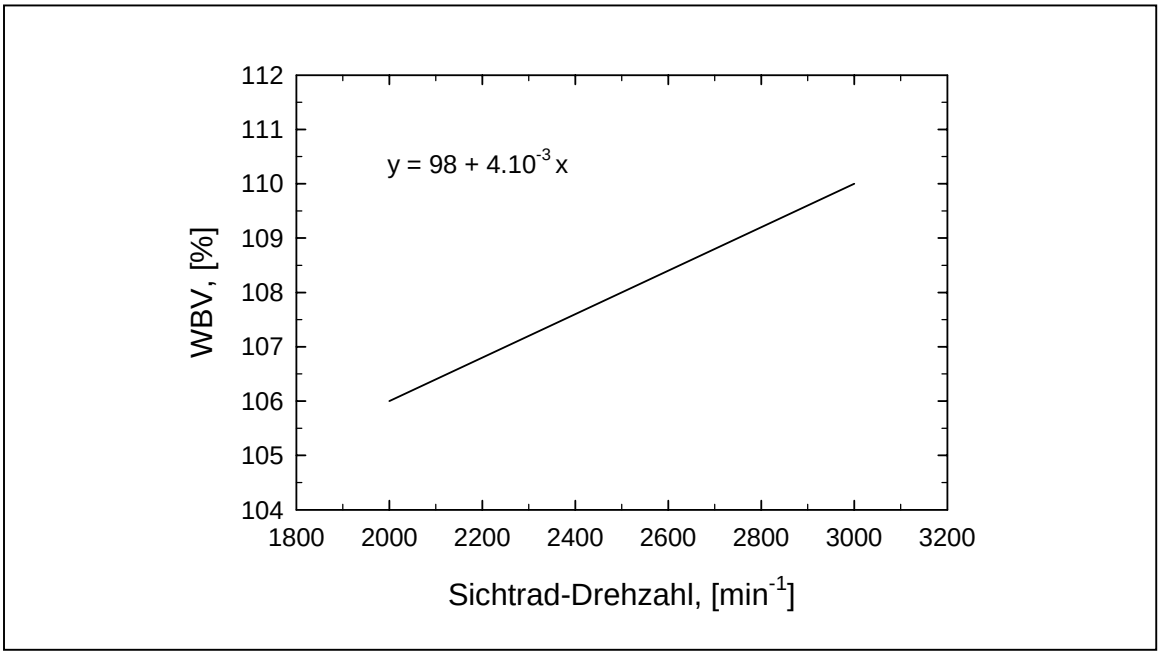


Abb. 43: Einfluss der Sichtrad-Drehzahl auf das Wasserbindevermögen (WBV) der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorte Akratos

5.1.4.1.3 Viskositäts–Eigenschaften

Die Viskositätseigenschaften der Prallmehle werden beeinflusst von ihrem Feinheitsgrad, dem Stärkebeschädigungsgrad und dem Wasserbindevermögen. Die geprallten Mehle zeigten niedrigere Viskositäten als die Walzenmehle. Dies kann auch mit einer übermolekularen Strukturmodifizierung der Stärke während der Prallzerkleinerung bei hohem Energieeintrag zusammenhängen. Bei der statistischen Auswertung hatte die Weizensorte Einfluss auf die Verkleisterungsmaxima und die Endviskositäten, der auch in einer negativen Korrelation mit dem Stärkebeschädigungsgrad und dem Wasserbindevermögen bestand. Dies bedeutet, dass bei den Prallmehlen der Sorten Tarso und Akratos aufgrund des höheren Stärkebeschädigungsgrades und des höheren Wasserbindevermögens niedrigere Werte der Verkleisterungsmaxima und der Finalviskositäten gegenüber den Contra-Mehlen beobachtet worden sind. Dies war auf einen verbesserten Wasserzugang und eine vollständigere Hydratisierung der Stärke zurückzuführen.

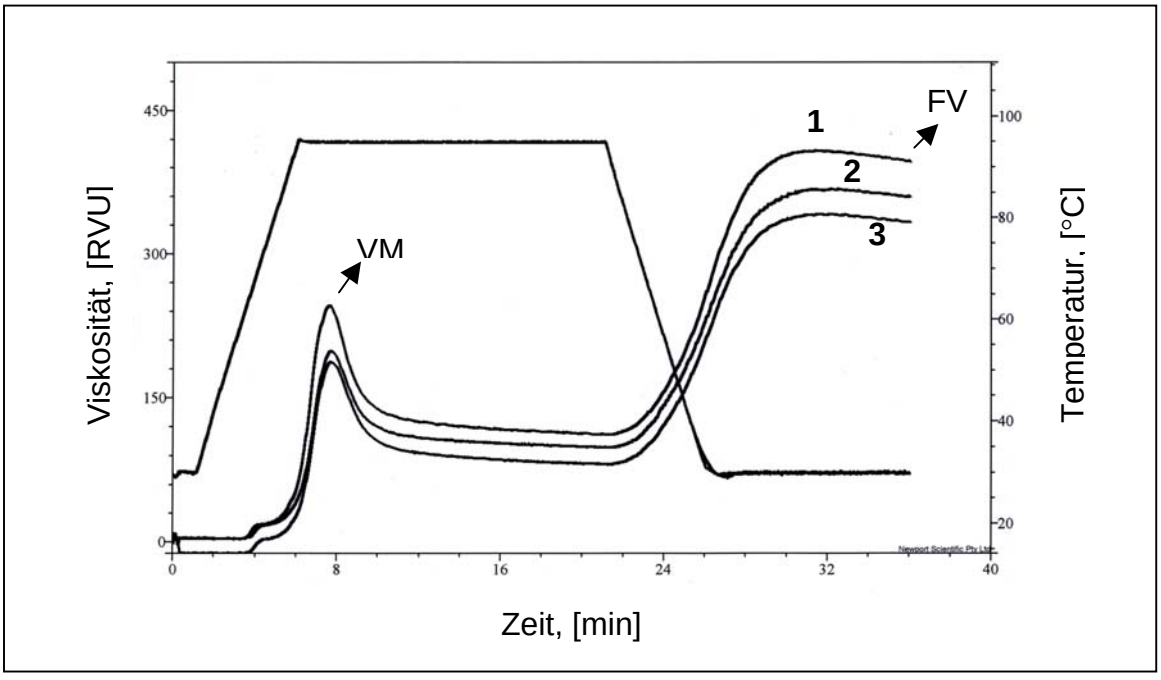


Abb. 44: Verkleisterungsmaximum (VM) und Finalviskosität (FV) der Stärke in Mehl bei der RVA-Untersuchung von Ausgangsmehl (1), ein- (2) und zweistufig (3) geprallten Mehlen der Sorte Tarso exemplarisch dargestellt für alle Sorten

Die Abbildung 44 zeigt orientierend drei RVA-Kurven vom Ausgangsmehl sowie von ein- und zweistufig geprallten Mehlen mit den deutlichsten Effekten. Eine ausgeprägte Prallbehandlung führte bei der RVA-Messung zu geringeren Verkleisterungsmaxima und Finalviskositäten (Kurven 2 und 3) als bei der nicht geprallten Mehlprobe (Kurve 1).

Beim einstufigen Prallen der Contra- und Tarso-Mehle hatte die Prallgeschwindigkeit nur eine Wirkung auf die Verkleisterungsmaxima und die Finalviskositäten. Eine steigende Prallgeschwindigkeit verursachte insgesamt eine Abnahme der Verkleisterungsmaximum- und Finalviskositäts- Werte (Abb. 45 und 46).

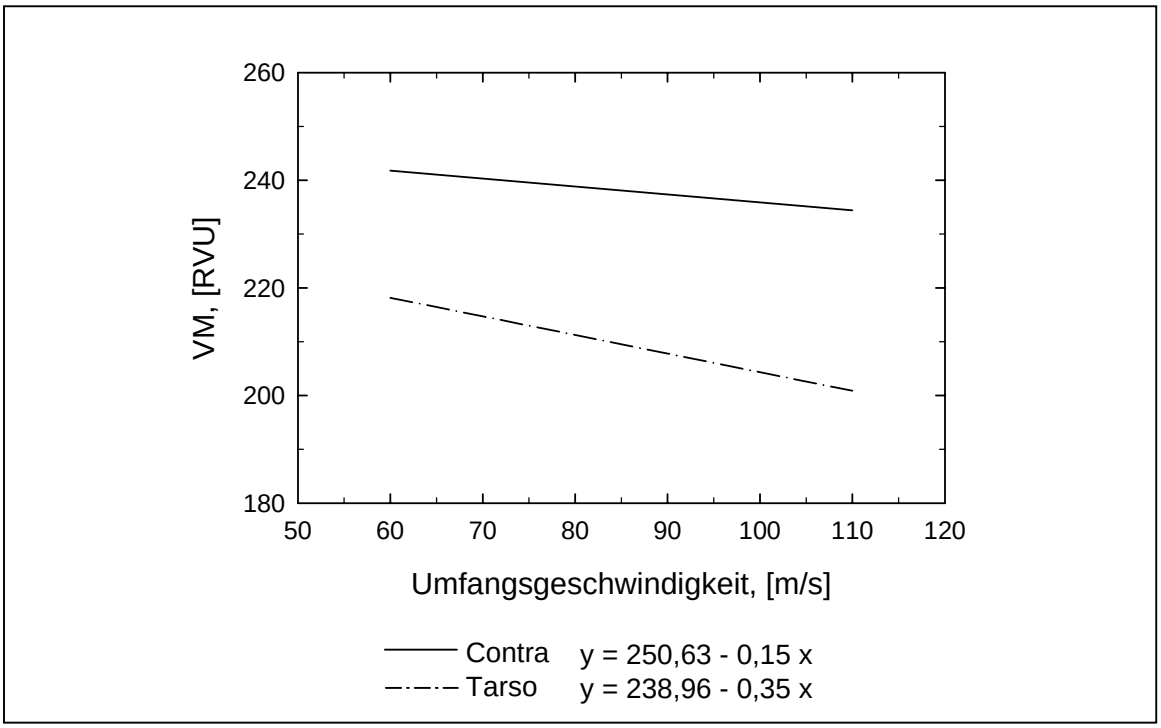


Abb. 45: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf das Verkleisterungsmaximum (VM) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

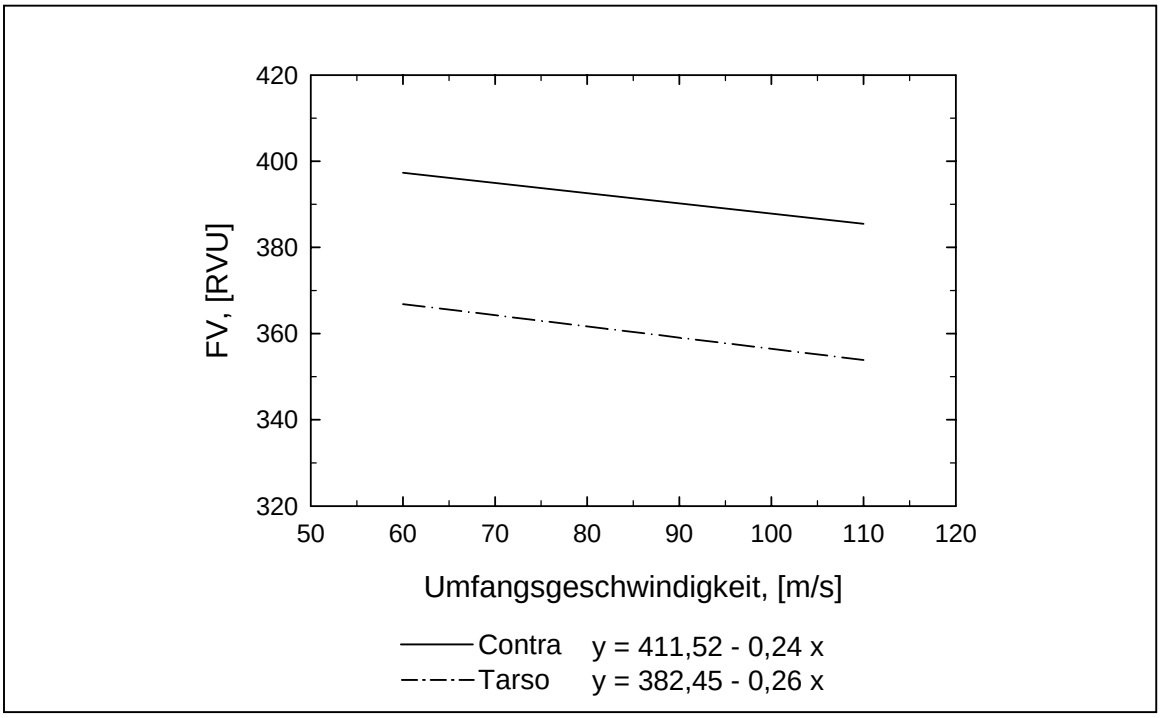


Abb. 46: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die Finalviskosität (FV) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Mit steigendem Feinheitsgrad, Stärkebeschädigungsgrad und Wasserbindevermögen nach dem einstufigen Prallen fielen die Verkleisterungsmaxima und die Finalviskositäten des Akratos-Prallmehles ebenfalls (Tab. 16, Anhang).

Allerdings war die Viskositätsabnahme bei den harten Weizensorten Tarso und Akratos stärker als bei der weichen Weizensorte Contra ausgeprägt. Ursache war die höhere Stärkebeschädigung mit dem höheren Wasserbindevermögen der Sorten Tarso und Akratos. Die Zunahme des Anteils beschädigter Stärke ermöglichte eine schnellere Angreifbarkeit der Stärke und damit ihren schnelleren Abbau durch die mehleigene Amylase.

Trotz der zunehmenden Feinheit, des zunehmenden Stärkebeschädigungsgrades und Wasserbindevermögens nach dem zweistufigen Prallen ergaben sich für die Contra-, Tarso- und Akratos-Mehle unwesentliche Veränderungen der Verkleisterungsmaxima und Finalviskositäten im Vergleich zur einstufigen Prallung. Die Unterschiede zwischen den Weizensorten blieben auch nach dem zweistufigen Prallen bestehen (Tab. 16, Anhang).

5.1.4.1.4 Desintegrationswärme der Stärke im Mehl

Mittels Differential Scanning Calorimetry (DSC) wurde thermoanalytisch die durch Prallwirkung mechanisch induzierte Stärkemodifikation in Mehl charakterisiert. Als Maß diente die beim Aufheizen abgerufene Auflösung der endothermen Desintegrationswärme (ΔQ) oder Enthalpie (ΔH), die in enger Relation zur Auflösung der in den Stärkekörnern vorhandenen geordneten Strukturen in Form der Stärkekristallite steht.
Da die Untersuchungen vor und nach dem Prallvorgang durchgeführt wurden, ließ sich die Wirkung der mechanischen Modifizierung auf die Stärke darstellen.

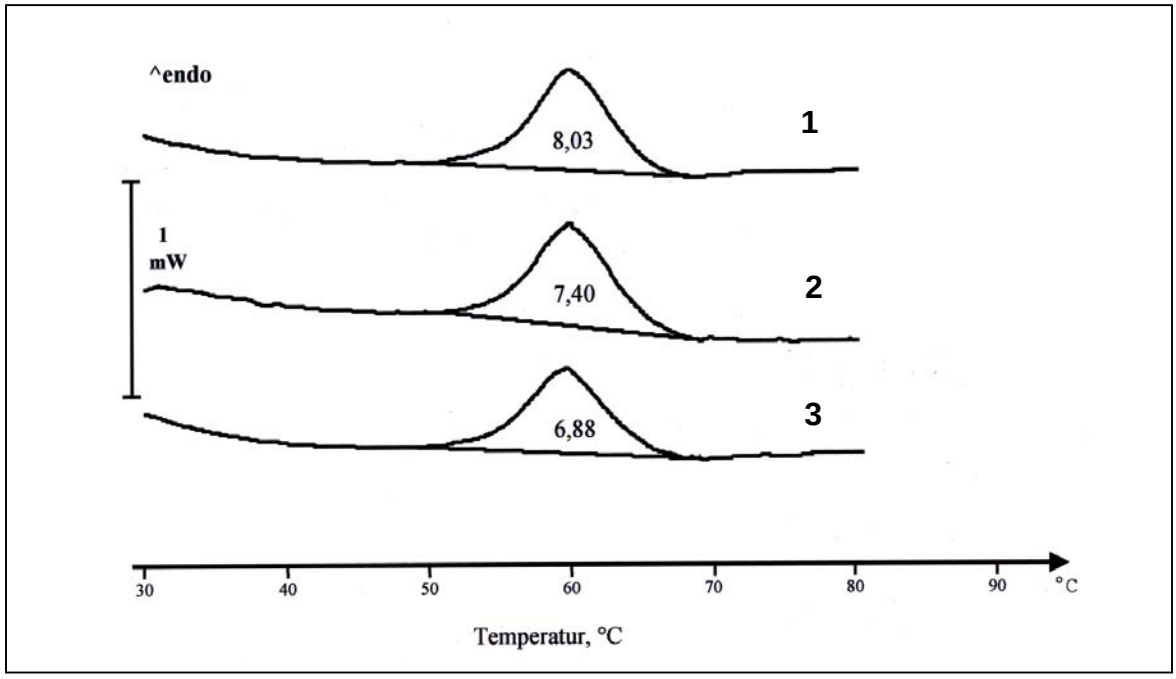


Abb. 47: DSC-Thermogramme vom Ausgangsmehl (1) und von ein- (2) und zweistufig (3) geprallten Mehlen der Sorte Tarso exemplarisch dargestellt für alle Sorten

Die Abbildung 47 zeigt beispielhafte DSC-Thermogramme vom Ausgangsmehl, sowie von ein- und zweistufig geprallten Mehlen mit ausgeprägten Effekten. Die Fläche unter der Kurve, die bei etwa 50°C beginnt, kennzeichnet die Wärmemenge (ΔQ), die zur vollständigen Desintegration der übermolekularen Stärkestruktur beim Aufheizen der Mehl/ Wasser-Suspension abgerufen wurde. Eine Prallbehandlung führte bei der

DSC-Messung zu geringeren Wärmemengen (Kurven 2 und 3) als bei der nicht geprallte Mehlprobe (Kurve 1).

Die p-Werte der positiven Regressionskoeffizienten aus der varianzanalytischen Auswertung der Contra- und Tarso-Mehle zeigten, dass die Prallgeschwindigkeit und die Dosierung einen Einfluss auf die Umwandlungswärme beim einstufigen Prallen hatten (Tab. 22, Anhang). Während bei niedriger Umfangsgeschwindigkeit die Stärke unversehrt blieb (die Desintegrationswärme blieb auf hohem Niveau), bewirkte das einstufige Prallen mit hoher Umfangsgeschwindigkeit eine mechanische Modifikation der Stärke, je geringer die Dosierschnecken-Drehzahl war (Abb. 48).

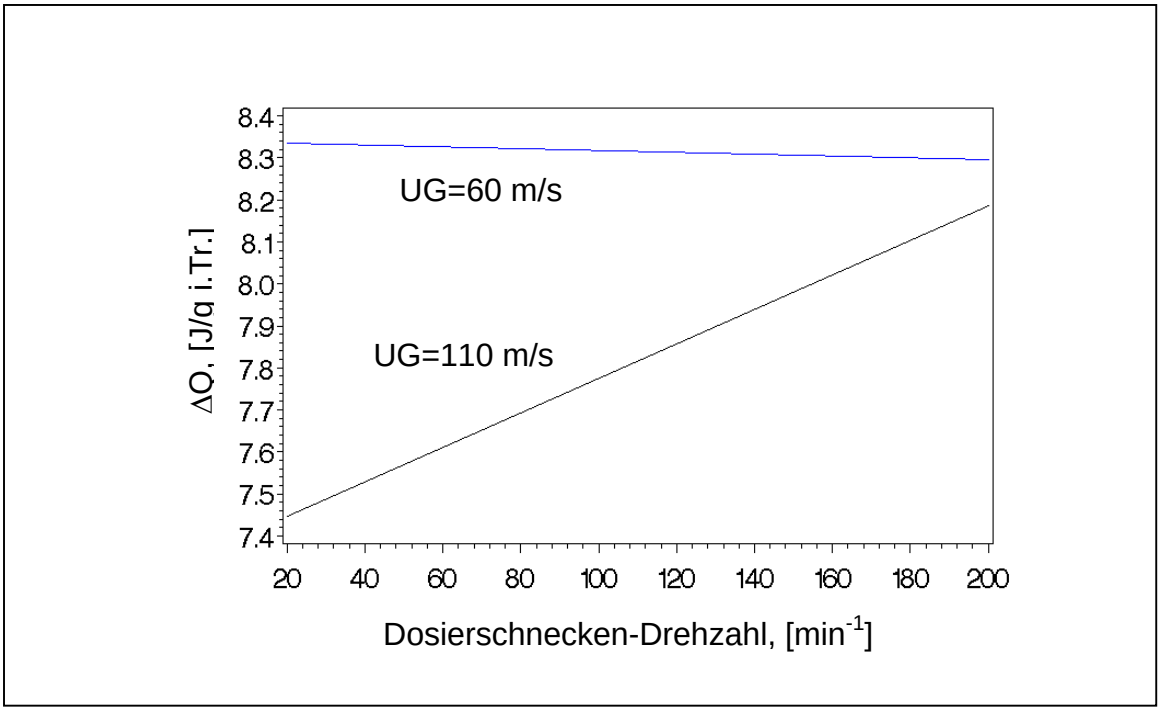


Abb. 48: Einfluss der Wechselwirkung zwischen der Umfangsgeschwindigkeit (UG) und der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Desintegrationswärme der Stärke (ΔQ) im Mehl der Weizensorten Contra und Tarso beim einstufigen Prallen

Im Sortenvergleich wiesen die Prallmehle der weich strukturierten Sorte Contra höhere Werte der Umwandlungswärme der Stärke auf (gleichbedeutend mit höherer Strukturintegrität) im Vergleich zu den Prallmehlen der hart strukturierten Sorte Tarso, die partiell ihre übermolekulare Struktur während der mechanischen Beanspruchung verloren haben (Abb. 49).

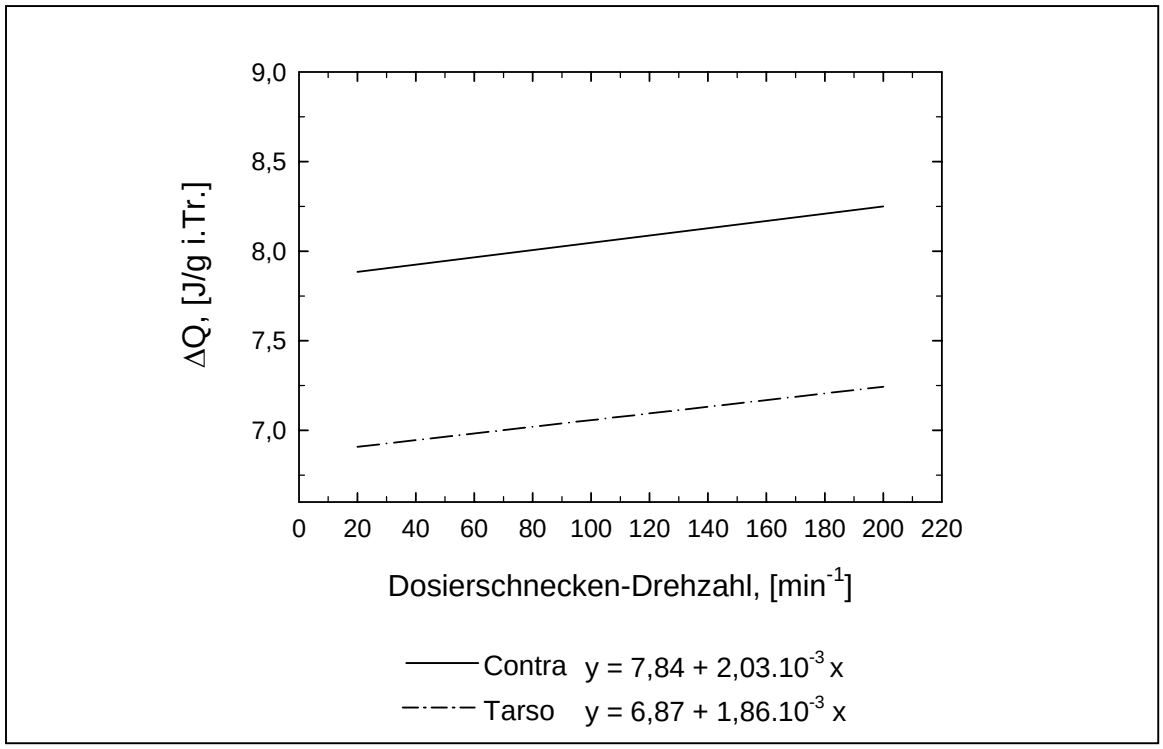


Abb. 49: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Desintegrationswärme der Stärke (ΔQ) im Mehl der Weizensorten Contra und Tarso beim einstufigen Prallen

Die Weizensorte Akratos zeigte nach dem einstufigen Prallen ebenfalls eine leichte Abnahme der Umwandlungswärme der Stärke auf 7,31 J/g gegenüber dem Ausgangsmehl (7,41 J/g).

Beim zweistufigen Prallen fielen die ΔQ-Werte wie beim einstufigen Prallen mit zunehmender Prallzerkleinerungsintensität, was die durchgeführte statistische Auswertung auch bestätigt. Die p-Werte der Regressionskoeffizienten wiesen nach der zweistufigen Prallung der Contra- und Tarso- Mehle einen signifikanten Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl und der Sichtrad-Drehzahl auf (Tab. 22, Anhang). Mit abnehmender Dosierschnecken- und Sichtrad-Drehzahl sank die thermoanalytisch erfasste Umwandlungswärme der Contra- und Tarso- Mehle.

Aufgrund des bedeutend höheren Stärkebeschädigungsgrades der Akratos-Mehle nach dem zweistufigen Prallen, wurde diese Abnahme der Umwandlungswärme-Werte auch bei höherer Dosierung erreicht, unabhängig von der Sichtrad-Drehzahl (Abb. 50 und 51).

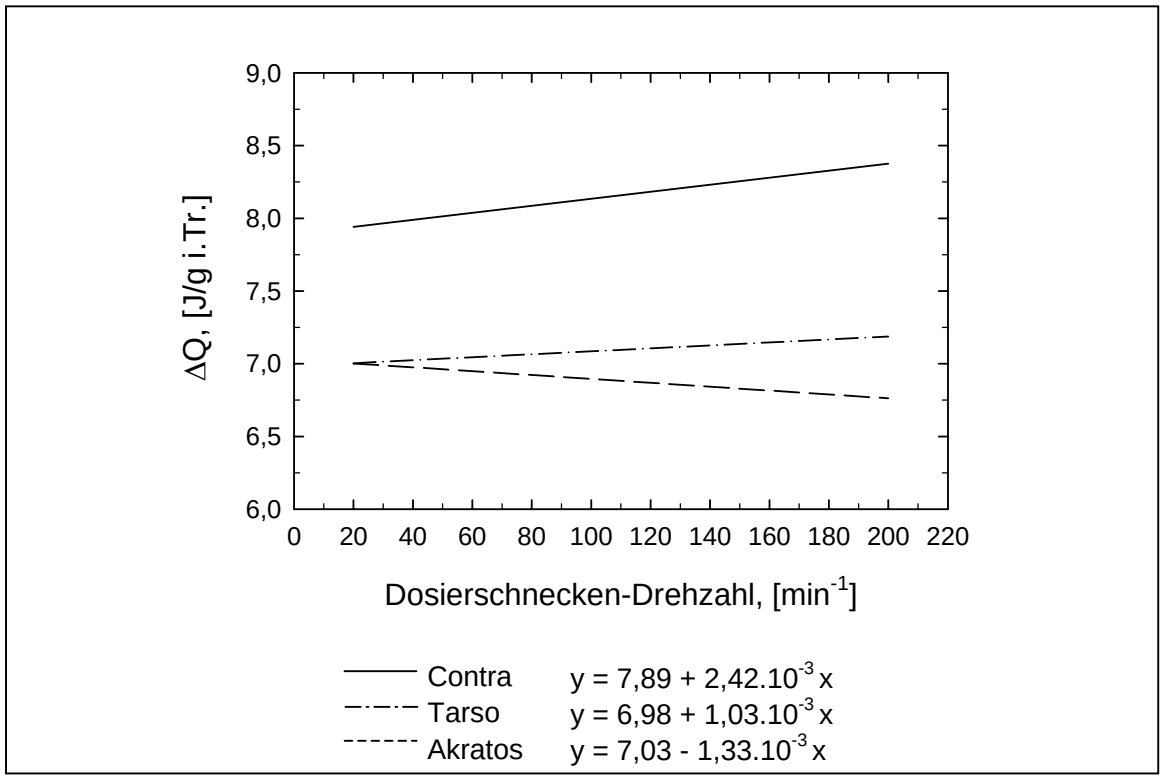


Abb. 50: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Desintegrationswärme der Stärke (ΔQ) im Mehl der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos beim zweistufigen Prallen

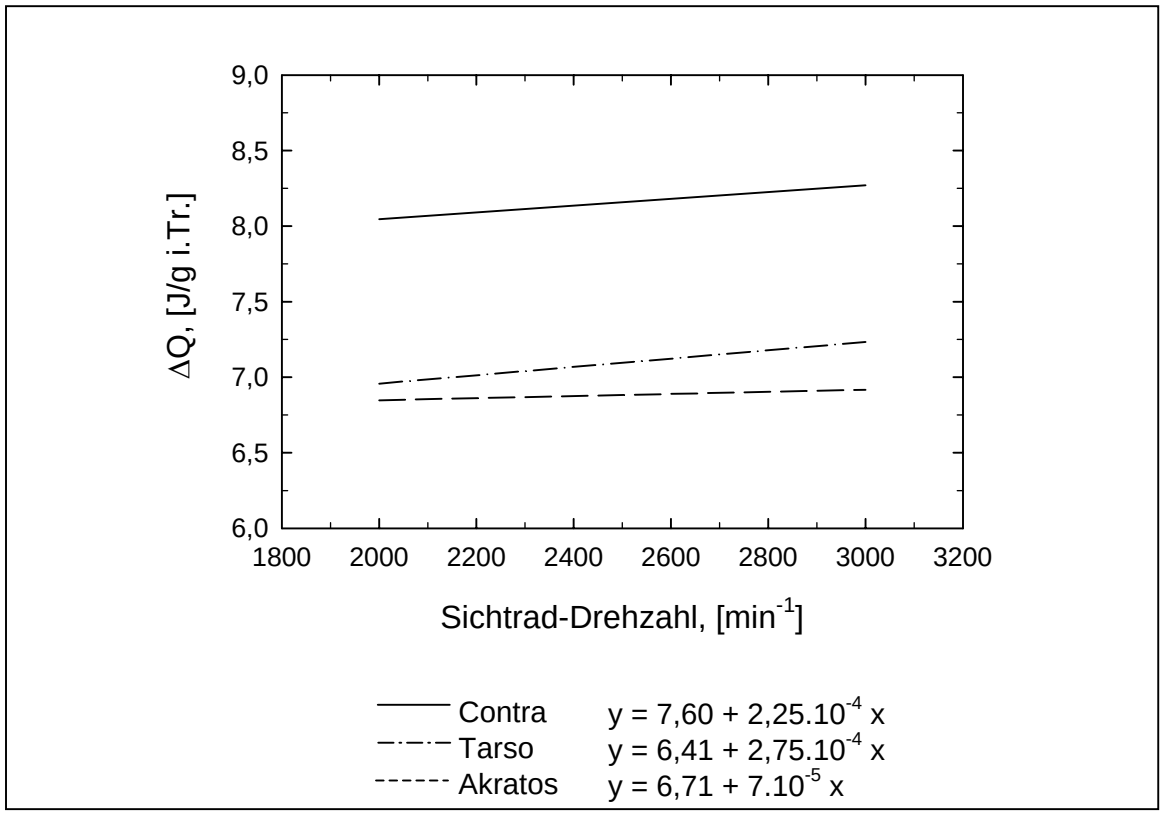


Abb. 51: Einfluss der Sichtrad-Drehzahl auf die Desintegrationswärme der Stärke (ΔQ) im Mehl der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos beim zweistufigen Prallen

Die Contra-Mehle zeigten insgesamt höhere Werte als die Tarso- und Akratos- Mehle, was vornehmlich auf dem Stärkegehalt beruht (Contra hatte höhere Werte) und von der geringeren mechanischen Stärkemodifizierung abhängig war.

5.1.4.2 Eigenschaften und Qualität des Glutens der Prallmehle

5.1.4.2.1 Feuchtglutengehalt

Insgesamt war der Kleber nach dem ein- und zweistufigen Prallen schlecht auswaschbar, besonders bei den harten Sorten Tarso und Akratos. Ähnliche Effekte wurden auch von Meuser u. Klingler (1979) beschrieben.

Die statistische Auswertung der Daten vom einstufigen Prallen der Weizensorten Contra und Tarso zeigte erwartungsgemäß Veränderungen des Feuchtglutengehaltes in erster Linie in Abhängigkeit von der Weizensorte (Tab. 22, Anhang). Infolge des höheren Proteingehaltes im Walzenmehl der Weizensorte Tarso wiesen die Prallmehle dieser Sorte insgesamt auch höhere Gehalte an Kleber gegenüber den Prallmehlen der Sorte Contra auf. Eine Interaktion zwischen der Weizensorte und der Prallgeschwindigkeit zeigte aber Verschiebungen der Feuchtglutengehalte innerhalb einer Sorte in Abhängigkeit von der Intensität der Prallgeschwindigkeit (Abb. 52).

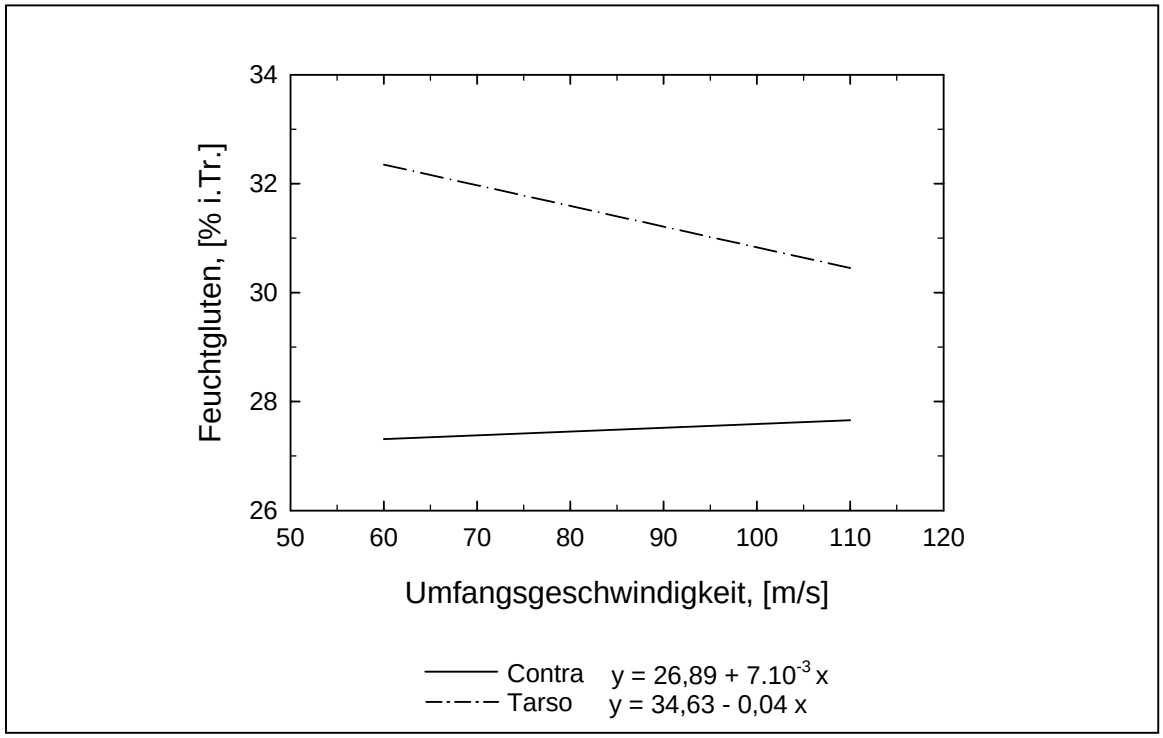


Abb. 52: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf den Feuchtglutengehalt der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Die zunehmende Prallgeschwindigkeit bewirkte einen leichten Anstieg des Feuchtglutens der Sorte Contra um etwa 1 % gegenüber dem Walzenmehl. Auf den Feuchtglutengehalt der Sorte Tarso hatte die Prallgeschwindigkeit einen negativen Einfluss, es wurde eine leichte Abnahme des Klebergehaltes um etwa 2 % festgestellt. Trotzt der geringen Abnahme zeigte der Feuchtglutengehalt des Akratos- Mehles nach dem einstufigen Prallen keine wesentliche Veränderung (Tab. 17, Anhang). Beim zweistufigen Prallen der Sorten Contra, Tarso und Akratos wurde ebenfalls ein Einfluss der Prallgeschwindigkeit auf den Feuchtglutengehalt beobachtet (Abb. 53). Die Feuchtglutengehalte der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorte Contra wiesen einen weiteren Anstieg von etwa 3-4 % im Vergleich zu den einstufig geprallten Mehlen auf. Dagegen zeigten die Feuchtglutengehalte der Mehle der hart strukturierten Weizensorten Tarso und Akratos eine Abnahme von etwa 1-2%.

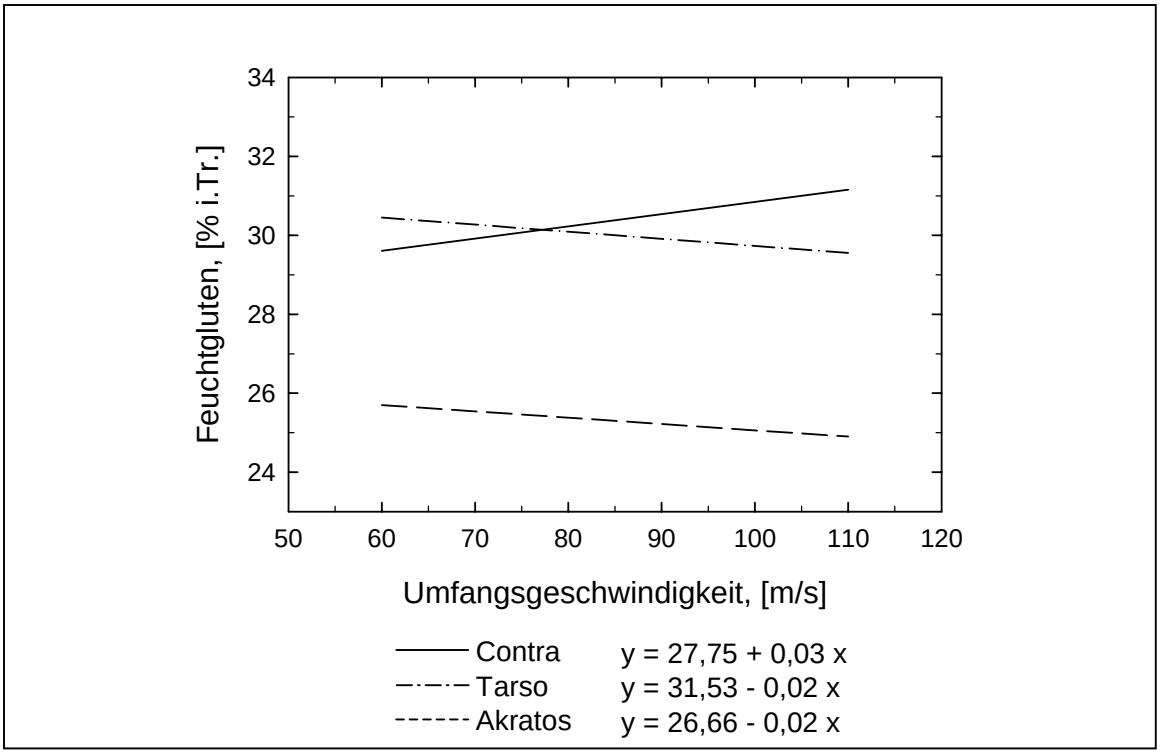


Abb. 53: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf den Feuchtglutengehalt der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos

Ursache für die Abnahme der Feuchtglutengehalte der ein- und zweistufig geprallten Mehle der härteren Sorten Tarso und Akratos könnten Verluste während der Kleber-

auswaschung sein. Die Konsistenz des Teiges im Initialstadium der Kleberbildung ist für den nachfolgenden Auswaschprozess nicht optimal. Dies ist daran zu erkennen, dass der Teig am Anfang stark bröcklig und fest ist .

Die durch die Prallwirkung verursachte mechanische Beschädigung der Stärke, ergab eine erhöhte Wasseraufnahme der Stärke (hohe Wasserbindung der Stärke). Da im Stadium der Teigbildung Stärke und Kleber in Konkurrenz zum Wasser stehen, hat der Kleber nicht die Wassermenge erhalten, die er zur optimalen Strukturbildung benötigt. Bei einer nicht optimalen Kleberstruktur, z.B. mangelnde Kohesivität, führt das Auswaschen der Stärke gleichzeitig zu einem unerwünschten Verlust des kleberbildenden Proteins. Dieser Nachteil kann bei der Klebergewinnung nach dem Glutomaticverfahren nicht ausgeglichen werden; die Metallsiebe lassen einen Teil des Klebers passieren. Demzufolge ergeben sich Kleberverluste.

Unter dem Einfluss der Prallwirkung werden keine guten Kleberauswaschbedingungen erreicht (die Knetarme findet keinen Ansatz, um die Knetwirkung wie sonst durchzuführen) . Die optimale Kleberbildung tritt unter diesen Umständen erst später auf, wenn bereits der Auswaschvorgang begonnen hat, daher die Verluste.

Ähnliche Ergebnisse sind in der Literatur zu finden. Es wurde von Nierle u. Kersting (1999) festgestellt, dass Weizenmehle mit harter Kornstruktur sowie deren Fraktionen im Vergleich zu Mehlen mit weicher Kornstruktur einen höheren Massenverlust bei der Aufbereitung aufweisen.

Eine thermische Schädigung des Proteins war aufgrund des geringen Feuchtigkeitsgehaltes der Mehle und der kurzen Verweildauer auszuschließen. Eine Temperaturschädigung des Glutens kann bei Vermahlungen erst ab einer Mehlfeuchtigkeit von 20 % und bei langen Vermahlungszeiten von über 1 h erwartet werden (Weegels et al., 1994).

5.1.4.2.2 Sedimentationswert

Für die Beurteilung der Proteinqualität bei Weizen wird allgemein der Sedimentationswert herausgezogen, wobei hier neben der Flockung der kleberbildenden Komponenten ebenfalls das Quellverhalten eine Rolle spielt. Der Proteinkomplex im Weizen wird qualitativ durch müllereitechnologische Maßnahmen, z.B. Prallung und Windsichtung verändert.

Aufgrund der höheren Protein- und Feuchtglutengehalte und der höheren Stärkebeschädigungsgrade sedimentierten die Mehle der härteren Weizensorte Tarso zu höheren Werten als die Mehle der weicheren Weizensorte Contra.

Neben der Weizensorte hatte die Dosierung einen Einfluss auf das Sedimentationsverhalten der Contra- und Tarso- Mehle vom einstufigen Prallen (Abb. 54). Eine niedrigere Dosierung ergab eine höhere Zerkleinerungswirkung mit höherer Stärkebeschädigung. Demzufolge wurde die Mehlkörperstruktur intensiver aufgelöst und mehr Zwickelprotein freigelegt, bei gleichzeitig zunehmender Partikelfeinheit. So führte die niedrigere Dosierung zu höheren Sedimentationswerten der Prallmehle.

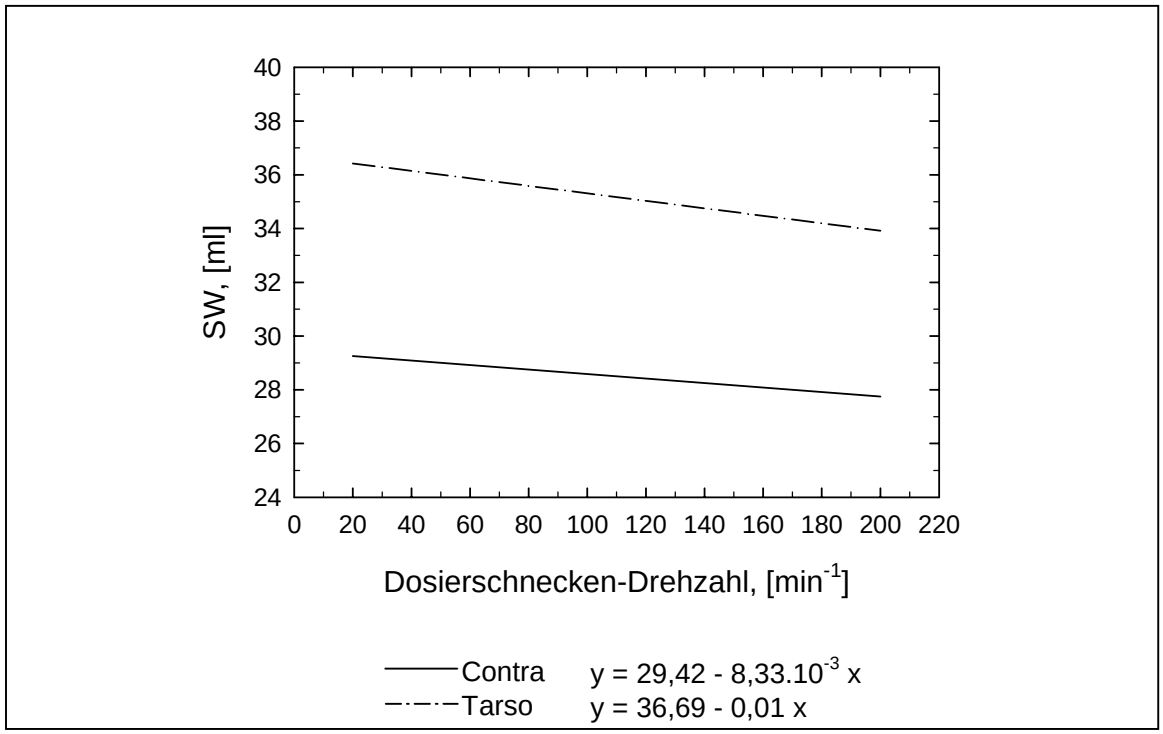


Abb. 54: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf den Sedimentationswert (SW) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Trotz des niedrigen Protein- und Feuchtglutengehaltes wiesen die Akratos-Mehle, ähnlich wie die Tarso-Mehle hohe Sedimentationswerte auf. Als Ursache konnte der höhere Stärkebeschädigungsgrad ebenfalls genannt werden. Nach dem einstufigen Prallen des Akratos-Mehles wurde eine Zunahme des Sedimentationswertes um 2 ml festgestellt (Tab. 17, Anhang).

Obwohl der Sedimentationstest als Methode für die Beurteilung der Proteinqualität gilt, kam in den Ergebnissen der Einfluss der Partikelfeinheit zum Ausdruck. Dies spielte offenbar eine wesentliche Rolle für das Quell- bzw. Aggregationsverhalten eines Mehles. Durch die steigende mechanische Beanspruchung des Mehles mit zunehmendem Energieeintrag beim Prallen wurde das Kleberquellvermögen verbessert. Dabei konnten auch die Quelleigenschaften der Stärkekomponenten des Mehles beim Sedimentationsvorgang Einfluss nehmen. Das war kennzeichnend dafür, dass der Sedimentationstest nicht nur durch die Funktionalität des kleberbildenden Proteins, sondern auch durch die Eigenschaften der Stärke beeinflusst wurde.

Demzufolge zeigten trotz vergleichbarer Feuchtglutengehalte und Kleberqualitäten die Mehle der Sorten Contra und Tarso nach dem zweistufigen Prallen weizensortenabhängige Sedimentationswert-Unterschiede. Die Sedimentationswerte der Contra-, Tarso- und Akratos-Mehle wiesen mit steigender Intensität der Prallbehandlung beim zweistufigen Prallen erwartungsgemäß eine weitere Zunahme im Vergleich zu den Walzenmehlen und den einstufig geprallten Mehlen auf (Tab. 17, Anhang). Dabei erreichten die Tarso- und Akratos-Mehle eine enorme Erhöhung von über 40 ml gegenüber den Prallmehlen der Weizensorte Contra (33-36 ml). Hier spielten die Quelleigenschaften der Stärkekomponenten auch eine nicht zu unterschätzende Rolle. Die Ergebnisse aus der statistischen Auswertung nach dem zweistufigen Prallen zeigte den Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf der Sedimentation der Contra-, Tarso- und Akratos-Mehle (Abb. 55).

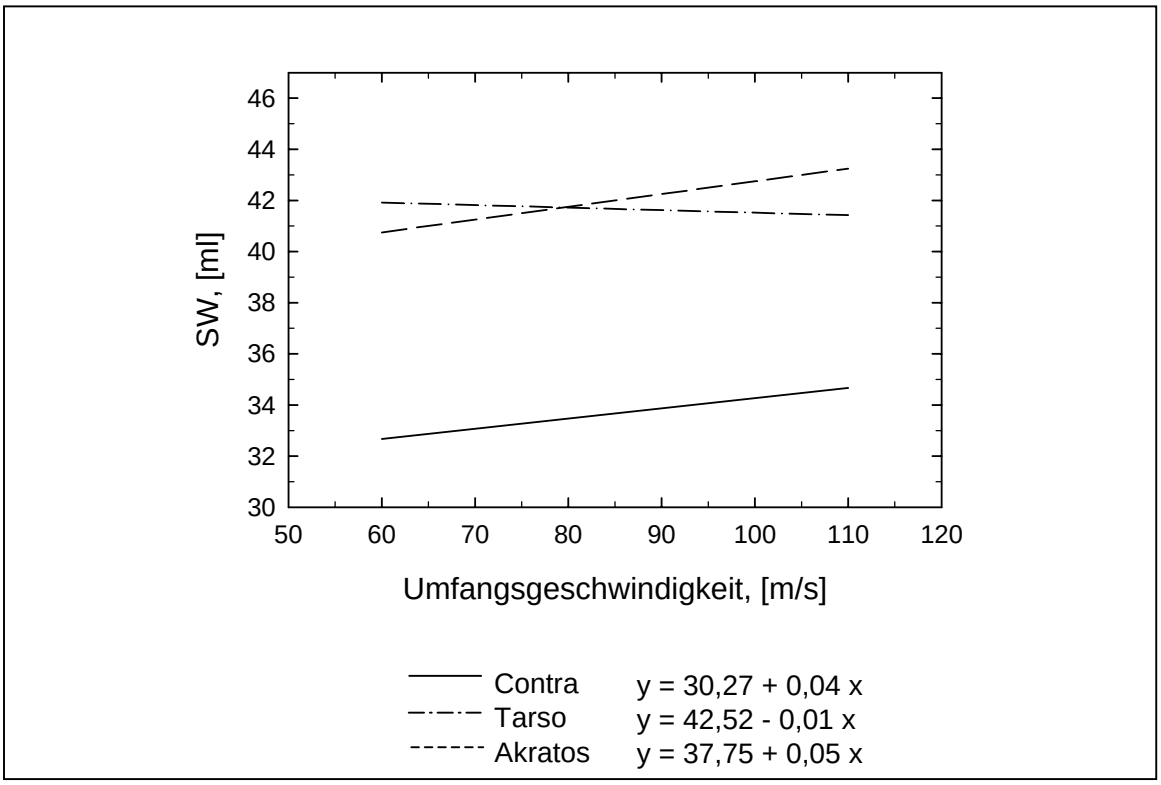


Abb. 55: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf den Sedimentationswert (SW) der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos

5.1.4.2.3 Viskoelastisches Verhalten von Gluten

Die technologisch bedeutendste Eigenschaft des Feuchtklebers ist seine viskoelastische Eigenschaft. Diese verleiht dem Kleber die Formbeständigkeit, speichert bei der mechanischen Beanspruchung (Vermahlen, Kneten, Auswaschen u.a.) die eingeleitete Energie und bewirkt die Reversibilität der Deformation (Weipert, 1988).

Mittels Kriech–Erholungsversuch wurde die max. Deformation (γ_{max}) des Klebers der Prallmehle bestimmt. Die gemessene max. Deformation charakterisierte die spezifischen Klebereigenschaften des Mehles, so dass auch Änderungen der elastischen Klebereigenschaften erfasst wurden.

Die maximale Deformation des Klebers verringerte sich bei den untersuchten Mehlen von den Walzenmehlen bis zu den zweistufig geprallten Mehlen mit Zunahme der Zerkleinerungsintensität und war von der Weizensorte abhängig (Tab. 6).

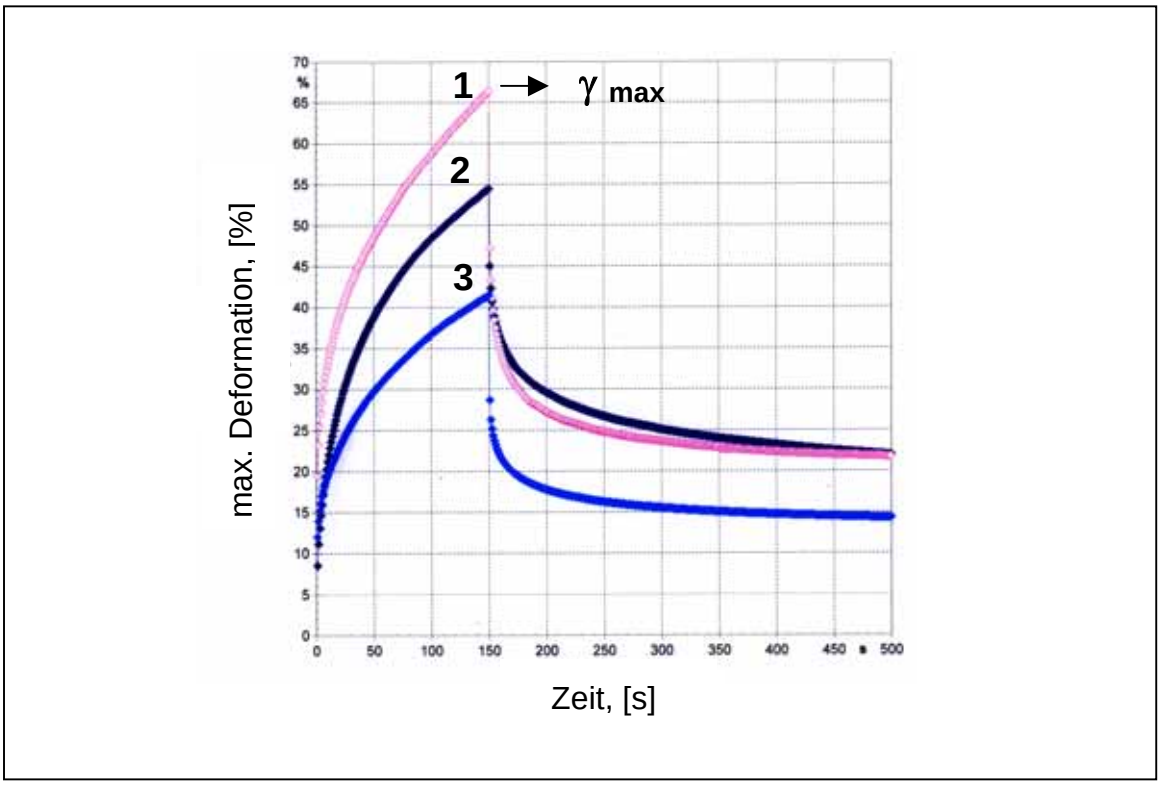


Abb. 56: Maximale Deformation (γ_{max}) des Klebers von Ausgangsmehl (1), ein- (2) und zweistufig (3) geprallten Mehlen der Sorte Tarso exemplarisch dargestellt für alle Sorten

Die Abbildung 56 zeigt drei Beispielkurven der gemessenen maximalen Deformation vom Ausgangsmehl sowie von ein- und zweistufig geprallten Mehlen. Eine ausgeprägte ein- und zweistufige Prallbehandlung führte bei der Kriech-Erholungsmessung zu niedrigeren γ_{max}-Werten (Kurven 2 und 3), d.h. es war mit der Prallintensität eine Verfestigung des Klebers gegenüber der nicht geprallten Mehlprobe (Kurve 1) eingetreten.

Der Kleber der einstufig geprallten Mehle der Weizensorte Contra zeigte eine höhere Deformation im Vergleich zu den Weizensorten Tarso und Akratos. Die Verminderung der Deformationswerte des Klebers der Sorte Contra durch das Prallen im Vergleich zum Ausgangsmehl bedeutet eine Verfestigung des Glutens und weis damit auf eine wesentliche Verbesserung der Kleberaggregationseigenschaften hin. Dagegen hatte das Prallen der Tarso-Mehle geringeren Einfluss auf eine Veränderung der maximalen Deformation des Glutens. Aus den durchgeführten statistischen Untersuchungen nach dem einstufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso waren keine

signifikanten Einflüsse der Maschinenparameter zu erkennen. Allerdings wurde nach dem einstufigen Prallen des Akratos-Mehles eine leichte Abnahme der maximalen Deformation, d.h. Kleberverfestigung, festgestellt.

Die zweistufig geprallten Mehle der Weizensorte Contra wiesen, analog zu ihren Feuchtglutengehalten, eine Veränderung der Glutenqualität auf, sie zeigten eine weitere Senkung der Werte der maximalen Deformation. Dies bedeutet eine weitere Kleberverfestigung im Vergleich zum Ausgangsmehl und zum einstufig geprallten Mehl (Tab. 6).

Die Kleberqualität der Mehle der Weizensorte Tarso veränderte sich nach dem zweistufigen Prallen weniger, d.h. es wurde eine geringe Abnahme der maximalen Deformation festgestellt. Die Annäherung der Deformationswerte des Contra– Mehles an die des Tarso–Mehles durch das zweistufige Prallen deutet auf eine Annäherung der Gluteneigenschaften hin.

Nach dem zweistufigen Prallen des Akratos-Mehles wurde ebenso eine weitere Senkung der Deformationswerte und damit eine Verfestigung des Glutens beobachtet.

Tab. 6: Maximale Deformation (γ_{max}) des Klebers von Ausgangsmehlen, ein- und zweistufig geprallten Mehlen der Sorten Contra, Tarso und Akratos

Prallen der Sorten Contra und Tarso			**Prallen der Sorte Akratos**	
Sorte/ VNummer	einstufig	zweistufig	Sorte/ VNummer	γ_{max}
	γ_{max}	γ_{max}		
C 1	0,670	0,637	A 1	0,236
T 2	0,586	0,542	A 2	0,238
T 3	0,888	0,432	A 3	0,262
C 4	0,820	0,588	A 4	0,257
T 5	0,613	0,475	A 5	0,241
C 6	0,620	0,532	A(EM)	0,358
C 7	0,844	0,622	A(AM)	0,459
T 8	0,632	0,653		
C 9	1,670	0,767		
C 10	1,690	0,764		
T 11	0,681	0,669		
T 12	0,581	0,608		
C(EM)	-	1,796		
T(EM)	-	0,668		
C(AM)	1,880	1,776		
T(AM)	0,671	0,670		

Die statistischen Untersuchungen nach dem zweistufigen Prallen der Sorten Contra, Tarso und Akratos zeigten keine signifikanten Maschineneinflussvariablen, die Wirkung auf die Veränderungen der maximalen Deformation des Klebers hatten.

Die elastischen Eigenschaften des Glutens werden hauptsächlich den Wechselwirkungen zwischen hochmolekularen Gluteninketten zugeordnet. Die rheologischen Eigenschaften des Weizenklebers hängen u.a. vom Aggregationszustand der Gluteninfraktion ab, der durch Reduktions- und Oxidationsmittel beeinflussbar ist. Es wurde von Belitz et al. (1989) festgestellt, dass Oxidationsmittel wie z.B. Luft eine Aggregation bewirken und zur Kleberverfestigung führen. Die beteiligten Proteine liegen im Weizenendosperm im reduzierten, nichtaggregierten Zustand vor, die erst durch Vermahlen und Kneten durch Einwirkung des Luftsauerstoffs unter Ausbildung von inter- und/oder intramolekularen Disulfidbrücken zu sehr hochmolekularen Proteinen polymerisiert und/oder aggregiert werden. Auch Nierle u. Kersting (1997) berichten, dass durch Prallung der Gehalt an HMW-Gluteninen erhöht wird.

Disulfidbindungen spielen eine wesentliche Rolle im Aufbau des dreidimensionalen Klebernetzwerkes und beeinflussen wiederum die rheologischen Eigenschaften des Weizenglutens. Als Ursache für die Wirkung von Oxidationsmitteln, die die Teigbeschaffenheiten deutlich verändern können, werden Änderungen in der Thiol-/ Disulfid-Struktur der Kleberproteine gesehen (Antes u. Wieser, 2000).

Mit zunehmendem Energieeintrag beim Prallen nimmt die Löslichkeit der hochmolekularen Glutenine ab. Diese Abnahme wird auf eine Agglomeration der Proteine zurückgeführt, die mit einer Oxydation von SH-Gruppen bei der Prallvermahlung in Gegenwart von Luftsauerstoff erklärt wird (Delgado, 1995). Eine Abnahme der Löslichkeit ist auf die Bildung von Proteinaggregaten zurückzuführen. An der Bildung großer Molekülaggregate können auch Wasserstoffbrückenbindungen und van der Waalssche Bindungen beteiligt sein (Greene u. Kasarda, 1971).

5.1.4.3 Rheologische Eigenschaften der Teige

5.1.4.3.1 Farinogramme der Prallmehle

Die Kneteigenschaften sind ein wichtiges Kriterium für die Qualität eines Weizenmehles. Da die höhere Zerkleinerungsenergie auf die Mehlstruktur Einfluss hatte und damit auch auf die funktionellen Eigenschaften der Mehlkomponenten, wurden die Kneteigenschaften der Mehle im Farinographen untersucht.

Die Wasseraufnahme eines Mehles wurde wesentlich durch seine Inhaltsstoffe Protein und beschädigte Stärke bestimmt. Auch die Partikelfeinheit hatte dabei eine Wirkung. Bei konstantem Gehalt an Weizenprotein kann die Wasseraufnahme über eine Steigerung des Anteils an beschädigter Stärke erhöht werden. Die Wasseraufnahme korreliert mit der Stärkebeschädigung positiv. Es gibt jedoch Hinweise, dass je nach Mahlverfahren und Weizensorte die Wasseraufnahme unterschiedlich sein kann (Stevens u. Evers, 1983; Rogers et al., 1994; Morgan u. Williams, 1995).

Die Einflüsse, die durch den Vermahlungsvorgang auf die im Farinographen gemessenen Parameter (Wasseraufnahme, Teigentwicklungszeit, Teigstabilität und Teigerweichung) eines Mehles wirken, beschränken sich nicht allein auf die Stärkebeschädigung. Auch die Proteinkomponente kann verändert werden, z.B. durch oxidative Einflüsse. Andererseits ist auch eine Schädigung des Proteins durch Schereffekte denkbar (Handreck u. Pötschke, 1996).

Die Abbildungen 57, 58 und 59 zeigen beispielhaft Farinogramme von Ausgangsmehlen sowie von ein- und zweistufig geprallten Mehlen der Sorten Contra, Tarso und Akratos.

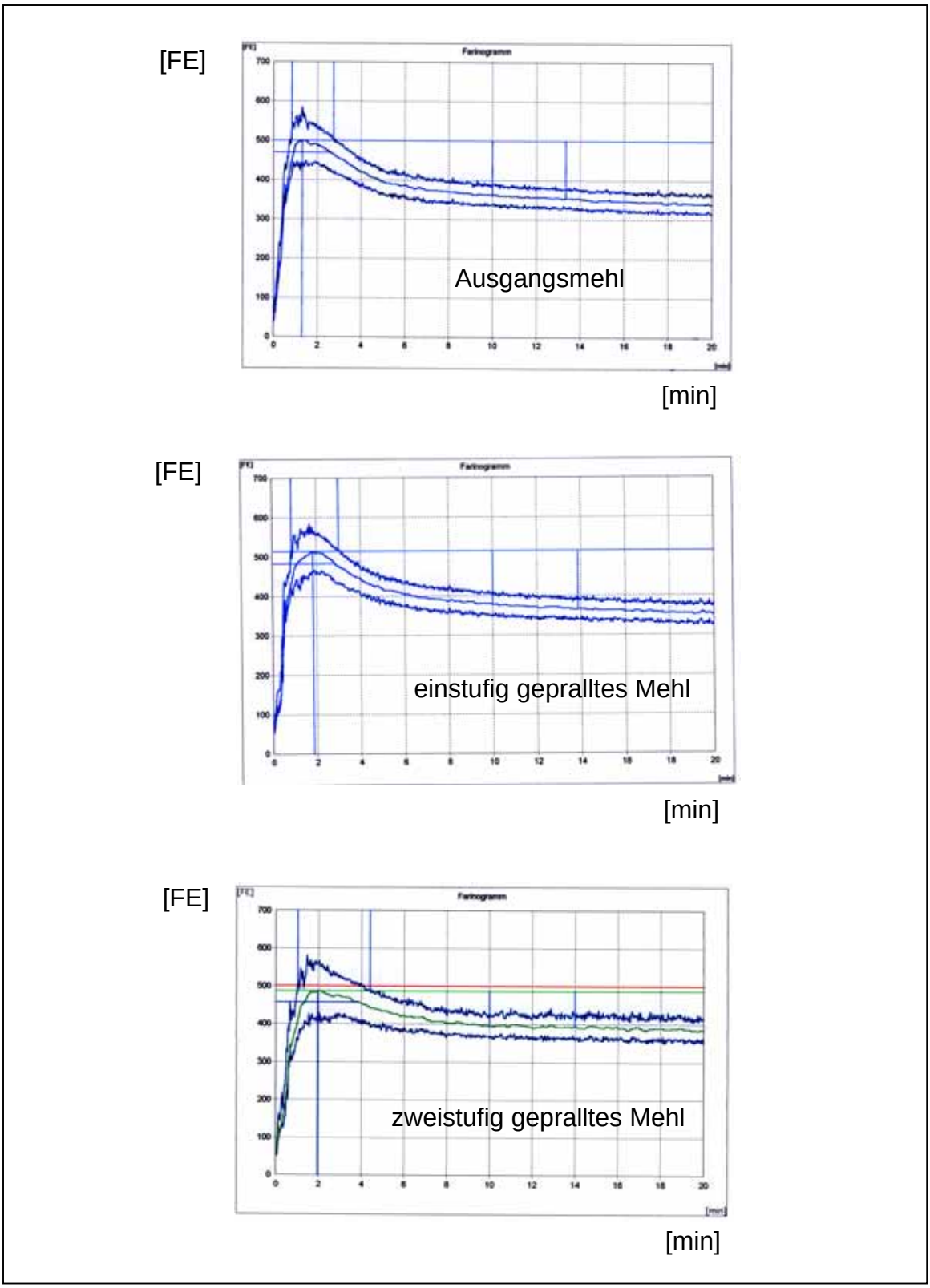


Abb. 57: Ausgewählte Farinogramme von Ausgangsmehl, ein- und zweistufig geprallten Mehlen der Sorte Contra

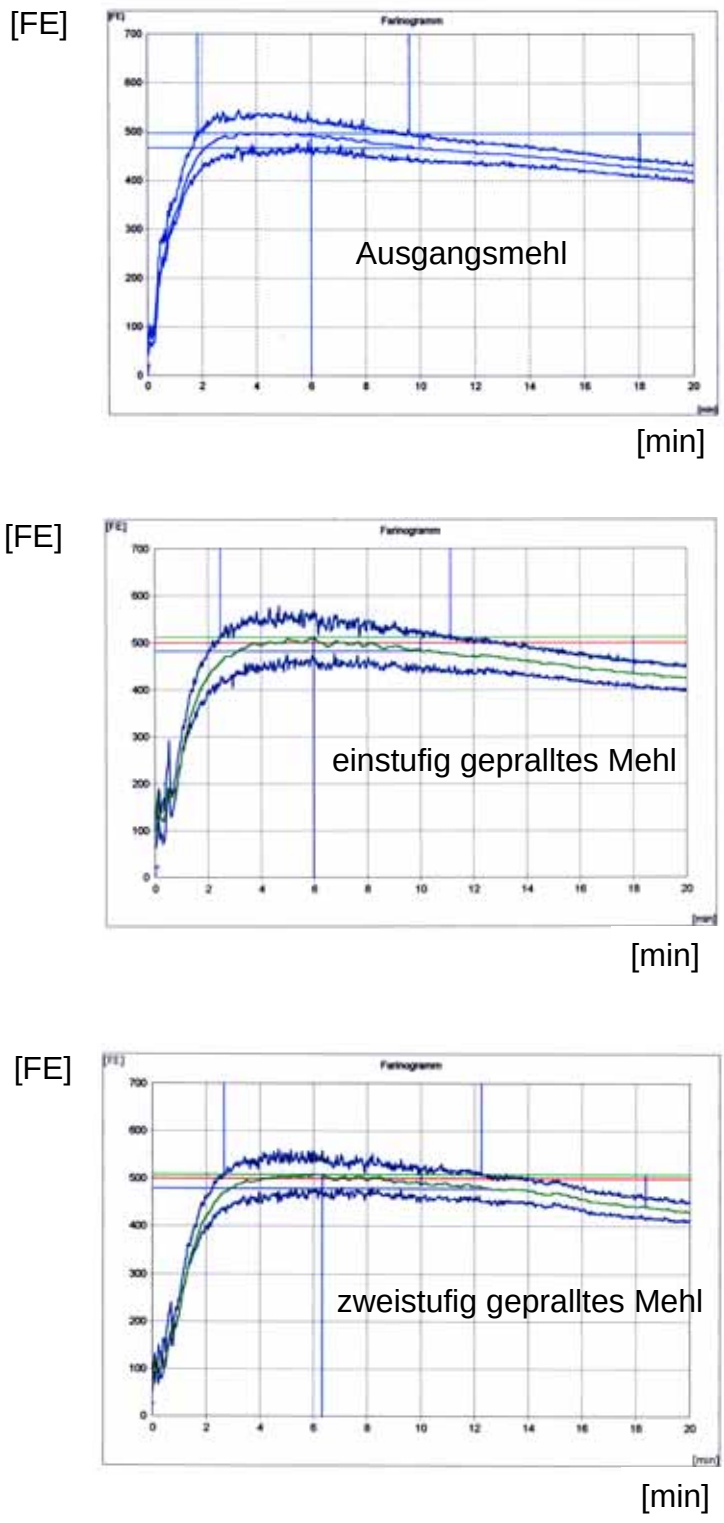


Abb. 58: Ausgewählte Farinogramme von Ausgangsmehl, ein- und zweistufig geprallten Mehlen der Sorte Tarso

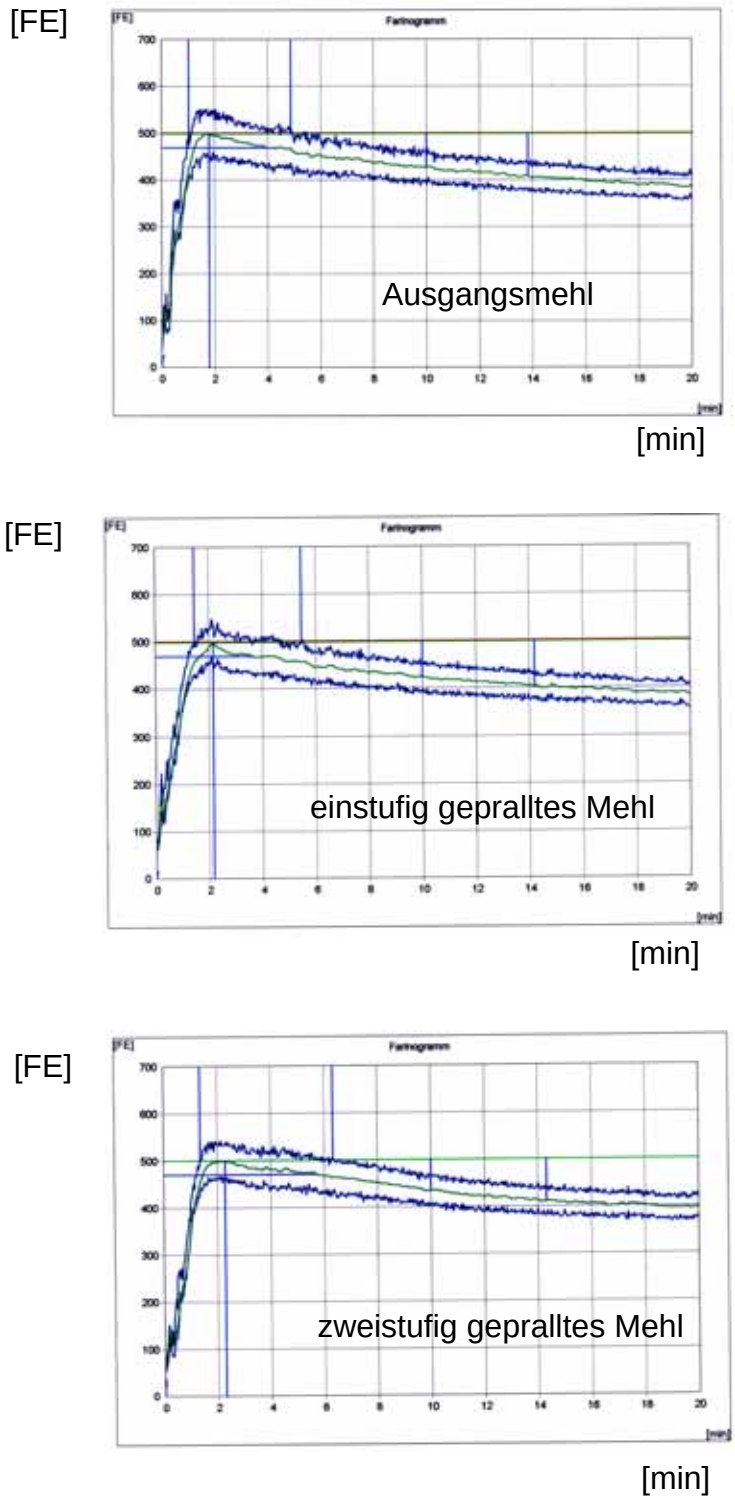


Abb. 59: Ausgewählte Farinogramme von Ausgangsmehl, ein- und zweistufig geprallten Mehlen der Sorte Akratos

Im Sortenvergleich deutete sich für die Sorte Contra parallel zu dem leichten Anstieg der Stärkebeschädigung nach dem einstufigen Prallen eine schwache Zunahme der Wasseraufnahme an. Aufgrund der wesentlich höheren Stärkebeschädigung gegenüber den Walzenmehlen wiesen die Prallmehle der Weizensorten Tarso und Akratos dagegen höhere Werte der Wasseraufnahme auf (Tab. 18, Anhang).

Die Teigentwicklungszeiten und die Teigstabilitäten bei der Sorte Tarso nach dem einstufigen Prallen wiesen insgesamt höhere Werte gegenüber den Sorten Contra und Akratos auf. Die Teigentwicklungszeiten und die Teigstabilitäten der Contra und Akratos-Mehle lagen nahe beieinander und zeigten eine leichte Zunahme im Vergleich zu den Ausgangsmehlen.

Interessant waren die Werte der Teigerweichung der einstufig geprallten Mehle. Insgesamt wurde bei allen drei Sorten eine Abnahme gegenüber den Walzenmehlen festgestellt. Haupteinfluss hier hatte wieder die Weizensorte. Die Ergebnisse zeigten niedrigere Werte der Teigerweichung bei den Weizensorten Tarso und Akratos im Vergleich zu der Weizensorte Contra (Tab. 18, Anhang).

Die Ergebnisse aus der durchgeführten statistischen Untersuchung nach dem einstufigen Prallen der Sorten Contra, Tarso und Akratos wiesen keine signifikanten Maschineneinflussvariablen auf, die Wirkung auf die Kneteigenschaften der Mehle haben.

Aus der statistisch ausgewerteten Wirkung der Einflussvariablen auf die Wasseraufnahme der Contra-, Tarso- und Akratos-Prallmehle nach dem zweistufigen Prallen wurde ein signifikanter Einfluss der Weizensorte und der Dosierschnecken-Drehzahl festgestellt (Tab. 22, Anhang). Die hohe Stärkebeschädigung war bei den Weizensorten Tarso und Akratos besonders ausgeprägt. Aus diesem Grund und wegen des höheren Proteingehaltes wiesen die Prallmehle dieser Sorten gegenüber der Sorte Contra höhere Werte der Wasseraufnahme auf.

Eine erhöhte Mehleinspeisung wirkte auf die Wasseraufnahme bei allen Sorten in negativer Richtung. Eine niedrigere Dosierung erhöhte dagegen die Stärkebeschädigung der Prallmehle und damit die Wasseraufnahme (Abb. 60).

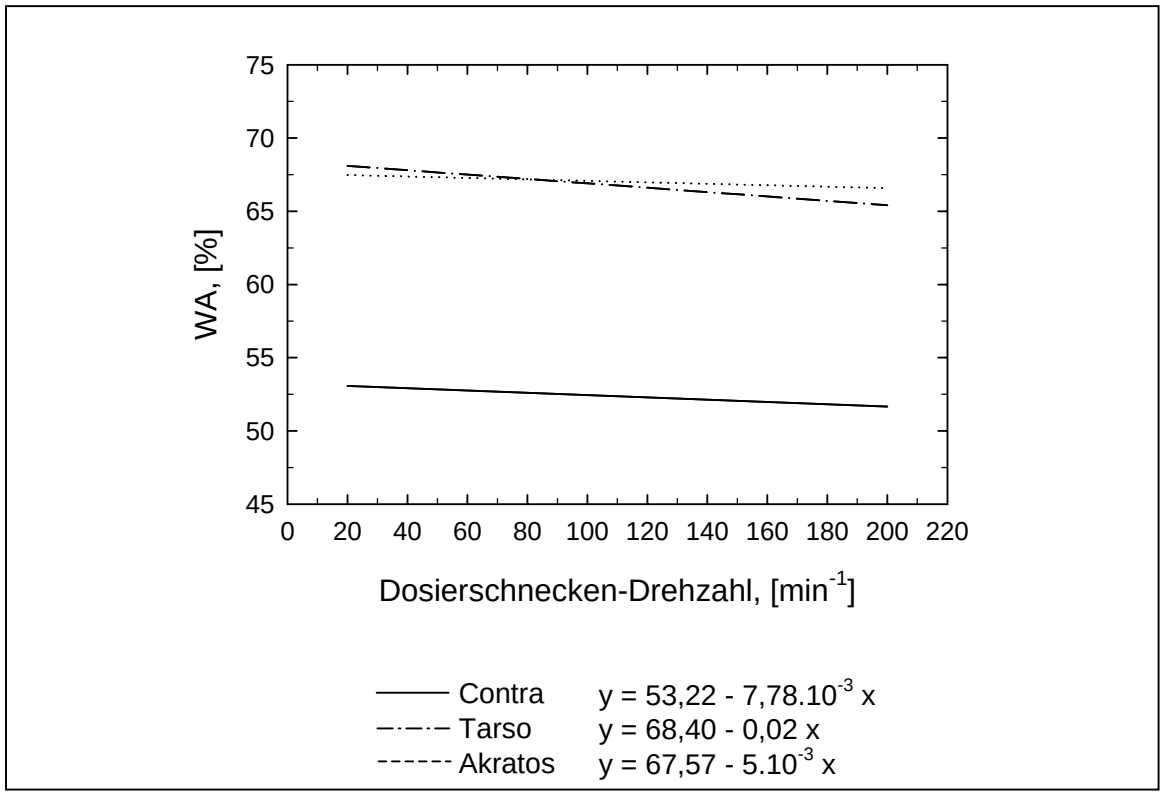


Abb. 60: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Wasseraufnahme (WA) der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos

Die Teigentwicklungszeit und die Teigstabilität unterlagen ebenfalls dem Sorteneinfluss. Die Sorte Tarso erreichte höhere Werte als die Sorte Contra (Tab. 18, Anhang). Die Weizensorte Akratos wies eine ähnliche Teigentwicklungszeit (ca. 2 min) wie die Sorte Contra auf. Die Teigstabilität des Akratos-Mehles (4 min) lag zwischen denen der Contra- und Tarso-Mehle. Die statistische Untersuchung nach dem zweistufigen Prallen der Sorten Contra, Tarso und Akratos zeigte keine signifikanten Maschineneinflussvariablen, die Wirkung auf die Teigentwicklungszeit und Teigstabilität hatten.

Interessant waren die Werte der Teigerweichung der zweistufig geprallten Mehle. Den Haupteinfluss hatte ebenfalls die Weizensorte, die sich auch zusammen mit der Dosierungswirkung in einer Interaktion befand (Abb. 61). Die Ergebnisse zeigten niedrigere Werte der Teigerweichung bei den Weizensorten Tarso und Akratos im Vergleich zu der Weizensorte Contra.

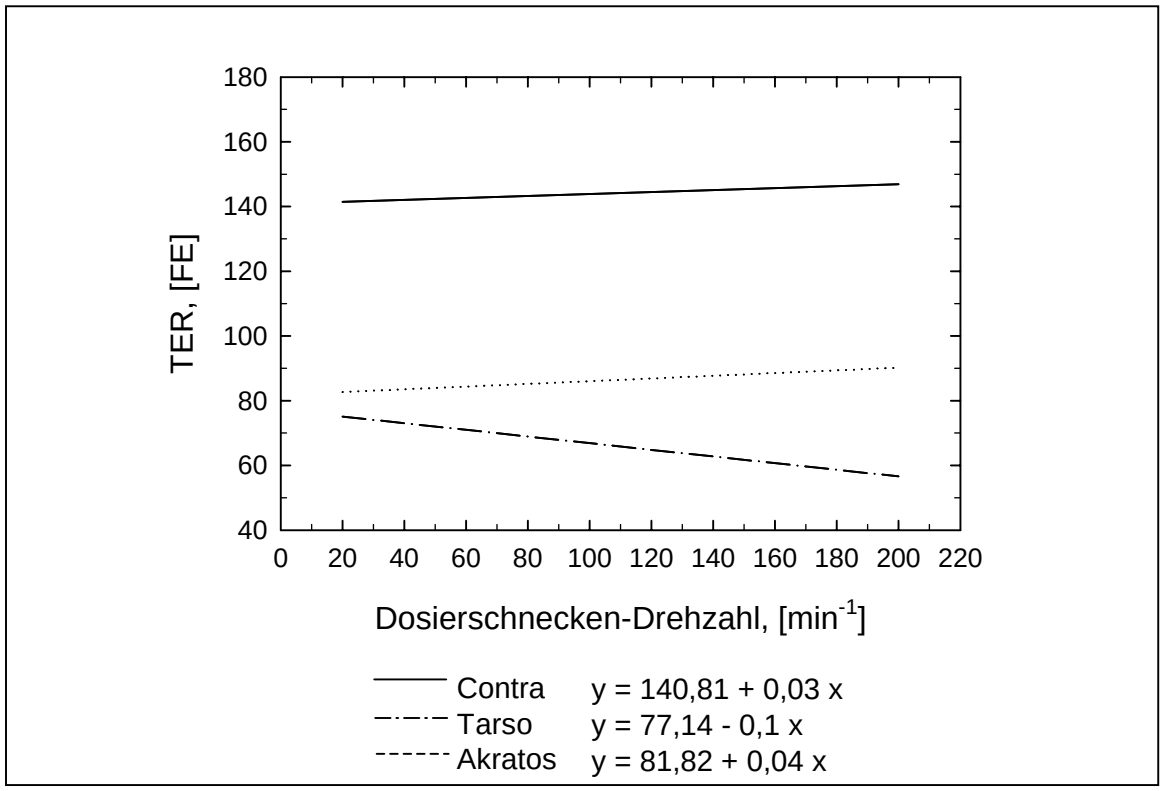


Abb. 61: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Teigerweichung (TER) der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra, Tarso und Akratos

Die Prallmehle der Weizensorte Contra und Akratos deuteten eine Abnahme der Teigerweichungswerte mit der abnehmenden Dosierschnecken-Drehzahl an. Bei dem Prallmehl der Weizensorte Tarso war dagegen eine Zunahme der Teigerweichungswerte mit zunehmender Dosierung zu beobachten. Die Teigerweichung ließ z.B. Rückschlüsse auf die Klebrigkeit des Teiges zu. Die Zunahme der Teigerweichung beim Prallmehl der Sorte Tarso ließ auf stärkere Klebrigkeit und somit auf eine schlechtere Maschinengängigkeit des Teiges schließen.

Die Teigerweichung der Weizensorte Akratos nach dem zweistufigen Prallen lag zwischen derjenigen der Sorten Contra und Tarso (Tab.18, Anhang). Die gute Kleberqualität bei einer gleichzeitig härteren Kornstruktur bzw. hohem Stärkebeschädigungsgrad charakterisierten die mittleren Kneteigenschaften der Weizensorte Akratos im Vergleich zu den Sorten Contra und Tarso.

5.1.4.3.2 Extensogramme der Teige der Prallmehle

Um den Einfluss der Prallzerkleinerung auf die Dehnungseigenschaften der Teige zu beobachten, wurden die Extensogramm–Untersuchungen ohne Zusatz von Ascorbinsäure durchgeführt.

Die Dehnungseigenschaften der Teige wurden vorrangig von den Gluteneigenschaften der Mehle und demzufolge von der Weizensorte beeinflusst.

Von den Prozessparametern hatte die Dosierung Einfluss auf die Dehnbarkeit und den Dehnwiderstand beim einstufigen Prallen der Contra- und Tarso-Mehle (Tab. 22, Anhang). Eine höhere Einspeisung bewirkte eine höhere Dehnbarkeit der Prallmehle der Weizensorte Tarso. Bei der Sorte Contra war dieser Einfluss marginal. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 62 dargestellt.

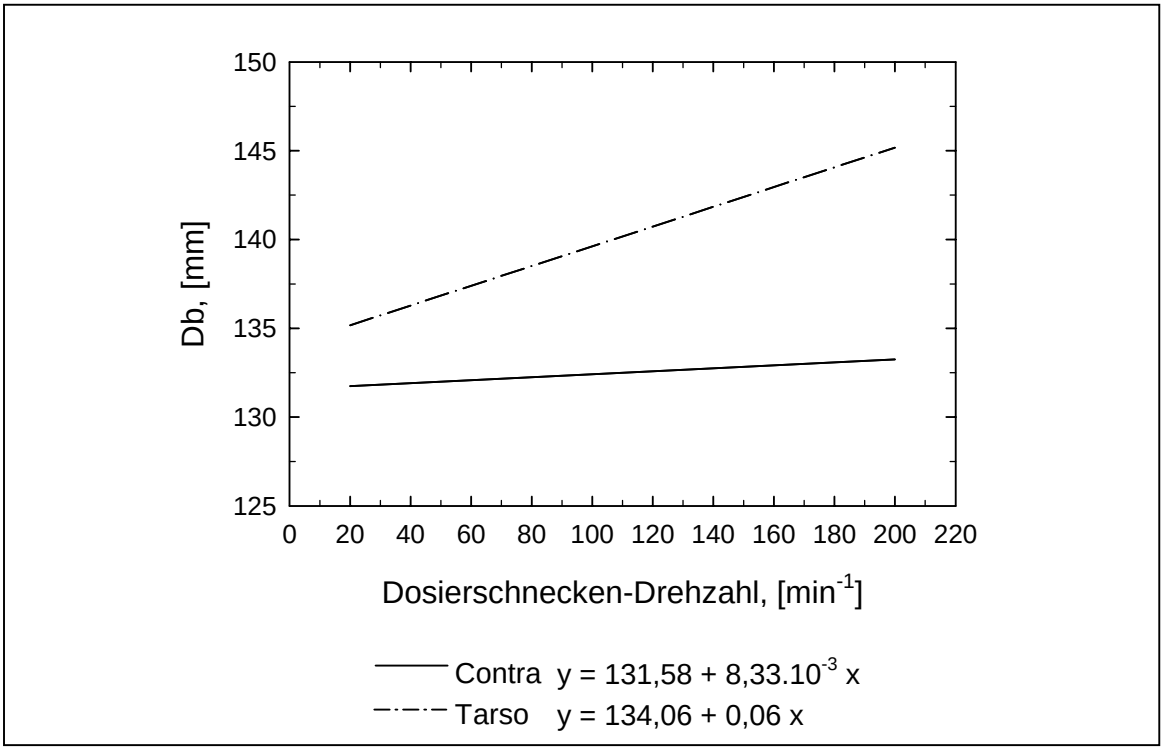


Abb. 62: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Dehnbarkeit (Db) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Die Extensogramm-Ergebnisse des Prallmehles der Sorte Akratos aus dem einstufigen Prallen deuteten keine Änderung der Dehnbarkeit an (Tab. 19, Anhang).

Eine niedrigere Dosierung, d.h. eine intensivere Mehlbeanspruchung, bewirkte eine Abnahme des Dehnwiderstandes der Contra- und Tarso-Mehle nach dem einstufigen Prallen (Abb. 63).

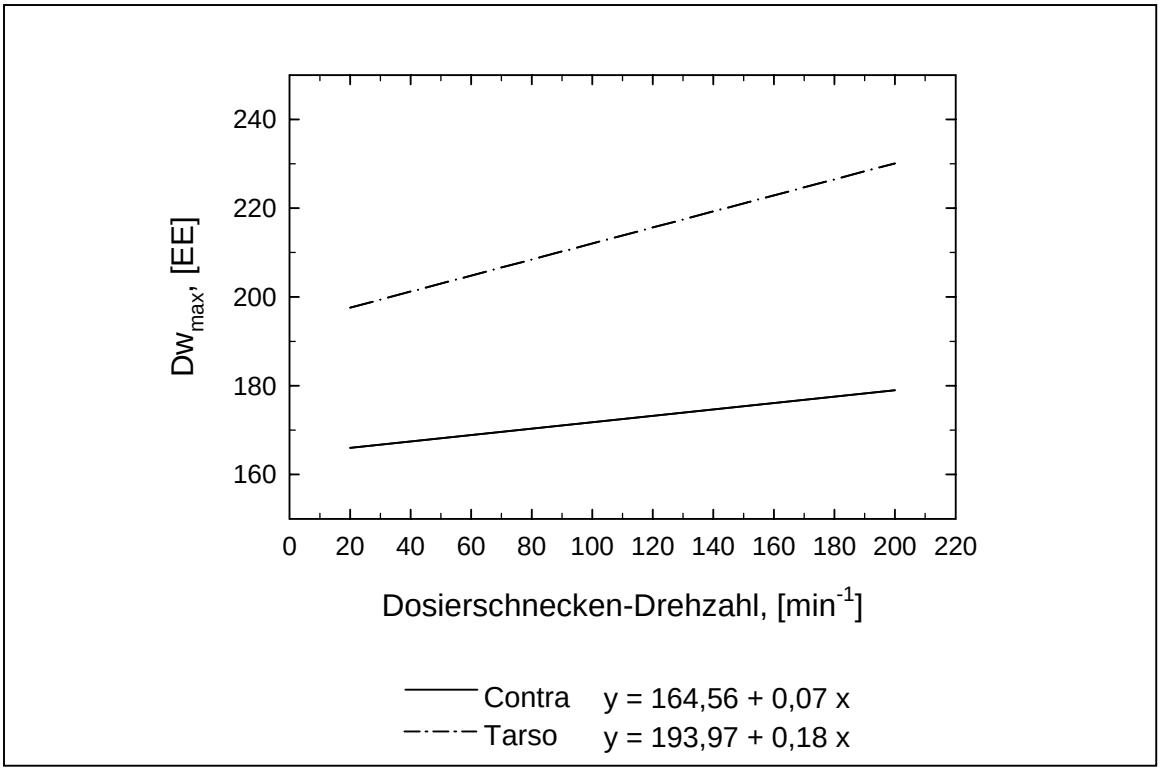


Abb. 63: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf den Dehnwiderstand (Dw_{max}) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Die Weizensorte Akratos wies nach dem einstufigen Prallen auch eine Senkung des Dehnwiderstandes auf 208 EE im Vergleich zum Ausgangsmehl (224 EE) auf.
Die Dehnungsenergie veränderte sich abhängig von der Weizensorte. Die Messwerte des Ausgangsmehles sowie der einstufig geprallten Mehle der Sorte Tarso lagen erheblich über den Werten der Contra–Mehle und ergaben somit höhere Dehnungsenergien. Unter den statistisch variierten Maschinenfaktoren beim einstufigen Prallen der Contra- und Tarso-Mehle wies die Dosierung einen signifikanten Einfluss auf die Dehnungsenergie auf (Abb. 64).

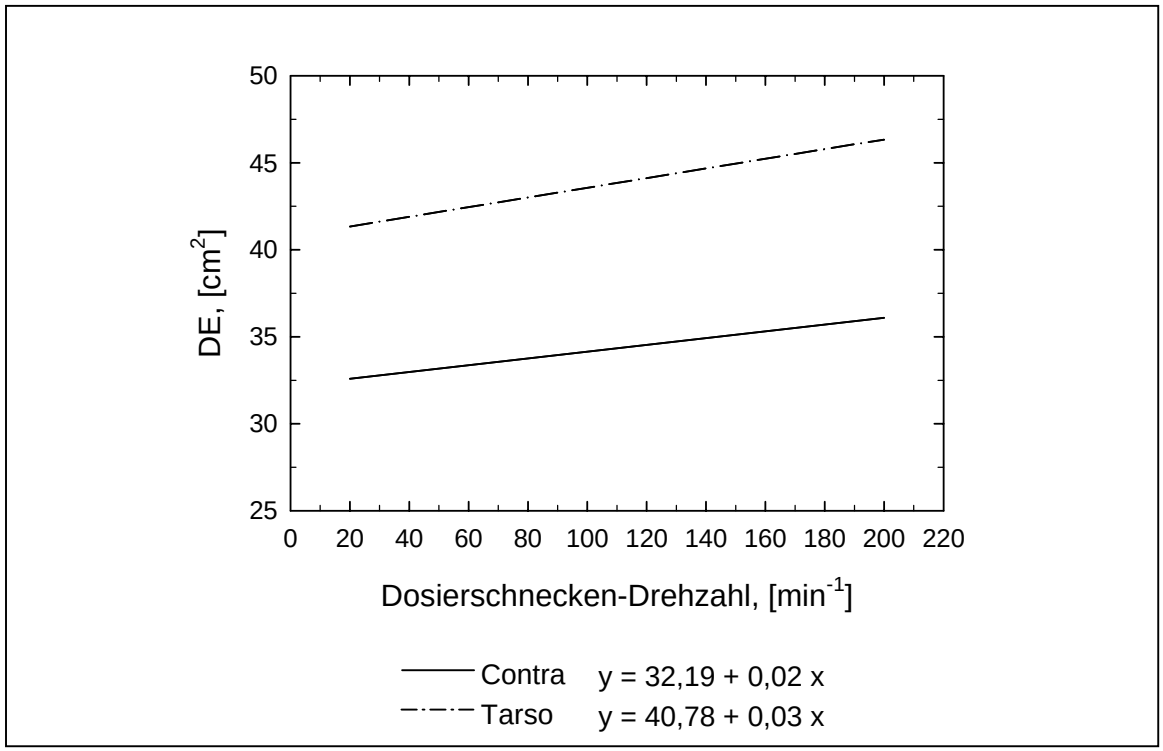


Abb. 64: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Dehnungsenergie (DE) der einstufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra und Tarso

Die Sorte Akratos zeigte im Vergleich zu den Sorten Contra und Tarso nach dem einstufigen Prallen die höchsten Dehnungsenergie–Werte (56 cm^2) (Tab. 19, Anhang).

Diese Veränderung der Dehnungseigenschaften der Teige korrelierte mit der gemessenen Abnahme der Deformierbarkeit des Glutens unter Einfluss der Prallung. Eine wesentliche Rolle spielte auch der erhöhte Stärkebeschädigungsgrad. Durch Stärkebeschädigung infolge einer sehr feinen Vermahlung von Weizenmehlen wird eine besonders hohe Wasseraufnahme erreicht. Das schnell aufgenommene Wasser wird im Laufe der Teigknetung nicht gehalten, so dass sich Teige mit schlechtem Stand ergeben können (Meuser et al., 1979).

Die Aufnahme des Extensogramms des Mehles aus der Sorte Tarso nach dem zweistufigen Prallen war nicht möglich. Trotz der registrierten leichten Verfestigung des Klebers bei der Kriecherholungs-Messung bildeteten sich beim Kneten im Extensographen nachlassende, schmierige Teige, die nicht zu Untersuchung im Extensographen geeignet waren. Als Ursache kann hier die hohe Stärkebeschädigung genannt werden, wodurch die Stärke bei der Wasseraufnahme in Konkurrenz zum Pro-

tein stand, was den genannten negativen Effekt zur Folge hatte. Es wurde auch von Bode et al. (2001) beschrieben, dass sehr hohe Stärkebeschädigungen, wie ggf. bei den ein- und insbesonders zweistufig geprallten Mehlen der Sorte Tarso zu unerwünschten Effekten, wie z.B. nachlassenden Teige, führen können.

Aus diesem Grund war eine statistische Auswertung der Contra- und Tarso-Mehle nach dem zweistufigen Prallen nicht möglich.

Beim zweistufigen Prallen wiesen die Dehnbarkeit, der Dehnwiderstand und die Dehnungsenergie der Prallmehle aus der Sorte Contra eine weitere Verschiebung im Vergleich zu den Walzenmehlen und den Mehlen nach dem einstufigen Prallen auf. So erreichten die Contra–Mehle eine wesentliche Verbesserung ihrer Dehnungseigenschaften (Tab. 19, Anhang). Die Extensogramm-Ergebnisse bestätigten die verbesserten Aggregationseigenschaften und die Verfestigungen des Klebers der ein- und zweistufig geprallten Mehle der Weizensorte Contra.

Die Extensogramm-Ergebnisse der zweistufig geprallten Mehle aus der Sorte Akratos deuteten eine leichte Abnahme der Dehnbarkeiten an (Tab. 19, Anhang). Statistisch wurden hier keine signifikanten Faktoren festgestellt.

Der Dehnwiderstand der Akratos- Mehle wurde von der Dosierung beeinflusst. Eine niedrigere Dosierung bewirkte einen höheren Dehnwiderstand der Mehle (Abb. 65).

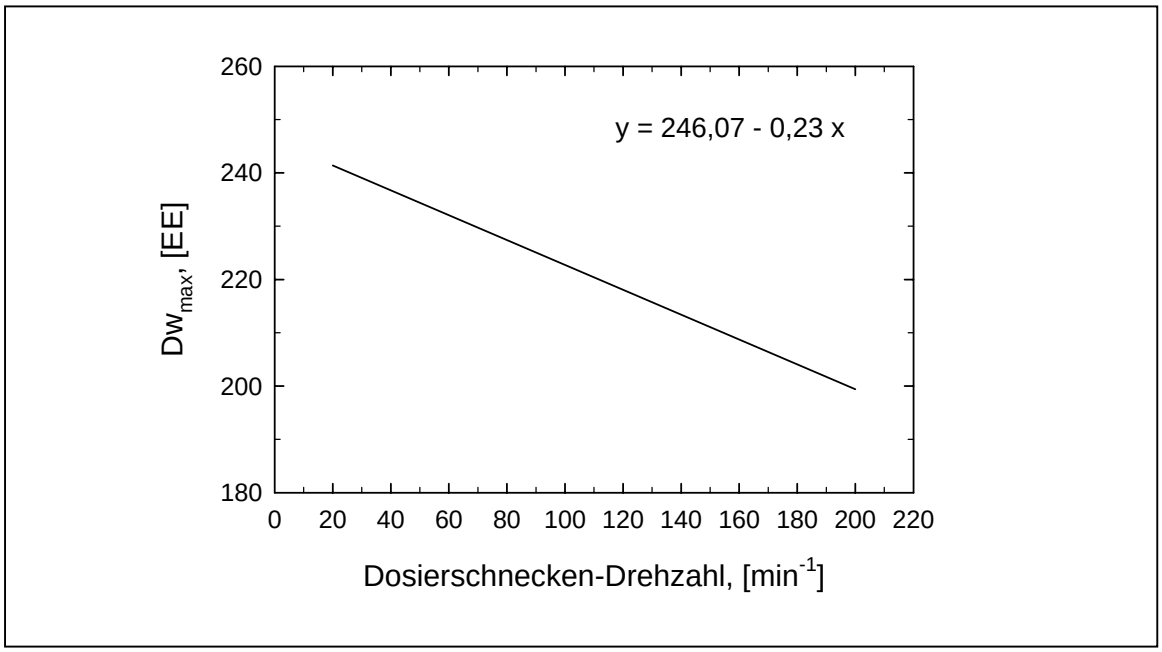


Abb. 65: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf den Dehnwiderstand (Dw_{max}) der zweistufig geprallten Mehle der Sorte Akratos

Die statistische Auswertung nach der zweistufigen Prallzerkleinerung ergab eine negative Wirkung der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Dehnungsenergie der Akratos-Mehle. Die zunehmende Dosierung verursachte eine abnehmende Dehnungsenergie (Abb. 66).

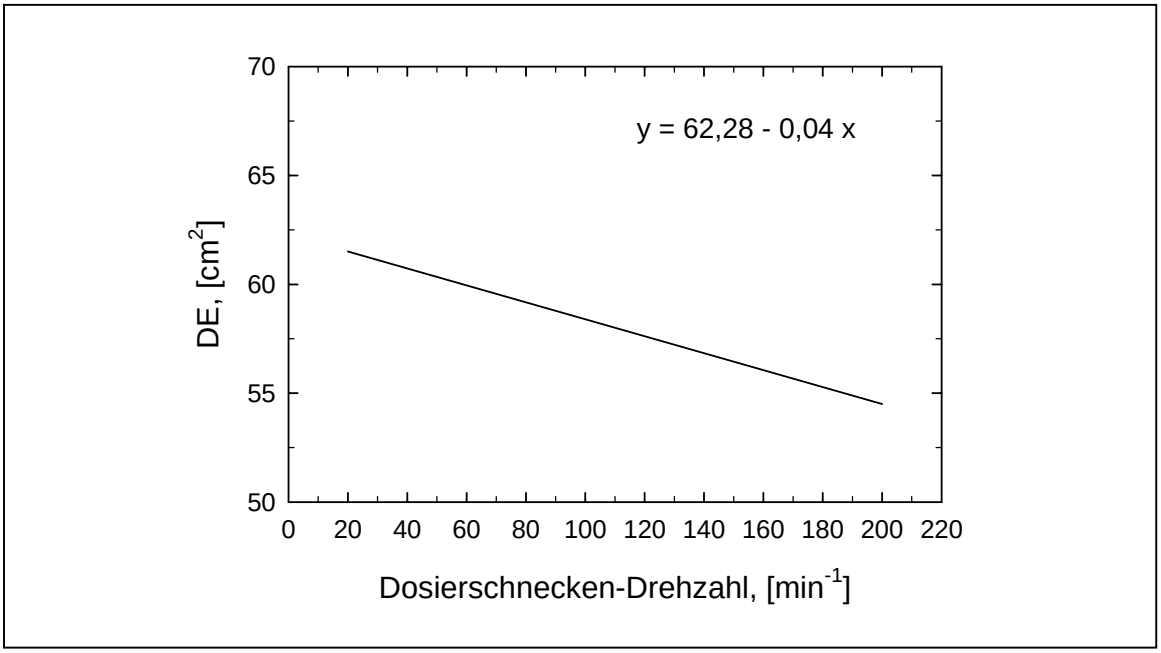


Abb. 66: Einfluss der Dosierschnecken-Drehzahl auf die Dehnungsenergie (DE) der zweistufig geprallten Mehle der Weizensorte Akratos

5.1.4.4 Backeigenschaften

Für die Backversuche wurden die Ausgangsmehle sowie die ein- und zweistufig geprallten Mehle der Weizensorten Contra, Akratos und Tarso, vermahlen mit den Parametern Dosierschnecken-Drehzahl 110 min^{-1}, Umfangsgeschwindigkeit 85 m/s, Sichtrad-Drehzahl 2500 min^{-1}, verwendet.

Teigausbeute und Backergebnisse der Prallmehle sind durch die mechanische Beanspruchung in der ZPS-Mühle und abhängig von der Weizensorte unterschiedlich verändert worden. Die Glutenveränderungen der Contra-Mehle wirkten positiv auf die Backergebnisse aus. Analog zu Glutenqualität und -eigenschaften sowie zu den rheologischen Eigenschaften der Teige wiesen die Prallmehle dieser Sorte im Vergleich zum Walzenmehl ebenfalls auf eine Verbesserung der Backeigenschaften, besonders ausgeprägt in der Teig- und Volumen- Ausbeute, auf (Tab. 7). Dagegen zeigten

die Tarso- Mehle fast keine Veränderung der Teigausbeute. Die nachlassenden, schmierigen Teige, die sich beim Kneten im Extensograph bildeten, führten bei den Backerversuchen zu einer Abnahme der Volumenausbeute mit zunehmender Prallintensität.

Die Backeigenschaften der Prallmehle der Sorte Akratos wiesen ebenso keine wesentlichen Änderungen im Vergleich zum Ausgangsmehl auf.

Tab. 7: Backergebnisse der Walzenmehle (WM), ein (EM)- und zweistufig (ZM) geprallten Mehle der Sorten Contra, Tarso und Akratos

Fraktion	TA [%]	VA [ml/100g]	Ausbund	Bräunung	Porung	KE
Contra WM	148,8	555	mangelhaft	etw.sch.(a)	z.glm.(b)	gut
Contra EM	149,0	570	mangelhaft	etw.sch.	z.glm.	gut
Contra ZM	149,7	599	mangelhaft	etw.sch.	z.glm.	gut
Tarso WM	160,2	711	befriedigend	normal	z.glm.	gut
Tarso EM	161,9	697	befriedigend	normal	z.glm.	gut
Tarso ZM	161,3	685	befriedigend	normal	z.glm.	gut
Akratos WM	159,3	621	noch gut	etw.kr.(c)	z.glm.	gut
Akratos EM	160,7	628	noch gut	etw.kr.	z.glm.	gut
Akratos ZM	161,3	627	noch gut	etw.kr.	z.glm.	gut

(a) etwas schwach

(b) ziemlich gleichmäßig

(c) etwas kräftig

5.1.5 Schlussfolgerungen zum Einfluss der Prallzerkleinerung auf die Weizenmehleigenschaften

Die ein- und zweistufige Prallzerkleinerung von sortenreinen Typenmehlen der Weizensorten mit weicher und harter Kornstruktur in der Sichtermühle beeinflusste die funktionellen Eigenschaften der Mehle, auch wenn die Mehleigenschaften eines Weizens im hohen Grad von der Weizensorte abhängen.

Durch Zusammenwirkung variierter Einstellungen der Dosierung, Umfangsgeschwindigkeit und Sichtrad-Drehzahl in der ZPS-Mühle konnte eine höhere kinetische Energie in das Gut eingetragen werden als mit der Walzenzerkleinerung. Das führte zu einem intensiven Zerkleinerungseffekt bzw. hohem Feingutanteil. Da die Strukturauflösung des Endosperms weich strukturierter Weizensorten ausgeprägter war als bei hart strukturierten, hatten Mehle aus weichem Weizen nach dem einstufigen Prallen einen höheren Anteil an Partikeln unter 10 µm als solche aus hartem Weizen. Eine zweistufige Prallzerkleinerung führte zu einer weiteren Zunahme des Feingutanteils der Mehle. Dieser Effekt war bei den hart strukturierten Sorten höher ausgeprägt als bei der weich strukturierten Sorte.

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Mehle gaben Hinweise auf deren Beschaffenheit. Bei einstufiger Prallung der Mehle aus weichen Weizen lösten sich deutlich größere Anteile an Stärkekörnern von der Proteinmatrix ab als bei den Mehlen aus harten Weizen. Aufgrund der weichen Kornstruktur mit fast vollständiger Auflösung des Mehlkörpers nach dem einstufigen Prallen konnte nach der zweiten Prallstufe bei der weichen Sorte nur noch eine geringfügige Veränderung in der Strukturauflösung des Mehlkörpers festgestellt werden. Dagegen wurde bei den hart strukturierten Sortenmehlen eine weitere Abtrennung der Stärkekörner aus der Proteinmatrix durch die zweistufige Prallung erreicht.

Die stoffliche Zusammensetzung der Mehle ist sortenabhängig und änderte sich durch die Prallzerkleinerung nicht, bis auf den eingetretenen Feuchtigkeitsverlust und die geringe Abnahme der salzwasserlöslichen Proteine.

Die zunehmende Mehloberfläche begünstigte eine Abnahme der ursprünglichen Mehlfeuchtigkeit um etwa 3-4 % während der ein- und zweistufigen Prallung.

Die Proteingehalte und die Anteile an salzwasserlöslichen Proteinen der Prallmehle vom ein- und zweistufigen Prallen waren von der Weizensorte abhängig. Mehle mit ursprünglich höherem Gehalt an Rohprotein- und an löslichem Protein ergaben nach dem Prallen auch höhere Werte. Eine geringfügige Abnahme des Gehaltes an salz-

wasserlöslichen Proteinen konnte auf eine Verringerung der Löslichkeit der salzwasserlöslichen Proteine (Albumine und Globuline) durch die Prallzerkleinerung zurückgeführt werden. Ähnliche Ergebnisse sind in der Literatur beschrieben (Mac Arthur u. D'Appolonia, 1977; Pamuk, 1999). Körner mit höherem Proteingehalt haben einen geringeren Stärkegehalt. Dies wurde von den Untersuchungswerten nach dem ein- und zweistufigen Prallen der sortenreinen Typenmehle bestätigt.

Die bei der mechanischen Beanspruchung zugeführte Energie bewirkte neben der plastischen Verformung der Stärkekörner auch eine Modifikation der übermolekularen Struktur der Stärke. Dies war besonders bei Weizen mit harter Kornstruktur stärker ausgeprägt. So wiesen alle Prallmehle der härteren Sorten nach dem ein- und zweistufigen Prallen einen höheren Stärkebeschädigungsgrad und ein höheres Wasserbindevermögen im Vergleich zur weichen Sorte auf. Parallel führte die zunehmende Prallintensität zu einem partiellen Verlust der übermolekularen Struktur der Stärke, wobei die Desintegrationswärmemenge der Stärke der Prallmehle sank. Im Sortenvergleich zeichnen sich die Prallmehle der weich strukturierten Sorte durch höhere Werte der Umwandlungswärme der Stärke aus (gleichbedeutend mit höherer Strukturintegrität) im Vergleich zu den Prallmehlen der hart strukturierten Sorten, die partiell ihre übermolekulare Struktur während der mechanischen Beanspruchung verloren haben.

Die geprallten Mehle hatten insgesamt niedrigere Viskositäten als die Walzenmehle. Die Viskositätseigenschaften der Prallmehle standen im Zusammenhang mit dem Feinheitsgrad, dem Stärkebeschädigungsgrad und dem Wasserbindevermögen. Erwartungsgemäß wurden bei den Prallmehlen der hart strukturierten Sorten nach dem ein- und zweistufigen Prallen niedrigere Werte der Verkleisterungsmaxima und der Finalviskositäten beobachtet als bei den Prallmehlen der weich strukturierten Sorte. Dies war auf einen verbesserten Wasserzugang und eine vollständigere Hydratisierung zurückzuführen.

Obwohl der Sedimentationstest als eine Methode zur Beurteilung der Proteinqualität gilt, spielen die Quelleigenschaften der Stärkekomponenten auch eine nicht zu unterschätzende Rolle. Die Sedimentationswerte der Prallmehle wiesen mit steigender Intensität der Prallbehandlung eine Zunahme gegenüber den Walzenmehlen auf. Gegenüber dem weichen Weizen sedimentierten die Prallmehle aus hartem Weizen nach dem ein- und zweistufigen Prallen zu höheren Werten. Als Ursache könnte der höhere Stärkebeschädigungsgrad ebenfalls genannt werden.

Die zunehmende Prallintensität bewirkte einen Anstieg des Feuchtglutens der weich strukturierten Sorte und eine leichte Abnahme des Feuchtglutens der hart strukturierten Sorten gegenüber den Ausgangsmehlen. Ursache für diese Abnahme könnten Verluste während der Kleberauswaschung sein. Obwohl beim Prallen eine Erhöhung der Mehltemperatur bis etwa 23-29°C registriert wurde, ist eine thermische Schädigung des Proteins aufgrund des geringen Feuchtigkeitsgehaltes der Mehle und der kurzen Verweildauer auszuschließen. Eine Temperaturschädigung des Glutens kann bei Vermahlungen erst ab einer Mehlfeuchtigkeit von 20 % und bei langen Vermahlungszeiten von über 1 h erwartet werden (Weegels et al., 1994). Mit zunehmender Prallintensität verringerte sich die maximale Deformation des Klebers, die auch von der Weizensorte abhängig war. Die Erniedrigung der Deformationswerte bedeutete eine Verfestigung des Glutens und damit eine Verbesserung der Kleberaggregationseigenschaften, was bei der weich strukturierten Sorte deutlicher ausgeprägt war.

Stärkezustand und Kleberaggregationseigenschaften bestimmen die rheologischen Eigenschaften der Teige. Ausgehend von niedrigerer Stärkemodifizierung, zunehmendem Feuchtglutengehalt und erhöhter Kleberverfestigung hatten die ein- und zweistufig geprallten Mehle aus weichem Weizen bessere Knet- und Dehnungseigenschaften der Teige im Vergleich zu den Ausgangsmehlen und zu den Prallmehlen aus hartem Weizen. Darüber hinaus sind die Backeigenschaften dieser Mehle ebenfalls verbessert worden.

Die Ergebnisse der durchgeführten statistischen Auswertung vom ein- und zweistufigen Prallen lassen insgesamt den Schluss zu, dass der Einfluss der Prallzerkleinerung in einer Sichtermühle auf die Mehleigenschaften nicht nur von den Eigenschaften des Mahlgutes und von der Prallgeschwindigkeit abhängig ist, sondern auch von der Dosierung und der Sichtrad-Drehzahl bzw. von der Gutkonzentration und der Verweilzeit des Gutes in der Maschine. Geringe Dosierungen, hohe Prallgeschwindigkeiten sowie hohe Sichtrad-Drehzahlen führen zu einer höheren mechanischen Gutbeanspruchung.

5.2 Ergebnisse der Untersuchungen zu windgesichteten Mehlfraktionen

5.2.1 Ermittlung der Sichtraddrehzahlen für die Mehlfraktionierung

Zur Ermittlung der Sichtraddrehzahlen für eine anschließende Fraktionierung der zweistufig geprallten Versuchsmehle wurden die Änderungen der Massenanteile von Grob- und Feingut sowie deren Proteingehalte als Funktion der Sichtraddrehzahl aufgetragen (Abb. 67 und 70). Die zugrunde liegenden Daten können der Tabelle 20, Anhang entnommen werden.
Anhand der Darstellung der Versuchsergebnisse konnten die Bereiche mit Proteinan- bzw. -abreicherung festgestellt und die entsprechende Sichtraddrehzahl festgelegt werden.

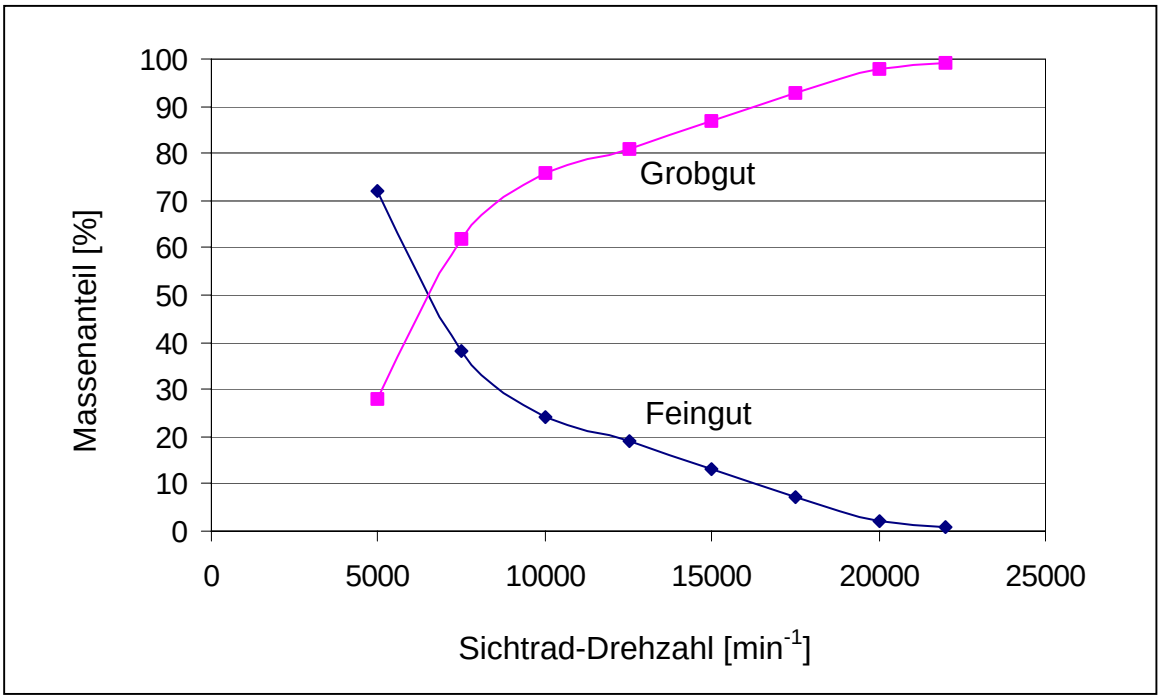


Abb. 67: Massenanteile der Sichtfraktionen von zweistufig geprallтem Weizenmehl in Abhängigkeit von der Sichtrad-Drehzahl

Mit steigender Sichtraddrehzahl nahm der Massenanteil des Feingutes stetig ab (Abb. 67). Bei der Sichtung mit 5 000 min^{-1} betrug der Massenanteil des Feingutes 72 % und bei 15 000 min^{-1} fast 13 %. Bei 22 000 min^{-1} wurde der Wert auf etwa 1 % verringert. Es lagen also kaum entsprechend große Partikel in dieser Feinfraktion vor, die bei dieser Sichtraddrehzahl zusätzlich ins Grobgut gesichtet wurden. Mit ab-

nehmendem Massenanteil des Feingutes nahm erwartungsgemäß der Anteil des Grobgutes zu. Beispielsweise betrug der Massenanteil des Grobgutes bei der Sichtung mit 5 000 min^{-1} 28 %, bei 15 000 min^{-1} schon 87 %. Die größte Steigerung hatte die Grobgerade von 5 000 bis 7 500 min^{-1}. Bei 22 000 min^{-1} wies die grobe Fraktion einen Massenanteil von 99 % auf.

Mit steigender Sichtraddrehzahl verschoben sich die Werte der mittleren Teilchengröße (d_{50}) der gesichteten Mehlfraktionen sowie ihrer massenspezifischen Mehloberfläche (Ao) (Abb. 68 und 69).

Der Median-Wert der Feinfraktionen verringerte sich von 15,97 µm bei 5 000 min^{-1} auf 4,11 µm bei 22 000 min^{-1}, und die spezifische Oberfläche vergrößerte sich von 0,79 m^2/g bzw. auf 1,97 m^2/g. Gleichzeitig wurde eine Abnahme der d_{50}-Werte der Grobfraktionen von ca. 38 µm bei 5 000 min^{-1} auf ca. 18 µm bei 22 000 min^{-1} ermittelt. Damit stieg die massenspezifische Mehloberfläche von 0,35 m^2/g auf 0,73 m^2/g fast um das Doppelte an (Tab. 21, Anhang).

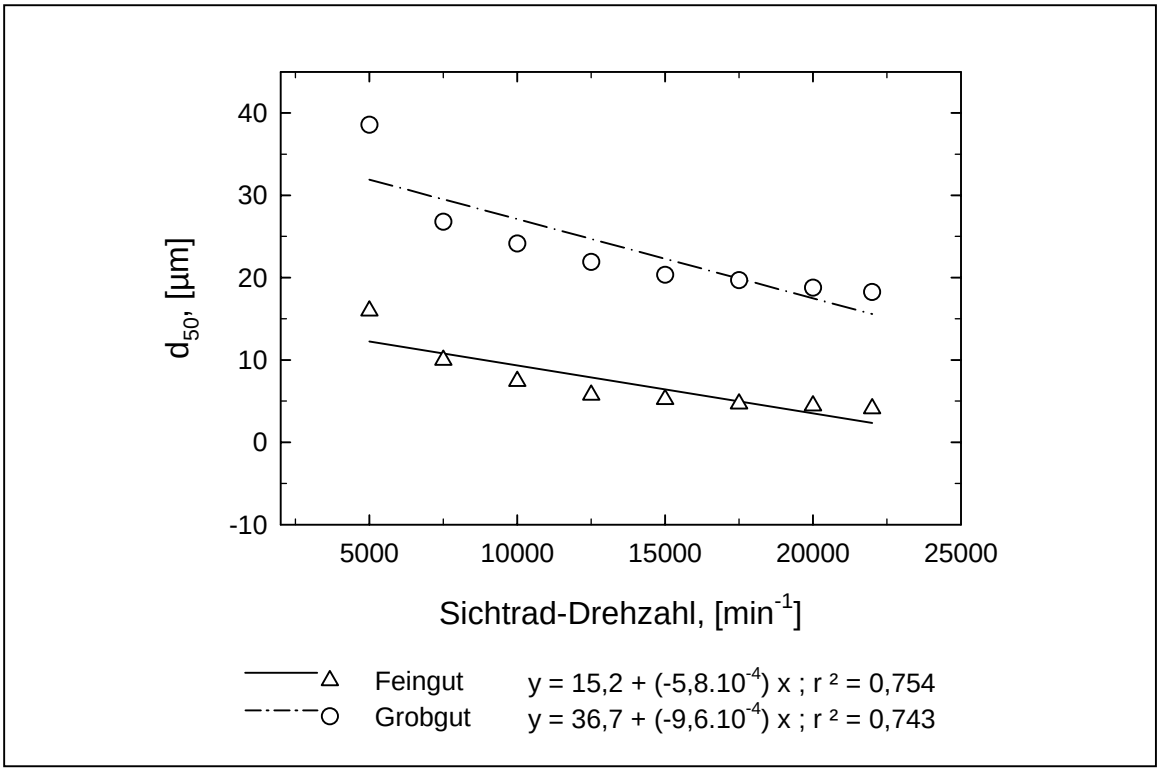


Abb. 68: Mittlere Teilchengröße (d_{50}) der Sichtfraktionen von zweistufig gepralltem Weizenmehl in Abhängigkeit von der Sichtrad-Drehzahl

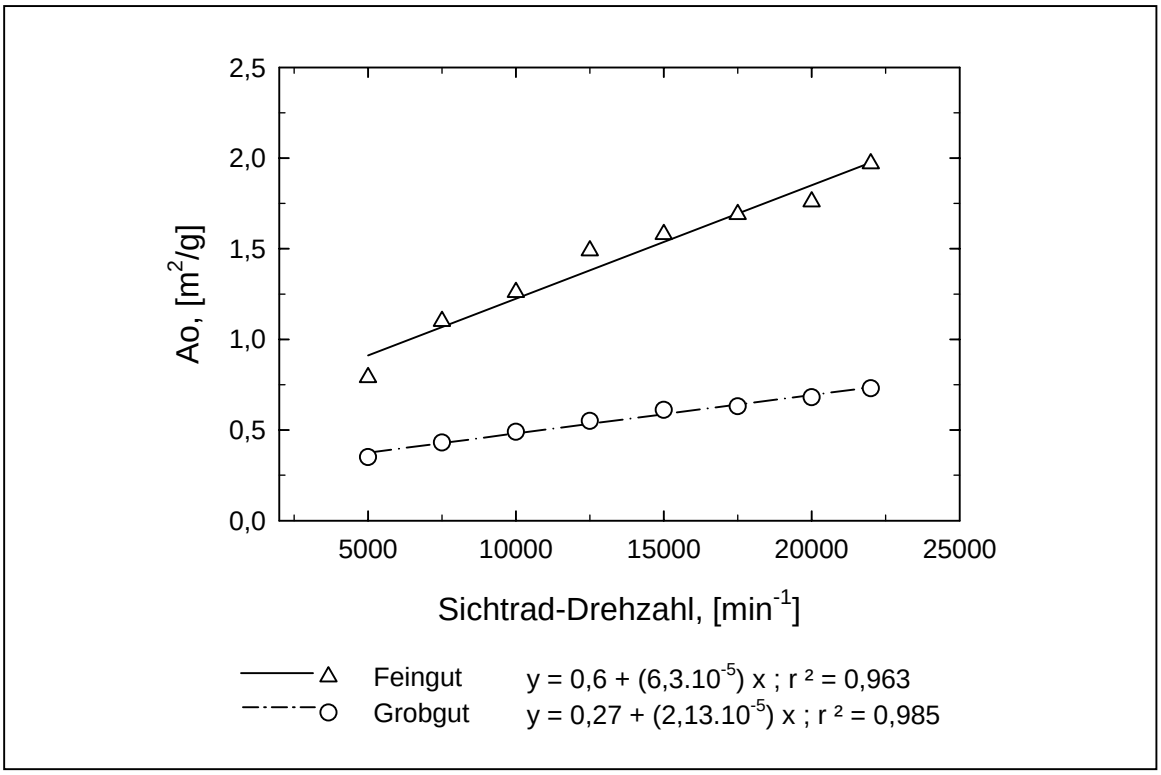


Abb. 69: Massenspezifische Mehloberfläche (Ao) der Sichtfraktionen von zweistufig gepralltem Weizenmehl in Abhängigkeit von der Sichtrad-Drehzahl

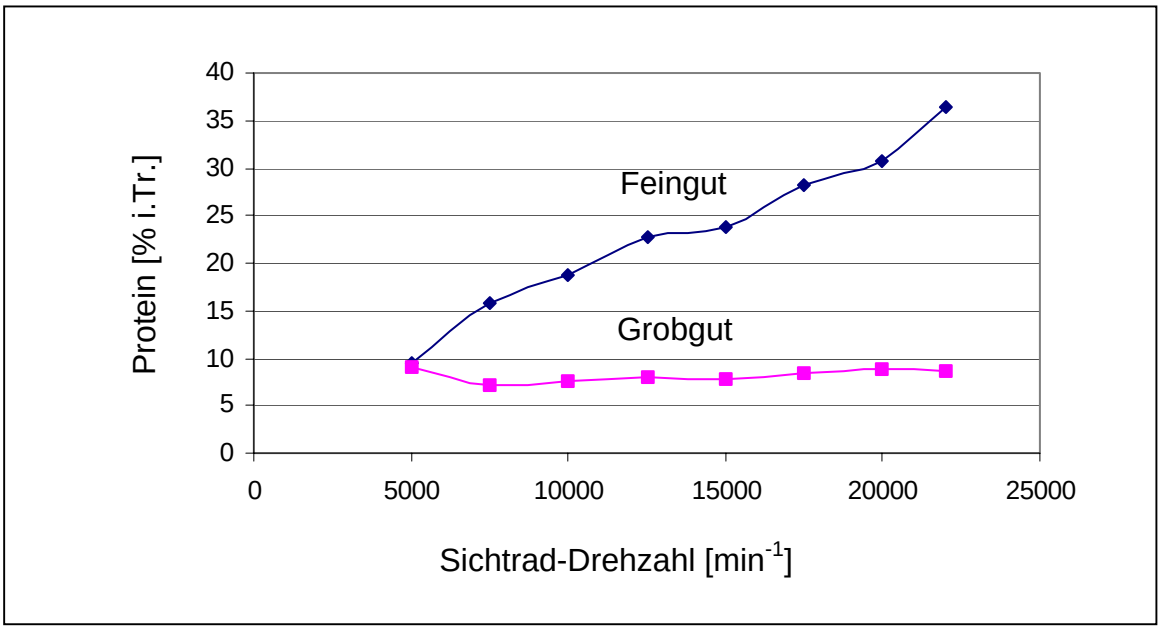


Abb. 70: Proteingehalte der Sichtfraktionen von zweistufig gepralltem Weizenmehl in Abhängigkeit von der Sichtrad-Drehzahl

In Abbildung 70 ist der Verlauf des Proteingehaltes bei steigender Sichtraddrehzahl für Grob- und Feingut dargestellt.

Der Proteingehalt des Feingutes stiegt entsprechend mit zunehmender Sichtraddrehzahl. Ab 7 500 min^{-1} reichte die Abreicherung der wenigen kleinen Stärkekörner mit abnehmender Feingutmasse aus, um den Proteingehalt des Feingutes aus der Sichtung mit 22 000 min^{-1} auf 36,4 % zu erhöhen (Tab. 20, Anhang).

Das Grobgut enthielt dagegen generell, unabhängig von der gewählten Sichtraddrehzahl, weniger Protein als das Feingut. Bei einer Sichtradrehzahl von 5 000 min^{-1} enthielt die grobe Fraktion allerdings mit 9 % etwas weniger Protein als das Ausgangsmehl mit 10 %. Hier wurden aber auch Mehlteilchen mit höherem Proteingehalt ins Grobgut überführt – es waren vermutlich überwiegend proteinreiche Zellverbände aus dem härteren Rückenteil des Getreidekorns. Zwischen 7 500 und 15 000 min^{-1} wurde hauptsächlich Stärke im Grobgut angereichert, so dass der Proteingehalt auf etwa 7,2 – 7,8 % fiel.

Die Sichtraddrehzahl für die Fraktionierung der Prallmehle wurde auf 15 000 min^{-1} eingestellt. Es war die maximale Einstellung des Sichtrades, bei der eine befriedigende Menge zweistufig geprallten Weizenmehles gesichtet werden konnte. Bei dieser Sichtraddrehzahl war der Proteingehalt des Feingutes mehr als doppelt so hoch (23,8 %) wie der des Walzenmehles bei einer gleichzeitigen Gutausbeute von etwa 13 % Massenanteil. Der Proteingehalt des Grobgutes betrug dagegen nur 7,8 % bei einer Gutausbeute von etwa 87 %. So konnte eine feine Fraktion mit möglichst hohem Proteingehalt und eine grobe Fraktion mit möglichst geringem Proteingehalt gewonnen werden.

5.2.2 Physikalische Eigenschaften der Mehlfraktionen

5.2.2.1 Massenanteile, Granulation und Oberfläche

Der Einfluss der Prallzerkleinerung auf den Feingutanteil im Mehl spielte für die später durchzuführende Windsichtung eine wichtige Rolle. Durch die der Windsichtung vorgeschaltete Prallvermahlung veränderten sich die Massenanteile in den einzelnen Fraktionen und damit die Korngrößenverteilungen. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Anteile der Mehlfraktionen zusammengefasst dargestellt.

Die Trennung der Mehle durch Windsichtung führte bei der weichen Sorte Contra zu einem Feinanteil, der wesentlich höher lag (ca. 10%) als der aus den Mehlen der harten Weizensorten Akratos und Tarso (ca. 6%). Demzufolge war der Anteil der groben Fraktion der Sorte Contra niedriger (etwa 90%) als jener Anteil der Sorten Akratos und Tarso (etwa 94%).

Tabelle 8: Anteil der windgesichteten Mehlfraktionen bei der Trenngrenze 6 µm

	Contra	Akratos	Tarso
Feinanteil [%]	9,7	5,8	6,0
Grobanteil [%]	90,3	94,2	94,0

Die Granulation und die massenspezifische Oberfläche der Ausgangsmehle, der groben und feinen Mehlfraktionen der Sorten Contra, Akratos und Tarso sind in der Tabelle 9 ausgewiesen. Die entsprechenden Korngrößenverteilungsfunktionen sind in den Abbildungen 71, 72 und 73 dargestellt.

Tabelle 9: Granulation und massenspezifische Oberfläche der windgesichteten Walzen- und Prallmehle

Sorten	Walzenmehl			Feingut			Grobgut		
	< 6 µm [%]	d_{50} [µm]	A_O [m^2/g]	< 6 µm [%]	d_{50} [µm]	A_O [m^2/g]	< 6 µm [%]	d_{50} [µm]	A_O [m^2/g]
Contra	6,2	82,63	0,33	57,6	5,29	1,52	10,2	21,42	0,57
Akratos	2,8	121,48	0,19	56,6	5,42	1,48	7,8	26,01	0,48
Tarso	2,9	127,28	0,18	57,5	5,34	1,49	8,9	24,51	0,52

Auf Grund des hohen Feinheitsgrades infolge der Prallzerkleinerung und der niedrigen Trenngrenze bei hoher Sichtraddrehzahl (etwa 6 µm), wurde eine Angleichung der mittleren Teilchengröße (d_{50}) und der Partikelanteile unter 6 µm in der feinen Mehlfraktion aller drei Weizensorten auf etwa 5 µm mit etwa 57 % festgestellt. Diese Tendenz wurde auch bei den groben Mehlfraktionen beobachtet; die d_{50}-Werte des Grobgutes der Mehle lagen bei etwa 21-26 µm. Die Grobgutfraktionen der Mehle enthielten noch Feingutanteile < 6 µm von 8-10 % als sogenanntes Fehlkorn. Je klei-

ner dieser Anteil war, umso höher war die Trenngenauigkeit (Trennschärfe). Aufgrund der weichen Kornstruktur der Sorte Contra war deren Fehlkornanteil in der Grobgutfraktion am höchsten.

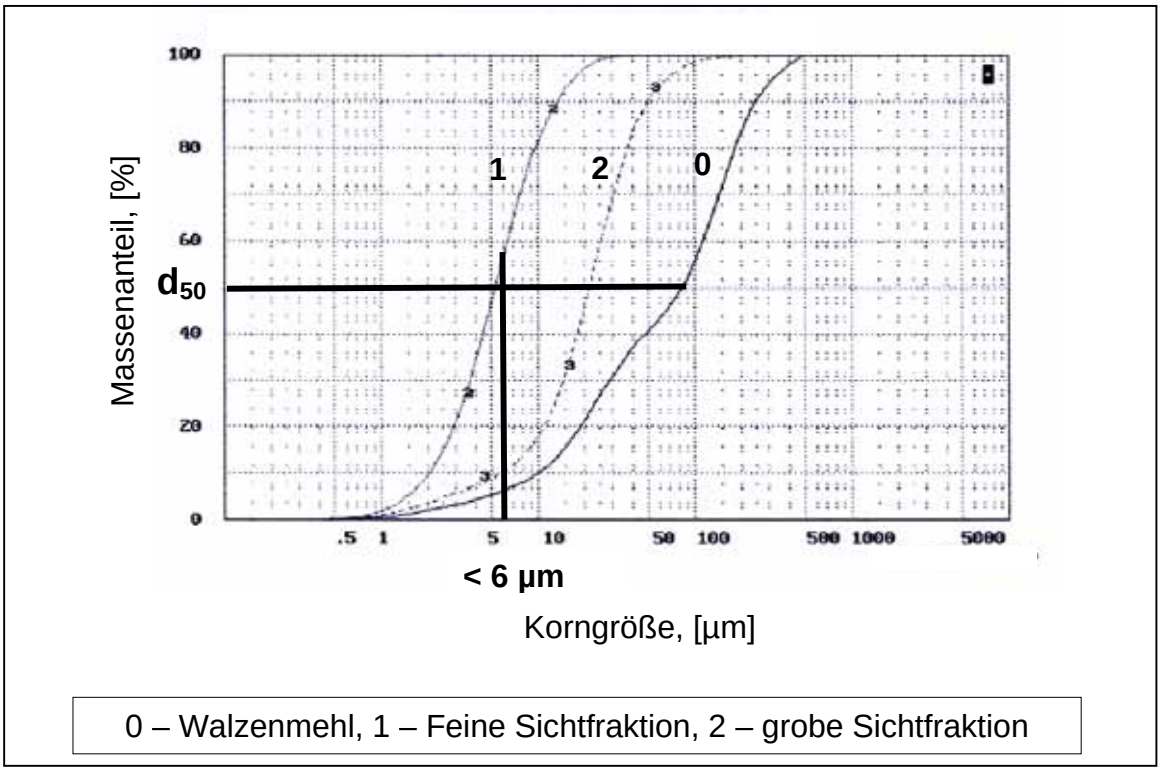
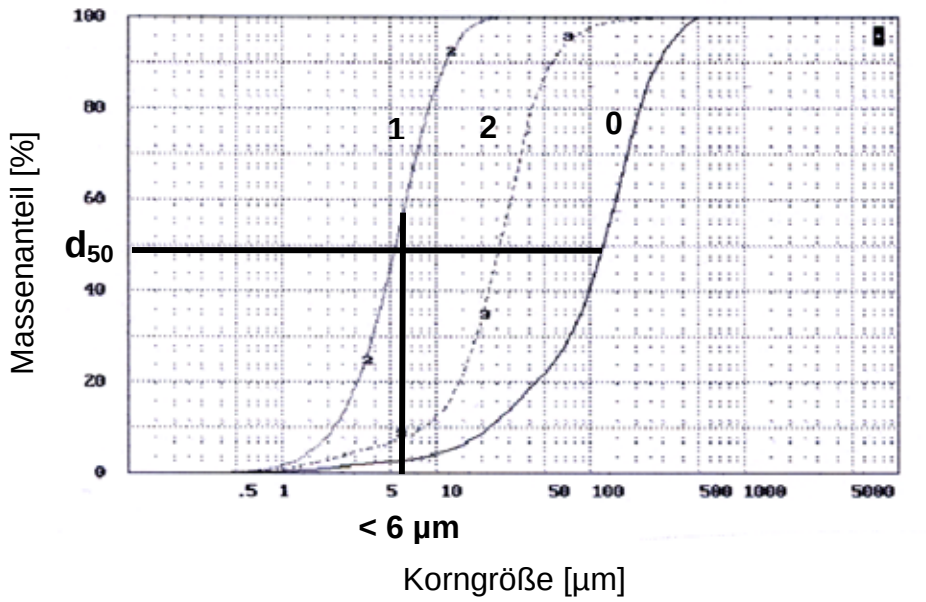
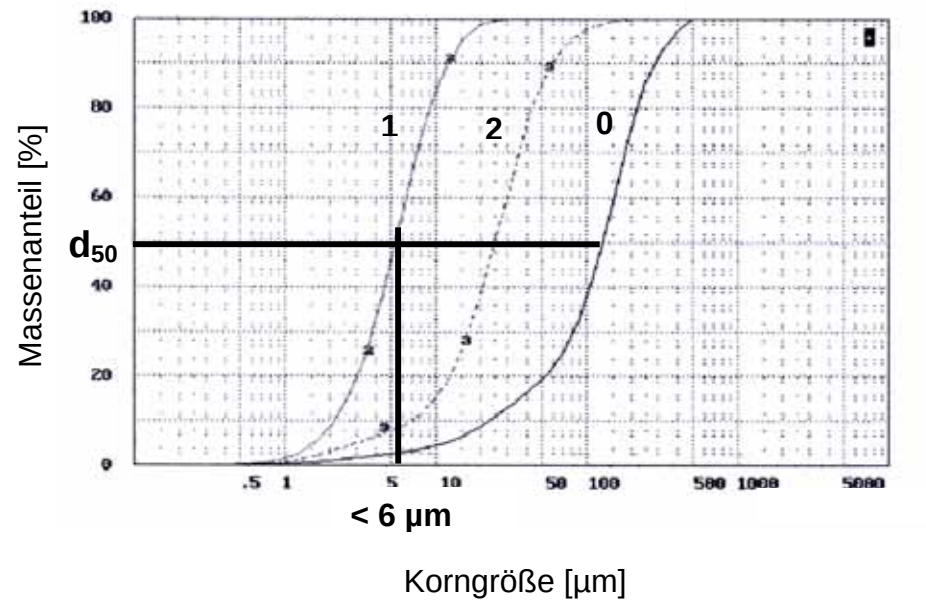


Abb. 71: Korngrößenverteilungsfunktionen von Ausgangsmehl und Sichtfraktionen der Weizensorte Contra



0 – Walzenmehl, 1 – Feine Sichtfraktion, 2 – grobe Sichtfraktion

Abb. 72: Korngrößenverteilungsfunktionen von Ausgangsmehl und Sichtfraktionen der Weizensorte Akratos



0 – Walzenmehl, 1 – Feine Sichtfraktion, 2 – grobe Sichtfraktion

Abb. 73: Korngrößenverteilungsfunktionen von Ausgangsmehl und Sichtfraktionen der Weizensorte Tarso

Mit der Verringerung der Teilchengröße nahm die spezifische Oberfläche in den feinen und groben Fraktionen zu (Tab. 9). Infolge der ähnlichen Granulation zeigten die Werte der massenspezifischen Mehloberfläche aller drei Weizensorten auch eine Angleichung in den feinen Fraktionen bei ca. 1,5 m^2/g und in den groben Fraktionen bei ca. 0,5 m^2/g.

Daraus ist zu entnehmen, dass Mehle aus weich und hart strukturierten Weizen unter Zweistufigprall- und Sichtbedingungen in der Sichter-Mühle einen vergleichbaren Zerkleinerungsgrad aufweisen.

5.2.2.2 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen

Von den Walzenmehlen und den Sichtfraktionen der Prallmehle wurden REM- Aufnahmen angefertigt. Die Aufnahmen der entsprechenden Sichtfraktionen liefern einen orientierenden Einblick in den Partikelaufbau (Struktur, Form, Zusammensetzung) der Mehle.

In den Abbildungen 74, 75 und 76 sind die mikroskopischen Aufnahmen der Ausgangsmehle der Sorten Contra, Akratos und Tarso dargestellt.

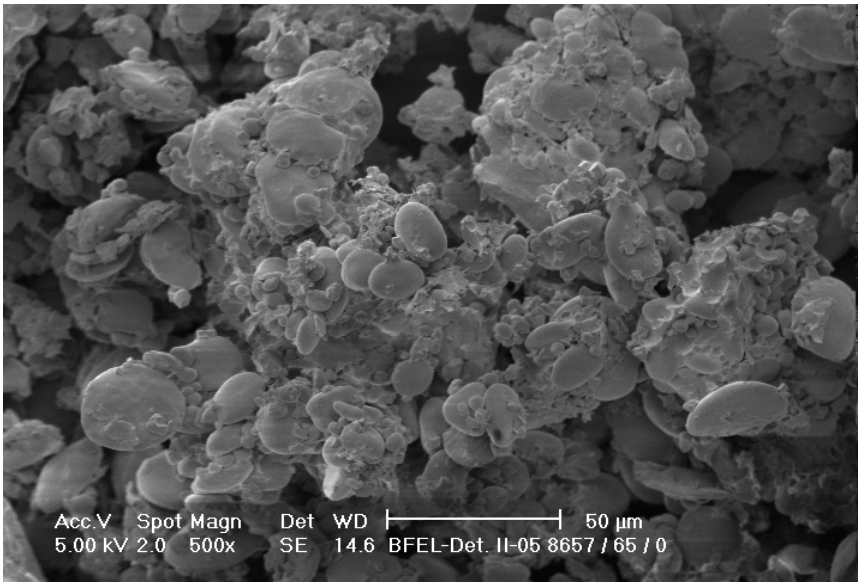


Abb. 74: Walzenmehl der Sorte Contra

Abb. 75: Walzenmehl der Sorte Akratos

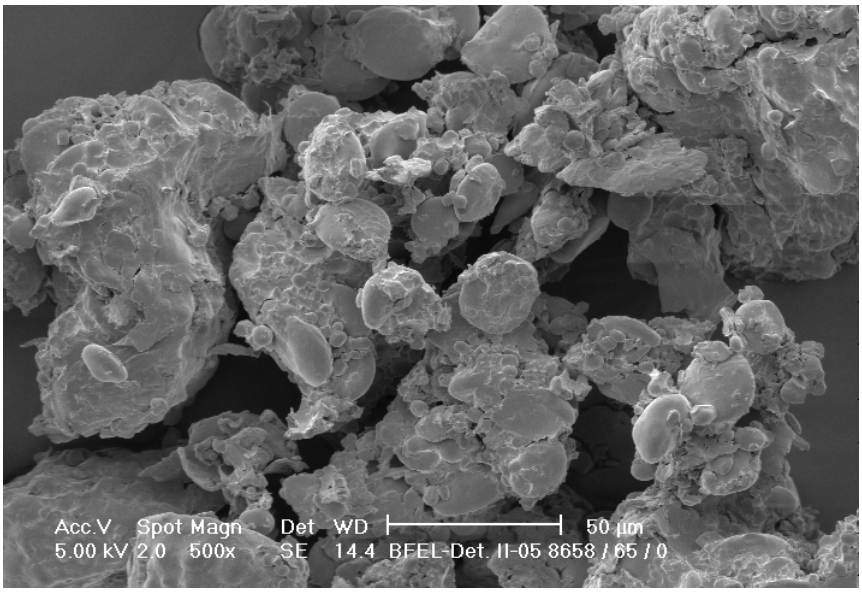


Abb. 76: Walzenmehl der Sorte Tarso

Die Aufnahmen der feinen Fraktionen der drei sortenreinen Weizenmehle mittels Rasterelektronenmikroskop (Abb. 77, 78 und 79) ließen die unterschiedlichen Anteile an herausgelösten Partikeln, z.B. der kleinen kugel- und linsenförmigen Stärkekörner, aus den umhüllenden Proteinplättchen sowie Zellwandresten gut erkennen. Durch den höheren Energieeintrag ins Mehl bei 110 m/s Prallgeschwindigkeit wurden die Proteinteilchen fast ganz von der Stärke abgetrennt und durch die niedrige Trenngrenze von 6 µm beim Windsichten sehr gut differenziert. Diese Fraktionen

wiesen einen wesentlich höheren Proteingehalt im Vergleich zu dem mit Walzen hergestellten Ausgangsmehl auf.

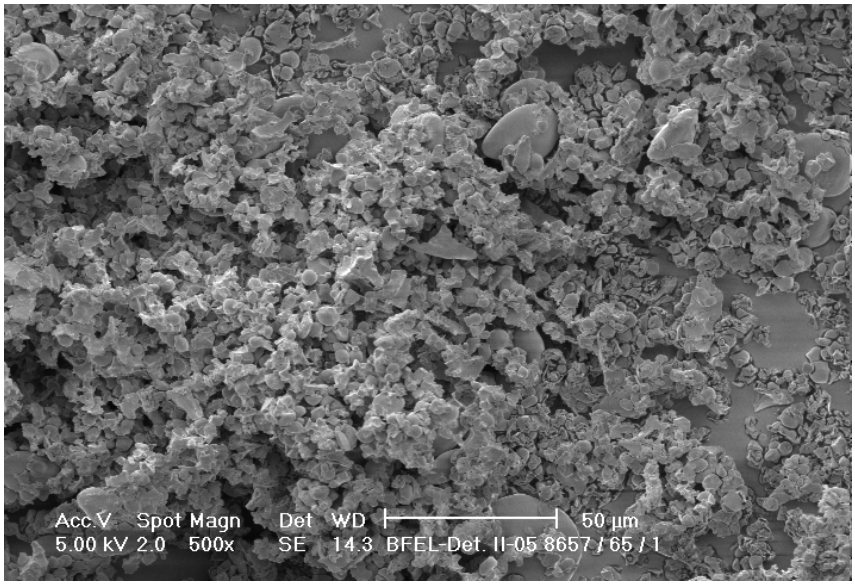


Abb. 77: Feine Fraktion der Sorte Contra

Die feine Fraktion des windgesichteten Prallmehles der Sorte Contra wies im Vergleich zu den Sorten Akratos und Tarso höhere Anteile an kleinkörnigen Stärken und feinen Proteinpartikeln auf (Abb. 77).

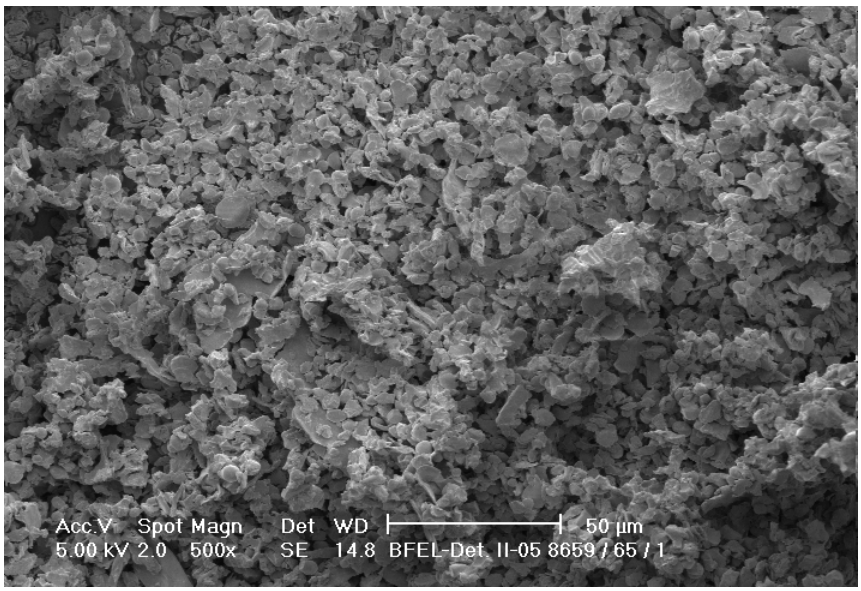


Abb. 78: Feine Fraktion der Sorte Akratos

Die feinen Fraktionen der windgesichteten Prallmehle der Sorten Akratos und Tarso erschienen als ein relativ homogenes Produkt im Vergleich zu den Ausgangsmehlen (Abb. 78 und 79). Bei der mikroskopischen Vergrößerung war zu erkennen, dass weniger Konglomerate vorlagen und die Fraktion überwiegend aus freier Stärke, Partikeln der Proteinmatrix und Zellwandresten bestand.

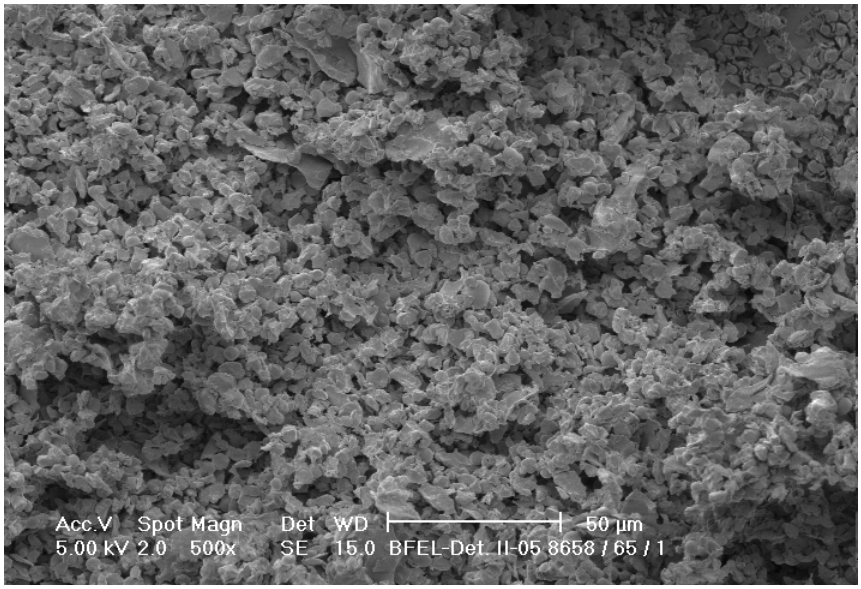


Abb. 79: Feine Fraktion der Sorte Tarso

Der Einfluss der Prallenergie war in den groben Fraktionen deutlicher zu erkennen. In Abbildungen 80, 81 und 82 sind höhere Anteile der Stärkekörner in freier Form und Reste von kleinen Konglomeraten im Gegensatz zum Walzenmehl zu sehen.

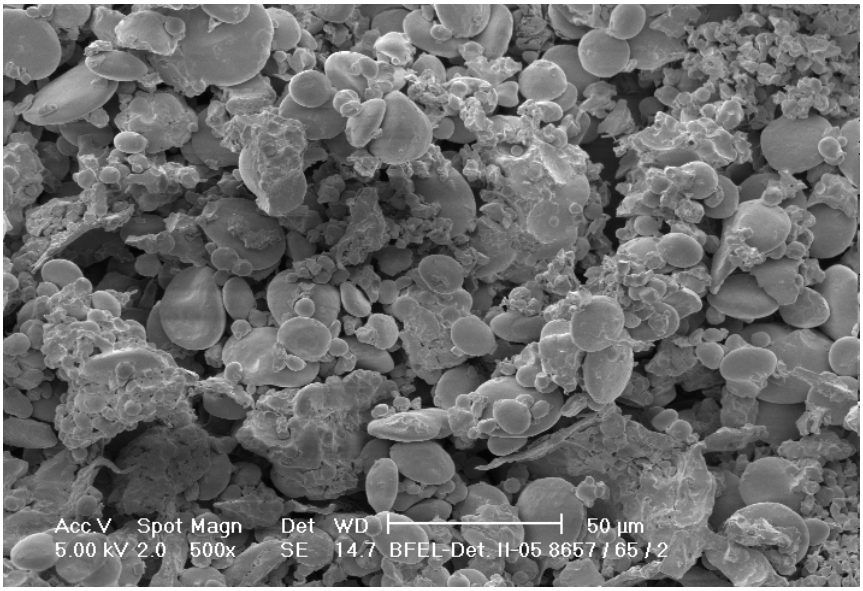


Abb. 80: Grobe Fraktion der Sorte Contra

Die grobe Fraktion des windgesichteten Prallmehles der Sorte Contra bestand nach fast vollkommener Auflösung der Zellverbände zu einem hohen Anteil aus freiliegender, großkörniger Stärke (Abb. 80).

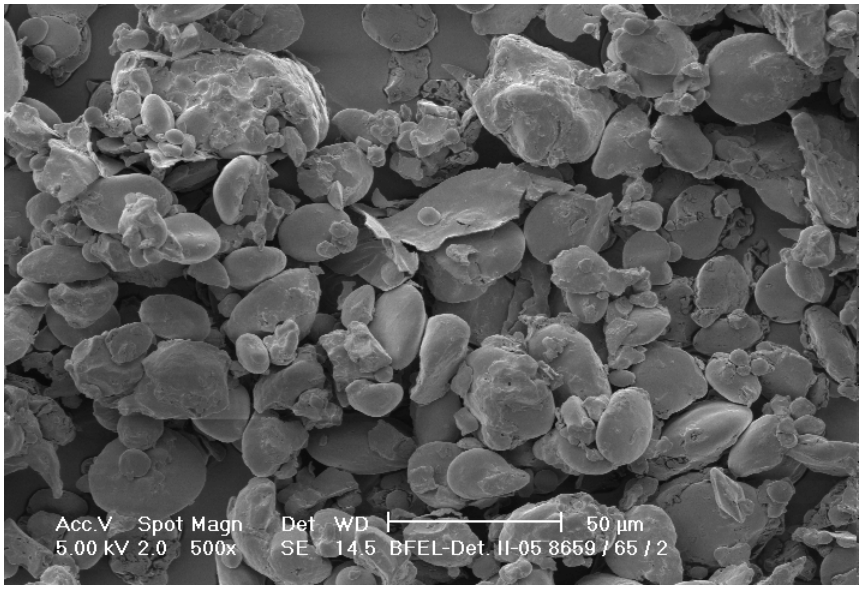


Abb. 81: Grobe Fraktion der Sorte Akratos

Die vorgeschaltete Prallung hatte besonders bei Mehlen aus hartem Weizen einen zusätzlichen Effekt auf den Zerkleinerungsgrad und die Zusammensetzung. Die groben Fraktionen der windgesichteten Prallmehle der Sorten Akratos und Tarso (Abb. 81 und 82) enthielten nur noch einen geringen Anteil an Zellverbänden. Dabei hatte sich der Anteil an freiliegender Stärke gegenüber den Walzenmehlen maßgeblich erhöht.

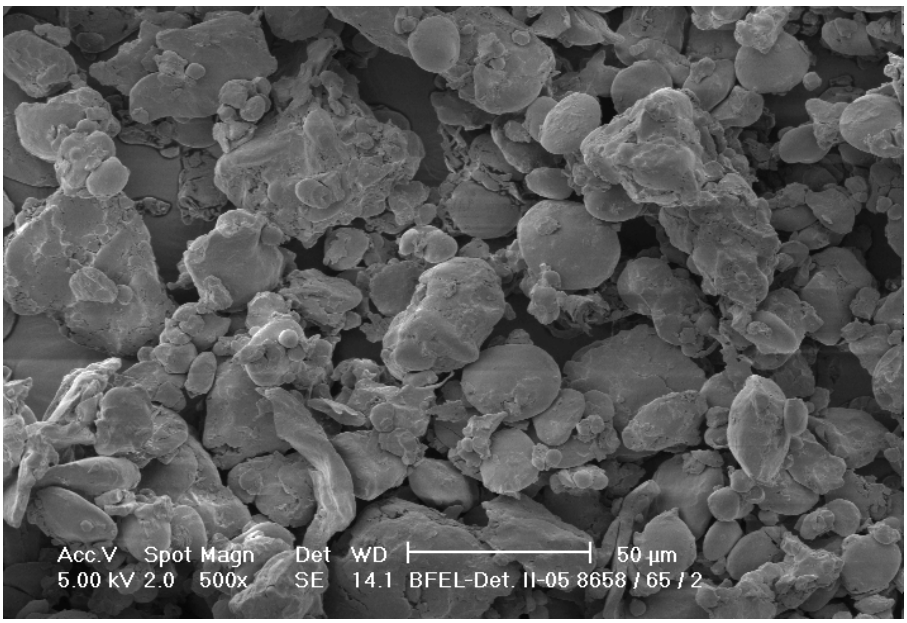


Abb. 82: Grobe Fraktion der Sorte Tarso

Die mikroskopischen Aufnahmen der groben Fraktionen zeigten Zellbruchstücke und Zellverbände, die kleiner als in den Ausgangsmehlen sind. Das unterstreicht ebenfalls die ausgeprägtere mechanische Desintegration des Endosperms bei der hohen Prallenergie. Dies wurde von den verringerten mittleren Korngrößen und den vergrößerten spezifischen Oberflächen der groben Fraktionen bestätigt.

5.2.3 Änderung der stofflichen Zusammensetzung der Mehlfraktionen

Die Verfahren der Prallzerkleinerung und Windsichtung hatten erwartungsgemäß nicht nur Einfluss auf die Korngrößenverteilung der Mehle, sondern auch auf die Zusammensetzung der Inhaltstoffe. Ein wesentliches Ziel der kombinierten Behandlung Prallzerkleinerung und Windsichtung bestand darin, die Ausgangsmehle in eine grobe Fraktion mit möglichst geringem Proteingehalt und in eine feine Fraktion mit möglichst hohem Proteingehalt zu separieren.
Im Gegensatz zu den Ausgangmehlen und den nachzerkleinerten Mehlen, die keine Veränderung in der stofflichen Zusammensetzung aufwiesen, waren durch das Windsichten und infolge der unterschiedlichen Strukturauflösung durch die Prallzerkleinerung beachtliche stoffliche Verschiebungen eingetreten (Tab. 10).

Tabelle 10: Inhaltsstoffzusammensetzung der Mehlfraktionen

Fraktion	Feuchte [%]	Asche [% i.Tr.]	Protein [% i.Tr.]	lösl.PR [% i.Tr.]	Gluten [% i.Tr.]	Stärke [% i.Tr.]
Contra WM	11,7	0,56	10,5	1,95	27,4	82,61
Contra Fein	8,5	0,82	24,2	3,00	51,0	67,09
Contra Grob	9,7	0,52	8,5	1,29	18,6	85,34
Akratos WM	13,7	0,55	10,8	2,00	26,5	82,64
Akratos Fein	8,2	1,26	26,9	3,13	55,0	55,74
Akratos Grob	9,9	0,48	9,4	1,51	22,2	83,55
Tarso WM	13,3	0,55	11,6	2,44	28,2	81,33
Tarso Fein	8,1	1,10	23,7	3,77	48,9	60,57
Tarso Grob	9,7	0,49	10,3	2,09	23,7	82,74

Durch die intensive Luftumspülung bei der kombinierten Prall- und Sichtwirkung kam es zu einem starken Feuchtigkeitsentzug in den gesichteten Mehlfraktionen bis auf etwa 8% Feuchtigkeit in den feinen Sichtfraktionen und auf etwa 10 % in den groben Sichtfraktionen.
Die Stärke- und Proteingehalte der gesichteten Fraktionen verhalten sich in etwa wie in der Literatur beschrieben.

Infolge der niedrigen Trenngrenze der Sichtung (etwa 6 µm) hatten die feinen Fraktionen, in denen auch kleine Stärkekörner abgeschieden wurden, die niedrigsten Stärkegehalte mit einer Abreicherung um etwa 15% - 25% bei den verschiedenen Weizensorten gegenüber den ungeprallten und ungesichteten Walzenmehlen.

In der groben Fraktion, mit der Hauptmenge an freiliegenden Stärkekörnern, lag der Stärkegehalt bei der weich strukturierten Weizensorte Contra infolge der besseren Strukturauflösung beim Prallen um etwa 3 % höher gegenüber dem Walzenmehl. So wies diese Fraktion, mit einem etwa 90 %igen Massenanteil, einen Stärkegehalt von ca. 85% auf. In den groben Fraktionen der hart strukturierten Weizensorten Tarso und Akratos erhöhte sich der Stärkegehalt um etwa 1 %. Aus den beiden Weizensorten konnten stärkeangereicherte grobe Fraktionen mit Anteilen um etwa 94 % mit Stärkegehalten von ca. 83 % gewonnen werden (Tab. 10).

Mit der intensiven Zerkleinerung wurden auch große Mengen der Zwickelproteine aus der Stärke–Protein–Matrix herausgelöst. Sie fielen als Feingut vor allem in den feinen Fraktionen an. Demzufolge waren die Gehalte des glutenbildenden Proteins dieser Fraktionen besonders hoch. Sie lieferten entsprechend hohe Feuchtkleberwerte. Da der Protein- und Glutengehalt eines sortenreinen Weizenmehles genotypisch verankert ist, zeigten die windgesichteten Feinfraktionen der Sorten Contra, Tarso und Akratos entsprechend Unterschiede (Tab. 10). Bei der Sichtung des geprallten Mehles der Sorte Contra ist eine feine Fraktion mit über 24 % Proteingehalt sowie 51 % Glutengehalt gewonnen worden. Während aus dem geprallten Mehl der Sorte Akratos eine feine Fraktion mit etwa 27 % Proteingehalt und 55 % Glutengehalt gewonnen werden konnte, lieferte die Sorte Tarso eine feine Fraktion mit etwa 24 % Proteingehalt und einem Glutengehalt um etwa 49 %.

Im Gegensatz zu den feinen Fraktionen zeigten die groben Fraktionen schwache Veränderungen der Protein- und Glutengehalte gegenüber den Walzenmehlen. Es wurde eine Abnahme der Protein- und Glutengehalte festgestellt, die bei der Sorte Contra ausgeprägter war. Hier konnte eine Senkung des Proteingehaltes um 2 % und des Feuchtglutengehaltes um etwa 9 % ermittelt werden. Bei den groben Fraktionen der Sorten Tarso und Akratos nahmen die Proteingehalte um nur etwa 1 % bzw. die Klebergehalte um etwa 5 % gegenüber den Ausgangsmehlen ab. Die bekannte Tatsache, dass die Protein- und Glutengehalte in einer positiven Korrelation zueinander stehen, wurde bestätigt.

Der Zusammenhang zwischen den Proteinanteilen und Stärkegehalten in den Ausgangsmehlen und in den windgesichteten Fraktionen der Sorten Contra, Akratos sowie Tarso ist in den Abbildungen 83, 84 und 85 dargestellt.

Mit abnehmendem Stärkegehalt und zunehmendem Gehalt an glutenbildenden Proteinen in den feinen Fraktionen wurde entsprechend ein Anstieg der salzwasserlöslichen Proteine auf 3,0 - 3,77 %, abhängig von der Weizensorte, beobachtet (Tab. 10). Dagegen wiesen die groben Fraktionen parallel zu steigendem Stärkegehalt und sinkendem Proteingehalt eine Abnahme des löslichen Proteins auf 1,29 - 2,09 % auf.

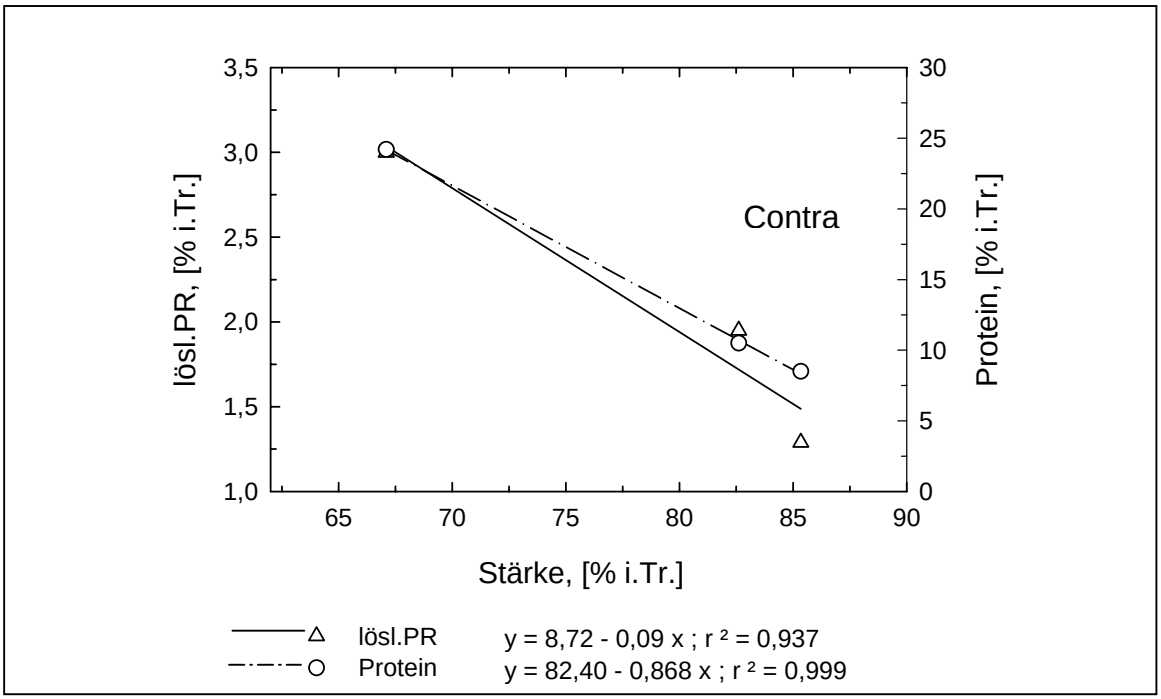


Abb. 83: Abhängigkeit der Proteinanteile vom Stärkegehalt bei der Sorte Contra

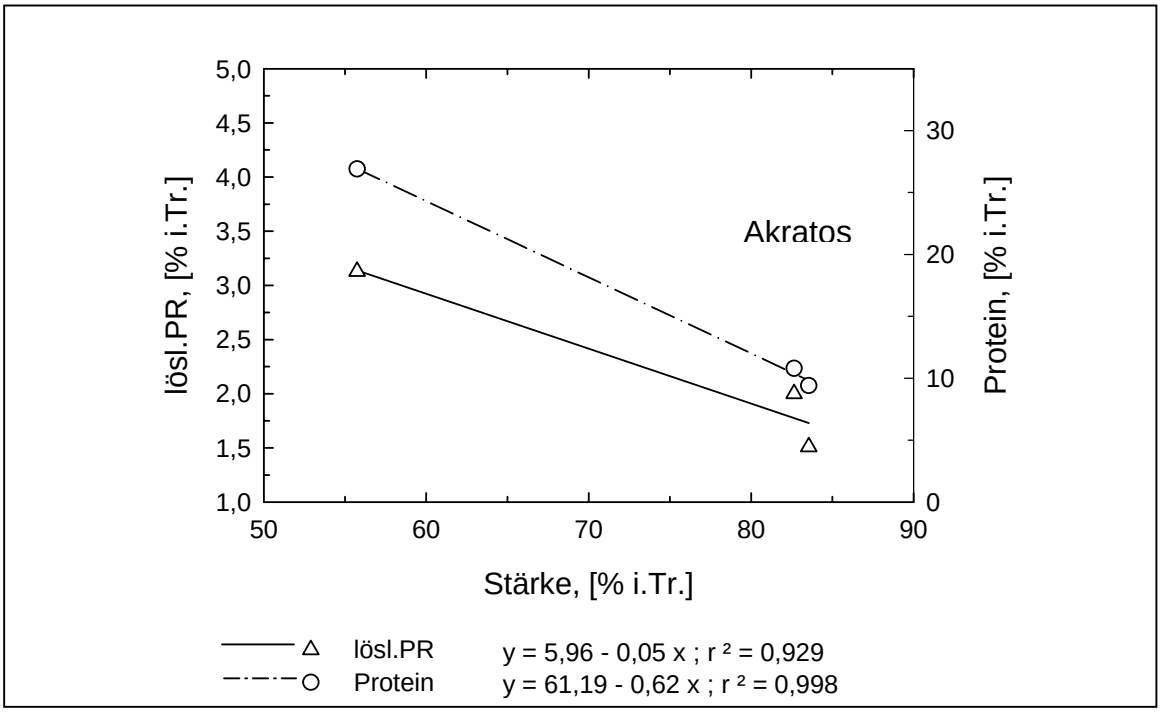


Abb. 84: Abhängigkeit der Proteinanteile vom Stärkegehalt bei der Sorte Akratos

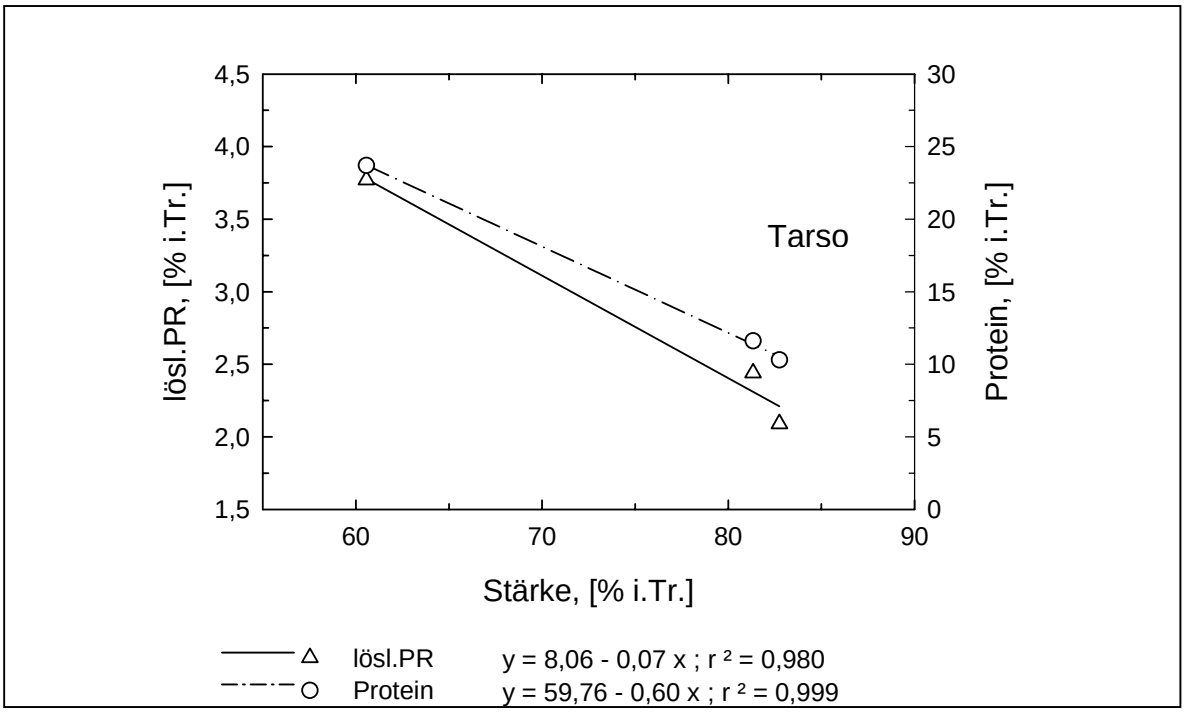


Abb. 85: Abhängigkeit der Proteinanteile vom Stärkegehalt bei der Sorte Tarso

Die Mineralstoffgehalte der Mehlfraktionen korrelierten positiv mit den Proteingehalten, weil sie nicht in den Stärkekörnern, sondern vorrangig innerhalb der Endospermzellwände und in der Proteinmatrix lokalisiert sind. So wiesen die feinen Fraktionen die höchsten Aschegehalte auf, die analog zu den Proteingehalten mit der Prallzerkleinerung und nachfolgenden Windsichtung anstiegen (Tab. 10). Den höchsten Mineralstoffwert erreichte die feine Fraktion aus der Weizensorte Akratos mit 1,26 %. Bei den groben Fraktionen stellte sich parallel zu den sinkenden Proteingehalten eine Abnahme der Mineralstoffgehalte auf 0,48 – 0,52 % bei den verschiedenen Sorten ein.

5.2.4 Funktionelle Eigenschaften der windgesichteten Mehlfraktionen

5.2.4.1 Stärkebeschädigung

Infolge der quantitativen veränderten Zusammensetzung ändern sich auch die Eigenschaften der gesichteten Fraktionen der Prallmehle. Die Funktionalitätsänderungen durch die Prallbehandlung und nachfolgende Windsichtung sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tab. 11: Eigenschaften der Mehlfraktionen

Fraktion	STB [% as is]	WBV [%]	VM [RVU]	FV [RVU]	SW [ml] (nach 10 min)	γ_{max}
Contra WM	1,5	83	223,50	368,50	19	1,000
Contra Fein	2,5	115	91,67	157,00	-*	0,497
Contra Grob	1,9	86	237,33	382,17	14	0,913
Akratos WM	6,5	100	193,58	419,75	26	0,515
Akratos Fein	10,7	188	41,17	122,25	56	0,268
Akratos Grob	8,5	104	201,25	439,83	17	0,415
Tarso WM	4,8	98	217,00	394,92	30	0,753
Tarso Fein	9,5	206	49,92	128,92	65	0,519
Tarso Grob	8,2	101	212,25	389,17	27	0,664

* - sedimentiert nicht

Die intensive doppelte Prallung der Mehle in der Sichtermühle bewirkte eine intensive Zerkleinerung der Mehlkörper. Gleichzeitig verursachte sie insbesondere bei den hart strukturierten Weizensorten einen hohen Stärkebeschädigungsgrad. Das Ausmaß der Stärkebeschädigung ist abhängig von der Stärkekorngröße und dem Haftprotein. Die kleinen Stärkekörner leisten den größeren Widerstand gegenüber der Zerkleinerung. Durch den festen Verbund der Stärkekörner mit der Proteinmatrix, was bei harter Kornstruktur perfekt ausgebildet ist, lässt sich die eingeleitete mechanische Energie leichter auf die Stärke übertragen als bei weichen Sorten. In den proteinangereicherten Fraktionen befinden sich vor allem kleine Stärkekörner. Kennzeichnend für die oben geschilderten Zusammenhänge war der ausgeprägt hohe Stärkebeschädigungsgrad bei den Feinfraktionen der hart strukturierten Sorten Akratos und Tarso, die eine enorme Zunahme auf 10,7 % bzw. auf 9,5 % gegenüber den Walzenmehlen zeigten. Der Stärkebeschädigungsgrad der feinen Fraktion der weich strukturierten Sorte Contra stieg auf 2,5 % an (Tab. 11).

Infolge der intensiveren vorgeschalteten Prallzerkleinerung wiesen die groben Fraktionen der Mehle höhere Stärkebeschädigung gegenüber den Ausgangsmehlen auf.

Erwartungsgemäß zeigte sie bei den Sorten Akratos und Tarso höhere Werte (8,5 % bzw. 8,2 %) im Vergleich zu der Sorte Contra (1,9 %).

5.2.4.2 Wasserbindevermögen

Interessant war der unterschiedliche Einfluss der Inhaltstoffzusammensetzung, Partikelfeinheit und Stärkebeschädigung auf das Wasserbindevermögen der Mehlfraktionen. So wiesen die Feinfraktionen der hart strukturierten Sorten Akratos und Tarso eine doppelte Zunahme des Wasserbindevermögens auf 188 % bzw. auf 206 % gegenüber den Walzenmehlen auf. Die Werte des Wasserbindevermögens der weich strukturierten Sorte Contra stiegen auf 115 % gegenüber dem Walzenmehl an (Tab. 11).

Außer der hohen Stärkebeschädigung wirkten die angehobenen Protein- und Glutengehalte sowie die spezifischen Oberflächen auf die Wasserbindung.

Im Laufe der Bestimmung des Wasserbindevermögens der feinen Sichtfraktionen wurde im Zentrifugenglas eine spezifisch leichtere obere Schicht von etwa 0,5 ml beobachtet. Diese Schicht dürfte vorwiegend die freien Proteine enthalten, aber auch kleine Endospermbruchstücke. Es wurde auch von Banafa (2004) beschrieben, dass durch Prallen bzw. Windsichtung der Mehle bei einer enormen Steigerung des Proteingehaltes ebenfalls diese Schichtung im flüssigen Medium auftritt.

Im Gegensatz zu den feinen windgesichteten Fraktionen wies das Wasserbindevermögen der groben Fraktionen eine geringfügige Tendenz der ansteigenden Wasserbindung auf. Die Werte liegen um etwa 3-4% über den WBV-Werten der Walzenmehle (Tab. 11). Der gleichzeitig abnehmende Protein- und Glutengehalt zeigte ebenfalls seine Wirkung in der schwächeren Tendenz der zunehmenden Wasserbindung.

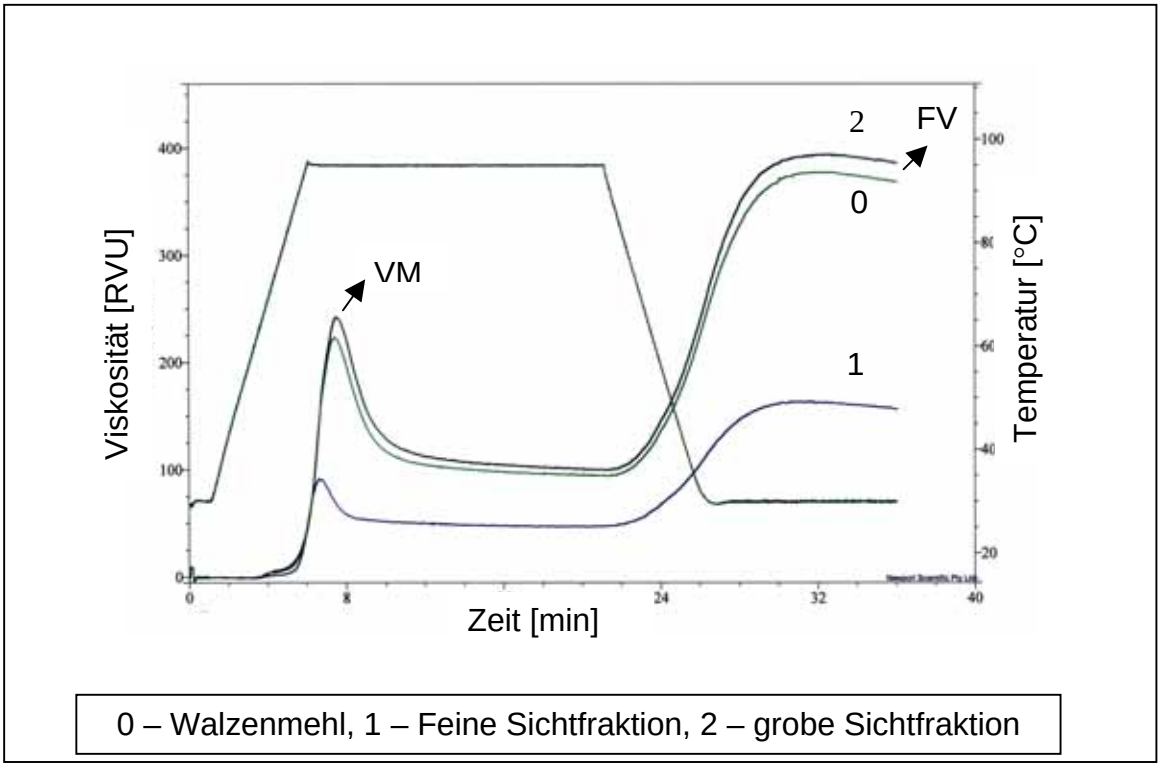
Die Untersuchungsergebnisse belegen, dass das Wasserbindevermögen der unterschiedlich stofflich zusammengesetzten gesichteten Fraktionen vorrangig vom Protein- bzw. Glutengehalt abhing und dabei die Höhe der Stärkebeschädigung nachgeordnet war. Problematisch an der Methodik der Wasserbindung ist die möglicherweise störende Funktionalität der Glutenaggregation. Diese dürfte bei dem hohen Wasserüberschuss und der nicht ausgeübten mechanischen Energieeinleitung (kein Kneten, kein Mixen) nicht eintreten. Dennoch ist davon auszugehen, dass bei hoher Aggregationsbereitschaft der Kleberproteine das Ergebnis der Wasserbindung von Mehl

nicht nur von den Stärkeeigenschaften bestimmt wird. Eine Kleberaggregation führt stets zur erhöhten Wasserbindung.

5.2.4.3 Viskositäts – Eigenschaften

Aufgrund der wesentlichen Stoffverschiebung in den feinen und groben Mehlfraktionen durch die Prallzerkleinerung und nachfolgende Windsichtung wurden analog zu den Prallmehlen die Viskositätseigenschaften dieser Fraktionen mittels RVA untersucht.

In Abbildung 86 sind die Kurvenverläufe des Walzenmehles und der windgesichteten Mehlfraktionen der Weizensorte Contra dargestellt. Es zeigte sich, dass die grobe Fraktion eine deutlich höhere Viskosität liefert als die feine Fraktion. Dabei lagen das Verkleisterungsmaximum und die Finalviskosität gering über den Werten des Walzenmehles (Tab. 11). Die höhere Viskosität war auf den höheren Stärkegehalt zurückzuführen.



0 – Walzenmehl, 1 – Feine Sichtfraktion, 2 – grobe Sichtfraktion

Abb. 86: Verkleisterungsmaximum (VM) und Finalviskosität (FV) der Stärke im Ausgangsmehl und in den Sichtfraktionen der Weizensorte Contra

Die proteinangereicherte Sichtfraktion der Sorte Akratos (Abb. 87) zeigte wie bei Contra auf Grund des niedrigen Stärkegehaltes deutlich abnehmende Viskositäts – Eigenschaften. Kennzeichnend für die Viskosität der groben Fraktion waren die geringfügigen Unterschiede gegenüber der Viskosität des Walzenmehles. Hier war die Verschiebung des Stärkegehaltes nur gering.

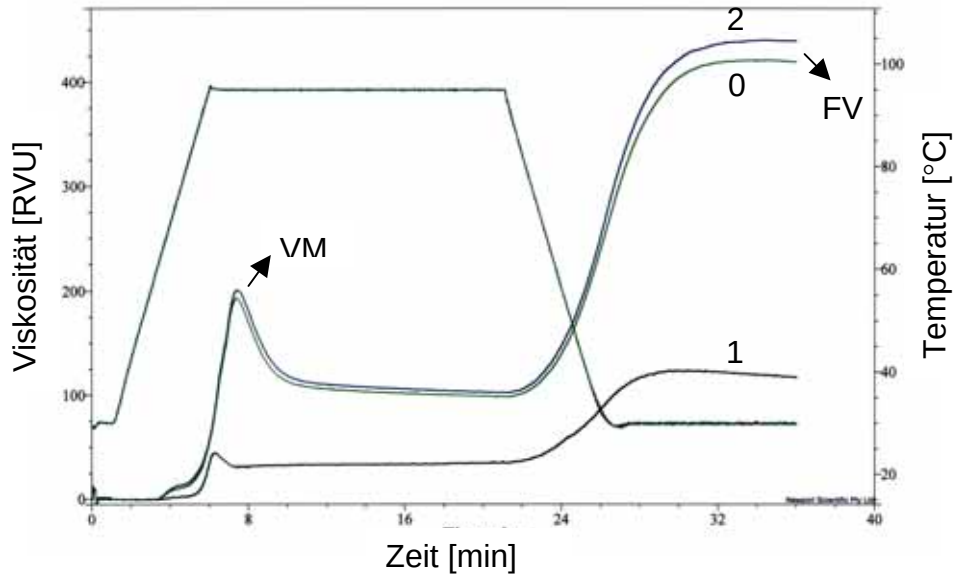


Abb. 87: Verkleisterungsmaximum (VM) und Finalviskosität (FV) der Stärke im Ausgangsmehl und in den Sichtfraktionen der Weizensorte Akratos

Erwartungsgemäß lag die Messkurve der proteinangereicherten Fraktion der Sorte Tarso auf einem niedrigen Niveau (Abb. 88). Das Verkleisterungsmaximum und die Finalviskosität der proteinabgereicherten Fraktion zeigten fast keine Veränderungen im Vergleich zum Ausgangmehl.

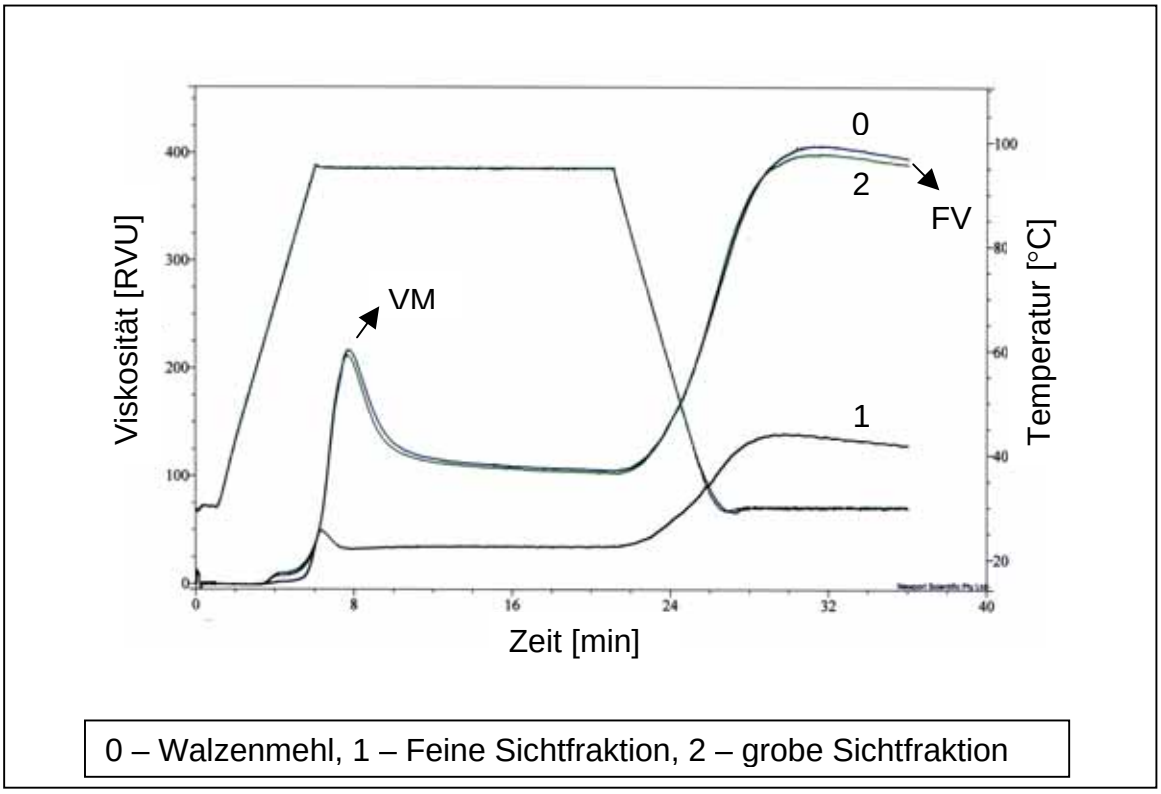


Abb. 88: Verkleisterungsmaximum (VM) und Finalviskosität (FV) der Stärke im Ausgangsmehl und in den Sichtfraktionen der Weizensorte Tarso

Durch Prallen und Windsichten eines Mehles können Mehlfraktionen mit unterschiedlichen Viskositäten gewonnen und in verschiedenen Anwendungsgebieten eingesetzt werden. Die höheren Viskositäten ergeben optimale Hafteigenschaften von Mehlen. In Abhängigkeit vom Verwendungszweck kann die Viskosität aber auch durch einen hohen Proteingehalt verringert werden (Rohrlich u. Müller, 1969).

5.2.4.4 Sedimentationswert

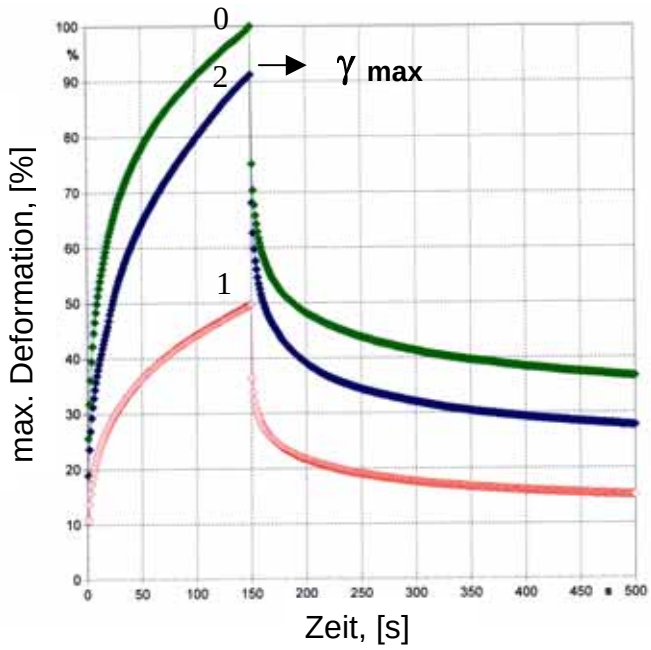
Analog zu den Mehlen wurde der Sedimentationswert der Mehlfraktionen untersucht. Wegen des hohen Anteils kleiner Partikelgrößen in den feinen windgesichteten Fraktionen war die Bestimmung des Sedimentationswertes mittels der Standardmethode nicht möglich. Aus diesem Grund ist die Methode modifiziert worden. Die Werte aller Walzenmehle und Mehlfraktionen wurden nach veränderter Sedimentationszeit von 10 Minuten abgelesen.

Trotzdem wurde bei der feinen Fraktion der weichen Sorte Contra keine Sedimentation beobachtet (Tab. 11). Die Feinpartikel blieben in der Schwebe, was auf eine Angleichung ihrer Auftriebskraft und Sedimentationskraft zurückzuführen ist.
Im Gegensatz zur weich strukturierten Weizensorte wiesen die feinen Fraktionen der hart strukturierten Weizensorte eine mehr als doppelte Steigerung des Sedimentationswertes auf, insbesonders bei der Sorte Akratos. Hier wurde eine Zusammenwirkung von Kornhärte, Gutfeinheit, Protein- und Glutengehalt und Stärkebeschädigung auf den Sedimentationswert der Mehlfraktionen beobachtet. Infolge des hohen Stärkebeschädigungsgrades in Kombination mit dem hohen Protein- und Glutengehalt bzw. hohen Wasserbindevermögen erreichten die feinen Fraktionen aus Akratos und Tarso Sedimentationswerte von 56 ml und 65 ml. Während der Bestimmung des Sedimentationswertes dieser feinen Fraktionen wurde, analog zur Bestimmung des Wasserbindevermögens, eine aufschwimmende Schichtung von etwa 2 ml festgestellt. In dieser Schicht befanden sich kleinpartikuläre Mehlbestandteile, deren Auftriebskraft über der Sedimentationskraft, die die Teilchen zum Boden zieht, lag. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von Nierle u. Kersting (1999) beobachtet. Sie stellten fest, dass die feinen Fraktionen eines windgesichteten Mehles nach Schütteln und Sedimentieren wesentliche Mengen Überstand aufwiesen.
Aufgrund der abnehmenden Protein- und Glutengehalte wiesen die groben Fraktionen der Sorten Contra, Akratos und Tarso auf eine Senkung des Sedimentationswertes gegenüber den Ausgangsmehlen hin. Hier lag auch ein grobdisperses System vor, das eine nicht zu unterschätzende Rolle spielt.

5.2.4.5 Rheologische Eigenschaften des Glutens

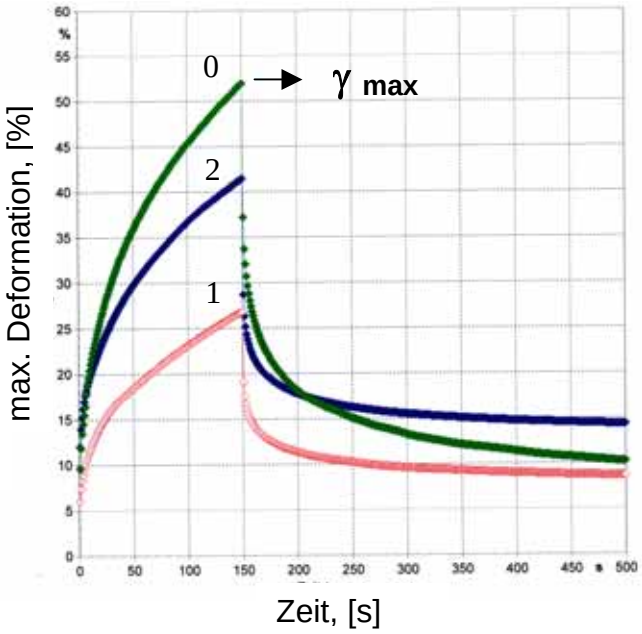
Bei der Bestimmung der Deformierbarkeit des Glutens der groben und feinen Sichtfraktionen der Sorten Contra, Akratos und Tarso (Abb. 89, 90 und 91) wurde eine Verschiebung der rheologischen Eigenschaften des Klebers festgestellt. Die maximale Deformation (γ_{max}) der feinen Mehlfraktionen nahm signifikant ab (Tab.11). Das entsprach einer wesentlichen Verfestigung des Klebers, die mit dem steigenden Protein- und Glutengehalt und der positiven Prallwirkung gut korrelierte.
Obwohl in den groben Fraktionen die Anteile an Protein und Gluten niedriger waren, ergab sich eine niedrigere Deformation des Klebers, was auf eine höhere Elastizität, bzw. eine Verfestigung des Klebers zurückzuführen war. Als Grund kann die positive

Wirkung der vorausgehenden mechanischen Modifikation auf die Kleberaggregation-seigenschaften angesehen werden.



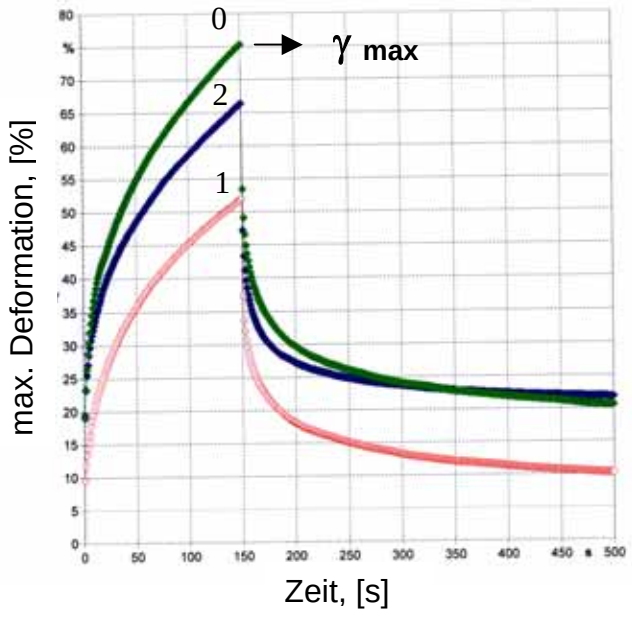
0 – Walzenmehl, 1 – Feine Sichtrfaktion, 2 – grobe Sichtfraktion

Abb 89: Maximale Deformation (γ_{max}) des Klebers von Walzenmehl und Sichtfraktionen der Weizensorte Contra



0 – Walzenmehl, 1 – Feine Sichtrfaktion, 2 – grobe Sichtfraktion

Abb 90: Maximale Deformation (γ_{max}) des Klebers von Walzenmehl und Sichtfraktionen der Weizensorte Akratos



0 – Walzenmehl, 1 – Feine Sichtrfaktion, 2 – grobe Sichtfraktion

Abb 91: Maximale Deformation (γ_{max}) des Klebers von Walzenmehl und Sichtfraktionen der Weizensorte Tarso

5.2.5 Schlussfolgerungen zu den Eigenschaften der windgesichteten Mehlfraktionen

Der Einfluss der Prallzerkleinerung auf den Feingutanteil im Mehl spielte für die später durchzuführende Windsichtung eine wichtige Rolle. Durch die der Windsichtung vorgeschaltete Prallvermahlung veränderte sich die sortenspezifische Feinheit an Mehlen aus Weizen unterschiedlicher Endospermhärte. Demzufolge führte die Trennung der Mehle durch Windsichtung bei einer weich strukturierten Weizensorte zu einem Feingutanteil, der nahezu fast doppelt so hoch lag wie bei einer hart strukturierten Weizensorte.

Mit der intensiven Zerkleinerung wurden auch große Mengen der Zwickelproteine aus der Stärke–Protein–Matrix herausgelöst. Sie fielen als Feingut vor allem in den feinen Fraktionen an. Demzufolge waren Proteingehalte dieser Fraktionen besonders hoch gegenüber denen der nicht geprallten und nicht gesichteten Mehle. Sie lieferten entsprechend hohe Feuchtkleberwerte. Ein besonders hoher Proteingehalt im Ausgangsmehl wirkte sich naturgemäß positiv auf die Höhe des Proteingehaltes in der feinen Fraktion aus. Im Gegensatz zu den feinen Fraktionen zeigten die groben Fraktionen eine Abnahme der Protein- bzw. Glutengehalte, die bei der weich strukturierten Sorte stärker ausgeprägt war. Parallel mit der Proteinanreicherung lieferten die feinen Fraktionen die niedrigsten Stärkegehalte. In den groben Fraktionen erhöhte sich der Stärkegehalt, was bei der weichen Weizensorte deutlicher war. Bedingt durch die Reservestoffeinlagerung in der Wachstumsphase des Korns verhalten sich Stärke- und Proteingehalt gegenläufig. Körner mit geringerem Proteingehalt haben einen höheren Stärkegehalt.

Mit abnehmendem Stärkegehalt und zunehmendem Gehalt an glutenbildenden Proteinen in den feinen Fraktionen wurde entsprechend ein Anstieg der salzwasserlöslichen Proteine abhängig von der Weizensorte beobachtet. Dagegen wiesen die groben Fraktionen parallel mit steigendem Stärkegehalt und sinkendem Proteingehalt eine Abnahme der löslichen Proteine auf. Die Mineralstoffgehalte der Mehlfraktionen korrelierten positiv mit den Proteingehalten. Die feinen Mehlfraktionen hatten darüber hinaus höhere Mineralstoffgehalte, die bei den Mehlen aus härteren Weizen im Trend über 1 % liegen konnten.

Die Aufnahmen mittels Rasterelektronenmikroskop von den feinen Fraktionen der windgesichteten Prallmehle wiesen auf ein relativ homogenes Produkt im Gegensatz

zu den Ausgangsmehlen hin. In den groben Fraktionen waren höhere Anteile der Stärkekörner in freier Form und Reste von kleinen Konglomeraten zu erkennen.

Mit der Prallintensität wurden größere Anteile der Stärkekörner aus der verkitteten Proteinmatrix gelöst. Dieser Vorgang führte zwangsläufig zu einer zusätzlichen Beschädigung der Stärkekörner und war von der Kornhärte abhängig. Nicht nur die Stärkekörner der feinen Fraktionen wurden dadurch beeinträchtigt, auch die Stärkekörner der groben Fraktionen wurden beim Prallen beschädigt. Erwartungsgemäß wurde insbesondere bei den hart strukturierten Weizensorten ein höherer Stärkebeschädigungsgrad verursacht. Demzufolge war das Wasserbindevermögen der feinen Sichtfraktionen wesentlich höher im Vergleich zu den Walzenmehlen und zu den groben Sichtfraktionen, was bei den hart strukturierten Sorten besonders ausgeprägt war.

Durch die Verschiebung des Verhältnisses der Mehlkomponenten Protein und Stärke sowie des Anteils beschädigter Stärkekörner unterschieden sich die Viskositäten der feinen und groben Fraktionen deutlich. Demzufolge wurde eine Abnahme der Verkleisterungsmaxima und der Finalviskositäten bei den Feinfraktionen, bzw. eine Zunahme bei den Grobfraktionen im Vergleich zu denjenigen der Walzenmehle beobachtet.

Die rheologischen Untersuchungen am Gluten der feinen und groben Fraktionen zeigten den starken Einfluss der Verschiebung von Proteinfraktionen sowie der vorgeschalteten Prallung. Demzufolge wies die maximale Deformation des Klebers der feinen Mehlfraktionen eine wesentliche Verfestigung des Klebers auf. Obwohl in den groben Fraktionen die Anteile an Protein und Gluten niedriger waren, ergaben sich auch elastischere und festere Glutene gegenüber den Walzenmehlen, was mit der positiven Prallwirkung gut korrelierte.

Die Untersuchungsergebnisse bestätigen, dass die Trennung der Prallmehle in verschiedene Fraktionen zu einer Inhaltstoffverschiebung führt und daraus resultierend zu abweichenden Funktionseigenschaften der Fraktionen. Diese Wirkungen sind sortenabhängig.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit steht die Wirkung der mechanischen Modifizierung einschließlich der Windsichtung auf die Stoffzusammensetzung von Typenmehlen sowie auf die Veränderungen der Stärke- und Gluteneigenschaften unterschiedlicher Weizensorten im Mittelpunkt des Interesses.

Aufgrund der unterschiedlichen Kornhärte und des unterschiedlichen Proteingehaltes wurden die Weichweizensorten Contra (weiche Kornstruktur und niedriger Proteingehalt), Akratos (harte Kornstruktur und niedriger Proteingehalt) und Tarso (harte Kornstruktur und hoher Proteingehalt) verwendet. Zur sortenreinen Mehlgewinnung nach herkömmlichen Verfahren wurde ein Mahlautomat eingesetzt, mit dem es möglich war, Typenmehle mit einem Aschegehalt von 0,55% i.Tr. (Type 550) herzustellen. Die Mehle wurden nachfolgend in einer Sichtermühle mit durch statistische Versuchspläne variierten minimalen, mittleren und maximalen Einstellungen der Dosierschnecken-Drehzahl (20-200 min^{-1}), Sichtrad-Drehzahl (2000-3000 min^{-1}) und Umfangsgeschwindigkeit (60-110 m/s) ein- und zweistufig geprallt. Anschließend wurden die zweistufig geprallten Mehle in einem Windsichter 50 ATP in feine und grobe Fraktionen gesichtet. Die Trennung wurde mit einer Dosierschnecken-Drehzahl von 70 min^{-1}, Sichtrad-Drehzahl von 15 000 min^{-1} und einem Luftgesamtvolumenstrom von 80 m^3/h durchgeführt.

Die ein- und zweistufige Prallzerkleinerung von Weizenmehl der Type 550 in der Sichtermühle führte zu einer Zunahme des Feingutanteiles um das 2-fache bei dem weichen Weizen und um das 3 bis 4-fache bei den harten Weizen gegenüber den Walzenmehlen. So stieg der Beschädigungsgrad der Stärkekörner eines Mehles aus hartem Weizen (ca. 8-10 %) stärker an, im Vergleich zum Mehl aus weichem Weizen (ca. 2 %). Demzufolge deuteten die Prallmehle der weich strukturierten Sorte höhere Werte der Stärke-Umwandlungswärme an (ca. 7,4-8,3 J/g), im Vergleich zu den Prallmehlen der hart strukturierten Sorten (ca. 6,3-7,4 J/g), die partiell ihre übermolekulare Struktur während der mechanischen Beanspruchung verloren haben. Darüber hinaus wurden ein höheres Wasserbindevermögen der Prallmehle und niedrigere Viskositäten der Mehlstärke bewirkt.

Mittels Prallverfahren wurden die spezifischen Eigenschaften des Klebers modifiziert. Die Senkung der Deformations-Beanspruchungswerte des Glutens auf das etwa 2 bis 3-fache ermöglichte eine Verfestigung des Glutens und damit eine Verbesserung

der Kleberaggregationseigenschaften, was bei der weich strukturierten Sorte deutlicher ausgeprägt war. Gleichzeitig bewirkte die zunehmende Prallintensität einen Anstieg des Feuchtglutens der weich strukturierten Sorte um etwa 5 % und eine leichte Abnahme bei den hart strukturierten Sorten um etwa 1-2 % gegenüber den Ausgangsmehlen. Ursache für diese Abnahme könnten Verluste während der Kleberauswaschung sein. Durch die mechanisch modifizierten Stärke- und Klebereigenschaften ergab sich eine Veränderung der Knet- und Dehnungseigenschaften der Teige sowie der Backeigenschaften der Prallmehle.

Die statistischen Auswertungen der variierten Maschinenparameter der ein- und zweistufigen Prallenzerkleinerung ergaben, dass die Verschiebung der funktionellen Mehleigenschaften mittels Prallen in einer Sichtermühle nicht nur von den Eigenschaften des Mahlgutes und von der Umfangsgeschwindigkeit abhängig ist, sondern auch von der Dosierung und der Sichtrad-Drehzahl.

Die niedrige Trenngrenze der Windsichtung (etwa 6 µm) der zweistufig geprallten Mehle führte bei der weich strukturierten Weizensorte zu einem Feingutanteil, der nahezu fast doppelt so hoch lag (ca. 10%) im Vergleich zur hart strukturierten Weizensorte (ca. 6%). Die gewonnen Feinfraktionen hatten etwa 24-27 % Protein und 49-55 % Gluten, was eine Anreicherung von etwa 12-16 % Protein sowie etwa 20-29 % Gluten bezogen auf die Ausgangsmehle bedeutet. Die Grobfraktionen zeigten je nach Weizensorte eine Stärkeanreicherung um etwa 1-3 %, wobei die weich strukturierte Sorte über 85 % Stärkegehalt erreichte. Die Mineralstoffgehalte der Mehlfraktionen korrelierten positiv mit den Proteingehalten, weil sie vorrangig innerhalb der Endospermzellen in der Proteinmatrix lokalisiert sind. Die feinen Mehlfraktionen hatten darüber hinaus höhere Mineralstoffgehalte, die bei den Mehlen aus härteren Weizen im Trend über 1,2 % erreichten.

Infolge der hohen mechanischen Stärkebeschädigung erhöhte sich das Wasserbindevermögen der Sichtfraktionen, was bei den feinen Fraktionen der hart strukturierten Sorten besonders ausgeprägt war (auf 188-206 %). Durch die Verschiebung der Mengenverhältnisse von Stärke und Protein sowie der Anteile beschädigter Stärkekörner wurde eine Abnahme der Viskositäten bei den Feinfraktionen, bzw. eine Zunahme bei den Grobfraktionen im Vergleich zu den eingesetzten Walzenmehlen beobachtet. Die erhöhte Kleberverfestigung der feinen und groben Fraktionen zeigte den ausgeprägten Einfluss der Proteinverschiebung sowie der vorangegangenen Prallung.

Insgesamt zeigten die Untersuchungsergebnisse, dass die mechanische Modifizierung von Walzenmehlen durch Prallzerkleinerung mit weitestgehender Strukturauflösung des Mehlkörpers in Protein und Stärke und nachfolgender Windsichtung in verschiedene Fraktionen die ursprüngliche Qualität der Mehle verändert, auch wenn die Mehleigenschaften eines Weizens im hohen Grade von der Weizensorte abhängen. Durch die gewonnenen Erkenntnisse können die in der Sorte verankerten technologisch-funktionellen Eigenschaften so eingestellt werden, dass entsprechende Mahlerzeugnisse erweiterte Anforderungen erfüllen.

7. Literaturverzeichnis

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

Banafa, W.
Einfluss der Prallzerkleinerung und Windsichtung auf die stoffliche Zusammensetzung und Verarbeitungseigenschaften von Weizenmehlen
Dissertation (2004), TU-Berlin

Barlow, K. K., Buttrose, M. S., Simmonds, D. H., Vesk, M.
The nature of the starch-protein interface in wheat endosperm
American Association of Cereal Chemists 50(1973), 443-454

Becker, G., Acker, L.
Handbuch der Stärke
Die Lipide der Getreidestärken, Band VI-5
Paul Parey, Berlin und Hamburg 1976

Belderok, B., Mesdag, J., Donner, D. A. (Hrsg.)
Bread making quality of wheat
A century of breeding in Europe, Dordrecht, Kluwer Academic Publ. (2000), 3

Belitz,H.-D., Dirndorfer, M., Kim, J.-J-, Seilmeier, W., Werbeck, U., Wieser, H.
Kleberproteine des Weizens
Diskussionstagung.
Forschungskreis der Ernährungsindustrie 47(1989), 145-171

Bloksma, A.H.
Thiol and Disulfide groups in dough rheology
Cereal Chem 52(1975), 170r-183r

Bode, J, Degant, O., Schwechten, D.
Steigerung der Wasseraufnahmefähigkeit von Weizenmehl durch Attritionsbehandlung
Getreide Mehl und Brot 55(2001)5, 278-285

Bonjean, A. P., Angus, W.J. (Hrsg.)
The world wheat book
A history of wheat breeding, Paris, Lavoisier Publishing 2001

Bundessortenamt – BSA (Hrsg.)
Beschreibende Sortenliste: Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen (grobkörnig), Hackfrüchte (außer Kartoffeln)
Verlag: Landbuch Verlagsgesellschaft GmbH, Hannover 2003

Bundessortenamt – BSA (Hrsg.)
Beschreibende Sortenliste: Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen (grobkörnig), Hackfrüchte (außer Kartoffeln)
Verlag: Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, Hannover 2005

Bushuk, W., Bekes, F., McMaster, G.J., Zawistowska, U.
Kohlenhydrate und Lipidkomplexe mit Proteinen im Kleber
Getreide Mehl und Brot 39(1985)2, 35-37

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

Dambroth, M.
CLB Chemie f. Labor u. Betrieb 37(1986), 100-103

D´Appolonia, B. L., Kim, S. K.
Wheat flour pentosans
The Bakers Digest 50(1976)6, 45-49

Degant, O.
Neue entwickelte Prallmühlen und Windsichtungen in der Getreideverarbeitung
Getreide Mehl und Brot 50(1996)3, 164-166

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

Dexter, J. E., Preston, K.R., Martin, D.G., Gander, E.J.
The effect of protein content and starch damage on the physical dough Properties and bread making quality of canadian durum wheat
Journal of Cereal Science 20(1994), 139-151

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

Eberstein, K., Höpcke, R., Konieczny-Janda, G., Stute, R.
DSC- Untersuchungen an Stärke (DSC Investigations of Starches)
Starch/Stärke 32(1980)12, 397-404

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

EU-VO 228/67
Bestimmung des Stärkegehalts von Kleie und Mischfuttermitteln, sowie die Denaturierung von Mehl aus Maniok und anderen Wurzeln
Amtsblatt Nr. 136(1967), 2925 - 2928

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

Ewart, J.A.D.
Re-examination of the linear glutenin hypothesis
J. Sci. Fd Agric. 28(1977), 191-199

Ewart, J.A.D.
Glutenin and dough tenacity
J. Sci. Fd Agric. 29(1978), 551-556

Freund, K., Handreck, B.
Untersuchungen zur selektiven Prallzerkleinerung von Weizen
Mühle+Mischfuttertechnik 128(1991)17, 207-210

Friedrich, H.P., Handreck, B.
Einsatz von Stiftmühlen im Vermahlungsdiagramm von Weizen
Die Mühle+Mischfuttertechnik 127(1990)5, 173-275

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

Grosch, W., Wieser, H.
Redox reactions in wheat dough as affected by ascorbic acid
Journal of Cereal Science 29(1999)1, 1-16

Handreck, B., Banafa, B.
Feinstvermahlung und Windsichtung von Weizenmehlen
Mühle+Mischfutter 140(2003)10, 295-301

Handreck, B., Pötschke, L.
Vermahlung von Weizengrieß der 1. Qualitätsstufe in Prallmühlen unterschiedlicher Wirkprinzipe
Mühle+Mischfuttertechnik 132(1995)29, 479-483

Handreck, B., Pötschke, L.
Einfluss der Prallzerkleinerung und Mehlqualität bei der Vermahlung von Dunsten aus unterschiedlichen Weizensorten
Getreide Mehl und Brot 50(1996)3, 159-163

Heideker, H.-T., Schubert, H.
Anreicherung pflanzlicher Inhaltsstoffe durch selektives Trockenzerkleinern und anschließendes Klassieren
Starch/Stärke 43(1991)2, 47-52

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

Höhne G.
Mikrokalorimetrie. – in: Analytiker-Taschenbuch Bd. 4,
Hrsg.: Fersenius W., Günzler H., Huber W., Lüderwald I. und Tölg G.,
Springer, Berlin (1984), 107 – 121

ICC Internationale Gesellschaft für Getreidewissenschaft und –technologie
Standardmethoden, Wien 2001

Kasarda, D. D.
Glutenin structure in relation to wheat quality
Wheat is unique
AACC (Pomeranz, Y.) 1989, 277-302

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

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, 40-44

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

Kurimoto, Y., Shelton, D.R.
The effect of flour particle size on baking quality and other flour attributes
Cereal Foods World 33(1988)5, 429-433

Lange, A., Bode, S.
Neues für Müller und Bäcker: Die Attritionsbehandlung
Mühle + Mischfutter 140(2003)1, 1-8

Lauer, O.
Zerkleinerung und Windsichtung in der Nahrungsmitteltechnik
ZFL 34(1983)5, 511-515

Lindhauer M. G.
Grundlagen Weizenmahlerzeugnisse
in: Freund, W. (Hrsg.): Handbuch Backwaren Technologie 3. Akt.-Lfg. 12/03, Hamburg, Behr´s (Losebl.) (2003), Pkt. 2.2

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), 669

Mair, G., Grosch, W.
Changes in glutathione content (reduced and oxidised form) and the effect of ascorbic acid and potassium bromate on glutathione oxidation during dough mixing
J. Sci. Fd Agric. 30(1979), 914-920

Menard, K.P.
„Rheology basics: creep recovery and stress relaxation." 11, 39-60 in Dynamic mechanical analysis – A practical introduction, Menard, K.P, CRC Press Boca Raton London, New York, 1999

Meuser, F., Klingler, R.W.
Einfluss physikalischer Struktureigenschaften auf die Teigbildung
Getreide Mehl und Brot 33(1979)3, 57-62

Meuser, F., Klingler, R.W., Niediek, E.A.
Charakterisierung mechanisch modifizierter Stärke
Starch/Stärke 30(1978)11, 376-384

Meuser, F., Klingler, R.W., Niediek, J.A.
Veränderung der Mehlpartikelstruktur durch Schwingmahlung zur Beeinflussung der Verarbeitungseigenschaften von Weizenmehlen
Deutsche Müller-Zeitung 77(1979)23, 399-402

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

Meuser, F., Reimer, H., Fischer, G.
Physikalische und chemische Untersuchungen an Mehlen aus unterschiedlich vermahlenen Weizen im Hinblick auf deren Backqualität
Mühle+Mischfuttertechnik 114(1977)13, 180-187

Meyer, D., Zwingelberg, H.
Prallzerkleinerung und Windsichtung. Struktur und Zusammensetzung der Mehle
Mühle+Mischfuttertechnik 135(1998)3, 78,87-91

Morgan, J.E., Williams, P.C.
Starch damage in wheat flours: A comparison of enzymatic, iodometric and near infrared techniques
Cereal Chemistry 72(1995)2, 209-212

Morrison, W.B., Tester, R.F., Gidley, M.J.
Properties of damaged starch granules. II Crystalinity, molecular order and gelatinisation of ball-milled starches
Journal of Cereal Science 19(1994), 209-217

Müller, U., Schneeweiß, V.
Optimierung funktioneller Eigenschaften von Mehlen
Optimierte Mehle – Teil 1
Brot und Backwaren 49(2001)11, 30-32

Münzing, K.
Wärmestromregistrierende Differenz–Kalorimetrie (DSC) zur Beschreibung der Stärkeveränderungen bei Getreidenährmitteln
Getreide Mehl und Brot 46(1992)12, 373-381

Nierle, W., Kersting, H.-J.
Einfluss der Mehlprallung auf physikochemische Eigenschaften der Mehlfraktionen
Jahresbericht der Bundesanstalt für Getreide-,Kartoffel- und Fettforschung in Detmold und Münster, (1997), 55-56

Nierle, W., Kersting, H.-J.
Einflussfaktoren auf Stärke/Proteintrennungen
Getreide Mehl und Brot 53(1999)1, 20-26

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

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

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

Pelshenke, P. F., Schulz, A., Stephan, H.
Rapid-Mix-Test
Standard-Backmethode für Brötchen
Arbeitsgemeinschaft für Getreideforschung e.V.
Detmold 1978

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

Rabe, E., Meyer, D.
Methoden zur Bestimmung der mechanischen Stärkebeschädigung in Weizenmehl
Getreide Mehl und Brot 51(1997)4, 195-200

Rogers, D.E., Gelroth, J.A., Langemeier, J.M., Ranhotra, G.S.
Evaluation of starch damage values determined enzymatically or amperometrically
Cereal Chem 71(1994)6, 578-581

Rohrlich, M., Brückner, G.
Das Getreide: I.Teil: Das Getreide und seine Verarbeitung
Verlag Paul Parey. 2. Aufgabe, 1966

Rohrlich, M., Müller, V.
Freies Protein und freie Stärke in Weizen- und Roggenmehl
Die Stärke 21(1969), 29-38

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

Rumpf, H.
Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft
Chemie-Ing.-Techn. 37(1965)3, 187-202

Rumpf, H.
Mechanische Verfahrenstechnik
München, Wien: C. Hanser- Verlag, 1975

Seib, P. A.
Wheat starch: isolation, structure and properties
Oyo Toshitsu Kagaku, Vol. 4, No. 1 (1994), 49-69

Southan, M., Mac Ritchie, F.
Molecular weight distribution of wheat proteins
Cereal Chem 78(1999), 827-836

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

Schlauri, U.
Veränderung der Mehlqualität durch thermische Behandlung
Getreide Mehl und Brot 53(1999)5, 308-309

Schramm, G.
„Kriechen und Rückverformung.“ eine Einführung; In: Rheologie und
Rheometrie, Schramm, G., Gebrüder HAAKE GmbH,
Karlsruhe (1995), 129-156

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

Schultze, M., Draheim, L., Faustmann, S.
Prallzerkleinerung erhöht Durchsatz und senkt Energieaufwand
Getreidewirtschaft 19(1985)12, 282-28

Schwechten, D., Degant,O.
Entwicklungsansätze zur Attritionsmahlung von Spezialmehlen für die Lebensmittelindustrie und neuartige Verwendungsbereiche
Getreide Mehl und Brot 55(2001)2, 74-83

Spänkuch, C., Fass, M.
Trockenvermahlung und Sichtung von Getreide
Mühle+Mischfuttertechnik 49(1994)40, 555

Stevens, J., Evers, A.D.
Der Mechanismus der Stärkebeschädigung
Getreide Mehl und Brot 37(1983)4, 101-106

Vorweck, K.
Möglichkeiten der Prallzerkleinerung in der Müllerei
Die Mühle+Mischfuttertechnik 114(1977)1, 8-13

Weegels, P. L., Verhoek, J.A., de Groot, A.M.G., Hamer, R.J.
Effect on gluten of heating at different moisture contents
I. Changes in funktional properties
II. Changes in physico-chemical properties and secondary structure
J. Cereal Sci. 19(1994), 31-47

Weegels, P. L., Hamer, R. J., Schonfield, J. D.
Functional properties of wheat glutenin
Journal of Cereal Science 23(1996), 1-18

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

Weipert, D., Gerstenkorn, P.
Beurteilung der Klebereigenschaften mittels der Kriecherholungs-Messung
Getreide Mehl und Brot 42(1988)4, 99-103

Wrigley, C. W.
The biochemistry of the wheat endosperm-protein and its genetic control
Cereal Sci. Today 17(1972), 370

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

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), 324-330

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

Willm, C.
Stand der Windsichtung in Frankreich
Getreide Mehl und Brot 39(1985)7, 215-218

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

Zwingelberg, H.

Prallzerkleinerung und Windsichtung – Weizeneigenschaften und Mehlqualität

Die Mühle+Mischfuttertechnik 134(1997)12, 352-358

Zwingelberg, H.

Prallzerkleinerung und Windsichtung integriert in ein Vermahlungssystem

Getreide Mehl und Brot 52(1998)1, 18-23

8 Anhang

8.1 Statistische Versuchspläne

Tab. 12: Planmatrizen der statistischen Versuchspläne

I. ein- und zweistufiges Prallen der Weizensorten Contra und Tarso: Versuchsplan 1. Ordnung 2^{4-1} mit 4 Läufen im Nullpunkt				
Stufe	Variablen			
	X_1: DD (min^{-1})	X_2: UG (m/s)	X_3: SD (min^{-1})	X_4: WS
- 1	20	60	2000	1
+1	200	110	3000	2
0	110	85	2500	1/2
Versuchsnummer:				
1	- 1	- 1	- 1	- 1
2	+1	- 1	- 1	+1
3	- 1	+1	- 1	+1
4	+1	+1	- 1	- 1
5	- 1	- 1	+1	+1
6	+1	- 1	+1	- 1
7	- 1	+1	+1	- 1
8	+1	+1	+1	+1
9	0	0	0	- 1
10	0	0	0	- 1
11	0	0	0	+1
12	0	0	0	+1

WS: 1- Contra, 2- Tarso

II. zweistufiges Prallen der Weizensorten Akratos: Versuchsplan 1. Ordnung 2^{3-1} - Plan mit Lauf im Nullpunkt			
Stufe	Variablen		
	X_1: DD (min^{-1})	X_2: UG (m/s)	X_3: SD (min^{-1})
-1	20	60	2000
+1	200	110	3000
0	110	85	2500
Versuchsnummer:			
1	- 1	- 1	+1
2	+1	- 1	- 1
3	- 1	+1	- 1
4	+1	+1	+1
5	0	0	0

8.2 Analytische Daten

Tab. 13: Versuchsergebnisse Verfahrensdaten der Prallzerkleinerung

Einstufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso		
Sorte/ VNummer	Durchsatz [Kg/h]	T_{Mehl} [°C]
C 1	4,0	24,0
T 2	30,0	23,6
T 3	5,0	28,5
C 4	20,0	27,2
T 5	5,0	22,5
C 6	18,5	25,3
C 7	4,1	27,9
T 8	30,0	28,8
C 9	14,1	25,7
C 10	14,1	26,0
T 11	20,0	26,7
T 12	20,0	26,5
C(AM)	-	18,0
T(AM)	-	18,0
Zweistufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso		
Sorte/ VNummer	Durchsatz [Kg/h]	T_{Mehl} [°C]
C 1	2,9	23,4
T 2	10,9	25,0
T 3	2,7	29,1
C 4	12,0	26,5
T 5	2,7	24,0
C 6	7,5	22,7
C 7	2,6	27,7
T 8	6,9	28,6
C 9	8,6	24,5
C 10	8,6	24,8
T 11	10,0	26,1
T 12	10,0	26,4
C(EM)	14,1	25,1
T(EM)	20,0	25,9
C(AM)	-	18,5
T(AM)	-	18,5
Ein- und zweistufiges Prallen der Sorte Akratos		
Sorte/ VNummer	Durchsatz [Kg/h]	T_{Mehl} [°C]
A 1	2,8	26,1
A 2	8,3	26,2
A 3	3,0	28,7
A 4	7,7	28,5
A 5	10,4	26,7
A(EM)	26,6	27,7
A(AM)	-	19,0

Tab. 14: Versuchsergebnisse Granulation und spezifische Oberfläche der Prallmehle

Einstufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso			
Sorte/ VNummer	A_O [m^2/g]	d_{50} [µm]	<10 µm [%]
C 1	0,45	33,16	13,4
T 2	0,27	81,18	7,5
T 3	0,44	35,89	13,5
C 4	0,58	22,44	18,9
T 5	0,46	35,28	15,6
C 6	0,61	20,78	20,2
C 7	0,63	19,54	21,0
T 8	0,55	24,88	18,5
C 9	0,64	19,92	21,5
C 10	0,61	20,36	20,4
T 11	0,40	41,54	12,7
T 12	0,42	38,82	13,4
C(AM)	0,37	58,36	11,1
T(AM)	0,16	130,79	3,7
Zweistufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso			
Sorte/ VNummer	A_O [m^2/g]	d_{50} [µm]	<10 µm [%]
C 1	0,63	20,63	21,0
T 2	0,63	21,07	21,7
T 3	0,65	20,74	22,8
C 4	0,62	21,28	21,1
T 5	0,67	19,77	24,6
C 6	0,60	21,66	19,4
C 7	0,61	20,66	21,5
T 8	0,60	21,97	19,5
C 9	0,63	20,53	21,2
C 10	0,61	20,14	21,7
T 11	0,63	21,21	21,5
T 12	0,61	21,82	20,6
C(EM)	0,63	20,13	20,9
T(EM)	0,42	40,29	13,1
C(AM)	0,38	59,44	11,0
T(AM)	0,16	131,56	3,6
Ein- und zweistufiges Prallen der Sorte Akratos			
Sorte/ VNummer	A_O [m^2/g]	d_{50} [µm]	<10 µm [%]
A 1	0,54	29,22	16,5
A 2	0,43	37,30	14,0
A 3	0,46	31,79	13,8
A 4	0,49	28,45	15,5
A 5	0,50	27,86	16,1
A(EM)	0,37	43,79	10,9
A(AM)	0,17	131,56	3,6

Tab. 15: Versuchsergebnisse der stofflichen Zusammensetzung der Prallmehle

Einstufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso					
Sorte/ VNummer	Feuchte [%]	Asche [% i.Tr.]	Protein [% i.Tr.]	lösl.Proteine [% l.Tr.]	Stärke [% i.Tr.]
C 1	10,7	0,54	10,9	2,23	83,0
T 2	12,8	0,54	12,8	3,05	81,5
T 3	10,9	0,53	12,5	3,05	80,0
C 4	11,5	0,55	10,8	2,49	83,9
T 5	10,6	0,56	12,9	3,05	80,4
C 6	12,0	0,55	10,8	2,61	85,9
C 7	10,2	0,55	10,9	2,56	82,9
T 8	11,2	0,53	12,4	3,10	80,5
C 9	11,7	0,54	10,7	2,56	84,3
C 10	11,7	0,54	10,8	2,45	84,6
T 11	11,8	0,54	12,5	3,06	80,6
T 12	11,8	0,55	12,6	3,00	80,4
C(AM)	12,6	0,55	10,9	2,55	85,1
T(AM)	13,2	0,54	12,8	2,99	80,8
Zweistufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso					
Sorte/ VNummer	Feuchte [%]	Asche [% i.Tr.]	Protein [% i.Tr.]	lösl.Proteine [% l.Tr.]	Stärke [% i.Tr.]
C 1	9,9	0,53	11,3	3,09	84
T 2	9,1	0,52	12,3	3,19	79,6
T 3	8,9	0,53	12,6	3,15	79,6
C 4	9,9	0,52	11,6	2,91	83
T 5	9,0	0,54	12,7	3,3	79,3
C 6	10,1	0,53	11,3	2,95	84,1
C 7	9,2	0,53	11,5	3,06	81,1
T 8	9,1	0,52	12,3	3,14	80,7
C 9	10	0,53	11,3	2,96	83,6
C 10	10	0,52	11,4	2,75	83,1
T 11	9,2	0,53	12,5	3,04	79,5
T 12	9,2	0,52	12,5	2,83	79,3
C(EM)	11,1	0,54	11,6	2,70	82,3
T(EM)	11,7	0,53	12,6	2,84	79,2
C(AM)	12,6	0,53	11,6	2,85	82,9
T(AM)	13,3	0,53	12,6	3,08	79,6
Ein- und zweistufigen Prallen der Sorte Akratos					
Sorte/ VNummer	Feuchte [%]	Asche [% i.Tr.]	Protein [% i.Tr.]	lösl.Proteine [% l.Tr.]	Stärke [% i.Tr.]
A 1	10,3	0,55	10,6	2,41	80,3
A 2	10,9	0,53	10,6	2,23	80,3
A 3	10,4	0,53	10,5	1,86	80,4
A 4	10,7	0,55	10,6	1,72	80,3
A 5	11,2	0,54	10,5	1,79	80,4
A(EM)	11,9	0,55	10,6	1,94	80,7
A(AM)	13,4	0,56	10,7	1,91	81,1

Tab. 16: Versuchsergebnisse Stärke-Eigenschaften der Prallmehle

Einstufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso					
Sorte/ VNummer	STB [% as is]	WBV [%]	VM [RVU]	FV [RVU]	Wärme [J/g i.Tr.]
C 1	2,0	75	238,08	391,83	7,43
T 2	6,7	95	212,33	358,42	7,08
T 3	8,4	96	196,67	350,5	7,40
C 4	2,2	77	243,08	398,33	8,14
T 5	8,5	99	210,08	358,75	6,34
C 6	1,7	77	245,00	401,25	8,17
C 7	2,4	75	225,25	371,08	8,15
T 8	7,3	98	191,08	340,67	7,33
C 9	1,7	77	238,42	392,17	8,31
C 10	1,7	77	238,75	393,75	8,20
T 11	6,0	96	223,17	375,67	7,15
T 12	5,9	96	223,67	378,08	7,15
C(AM)	1,4	75	251,50	412,67	8,20
T(AM)	4,8	94	246,83	397,00	7,70
Zweistufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso					
Sorte/ VNummer	STB [% as is]	WBV [%]	VM [RVU]	FV [RVU]	Wärme [J/g i.Tr.]
C 1	2,0	79	253,25	408,33	7,70
T 2	8,3	106	192,92	364,25	7,07
T 3	8,6	105	199,75	362,67	6,88
C 4	2,0	79	248,17	401,50	8,35
T 5	8,4	103	187,92	334,33	7,16
C 6	1,9	83	260,58	412,75	8,36
C 7	2,0	84	259,33	408,42	8,14
T 8	8,7	104	204,67	366,92	7,34
C 9	1,9	79	249,33	408,00	8,24
C 10	1,9	79	255,58	409,17	8,16
T 11	8,5	104	187,42	348,17	6,94
T 12	8,4	104	192,92	354,25	7,18
C(EM)	1,9	77	247,5	399,83	8,30
T(EM)	6,4	96	199,17	360,67	6,77
C(AM)	1,5	76	267,50	426,58	8,30
T(AM)	4,6	94	197,72	378,33	8,03
Ein- und zweistufiges Prallen der Sorte Akratos					
Sorte/ VNummer	STB [% as is]	WBV [%]	VM [RVU]	FV [RVU]	Wärme [J/g i.Tr.]
A 1	9,7	111	165,92	400,25	7,11
A 2	8,5	105	172,25	401,58	6,80
A 3	8,5	107	172,83	398,08	6,99
A 4	9,1	109	171,17	403,08	6,82
A 5	8,9	108	172,42	402,5	6,69
A(EM)	8,2	105	175,92	405,25	7,31
A(AM)	6,5	101	193,58	432,33	7,41

Tab. 17: Versuchsergebnisse Gluten-Eigenschaften und –Qualität der Prallmehle

Einstufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso			
Sorte/ VNummer	Feuchtglutengehalt [%]	SW [ml]	γ_{max}
C 1	28,4	30	0,670
T 2	32,4	33	0,586
T 3	30,9	38	0,888
C 4	28,6	28	0,820
T 5	32,5	36	0,613
C 6	26,6	28	0,620
C 7	27,1	29	0,844
T 8	30,2	36	0,632
C 9	27,2	28	1,670
C 10	27,0	28	1,690
T 11	31,2	34	0,681
T 12	31,2	34	0,581
C(AM)	27,2	26	1,880
T(AM)	31,2	32	0,671
Zweistufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso			
Sorte/ VNummer	Feuchtglutengehalt [%]	SW [ml]	γ_{max}
C 1	30,1	33	0,637
T 2	29,1	39	0,542
T 3	30,7	40	0,432
C 4	31,9	34	0,588
T 5	32,4	44	0,475
C 6	29,2	33	0,532
C 7	30,5	36	0,622
T 8	29,0	42	0,653
C 9	30,0	33	0,767
C 10	30,6	33	0,764
T 11	29,0	42	0,669
T 12	29,8	43	0,608
C(EM)	28,2	29	1,796
T(EM)	30,9	35	0,668
C(AM)	27,8	26	1,776
T(AM)	30,4	33	0,670
Ein- und zweistufiges Prallen der Sorte Akratos			
Sorte/ VNummer	Feuchtglutengehalt [%]	SW [ml]	γ_{max}
A 1	25,3	41	0,236
A 2	25,8	41	0,238
A 3	24,8	43	0,262
A 4	24,7	44	0,257
A 5	25,9	41	0,241
A(EM)	26,3	40	0,358
A(AM)	26,7	38	0,459

Tab. 18: Versuchsergebnisse Kneteigenschaften (Farinogramme) der Prallmehle

Einstufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso				
Sorte/ VNummer	WA [%] (500 FE)	TEZ [min]	TS [min]	TER [FE] (12 min nach Max.)
C 1	51,7	2,0	3,4	92
T 2	65,1	5,0	8,8	64
T 3	66,4	4,4	8,1	59
C 4	50,3	1,9	3,6	107
T 5	65,4	5,5	9,1	70
C 6	52,4	1,7	3,5	101
C 7	51,7	3,0	2,7	99
T 8	66,5	6,4	9,6	67
C 9	50,7	1,7	3,8	93
C 10	50,9	1,9	3,7	101
T 11	65,3	4,0	9,2	63
T 12	66,1	4,5	8,9	72
C(AM)	50,6	1,3	1,9	146
T(AM)	61,9	6,0	7,8	71
Zweistufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso				
Sorte/ VNummer	WA [%] (500 FE)	TEZ [min]	TS [min]	TER [FE] (12 min nach Max.)
C 1	53,4	2,0	2,0	136
T 2	63,0	4,7	6,8	61
T 3	67,0	7,0	6,7	75
C 4	52,3	1,7	2,5	146
T 5	69,3	6,0	8,7	78
C 6	51,6	1,9	2,1	148
C 7	53,3	2,0	2,2	147
T 8	67,9	5,0	10,7	55
C 9	52,0	2,0	2,1	154
C 10	51,6	2,2	2,2	134
T 11	66,7	6,2	10,9	67
T 12	66,6	6,2	10,7	59
C(EM)	52,4	2,0	3,3	148
T(EM)	66,8	6,5	10,0	61
C(AM)	51,6	1,4	2,1	131
T(AM)	62,6	6,1	7,9	70
Ein- und zweistufigen Prallen der Sorte Akratos				
Sorte/ VNummer	WA [%] (500 FE)	TEZ [min]	TS [min]	TER [FE] (12 min nach Max.)
A 1	68,4	2,0	4,3	81
A 2	66,3	2,4	4,7	91
A 3	66,8	2,0	4,8	84
A 4	67,1	2,3	5,0	89
A 5	66,5	2,0	5,4	87
A(EM)	66,0	2,2	4,0	95
A(AM)	61,7	1,8	3,8	90

Tab. 19: Versuchsergebnisse Extensogramme der Prallmehle

Einstufiges Prallen der Sorten Contra und Tarso			
Sorte/ VNummer	Db [mm]	Dw_{max} [EE]	DE [cm^2]
C 1	131	168	33
T 2	144	223	46
T 3	135	211	40
C 4	136	169	35
T 5	135	166	40
C 6	130	189	37
C 7	132	164	32
T 8	146	219	44
C 9	135	171	35
C 10	131	174	34
T 11	143	234	48
T 12	138	230	45
C(AM)	136	149	31
T(AM)	136	202	39
Zweistufiges Prallen der Sorten Contra			
Sorte/ VNummer	Db [mm]	Dw_{max} [EE]	DE [cm^2]
C 1	162	245	59
T 2	-	-	-
T 3	-	-	-
C 4	165	297	73
T 5	-	-	-
C 6	165	217	53
C 7	154	223	50
T 8	-	-	-
C 9	161	224	53
C 10	158	216	48
T 11	-	-	-
T 12	-	-	-
C(EM)	144	177	35
C(AM)	145	154	34
Ein- und zweistufiges Prallen der Sorte Akratos			
Sorte/ VNummer	Db [mm]	Dw_{max} [EE]	DE [cm^2]
A 1	138	248	59
A 2	148	208	56
A 3	152	240	65
A 4	151	196	54
A 5	150	210	56
A(EM)	152	208	56
A(AM)	153	224	63

Tab. 20: Massenanteile und Proteingehalte der Sichtfraktionen von zweistufig gepralltem Weizenmehl in Abhängigkeit von der Sichtrad-Drehzahl

SD, [min^{-1}]	Feingut		Grobgut	
	Massenanteil [%]	Protein [%]	Massenanteil [%]	Protein [%]
ZM	-	10,0	-	10,0
5000	72	9,5	28	9,0
7500	38	15,7	62	7,2
10000	24	18,8	76	7,6
12500	19	22,8	81	7,9
15000	13	23,8	87	7,8
17500	7	28,3	93	8,4
20000	2	30,8	98	8,8
22000	1	36,4	99	8,6

Tab. 21: Mittleren Teilchengrößen (d_{50}) und massenspezifischen Mehloberflächen der Sichtfraktionen von zweistufig gepralltem Weizenmehl in Abhängigkeit von der Sichtrad-Drehzahl

SD, [min^{-1}]	Feingut		Grobgut	
	d_{50} [µm]	Ao [m^2/g]	d_{50} [µm]	Ao [m^2/g]
ZM	20,08	0,64	-	
5000	15,97	0,79	38,57	0,35
7500	9,98	1,10	26,78	0,43
10000	7,44	1,26	24,13	0,49
12500	5,76	1,49	21,90	0,55
15000	5,22	1,58	20,32	0,61
17500	4,68	1,69	19,68	0,63
20000	4,44	1,76	18,77	0,68
22000	4,11	1,97	18,23	0,73

8.3 Statistische Auswertung

Tab. 22: Regressionskoeffizienten und Standardfehler der Parameterschätzung (p-Werte)

Verfahrensdaten des einstufigen Prallens der Sorten Contra und Tarso			
Variable	Durchsatz Kg/h	T_{Mehl} °C	
DD	<.0001 [+]	<.0001 [+]	
UG	-	0,0132 [+]	
SD	-	-	
WS	0.0001 [+]	-	
DD^UG	-	0.0158 [-]	
DD^WS	0.0016 [+]	-	
UG^WS	-	0.0599 [+]	
Verfahrensdaten des zweistufigen Prallens der Sorten Contra und Tarso			
Variable	Durchsatz Kg/h	T_{Mehl} °C	
DD	<.0001 [+]	-	
UG	-	<.0001 [+]	
SD	-	-	
WS	-	0.0125 [+]	
Verfahrensdaten des zweistufigen Prallens der Akratos			
Variable	Durchsatz Kg/h	T_{Mehl} °C	
DD	0.0283 [+]	-	
UG	-	0,0021 [+]	
SD	-	-	
Granulation und spezifische Oberfläche der Mehle nach dem einstufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso			
Variable	A_O m^2/g	d_{50} µm	<10 µm
DD	-	-	-
UG	0.0063 [+]	0.0467 [-]	0.0110 [+]
SD	0.0018 [+]	0.0365 [-]	0.0014 [+]
WS	<.0001 [-]	0.0088 [+]	0.0003 [-]
Granulation und spezifische Oberfläche der Mehle nach dem zweistufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso			
Variable	A_O m^2/g	d_{50} µm	<10 µm
DD	-	0.0184 [+]	0.0121 [-]
UG	-	-	-
SD	-	-	-
WS	-	-	-
DD^SD	-	-	0.0422 [-]

Fortsetzung Tab. 22:

Granulation und spezifische Oberfläche der Mehle nach dem zweistufigen Prallen der Sorte Akratos			
Variable	A_O m^2/g	d_{50} µm	<10 µm
DD	-	-	0.0627 [+]
UG	-	-	-
SD	-	-	-

Stoffliche Zusammensetzung der Mehle nach dem einstufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso					
Variable	Feuchte %	Asche % i.Tr.	Protein % i.Tr.	lösl.Proteine % I.Tr.	Stärkegehalt % i.Tr.
DD	<.0001 [+]	-	-	-	-
UG	0.0002 [-]	-	-	-	-
SD	0.0004 [-]	-	-	-	-
WS	0.0057 [+]	-	<.0001 [+]	<.0001 [+]	<.0001 [-]

Stoffliche Zusammensetzung der Mehle nach dem zweistufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso					
Variable	Feuchte %	Asche % i.Tr.	Protein % i.Tr.	lösl.Proteine % I.Tr.	Stärkegehalt % i.Tr.
DD	<.0001 [+]	-	-	-	-
UG	-	-	-	<.0001 [-]	-
SD	-	-	-	-	-
WS	0.0131 [-]	-	0.0035 [+]	0.0229 [+]	0.0122 [-]

Stoffliche Zusammensetzung der Mehle nach dem zweistufigen Prallen der Sorte Akratos					
Variable	Feuchte %	Asche % i.Tr.	Protein % i.Tr.	lösl.Proteine % I.Tr.	Stärkegehalt % i.Tr.
DD	0.0025 [+]	-	-	-	-
UG	-	-	-	0.0492 [-]	-
SD	-	-	-	-	-

Stärke-Eigenschaften der Mehle nach dem einstufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso					
Variable	STB % as is	WBV %	VM RVU	FV RVU	Wärme J/g i.Tr.
DD	0.0604 [-]	-	-	-	0.0173 [+]
UG	-	-	0.0347 [-]	0.0237 [-]	-
SD	-	-	-	-	-
WS	<.0001 [+]	<.0001 [+]	0.0003 [-]	0.0017 [-]	<.0001 [-]
DD^UG	-	-	-	-	0.0106 [-]

Fortsetzung Tab. 22:

Stärke-Eigenschaften der Mehle nach dem zweistufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso					
Variable	STB % as is	WBV %	VM RVU	FV RVU	Wärme J/g i.Tr.
DD	-	-	-	-	0.0071 [+]
UG	-	-	-	-	-
SD	-	-	-	-	0.0202 [+]
WS	0.0011 [+]	0.0023 [+]	-	-	<.0001 [-]
Stärke-Eigenschaften der Mehle nach dem zweistufigen Prallen der Sorte Akratos					
Variable	STB % as is	WBV %	VM RVU	FV RVU	Wärme J/g i.Tr.
DD	-	<.0001 [-]	-	-	<.0013 [-]
UG	-	-	-	-	-
SD	0.0354 [+]	<.0001 [+]	-	-	<.0001 [+]

Gluten-Eigenschaften und -Qualität der Mehle nach dem einstufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso			
Variable	Feuchtgluten %	SW ml	γ_{max}
DD	-	0.0389 [-]	-
UG	-	-	-
SD	-	-	-
WS	<.0001 [+]	<.0001 [+]	0,0512 [-]
UG^WS	0.0385 [-]	-	-
Gluten-Eigenschaften und -Qualität der Mehle nach dem zweistufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso			
Variable	Feuchtgluten %	SW ml	γ_{max}
DD	-	-	-
UG	-	-	-
SD	-	-	-
WS	-	0.0118 [+]	0.0029 [-]
UG^WS	0.0318 [-]	0.0144 [-]	-
Gluten-Eigenschaften und -Qualität der Mehle nach dem zweistufigen Prallen der Sorte Akratos			
Variable	Feuchtgluten %	SW ml	γ_{max}
DD	-	-	-
UG	0.0163 [-]	0.0467 [+]	-
SD	-	-	-

Fortsetzung Tab. 22:

Kneteigenschaften (Farinogramme) der Mehle nach dem einstufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso				
Variable	WA % (500 FE)	TEZ min	TS min	TER FE (12 min nach Max.)
DD	-	-	-	-
UG	-	-	-	-
SD	-	-	-	-
WS	<.0001 [+]	<.0001 [+]	<.0001 [+]	<.0001 [-]
Kneteigenschaften (Farinogramme) der Mehle nach dem zweistufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso				
Variable	WA % (500 FE)	TEZ min	TS min	TER FE (12 min nach Max.)
DD	0.0630 [-]	-	-	-
UG	-	-	-	-
SD	-	-	-	-
WS	<.0001 [+]	<.0001 [+]	<.0001 [+]	<.0001 [-]
DD^WS	-	-	-	0.0357 [-]
Kneteigenschaften (Farinogramme) der Mehle nach dem zweistufigen Prallen der Sorte Akratos				
Variable	WA % (500 FE)	TEZ min	TS min	TER FE (12 min nach Max.)
DD	<.0001 [-]	-	-	0.0017 [+]
UG	-	-	-	-
SD	-	-	-	-

Extensogramme nach 135 min Gärzeit der Mehle nach dem einstufigen Prallen der Sorten Contra und Tarso			
Variable	Db mm	Dw_{max} EE	DE cm^2
DD	0.0076 [+]	0.0814 [+]	0.0052 [+]
UG	-	-	-
SD	-	-	-
WS	0.0004 [+]	0.0018 [+]	<.0001 [+]
Extensogramme nach 135 min Gärzeit der Mehle nach dem zweistufigen Prallen der Sorte Akratos			
Variable	Db mm	Dw_{max} EE	DE cm^2
DD	-	0.0177 [-]	0.0938 [-]
UG	-	-	-
SD	-	-	-

8.4 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol- und Einheitsverzeichnis

Symbol	Einheit	Erläuterung
-	% i.Tr.	Prozent Trockensubstanz
-	-	negativer Regressionskoeffizient
γ_{max}	-	maximale Deformation
ΔQ	J/g	Desintegrationswärme bzw. Enthalpie
+	-	positiver Regressionskoeffizient
<10	µm	Korngröße <10 µm
A_O	m^2/g	massenspezifische Oberfläche
d_{50}	µm	mittlere Teilchengröße bzw. Median-Wert
EE	-	Extensogrammeinheit
M_r	kDa	Molekularmasse
RVU	1RVU=12mPa	Viskositätseinheit (Rapid Visco Unit)
T_M	°C	Temperatur des Mehles

Abkürzungsverzeichnis

Index/ Abkürzung	Einheit	Erläuterung
A	-	Weizensorte Akratos
AM	-	Ausgangsmehl
C	-	Weizensorte Contra
Db	mm	Dehnbarkeit
DD	min^{-1}	Dosierschnecken-Drehzahl
DE	cm^2	Dehnenergie (Fläche unter der Kurve)
Dw_{max}	EE	Dehnwiderstand im Maximum
EM	-	einstufig gepralltes Mehl
EP	-	einstufiges Prallen
FV	RVU	Finalviskosität
HMW	-	High Molecular Weight
HPLC	-	High Performance Liquid Chromatotography
ICC	-	International Association for Cereal Chemistry and Technology
KE	-	Krumenelastizität
lösl. PR	-	Salzwasserlösliche Proteine
RVA	-	Rapid Visco Analyser
SD	min^{-1}	Sichtrad-Drehzahl
STB	% as is	Stärkebeschädigung
SW	ml	Sedimentationswert
T	-	Weizensorte Tarso
TA	%	Teigausbeute
TER	FE	Teigerweichung
TEZ	min	Teigentwicklungszeit
TS	min	Teigstabilität
UG	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
VA	ml/100g	Volumenausbeute
VM	RVU	Verkleisterungsmaximum

Fortsetzung Abkürzungsverzeichnis:

VNummer	-	Versuchsnummer
VZ	-	Verhältniszahl
WA	%	Wasseraufnahme
WBV	%	Wasserbindevermögen
WS	-	Weizensorte
ZM	-	zweistufig gepralltes Mehl
ZP	-	zweistufiges Prallen
ZSGWM	-	zweistufig gepralltes Weizenmehl

Persönliche Daten:

Petya Ivanova
Geboren am 13.03.1977 in Yambol, Bulgarien

Schulbildung:

1984 – 1987	Grundschule in Yambol, Bulgarien
1987 – 1991	Mittelschule in Yambol, Bulgarien
1991 – 1995	Gymnasium in Yambol, Bulgarien, Abschluss: Abitur

Studium:

09.1996 – 11.2001	Hochschule für Nahrungs- und Genussmittel-industrie – Plovdiv, Bulgarien Fachrichtung: Technologie der Getreide-, Brot- und Futterprodukte Akad. Grad: Magister Qualifikation: Ingenieur-Technologin
05.2003 – 03.2006	Promotion an der Technischen Universität Berlin

Bisherige Tätigkeiten

09.2000 - 09.2002	Beratungstechnologin Firma „Helder“ (Sofia, Bulgarien) – Einfuhr und Handel mit Rohstoffen für das Konditoreigewerbe