

**Vermahlungstechnische Untersuchungen mit Roggen und Triticale aus dem  
Anbau reduzierter Intensität  
zur Herstellung stärkeangereicherter Mahlprodukte  
für deren Einsatz zur chemischen Modifizierung**

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieurin  
Lydia Thamm  
aus Berlin

Von der an 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. Thiemig

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. agr. Dr. h.c. Handreck

Gutachter: Prof. Dr. Lindhauer

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 29.08.2003

Berlin 2004

D 83

## **Danksagung**

Herrn Prof. Dr. B. Handreck danke ich für die Überlassung des Themas, für die wertvollen fachlichen Ratschläge bei der Ausführung und Betreuung der vorliegenden Arbeit.

Herrn Prof. Dr. M. G. Lindhauer danke ich für seine fachlichen Anregungen und die freundliche Übernahme des Korreferates.

Mein besonderer Dank gilt den Mitarbeitern des Fachgebietes Aufbereitungs- und Müllertechnologie am Institut für Lebensmitteltechnologie II der Technischen Universität Berlin für die hervorragende Zusammenarbeit. Frau Dipl.-Ing. Ch. Senge und B.C. Fischer danke ich sehr für das Engagement bei der Versuchsdurchführung und die fachliche wie auch persönliche Unterstützung während der Arbeit. Herrn Dipl.-Ing. L. Pötschke und Herrn Dr. J. Dörfer danke ich für ihr Interesse an der Durchführung der Arbeit und für die fachliche Unterstützung und Diskussion.

Besonderen Dank auch an meinen Vater und an die ungenannten Freunde und Angehörigen, die mich in schwierigen Phasen angetrieben, aufgebaut und unterstützt haben.

# **Vermahlungstechnische Untersuchungen mit Roggen und Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität zur Herstellung stärkeangereicherter Mahlprodukte für deren Einsatz zur chemischen Modifizierung**

**Lydia Thamm**

## **Abstract**

Getreidemehle sind alternativ zu reiner Stärke nach chemischer Modifizierung als Zuschlagsstoff in der Papierindustrie einsetzbar. In der Arbeit wurde an Roggen und Triticale der Einfluss der Anbauintensität und der Prozessführung beim Vermahlen und Sichten auf die Eigenschaften der Mahlprodukte untersucht. Das Ziel bestand in der Gewinnung einer hohen Ausbeute an Mehlen mit möglichst hohem Stärkeanteil und niedrigem Protein- sowie Mineralstoffgehalt. Durch eine an die Getreideart angepasste verringerte Anbauintensität wurden dafür Roggen und Triticale mit verbesserten Korn- und Mahleigenschaften erzeugt. In kleintechnischen Mahlversuchen ist mit Hilfe statistischer Versuchspläne untersucht worden, mit welchen Verfahrensvarianten und unter welchen Zerkleinerungsparametern das Ziel zu erreichen ist. Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass eine kurze und intensive Vermahlung im Walzenstuhl von Getreide aus dem Anbau reduzierter Intensität, ausgerichtet auf einen hohen Anfall an stärkereichem Schrotmehl mit Hilfe der Doppelmahlung, die qualitativ geeignetsten Mehle für die chemische Modifizierung lieferte. Für die Vermahlung von Roggen und Triticale sind jeweils optimierte Verfahrensvorschläge erarbeitet worden. Die Modifizierungseignung der Mehle ließ sich durch die weitere Stärkeanreicherung und Proteinverminderung mittels Windsichten noch verbessern.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> 7
1.1	Einführung und Problemdarstellung 7
1.2	Zielsetzung 9
<b>2</b>	<b>Allgemeiner Teil</b> 11
2.1	Tendenzen im Getreideanbau 11
2.2	Nachwachsende Rohstoffe auf Stilllegungsflächen 12
2.3	Roggen und Triticale als nachwachsende Rohstoffe 14
2.4	Vermahlung von Roggen und Triticale 15
2.4.1	Mahlverfahren zur Herstellung von Backmehlen 15
2.4.2	Kornbeschaffenheit von Roggen und Triticale 18
2.4.3	Mahleigenschaften von Roggen und Triticale 20
2.4.4	Windsichten von Roggen- und Triticalemehlen 21
<b>3</b>	<b>Material und Methoden</b> 25
3.1	Versuchsmaterial 25
3.2	Methoden der Untersuchungen am Korn 25
3.2.1	Bestimmung der Tausendkornmasse 25
3.2.2	Bestimmung des Hektolitergewichts 25
3.2.3	Bestimmung des Vollkornanteils 25
3.2.4	Bestimmung der mittleren Korndicke 26
3.2.5	Bestimmung des mittleren Korndurchmessers 26
3.2.6	Bestimmung der Korndichte 26
3.2.7	Bestimmung des Schalenanteils 26
3.2.7.1	Auswaschen nach Säureaufschluss 27
3.2.7.2	Auswaschen unter Verwendung von Milchsäure 27
3.2.8	Bestimmung der Mahleigenschaften 27
3.3	Methoden zur Charakterisierung der Versuchsmaterialien und Mahlprodukte 28
3.3.1	Bestimmung des Feuchtegehalts 28
3.3.2	Bestimmung des Mineralstoffgehalts 28
3.3.3	Bestimmung des Stärkegehalts 28
3.3.4	Bestimmung der mechanischen Stärkebeschädigung 28
3.3.5	Bestimmung des Rohproteingehalts 29
3.3.6	Bestimmung des Pentosangehalts 30
3.4	Methoden zur Charakterisierung der Zerkleinerung 30
3.4.1	Bestimmung der Korngrößenverteilung 30
3.4.2	Berechnung der Oberflächenzunahme 31
3.4.3	Berechnung des Zerkleinerungsgrades 32
3.4.4	Ermittlung der Zerkleinerungskräfte im Walzenstuhl 32
3.4.5	Ermittlung der Zerkleinerungsleistung 33
3.4.6	Berechnung der Zerkleinerungsarbeit 33
3.5.	Durchführung der Versuche zum Vermahlen und Windsichten 34
3.5.1	Abstehzeit genetzter Getreide vor der Vermahlung 34

	Seite	
3.5.2	Vorbereiten des Versuchsmaterials	35
3.5.3	Zerkleinern im Walzenstuhl	35
3.5.4	Prallzerkleinern in der Stiftmühle	37
3.5.5	Klassieren der Zerkleinerungsprodukte	38
3.5.6	Nachzerkleinern der Mehle für das Windsichten	38
3.5.7	Windsichten der Mehle	39
3.6	Methode zur Bestimmung des Ladungspotentials modifizierter Mahlprodukte	40
3.7	Statistische Methoden	42
3.7.1	Versuchsstreuung	42
3.7.2	Konfidenzgrenzen	42
3.7.3	Statistische Versuchspläne	42
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>46</b>
4.1	Untersuchungen zum Einfluss der Anbauintensität auf die Korneigenschaften von Roggen und Triticale	46
4.1.1	Versuchsanordnung	46
4.1.2	Kornausbildung und Korninhaltsstoffe	46
4.1.2.1	Tausendkornmasse und mittlere Korndicke	47
4.1.2.2	Mineralstoffe und Pentosane	48
4.1.2.3	Stärke und Rohprotein	48
4.1.2.4	Korndichte	50
4.1.3	Mahlfähigkeit nach Standardmahlversuch	51
4.1.3.1	Sorten und Anbauintensitätsstufen	51
4.1.3.2	Mahlergebnisse	52
4.1.3.3	Mehlinhaltsstoffe	54
4.1.4	Diskussion der Korn- und Mahleigenschaften	55
4.2	Kleintechnische Untersuchungen zum Aufschroten von Roggen und Triticale	57
4.2.1	Untersuchte Verfahrensvarianten und Versuchsmaterial	57
4.2.2	Mahlversuche I. Schrot	58
4.2.2.1	Versuchsergebnisse	58
4.2.2.3	Einfluss der Variablen auf das Mahlergebnis	59
4.2.2.4	Optimierungsergebnisse	62
4.2.3	Mahlversuche II. Schrot	63
4.2.3.1	Versuchsergebnisse	63
4.2.3.2	Einfluss der Variablen auf das Mahlergebnis	65
4.2.3.4	Optimierungsergebnisse	67
4.2.4	Prallvermahlung gequetschter Getreide	68
4.2.4.1	Versuchsbedingungen	68
4.2.4.2	Massenanteile und Mineralstoffgehalte der Fraktionen	69
4.2.4.3	Zerkleinerungsgrad und -aufwand; Aschewertzahl des Feingutes	73
4.2.5	Diskussion: Eignung der Verfahrensvarianten zum Aufschroten von Roggen und Triticale	74
4.2.6	Anwendung der optimierten Zerkleinerungsparameter beim mehrstufigen Aufschroten von Roggen und Triticale unterschiedlicher Anbauintensität	80
4.2.6.1	Charakterisierung der verwendeten Getreide	80
4.2.6.2	Mahlergebnisse	82

		Seite
4.3	Kleintechnische Untersuchungen zum Vermahlen von Roggen- und Triticalegrieß	85
4.3.1	Untersuchte Verfahrensvarianten und Versuchsmaterial	85
4.3.2	1. Grießmahlung für Roggen und Triticale	86
4.3.2.1	Vermahlen im Walzenstuhl	86
4.3.2.1.1	Versuchsergebnisse	86
4.3.2.1.2	Einfluss der Variablen auf den Mehlanfall und -mineralstoffgehalt	87
4.3.2.1.3	Optimierungsergebnisse	89
4.3.2.2	Prallvermahlen in der Stiftmühle	91
4.3.2.3	Diskussion: Eignung der Verfahrensvarianten zur 1.Grießmahlung	94
4.3.3	2. Roggengrießmahlung im Walzenstuhl	96
4.3.3.1	Versuchsergebnisse	96
4.3.3.2	Einfluss der Variablen auf den Mehlanfall und -mineralstoffgehalt	97
4.3.3.3	Optimierungsergebnisse	99
4.3.3.4	Diskussion: Vergleich der konventionellen zweistufigen Vermahlung mit der Doppelmahlung von Roggengrieß	101
4.3.4	Anwendung der optimierten Verfahrensvariante auf die Grießmahlung von Roggen und Triticale unterschiedlicher Anbauintensität	102
4.4	Diagrammvorschläge zur Vermahlung von Roggen und Triticale unterschiedlicher Anbauintensität	105
4.4.1	Vermahlungsabläufe und Bilanzen	105
4.4.2	Zerkleinerungsaufwand der Vermahlung	110
4.4.3	Inhaltsstoffverteilung in den Mahlprodukten	112
4.5	Untersuchungen zum Windsichten von Roggen- und Triticalemehl	118
4.5.1	Sichtversuche zur Bestimmung der Trennschnitte	118
4.5.1.1	Versuchsmaterial und -ergebnisse	118
4.5.1.2	Lage der Trennschnitte	120
4.5.2	Anwendung der Prozessbedingungen auf das Windsichten der Mehle	122
4.5.2.1	Nachzerkleinern der Mehle	122
4.5.2.2	Sichtergebnisse	125
4.5.3	Inhaltsstoffverteilung in den Sichtfraktionen	128
4.6	Chemische Modifizierung der Roggen- und Triticalemehle	135
4.6.1	Modifizierungsergebnisse in Abhängigkeit von der Anbauintensität	135
4.6.2	Modifizierungsergebnisse in Abhängigkeit von den Mehleigenschaften	138
4.6.3	Diskussion: Einflussfaktoren der Modifizierbarkeit	139
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>142</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>146</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>148</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>153</b>
<b>9</b>	<b>Verzeichnis der Abbildungen</b>	<b>159</b>
<b>10</b>	<b>Verzeichnis der Tabellen</b>	<b>162</b>
<b>11</b>	<b>Lebenslauf</b>	<b>164</b>

## Verzeichnis der Abkürzungen

a	Mahlspalt
$A_{1,2,\dots}$	Antwortgrößen statistischer Versuchspläne
$A_O / \Delta A_O$	Oberfläche / Oberflächenzunahme
AWZ	Aschewertzahl
BV	Blue Value
$D_m / d_m$	mittlerer Korndurchmesser vor / nach der Zerkleinerung
$E_{1,2,\dots}$	Antwortgrößen statistischer Versuchspläne
F	Feuchteanteil
f	Feingutfraktion
$F_{D\ s/1}$	Druckkraft schnelle / langsame Walze
fm	Filtermehl
$F_{res\ s/1}$	resultierende Kraft schnelle / langsame Walze
$F_t$	Tangentialkraft
g	Grobgutfraktion
hl-Gewicht	Hektolitergewicht
i	Voreilung
i.Tr.	in der Trockenmasse
$M_{1,2,\dots}$	Antwortgrößen statistischer Versuchspläne
m	Durchsatz
$M_{ts/1}$	tangentiales Drehmoment schnelle / langsame Walze
n	Anzahl der Stichproben
$P_Z$	Zerkleinerungsleistung
Q	kummulative Häufigkeit
q	relative Häufigkeit
R	Rückstandssumme
r	Korrelationskoeffizient
RAI	Rohasche
S.	Seite
TKM	Tausendkornmasse
$v_s$	Umfangsgeschwindigkeit schnelle Walze oder äußere Stiftreihe
$W_{ZAo}$	oberflächenbezogene Zerkleinerungsarbeit
$W_{Zm}$	massebezogene Zerkleinerungsarbeit
$X_{1,2,\dots}$	Variablen statistischer Versuchspläne
$\bar{x}$	arithmetisches Mittel
ZG	Zerkleinerungsgrad
$\Sigma$	Summe

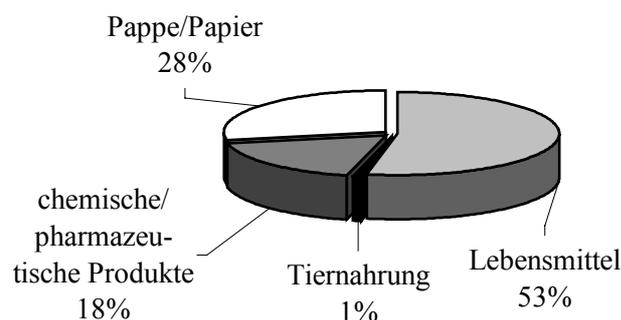
## 1 Einleitung

### 1.1 Einführung und Problemdarstellung

In ihrer Funktion als Nährstoffreservoir für die keimende Pflanze ist in den Samenkörnern der Getreidepflanzen vor allem das Reservekohlenhydrat Stärke mit einem Anteil von 70-80% gespeichert [1]. Aufgrund des vergleichbaren Ausgangsgehalts ist es denkbar, dass eine auf dem Stärkeanteil basierende Non-Food-Nutzung des Weizens auch auf andere Getreidearten übertragbar ist. Zur Erweiterung der Rohstoffbasis werden insbesondere Roggen und Triticale in Betracht gezogen.

Diese Non-Food-Anwendung beinhaltet, chemisch modifiziertes Getreidemehl als kationisches oder anionisches Stärke/Protein-Komposit<sup>1</sup> alternativ zu modifizierten Stärken in der Papierfertigung einzusetzen. Vorteilhaft dabei ist, dass der energieaufwendige Nassprozess der Stärkegewinnung entfällt; die Mehle werden durch trockene Vermahlung bereitgestellt.

In Abhängigkeit von der zukünftigen Entwicklung der Stärkepreise werden diesen ökologisch und ökonomisch günstigen Produkten gute Marktchancen gegeben. Bei der Erzeugung von 1t Pappe oder Papier werden durchschnittlich 4 -10 kg Stärke verwendet. Im Wirtschaftsjahr 2000/2001 betrug innerhalb der Europäischen Union die Einsatzmenge an Stärke in der Papierindustrie 1,4 Mio. t [2], das entsprach einem Anteil von 28% am gesamten Stärkeverbrauch (Abb.1).



Quelle: Ceresar 2000

**Abb. 1:** Bedarf an Stärkeprodukten nach ihrer Verwendung im Jahr 2000

<sup>1</sup> für Weizen: CERESAN®, Ceresan GmbH, Markranstädt

In Anbetracht des hohen Stärkebedarfs wird für den deutschen Markt eine potentielle jährliche Absatzmenge an modifiziertem Weizenmehl von rund 58 000 t, für den europäischen Markt von 200-300 00 t erwartet [3].

Betrachtet wurde die Variante, chemisch modifizierte Roggen- und Triticalemehle als kationische Zuschlagstoffe für den Masseinsatz in der Papierfertigung zu nutzen. Dabei steigert das Einbringen der kationisierten Stärke und anderer Inhaltsstoffe der Getreidemehle die Bindefähigkeit zu negativ geladenen Papierfaserstoffen mit der Folge, dass die Faserkomponenten stärker vernetzt werden und sich die Papierfestigkeit erhöht [4]. Zudem wirkt der Zuschlagsstoff auch als kationisches Retentionsmittel und bindet störende Substanzen im Stoffsystem. Mit der aus ökologischen Gründen angestrebten Senkung des spezifisch hohen Frischwasserverbrauchs bei der Papierfertigung wird zunehmend mehr gereinigtes Abwasser und weniger Frischwasser verwendet. Die Wasserkreisläufe in den Papierfabriken engten sich von 100 l Wasser pro kg Papier auf unter 20 l pro kg ein, und trotz aufwendiger Zwischenreinigung steigt die Fracht von Störstoffen im Fabrikwasser erheblich an. Die Bedeutung und der Einsatz kationischer Retentionsmittel nimmt daher weiter zu [5].

Der aus der Mühlenindustrie bekannte trockene vermahlungstechnische Aufschluss des Getreides erfolgt vor allem zur Herstellung verschiedener Mehltypen aus Roggen und Weizen für deren Verwendung in Backwaren. Das Zusammenwirken bestimmter Inhaltsstoffanteile in den Mahlprodukten gewährleistet die geforderten guten Backeigenschaften. So wird die Backfähigkeit eines Roggenmehls wesentlich von der Menge und Beschaffenheit der Stärke und des Pentosans als Quellstoff beeinflusst [6], [7]. Bei normaler Pentosanbeschaffenheit sind bei einem Pentosan / Stärke-Verhältnis von 1:16 optimale Voraussetzungen für das Erreichen einer guten Gebäckqualität gegeben [8]. Bei der Herstellung von Roggenbackmehl wird dieses Verhältnis durch eine hohe Kornausmahlung von bis zu 85% erreicht, dabei erhöhen sich neben dem Pentosananteil gleichzeitig die Mineralstoff- und Proteingehalte, während der Stärkeanteil abnimmt. Der vermahlungstechnische Aufschluss von Roggen und Triticale zur Non-Food-Nutzung erfordert ein Mahlprodukt, das sich in seiner stofflichen Zusammensetzung von Backmehlen unterscheidet. Bei der Verwendung von Getreidemehl zur Modifizierung sind zwar Anteile an Protein, Mineralstoffen, Pentosan u.a. nicht zu vermeiden, aber soweit wie möglich zu Gunsten des Stärkegehalts zu minimieren.

Dabei werden zur Gewinnung stärkereicher Mehle Getreide bevorzugt, die einen hohen Stärke- bzw. niedrigen Proteingehalt schon im Korn aufweisen. Aus dem extensivierten Anbau von Weizen ist bekannt, dass im Vergleich zum konventionellen Anbau Unterschiede in der

Inhaltsstoffzusammensetzung bestehen. Charakteristisch ist vor allem ein für die Non-Food-Anwendung günstiger verringerter Rohproteingehalt [9], [10], [11]. Beim Anbau von Roggen und Triticale mit reduzierter Intensität wird ein ähnlicher positiver Effekt erwartet.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit war, mineralstoffarme Mahlprodukte von Roggen und Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität in möglichst hoher Ausbeute zu gewinnen, die durch optimierte Mahl- und Klassierverfahren stärkeangereichert sowie protein- und pentosanvermindert sind und gute Modifizierungseigenschaften aufweisen.

Für die Verwendung von Roggen und Triticale aus dem Anbau mit reduzierter Intensität waren Kenntnisse über deren veränderte Verarbeitungseigenschaften im Vergleich zum Getreide aus konventionellem Anbau notwendig. Anhand der Ergebnisse aus Feldversuchen mit sechs Roggen- und fünf Triticalesorten über drei Jahre<sup>2</sup> wurden die Einflüsse der Anbauintensität auf die Korneigenschaften und auf das Mahlverhalten untersucht.

Das gegenüber der Herstellung von Backmehlen andere Vermahlungsziel erforderte auch eine eigene Vermahlungstechnologie. Daraus ergab sich die Aufgabe, die für Roggen und Triticale jeweils effektivsten Zerkleinerungsarten und Vermahlungsbedingungen mit Hilfe statistischer Versuchspläne zu ermitteln. In den Prozessstufen der Vermahlung, dem Aufschroten des Korns und dem Feinzerkleinern des Mehlkörpers, wurde der Einfluss verschiedener Beanspruchungsarten und -kombinationen (Druck-Schub-Beanspruchung im Walzenstuhl, Druckbeanspruchung durch Quetschen im Walzenstuhl, Prallbeanspruchung in der Stiftmühle) sowie der Klassierung (Doppelmahlung, Vermahlung mit Zwischenabsieben) auf das Mahlergebnis untersucht.

Auf Grundlage der Optimierungsergebnisse aus den statistischen Versuchsplänen ist jeweils ein Prozessablauf für die Vermahlung von Roggen und Triticale im kleintechnischen Rahmen simuliert und charakterisiert worden. Besondere Beachtung fanden die bei der vergleichenden Vermahlung von Getreide aus dem Anbau konventioneller und reduzierter Intensität auftretenden Unterschiede hinsichtlich der Produktanfalle, deren stoffliche Zusammensetzung und der Modifizierungseigenschaften der Mahlprodukte.

---

<sup>2</sup> Vollkornproben der Erntejahre 1996-98 vom Professor-Hellriegel-Institut, Bernburg

Durch mehrmaliges Trockenklassieren von Roggen- und Triticalemehlen mittels Windsichten ließen sich Fraktionen mit erhöhten Stärke- und verminderten Proteingehalten gewinnen. Voraussetzung dafür war eine Erhöhung des Aufschlussgrades des Mehlkörpers durch Feinstzerkleinerung bei hoher Beanspruchungsintensität (Stiftmühle mit hoher Geschwindigkeit). Neben granulometrischen Untersuchungen und der stofflichen Charakterisierung der Sichtfraktionen wurde die Modifizierbarkeit der stärkereichen Mehle überprüft.

Die Ergebnisse sollen zu einem technologischen Lösungsvorschlag der Herstellung von Roggen- und Triticalemehlen als Ausgangsprodukt für die chemische Modifizierung führen.

## 2 Allgemeiner Teil

### 2.1 Tendenzen im Getreideanbau

In Deutschland werden rund 17 Mio. ha landwirtschaftlich bewirtschaftet. Mit ca. 12 Mio. ha sind etwa 70% davon Ackerland. Das sind 33% der Fläche Deutschlands oder 1400m<sup>2</sup> Ackerfläche je Einwohner. Die Flächen, ca. 7 Mio. ha, werden vor allem zum Anbau von Getreide genutzt. Die Entwicklung der Anbauflächen wurde seit 1993 von der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) der Europäischen Gemeinschaften beeinflusst. Infolge der vereinbarten Preisausgleichszahlungen wurde der Anbau von Getreide, Ölfrüchten und Eiweißpflanzen in Deutschland ausgedehnt. Die Getreideanbaufläche nahm im Vergleich zu 1991 dabei um rund 8% zu. Die erweiterten Regelungen zu Flächenstilllegungen führten auch zu mehr Brachflächen. Der Anteil an stillgelegten und vorübergehend nicht genutzten Ackerflächen erhöhte sich im gleichen Zeitraum um 9% [12].

Fortschritte in Züchtung, Anbautechnik und Bestandesführung bilden die Grundlage stetig steigender Hektarerträge. Im Jahr 1960 lag der Hektarertrag noch bei 28,7 dt, 1980 schon bei 44,5 dt. Der bisherige Höchststand wurde im Erntejahr 2001 mit 70,6 dt/ha erreicht. Auch im Folgejahr 2002 mit einem ungünstigen Witterungsverlauf betrug der Ertrag noch 62,5 dt/ha. [13]. In Folge dieser Entwicklung wird jährlich Getreide im Überschuss erzeugt. In den Jahren 1990 bis 2000 wurden durchschnittlich nur 78% des Getreides im Inland verwendet; davon ca. 23% zur menschlichen Ernährung und etwa 61% als Viehfutter (Tab.1).

**Tabelle 1:** Getreideversorgung in Deutschland

Wirtschaftsjahr <sup>1)</sup>	1980/81	1990/91	1999/00	2000/01
<b>Getreide<sup>2)</sup></b>				
Verwendbare Erzeugung (1000 t)	23.087	37.580	43.874	45.219
Inlandsverwendung (1000 t), davon	25.117	33.052	34.025	36.468
- Futter (%)	61,1	60,5	59,8	62,4
- Nahrungsverbrauch (%)	21,5	22,6	23,6	22,0
- industrielle Verwendung (%)	11,6	10,9	10,2	9,4
Selbstversorgungsgrad (%)	92	114	128	124

<sup>1)</sup> ab 1991 einschließlich der fünf neuen Bundesländer

<sup>2)</sup> einschließlich Körnermais

*Quelle:* ZMP-Bilanz Getreide, Ölsaaten, Futtermittel aus [14]

Die subventionierten Exporte des überschüssigen Getreides auf den Weltmarkt sind durch bestehende Handelsabkommen mengenmäßig beschränkt und nicht zu steigern. Daher wird

mit einer weiteren Zunahme der Interventionsbestände an Getreide in der Europäischen Union von gegenwärtig 7,3 Mio t gerechnet [13].

## 2.2 Nachwachsende Rohstoffe auf Stilllegungsflächen

Um der Überproduktion entgegen zu wirken, werden die Landwirte angehalten, jährlich einen bestimmten Anteil (zz. 10%) ihrer Flächen stillzulegen und damit aus der Nutzung zur Erzeugung von Nahrungsmitteln zu nehmen. Dafür werden Ausgleichszahlungen geleistet. Als Alternative bietet sich die Produktion nachwachsender Rohstoffe an. Der Anbau von Industriepflanzen ermöglicht die Nutzung der Stilllegungsflächen, ohne auf die Ausgleichszahlungen zu verzichten. Zudem können sich durch nachwachsende Rohstoffe innovative Entwicklungen und neue Produkte ergeben, die zu Produktions- und Einkommensalternativen für Unternehmen der Landwirtschaft und Industrie führen. Auch ökologische Gründe sprechen für die nachwachsenden Rohstoffe. Sie sind weitgehend CO<sub>2</sub>-neutral und tragen zur Schonung endlicher fossiler Ressourcen bei. Aufgrund der positiven ökologischen und ökonomischen Wirkungen wird die Entwicklung neuer Anwendungen nachwachsender Rohstoffe bundesweit gefördert<sup>3</sup>.

**Tabelle 2:** Anbau nachwachsender Rohstoffe auf stillgelegten Flächen

Erntejahr	1999	2000	2001
<b>Pflanzenart (Auszug)</b>	<b>Anbaufläche (ha)</b>		
Raps	359 744	332 978	323 341
Sonnenblume	7 049	5 279	4 998
Öllein	1 041	1 096	441
Getreide	324	328	325
- davon Roggen	50	0	0
- davon Triticale/Gemisch	0	2	3
Mais	256	895	2 151
Hanf	38	78	18
gesamt	369 452	341 391	333 004

*Quelle:* Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 10/2000

In Deutschland wurden 1999 auf ca. 6% der Ackerfläche (740.000 ha) nachwachsende Rohstoffe angebaut. Damit gehört Deutschland neben Frankreich zu den Hauptanbauländern von

<sup>3</sup>Projektträger des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow

nachwachsenden Rohstoffen innerhalb der Europäischen Union [15]. Der Umfang der Anbauflächen spiegelt die momentane Bedeutung der einzelnen Rohstoffe wider. Die ÖL-liefernden Pflanzen sind am wichtigsten, mit Abstand folgen die Stärkepflanzen (Tab.2). Unter dem Gesichtspunkt „Stärke als nachwachsender Rohstoff“ ist das bedeutendste Anwendungsgebiet die Herstellung biologisch abbaubarer Werkstoffe (Tab.3).

**Tabelle 3:** Industrielle Hauptanwendungen nachwachsender Rohstoffe [15]

Produktgruppe	Rohstoff	Produkte
Schmier- und Verfahrensstoffe	Rapsöl	schnell biologisch abbaubare Hydraulik-, Getriebe-, Sägeketten-, Schmier- und Umformöle; Motorenöle, Betontrennmittel
Wasch- und Reinigungsmittel	Kokos- und Palmkernöl, auch Mais- und Kartoffelstärke, Zucker	Bio-Tenside in Wasch- und Spülmittel, Allzweckreiniger, Shampoos und Duschbäder
Biologisch abbaubare Werkstoffe / naturfaserverstärkte Kunststoffe	Mais-, Weizen- und Kartoffelstärke, Zucker, Cellulose, Rapsöl / Hanf, Flachs	Verpackungschips und -folien, Mulchfolien, Overheadfolien, Plastikgeschirr, -besteck und -tüten / Autoinnenverkleidung, Formteile in Bootsrümpfen, Auto- und Flugzeugbau
Baumaterialien und Dämmstoffe	Holz, Holzfasern und -wolle, Cellulose, Flachs, Hanf, Stroh, Schilf, Roggen	konstruktive Bauteile, Innenausbau, Dämmwolle, Flocken, Dämmvliese und -matten, Faserplatten, Bodenbeläge
Arzneimittel	z.B. Kamille, Sonnenhut, Baldrian, Johanniskraut, Ringelblume	Heil- und Gewürzkräuter, Kosmetika
Farben / Lacke	Krapp, Färberwau, Waid, Färberknöterich / Öllein,	Naturfarben / Leinölfirnis, Leinöl als Grundstoff von Naturfarben und -lacke
Papier und Pappe	Holz, Restholz, Gräser, Getreide, Flachs, Hanf	Cellulose für Papierprodukte und Viskose, Spezialpapiere, Celluloseester, -ether und -regenerat
Textilien	Flachs, Hanf	Schnüre, Filter u.ä., Bekleidung
Treibstoffe	Rapsöl	Rapsölmethylester als „Biodiesel“ und Heizöl
Strom und Wärme	Holz, Hackschnitzel und Pellets aus Holzresten, Getreide, Ölsaaten, Gräser	Energie durch Verbrennung der Biomasse in Blockheizkraftwerken

### 2.3 Roggen und Triticale als nachwachsende Rohstoffe

Vor dem Hintergrund einer deutlichen Überproduktion und der schwierigen Absatzlage besteht an einer alternativen Nutzung von Roggen erhöhter Bedarf. Die territorialen Beschaffenheiten des Bodens und des Klimas in den traditionellen Roggenanbaugebieten lassen einen wirtschaftlichen Anbau anderer Nutzpflanzen kaum zu. Die Roggenanbaufläche beträgt in Deutschland insgesamt rund 30% der Fläche von Weichweizen (Tab.1, S.5), in Gebieten mit überwiegend minderwertigen Böden ist Roggen jedoch die Hauptgetreideart. Eine Studie zur Struktur des Bodenfonds [16] weist z.B. für das Land Brandenburg einen Anteil der Sandböden von 63% an der landwirtschaftlichen Nutzfläche aus, für Mecklenburg-Vorpommern 33% und für Sachsen-Anhalt noch 15%. Roggen kann auch auf leichten Böden mit ungünstiger Wasserversorgung noch Erträge realisieren. Ebenfalls erfolgreich auf Roggenstandorten ist der Anbau von Triticale. Diese Getreideart, eine durch biotechnologische Verfahren entstandene Kreuzung zwischen Roggen und Weizen, vereint die Anspruchslosigkeit des Roggens mit der Ertragsstärke des Weizens und wird vorrangig als Futtermittel angebaut.

Roggen und Triticale besitzen als nachwachsende Rohstoffe zz. nur geringe Bedeutung. Sie finden als potentielle Energiepflanzen Erwähnung. Durch Verbrennung oder Vergasung der Biomasse könnten sie in Zukunft als Energielieferanten genutzt werden [15], [17], [18]. Ebenso wie bei Weizen ist die Stärke hinsichtlich des Massenanteils zwar der bedeutendste Inhaltsstoff, er wird aber derzeit nicht industriell genutzt. Für die Isolierung der Triticalestärke ist aufgrund des fehlenden Bedarfs bisher auch kein spezielles Verfahren entwickelt worden. Einer wirtschaftlichen Gewinnung der Roggenstärke steht eine zu niedrige Ausbeute entgegen. Die im Roggenmehl enthaltenen Pentosane und  $\beta$ -Glucane erhöhen die Viskosität des Prozesswassers und erschweren so die Stärke-Protein-Trennung [19]. Zudem lässt sich aus Roggen und Triticale kein Vitalgluten gewinnen, dieses Nebenprodukt ist bei der Weizenstärkeherstellung mit einer Ausbeute von nur 9% etwa zu einem Drittel am gesamten Produktionserlös beteiligt [20].

Weiter vorangeschritten ist die Entwicklung thermoplastisch verformbarer Werkstoffe auf der Basis von Roggenmehl<sup>4</sup> für das Spritzgießen, die Herstellung von Pflanzpaletten unter Verwendung von Roggenmahlprodukten und Pflanzenfasern<sup>5</sup> sowie der Einsatz extrudierten Roggenschrots in Dämmstoffplatten<sup>6</sup> [21], [22]. Dämmstoff-Granulat aus Roggenschrot und

---

<sup>4</sup> Getrex®, IGV GmbH

<sup>5</sup> ROFA®-Pflanzplatten, IGV GmbH

<sup>6</sup> Cobbelsdorfer Naturstoff GmbH

Kleie<sup>7</sup> wird seit dem Jahr 2000 in Serie produziert [21], [23]. Aus Frankreich ist ein kommerzielles Biopolymer<sup>8</sup> aus Roggenmehl bekannt. Es wird durch Gelatinierung und Plastifizierung mit natürlichen Alkoholen hergestellt und soll in seinen Eigenschaften den etablierten Kunststoffen wie Polyethylen oder Polypropylen nahe kommen [2].

In aktuellen Forschungsarbeiten bilden charakteristische funktionelle Eigenschaften von Roggen und Triticale die Ausgangspunkte zur Entwicklung neuer Non-Food-Anwendungen. So werden die stark adhäsiven Eigenschaften erhitzter oder modifizierter Roggenstärke und -mehle zur Herstellung von Klebstoffen und Leimen genutzt [24], [25]. Dabei erweist sich das hohe Wasserbindevermögen von Roggenmehl als weiterer Vorteil, es reguliert z.B. das Eindringen von Leim in Furniere und Sperrholz [24]. Die niedrigere Verkleisterungstemperatur erlaubt bei der Papierfertigung höhere Maschinengeschwindigkeiten, wenn Additive aus Roggenstärke eingesetzt werden [25]. Die löslichen Proteine des Roggens in Verbindung mit den Pentosanen sind zur Bildung stabiler Schäume fähig [25]. Der hohe Pentosengehalt des Roggens lässt die Gewinnung von Furfural aussichtsreich erscheinen [8]. Die hohe Enzymaktivität des Roggens, aber vor allem auch der Triticale, führt zu einer Verringerung oder zum Wegfall des Fremdenzym-Einsatzes bei der Alkoholproduktion [24], [26], [27]. Der große Anteil an Feinkornstärke bei Triticale bietet die Möglichkeit, durch Gewinnung dieser Fraktion Ersatz für die in Deutschland nicht mehr produzierte Reisstärke zu erhalten [20]. Allerdings kann Reisstärke auch importiert und Feinkornstärke aus Weizen inzwischen wirtschaftlich gewonnen werden.

## **2.4 Vermahlung von Roggen und Triticale**

### **2.4.1 Mahlverfahren zur Herstellung von Backmehlen**

Die in der Getreidevermahlung zur Mehlgewinnung aus Weizen und Roggen angewendeten Mahlverfahren haben die Aufgabe, Endosperm, Schale und Keimling des Korns voneinander zu trennen und die Zwischenprodukte der Zerkleinerung quantitativ und qualitativ zu fraktionieren. Die selektive Zerkleinerung ist am besten durch den Einsatz von Walzenstühlen zu erreichen. Die bekannten Mahlverfahren sind an die jeweiligen Rohstoffeigenschaften sowie den Anforderungen an Mehlqualität und -ausbeute angepasst. Dabei bestehen zwischen Roggen und Weizen gravierende Unterschiede. So erfordert die Gewinnung heller Weizenmehle ein schonendes Grobzerkleinern des Korns. Es wird ein hoher Grieb- und Dunstanfall angestrebt, der nach dem Abtrennen von Schale und Keimling zu Mehl vermahlen wird. Dagegen

---

<sup>7</sup> CERALITH®, Romonta Ceralith GmbH, Amsdorf

werden bei der Roggenvermahlung hauptsächlich dunklere und pentosanreiche Mehle der Typen 997 und 1150 gewonnen. Die zäh-plastische und weichere Endospermstruktur des Roggens führt zu einem geringen Anfall an Zwischenprodukten bei gleichzeitig hoher Mehlbildung. Die Vermahlung von Roggen ist daher auf eine hohe Mehlausbeute aus jeder Passage bei Walzenführung mit engem Mahlpalt ausgerichtet [28]. Für die Vermahlung von Roggen in Walzenstühlen werden Riffelwalzen eingesetzt. In der Riffelstellung Rücken gegen Rücken (R:R) üben sie Druck-, Scher- und Schneidwirkungen, in der Stellung Schneide gegen Schneide (S:S) Schneid-, Druck- und Scherwirkungen auf das Mahlgut aus. Die Druckbeanspruchung im Walzenstuhl wird nur beim Quetschen oder Vorbrechen des Roggens mit Glattwalzen angewendet, verliert aber in neueren Mahlverfahren an Bedeutung [29]. Bedingt durch die plastischen Eigenschaften der Roggengrieße ist ihre Zerkleinerung mit Glattwalzen, wie sie für die Auflösung von Weizengrießen verwendet wird, nicht üblich [28]. Zur Unterstützung der Mahlarbeit der Walzen oder als Selbstpassage werden auch Prallmühlen eingesetzt.

Ein Beispiel für ein Roggenvermahlungsdiagramm zeigt Abbildung 2. Die Vermahlung von Roggen zur Herstellung von Typenmehlen umfasst ca. 11-14 Passagen, bei verstärktem Einsatz von Mahlhilfsmaschinen wie Kleieschleudern, Auflösern und Prallmühlen 8-10 Passagen [29]. In der ersten Zerkleinerungsstufe fallen bei der hohen Zerkleinerungsintensität bis zu 20% Mehl an. In den weiteren Schrotungen nehmen die Mehlausbeuten stufenweise ab. Grieße und Dunste aus den Schrotpassagen werden in Grießmahlungen zu Mehl zerkleinert.

Für Triticale ist bisher kein eigenes Mahlverfahren entwickelt worden. In den bekannten Untersuchungen zur Triticalevermahlung wurden sowohl Roggen- als auch Weizenmahlverfahren angewandt [30, 31, 32, 33].

---

<sup>8</sup> POLYNAT®, ROVERCH S.A., Frankreich

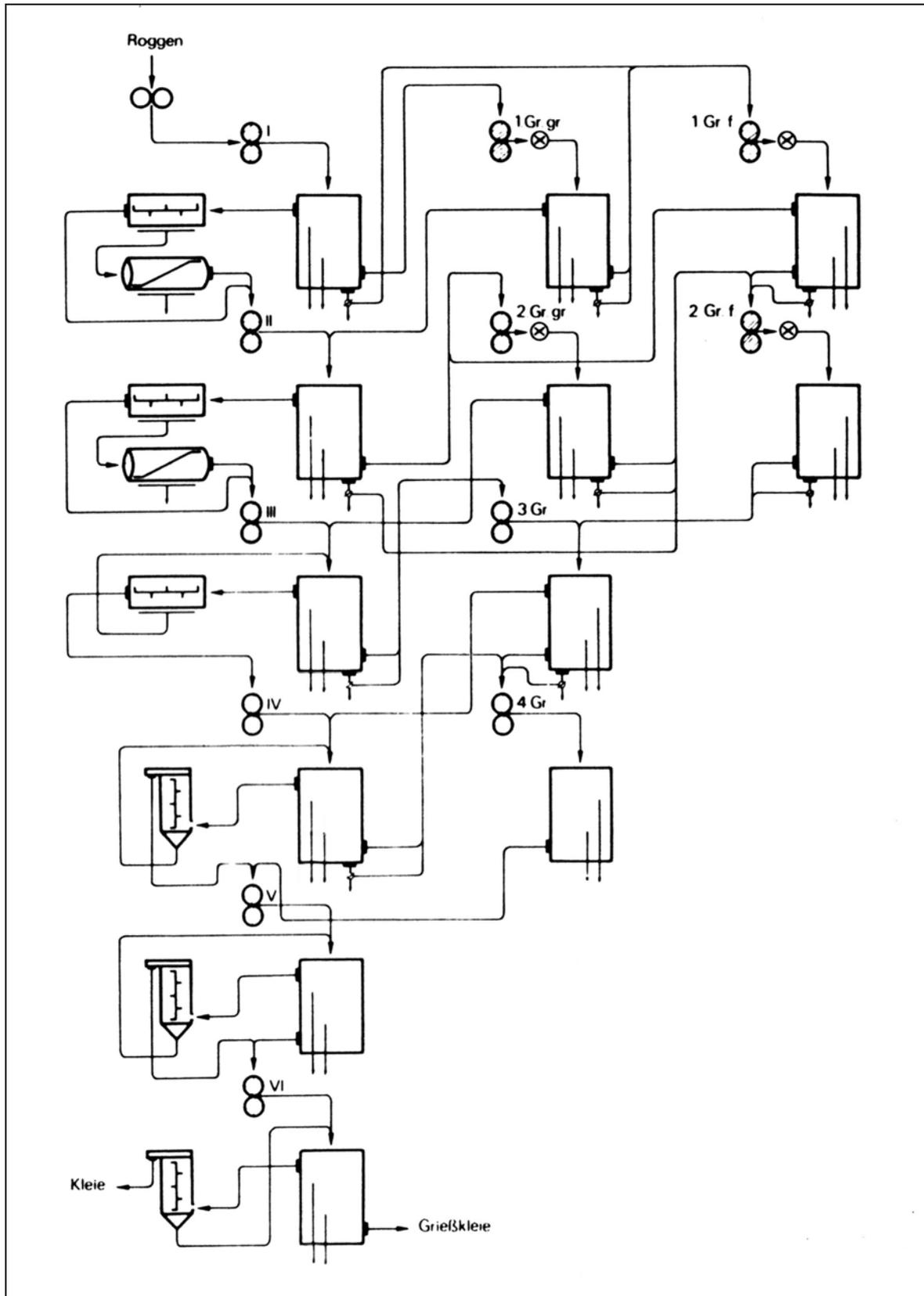
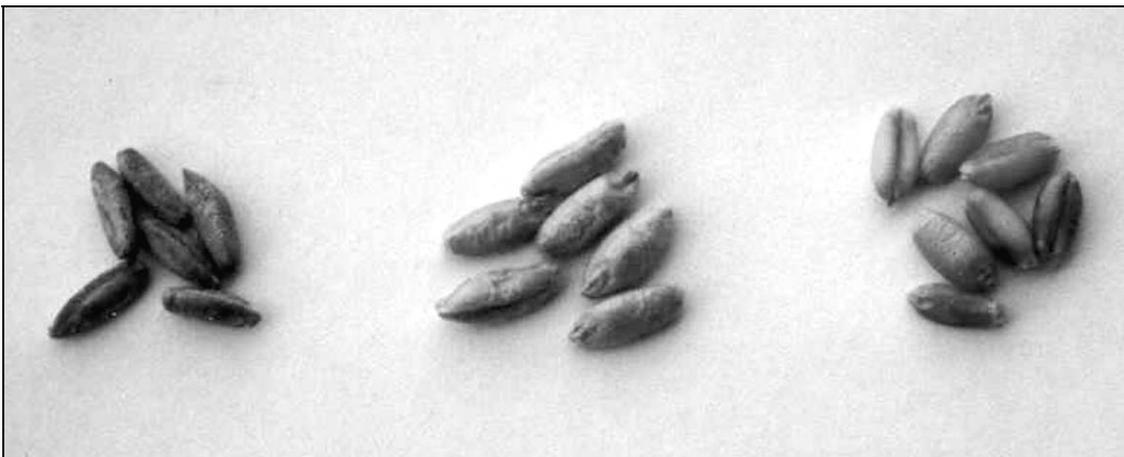


Abb. 2: Roggenvermahlungsdiagramm [28]

### 2.4.2 Kornbeschaffenheit von Roggen und Triticale

Die Mahleigenschaften der Getreide werden vor allem vom morphologischen Aufbau und der stofflichen Zusammensetzung des Korns beeinflusst. Bei den als Kreuzungsprodukt aus Weizen und Roggen entstandenen Triticalesorten sind Eigenschaften des Roggens und des Weizens in unterschiedlichem Maße ausgeprägt.

Schon bei der äußeren Kornform sind charakteristische Unterschiede zwischen Roggen und Triticale festzustellen. Triticale weist größere und längere Körner mit leicht runzlicher Oberfläche auf (Abb.3). Triticalesorten der späten 60er bis in die Mitte der 70er Jahre bildeten meist Schrumpfkörner mit welliger Oberfläche. Die Ursache der Schrumpfung liegt im schnellen Kornwachstum in frühen Entwicklungsstadien der Kornbildung. Teile des Nährgewebes fehlen und es entstehen Hohlräume im Endosperm [30]. Dieser Defekt ist bei neueren Zuchtsorten deutlich reduziert. Heute besitzen Triticalekörner eine volle bis leicht faltige oder runzlige Form [31], [32].



**Abb. 3:** Getreidekörner: Roggen, Triticale, Weizen (v.l.n.r.)

Die Tausendkornmasse von Triticale ist der des Roggens ähnlich, das Hektolitergewicht dagegen im allgemeinen niedriger (Tab.4). Aufgrund der rauen Kornoberfläche entstehen bei der Bestimmung des Hektolitergewichts größere freie Hohlräume [33]. Die Hauptursache ist aber in der lockeren Struktur des Kornendosperms zu sehen. Triticale weist eine niedrigere Korndichte auf (Tab.4), die Stärkekörner sind in geringerem Maße fest in der Proteinmatrix eingebettet [30], [33].

**Tabelle 4:** Kornbeschaffenheit von Roggen und Triticale

	<i>Quelle</i>	<b>Roggen</b>	<b>Triticale</b>
Tausendkornmasse (g %i.Tr.)	[30]	24,0	26,6
Hektolitergewicht (kg/hl)	[30]	74,20	71,15
Korndichte (g/cm <sup>3</sup> )	[34]*	1,28	1,26
Mineralstoffe (% i.Tr.)	[34]*	1,53	1,81
Rohprotein (% i.Tr.)	[34]*	10,7	13,1
Stärke (% i.Tr.)	[34]*	65,5	70,0
Pentosan (% i.Tr.)	[34]*	8,7	6,9

\* Roggen n=18, Triticale n=15

Analysenergebnisse zur stofflichen Zusammensetzung von Roggen und Triticale enthält Tabelle 4. Die Ergebnisse sind Mittelwerte aus einem dreijährigem Anbauversuch mit 6 Roggen- und 5 Triticalesorten am gleichen Standort bei konventionelle Anbauintensität [34]. Triticale weist gegenüber Roggen einen höheren Stärke-, Protein- und Mineralstoffgehalt auf, sowie einen geringeren Pentosananteil. Die Pentosane stellen die Zellwandbaustoffe des Korns, Ihr Anteil ist vor allem genetisch bedingt und nicht in dem Maße variabel wie z.B. der Proteinanteil in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung. Bei niedrigerem Pentosangehalt ist das Protein/Pentosan-Verhältnis im Triticale-Endosperm dem des Weizen-Endosperms ähnlicher, und die Kornhärte wird vorrangig durch die Beschaffenheit der Proteinmatrix bestimmt. Bei Roggen beeinflusst dagegen der hohe Pentosangehalt in starkem Maße die Zähigkeit und bewirkt eine schlechtere Mahlfähigkeit infolge der schwierigeren Trennung der Schale vom Endosperm [8], [35]. In neueren Roggensorten sind höhere Pentosangehalte zu verzeichnen. Bei der Züchtung von Roggensorten auf Auswuchsresistenz wird die Fallzahl als Indikator benutzt. Höhere Fallzahlen sind aber nicht nur durch geringere Enzymaktivitäten, sondern auch durch einen höheren Quellstoffanteil zu erreichen. Ein Einfluss des zunehmenden Pentosangehalts auf die Mehlausbeute der Roggenvermahlung konnte aber bei dem hohen Niveau von über 80% Ausmahlung bisher nicht festgestellt werden [36].

### 2.4.3 Mahleigenschaften von Roggen und Triticale

In Mahlversuchen wurde wiederholt festgestellt, dass der Vermahlungsverlauf von Triticale dem eines Weichweizens ähnlicher ist als dem von Roggen [30], [32], [35], [37], [38].

Bei Roggen werden die Korneigenschaften überwiegend von der Menge und Beschaffenheit der Pentosane beeinflusst. Nach der Wasserzugabe beim Netzen bestimmen sie aufgrund ihrer hohen Wasseraufnahmefähigkeit die Kornstruktur des zur Vermahlung vorbereiteten Getreides. Während die Schale an Sprödigkeit verliert und ein zäh-plastisches Verhalten zeigt, verändert sich das Roggen-Endosperm nur geringfügig [28]. Für das hohe Mehlbildungsvermögen wird der hohe Anteil an niedermolekularer Proteinfraction Friabilin verantwortlich gemacht. Diese Proteinfraction bewirkt eine schwächere Bindung des Stärkekorns in der Proteinmatrix der Endospermzelle als z.B. beim Weizen. Die Roggenstärke fällt unter der Einwirkung der Zerkleinerungskräfte leichter an [39].

Die lockere Kornstruktur von Triticale ermöglicht einen schnellen Wassereintritt ins Endosperm und dessen Mürbung. Die Schale lässt sich leichter und vollständiger vom Endosperm trennen als bei Roggen. Die Nachprodukte Schrot- und Grießkleie fallen zwar in höheren Anteilen als bei Weizen an, sind jedoch relativ sauber und stärkefrei. Die Mehlausbeute bei Triticale liegt meist unter den bei Weizen üblichen Werten. Triticale besitzt ein hohes Grießauflösungsvermögen. Das Endosperm zerfällt sehr leicht. Im Triticalekorn wurde ein höherer Anteil an löslichen Proteinen als Ursache einer weniger festen Quellstoffmatrix ermittelt, aus der die Stärke einfach zu lösen ist [30]. Insgesamt fallen die Mehle griffiger an als bei Roggen oder Weichweizen. Die Mineralstoffgehalte der Triticalemehle liegen jedoch weit über denen der Roggen- und Weizenmehle. Für die hohen Mehlaschen wurde ein erhöhter Mineralstoffgehalt des Endosperms verantwortlich gemacht [30].

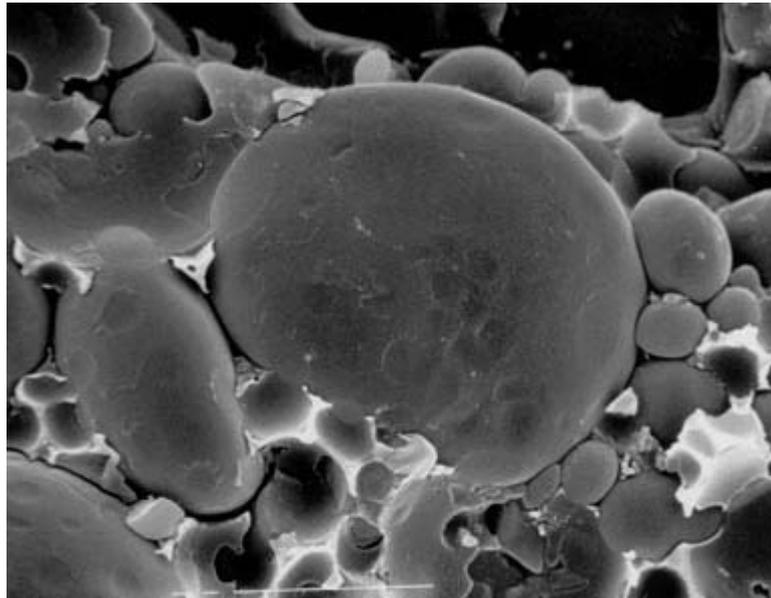
Untersuchungen zum extensivierten Weizenanbau ergaben einen nur geringen Einfluss der Anbauintensität auf das Mahlverhalten [10]. Der Verzicht auf Pflanzenbau- und Pflanzenschutzmaßnahmen, wie z.B. der Einsatz von Wachstumsregulatoren oder Fungizidbehandlungen, wirkten sich nicht auf die Mehlausbeute der Type 550 aus. Bei Verminderung der Stickstoffdüngung und damit des Proteingehalts konnten zum Teil geringere Kornhärten bei etwa gleicher Kornausbildung ermittelt werden, insgesamt wurden jedoch keine Veränderungen in den Mahleigenschaften festgestellt. Roggen mit einem niedrigeren Proteingehalt aus ökologischem Anbau wurde dagegen eine verbesserte Mahlfähigkeit bescheinigt [10].

#### 2.4.4 Windsichten von Roggen- und Tritcalemehlen

Das Windsichten ist als Verfahren der Trennung feinstvermahlener Weizenmehle in Fraktionen unterschiedlicher Inhaltsstoffe und funktioneller Eigenschaften verbreitet [40, 41]. Für Roggen- und Tritcalemehle sind bisher keine industriellen Anwendungen bekannt. Die windgesichteten Weizenmehle weisen gegenüber dem Ausgangsmehl signifikante Veränderungen im Protein- und Stärkegehalt auf. In der „groben“ Mehlfraktion ist hauptsächlich freigelegt Großkornstärke anzutreffen. Der Einsatz dieser proteinarmen Spezialmehle bringt Vorteile bei der Herstellung von Gebäcken, in denen die Glutenfunktionalität störend wirkt oder bisher zusätzlich Weizenstärke verwendet wurde; z.B. bei Waffeln, Oblaten, Keksen, Rühr- und Biskuitmassen. Die proteinangereicherten Mehlfraktionen wirken qualitätsverbessernd in Weizengrundmehlen und bei der Herstellung von Tiefkühlbackwaren. Der Anstieg des Feuchtglutengehalts führt zu höheren Wasseraufnahmen der Teige, höheren Verarbeitungstoleranzen und Gebäckvolumina. Sie verbessern die Frosterstabilität und helfen Gebäckfehler zu vermeiden [40].

Beim Windsichten werden trockene Feststoffteilchen nach ihrem unterschiedlichen Bewegungsverhalten im gasförmigen Medium getrennt. Das Bewegungsverhalten wird unter anderem von der Größe, Dichte und Form der Teilchen beeinflusst [40]. Daraus ergibt sich, dass eine Trennung nach der Korngröße eigentlich nur bei gleicher Dichte und Form der Teilchen möglich ist. Trotz dieser Einschränkung wird beim Windsichten von Mehl die Korngröße als wichtigstes Trennmerkmal angesehen. Als Trenngrenze zwischen zwei Fraktionen wird oft die Korngröße  $d_{50}$  angegeben. Teilchen dieser Korngröße sind mit 50%iger Wahrscheinlichkeit im Feingut oder im Grobgut anzutreffen.

Für die Proteinverschiebung durch das Windsichten sind niedrig ausgemahlene Mehle aus dem Inneren des Getreidekorns, dem Endosperm geeignet [41]. Es wird aus großräumigen Zellen gebildet, in denen die unterschiedlich großen Stärkekörner in einer Proteinmatrix eingebettet sind (Abb.4).



**Abb. 4:** Ausschnitt aus einer Endosperm-Zelle von Weizen, REM-Aufnahme [43]

Mehle sind hinsichtlich der Partikelgrößen ein heterogenes Gemisch aus Endospermzellen in verschiedenen Auflösungsgraden bis hin zu den freiliegenden Inhaltsstoffen Stärke und Protein. Eine Nachzerkleinerung der Mehle vor dem Windsichten erhöht den Anteil aufgelöster Mehlteilchen, die damit einer Sichtung zugänglich werden. Im aufgelösten Mehl sind mit einer Korngröße  $< 18 \mu\text{m}$  freie Zwickelproteine und im Bereich  $1\text{-}50 \mu\text{m}$  freiliegende Stärkekörner mit an der Oberfläche angelagertem Haftprotein zu finden [42].

Die Größenverteilung und Form der Stärkekörner ist abhängig von der Getreideart. Typisch für Weizen-, Roggen- und Triticalestärke ist eine Verteilung in eine Feinkorn- und eine Grobkornfraktion. Bei Triticale sind ähnlich wie beim Weizen Stärkekörner in zwei Größenbereichen zu finden: kugelig-eiförmige von  $2\text{-}8 \mu\text{m}$  Durchmesser und rundlich-elliptische, oft mit Kratern und deformiert, meist  $15\text{-}32 \mu\text{m}$  groß. Ein erstes Maximum in der Verteilung tritt im Feinkornbereich  $4\text{-}8 \mu\text{m}$  mit einem Anteil von  $40,4\%$  auf, ein zweites bei Korngrößen  $> 16 \mu\text{m}$  mit  $34,3\%$ . Auf die Masse der Triticalestärke bezogen, repräsentiert das zweite Maximum den dominierenden Anteil [20]. Typisch für Roggenstärke ist eine Massenverteilung von  $15\%$  im Korngrößenbereich  $\leq 10 \mu\text{m}$  und  $85\% \geq 11\text{-}40 \mu\text{m}$  [19]. Die größeren Stärkekörner besitzen eine linsenförmige Gestalt. Vor allem beim Roggen sind die Grobkörner (bis über  $50 \mu\text{m}$ ) häufig durch Übergangsstadien mit den Kleinkörnern verbunden [45]. Die Werte der Korngrößenverteilungen verschiedener Getreidestärken zeigen den im Vergleich zu Roggenstärke höheren Feinkornanteil der Triticalestärke (Tab.5). Die Korngrößenverteilung der Stärke von Triticale ähnelt mehr der von Weizen, speziell von Hartweizen [44].

**Tabelle 5:** Korngrößenverteilung von Getreidestärken [44]

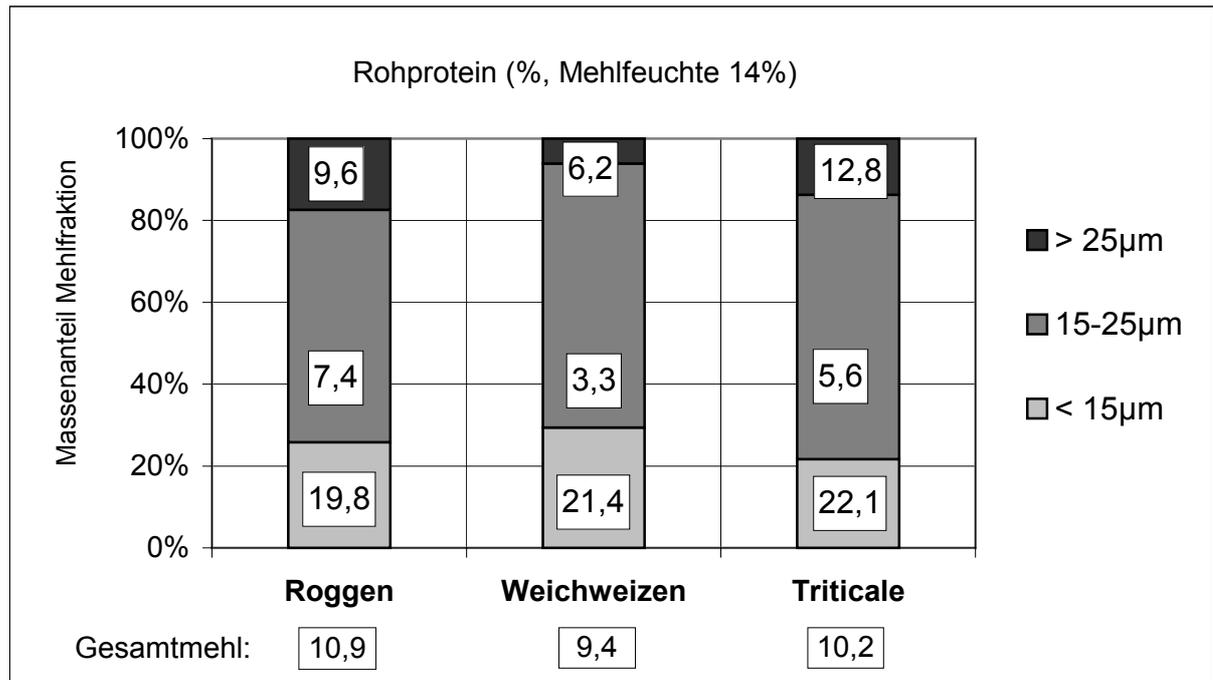
Korngröße (µm)	>40	30-40	20-30	10-20	<10
	Anteil (%)				
Roggen	6	17	49	26	2
Triticale	0	7	28	55	10
Hartweizen	0	2	31	49	18
Weizen HRS*	0	3	41	46	10

\* hard red spring

Für die Abtrennung einer proteinreichen Fraktion sowohl aus Weizenmehl als auch aus Roggenmehl [25] durch Windsichten werden Trenngrenzen <10-20 µm angegeben [46], [47], [48], [49]. Diese Fraktionen enthielten in Abhängigkeit vom Auflösungsgrad und der Packungsdichte der Stärke-Proteinmatrix sowie vom Ausgangsproteingehalt des Mehles 14-24 %i.Tr. Rohprotein.

Für den Einsatz zur trocken-chemischen Modifizierung erscheint die Fraktion des Korngrößenbereiches von 10-20 bis 35-50 µm am interessantesten. Darin wurden die höchsten Stärkeanteile und in Abhängigkeit vom Ausgangsproteingehalt die niedrigsten Proteingehalte mit Werten zwischen 3 bis 7%i.Tr. festgestellt. Ein Vergleich der Sichtfraktionen nachzerkleinerter Mehle zeigte gleiche Tendenzen für Roggen und Triticale wie für Weizen (Abb.5).

Die Proteingehalte in den Mehlfraktionen des Korngrößenbereichs <15 µm nahmen bis auf durchschnittliche Anteile von 20-22% zu, während im Bereich von 15-25 µm eine Abreicherung bis auf 3-7% festgestellt wurde. Die Proteingehalte in den größeren Fraktionen > 25 µm lagen im Bereich der Ausgangsmehle [38]. Der höchste Grad der Proteianreicherung wurde beim Sichten des Weizenmehls erzielt, die feinste Fraktion enthielt 82% des gesamten Proteinanteils. Bei Triticale wurden 58% der Proteine in der Fraktion <15 µm gefunden, bei Roggen nur 41%.



**Abb. 5:** Proteingehalte in den Mehlfraktionen von Roggen, Weichweizen und Triticale nach dem Windsichten [38]

Zusammengefasst wurde festgestellt, dass die Eigenschaften von Triticale bei der Windsichtung denen von Weichweizen ähneln, der Proteingehalt in den Fraktionen ist dabei höher.

### **3 Material und Methoden**

#### **3.1 Versuchsmaterial**

Zur Durchführung der Versuche zum Aufschrotten von Roggen und Triticale stand in ausreichender Menge Saatgetreide des Erntejahres 1996 zur Verfügung; für Roggen die Sorte Esprit<sup>9</sup> und für Triticale die Sorte Modus<sup>10</sup>. Für die Versuche zur Grießmahlung wurde ein kommerzieller 3. Roggengrieß<sup>11</sup> bzw. ein durch Vermahlung von Ernteproben hergestellter Triticalegrieß verwendet. Das für Windsichtversuche benötigte Roggen- und Triticalemehl ist ebenfalls aus der Vermahlung von Ernteproben unterschiedlicher Sorten gewonnen worden.

Die vergleichende Vermahlung von Roggen und Triticale unterschiedlicher Anbauintensität ist mit den Sorten Esprit und Modus des Erntejahres 1998 vorgenommen worden. Exemplarisch für Getreide aus dem konventionellen Anbau wurde Saatgetreide verwendet. Die Getreide des reduzierten Anbaus stammten aus einem Anbau ohne Fungizidanwendung mit niedrigerer Stickstoffdüngung von insgesamt 80 kg/ha. Standort des reduzierten Anbaus war Bernburg-Strenzfeld in Sachsen-Anhalt im mitteldeutschen Trockengebiet auf Lößschwarzerde [50]. Roggen und Triticale aus dem reduzierten Anbau sind vor der Vermahlung noch durch Windsichten gereinigt worden.

#### **3.2 Methoden der Untersuchungen am Korn**

##### **3.2.1 Bestimmung der Tausendkornmasse**

Die Tausendkornmasse (TKM) ist die feuchtefreie Masse von tausend unbeschädigten Körnern einer repräsentativen Getreideprobe und wurde durch manuelles Auszählen und Masseermittlung von zweimal 500 Körnern bestimmt.

##### **3.2.2 Bestimmung des Hektolitergewichts**

Zur Bestimmung wurde die Masse des Getreides in einem ¼ l Getreideprober ermittelt und anhand der Vergleichstafeln das Hektolitergewicht berechnet [51].

##### **3.2.3 Bestimmung des Vollkornanteils**

Der Vollkornanteil ist der schwarzbesatzfreie Anteil an Getreide > 1,8 mm. Die Bestimmung des Vollkornanteils ist gemäß den Angaben im ICC-Standard Nr. 103/1 durchgeführt worden.

---

<sup>9</sup> Lochow-Petkus, Bergen

<sup>10</sup> Nordsaat Saatzeit, Böhnshausen

### 3.2.4 Bestimmung der mittleren Korndicke

Die mittlere Korndicke ist das gewichtete arithmetische Mittel der in der Getreideprobe ermittelten Korngrößenklassen. Zur Bestimmung der mittleren Korndicke wurde die besatzfreie Probe durch Siebung über Schlitzlochsiebe in 10 Korngrößenklassen<sup>12</sup> getrennt und deren Massen ermittelt.

- Berechnung der mittleren Korndicke:

$$\mathbf{KD}_m[\text{mm}] = \frac{d_{K1} \cdot m_{K1} + \dots + d_{Kn} \cdot m_{Kn}}{m_{K1} + \dots + m_{Kn}} \quad \begin{array}{l} d_{K1} \dots d_{Kn} : \text{arithm. Mittel der Korngrößenklassen} \\ m_{K1} \dots m_{Kn} : \text{Masse der Korngrößenklasse} \end{array} \quad (1)$$

### 3.2.5 Bestimmung des mittleren Korndurchmessers

Der mittlere Korndurchmesser von Getreide ist auf Grundlage der Kornmaße Länge (L), Breite (B) und Dicke (D) einer repräsentativen Stichprobe näherungsweise bestimmt worden [61]:

- Berechnung des mittleren Korndurchmessers:

$$\mathbf{D}_m [\text{mm}] = 1,24 \sqrt[3]{L \cdot B \cdot D \cdot 0,52} \quad (2)$$

### 3.2.6 Bestimmung der Korndichte

Die Korndichte wurde anhand des spezifischen Volumens der Getreideprobe bekannter Masse, das durch Verdrängung der nichtbenetzenden Flüssigkeit Xylol ermittelt wurde, bestimmt. Der Wert für die Korndichte ist als Mittelwert aus drei Einzelbestimmungen berechnet worden.

### 3.2.7 Bestimmung des Schalenanteils

Die angewendeten Methoden ermöglichten alle nicht die exakte Bestimmung des Anteils der Schale am Korn. Während beim „Auswaschen nach Säureaufschluss“ [51] die in der Bauchfurche des Korns eingeschlossenen Schalenteile fehlten, wurden beim „Auswaschen unter Verwendung von Milchsäure“ Aleuronzellen und Keimling miterfasst. Obwohl die Aleuronzellen botanisch den Schaleschichten zuzuordnen sind, ist die weitestgehende Abtrennung der Aleuronzellen wie auch des Keimlings vom Mehl ein Ziel der Vermahlung. Somit liefert die Methode des „Auswaschens unter Verwendung von Milchsäure“ für die Bewertung des Ge-

<sup>11</sup> Eickernmühle, Lemgo-Voßheide

<sup>12</sup> (in mm): <1,0; >1,0; >1,5; >1,8; >2,0; >2,2; >2,5; >2,8; >3,0; >3,25

treides unter dem Aspekt der möglichen Mehlausbeute die geeigneteren Anhaltspunkte. Für Weizen wurden Schalenanteile zwischen 10 und 18% gefunden, für Roggen lagen die Werte etwa 1 bis 2% höher [52].

### 3.2.7.1 Auswaschen nach Säureaufschluss

50 g des bei 100°C getrockneten Getreides wurden mit 8 ml konz. Schwefelsäure durch zweiminütiges Rühren benetzt und in Abständen von 1 Minute wiederholt gemischt, bis alle Körner schwarz geworden waren. Danach wurden tropfenweise 3 ml konz. Salpetersäure unter ständigem Mischen zugegeben, bis sich unter Temperaturanstieg und Entwicklung brauner Dämpfe die Körner gelb färbten. Das anschließende Waschen und Dekantieren der abgelösten Schale wurde bis zur Neutralität des Waschwassers wiederholt, das behandelte Getreide anschließend bei 100°C getrocknet und der Gewichtsverlust gegenüber der Einwaage als Schalenanteil berechnet.

### 3.2.7.2 Auswaschen unter Verwendung von Milchsäure

5 g Getreide bekannter Feuchte wurden in 0,02 n Milchsäure 48 Stunden bei 40 bis 50°C geweicht, danach gequetscht und über einem Sieb so lange ausgewaschen, bis das Waschwasser stärkefrei war. Die Schalen sind wiederholt für 3 Stunden in Milchsäure bei 40 bis 50°C geweicht und ausgewaschen worden. Zur Berechnung des Schalenanteils diente das Gewicht der bei 105°C getrockneten Schalen.

### 3.2.8 Bestimmung der Mahleigenschaften

Die experimentelle Bestimmung der Mahleigenschaften von Roggen- und Triticaleproben erfolgte nach der Standard-Methode für den Mahlversuch [53]. Zur Vermahlung wurden sowohl der Bühler Laboratoriums-Mahlautomat<sup>13</sup> als auch der Mahlautomat QUADRUMAT® SENIOR verwendet. Bei letzterem ist auf ein weiteres Ausmahlen der Grieß- und Schrotkleie verzichtet worden. Die Vermahlungsfeuchte von Triticale betrug 16%, von Roggen 15%. Die Mahleigenschaften wurden anhand der erzielten Mehlausbeute, des Mineralstoffgehalts des Mehles und der daraus berechneten Aschewertzahl beurteilt.

- Berechnung der Aschewertzahl:

$$\text{AWZ} = \frac{\text{Mineralstoffgehalt (\% i.Tr.)}}{\text{Mehlanfall (\%)}} \cdot 100\,000 \quad (3)$$

<sup>13</sup> Modell MLU-202, Bühler-Miag, Braunschweig

### **3.3 Methoden zur Charakterisierung der Versuchsmaterialien und Mahlprodukte**

#### **3.3.1 Bestimmung des Feuchtegehalts**

Der Feuchtegehalt der Proben wurde entsprechend dem ICC-Standard Nr. 110/1 als Masseverlust nach dem Trocknen bei 130°C bestimmt [53].

#### **3.3.2 Bestimmung des Mineralstoffgehalts**

Die Bestimmung des Mineralstoffgehalts erfolgte nach dem ICC-Standard Nr. 104 durch Veraschen der Proben bei 900°C [53].

#### **3.3.3 Bestimmung des Stärkegehalts**

Der Stärkegehalt der Proben ist nach der Arbeitsvorschrift im ICC-Standard Nr. 123 durch Salzsäure-Aufschluss bestimmt worden [53]. Als Berechnungsfaktor für den spezifischen Drehwert  $A_D$  von Triticalestärke wurde der Wert 182,7 eingesetzt.

#### **3.3.4 Bestimmung der mechanischen Stärkebeschädigung**

Durch Wirkung äußerer Kräfte bei der Vermahlung und Sichtung, wie Scher- und Schubkräfte infolge Druck, Zug und Reibung, werden Stärkekörner mechanisch beschädigt. Die „mechanischen“ Kräfte können eine Modifizierung sowohl der äußeren Kornstruktur (erkennbar sind Risse, Brüche, Oberflächenverletzungen und Formänderungen) als auch der inneren quasikristallinen Struktur (Spannungen führen zum Aufbrechen von Bindungen) bewirken [54], [55]. Als Folge einer mechanischen Beanspruchung der Stärkekörner treten charakteristische Eigenschaftsänderungen auf: Verlust der Doppelbrechung, erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit in kaltem Wasser, erhöhte enzymatische Angreifbarkeit, Anfärbbarkeit, Amyloseextrahierbarkeit in kaltem Wasser, Verringerung der thermischen Stabilität.

Die qualitative Bestimmung der Stärkebeschädigung in Roggen- und Triticalemehlen erfolgte durch Mikroskopieren und Fotografieren der in Glycerin emulgierten Proben bei 100 bis 400facher Vergrößerung, teilweise im polarisierten Licht. Die Verwendung von Glycerin als vorübergehendes Mittel zum Einbetten verhinderte dabei ein Quellen und Verschleimen von Inhaltsstoffen [45].

Die bisher bekannten Methoden zur quantitativen Bestimmung schließen aus dem Maß der Eigenschaftsänderungen auf den Grad der Stärkebeschädigung. Am häufigsten werden enzymatische Methoden (Fa. MegaZyme) und Methoden zur Bestimmung der extrahierbaren A-

mylose (Hampel, Williams und Fegol, McDermott) verwendet. Zur Ermittlung der mechanischen Stärkebeschädigung in Roggen- und Titalcemehlen wurde die Methode von McDermott [56] benutzt. Sie ermöglicht bei geringem Arbeits- und Zeitaufwand gut reproduzierbare Ergebnisse [57].

- Extraktion der Amylose:

In einem 100-ml-Erlenmeyerkolben wurden 0,50 g der Probe eingewogen und im Wasserbad auf 30°C temperiert. 20 ml des auf 30°C erwärmten Extraktionsmittels<sup>14</sup> sind zugegeben worden. Die Extraktionszeit betrug 15 Minuten, wobei alle 3 Minuten 10 Sekunden lang geschüttelt wurde. Nach der Extraktion ist die Probe über einem Whatman-Filter Nr. 1 filtriert worden, wobei die ersten 2 ml des Filtrats verworfen wurden.

- Jodometrische Bestimmung der gelösten Amylose:

In einen 25-ml-Messkolben wurden 15 ml dest. Wasser mit einer Temperatur von 21,0°C gegeben und 2,0 ml des Filtrats sowie 1,0 ml der Jodlösung<sup>15</sup> zugefügt. Falls die blau-grüne Färbung des Amylose-Jod-Komplexes zu schwach war, musste ein weiterer aliquoter Anteil des Filtrats zugegeben werden. Nach dem Auffüllen mit dest. Wasser auf 25 ml blieb die Lösung 10 Minuten stehen. Die Extinktion des Farbkomplexes wurde gegen einen Blindwert bei 600 nm gemessen.

- Berechnung der Stärkebeschädigung:

$$SB \text{ [Blue Value (BV) / g i.Tr.]} = \frac{(\text{Extinktion Probe} - \text{Extinktion Blindwert}) \cdot 20 \cdot 100}{100 - F}$$

Für jede Probe ist eine Dreifachbestimmung durchgeführt worden. Die Stärkebeschädigung kann auf das Mehl oder auf den Stärkegehalt bezogen berechnet werden. In handelsüblichen Weizenmehlen liegen die Werte der Stärkebeschädigung bei 2,5 bis 3 BV/g<sub>Mehl</sub> i.Tr..

### 3.3.5 Bestimmung des Rohproteingehalts

Der Rohproteingehalt wurde gemäß dem ICC-Standard Nr. 105/1 nach dem Kjeldahl-Verfahren bestimmt [53].

<sup>14</sup> 1,67% Trichloressigsäure und 5,0% Kaliumthiozyanat in dest. Wasser

<sup>15</sup> 0,20 g Jodkristalle und 2 g Kaliumjodid in 100 ml dest. Wasser gelöst

### 3.3.6 Bestimmung des Pentosangehalts

Der Gesamtpentosengehalt ist nach einer von Dörfer [58] und Schober [59] modifizierten Methode nach Hashimoto et al. [60] bestimmt worden. Dabei werden die Pentosane hydrolysiert und die freigesetzten Pentosen kolorimetrisch bestimmt. Beim Erhitzen der pentosehaltigen Lösung mit Eisen(III)-chlorid in konz. Salzsäure und Orcin entsteht ein grüner Farbstoff, dessen Absorptionsmaximum bei 670 nm liegt. Die ebenfalls umgesetzte Glucose absorbiert bei 580 nm nahezu gleich stark wie bei 670 nm, so dass bei der Auswertung der Extinktionsdifferenz Störungen durch Glucose eliminiert werden.

- Aufschluss:

50 mg der Probe wurden mit 5 ml 0,5 M Schwefelsäure in einem 25-ml-Pyrex-Reagenzglas verrührt und 45 Minuten im siedenden Wasserbad erhitzt. Nach dem Abkühlen unter laufendem Leitungswasser wurde der Aufschluss filtriert.

- Dehydratisierung und Farbreaktion:

0,1 ml des klaren Filtrats wurden in ein Pyrex-Reagenzglas pipettiert, 2,9 ml dest. Wasser und 3 ml Orcin-Reagenz<sup>16</sup> zugefügt, 10 Sekunden gemischt und anschließend 30 Minuten im siedenden Wasserbad erhitzt. Nach dem Abkühlen bei 20°C wurden die Extinktionen bei 670 und 580 nm gemessen.

- Berechnung des Pentosangehalts:

Anhand der Kalibriergeraden (erstellt mit D(+)-Xylose und dem verwendeten Orcin-Reagenz) wurde die Konzentration an Pentose  $x_P$  berechnet, die der Extinktionsdifferenz der Probe entspricht. Einem bestimmten Pentosengehalt lagen drei Einzelbestimmungen zugrunde.

$$\text{Pentosan [\% i.Tr.]} = \frac{x_P \text{ (mg/l)} \cdot 100 \cdot 0,88}{\text{Einwaage}_{\text{ProbeTrockenmasse}} \text{ (mg)} \cdot 5,556}$$

## 3.4 Methoden zur Charakterisierung der Zerkleinerung

### 3.4.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung

Die Verteilung der Korngrößenklassen in den Mahlprodukten wurde durch Siebanalysen bestimmt. Dabei lag die untere Trenngrenze bei 40 µm. Für den Korngrößenbereich >100 µm ist

<sup>16</sup> Orcin-Reagenz: 5,3 mmol (750 mg) Orcin und 7 ml FeCl<sub>3</sub>-Lösung (10 g Eisenchlorid[x6 H<sub>2</sub>O] in 100 ml dest. Wasser lösen, mit 30%iger Salzsäure auf 1 Liter auffüllen)

das zu untersuchende Material auf einer Plansiebmaschine<sup>17</sup> klassiert worden, für den Korngrößenbereich von 100 bis 40 µm kam bei Bedarf ein Alpine-Luftstrahlsieb<sup>18</sup> zum Einsatz.

Zur Auswertung der Versuche zum Windsichten erfolgte die Ermittlung der Korngrößenverteilungen in den Mehlen und Sichtfraktionen als Doppelbestimmung im Messbereich von 0,16 bis 300 µm im Laser-Particle-Sizer<sup>19</sup>. Das Untersuchungsmaterial wurde dabei für die Messung in n-Butanol suspendiert, um ein Quellen und Lösen von Inhaltsstoffen zu verhindern.

### 3.4.2 Berechnung der Oberflächenzunahme

Die Oberflächenzunahme ( $\Delta A_O$ ) ist die Differenz der Oberflächen des vermahlenden Materials nach ( $A_{O2}$ ) und vor ( $A_{O1}$ ) der Zerkleinerung. Die Oberfläche einer Getreideprobe wurde näherungsweise nach den Untersuchungen am Korn anhand der Korndichte ( $\rho_{Korn}$ ) und des mittleren Korndurchmessers ( $D_m$ ) ermittelt.

- Berechnung der Oberfläche von Getreide:

$$A_{O1} = A_{OKorn} [m^2/kg] = \frac{6}{\rho_{Korn} \cdot D_m} \quad (4)$$

Die Oberfläche eines Mahlprodukts wurde durch Summation der gewichteten Teiloberflächen von Korngrößenklassen nach einer Siebanalyse berechnet. Die verwendeten Stoffdichten der Siebfractionen sind für Roggen- und Triticalemahlprodukte in Vorversuchen ermittelt worden<sup>20</sup>.

- Berechnung der Oberfläche von Mahlprodukten:

$$A_{OTeil} [m^2] = \frac{6 \cdot m_K}{\rho_K \cdot d_{mK}} \quad \begin{array}{l} m_K : \text{Masse der Korngrößenklasse} \\ d_{mK} : \text{arithm. Mittel der Teilchengröße} \\ \rho_K : \text{Stoffdichte der Korngrößenklasse} \end{array} \quad (5)$$

$$A_{O1 \text{ oder } 2} [m^2/kg] = \sum_{i=1}^n A_{Oteil} (n) / m_{ges} \quad m_{ges}: \text{Gesamtmasse der Korngrößenklassen} \quad (6)$$

<sup>17</sup> Typ analysette 18, Fritsch, Idar-Oberstein bzw. Typ KS 1000, Retsch, Haan

<sup>18</sup> Typ 200 LS, Hosokawa Alpine, Augsburg

<sup>19</sup> Typ analysette 22, Fritsch, Idar-Oberstein

<sup>20</sup>  $\rho = 1450 \text{ g/cm}^3$  : Triticale < 200µm, Roggen < 160 µm; alle größeren Fraktionen  $\rho = 1350 \text{ g/cm}^3$

### 3.4.3 Berechnung des Zerkleinerungsgrades

Für eine Einschätzung des Zerkleinerungserfolgs kann der Zerkleinerungsgrad als Verhältnis des mittleren Teilchendurchmessers des Aufgabegutes ( $d_{m1}$ ) und des mittleren Teilchendurchmesser des gemahlten Gutes ( $d_{m2}$ ) oder der jeweiligen Oberflächen ( $A_{O1}$  bzw.  $A_{O2}$ ) berechnet werden [61]:

- Berechnung des Zerkleinerungsgrades:

$$\mathbf{ZG} = \frac{d_{m1}}{d_{m2}} \quad (7) \quad \text{oder} \quad \mathbf{ZG} = \frac{A_{O2}}{A_{O1}} \quad (8)$$

Die mittleren Teilchendurchmesser für Mahlprodukte wurden aus den Ergebnissen der Siebanalysen nach Gl. (1) berechnet.

### 3.4.4 Ermittlung der Zerkleinerungskräfte im Walzenstuhl

Grundlage der Berechnung von Zerkleinerungskräften im Walzenstuhl waren die während der Mahlversuche erfassten Messwerte für die Drehmomente der Walzen und für die an den Lagern der Walzen wirkenden Druckkräfte. Die verstärkten und bearbeiteten Messsignale<sup>21</sup> wurden von der Software<sup>22</sup> im PC erfasst und verarbeitet. An den Antriebswellen der schnellen und langsamen Walze in Messdosen angebrachte Dehnmessstreifen lieferten über Kohle-schleifkontakte Messsignale zur Erfassung der tangentialen Drehmomente ( $M_t$ ). Auf die Walzen horizontal einwirkende Druckkräfte wurden über Dehnmessstreifen an jeder Lagerspindel gemessen, die Gesamtdruckkraft ( $F_D$ ) einer Walze war die Summe der auf den rechten und linken Lagerbock wirkenden Teilkräfte.

Für die Berechnung der zur Zerkleinerung aufgewandten Kräfte wurde die Differenz aus den mittleren Drehmomenten bzw. Druckkräften während der Zerkleinerung und im Leerlauf verwendet.

- Berechnung der Tangentialkraft (wirkt an der Walzenoberfläche):

$$\mathbf{F}_t \text{ [kN]} = \frac{M_t}{r_w} \quad r_w: \text{Walzenradius} \quad (9)$$

<sup>21</sup> Messverstärker-System MGC, HBM, Darmstadt

<sup>22</sup> catman für MS-Window, HBM, Darmstadt

- Berechnung der resultierenden Kraft (entspricht angenähert der auf das Mahlgut wirkenden Kraft):

$$F_{\text{res}} [\text{kN}] = \sqrt{F_D^2 + F_t^2} \quad (10)$$

### 3.4.5 Ermittlung der Zerkleinerungsleistung

- Berechnung der Zerkleinerungsleistung im Betriebszustand des Walzenstuhls:

Die zur Zerkleinerung notwendige Leistungsaufnahme wurde als Differenz der Leistungen der schnellen ( $P_s$ ) und der langsamen ( $P_l$ ) Walze ermittelt:

$$P_Z [\text{kW}] = P_s - P_l = (F_{ts} \cdot v_s) - (F_{tl} \cdot v_l) \quad v_s \text{ bzw. } l: \text{ Walzenumfangsgeschwindigkeit} \quad (11)$$

Die Leistungsaufnahme bei der Prallzerkleinerung ist direkt gemessen<sup>23</sup> und der zeitliche Verlauf aufgezeichnet worden. Zur Berechnung der aufgewendeten Arbeit und Leistung wurde die Fläche unter der Verlaufskurve mit Hilfe eines Planimeters ermittelt. Die Zerkleinerungsleistung war aus der Differenz der Leistungsaufnahme während der Zerkleinerung und des Leerlaufs zu berechnen.

### 3.4.6 Berechnung der Zerkleinerungsarbeit

Um eine bessere Vergleichbarkeit und Aussagekraft zu erreichen, wurde die Zerkleinerungsarbeit auf die Masse ( $m$ ) des Aufgabegutes bzw. auf die Oberflächenzunahme ( $\Delta A_o$ ) bezogen berechnet.

- Berechnung der Zerkleinerungsarbeit:

$$\text{massebezogen:} \quad W_{Zm} [\text{kJ/kg}] = \frac{P_Z \cdot t}{m} \quad (12)$$

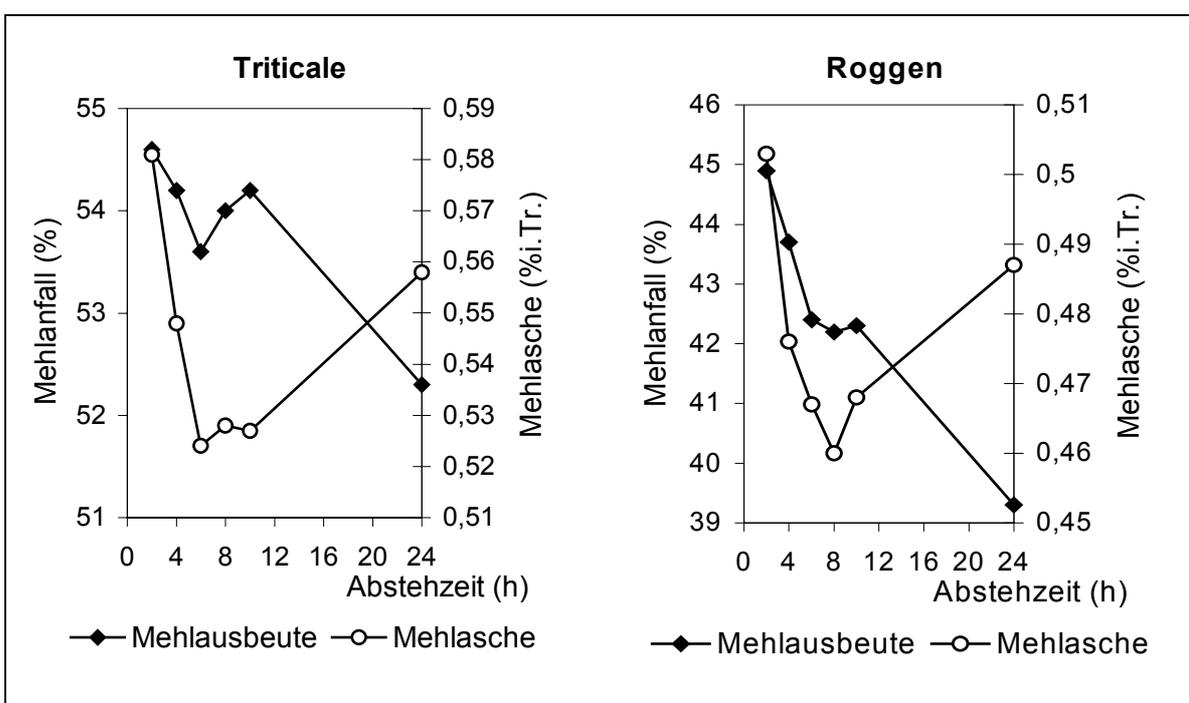
$$\text{oberflächenbezogen:} \quad W_{ZAo} [\text{kJ/m}^2] = \frac{P_Z \cdot t}{\Delta A_o} \quad (13)$$

<sup>23</sup> AC Power Analyzer D 5255 M, NGI Norma Goerz Instruments, Nürnberg

### 3.5 Durchführung der Versuche zum Vermahlen und Windsichten

#### 3.5.1 Abstezeit genetzter Getreide vor der Vermahlung

Der Zeitpunkt der optimalen Abstezeit des genetzten Getreides ist erreicht, wenn sich das Bruchverhalten der Schale am weitesten von dem des Endosperms unterscheidet. Die Schaleschichten lassen sich durch die verringerte Sprödigkeit großflächiger und vollständiger vom mürberen Mehlkörper trennen. Es können mineralstoffärmere Mahlprodukte gewonnen werden. Deshalb wurden die Mineralstoffgehalte der bei Vermahlungsversuchen im Mahlautomaten QUADRUMAT® SENIOR<sup>24</sup> anfallenden Mehle in Abhängigkeit von der Abstezeit zur Bestimmung der optimalen Abstezeit herangezogen (Abb.6).



**Abb. 6:** Ergebnisse der Standardmahlversuche von Roggen und Triticale in Abhängigkeit von der Abstezeit

Bei Roggen mit einem Feuchtegehalt zur Vermahlung von 15% ist die optimale Abstezeit bei minimalem Mineralstoffgehalt des Mehles nach 8 Stunden erreicht worden. Das Mehl aus Triticale mit der höheren Vermahlungsfeuchte von 16,5% erreichte in den Mahlversuchen sein Minimum nach 6 Stunden. Der Anstieg der Mineralstoffgehalte bei Abstezeiten zwischen 6 bis 10 Stunden war sehr gering. Auch der Mehlanfall blieb bei Abstezeiten von 2 bis 10 Stunden nahezu unverändert. Eine Überschreitung der optimalen Abstezeit von 6 Stunden um bis zu 4 Stunden zog keine deutliche Verschlechterung der Mahlergebnisse nach sich.

<sup>24</sup> BRABENDER® OHG, Duisburg

### 3.5.2 Vorbereiten des Versuchsmaterials

Vor der Zerkleinerung des sauberen Versuchsgetreides ist der Feuchtegehalt von Roggen und Triticale durch Netzen mit kaltem Wasser in einem Schneckenmischer innerhalb von 6 Minuten auf die erforderliche Vermahlungsfeuchte erhöht worden. Die genetzten Chargen von jeweils 10 kg wurden in einen ausreichend großen Behälter überführt, nochmals gemischt und anschließend im geschlossenen Behälter bei Raumtemperatur die gewünschte Zeit abstehen gelassen. Das genetzte Getreide bzw. die zu zerkleinernden Zwischenprodukte wurde für die Vermahlungen im Walzenstuhl in Chargen zu 2 kg abgewogen. Für die Vermahlungen in der Stiftmühle wurden Portionen von jeweils 3 kg hergestellt.

### 3.5.3 Zerkleinern im Walzenstuhl

Das Zerkleinern erfolgt auf einem Versuchswalzenstuhl<sup>25</sup> mit horizontal angeordnetem Walzenpaar. Der einfache und gut zugängliche Aufbau des Versuchswalzenstuhls ermöglichte eine ausreichend schnelle Änderung der Zerkleinerungsparameter, so dass die Vermahlungen nach einem Versuchsplan unter gleichbleibenden äußeren Bedingungen erfolgen konnten.

Die Mahlwalzen (Tab.6) mit einer Walzenlänge von 1dm wurden getrennt angetrieben, die zwischen den Walzen und den Elektromotoren angeordneten 33-stufigen Zahnradgetriebe gestatteten für die verwendeten Walzendurchmesser von 250 mm Umfangsgeschwindigkeiten von 1,6 bis 19,4 m/s der schnellen Walze und 1,0 bis 12,9 m/s der langsamen Walze. Die Drehzahlen der Speisewalzen blieben während der Versuche unverändert, die unterschiedlichen Beschüttungen des Walzenstuhls wurden über die Stellung des Auslaufschiebers am Vorratsgefäß eingestellt. Änderungen des Mahlspalts zwischen den Walzen sind mit Hilfe einer Fühllehre durch Verrücken der langsamen Walze über zwei Handräder vorgenommen worden.

**Tabelle 6:** Kennwerte der Walzenpaare zur Roggen- und Triticalevermahlung

	Quetschen	I. Schrot	II. / III. Schrot	IV. Schrot*	1. u. 2.* Grieß
- Riffelzahl (je cm)	4,5	5	10	11	14
- (Vergl. zu [62])**		(5,5...6)	(6,5...7,5)	(8...8,5)	(10,5...12)
- Drall (%)	10				12 oder 5
- Riffelwinkel $\alpha / \beta$ (°)	35 / 70				45 / 75

\* nur Roggen

\*\* kombinierte Roggen- und Weizenvermahlung bei Walzendurchmesser 250 oder 300 mm

<sup>25</sup> Maschinen- und Mühlenbau Wittenberg in Zusammenarbeit mit der Humboldt-Universität zu Berlin

Die Vermahlungsbedingungen am I. Schrot führten zu einer intensiven Zerkleinerung. Dem hohen Feingutanteil im Aufgabegut wurden die Riffelzahlen der nachfolgenden Zerkleinerungsstufen angepasst. Für die Grießvermahlung und den IV. Schrot (Abb.7) standen mehrere Walzenpaare zur Auswahl. In Vorversuchen wurde anhand der Zerkleinerungsergebnisse die jeweils günstigste Variante ermittelt.

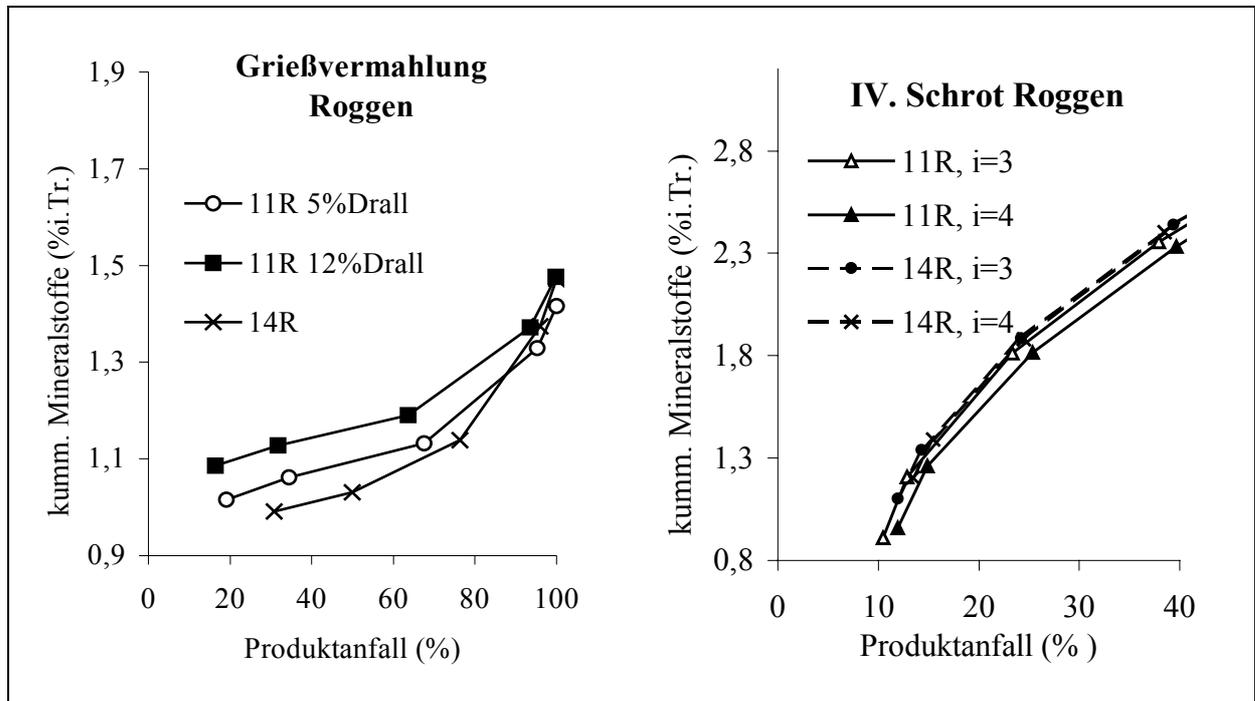


Abb. 7: Anfall-Asche-Kurven unterschiedlicher Walzenpaare

Im Vergleich zu gebräuchlichen Riffelwerten einer kombinierten Roggen- und Weizenvermahlung nach Gerecke [62] wurden wegen der niedrigeren Teilchengröße feinere Riffelungen verwendet (Tab.6). Die Riffelwinkel und der Drall der Mahlwalzen waren nicht wählbar.

In allen Passagen wurde die Riffelstellung Rücken gegen Rücken (R:R) angewendet. Bei dieser Arbeitsstellung wird das Zerkleinerungsgut gegen die Rückenflächen der langsamen Walze gedrückt und mit der Verkleinerung des Mahlspalts zerstört. Charakteristisch ist die gegenüber den Scherkräften erhöhte Druckkraft [63]. Die Geschwindigkeit der Teilchen nähert sich auf dem Zerkleinerungsweg mehr der Geschwindigkeit der langsamen Walze an. Das Mahlgut verweilt länger in der Mahlzone und eine größere Anzahl Mahlgutteilchen werden getroffen mit der Folge, dass das Zerkleinerungsprodukt insgesamt feiner, durch geringere Schalezerkleinerung auch ascheärmer ist. Nachteilig der Stellung R:R gegenüber anderen Riffelstellungen sind der höhere Energieverbrauch und kürzere Riffelstandzeiten [63]. Empfohlen wird die Stellung R:R u. a. für das Schroten von Roggen und Weichweizen bei hoher Mehlbildung

[62] und bei einer Gesamtmehlausbeute <70% [63]. Die Festlegung auf die Riffelstellung R:R in allen Versuchsplänen ist in dem zu erwartenden hohen Feingut- und Mehlanfall mit geringem Mineralstoffgehalt der vorderen Passagen der Roggen- und Triticalevermahlung im Walzenstuhl begründet.

### 3.5.4 Prallzerkleinern in der Stiftmühle

Die Versuche zur Prallzerkleinerung der gequetschten Getreide und Zwischenprodukte fanden in einer Schlagstiftmühle des Typs Record A<sup>26</sup> mit jeweils zwei Stiftkreisen auf Stator und Rotor als Mahlelemente statt. Das Aufgabegut wurde über eine Schüttelrinne gleichmäßig dosiert zugeführt. Durch die hohe Umfangsgeschwindigkeit des Rotorstiftkreises entstand ein Sog, der das Mahlgut radial in den Mahlraum einzog. Das Gut bewegte sich vom inneren zum äußeren Stiftkreis und wurde dabei durch mehrmaliges Aufprallen auf die Stifte zerkleinert. Die Gutbewegung erfolgte geradlinig oder kreisförmig, neben der Prallbeanspruchung trat auch Reibung auf. Die auf das Gut wirkende Zerkleinerungsenergie hing von der kinetischen Energie ( $E_{kin}$ ) der Teilchen ab:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v_{rel}^2 \quad \begin{array}{l} m: \text{Masse des Teilchens} \\ v_{rel}: \text{Relativgeschwindigkeit zwischen} \\ \text{Teilchen und Mahlfläche} \end{array} \quad (14)$$

Bei einer angenommenen Kugelform der Teilchen und konstanter Relativgeschwindigkeit ( $v_{rel}$ ) beeinflusste neben der Stoffdichte ( $\rho$ ) vor allem der Teilchendurchmesser ( $d_T$ ) die aufgenommene kinetische Energie:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} V_{Kugel} \cdot \rho \cdot v_{rel}^2 \quad E_{kin} \approx \rho \quad (15)$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot \pi/6 \cdot d_T^3 \cdot \rho \cdot v_{rel}^2 \quad E_{kin} \approx d_T^3$$

Die Umfangsgeschwindigkeit der Rotorstiftscheibe nahm nach außen hin zu, so dass die zu zerkleinernden Teilchen selbst bei abnehmender Korngröße eine höhere Zufuhr an kinetischer Energie erfuhren [61]. Über die am Frequenzumrichter einstellbare Solldrehzahl ( $n$ ) des Motors wurde die Umfangsgeschwindigkeit ( $v$ ) des Stiftrotors variiert:

$$v \text{ [m/s]} = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad d: \text{Stiftkreisdurchmesser (m)} \quad (16)$$

<sup>26</sup> Gebr. Jehmlich, Nossen 1993

Der Durchsatz der Stiftmühle wurde von der regelbaren Intensität der Vibrationen der Schüttelrinne und von den Fließeigenschaften des Mahlgutes bestimmt. Weitere Kennwerte zu den Mahlelementen sind in Tabelle 7 enthalten:

**Tabelle 7:** Mahlelemente der Stiftmühle Record A

Doppelstiftreihen	Schlagstiftrotor	Schlagstiftstator
- Zahl der Stifte	72 (52 + 20)	104 (58 + 46)
- Wirklänge der Stifte (mm)	22	22
- Durchmesser der Stifte (mm)	7	7
- max. Stiftkreisdurchmesser (mm)	210	232
- max. Drehzahl ( $\text{min}^{-1}$ ) / max. Umfangsgeschwindigkeit des äußeren Stiftkreises (m/s)	10 000 / 110	-

### 3.5.5 Klassieren der Zerkleinerungsprodukte

Für das Klassieren größerer Massen von Zerkleinerungsprodukten wurde ein Kurzplansichter<sup>27</sup> zu Hilfe genommen. Insbesondere die Ergebnisse der Siebanalyse von Grießfraktionen wichen aufgrund des anderen Klassierprinzips von den Sichterergebnissen deutlich ab, so dass nach der Sichtung die zur weiteren Vermahlung vorgesehenen Fraktionen auf Plansiebmaschinen nachgesiebt wurden, um die Vergleichbarkeit der Versuche zu bewahren. Die nach Korngröße klassierten Zerkleinerungsprodukte wurden bis zum nächsten Vermahlungsabschnitt in geschlossenen Behältern gekühlt gelagert.

### 3.5.6 Nachzerkleinern der Mehle für das Windsichten

Das Nachzerkleinern mittels Prallvermahlen diente der Vorbereitung der Mehle für das Windsichten. Durch die weitere Zerkleinerung noch vorhandener Endospermzellen wurde der Anteil freier Stärkekörner und freier Proteinteilchen erhöht, die der Sichtung zugänglich waren. Die Nachzerkleinerung wurde in einer Schlagstiftmühle des Typs 224<sup>28</sup> (Tab.8) bei maximaler Umfangsgeschwindigkeit des äußeren Stiftkreises durchgeführt, um einen möglichst hohen Auflösungsgrad zu erreichen.

Die Roggen- und Triticalemehle sind über eine Dosierschnecke dem Mahlraum zugeführt worden, der Durchsatz betrug 70 kg/h. Die Einstellung der Rotorgeschwindigkeit erfolgte analog Gleichung (16).

<sup>27</sup> Maschinen- und Mühlenbau Wittenberg

**Tabelle 8:** Mahlelemente der Stiftmühle 224

Doppelstiftreihen	Schlagstiftrotor	Schlagstiftstator
- Zahl der Stifte	70 (50 + 20)	93 (58 + 35)
- Wirklänge der Stifte (mm)	18,5	18,5
- Durchmesser der Stifte (mm)	7	7
- max. Stiftdurchmesser (mm)	217	237
- max. Drehzahl ( $\text{min}^{-1}$ ) / max. Umfangsgeschwindigkeit des äußeren Stiftdurchmessers (m/s)	17002 / 193	-

### 3.5.7 Windsichten der Mehle

Für das Windsichten wurde die Turboplex®-Sichtanlage 50 ATP<sup>29</sup> verwendet. Sie gehört der Bauart nach zu den Stabkorbsichtern [64]. Kernstück des Sichters war ein im Sichtergehäuse rotierender zylindrischer Korb aus stabförmigen Elementen, das sog. Sichtrad. Durch das umlaufende Sichtrad und die Sichtluftführung entstand eine Wirbelströmung, die infolge intensiver Desagglomeration des Aufgabegutes und auftretender Zentrifugal- und Trägheitskräfte eine trennscharfe Klassierung in ein Grob- und Feingut bewirkte. Das Feingut wurde mit der Sichtluft ausgetragen und im Zyklon und im Filter abgeschieden, während das vom Sichtrad abgewiesene Grobgut nach nochmaliger Durchspülung mit Luft nach unten auslief. Somit sind nach einem Sichtvorgang drei Fraktionen zu erhalten, zwei Feingutfraktionen (Feingut, Filtermehl) und das Grobgut. Die Trenngrenze ließ sich bei diesem Sichter im Bereich von 2,5 bis 120  $\mu\text{m}$  stufenlos einstellen [65]. Die Trenngrenze war primär von der Sichtraddrehzahl abhängig, sie wurde aber auch von der Luftmenge und dem Durchsatz beeinflusst. Der Sichter trennte um so feiner, je höher die Sichtraddrehzahl und je geringer der Luftvolumenstrom war. Bei Verringerung des Durchsatzes nahm die Trennschärfe zu und die Trenngrenze ab. Die Drehzahl des Sichtrades war über einen Frequenzumrichter im Bereich von 1400 bis 22 000  $\text{min}^{-1}$  einstellbar. Der Volumenstrom der Sichtluft konnte an einer Drossel variiert werden. Er wurde aber nicht verringert, um eine bestmögliche Desagglomeration des Aufgabegutes zu gewährleisten. Zur Ermittlung des gesamten Luftdurchsatzes (Spül- und Sichtluft) ist im Ausblasrohr eine Normblende eingebaut. Am dazugehörigen Manometer wurde der Differenzdruck abgelesen und mit Hilfe einer Eichkurve des Herstellers der Luftvolumenstrom ermittelt. Die Produktaufgabe erfolgte unter Luftabschluss mittels Dosierschnecke. Für eine hohe Trennschärfe ist für die Versuche ein niedriger Durchsatz von 0,5 kg/h gewählt

<sup>28</sup> Gebr. Jehmlich, Nossen

<sup>29</sup> Alpine AG, Augsburg

worden. Die mit der hohen Feinheit verbundenen schlechten Fließeigenschaften behinderten das Nachlaufen des Mehles in die Transportschnecke, dadurch blieb der Durchsatz während des Sichtvorgangs nicht konstant. Mit Verringerung der Füllhöhe des Vorratsbehälters nahm der Durchsatz innerhalb von 2 Stunden um ca. 0,15 kg/h ab. Die Sichterergebnisse wurden von der schwankenden Dosierung im genannten Bereich nicht beeinflusst. Bei längerer Sichtung musste dagegen die Anlage abgestellt und der Vorratsbehälter aufgefüllt werden.

### **3.6 Methode zur Bestimmung des Ladungspotentials modifizierter Mahlprodukte**

Der führende Parameter zur Bewertung des Modifizierungserfolgs ist das erreichte Ladungspotential des Modifikats [66]. Von den Ergebnissen der Ladungsmessung verschiedener Modifikate aus den Vermahlungsversuchen wurden Hinweise zur Gestaltung des Verfahrensablaufs erwartet. Es wurde versucht, an ausgewählten Beispielen die komplexen Zusammenhänge zwischen dem Zerkleinerungsprinzip, der Inhaltsstoff- und Korngrößenzusammensetzung, der Anbauintensität und der ermittelten Modifikatladung zu erkennen. Systematische Untersuchungen der Wirkungen von Einflussfaktoren aus der Vermahlung auf die Modifizierung der Mahlprodukte konnten aufgrund des Umfangs nicht durchgeführt werden. Dadurch sind Ursachen für unterschiedliche Modifizierungsergebnisse zum Teil nur zu vermuten, aber nicht eindeutig zu bestimmen.

Die trockenchemische Direktmodifizierung der Mahlprodukte und die Ermittlung der Ladungspotentiale wurden von Mitarbeitern des Herrn Prof. Gottstein im Fachbereich Landwirtschaft/Ökotrophologie/Landespflege der Fachhochschule Anhalt in Bernburg durchgeführt.

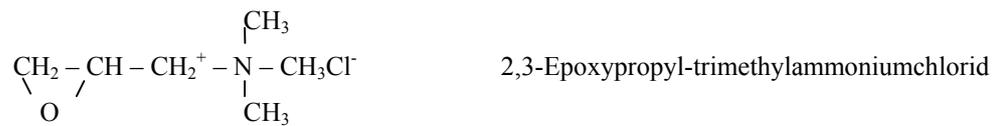
- Herstellung der Modifikate:

Die Modifizierung vollzog sich unter labortechnischen Bedingungen im temperierten Rührreaktor. Zur Anwendung kam ein standardisiertes Verfahren zur Kationisierung von Stärke, stärkehaltiger Mahlprodukte und spezieller organischer Mehlinhaltsstoffe durch gezielte Umsetzung mit 2,3-Epoxypropyl-trimethylammoniumchlorid<sup>30</sup> im alkalischen Reaktionsmilieu [67]. Zur Einstellung einer konstanten Feuchte wurde dem Mahlprodukt in Abhängigkeit von seiner Trockensubstanz entionisiertes Wasser zugesetzt. Als Katalysator ist Natronlauge verwendet worden.

---

<sup>30</sup> Quab 151, Fa. Degussa

Das Modifizierungsmittel besaß folgende chemische Struktur:



Nach Aufspaltung der reaktiven Epoxidgruppe erfolgte die Ankopplung an das Stärkemolekül bzw. an andere Mehlbestandteile. Der Kationisierungseffekt wurde durch die positiv geladene quaternäre Aminogruppe hervorgerufen.

- Bestimmung der Modifikatladung:

Zur quantitativen Bestimmung der positiven Ladungsdichte diente eine Polyelektrolyttitration. Aus dem Modifikat wurde eine 0,2%ige gekochte Suspension hergestellt und 10 ml davon in die Messzelle des Partikelladungsdetektors PCD 02<sup>31</sup> pipettiert. Die Messzelle war ein zylindrisches Kunststoffgefäß mit beweglichem Kolben. Zwischen der Gefäßwand und dem Kolben bestand ein definierter schmaler Spalt. Höhermolekulare, dissoziierbare Moleküle und Teilchen der Probenvorlage adsorbierten durch van-der-Waals'sche Kräfte an der Kunststoffoberfläche der Messzelle. Die kleinen Gegenionen blieben dagegen relativ frei beweglich. Die Bewegung des Kolbens in der Messzelle verursachte eine starke Flüssigkeitsströmung, in der die freien Gegenionen mitgerissen und von der adsorbierten Probensubstanz getrennt wurden. Die Gegenionen induzierten an den eingebauten Goldelektroden einen Strom, der gleichgerichtet und verstärkt als Strömungspotential in mV angegeben wurde. Als Titrationsmittel wird ein entgegengesetzt geladener Polyelektrolyt mit bekannter Ladungsdichte zuzugeben. Verwendet wurde eine 0,001n-Lösung mit polyethylensulfonsaurem Natrium (PES-Na) als anionischer Polyelektrolyt. Die Ladungen des Titrationsmittels neutralisieren die vorhandenen Ladungen in der Probe. Die Titration endet bei Erreichen des Ladungspunktes 0 mV.

- Berechnung der spezifischen Ladungsmenge:

$$q [\mu\text{eq/g}] = \frac{V \cdot c \cdot 1000}{w}$$

V : Volumen des verbrauchten Titrationsmittels (ml)  
 c : Normalität des Titrationsmittels (eq/l)  
 w: Feststoffgehalt der Probe (g)

Die Formel zeigt, dass der ermittelte Verbrauch des Titrationsmittels den eigentlichen Messwert darstellt. Die Modifikatladung wurde daher vereinfacht als Polyelektrolytverbrauch bis zum Ladungsnullpunkt in ml angegeben [66], [67].

<sup>31</sup> Fa. MÜTEK

### 3.7 Statistische Methoden

#### 3.7.1 Versuchsstreuung

Für die Anwendung von Verteilungstests war die Versuchsanzahl  $c$  für einen Mittelwert  $\xi$  zur Berechnung der jeweiligen Versuchsstreuung zu gering. Daher wurde die Versuchsstreuung  $s^2$  als eine Schätzung für die Varianz  $\sigma^2$  und die zugehörigen Freiheitsgrade  $v$  aus Ergebnissen einer externen, mehrfach realisierten Probe ermittelt. Aus der Versuchsstreuung ließen sich dann die Standardabweichung  $s$  und der Variationskoeffizient  $V$  ableiten:

- Anzahl der Freiheitsgrade:  $v = c - 1$
- Standardabweichung:  $s = \sqrt{s^2}$
- Variationskoeffizient:  $V = \frac{s}{\xi} \cdot 100\%$

#### 3.7.2 Konfidenzgrenzen

Die Konfidenzgrenzen schließen das Konfidenzintervall ein, in dem mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit (Konfidenzniveau)  $P$  der wahre Mittelwert  $\mu$  enthalten ist. Bei Verwendung der extern bestimmten Versuchsstreuung  $s$  galt für das Konfidenzintervall:

- Konfidenzintervall =  $\xi \pm t \cdot s / \sqrt{c}$        $t$  : Quantil der t-Verteilung
- Konfidenzniveau:       $P = 1 - \alpha$        $\alpha$  : Irrtumswahrscheinlichkeit

Berechnet wurden zentrale zweiseitige Konfidenzintervalle mit gleichmäßig auf den oberen und unteren Bereich verteilter Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$ . Die Quantile der t-Verteilung wurden der Tabelle [68] unter der Bedingung  $t_{\text{tab}} = t(v; 1 - \alpha/2)$  entnommen. Die ermittelten Konfidenzgrenzen sind ebenfalls Signifikanzschränken. Damit waren Aussagen über eine angenommene Signifikanz von Abweichungen möglich: war die Differenz zwischen zwei Mittelwerten größer als das Konfidenzintervall, unterschieden sich die Ergebnisse mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% signifikant voneinander.

#### 3.7.3 Statistische Versuchspläne

In den Vermahlungsversuchen wurden die Zerkleinerung im Walzenstuhl und in der Stiftmühle untersucht. Bei der Prallvermahlung übte die Umfangsgeschwindigkeit der Mahlelemente den Haupteinfluss auf die Zerkleinerungsintensität aus. Für die Charakterisierung der Prallvermahlung waren daher einfache Versuchsreihen mit Variation der Eigenschaften des Aufgabegutes und der Umfangsgeschwindigkeit ausreichend. Zur Untersuchung der Walzenstuhl-

zerkleinerung wurden die Vermahlungsversuche nach statistischen Versuchsplänen durchgeführt, da bereits in früheren Arbeiten auf diesem Gebiet mehrere Haupteinflussfaktoren der Zerkleinerung gefunden wurden, deren Wechselwirkungen ebenfalls die Ergebnisse signifikant beeinflussten [69], [70]. Die statistische Versuchsplanung ermöglichte trotz mehrerer Einflussgrößen eine grobe Modellierung und Optimierung der Walzenstuhlvermahlung bei einer noch durchführbaren Versuchsanzahl.

Die Versuchspläne wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Versuchsanzahl:

Die Vermahlungsversuche mussten innerhalb eines Tages durchführbar sein. Besondere Bedeutung besaß die Versuchsanzahl für die Auswahl des Versuchsplans am I. und II. Schrot. Versuchspläne 2. Ordnung waren ohne Störeinflüsse durch zu lange Abstehtzeiten der Getreide und Zwischenprodukte nicht möglich, als Kompromiss wurden Screeningpläne 1. Ordnung gewählt.

- Lösungstyp IV:

In den linearen Kombinationen der Versuchspläne des Lösungstyps IV sind alle Haupteffekte und 2-Wechselwirkungseffekte noch getrennt berechenbar unter der Voraussetzung, dass alle 3-Wechselwirkungseffekte und höheren Effekte vernachlässigt werden.

- Orthogonalität:

In orthogonalen Versuchsplänen werden die Koeffizienten unabhängig voneinander geschätzt; sie sind unkorreliert. Dadurch können nichtsignifikante Koeffizienten ohne Einfluss auf die verbleibenden aus dem Polynom gestrichen werden. Die Orthogonalität gilt nur für das Polynom im transformierten Maßstab; bei Umwandlung in die natürlichen Werte geht sie verloren.

- Drehbarkeit:

Da unbekannt ist, in welchem Teil des Versuchsraums das interessante Gebiet liegt, ist es für die Varianzanalyse sinnvoll, dass alle Variablen gleichberechtigt und deren Varianzen gleich gewichtet berechenbar sind. In drehbaren Versuchsplänen ist diese Voraussetzung erfüllt, die Varianz der Antwort ist an allen gleich weit vom Zentrum entfernten Versuchspunkten gleich.

Als statistisches Modell für die Einfluss-Wirkung-Beziehungen wurde das übliche Regressionsmodell verwendet. Es setzte voraus, dass zwischen den Einfluss- und Antwortgrößen ein linearer Zusammenhang besteht, der nicht immer gegeben ist. Nachteilig war auch, dass nur der stationäre Zustand beschrieben wurde und das Regressionspolynom nur begrenzt extrapolo-

lierbar war. Die Versuchspläne 1.Ordnung besaßen zuwenig Freiheitsgrade für eine weitere statistische Auswertung. Die Auswertung der Pläne 2.Ordnung erfolgte in mehreren Stufen, wobei die benötigten Berechnungen dem Programm StatGraphics Plus Quality & Design System<sup>32</sup> überlassen wurden:

- Varianzanalyse:

Aus der Sicht der Varianzanalyse gehörten die Versuchspläne zum Modell I: bestimmte Einflussgrößen wurden auf bestimmten einstellbaren Stufen vorgegeben. Aus den Experimentalergebnissen wurde abgeleitet, ob die mittleren Effekte signifikant oder zufällig in die Zielgröße eingehen. Dafür sind zuerst die Varianzanteile SQ (Summe der Quadrate der Abweichungen) und MQ (mittlere Quadratsumme) der Faktoren, der Wechselwirkungen und des Rests berechnet worden. Die Versuchsstreuung  $s^2$  der Effekte wurde aus den Ergebnissen der mehrfach realisierten Zentralpunkte ermittelt. Die anschließende Prüfung auf Signifikanz mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha=0,05$  erfolgte durch Vergleich der MQ der Effekte mit der Versuchsstreuung  $s^2$  mit Hilfe des F-Tests. Nichtsignifikante Faktoren konnten entfernt werden.

- Regressionsanalyse:

Das auf Grundlage der signifikanten Effekte berechnete Regressionspolynom wurde auf seine Adäquatheit geprüft. Das Polynom galt als nicht adäquat, wenn der Anpassungsdefekt des Modells größer als die Versuchsstreuung war. Die Prüfung auf Signifikanz des Anpassungsdefekts erfolgt mit Hilfe des F-Testes bei  $\alpha=0,05$ . Dafür wurde aus den Abweichungen zwischen Experimental- und Modellwerten die Restquadratsumme SQ(Rest) bestimmt. Sie bestand aus den SQ der bekannten Versuchsstreuung  $s^2$  und des Anpassungsdefekts. Die SQ des Anpassungsdefekts wurde als Differenz der SQ(Rest) und der SQ( $s^2$ ) berechnet, die MQ des Anpassungsdefekts als Quotient aus der SQ(Anpassungsdefekt) und der zugehörigen Freiheitsgrade. Die Prüfgröße  $F_{\text{exp}}$  wurde gebildet aus dem Verhältnis der MQ(Anpassungsdefekt) und der Versuchsstreuung  $s^2$ .

Als Ergebnis der Auswertung eines Versuchsplans sind Regressionspolynome für jede Antwortgröße berechnet worden. Die Antwortgrößen charakterisierten das Zerkleinerungsergebnis und den Zerkleinerungsaufwand. Sie waren Ergebnisse aus der Bestimmung der Korngrößenverteilung der Mahlprodukte und deren Mineralstoffgehalte sowie bei der Walzenstuhlvermahlung ermittelte Zerkleinerungskräfte. Durch Verknüpfung mehrerer, bei Bedarf gewichteter Antwortgrößen konnten Zielfunktionen gebildet werden. Deren Optimierung liefert

---

<sup>32</sup> Manugistics, Inc., Rockville (USA)

die gesuchten günstigsten Einstellungen für die Zerkleinerung. Mathematisch findet man das Extremum der Zielfunktion durch Differentiation und Nullsetzen der 1.Ableitung. Es sind so viele partielle Ableitungen nötig, wie das Polynom unbekannte Faktoren enthält; die Anzahl der entstehenden Gleichungen ist gleich der Anzahl der Faktoren. Die Lösung des Gleichungssystems liegt aber gewöhnlich außerhalb des Versuchsraumes, so dass dieser Optimierungsansatz nicht sinnvoll ist. Durch die Grenzen der Versuchsräume und der Faktoreinstellung ist die Antwortkontur ebenfalls begrenzt. Deshalb wird als Optimallösung oft ein Randmaximum bzw. -minimum gefunden. Für das Auffinden der Optimallösung wurden zwei unterschiedliche Lösungsansätze verwendet:

- Iterative Minimum/Maximumsuche:

Bei Variation der normierten Faktoren im Bereich der oberen und unteren Stufe liefert das Regressionspolynom endliche viele Lösungen. Der kleinste und größte Wert der Lösungsmenge stellt das gesuchte Minimum bzw. Maximum dar. Der in Pascal programmierte Algorithmus<sup>33</sup> wiederholte die Berechnung für alle Faktoren mit einer Schrittweite von 0,02. Als Ergebnis konnten die im Speicher abgelegten Minimal- und Maximalwerte sowie die zugehörigen Faktoreinstellungen ausgelesen werden.

- Methode des steilsten Anstiegs bei mehreren Antwortgrößen:

Bei dieser Gradientenmethode werden die zu untersuchenden Antwortgrößen in normierte Antwortgrößen transformiert. Aus der transformierten Antwortgröße wird eine dimensionslose Wunschfunktion gebildet. Die Wunschfunktionen der einzelnen Antwortgrößen können zu einer, eventuell gewichteten, mittleren allgemeinen Wunschfunktion zusammengefasst werden. Die allgemeine Wunschfunktion ist mit Hilfe des Statistikprogramms nach der Methode des steilsten Anstiegs maximiert worden. Der Wertebereich der Funktion lag zwischen 0 und 1. Optimierungsergebnisse zwischen 0,6 und 0,8 können als gut bezeichnet werden, darüberliegende als sehr gut.

---

<sup>33</sup> Programm „PolyOpti“, vielen Dank für die Hilfe an Frau Atze

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Untersuchungen zum Einfluss der Anbauintensität auf die Korneigenschaften von Roggen und Triticale

#### 4.1.1 Versuchsanordnung

Am Standort Bernburg (mitteldeutsches Trockengebiet) wurden von Mitarbeitern des Professor-Hellriegel-Instituts e.V. in dreijährigen Feldversuchen mehrfaktorielle Komplexprüfungen mit den Faktoren Genotyp, Stickstoffernährung und Fungizidanwendung mit dem Ziel durchgeführt, im Rahmen eines Verbundprojektes den Anbau von Roggen und Triticale als Industriegetreide zu optimieren (Tab.9).

**Tabelle 9:** Versuchsanordnung zur Optimierung des Anbaus von Roggen und Triticale als Industriegetreide [71]

Anbaustufe	Stickstoffdüngung	Fungizidanwendung	Anbauintensität
1	ohne	ohne	extensiv
2	mittel, 80-90 kg/ha N	ohne	reduziert
3	mittel, 80-90 kg/ha N	mit	reduziert
4	hoch, 160-180 kg/ha N	ohne	reduziert
5	hoch, 160-180 kg/ha N	mit	konventionell
<b>Standort:</b>	Schwarzerdeböden		
<b>Erntejahre:</b>	1996, 1997, 1998		
<b>Sorten:</b>	Roggen: Amando, Rapid, Clou, Esprit, Hacada, Farino Triticale: Alamo, Modus, Trimaran, Boreas, Binova		

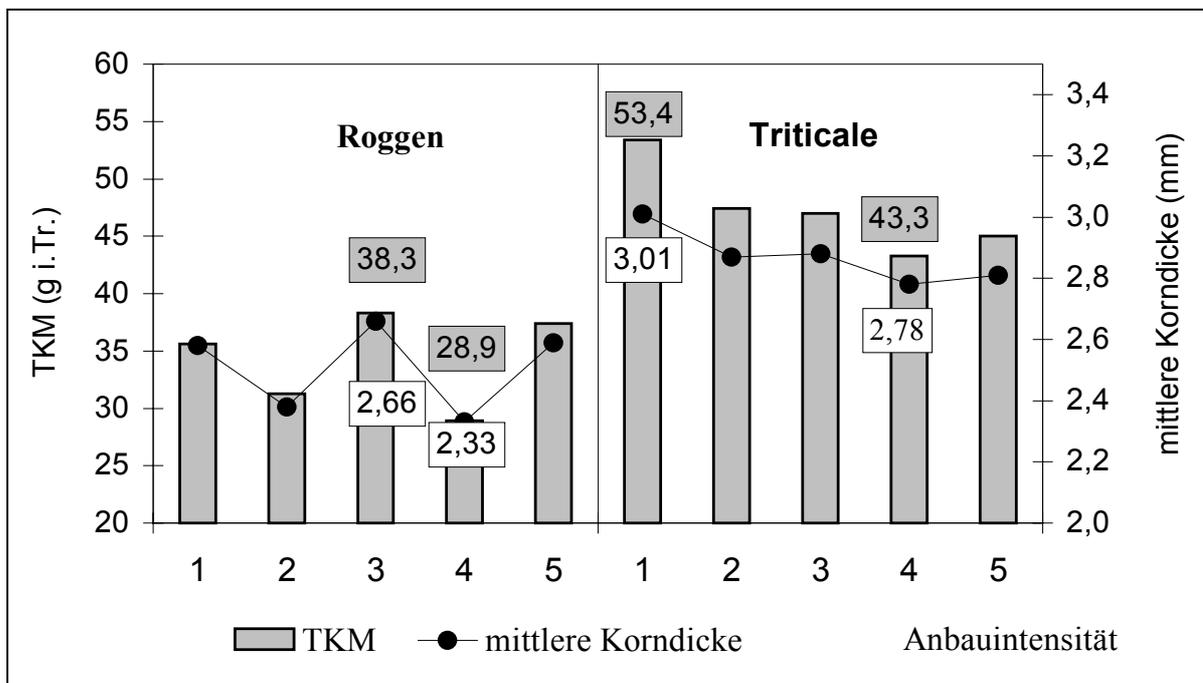
Für die Untersuchung der Kornausbildung und der Korninhaltsstoffe sowie der Mahleigenschaften bei variierten Anbaubedingungen wurden aus diesem Vorhaben Vollkornproben zur Verfügung gestellt.

#### 4.1.2 Kornausbildung und Korninhaltsstoffe

Die Auswertung der untersuchten Kornmerkmale erfolgte anhand arithmetischer Mittelwerte der Ergebnisse aus einer Anbaustufe aller Sorten und Erntejahre einer Getreideart (Roggen n=18, Triticale n=15).

#### 4.1.2.1 Tausendkornmasse und mittlere Korndicke

Für Roggen bot die Anbauintensitätsstufe mit mittlerer Stickstoffdüngung und Fungizidanwendung die günstigsten Bedingungen zur Kornausbildung mit den höchsten Tausendkornmassen und mittleren Korndicken (Abb.8). Zu erkennen war ein ausgeprägter positiver Einfluss der Fungizidanwendung auf die Kornausbildung in den Anbauintensitäten mit Stickstoffdüngung. Roggen ist gegenüber Krankheiten anfälliger als Triticale. Auch schon in der extensivsten Anbauvariante mit der niedrigsten Bestandsdichte wurde die Kornentwicklung durch Krankheiten (unter trockenen Bedingungen besonders Rostbefall) beeinträchtigt [72]. Bei steigender Stickstoffdüngung und höherer Bestandsdichte nahm der Krankheitsdruck stark zu. Dadurch fielen in den Anbaustufen gleicher Stickstoffdüngung ohne Fungizidanwendung die Tausendkornmassen und Korndicken deutlich geringer aus als mit Fungizideinsatz.



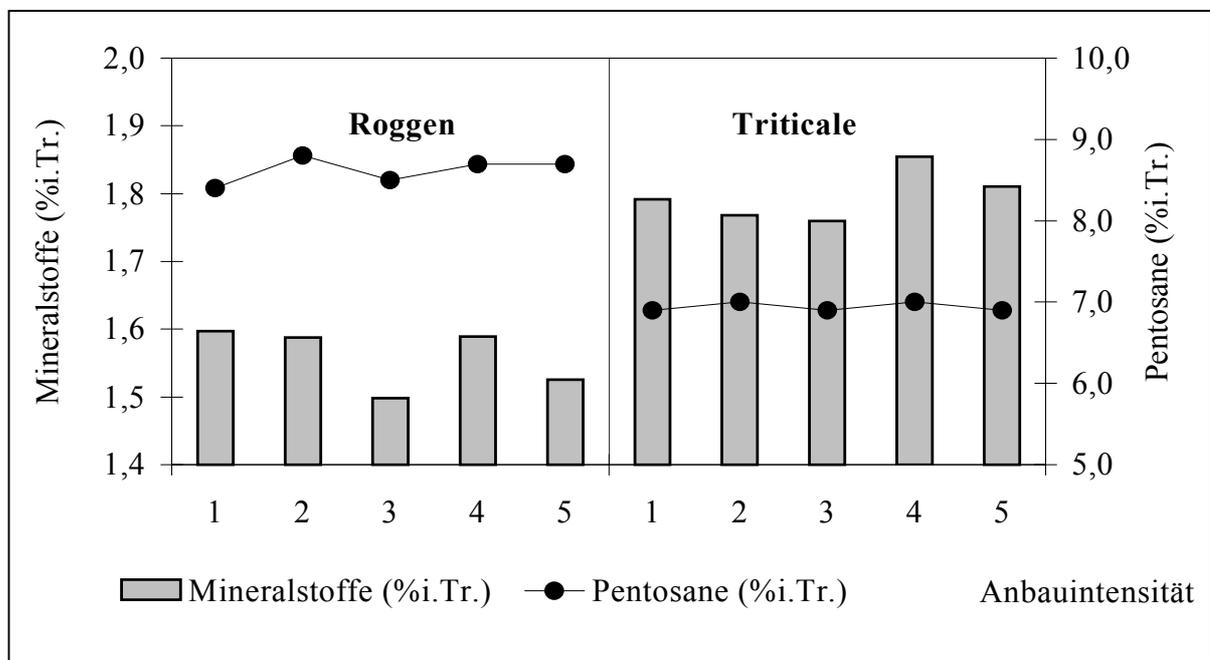
**Abb. 8:** Tausendkornmasse (TKM) und mittlere Korndicke von Roggen und Triticale in Abhängigkeit von der Anbauintensität

Bei Triticale ergab die Ermittlung der Tausendkornmassen und Korndicken insgesamt höhere Werte als bei Roggen. Dabei erbrachten die Proben aus dem extensiven Anbau ohne Stickstoffdüngung und ohne Fungizidanwendung im Durchschnitt die besten Ergebnisse (Abb.8). Mit Zunahme der Stickstoffdüngung wurden niedrigere Werte für die Kornausbildung ermittelt. Stickstoffgaben im Frühjahr förderten die Bestandsdichte, die höhere Biomassebildung nahm den Wasservorrat stärker in Anspruch. Wasser wurde besonders bei der extremen Trockenheit im Erntejahr 1998 am Standort Bernburg zum begrenzenden Faktor der Ertrags- und

Kornausbildung [72]. Durch diese Stresssituation nahmen die Tausendkornmassen und Korn-  
dicken um so mehr ab, je höher die Stickstoffdüngung war. Ein Einfluss der Fungizidanwen-  
dung auf die Kornausbildung war wegen der höheren Krankheitsresistenz von Triticale im  
Vergleich zu Roggen nicht festzustellen. Die Proben aus den Anbauintensitäten gleicher  
Stickstoffdüngung wiesen vergleichbare Ergebnisse auf, unabhängig vom Fungizideinsatz.

#### 4.1.2.2 Mineralstoffe und Pentosane

Bei der Untersuchung der Vollkornmineralstoff- und Pentosangehalte konnte kein Einfluss  
der Anbauintensität festgestellt werden. Klimatische Bedingungen im Erntejahr und Sortenei-  
genschaften bestimmten vorrangig die Anteile dieser Inhaltsstoffe in Roggen und Triticale  
(Abb.9).

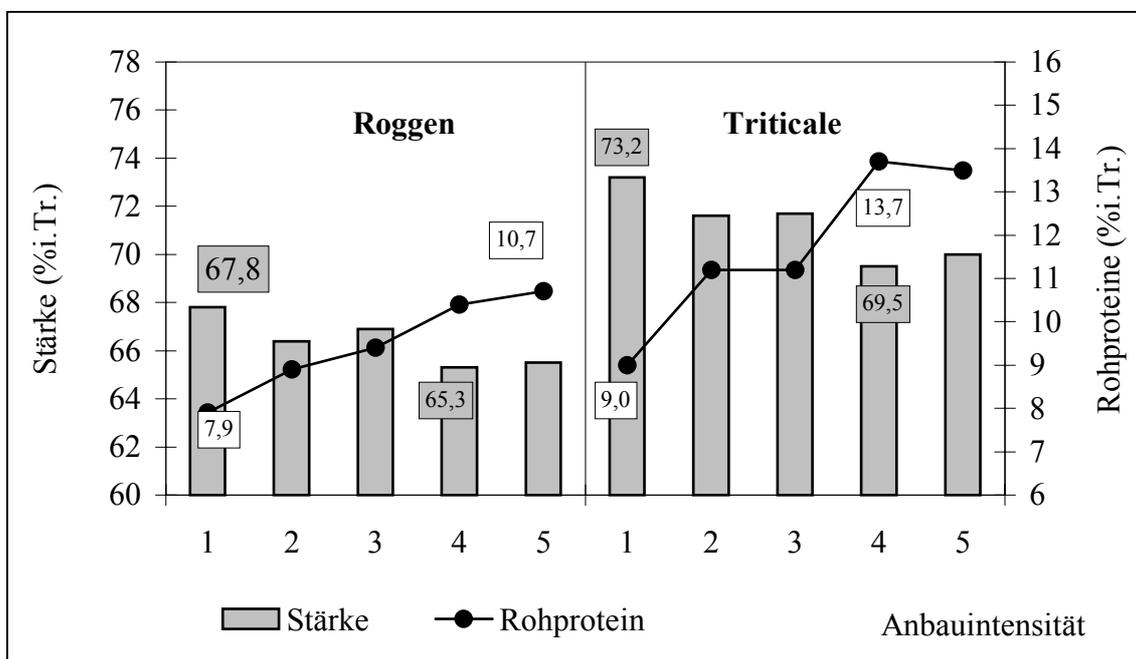


**Abb. 9:** Vollkornmineralstoff- und Pentosangehalte von Roggen und Triticale in Abhängigkeit von der Anbauintensität

#### 4.1.2.3 Stärke und Rohprotein

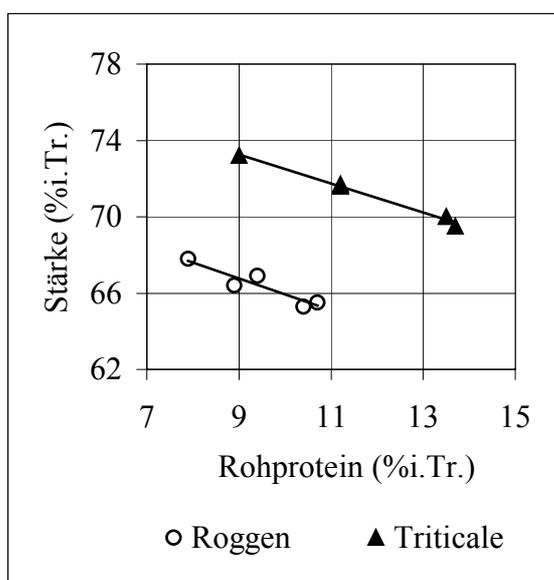
Die Stärke- und Rohproteingehalte im Getreidekorn wurden erwartungsgemäß deutlich von  
der Anbauintensität beeinflusst (Abb.10). Bei Roggen nahm der Rohproteingehalt mit Erhö-  
hung der Stickstoffgabe und zusätzlich durch einen Fungizideinsatz um maximal 2,8% zu. Bei  
Triticale war unter gleichen Anbaubedingungen die Zunahme an Rohprotein noch stärker  
ausgeprägt, die Erhöhung betrug bis zu 4,5%. Im Gegensatz zu Roggen beeinflusste bei Triti-  
cale eine Fungizidanwendung den Rohproteinanteil im Korn nicht.

Im Gegenzug zum Rohprotein verringerte sich der Stärkegehalt mit Erhöhung der Stickstoffdüngung. In den Roggenproben nahm der Stärkeanteil um bis zu 2,5% ab, bei Triticale betrug die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Stärkegehalt 3,7%.



**Abb. 10:** Stärke- und Rohproteingehalte von Roggen und Triticale in Abhängigkeit von der Anbauintensität

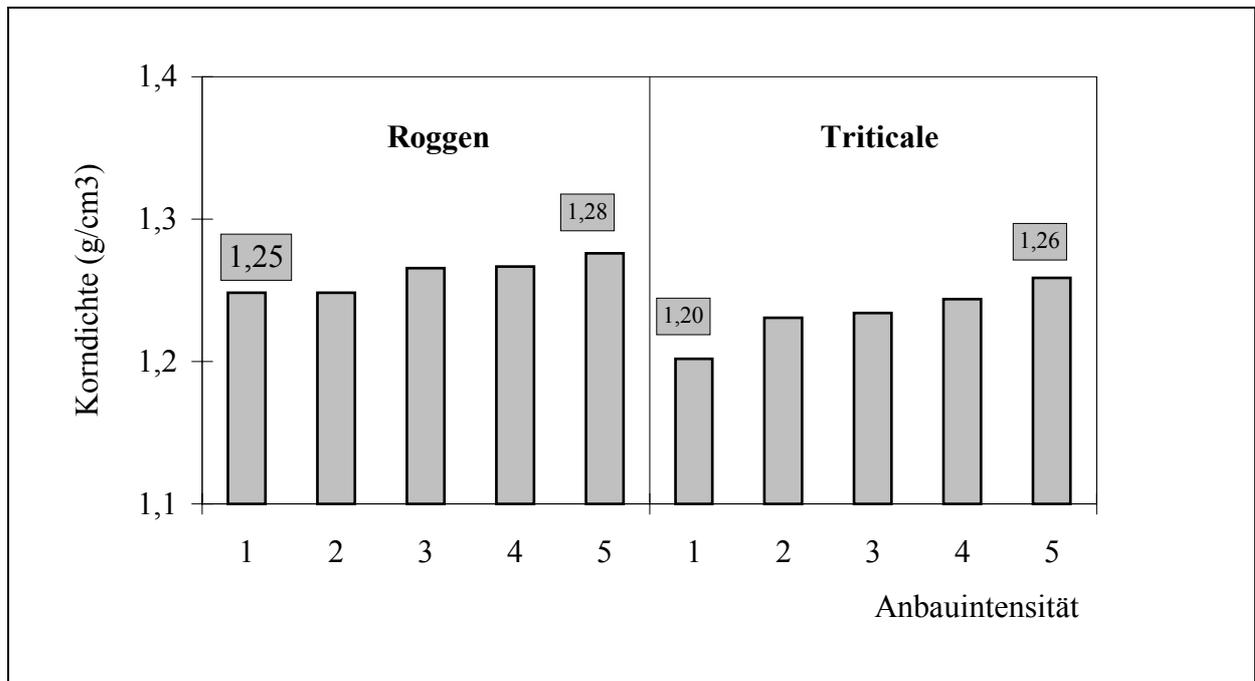
Der enge, wechselseitige Zusammenhang zwischen den Anteilen an Rohprotein und Stärke im Getreidekorn drückte sich auch in hohen Korrelationskoeffizienten aus. Er betrug für Roggen -0,93 und für Triticale -0,99 (Abb.11).



**Abb. 11:** Zusammenhang zwischen dem Rohprotein- und Stärkegehalt in Roggen- und Triticalekörnern

#### 4.1.2.4 Korndichte

Zwischen den Roggenproben aus den einzelnen Anbaustufen zeigten sich geringe Unterschiede in den Korndichten. Die Tendenz der steigenden Korndichten mit Zunahme der Anbauintensität war dennoch erkennbar (Abb.12). Bei Triticale unterschieden sich die mittleren Korndichten der Anbaustufen deutlicher voneinander.

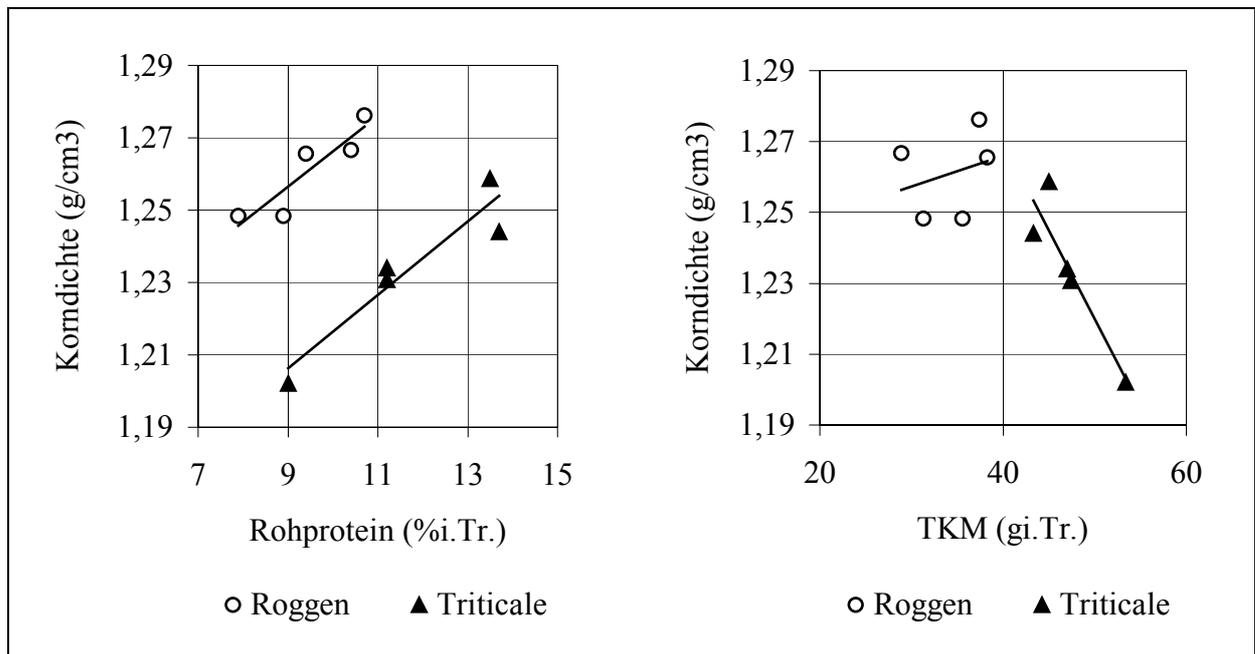


**Abb. 12:** Korndichten von Roggen und Triticale in Abhängigkeit von der Anbauintensität

Die Prüfung auf Zusammenhänge zwischen Kornmerkmalen und der Korndichte ergab, dass die Korndichte mit dem Rohproteingehalt eng korreliert (Abb.13). Mit dem Anstieg des Rohproteingehalts durch eine erhöhte Stickstoffgabe im Anbau nahmen die Korndichten bei Roggen ( $r=0,91$ ) und Triticale ( $r=0,94$ ) zu.

Dagegen konnte ein direkter Zusammenhang zwischen der Korngröße und der Korndichte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Bei Triticale nahm die Korngröße in den Anbaustufen steigender Intensität bei höherer Stickstoffgabe und höherer Bestandsdichte ab, so dass parallel mit Zunahme des Rohproteingehalts die Korndichten stiegen und die Tausendkornmassen abnahmen (Abb.13). Beim Anbau des Roggens zeigte der Fungizideinsatz eine größere Wirkung auf die Kornausbildung als bei Triticale. Die Anbaustufen, in denen durch die Anwendung von Fungiziden gesündere Bestände aufwuchsen, erbrachten auch höhere Tausendkornmassen. In den Intensitätsstufen gleichen Stickstoffangebots besaßen die Roggenkörner

zwar ähnliche Rohproteingehalte und Korndichten, aber ohne Einsatz von Fungiziden deutlich niedrigere Tausendkornmassen als mit Fungizidanwendung.



**Abb. 13:** Zusammenhang zwischen der Korndichte von Roggen- und Triticalekörnern und dem Rohproteingehalt sowie der Tausendkornmasse (TKM)

#### 4.1.3 Mahlfähigkeit nach Standardmahlversuch

##### 4.1.3.1 Sorten und Anbauintensitätsstufen

Für die Untersuchungen wurden Roggen- und Triticaleproben ausgewählter Sorten und Anbauintensitäten der drei Erntejahre vermahlen. Bei den Roggensorten handelte es sich um Esprit, Hacada und Farino, wobei die Sorte Farino zurückgezogen ist und 1998 nicht mehr zur Verfügung stand. Bei Triticale wurden die Sorten Trimaran, Boreas und Binova verwendet.

Es stand das Ziel, neben dem extensivsten und dem konventionellen Anbau eine Anbauvariante reduzierter Intensität zu untersuchen. Für die Auswahl der geeignetsten reduzierten Anbaustufe wurden die Erträge und Produktionskosten herangezogen (Tab.10).

Für Triticale war die Anbauintensität der Stufe 2 das Optimum. Obwohl die Erträge unter dem Maximum lagen, waren bei Triticale aufgrund des geringeren Aufwandes, mittlere Stickstoffdüngung und kein Fungizideinsatz, die Produktionskosten am niedrigsten. Roggen benötigte, um zu hohe Ertragsausfälle bei höherer Krankheitsanfälligkeit zu vermeiden, zusätzlich die

Fungizidanwendung. Die Anbauintensität der Stufe 3 war für Roggen der günstigste Kompromiss zwischen Aufwand und Nutzen.

**Tabelle 10:** Erträge und Produktionskosten in Abhängigkeit von der Anbauintensität [71]

Anbauintensität, Stufe	Roggen		Triticale	
	Ertrag (dt/ha)	Produktionskosten (€/dt)	Ertrag (dt/ha)	Produktionskosten (€/dt)
1	60,7	10,11	70,2	8,74
2	70,2	10,34	85,9	<b>8,44</b>
3	93,2	<b>8,75</b>	91,2	8,93
4	69,5	11,18	88,7	8,83
5	95,5	9,08	92,5	9,30

#### 4.1.3.2 Mahlergebnisse

Für die Auswertung der Ergebnisse wurden wieder die Mittelwerte aller Sorten und Erntejahre einer Anbauintensität mit n=8 (Roggen) und n=9 (Triticale) verwendet.

Die Mahlversuche im Standardmahlautomaten QUADRUMAT® SENIOR<sup>34</sup> lieferten Mehle niedriger Ausmahlung. Bei Roggen wurden Ausmahlungen bis 45%, bei Triticale bis ca. 58% erzielt (Tab.11).

**Tabelle 11:** Ergebnisse der Standardmahlversuche mit Roggen und Triticale

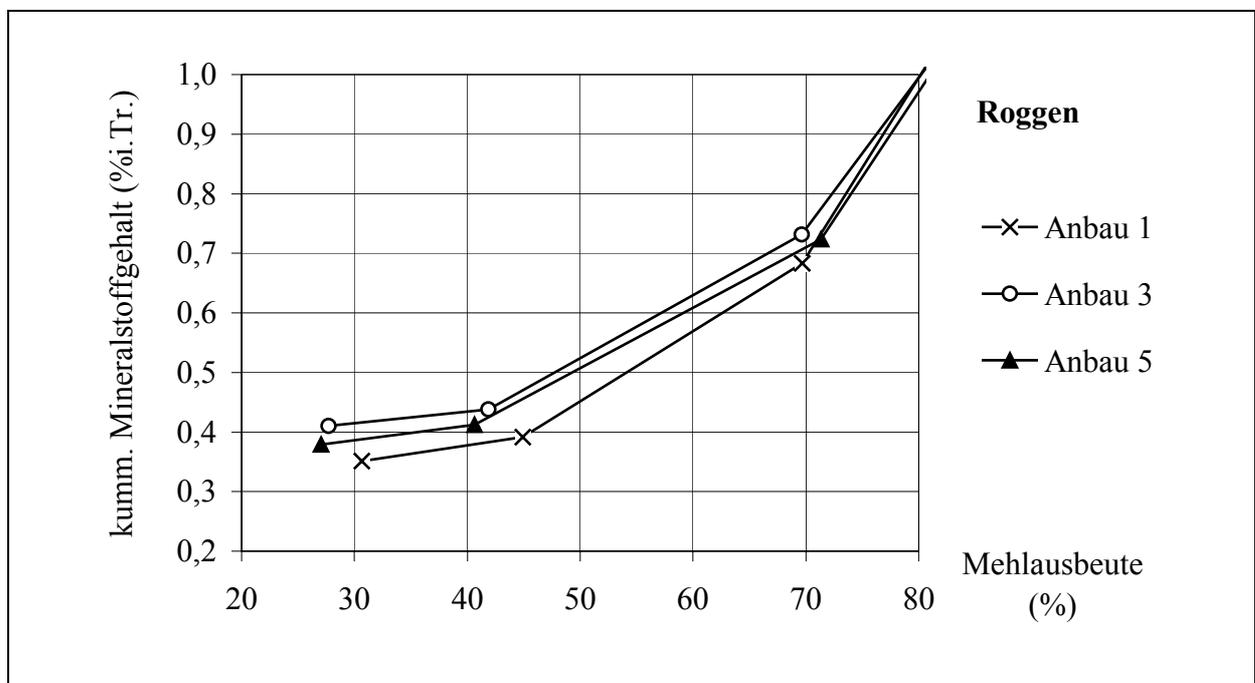
Anbauintensität, Stufe	Roggen		Anbauintensität, Stufe	Triticale	
	Mehlanfall (%)	Mineralstoffe (%i.Tr.)		Mehlanfall (%)	Mineralstoffe (%i.Tr.)
1	44,9	0,39	1	58,2	0,42
3	41,8	0,44	2	57,3	0,45
5	40,6	0,41	5	56,4	0,47

Bei beiden Getreidearten erreichten jeweils die Proben aus dem extensivsten Anbau ohne Stickstoffdüngung und Fungizideinsatz die höchste Mehlausbeuten mit den niedrigsten Mineralstoffgehalten im Mehl. Auch nach weiterer Ausmahlung der Schrot- und Grießkleie in einer Stiftmühle bis zu Ausmahlungen von etwa 70% (Roggen) bzw. bis 78% (Triticale) blieb diese Tendenz erhalten. An den gemittelten Ausbeute-Asche-Kurven über alle Sorten und

<sup>34</sup> BRABENDER® OHG, Duisburg

Anbaujahre (Abb.14 und 15) ist erkennbar, dass bei einem Vergleichsaschegehalt der Mehle von 0,7% i.Tr. mit Roggen und Triticale aus dem Anbau niedrigster Intensität die höchsten Mehlausbeuten erreicht wurden.

Mit Roggen aus der extensivsten Anbaustufe wurde im Durchschnitt bei einem Mehl mit 0,7% i.Tr. Asche eine Mehlausbeute von 70% ermittelt. Die reduzierte Anbauintensität der Stufe 3 ermöglichte bei Roggen zwar die beste Kornausbildung mit den höchsten Tausendkornmassen, ergab aber bei einer Ausmahlung von 70% einen um 0,05% höheren Mineralstoffgehalt. Bei einer Mehlasche von 0,7% i.Tr. lag die Mehlausbeute aus Roggen der reduzierten Anbauintensität um 3% unter der des extensiv angebauten Roggens. Ausbeute und Asche des Roggenmehls der konventionellen Anbauintensität 5 bewegten sich zwischen denen der beiden anderen Anbaustufen.



**Abb. 14:** gemittelte Ausbeute-Asche-Kurven der Roggen-Standardmahlversuche (n=8)

Im Vergleich zu Roggen fielen bei Triticale höhere Mehlausbeuten an. Bei der Vermahlung von Triticale aus dem extensivsten Anbau der Stufe 1 wurde bei einem Mineralstoffgehalt des Mehles von 0,7% i.Tr. eine Ausbeute von 78% erreicht. Bei Triticale der anderen Anbauvarianten verringerten sich die Mehlausbeuten um 5% (reduzierte Intensität, Stufe 2) und um 7% (konventionelle Intensität, Stufe 5).

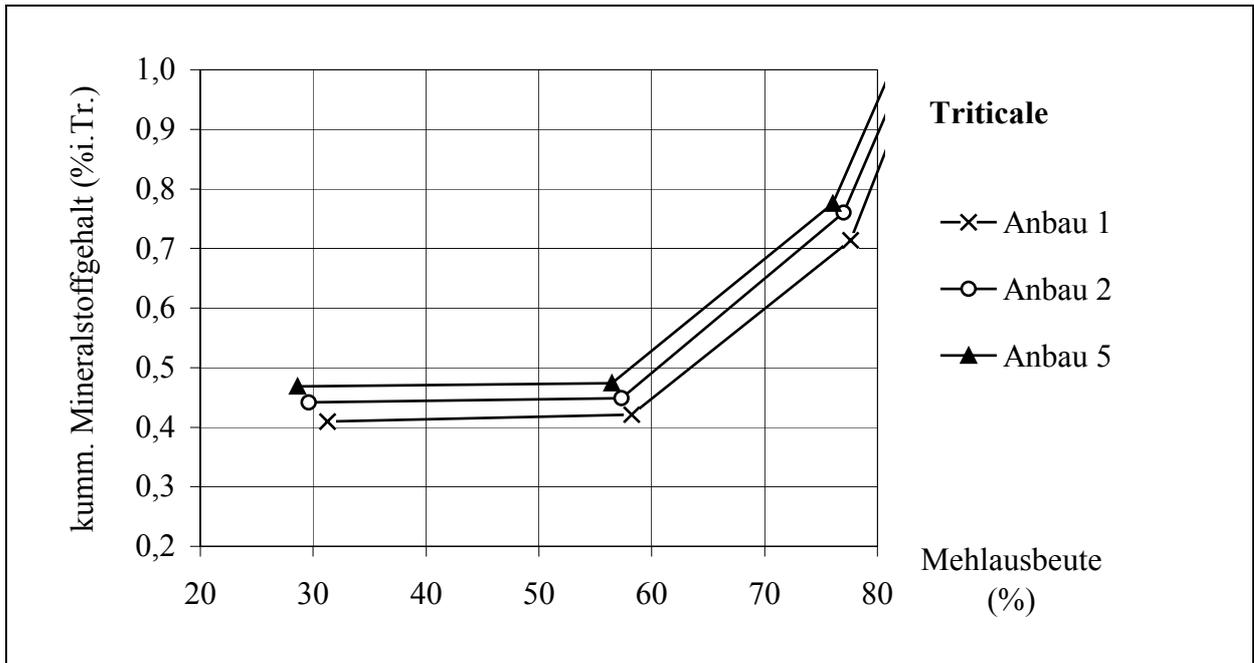


Abb. 15: gemittelte Ausbeute-Asche-Kurven der Triticale-Standardmahlversuche (n=9)

#### 4.1.3.3 Mehlinhaltsstoffe

Die durchschnittlichen Anteile an Stärke und Rohprotein in den Roggen- und Triticalemehlen mit einem Mineralstoffgehalt von 0,7%i.Tr. entsprachen den Verhältnissen im Korn. Mehle aus Getreide der extensivsten Anbaustufe enthielten die niedrigsten Rohproteingehalte und die höchsten Stärkeanteile (Abb.16).

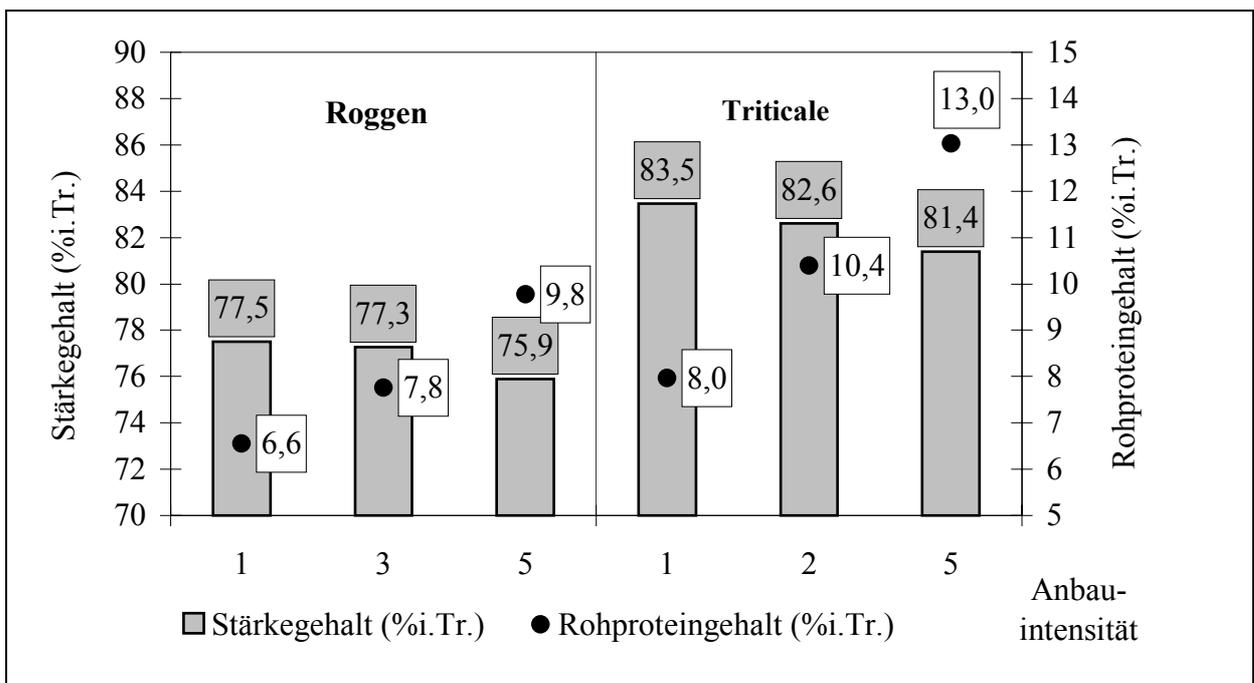


Abb. 16: Stärke- und Rohproteingehalte der Roggen- und Triticalemehle aus den Standardmahlversuchen, Mineralstoffgehalt der Mehle 0,7%i.Tr.

Mit zunehmender Anbauintensität und Stickstoffgabe war auch in den jeweiligen Mehlen ein stetiger Anstieg des Rohproteingehaltes zu verzeichnen. In den Roggenmehlen betrug die Zunahme bis zu 3,2%, der Stärkeanteil verringerte sich dabei um ca. 1,5%. In den Triticalemehlen waren in Abhängigkeit von der Anbauintensität gegenüber Roggen größere Unterschiede im Rohproteingehalt festzustellen. Die größte Differenz zwischen den Anteilen an Rohprotein betrug 5%, zwischen den Stärkegehalten ca. 2%.

#### **4.1.4 Diskussion der Korn- und Mahleigenschaften**

Eine optimierte reduzierte Anbauintensität führte bei Roggen und Triticale trotz der Ertragsausfälle durch die geringeren Aufwendungen bei der Stickstoffdüngung zu insgesamt niedrigeren Produktionskosten im Vergleich zum konventionellen Anbau. Dabei konnte bei Triticale aufgrund der höheren Krankheitsresistenz zusätzlich auf den Einsatz von Fungiziden verzichtet werden. Die Eigenschaften von Triticale, geringere Nährstoffansprüche und Krankheitsanfälligkeit, lassen diese Getreideart besonders für den Anbau unter extensiven Bedingungen geeignet erscheinen. Die niedrige Bestandsdichte wirkte sich dabei positiv auf die Kornausbildung aus. Triticalekörner aus dem extensiven Anbau besaßen die höchsten Tausendkornmassen und mittleren Korndicken. Für Roggen dagegen bot die reduzierte Anbauintensität mit Fungizidanwendung und mittlerer Stickstoffdüngung die günstigsten Bedingungen zur Kornausbildung.

Die Veränderungen der Anbauergebnisse, der Kornausbildung, der Verteilung der Korn- und Mehlinhaltsstoffe sowie der Mahlfähigkeit bei Reduzierung der Anbauintensität sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Mit Reduzierung der Stickstoffdüngung nahm der Rohproteingehalt im Korn und im Mehl ab, der Stärkeanteil zu. Die deutlichste Änderung der Anteile an Rohprotein und Stärke wurde in der extensivsten Intensitätsstufe erreicht, insbesondere bei Triticale. Bei fehlender Stickstoffzugabe im Anbau verursachte die Inhaltsstoffverschiebung in Richtung Stärke bei verminderter Proteineinlagerung ein lockeres Gefüge im Korn, die gemessenen Korndichten nahmen ab. Bei der Vermahlung zerfiel das Endosperm leichter und die Mehlausbeuten nahmen zu. Das Auslösen der Stärkekörner aus der schwächeren Proteinmatrix erforderte einen geringen Zerkleinerungsaufwand. Die proteinärmeren und stärkereichen Mehle wiesen zudem niedrigere Mineralstoffgehalte auf. Roggen und Triticale aus dem extensivsten Anbau lieferten bei niedriger bis mittlerer Ausmahlung die besten Mahlergebnisse. Wenn auch in geringerem Maße, blieben die positiven Auswirkungen verringerter Stickstoffdüngung auf das Mahlver-

halten bei Roggen und Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität erhalten. Es wurden gegenüber konventionell angebautem Getreide höhere Mehlanfälle erreicht, die Mehle enthielten weniger Rohprotein und mehr Stärke.

**Tabelle 12:** Veränderungen der Anbauergebnisse, Korneigenschaften und Mahlergebnisse bei reduzierter Anbauintensität (Differenzen zur konventionellen Anbauintensität)

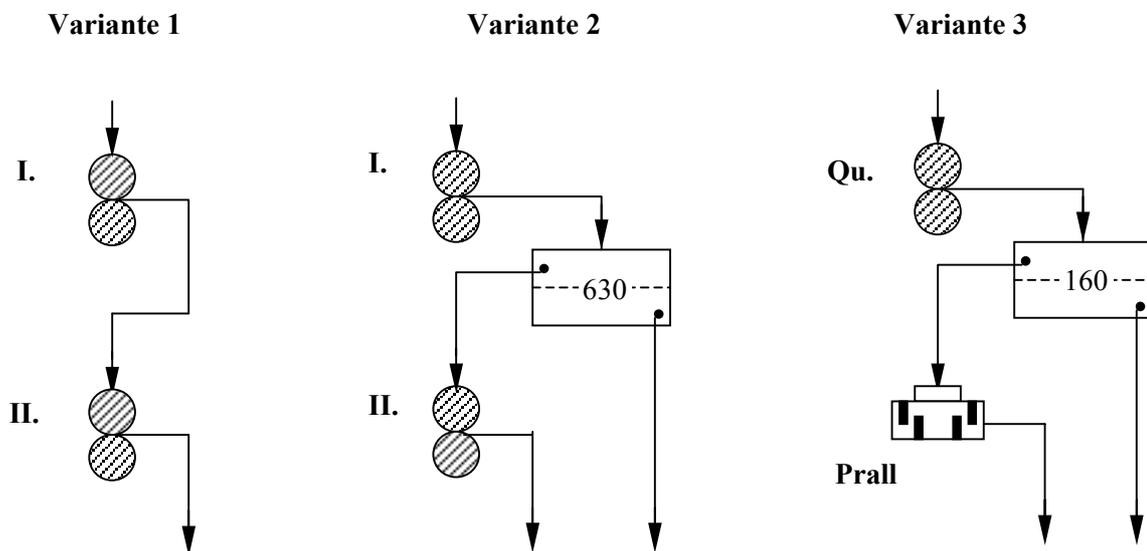
Anbauintensität, Stufe	Roggen		Triticale	
	1	3	1	2
<u>Anbau</u>				
Ertrag	- 36,4	- 2,5	- 24,8	- 7,9
Produktionskosten	+ 11,4	- 3,6	- 6,0	- 9,2
<u>Kornausbildung</u>				
TKM (gi.Tr.)	- 1,8	+ 0,9	+ 8,4	+ 2,4
mittl. Korndicke (mm)	- 0,01	+ 0,07	+ 0,20	+ 0,06
Korndichte (g/cm <sup>3</sup> )	- 0,02	- 0,01	- 0,06	- 0,03
<u>Korninhaltsstoffe</u>				
Rohprotein (%i.Tr.)	- 2,8	- 1,3	- 4,5	- 2,3
Stärke (%i.Tr.)	+ 2,3	+ 1,4	+ 3,2	+ 1,6
Mineralstoffe (%i.Tr.)	+ 0,07	- 0,03	- 0,02	- 0,04
<u>Mahlfähigkeit</u>				
Mehlanfall (%)	+ 4,1	+ 1,9	+ 1,8	+ 0,9
Mehlasche (%i.Tr.)	- 0,02	+ 0,04	- 0,05	- 0,02
Aschewertzahl	- 142	+ 32	- 117	- 57
<u>Mehlinhaltsstoffe</u> (Asche 0,7%i.Tr.)				
Rohprotein (%i.Tr.)	- 3,2	- 2,0	- 5,0	- 2,6
Stärke (%i.Tr.)	+ 1,6	+ 1,4	+ 2,1	+ 1,2

Bei der benannten Zielstellung des vermahlungstechnischen Aufschlusses, eine maximale Ausbeute an stärkereichen und proteinarmen Mehlen zu gewinnen, werden keine hohen Ausmahlungen zu erreichen sein. Damit bietet die Verwendung von Getreide aus reduzierter Anbauintensität gegenüber dem konventionellen Anbau Vorteile. Die weichere Kornstruktur von Roggen und Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität führt schon am Anfang der Vermahlung zu höheren Ausbeuten an hellen Mehlen. Der Vermahlungsprozess kann verkürzt und der benötigte Zerkleinerungsaufwand verringert werden. Für die Bereitstellung der Mehle als Rohstoff für die Non-Food-Anwendung ist ein kürzeres und einfacheres Diagramm als für die Vermahlung von Getreide zu Typenmehlen möglich.

## 4.2 Kleintechnische Untersuchungen zum Aufschrotten von Roggen und Triticale

### 4.2.1 Untersuchte Verfahrensvarianten und Versuchsmaterial

Für die vermahlungstechnische Trennung des Mehlkörpers von Schale und Keim mit möglichst hoher Ausbeute an schalearmen und fein- bis grobzerkleinerten Endospermteilchen waren die dafür effektivsten Beanspruchungsarten und Zerkleinerungsparameter verschiedener Aufschrotvarianten zu ermitteln. Untersucht wurden (Abb.17): die zweimalige Druck-Schubbeanspruchung im Walzenstuhl ohne (Variante 1) und mit (Variante 2) Zwischenabsieben des Feingutes sowie die Kombination der Druckbeanspruchung durch das Quetschen mit der Prallbeanspruchung in der Stiftmühle (Variante 3).



**Abb. 17:** Varianten zum Aufschrotten von Roggen und Triticale

Die vorhandene Menge an Roggen und Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität reichte für die durchzuführenden kleintechnischen Mahlversuche nicht aus. Die Untersuchungen zur Ermittlung optimaler Zerkleinerungsparameter und Beanspruchungsarten sind daher exemplarisch mit Saatgetreide der jeweiligen Sorte durchgeführt worden. Nach Auswertung der Versuchspläne und -reihen wurden Roggen und Triticale aus dem reduzierten und konventionellen Anbau unter optimierten Zerkleinerungsparametern der günstigsten Variante vermahlen und die Mahlergebnisse in Abhängigkeit von der Anbauintensität miteinander verglichen.

Die Analyseergebnisse der Kornuntersuchungen von Roggen der Sorte Esprit und der Triticalesorte Modus sind in Tabelle 13 aufgeführt. Die konventionell angebauten Getreide wiesen eine gute Kornausbildung bei typischer Inhaltsstoffzusammensetzung auf, eine zusätzliche

Beeinflussung der Mahleigenschaften durch vorhandene Korneigenschaften war nicht zu erwarten.

**Tabelle 13:** Roggen und Triticale aus konventionellem Anbau für die Untersuchungen zum Aufschroten

	<b>Roggen, Sorte Esprit</b>	<b>Triticale, Sorte Modus</b>
Mineralstoffe (%i.Tr.)	1,86	1,96
Rohprotein (%i.Tr.)	9,9	11,0
Stärke (%i.Tr.)	64,8	71,0
Korndichte (g/cm <sup>3</sup> )	1,28	1,27
TKM (g / g i.Tr.)	39,2 / 44,0	42,0 / 47,2
hl-Gewicht (kg)	75,9	73,7
D <sub>m</sub> Korn (mm)	3,48	3,76
Vollkornanteil (%)	99,8	97,5
A <sub>0</sub> Korn (m <sup>2</sup> /kg)	1,345	1,262

#### 4.2.2 Mahlversuche I. Schrot

##### 4.2.2.1 Versuchsergebnisse

Die Untersuchungen zum I. Schrot wurden für Roggen und Triticale anhand gleicher Versuchspläne 1.Ordnung 2<sup>5-1</sup> durchgeführt. Dabei variierten die Vermahlungsfeuchte der Getreide, der Mahlpalt zwischen den Riffelwalzen, die Umfangsgeschwindigkeit und Voreilung der schnellen Walze sowie der Durchsatz des Walzenstuhls auf zwei Stufen (Tab.14).

**Tabelle 14:** Variablen des Versuchsplans zum I. Schrot

<b>Variablen</b>	Stufe -1	Stufe +1
X <sub>1</sub> Feuchtegehalt Getreide (%)	15,0	16,5
X <sub>2</sub> Umfangsgeschwindigkeit schnelle Walze (m/s)	4	6
X <sub>3</sub> Mahlpalt (mm)	0,2	0,4
X <sub>4</sub> Durchsatz (kg/h·dm)	200	400
X <sub>5</sub> Voreilung	1,5	3

Einen Überblick zu Ergebnissen ausgewählter Antwortgrößen bietet Tabelle 15. Die unter gleichen Vermahlungsbedingungen erzielten Ergebnisse spiegelten das unterschiedliche Mahlverhalten von Roggen und Triticale wider. Beim Aufschroten von Triticale wurde weniger Zerkleinerungsarbeit aufgewendet. Trotzdem fiel im Mittel 15% mehr Feingut an, der Zerkleinerungsgrad des Mahlprodukts war deutlich höher als bei Roggen. Charakteristisch für

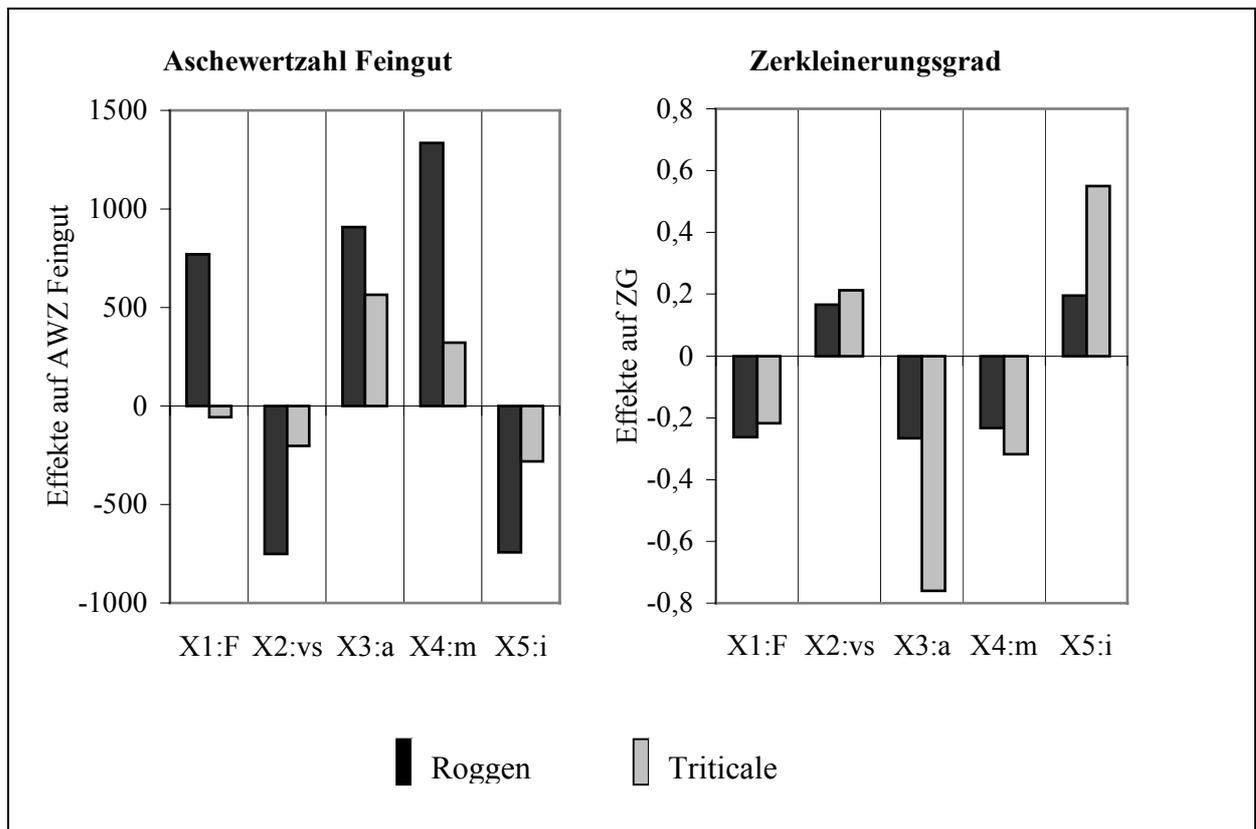
Triticale waren die meist höheren Mineralstoffgehalte in den Fraktionen im Vergleich zu Roggen, aber aufgrund des höheren Feingutanfalls wurden insgesamt günstigere Aschewertzahlen erreicht.

**Tabelle 15:** Ausgewählte Antwortgrößen des Versuchsplans zum I. Schrot

Antwortgrößen		Roggen			Triticale		
		$\bar{x}$	Min	Max	$\bar{x}$	Min	Max
<b>Massenanteile in %</b>							
Mehl	< 160 $\mu\text{m}$	9,3	4,7	16,1	11,7	8,0	16,4
Dunst	160...250 $\mu\text{m}$	1,8	0,8	3,4	6,0	4,1	9,0
Grieß	250...630 $\mu\text{m}$	8,0	3,7	14,0	28,7	17,5	39,5
	> 630 $\mu\text{m}$	80,9	67,1	90,7	66,2	48,4	78,3
Feingut	< 630 $\mu\text{m}$	19,1	9,2	32,9	33,8	21,7	51,7
<b>Mineralstoffgehalte (%i.Tr.)</b>							
Mehl	< 160 $\mu\text{m}$	0,44	0,37	0,52	0,53	0,47	0,61
Dunst	160...250 $\mu\text{m}$	0,64	0,54	0,83	0,56	0,46	0,67
Grieß	250...630 $\mu\text{m}$	0,75	0,64	0,98	0,87	0,73	1,02
	> 630 $\mu\text{m}$	2,03	1,86	2,33	2,62	2,30	3,15
Feingut	< 630 $\mu\text{m}$	0,59	0,52	0,74	0,69	0,59	0,81
<b>Zusammengesetzte Größen</b>							
	$P_Z$ (kW)	1,79	0,85	3,44	1,33	0,63	2,34
	$W_{Zm}$ (kJ/kg)	22,2	13,5	34,0	16,7	10,6	22,7
	$W_{ZA0}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	3,39	2,59	5,53	1,68	1,41	1,95
	ZG $D_m/d_m$	1,82	1,43	2,33	2,79	2,02	3,88
	AWZ <sub>Feingut</sub>	3454	1748	6055	2144	1295	2726

#### 4.2.2.3 Einfluss der Variablen auf das Mahlergebnis

Entsprechend dem Ziel der Untersuchungen zum I. Schrot, eine möglichst hohe Ausbeute an mineralstoffarmen Mahlprodukten zu erhalten, war eine Kombination der Einstellgrößen für eine intensive Zerkleinerung anzustreben. Eine Verringerung oder Erhöhung der Zerkleinerungsintensität als Folge geänderter Variableneinstellungen lässt sich anhand des Zerkleinerungsgrades als Quotient der mittleren Teilchendurchmesser vor und nach der Zerkleinerung darstellen (Abb.18). Beim Aufschroten von Roggen und Triticale interessierte insbesondere der Feingutbereich <0,63mm; der Massenanteil dieser Fraktion soll bei möglichst niedrigem Mineralstoffgehalt maximiert werden. Die Aschewertzahl<sub>Feingut</sub> drückt das Verhältnis zwischen dem Mineralstoffgehalt und der Ausbeute dieser Fraktion aus und ist damit geeignet, den Zerkleinerungserfolg zu quantifizieren (Abb.18).



**Abb. 18:** Mahlversuche zum I. Schrot: Effekte auf den Zerkleinerungsgrad und auf die Aschewertzahl<sub>Feingut</sub>

Für eine Verbesserung des Zerkleinerungserfolges waren Variableneinstellungen zu wählen, die zu einer Abnahme der Aschewertzahl führen. Bei der statistischen Auswertung der Versuchspläne mittels Varianzanalyse wurden die Wirkungen der einzelnen Variablen sowie Wechselwirkungen zweier Variablen auf die Antwortgrößen berechnet und deren Signifikanz getestet. Auf der Grundlage der ermittelten signifikanten Effekte wurden Regressionspolynome gebildet. Mit Hilfe der signifikanten Haupteffekte konnte die Wirkung geänderter Variableneinstellungen auf das Zerkleinerungsergebnis berechnet werden.

- Variable X<sub>1</sub>: Vermahlungsfeuchte

Die Erhöhung der Vermahlungsfeuchte führte zu einer Abnahme des Zerkleinerungsgrades bei Roggen und Triticale in vergleichbarer Ausprägung. Der verringerte, dazu noch etwas mineralstoffreichere Feingutanfall bewirkte bei Roggen eine Erhöhung der Aschewertzahl. Bei Triticale dagegen wurde der Nachteil der verminderten Feingutausbeute durch einen niedrigeren Mineralstoffgehalt ausgeglichen, so dass die Aschewertzahl sogar geringfügig abnahm.

- Variable  $X_2$ : Umfangsgeschwindigkeit der schnellen Walze

Die intensivere Zerkleinerung bei der höheren Umfangsgeschwindigkeit der schnellen Walze schlug sich in der vergleichbaren Zunahme des Zerkleinerungsgrades bei Roggen und Triticale nieder. Günstig für den Zerkleinerungserfolg war der dabei reduzierte Mineralstoffgehalt der Feingutfraktion. Die Abnahme des Mineralstoffgehalts war bei Roggen stärker ausgeprägt als bei Triticale, so dass sich die Aschewertzahl des Roggenfeingutes deutlicher verringerte.

- Variable  $X_3$ : Mahlsplatt

Auf das Zerkleinerungsergebnis des Aufschrotens von Triticale zeigte der Mahlsplatt den größten Einfluss im Vergleich der Variablen. Der höhere Mahlsplatt verursachte bei Triticale die größte Änderung der Zerkleinerungsintensität und die höchste Abnahme des Zerkleinerungsgrades. Trotz des geringeren Mineralstoffgehalts stieg die Aschewertzahl des Triticalefeingutes infolge des verminderten Anfalls deutlich an. Bei Roggen nahm der Zerkleinerungsgrad in geringerem Maße als bei Triticale ab, jedoch wies das Feingut neben einer geringeren Masse auch einen erhöhten Mineralstoffgehalt auf, so dass die Zunahme der Aschewertzahl des Roggenfeingutes die von Triticale noch überstieg.

- Variable  $X_4$ : Durchsatz

Die Abnahme des Zerkleinerungsgrades als Ausdruck der verminderten Zerkleinerungsintensität aufgrund des höheren Durchsatzes lagen bei Roggen und Triticale auf einem vergleichbaren Niveau. Der geringere Feingutanfall sowie der höhere Mineralstoffgehalt besonders in den Roggenfraktionen führten zur Anhebung der Aschewertzahlen. Der Durchsatz beeinflusste im Vergleich zu den anderen Variablen den Zerkleinerungserfolg bei Roggen am nachhaltigsten, die Änderung der Aschewertzahl des Roggenfeingutes war maximal.

- Variable  $X_5$ : Voreilung

Die intensivere Zerkleinerung bei höherer Voreilung der Walzen führte, besonders ausgeprägt bei Triticale, zur Zunahme des Zerkleinerungsgrades. Der daraus resultierende höhere Feingutanfall bewirkte trotz des ebenfalls gestiegenen Mineralstoffgehalts eine Abnahme der Aschewertzahl.

Anhand der dargestellten Wirkungen auf das Zerkleinerungsergebnis ließen sich mögliche Variableneinstellungen für das Aufschroten herleiten. Ein minimaler Durchsatz, die höchste Umfangsgeschwindigkeit der schnellen Walze bei maximaler Voreilung und engstem Mahlsplatt sind für beide Getreide günstig; für Roggen ist die niedrigere Feuchte besser, für Triticale die höhere. Die Ergebnisse aus der Varianzanalyse zeigten aber, dass auch nicht eindeutig

interpretierbare Wechselwirkungen zwischen zwei Variablen signifikant für das Mahlergebnis waren. Bei der rechnerischen Optimierung werden alle signifikanten Effekte berücksichtigt und deren Ergebnis bevorzugt.

#### 4.2.2.4 Optimierungsergebnisse

Zur Ermittlung der günstigsten Einstellungen für das Aufschroten von Roggen und Triticale wurde das Regressionspolynom der Aschewertzahl<sub>Feingut</sub> verwendet. Aufgrund der Linearität der Regressionsgleichung existieren keine mathematischen Optima, nur Minimal- und Maximalwerte an den Grenzen des Versuchsraumes. Als Optimum wurden das Minimum der Aschewertzahl<sub>Feingut</sub> berechnet und die dazugehörigen Variableneinstellungen erfasst. Sie entsprachen den hergeleiteten. Die zu erwartenden Zerkleinerungsergebnisse wurden berechnet und mit den Ergebnissen der Bestätigungsversuche verglichen (Tab. 16).

**Tabelle 16:** Ausgewählte Ergebnisse der Optimierung zum I. Schrot

Variablen		Roggen		Triticale	
X <sub>1</sub>	F (%)	15,0		16,5	
X <sub>2</sub>	v <sub>s</sub> (m/s)	6		6	
X <sub>3</sub>	a (mm)	0,2		0,2	
X <sub>4</sub>	m (kg/h·dm)	200		200	
X <sub>5</sub>	i	3		3	
		<b>berechnet</b>	<b>erreicht</b>	<b>berechnet</b>	<b>erreicht</b>
<b>Massenanteile in %</b>					
Mehl	< 160 µm	17,0	18,2	16,0	18,1
Dunst	160...250 µm	3,4	4,2	8,7	8,6
Grieß	250...630 µm	16,7	17,0	26,1	21,7
	> 630 µm	59,8	60,7	48,9	51,4
Feingut	< 630 µm	37,1	39,3	50,7	48,6
<b>Mineralstoffgehalte (%i.Tr.)</b>					
Mehl	< 160 µm	0,42	0,47	0,50	0,61
Dunst	160...250 µm	0,55	0,65	0,52	0,67
Grieß	250...630 µm	0,76	0,85	0,85	0,98
	> 630 µm	2,36	2,54	3,14	3,15
Feingut	< 630 µm	0,59	0,65	0,69	0,79
<b>Zusammengesetzte Größen</b>					
E3	P <sub>Z</sub> (kW)	1,77	1,72	1,14	1,68
E4	W <sub>Zm</sub> (kJ/kg)	31,2	29,6	21,4	28,3
E6	W <sub>ZA0</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	2,4	2,3	1,6	2,0
E7	ZG D <sub>m</sub> /d <sub>m</sub>	2,4	2,7	3,8	3,3
E10	AWZ <sub>Feingut</sub>	1579	1662	1351	1621

Abweichungen zwischen den theoretischen und den realisierten Ergebnissen waren aufgrund des einfachen, nur zweistufigen Versuchsplanes wahrscheinlich. Unterschiede traten neben

höheren Mehlanfällen insbesondere zwischen den rechnerisch und tatsächlich ermittelten Mineralstoffgehalten auf, die Feingutfraktionen waren mineralstoffreicher und die Aschewertzahlen erreichten nicht das theoretische Minimum.

### 4.2.3 Mahlversuche II. Schrot

#### 4.2.3.1 Versuchsergebnisse

Aufgabegut für die Untersuchungen zum II. Schrot war das Mahlprodukt des optimierten I. Schrotes, mit und ohne Absiebung des Feingutanteils <630 µm. Die Versuche wurden anhand einfacher Screeningpläne bei Variation der Umfangsgeschwindigkeit der schnellen Walze, der Voreilung und des Mahlpaltes durchgeführt. Der Durchsatz sowie der Feuchtegehalt wurden als konstante Einflussgrößen von den Einstellungen am I. Schrot bestimmt (Tab.17).

**Tabelle 17:** Variablen des Versuchsplans zum II. Schrot

<b>Variablen</b>	Stufe -1	Stufe +1
X <sub>1</sub> Umfangsgeschwindigkeit schnelle Walze (m/s)	6	8
X <sub>2</sub> Voreilung	3	4
X <sub>3</sub> Mahlpalt (mm)	0,10	0,15
<b>Konstante Größen</b>	Roggen	Triticale
Feuchtegehalt (%)	15,0	16,5
Durchsatz (kg/h·dm) Doppelmahlung	200	200
Durchsatz (kg/h·dm) mit Feingutabsiebung	120	105

In den Bilanzen für Roggen und Triticale nach dem II. Schrot (Tab.18 und 19) ist erkennbar, dass unabhängig von der Führung nach dem I. Schrot der mittlere Feingutanfall sowie dessen Mineralstoffgehalt auf einem Niveau lagen und sich die mittleren Aschewertzahlen nur wenig unterschieden. Der einzige Unterschied wurde im Feingutanfall bei Roggen gefunden, die Doppelmahlung erbrachte im Mittel 1% mehr Feingut mit gleichem Mineralstoffgehalt wie der II. Schrot mit Gutabsiebung.

Dagegen wich die Zusammensetzung der Fraktionen aus der Doppelmahlung innerhalb des Feingutbereichs deutlich von der des II. Schrotes mit Gutabsiebung ab; es fand eine für die Doppelmahlung typische Verschiebung der Zerkleinerung hin zu höherer Feinheit statt. Der Mehl- und Dunstanfall steigerte sich bei Roggen im Mittel um knapp 5%, bei Triticale um 7%. Der Mineralstoffgehalt des Dunstes lag dabei unter dem Mittelwert des Versuchsplans mit Feingutabsiebung.

**Tabelle 18:** Ausgewählte Antwortgrößen der Versuchspläne zum II. Schrot Roggen

Antwortgrößen nach II.		Roggen					
		mit Feingutabsiebung			Doppelmahlung		
		$\bar{x}$	Min	Max	$\bar{x}$	Min	Max
<b>Massenanteile in %</b>							
Mehl	< 160 $\mu\text{m}$	29,4	27,4	31,4	33,9	32,8	35,6
Dunst	160...250 $\mu\text{m}$	6,6	6,2	7,1	6,8	5,7	7,9
Grieß	250...400 $\mu\text{m}$	11,3	10,5	12,0	12,3	10,1	13,6
Grieß	400...630 $\mu\text{m}$	13,9	13,6	14,4	9,1	8,6	9,7
	> 630 $\mu\text{m}$	38,9	35,5	42,3	37,9	34,3	42,0
Feingut	< 630 $\mu\text{m}$	61,1	57,7	64,5	62,1	58,0	65,7
<b>Mineralstoffgehalte (%i.Tr.)</b>							
Mehl	< 160 $\mu\text{m}$	0,53	0,51	0,58	0,53	0,48	0,60
Dunst	160...250 $\mu\text{m}$	0,82	0,78	0,85	0,80	0,74	0,87
Grieß	250...400 $\mu\text{m}$	0,94	0,90	0,99	0,91	0,85	0,99
Grieß	400...630 $\mu\text{m}$	1,36	1,28	1,44	1,83	1,60	2,12
	> 630 $\mu\text{m}$	3,58	3,36	3,84	3,59	3,27	3,90
Feingut	< 630 $\mu\text{m}$	0,83	0,80	0,85	0,83	0,76	0,88
<b>Zusammengesetzte Größen</b>							
	$P_Z$ (kW)	3,08	2,83	3,35	2,91	2,58	3,58
	$W_{Zm}$ (kJ/kg)	46,4	43,4	49,9	50,9	45,9	57,4
	$W_{ZA0}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	2,33	2,19	2,48	2,33	2,17	2,91
	ZG $D_m/d_m$	4,65	4,27	5,06	4,87	4,04	5,46
	AWZ <sub>Feingut</sub>	1354	1277	1415	1332	1216	1428

Die Steigerung des Anteils der Fraktionen bis 400 $\mu\text{m}$  ging zu Lasten der Grießfraktion 400-630 $\mu\text{m}$ , dessen Anfall verringerte sich bei Roggen und Triticale um etwa den gleichen Betrag des erhöhten Mehl- und Dunstanfalls. Der Mineralstoffgehalt dieser Grießfraktion nahm bei Roggen um 0,5%i.Tr. zu. Der Anstieg des Mineralstoffgehalts fiel beim Triticalegrieß aus der Doppelmahlung noch höher aus; er betrug 1,2%i.Tr..

Die intensivere Zerkleinerung schlug sich auch in höheren Zerkleinerungsgraden der Mahlprodukte nieder. Bei der Doppelmahlung wurde pro Kilogramm Aufgabegut mehr Zerkleinerungsarbeit aufgewendet als bei der Vermahlung mit Feingutabsiebung. Dem stand die größere Oberflächenzunahme gegenüber, so dass im Mittel bei beiden Varianten die gleiche oberflächenbezogene Zerkleinerungsarbeit geleistet wurde.

**Tabelle 19:** Ausgewählte Antwortgrößen der Versuchspläne zum II. Schrot Triticale

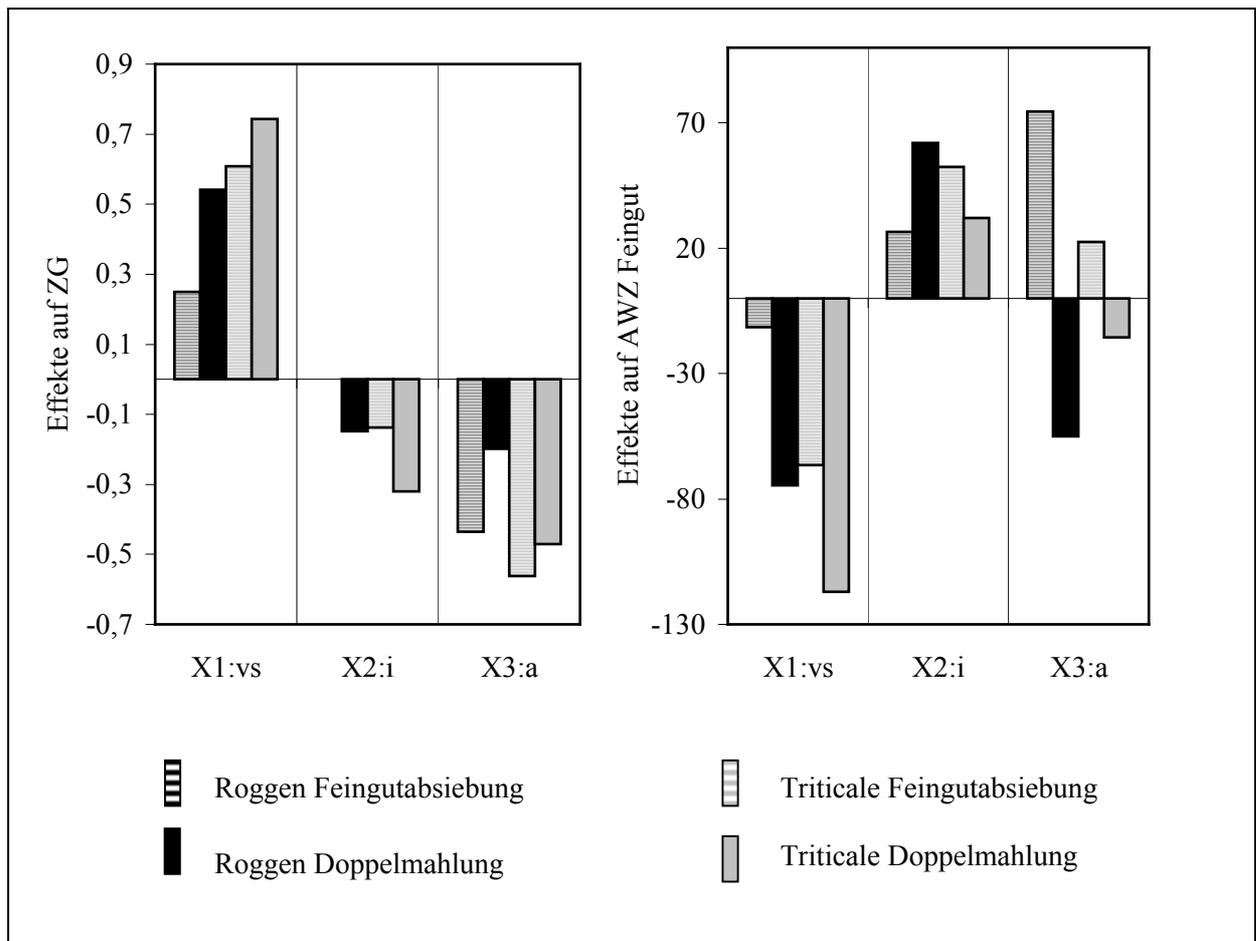
Triticale							
Antwortgrößen nach II.	mit Feingutabsiebung			Doppelmahlung			
	$\bar{x}$	Min	Max	$\bar{x}$	Min	Max	
<b>Massenanteile in %</b>							
Mehl	< 160 $\mu\text{m}$	25,2	23,0	27,7	29,8	28,0	32,9
Dunst	160...250 $\mu\text{m}$	12,3	11,2	13,6	14,7	11,3	18,4
Grieß	250...400 $\mu\text{m}$	16,4	15,4	17,1	16,9	14,8	19,5
Grieß	400...630 $\mu\text{m}$	12,4	12,0	12,7	5,2	3,9	6,7
	> 630 $\mu\text{m}$	33,6	29,9	37,8	33,4	29,3	38,5
Feingut	< 630 $\mu\text{m}$	66,4	62,2	70,1	66,6	61,5	70,7
<b>Mineralstoffgehalte (%i.Tr.)</b>							
Mehl	< 160 $\mu\text{m}$	0,71	0,68	0,73	0,71	0,67	0,76
Dunst	160...250 $\mu\text{m}$	0,75	0,72	0,77	0,73	0,68	0,78
Grieß	250...400 $\mu\text{m}$	0,91	0,87	0,97	0,97	0,87	1,10
Grieß	400...630 $\mu\text{m}$	1,59	1,48	1,70	2,75	2,01	3,44
	> 630 $\mu\text{m}$	4,30	4,61	3,93	4,22	3,78	4,58
Feingut	< 630 $\mu\text{m}$	0,93	0,90	0,97	0,93	0,89	0,98
<b>Zusammengesetzte Größen</b>							
	$P_Z$ (kW)	3,32	2,85	3,80	2,84	2,49	3,24
	$W_{Zm}$ (kJ/kg)	44,0	39,4	49,4	48,2	42,5	54,0
	$W_{ZA0}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	2,27	2,04	2,61	2,22	1,98	2,75
	ZG $D_m/d_m$	5,48	4,80	6,11	5,90	4,83	6,84
	AWZ <sub>Feingut</sub>	1400	1335	1478	1402	1330	1520

#### 4.2.3.2 Einfluss der Variablen auf das Mahlergebnis

Bei der varianzanalytischen Auswertung der Versuchspläne wurden die signifikanten Effekte ermittelt, die bei Änderung der Variableneinstellung von Stufe -1 auf +1 das Zerkleinerungsergebnis beeinflussten. Auf Grundlage der signifikanten Haupteffekte können die Einzelwirkungen veränderter Variablen auf den Zerkleinerungsgrad und die Aschewertzahl des Feingutes dargestellt werden (Abb.19).

- Variable  $X_1$ : Umfangsgeschwindigkeit der schnellen Walze

Die Erhöhung der Walzengeschwindigkeit bewirkte bei der Doppelmahlung die größte Änderung des Zerkleinerungsergebnisses im Vergleich zu den anderen Variablen. In den Mahlprodukten der Doppelmahlung überstiegen die Zunahme des Zerkleinerungsgrades wie auch die Verringerung des Mineralstoffgehaltes im Feingut die des II. Schrotes mit Feingutabsiebung, so dass auch die Aschewertzahlen für das Feingut in stärkerem Maße abnahmen.



**Abb. 19:** Mahlversuche zum II. Schrot: Effekte auf den Zerkleinerungsgrad und auf die Aschewertzahl<sub>Feingut</sub>

- Variable X<sub>2</sub>: Voreilung

Im Vergleich zu den anderen Variablen zeigte die veränderte Voreilung die geringste Wirkung auf den Zerkleinerungsgrad. Dabei erwies sich die obere Stufe der Voreilung als zu hoch für den II. Schrot von Roggen und Triticale. Insbesondere bei der Doppelmahlung nahmen die Zerkleinerungsgrade der Mahlprodukte bei höherer Voreilung ab, die Aschewertzahlen erhöhten sich aufgrund des geringeren Feingutanfalls bei allen Varianten.

- Variable X<sub>3</sub>: Mahlpalt

Durch die Einstellung des größeren Mahlpaltes nahmen bei geringerer Zerkleinerungsintensität die Zerkleinerungsgrade der Mahlprodukte ab. Dabei beeinflusste die Änderung des Mahlpaltes den Zerkleinerungsgrad des II. Schrotes mit Feingutabsiebung in stärkerem Maße als den der Doppelmahlung. Die stärker ausgeprägte Erniedrigung des Mineralstoffgehaltes im Feingut der Doppelmahlung führte bei dieser Vermahlungsvariante zur Verringerung der Aschewertzahl, während beim II. Schrot mit Absiebung die Wirkung des reduzierten Massenanteils überwog und zur Erhöhung der Aschewertzahl führte.

Aus den dargestellten Wirkungen der Variablen auf das Zerkleinerungsergebnis wurden als günstige Einstellungen die höhere Umfangsgeschwindigkeit der schnellen Walze, die niedrigere Voreilung sowie der kleinere Mahlpalt für den II. Schrot mit Feingutabsiebung und der größere Mahlpalt für die Doppelmahlung von Roggen und Triticale ermittelt. Vorhandene, signifikante Wechselwirkungen zwischen zwei Variablen konnten dabei im Gegensatz zur nachfolgenden rechnerischen Optimierung nicht berücksichtigt werden.

#### 4.2.3.4 Optimierungsergebnisse

Die Optimierung beinhaltete die Berechnung des Minimums der Regressionspolynome für die Aschewertzahl<sub>Feingut</sub> aus jedem Versuchsplan. Die für die berechneten Minima gültigen Variableneinstellungen konnten wegen der Linearität der Regressionspolynome am Rand des Versuchsraums erwartet werden. Die Ergebnisse der rechnerischen Optimierung (Tab. 20) wichen nur in einem Punkt von den hergeleiten ab; bei der Doppelmahlung von Triticale erwies sich unter Berücksichtigung aller signifikanten Effekte der engere Mahlpalt als günstigere Einstellung.

Auf Grundlage der Regressionsgleichungen wurden die Antwortgrößen bei der optimalen Variableneinstellung berechnet und mit den Ergebnissen eines Bestätigungsversuchs verglichen. Ausgewählte Antwortgrößen sind in Tabelle 20 enthalten. Trotz vorhandener Unterschiede zwischen den berechneten und den Ergebnissen des Bestätigungsversuchs entsprachen die Aschewertzahlen für das Feingut den Erwartungen. Abweichungen im Feingutbereich traten sowohl bei Roggen als auch bei Triticale bei den theoretischen und den erreichten Massenanteilen auf. Die Mehlanfälle waren etwas geringer, dafür fiel mehr Grieß an, so dass der berechnete Feingutanteil erreicht oder überboten wurde. Beim Roggen wies das Feingut wegen des höheren Anteils an mineralstoffreicherem Grieß insgesamt einen höheren Mineralstoffgehalt auf; die minimalen Aschewertzahlen wurden nur annähernd erreicht. Der Mineralstoffgehalt der Triticalemehle und –dunste lag unter den theoretischen Werten, so dass im Bestätigungsversuch die Minima der Aschewertzahlen für das Feingut deutlich unterboten wurden.

**Tabelle 20:** Ausgewählte Ergebnisse der Optimierung zum II. Schrot

Variablen	Roggen				Triticale			
	mit Feingut- absiebung		Doppel- mahlung		mit Feingut- absiebung		Doppel- mahlung	
X <sub>1</sub> vs (m/s)	8		8		8		8	
X <sub>2</sub> i	3		3		3		3	
X <sub>3</sub> a (mm)	0,1		0,15		0,1		0,1	
	berech- net	erreicht	berech- net	erreicht	berech- net	erreicht	berech- net	erreicht
<b>Massenanteile in %</b>								
Mehl < 160 µm	31,2	28,1	33,8	28,8	27,5	27,2	33,0	32,2
Dunst 160...250 µm	7,0	7,6	6,0	8,4	13,2	14,5	18,1	17,1
Grieß 250...630 µm	25,8	31,4	22,2	27,3	29,3	30,3	19,9	21,7
> 630 µm	36,0	32,9	38,0	35,5	30,0	28,1	29,1	29,0
Feingut < 630 µm	64,0	67,1	62,0	64,5	70,0	71,9	70,9	71,0
<b>Mineralstoffgehalte (%i.Tr.)</b>								
Mehl < 160 µm	0,52	0,49	0,48	0,45	0,70	0,64	0,70	0,64
Dunst 160...250 µm	0,80	0,79	0,78	0,70	0,75	0,67	0,71	0,66
Grieß 250...630 µm	1,22	1,23	1,18	1,22	1,24	1,22	1,58	1,35
> 630 µm	3,77	3,68	3,49	3,50	4,57	4,86	4,60	4,56
Feingut < 630 µm	0,83	0,87	0,76	0,81	0,93	0,89	0,95	0,86
<b>Zusammengesetzte Größen</b>								
E <sub>3</sub> P <sub>Z</sub> (kW)	3,08	2,24	2,60	2,37	3,10	2,30	2,78	2,41
E <sub>4</sub> W <sub>Zm</sub> (kJ/kg)	46,4	49,3	45,7	42,2	43,0	53,0	47,0	42,9
E <sub>6</sub> W <sub>ZA0</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	2,21	2,47	2,22	2,07	2,05	2,53	2,01	1,83
E <sub>7</sub> ZG D <sub>m</sub> /d <sub>m</sub>	5,00	5,27	4,64	5,20	6,00	6,36	6,71	6,74
E <sub>10</sub> AWZ <sub>Feingut</sub>	1281	1295	1220	1253	1336	1238	1323	1213

#### 4.2.4 Prallvermahlung gequetschter Getreide

##### 4.2.4.1 Versuchsbedingungen

Vor den Untersuchungen zur Prallzerkleinerung wurden die auf zwei unterschiedliche Feuchte genetzten Getreide im Walzenstuhl gequetscht, um durch die Zerstörung der kompakten Kornstruktur in der nachfolgenden Vermahlungsstufe höhere Feingutausbeuten bei geringerem Zerkleinerungsaufwand zu ermöglichen [73]. Für das Quetschen von Roggen und Triticale im Walzenstuhl wurden ein Mahlspace von 0,3 mm und eine Umfangsgeschwindigkeit der Walzen von 7,6 m/s eingestellt, der Durchsatz betrug 220 bis 240 kg/h·dm. Beim Quetschen des Roggens fiel 2,3% Mehl mit einem Mineralstoffgehalt von 0,60%i.Tr. an, bei Triticale betrug der Anteil an Quetschmehl 4,9% mit einem Mineralstoffgehalt von 0,53%i.Tr.. Im Vergleich zum I. Schrot waren für das Quetschen im Mittel nur etwa 25% (Roggen) bzw. 20% (Triticale) der massebezogenen Zerkleinerungsarbeit für das Aufschroten notwendig. Die gequetschten Getreide mit einem Feuchtegehalt von 15 und 16% wurden in der Stiftmüh-

le mit einem Durchsatz von durchschnittlich 37 kg/h zerkleinert. Höhere Durchsätze konnten wegen der schlechten Fließeigenschaften des Aufgabegutes nicht realisiert werden. Die Umfangsgeschwindigkeit der äußeren Stiftreihe variierte dabei zwischen 60, 80 und 100m/s.

#### 4.2.4.2 Massenanteile und Mineralstoffgehalte der Fraktionen

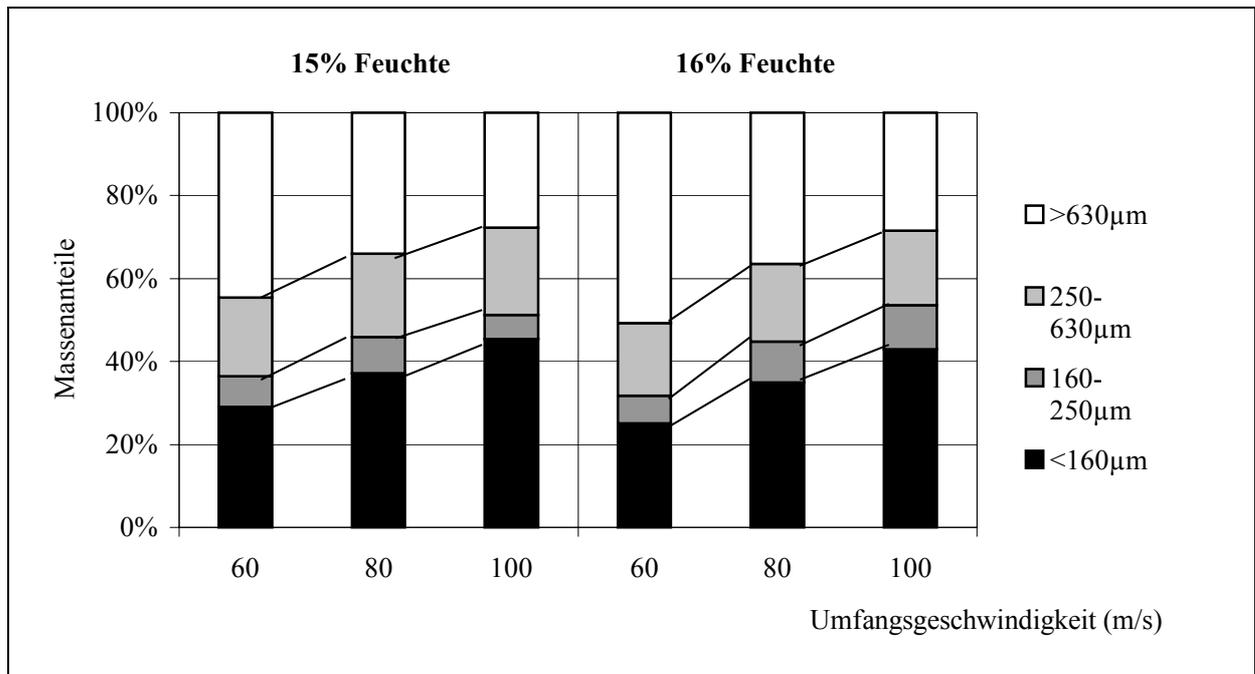
Die ausgewählten Zerkleinerungsergebnisse in Tabelle 21 zeigen, dass die Änderung der Umfangsgeschwindigkeit des Rotorstiftkreises die Massenanteile und Mineralstoffgehalte in den Fraktionen weitaus mehr beeinflusste als die Änderung des Feuchtegehaltes im Mahlgut.

**Tabelle 21:** Zerkleinerungsergebnisse bei Prallbeanspruchung der gequetschten Getreide

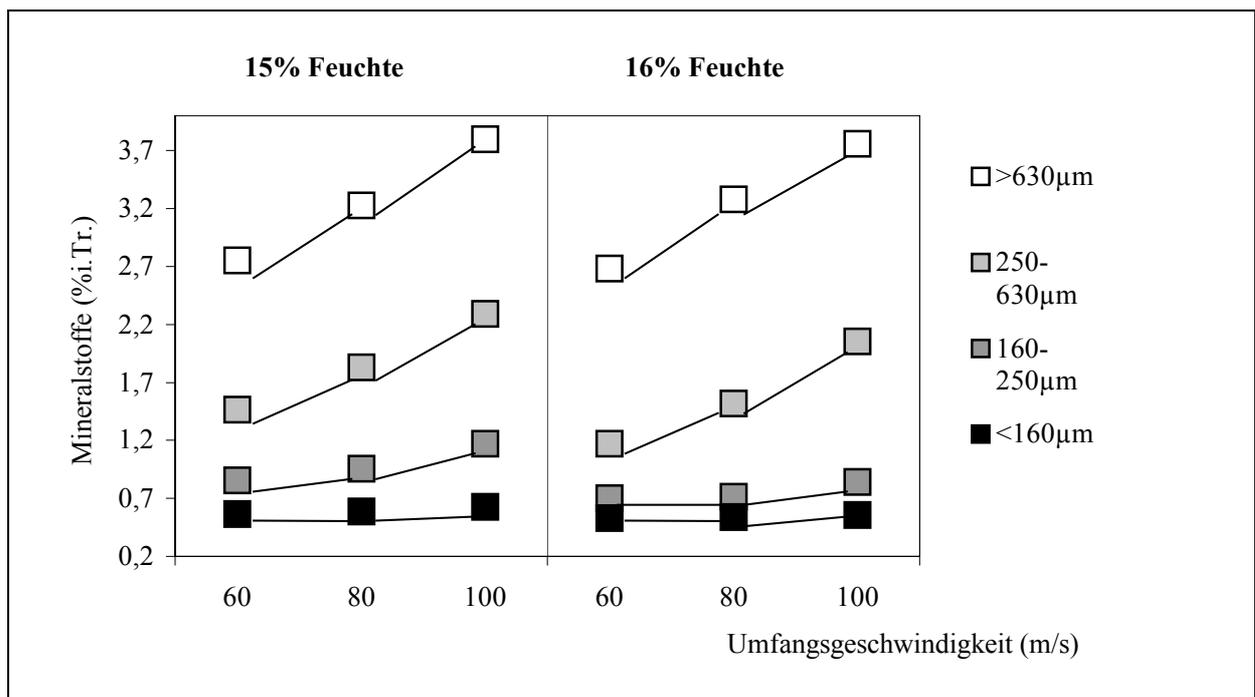
		15% Feuchte			16% Feuchte		
Umfangsgeschwindigkeit der äußeren Stiftreihe (m/s)		60	80	100	60	80	100
<b>Roggen</b>							
<b>Massenanteile in %</b>							
Mehl	< 160 µm	29,0	37,1	45,4	25,1	34,9	43,0
Dunst	160...250 µm	7,4	8,8	5,8	6,7	9,9	10,6
Grieß	250...630 µm	19,0	20,0	21,1	17,4	18,7	17,9
	> 630 µm	44,5	34,0	27,7	50,8	36,4	28,5
Feingut	< 630 µm	55,5	66,0	72,3	49,2	63,6	71,4
<b>Mineralstoffgehalte (%i.Tr.)</b>							
Mehl	< 160 µm	0,56	0,58	0,62	0,53	0,54	0,55
Dunst	160...250 µm	0,86	0,96	1,17	0,70	0,71	0,84
Grieß	250...630 µm	1,46	1,83	2,29	1,17	1,52	2,05
	> 630 µm	2,75	3,23	3,80	2,68	3,28	3,76
Feingut	< 630 µm	0,91	1,01	1,15	0,78	0,86	0,97
<b>Triticale</b>							
<b>Massenanteile in %</b>							
Mehl	< 160 µm	35,0	44,6	54,5	35,7	45,3	56,3
Dunst	160...250 µm	7,8	9,4	9,2	7,4	8,1	11,3
Grieß	250...630 µm	19,9	20,3	18,1	17,4	17,6	12,3
	> 630 µm	37,2	25,6	18,2	39,5	29,1	20,1
Feingut	< 630 µm	62,8	74,4	81,8	60,5	70,9	79,9
<b>Mineralstoffgehalte (%i.Tr.)</b>							
Mehl	< 160 µm	0,69	0,72	0,78	0,66	0,66	0,74
Dunst	160...250 µm	0,89	1,11	1,44	0,78	0,99	1,22
Grieß	250...630 µm	1,88	2,46	2,99	1,67	2,23	3,08
	> 630 µm	3,25	3,87	4,57	3,28	3,88	4,58
Feingut	< 630 µm	1,09	1,24	1,35	0,96	1,09	1,16

Der Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit des Rotorstiftkreises folgte der Anstieg der kinetischen Energie der Teilchen. Die auf das Mahlgut einwirkende Zerkleinerungsenergie nahm zu. Die steigende Zerkleinerungsintensität bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten des Rotors

fürten zur Zunahme besonders des Mehl- und Feingutanfalls und zur Verringerung des Massenanteils der Fraktionen  $>630\ \mu\text{m}$ . Bei Roggen fielen mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit jeweils zwischen 8 bis 10% mehr Mehl sowie 6 bis 14% mehr Feingut an (Abb.20), bei Triticale wurden im Mittel um 10% höhere Mehl- und Feingutanfälle erreicht (Abb.22, S.76). Eine kontinuierliche Änderung der Dunst- und Grießanteile bei steigender Umfangsgeschwindigkeit konnte nicht festgestellt werden.

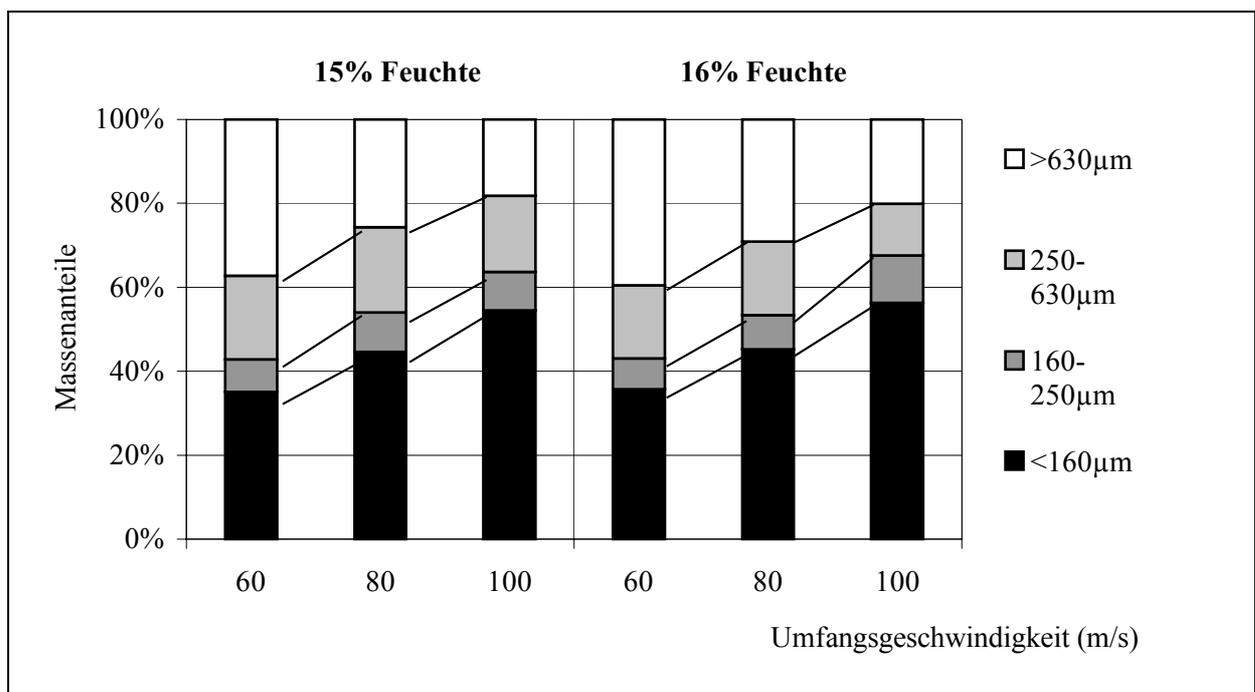


**Abb. 20:** Massenanteile der Fraktionen nach der Prallzerkleinerung gequetschten Roggens



**Abb. 21:** Mineralstoffgehalte der Fraktionen nach der Prallzerkleinerung gequetschten Roggens

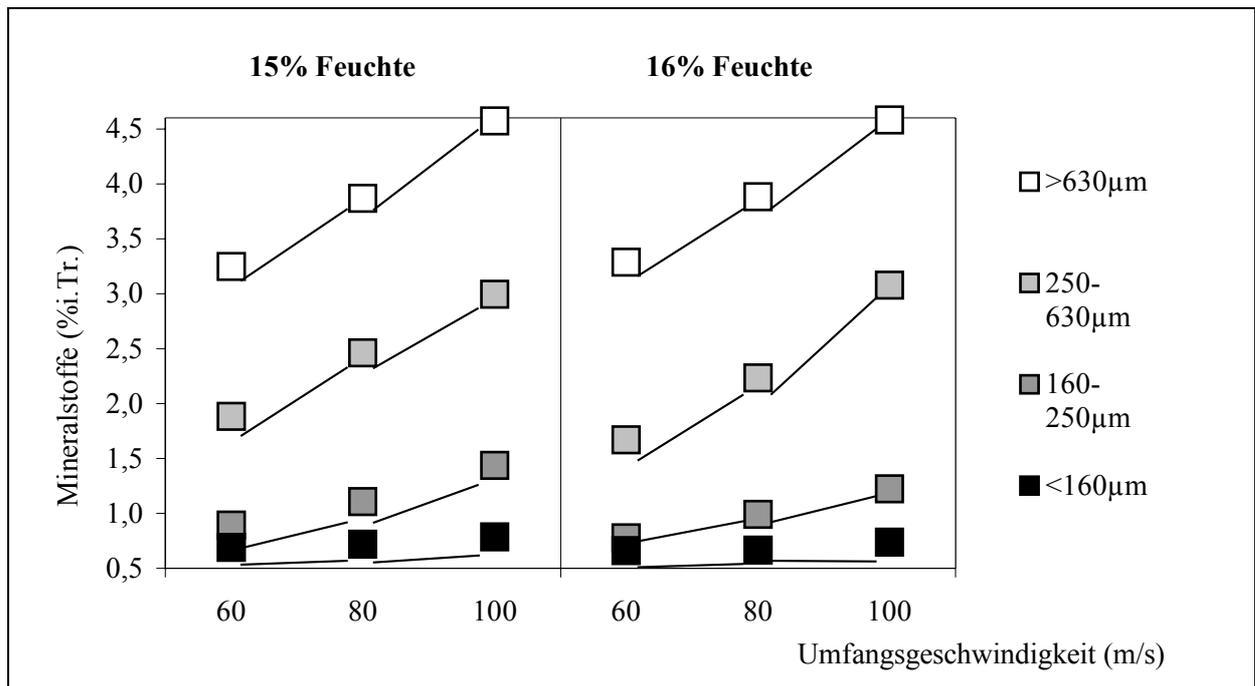
Bei der intensiveren Beanspruchung infolge höherer Umfangsgeschwindigkeiten erhöhte sich der Mineralstoffgehalt der gröberen und schalereichen Fraktionen. Die Trennung der Schale-schichten vom Endosperm war bei Roggen (Abb.21) und Triticale (Abb.23, S.77) weiter fort-geschritten. Dabei wurden neben Mehlkörperteilchen auch die mineralstoffreichen Schale-schichten stärker zerkleinert. Sie reicherten sich vor allem in den Grießfraktionen an, deren Mineralstoffgehalte mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit deutlich anstiegen. Die Ver-schiebung des mit der Umfangsgeschwindigkeit zunehmenden Anteils an feineren Schaleteil-chen ließ sich bis in die Mehlfractionen verfolgen. Im Roggenmehl war eine maximale Zu-nahme der Mehlasche um 0,06%i.Tr. festzustellen, im Triticalemehl um 0,09%i.Tr.. Die Mi-neralstoffgehalte der Feingutfraktionen stiegen bei Roggen und Triticale um 0,2 bis 0,25%i.Tr.. Insgesamt wurden alle Fraktionen mineralstoffreicher, wobei die Ausprägung der Zunahme mit der Korngröße der Fraktionen abnimmt.



**Abb. 22:** Massenanteile der Fraktionen nach der Prallzerkleinerung gequetschter Triticale

Bei konstanter Umfangsgeschwindigkeit des Rotorstiftkreises fiel bei der Prallzerkleinerung des Aufgabegutes mit höherer Feuchte ein gestiegener Anteil der Fraktionen >630mm an. Der Feingutanfall lag bei Roggen (Abb.20, S.75) um bis zu 6%, bei Triticale (Abb.22) um bis zu 3% unter den Werten des entsprechenden trockeneren Mahlgutes. Die Änderung der Dunst- und Grießfraktionen war uneinheitlich, es ließ sich keine eindeutige Tendenz erkennen. Ein Effekt des Netzens, die Mürbung des Endosperms, führte bei der Prallvermahlung von Triticale höherer Feuchte zu einem Anstieg des Mehlanfalls, die Zunahmen betragen 0,7 (60

cale höherer Feuchte zu einem Anstieg des Mehlanfalls, die Zunahmen betragen 0,7 (60 und 80m/s) und 1,8% (100 m/s).



**Abb. 23:** Mineralstoffgehalte der Fraktionen nach der Prallzerkleinerung gequetschter Triticale

Infolge des höheren Feuchtegehalts wurde das Mahlgut weniger spröde und die zähplastischen Eigenschaften der Schaleschichten verstärkten sich. Es waren höhere Spannungen notwendig, um durch Überwindung der Bindungskräfte einen Bruchvorgang des Teilchens einzuleiten. Bei gleicher Beanspruchung, d.h. gleicher Umfangsgeschwindigkeit des Rotorstiftkreises, reichten die Spannungen seltener für einen Bruch aus, sie wurden eher durch eine plastische Verformung der Teilchen wieder abgebaut. Bei der Anwendung höherer Feuchte und Abnahme der elastischen Guteigenschaften wirkte die Prallzerkleinerung im Vergleich zum trockenerem Aufgabegut selektiver. Die geringere Schalezerkleinerung führte zu mineralstoffärmeren Feingutfraktionen bei annähernd gleichem Mineralstoffgehalt der gröberen Fraktion >630µm. In den Mehlfraktionen konnte eine Reduzierung des Mineralstoffgehalts um maximal 0,07%i.Tr bei Roggen (Abb.21, S.75) bzw. um 0,05%i.Tr. bei Triticale (Abb.23) erreicht werden. Das Feingut war nach der Prallzerkleinerung der gequetschten Getreide höherer Feuchte um bis zu 0,18%i.Tr. mineralstoffärmer.

Beim Vergleich der beiden Getreidearten war zu erkennen, dass unter gleichen Vermahlungsbedingungen Triticale intensiver als Roggen zerkleinert wurde. Der Mehlanfall nach Prallbeanspruchung der bei 15% Feuchte gequetschten Triticale fiel im Mittel um 7,5% höher aus, beim feuchteren Aufgabegut als Folge des mürberen Mehlkörpers noch deutlicher um 11%.

Der Anteil an Feingut war im Triticalemahlprodukt um 7 bis 11% höher als bei Roggen. Mit der stärkeren Zerkleinerung einher gingen höhere Mineralstoffgehalte in den Triticalefraktionen. Die Triticalemehle wiesen einen um 0,13 bis 0,18% i.Tr. höheren Mineralstoffgehalt auf. Das Feingut war im Durchschnitt 0,2% i.Tr. aschereicher.

#### 4.2.4.3 Zerkleinerungsgrad und -aufwand; Aschewertzahl des Feingutes

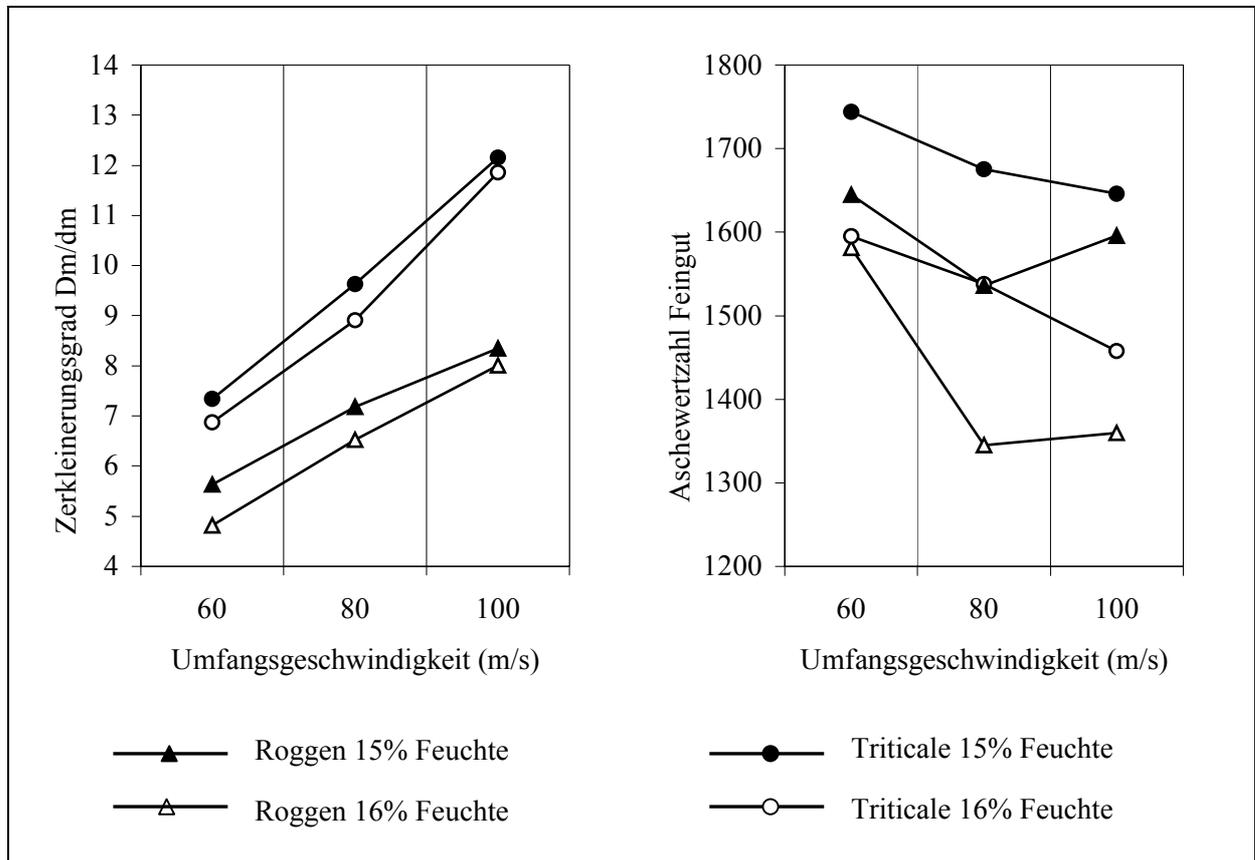
Die aufgewandten Zerkleinerungsleistungen und -arbeiten nahmen bei zunehmender Umfangsgeschwindigkeit der äußeren Stiftreihe, bis auf einen Ausreißer (Roggen mit 15% Feuchte und 80 m/s), unabhängig vom Aufgabegut und dessen Feuchte gleichermaßen zu (Tab.22). Die Zerkleinerungsgrade der Mahlprodukte folgten dem Anstieg der Umfangsgeschwindigkeiten der Rotorstiftscheibe und damit der Zerkleinerungsintensität fast linear (Abb.24). Entsprechend dem Massenanteil der Fraktionen lagen die Zerkleinerungsgrade bei Triticale über denen von Roggen. Die Mahlprodukte aus der Prallzerkleinerung bei höherer Feuchte des Aufgabegutes wiesen durch die Verstärkung des zäh-plastischen Verhaltens und damit geringerer Schalezersplitterung einen geringfügig reduzierten Zerkleinerungsgrad auf.

**Tabelle 22:** Zerkleinerungsaufwand und -erfolg bei Prallbeanspruchung der gequetschten Getreide

	15% Feuchte			16% Feuchte		
Umfangsgeschwindigkeit der äußeren Stiftreihe (m/s)	60	80	100	60	80	100
<b>Roggen</b>						
<b>Zusammengesetzte Größen</b>						
$P_Z$ (kW)	0,46	0,48	0,66	0,44	0,53	0,65
$W_{Zm}$ (kJ/kg)	21,2	22,8	40,2	20,0	28,6	40,8
$W_{ZA0}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	1,10	0,97	1,49	1,17	1,27	1,54
ZG $D_m/d_m$	5,63	7,18	8,35	4,82	6,52	8,01
$AWZ_{Feingut}$	1645	1536	1596	1581	1345	1360
<b>Triticale</b>						
<b>Zusammengesetzte Größen</b>						
$P_Z$ (kW)	0,44	0,54	0,66	0,46	0,58	0,63
$W_{Zm}$ (kJ/kg)	18,2	29,3	39,7	21,0	29,1	37,1
$W_{ZA0}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	0,81	1,07	1,25	0,94	1,07	1,14
ZG $D_m/d_m$	7,34	9,63	12,16	6,87	8,91	11,86
$AWZ_{Feingut}$	1744	1675	1646	1595	1538	1458

Wie die niedrigeren Aschewertzahlen zeigen, erwies sich für die Gewinnung einer höchstmöglichen Feingutausbeute mit möglichst niedrigem Mineralstoffgehalt bei Roggen und Triticale der höhere Feuchtegehalt als der günstigere (Abb.24). Bei Triticale führte die Prallzerkleinerung mit der höchsten Umfangsgeschwindigkeit des Rotorstiftkreises von 100m/s zur

niedrigsten Aschewertzahl des Feingutes. Der hohe Massenzuwachs an Feingut überstieg den Einfluss des zunehmenden Mineralstoffgehalts. Dagegen wurde die niedrigste Aschewertzahl  $_{\text{Feingut}}$  für Roggen bei der mittleren Geschwindigkeit von 80m/s erreicht. Der im Vergleich zur intensivsten Zerkleinerung geringere Mineralstoffgehalt des Feingutes bewirkte eine Verringerung der Aschewertzahl bis unter den bei 100m/s erreichten Wert.



**Abb. 24:** Zerkleinerungsgrade und Aschewertzahlen $_{\text{Feingut}}$  nach der Prallzerkleinerung der gequetschten Getreide

#### 4.2.5 Diskussion: Eignung der Verfahrensvarianten zum Aufschroten von Roggen und Triticale

Für die Bewertung der Aufschrotvarianten wurden die im 2. Bestätigungsversuch zum II. Schrot bzw. in den Versuchsreihen zur Prallzerkleinerung erreichten Ergebnisse mit den Einstellungen für eine minimale Aschewertzahl $_{\text{Feingut}}$  verwendet. Eine Zusammenfassung der Zerkleinerungsbedingungen enthält Tabelle 23. Die Einstellwerte unterschieden sich beim Aufschroten und Zerkleinern von Roggen und Triticale nur in wenigen Punkten. Diese spiegelten die verschiedenen Mahleigenschaften der Getreidearten wider. Im Vergleich zum zäheren Roggen ließ sich das Triticalekorn mit geringerem Aufwand in feinere Teilchen zerkleinern. Auch bei höherer Beanspruchung wurde der Nachteil des dabei ansteigenden Mineral-

stoffgehalts durch einen hohen Massenanteil ausgeglichen. Für die Vermahlung des Roggens war in der 2. Zerkleinerungsstufe eine etwas geringere Beanspruchungsintensität (weiterer Mahlpalt bei der Doppelmahlung, niedrigere Umfangsgeschwindigkeit in der Stiftmühle) günstiger, um zu dunkle Mahlprodukte zu vermeiden.

**Tabelle 23:** Zusammenfassung: Zerkleinerungsbedingungen für eine minimale Aschewertzahl<sub>Feingut</sub>

	Roggen			Triticale		
	I./II. Feingut- absiebung	I./II. Doppel- mahlung	Quet- schen/ Prallen	I./II. Feingut- absiebung	I./II. Doppel- mahlung	Quet- schen/ Prallen
1. Zerkleinerungsstufe						
Feuchte (%)	15	15	16	16,5	16,5	16
Abstezeit (h)	8	8	8	6...10	6...10	6...10
Beschüttung (kg/h)	200	200	230	200	200	230
Mahlpalt (mm)	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3
Umfangsgeschwindigkeit (m/s)*	6	6	7,6	6	6	7,6
Voreilung	3	3	1	3	3	1
2. Zerkleinerungsstufe						
Beschüttung (kg/h)	120	200	37	105	200	37
Mahlpalt (mm)	0,1	0,15		0,1	0,1	
Umfangsgeschwindigkeit (m/s)*	8	8	80	8	8	100
Voreilung	3	3		3	3	

\* bei I./II.: der schnellen Walze, bei der Prallzerkleinerung: der äußeren Stiftreihe

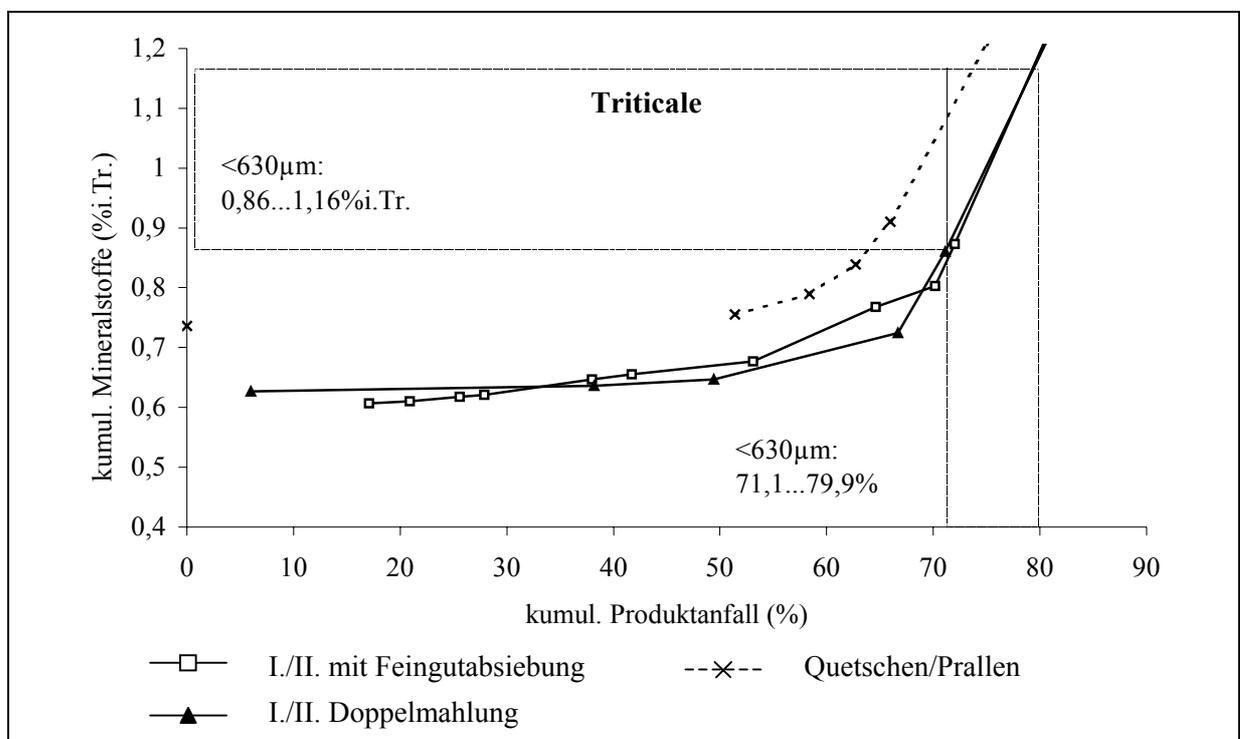
Die Beanspruchung durch Quetschen und Prallen zeichnete sich im Vergleich zur Walzenstuhlvermahlung durch eine effektivere Zerkleinerung aus. Die bezüglich der Oberflächenzunahme berechnete Zerkleinerungsarbeit  $W_{ZA0}$  war nach der 2. Zerkleinerungsstufe stets niedriger (Tab.24). Zudem wurden, insbesondere bei Triticale, höhere Zerkleinerungsgrade und Oberflächenzunahmen ermittelt. Nach Quetschen und Prallen von Roggen lag der Zerkleinerungsgrad um 1,2 höher als nach der Walzenstuhlvermahlung. Bei Triticale war der Zerkleinerungsgrad mit einem Betrag von etwa 12 fast verdoppelt. Die selektivere Vermahlung im Walzenstuhl mit der besseren Trennung der Schaleschichten vom Endosperm führte zu sauberen und mineralstoffärmeren Feingutfraktionen und damit auch zu niedrigeren Aschewertzahlen ( $AWZ_{Feingut}$ ). Die Differenz der Aschewertzahlen betrug bei Roggen nur mindestens 50, bei Triticale 220 (Tab.24). Die Ausbeute-Asche-Kurven der Variante Quetschen/Prallen lagen bei Triticale (Abb.25) und Roggen (Abb.26) über denen der Walzenstuhlzerkleinerung, wobei der Abstand bei Roggen geringer ausfiel als bei Triticale. Im Vergleich der beiden Walzenstuhlvarianten war nur bei Triticale ein höherer Zerkleinerungsgrad nach der Doppelmahlung

festzustellen. Bei beiden Getreidearten lag die oberflächenbezogene Zerkleinerungsarbeit der Doppelmahlung unter den Werten für die Variante mit Feingutabsiebung.

**Tabelle 24:** Zerkleinerungsgrade und –arbeiten nach der 2. Zerkleinerungsstufe

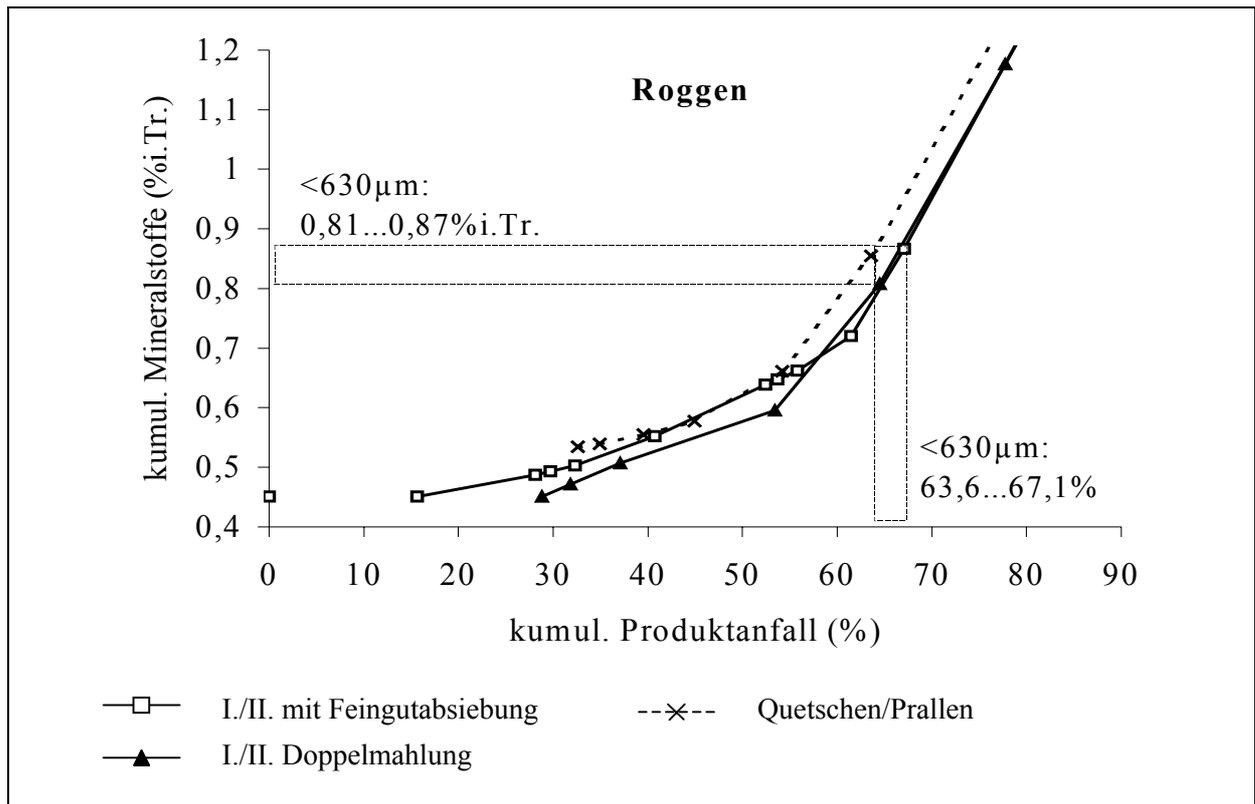
	Roggen			Triticale		
	I./II. Feingutabsiebung	I./II. Doppelmahlung	Quetschen/Prallen	I./II. Feingutabsiebung	I./II. Doppelmahlung	Quetschen/Prallen
$AWZ_{\text{Feingut}} < 630\mu\text{m}$	1295	1253	1345	1238	1213	1458
Zerkleinerungsgrad	5,3	5,2	6,5	6,4	6,7	11,9
Oberflächenzunahme ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	20,0	20,4	22,6	21,0	23,5	32,6
$W_{ZA0}$ ( $\text{kJ}/\text{m}^2$ )	2,5	2,1	1,3	2,5	1,8	1,1

Ein Ergebnis der stärkeren Zerkleinerung der Kombination Quetschen/Prallen war ein um 6% höherer Mehlanfall bei Roggen, bei Triticale betrug die Differenz ca. 25%. Im Vergleich zum Roggen wichen bei Triticale auch die anderen Ergebnisse der Prallzerkleinerung in stärkerem Maße von denen der Walzenstuhlvermahlungen ab. Während der Roggenfeingutanfall mit 63,5% im Bereich der Walzenstuhlvermahlungen lag, übertraf der Feingutanteil nach der Prallzerkleinerung der Triticale mit 79,9% das Ergebnis der Walzenstuhlvarianten um 8%.



**Abb. 25:** Ausbeute-Asche-Kurven von Triticale nach der 2. Zerkleinerungsstufe

Bei der einfacheren Zerkleinerung in der Stiftmühle gelangten vermehrt mineralstoffreiche Schaleilchen in feinere Fraktionen. Prallvermahlenes Roggenmehl war um mindestens 0,05% aschereicher als die Walzenstuhlmehle, bei Triticaleprallmehl betrug der Unterschied 0,1%i.Tr.. Der Mineralstoffgehalt des Roggenfeingutes der Kombination Quetschen/Prallen bewegte sich mit 0,86%i.Tr. ebenso wie der Feingutanteil in der Nähe der Ergebnisse aus der Walzenstuhlzerkleinerung. Dagegen war das Triticalefeingut mit 1,16%i.Tr. nach der Prallvermahlung um bis zu 0,3%i.Tr. mineralstoffreicher.

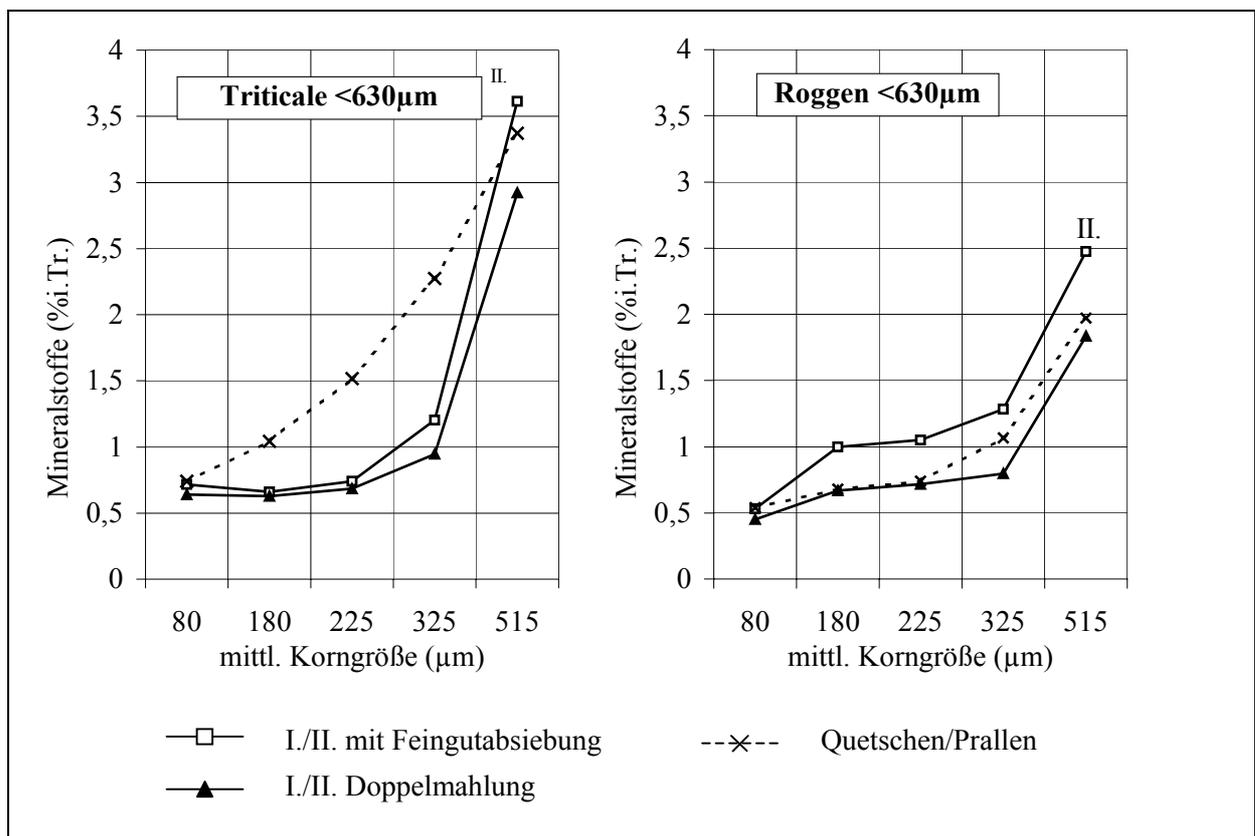


**Abb. 26:** Ausbeute-Asche-Kurven von Roggen nach der 2. Zerkleinerungsstufe

Die Walzenstuhlvermahlung von Triticale mit Feingutabsiebung bot die Möglichkeit, mineralstoffärmere Mehle und Zwischenprodukte nach dem I. Schrot zu gewinnen. Der Vorteil des Zwischenabsiebens kam ab einem Gutausfall von ca. 35% nicht mehr zur Wirkung und die Ausbeute-Asche-Kurve der Doppelmahlung wies einen günstigeren Verlauf auf. Die Variante mit Absiebung erbrachte mit 71,9% einen ähnlichen Feingutausfall wie die Doppelmahlung mit 71,0%. Der Mineralstoffgehalt von 0,89%i.Tr. lag aber über dem der Doppelmahlung von Triticale (0,86%i.Tr.), so dass mit der Variante ohne Feingutabsiebung eine etwas niedrigere Aschewertzahl<sub>Feingut</sub> erreichte wurde. Bei Roggen führte die Doppelmahlung auch schon bei niedrigen Produktausbeuten zu einem günstigeren Verlauf der Ausbeute-Asche-Kurve. Der Feingutanteil von 64,5% war etwas niedriger als bei der Variante mit Absiebung (67,1%). Er besaß aber mit 0,81%i.Tr. im Vergleich zu 0,87%i.Tr. einen geringeren Mineralstoffgehalt

mit der Folge, dass die Aschewertzahl für das Feingut aus der Doppelmahlung den niedrigsten Wert für Roggen erreichte.

Bei Betrachtung der Mineralstoffgehalte der Feingutfractionen (Abb.27) war zu erkennen, dass die zur Bewertung des Mahlerfolgs verwendete Korngrößengrenze von  $630\mu\text{m}$  für eine weitere Bearbeitung der Mahlprodukte nicht geeignet ist. Schon in der Grießfraktion unterhalb  $630\mu\text{m}$  reicherten sich Schaleteilchen an. Im Feingut nach dem II. Schrot stieg der Mineralstoffgehalt der Fraktion  $400\text{-}630\mu\text{m}$  ( $d_m = 515$ ) bei Triticale um 2,0 bzw. 2,4%i.Tr., bei Roggen auch noch deutlich um 1,0 bzw. 1,2%i.Tr. gegenüber der nächstfeineren Fraktion an. Für die Bewertung der Aufschrotvarianten wurden die nach der 2.Zerkleinerungsstufe erhaltenen Mahlprodukte entsprechend ihrer Korngröße nach Anfall und Mineralstoffgehalt miteinander verglichen (Tab.25). Den Triticalemehlen aus der Walzenstuhlvermahlung wurden die mineralstoffarmen Fraktionen  $160\text{-}200\mu\text{m}$  zugeordnet.



**Abb. 27:** Mineralstoffgehalte der Feingutfractionen von Roggen und Triticale nach der 2. Zerkleinerungsstufe

Am ungünstigsten fielen die Zerkleinerungsergebnisse bei der Kombination Quetschen/Prallen von Triticale aus. Die Fraktionen  $>250\mu\text{m}$  besaßen für die Weiterverarbeitung einen zu hohen Mineralstoffgehalt. Der Anteil an Mehl und Dunst war zwar hoch, aber auch reich an Mineralstoffen. Die Prallzerkleinerung des gequetschten Roggens führte mit einem

hohen Mehl- und Dunstanfall und vergleichsweise niedrigeren Mineralstoffgehalten zu einem besseren Ergebnis. Die Untersuchung der Modifizierungsfähigkeit von Mehlen aus der Walzenstuhl- bzw. Prallzerkleinerung ergab eine signifikant niedrigere Ladung im prallvermahlenden Roggenmehl. Für die Vermahlung zur Herstellung von Mehlen für die chemische Modifizierung schied die Variante Quetschen und Prallzerkleinern damit aus.

**Tabelle 25:** Produktanfälligkeiten nach der 2. Zerkleinerungsstufe

		Roggen			Triticale		
		I./II. Feingut- absiebung	I./II. Doppel- mahlung	Quet- schen/ Prallen	I./II. Feingut- absiebung	I./II. Doppel- mahlung	Quet- schen/ Prallen
Mehl	Fraktion ( $\mu\text{m}$ )	<160	<160	<160	<200	<200	<160
	Anteil (%)	28,1	28,8	34,9	33,3	38,2	56,3
	Asche (%i.Tr.)	0,49	0,45	0,54	0,65	0,64	0,74
Dunst	Fraktion ( $\mu\text{m}$ )	160...250	160...250	160...250	200...250	200...250	160...250
	Anteil (%)	7,6	8,3	10,0	8,4	11,2	11,3
	Asche (%i.Tr.)	0,80	0,70	0,71	0,69	0,68	1,22
Grieß 1	Fraktion ( $\mu\text{m}$ )	250...630/ 400	250...400	250...400	250...630/ 400	250...400	
	Anteil (%)	25,8	16,3	9,3	28,5	17,3	
	Asche (%i.Tr.)	0,95	0,80	1,06	1,02	0,95	
Zwischenprodukte		(Grieß 1 + Dunst)			(Grieß 1 + Dunst)		
	Anteil (%)	33,4	24,6	19,3	36,9	28,5	11,3
	Asche (%i.Tr.)	0,92	0,76	0,88	0,94	0,84	1,22
nutzbarer Auszug		(Zwischenprodukte + Mehl)			(Zwischenprodukte + Mehl)		
	Anteil (%)	61,5	53,4	54,2	70,2	66,7	67,6
	Asche (%i.Tr.)	0,72	0,60	0,66	0,80	0,72	0,82
Grieß 2	Fraktion ( $\mu\text{m}$ )	400...630	400...630	400...630			250...400
	Anteil (%)	5,6	11,1	9,4			3,3
	Asche (%i.Tr.)	2,47	1,83	1,97			2,27
Übergang	Fraktion ( $\mu\text{m}$ )	>630	>630	>630	>400	>400	>400
	Anteil (%)	32,9	35,6	36,5	29,9	33,5	29,1
	Asche (%i.Tr.)	3,68	3,50	3,28	4,79	4,34	4,21

Im Vergleich der Walzenstuhlvarianten zeigten die Produktanfälligkeiten <400  $\mu\text{m}$  bei Roggen und Triticale nach der Doppelmahlung eine Verschiebung hin zu höherer Feinheit. Die Mehl- und Dunstanteile fielen höher aus und waren mineralstoffärmer als bei der Variante mit Feingutabsiebung. Der Anfall an Grieß <400  $\mu\text{m}$  nahm ab, besaß aber auch einen geringeren Mineralstoffgehalt. Mit dem niedrigeren Anteil an mineralstoffärmeren Zwischenprodukten als Folge der Doppelmahlung können neben der schon eingesparten Klassierung nach dem I. Schrot die nachfolgenden Bearbeitungsstufen weiter verkürzt und vereinfacht werden. Die Trennung der

Schale vom Mehlkörper war gegenüber der Vermahlung mit Feingutabsiebung bei der Doppelmahlung noch nicht so weit vorangeschritten. Die Anfälle an schalehaltigen Grieß- und Schrotfraktionen waren nach der Doppelmahlung erhöht, die Mineralstoffgehalte der Fraktionen  $>400 \mu\text{m}$  niedriger. Damit wird durch die Doppelmahlung die Ausmahlung der Schale in hintere Passagen verschoben, wenn eine hohe Mehlausbeute erreicht werden soll. Beim vorliegenden Vermahlungsziel ist nur mit einer höchstens mittleren Mehlausbeute zu rechnen, so dass dieser Nachteil der Doppelmahlung in der Bewertung der Varianten nicht berücksichtigt wurde. Zusammenfassend erbrachte die Doppelmahlung im Walzenstuhl für Roggen und Triticale die besten Zerkleinerungsergebnisse. Diese Variante war für das Aufschrotten am geeignetsten.

#### **4.2.6 Anwendung der optimierten Zerkleinerungsparameter beim mehrstufigen Aufschrotten von Roggen und Triticale unterschiedlicher Anbauintensität**

##### **4.2.6.1 Charakterisierung der verwendeten Getreide**

Für die Vermahlungen wurden die gleichen Sorten wie in den vorhergehenden Untersuchungen, aber aus dem späteren Erntejahr 1998 verwendet. Neben Saatgetreide als Vertreter des konventionellen Anbaus wurde Getreide aus dem Anbau mit reduzierter Intensität, ohne Fungizidanwendung und mit einer mittleren Stickstoffdüngung vom Professor-Hellriegel-Institut e.V. Bernburg<sup>35</sup> bezogen (Tab.26). Vor der Vermahlung wurde das Getreide durch Windsichten gereinigt.

Ungünstige klimatische Bedingungen durch eine sehr trockene Witterung mit erhöhtem Krankheitsbefall im Anbaujahr [72] führten beim Getreide des reduzierten Anbaus zu mangelnder Kornausbildung (Tab.26). Die Auswirkungen waren vor allem an der Kornbeschaffenheit des Roggens zu erkennen. Die Körner waren kleinwüchsig und der Schalenanteil erhöht. Im Vergleich zum Saatgetreide war bei höherer Ausmahlung mit einer verminderten Mehlausbeute sowie höheren Mineralstoffgehalten in den Mahlprodukten zu rechnen. Triticale ist gegen Krankheiten resistenter als Roggen. Die Kornausbildung wurde bei den ungünstigeren Anbaubedingungen in geringerem Maße negativ beeinflusst.

---

<sup>35</sup> an der Fachhochschule Anhalt

**Tabelle 26:** Analysenergebnisse zur Charakterisierung der Getreide für die Vermahlung

	<b>Triticale, Sorte Modus</b>		<b>Roggen, Sorte Esprit</b>	
	konventionell	reduziert	konventionell	reduziert
Anbauintensität				
<b>Kornbeschaffenheit</b>				
TKM (g / g i.Tr.)	44,3 / 50,6	40,1 / 45,9	38,4 / 44,4	27,9 / 32,0
hl-Gewicht (kg)	73,1	68,2	75,2	72,9
Vollkornanteil (%)	97,5	94,0	99,7	99,1
mittl. Korndicke (mm)	3,00	2,86	2,78	2,36
mittl. Korndurchmesser (mm)	3,75	3,62	3,47	2,96
Kornoberfläche (m <sup>2</sup> /kg)	1,247	1,284	1,337	1,339
Korndichte (g/cm <sup>3</sup> )	1,26	1,22	1,28	1,25
<b>Inhaltsstoffe</b>				
Feuchte (%)	12,5	12,7	13,6	12,8
Mineralstoffe (%i.Tr.)	1,91	1,86	1,87	1,77
Stärke (%i.Tr.)	69,7	69,4	66,4	64,6
Proteine (%i.Tr.)	11,8	12,5	9,2	9,4
Pentosane (%i.Tr.)	7,5	7,9	8,7	9,9
<b>Standardmahlversuch</b> *				
Mehlausbeute (%)	53,4	55,2	42,3	43,4
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,53	0,51	0,47	0,48
Aschewertzahl	989	920	1106	1111
<b>Schalengehalt</b>				
Säureaufschluss ** (%i.Tr.)	12,0	13,0	13,7	17,8
Milchsäure *** (%i.Tr.)	16,7	16,9	18,0	20,4

\* im Mahlautomaten Quadrumat® Senior

\*\* die in der Kornfurche eingeschlossenen Schalentteile werden nicht vollständig erfasst

\*\*\* Aleuronzellen und Keimling werden miterfasst

Die Inhaltsstoffverteilung der Getreide entsprach nicht den zu erwartenden Ergebnissen [vgl. Abschnitt 4.1]. Roggen und Triticale der reduzierten Intensität wiesen trotz geringerer Stickstoffzufuhr beim Anbau jeweils höhere Proteinanteile und niedrigere Stärkegehalte auf als das Saatgetreide. Die unterschiedlichen Standorte ließen einen direkten Vergleich der Anbauintensitäten zwar nicht zu, aber der höhere Schalenanteil mit vermindertem Mehlkörperanteil im Getreide des reduzierten Anbaus dürfte für die Inhaltsstoffverschiebung verantwortlich sein. Eine weitere Vermutung, dass anders als im Gesamtkorn, im Mehlkörper die Protein-Stärkeverteilung zugunsten der Stärke verschoben war und zu einer weicherer Struktur führte, wurde durch die geringeren Korndichten des Getreides aus dem reduzierten Anbau sowie durch dessen höhere Mehlanfälle im Standardmahlversuch bekräftigt.

#### 4.2.6.2 Mahlergebnisse

Das Aufschroten von Roggen und Triticale wurde über den bisher untersuchten I. und II. Schrot bis zum III. Schrot hinaus geführt, um eine höhere Gesamtmehlausbeute zu erreichen. Bei Roggen schloss sich noch ein IV. Schrot an.

Beim Klassieren der Mahlprodukte wurde neben dem Mineralstoffgehalt der Fraktionen auch der Einfluss der Korngröße auf die Eignung zur chemischen Modifizierung berücksichtigt. Grundlage dafür bildeten die Ergebnisse<sup>36</sup> der Modifizierung von Mahlprodukten zunehmender Korngröße am Beispiel von Roggen, Triticale und Weizen. Die Hinzunahme größerer Fraktionen ins Roggenmehl führte zur Verringerung der Ladungsmengen im Modifikat, bei Triticale war keine Änderung festzustellen. Für die Klassierung der Mahlprodukte konnte davon ausgegangen werden, dass Fraktionen annähernd gleichen Mineralstoffgehalts auch bei unterschiedlicher Korngröße gleiche Modifizierungsergebnisse erbringen und zusammenzufassen sind. Nach dem Aufschroten von Triticale betraf das die Fraktionen der Korngröße 0-250 µm. Auf ihre weitere Zerkleinerung konnte verzichtet werden, während bei der Roggenvermahlung einer Erweiterung von Klassiergrenzen ein zu großer Unterschied zwischen den Mineralstoffgehalten der anfallenden Mehle und Dunste entgegenstand.

Eine Zusammenfassung der Vermahlungsergebnisse, der Inhaltsstoffzusammensetzung und der Vermahlungsparameter ist in den Tabellen 27 für Roggen und 28 für Triticale enthalten. Die durch die Anbauintensität hervorgerufenen Unterschiede im Mahlergebnis der Doppelmahlung zeigten für Roggen und Triticale gleiche Tendenzen. Die Schrotmehlanfälle lagen nach der 2. Zerkleinerungsstufe bei Roggen und Triticale reduzierter Anbauintensität um 3,3% über denen des konventionellen Anbaus bei gleichzeitig niedrigerer Mehlasche. Bei Triticale setzte sich diese Tendenz bis zur Korngröße von 250 µm fort. Insgesamt fielen beim Aufschroten von Triticale des reduzierten Anbaus 4,4% mehr Mehl und Dunst mit einem um 0,1% i.Tr. geringeren Mineralstoffgehalt an. Die höheren Feianteile im Mahlprodukt nach dem II. Schrot der Getreide reduzierter Anbauintensität gingen mit einer Verringerung des Grießanteils einher. Besonders deutlich mit einer Verringerung um fast 15% nahm der Anteil an Zwischenprodukten beim kleinkörnigen Roggen aus dem Anbau reduzierter Intensität ab. Der Anteil erreichte nur etwa die Hälfte des Ergebnisses der Zerkleinerung von konventionellen Roggen. Bei Triticale war eine Verringerung um ca. 5% zu verzeichnen.

---

<sup>36</sup> Die chemische Modifizierung und Ermittlung der Ladungsmengen erfolgte durch Mitarbeiter der FH Anhalt

**Tabelle 27:** Ergebnisse des Schrotens von Roggen unterschiedlicher Anbauintensität

Roggen	I./II.		III.		IV.	
	konventionell	reduziert	konventionell	reduziert	konventionell	reduziert
Walzenstuhl R/R						
Riffelanzahl (/cm)	5 / 10		10		11	
Durchsatz (kg/h-dm)	200		74	96	48	69
Mahlspalt (mm)	0,2 / 0,15		0,1		0,1	
$v_{u,s}$ (m/s)*	6 / 8		8		8	
Voreilung	3		3		4	
Mahlprodukte bez. I.						
Mehl	<160 $\mu$ m		<160 $\mu$ m		<160 $\mu$ m	
Anteil (%)	34,0	37,3	5,1	7,7	2,8	4,1
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,51	0,47	0,97	0,78	1,20	0,96
Zwischenprodukte	160-315 $\mu$ m		160-250 $\mu$ m		160-250 $\mu$ m	
Anteil (%)	18,8	9,2	3,2	2,2	0,8	1,0
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,85	0,82	1,49	1,98	2,44	2,50
Zwischenprodukte	315-400 $\mu$ m		250-355 $\mu$ m		250-400 $\mu$ m	
Anteil (%)	10,4	5,3	4,7	3,9	2,8	3,6
Mineralstoffe (%i.Tr.)	1,18	1,12	1,93	2,11	3,17	2,60
Übergang	>400 $\mu$ m		>355 $\mu$ m		>400 $\mu$ m	
Anteil (%)	36,8	48,1	23,8	34,3	17,3	25,6
Mineralstoffe (%i.Tr.)	3,64	3,03	4,52	3,69	5,60	4,40
Zerkleinerung						
Pz (kW)	2,24	2,72	0,47	0,62	0,40	0,39
$W_{Zm}$ bez.I. (kJ/kg)	40,3	49,0	8,4	11,1	7,2	7,0
$W_{ZA0}$ bez. I (kJ/m <sup>2</sup> )	1,37	1,73	3,50	2,26	1,68	2,33
ZG Dm/dm	6,75	3,86	1,66	2,00	1,26	1,14

\* Umfangsgeschwindigkeit schnelle Walze

Unter Berücksichtigung der Mineralstoffgehalte wurden die Roggengrießfraktionen >400 $\mu$ m sowie die Triticalegrieße >355 $\mu$ m dem Übergang zum III. Schrot zugeordnet. Deren Anteil war nach der Doppelmahlung des Getreides aus reduzierter Anbauintensität im Vergleich zum konventionellen Anbau erhöht und wies einen niedrigeren Mineralstoffgehalt auf. Insbesondere beim Roggen des reduzierten Anbaus führte die Doppelmahlung trotz höheren Zerkleinerungsaufwandes zu einem niedrigeren Zerkleinerungsgrad des Mahlprodukts, der Anteil größerer Fraktionen >400 $\mu$ m nahm um ca. 11% zu. Der gleichzeitig geringere Mineralstoffgehalt des Übergangs zeigte die unvollständigere Trennung der Schale vom Mehlkörper an. Die Triticalemehle nach dem III. Schrot fielen in geringer Menge und mit Mineralstoffgehalten über 1%i.Tr. an. Auch aus den aschereichen Zwischenprodukten und Übergängen waren keine hellen Mehle mehr herzustellen, so dass auf einen IV. Schrot bei der Triticalevermahlung verzichtet wurde. Die Vermahlung von Roggen erforderte einen höheren Zerkleinerungsaufwand

und eine weitere Schrotstufe. Insbesondere der Roggen aus dem Anbau reduzierter Intensität wies eine hohe Zähigkeit auf, die eine stärkere Zerkleinerung in den ersten Zerkleinerungsstufen verhinderte und zu einer Verlagerung des Mehlanfalls in hintere Schrotpassagen führte.

**Tabelle 28:** Ergebnisse des Schrotens von Triticale unterschiedlicher Anbauintensität

<b>Triticale</b>	<b>I./II.</b>		<b>III.</b>	
<b>Anbauintensität</b>	<b>konventionell</b>	<b>reduziert</b>	<b>konventionell</b>	<b>reduziert</b>
Walzenstuhl R/R				
Riffelanzahl (/cm)	5 / 10		10	
Durchsatz (kg/h·dm)	200		59	59
Mahlspalt (mm)	0,2 / 0,1		0,1	
$v_{us}$ (m/s)*	6 / 8		8	
Voreilung	3		3	
Mahlprodukte bez. I.				
Mehl	<200 $\mu$ m		<200 $\mu$ m	
Anteil (%)	43,2	46,5	1,8	1,4
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,66	0,56	1,34	1,32
Dunst	200-250 $\mu$ m		200-250 $\mu$ m	
Anteil (%)	5,7	6,8	2,0	2,0
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,62	0,55	1,39	1,41
Zwischenprodukte	250-355 $\mu$ m		250-355 $\mu$ m	
Anteil (%)	21,8	17,0	2,4	2,1
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,82	0,82	2,48	2,87
Übergang	>355 $\mu$ m		>355 $\mu$ m	
Anteil (%)	29,3	29,7	23,1	24,2
Mineralstoffe (%i.Tr.)	4,90	4,48	5,62	5,26
Zerkleinerung				
Pz (kW)	2,68	2,48	0,35	0,31
$W_{Zm}$ bez.I. (kJ/kg)	48,2	44,7	6,2	5,6
$W_{ZA0}$ bez. I (kJ/m <sup>2</sup> )	2,19	2,02	5,32	5,35
ZG Dm/dm	8,63	7,82	1,31	1,37

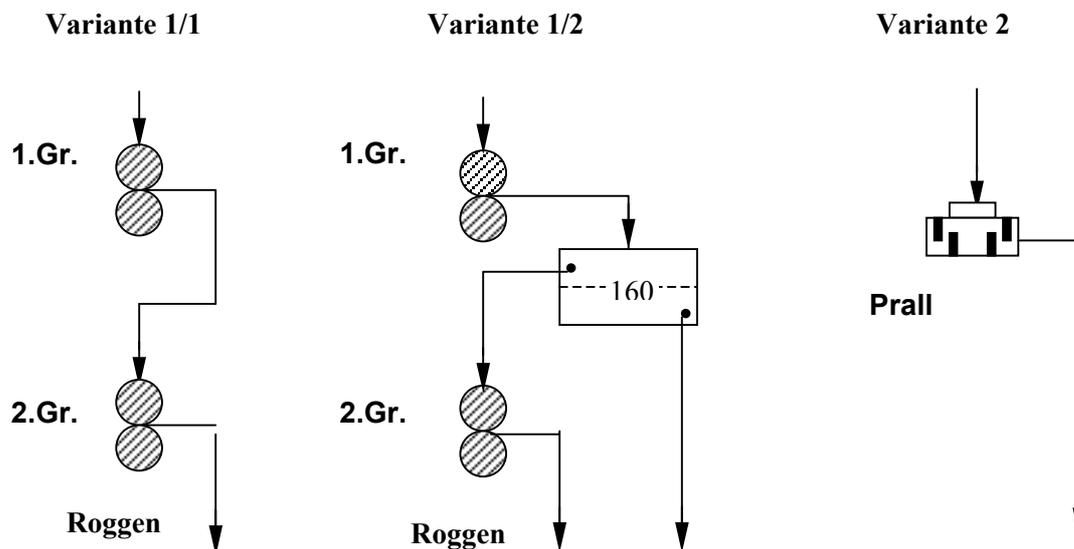
\* Umfangsgeschwindigkeit schnelle Walze

Insgesamt wurden beim Schroten von konventionell angebautem Roggen 41,9% Mehl mit einem Mineralstoffgehalt von 0,61%i.Tr. erbracht. Bei Roggen aus dem Anbau reduzierter Intensität fiel mit 49,1% mehr Mehl mit einem niedrigeren Mineralstoffgehalt von 0,56%i.Tr. an. Nach dem Schroten konventionell angebauter Triticale wurden 50,7% Mehl mit 0,68%i.Tr. Mehlasche gewonnen. Wie auch beim Roggen wurden bei Triticale reduzierter Anbauintensität ein höherer Mehlanfall von 54,7% und ein geringerer Mineralstoffgehalt von 0,58%i.Tr. erreicht.

### 4.3 Kleintechnische Untersuchungen zum Vermahlen von Roggen- und Triticalegrieß

#### 4.3.1 Untersuchte Verfahrensvarianten und Versuchsmaterial

Analog zu den Versuchen zum Aufschroten des Korns wurde die Eignung der Prallbeanspruchung in einer Stiftmühle (Variante 2) und der Walzenstuhlzerkleinerung (Varianten 1/1 und 1/2) für die Grießvermahlung untersucht (Abb.28). Das Ziel der Grießmahlung bestand vorrangig in der Gewinnung einer möglichst hohen Ausbeute an Mehl mit möglichst niedrigem Mineralstoffgehalt. Für die Vermahlung des Roggengrießes im Walzenstuhl war eine zweite Zerkleinerungsstufe notwendig, um dieses Ziel zu erreichen. Dabei wurde die Doppelmahlung (Variante 1/1) mit der zweistufigen Mahlung mit Mehlabseibung nach dem 1. Grieß (Variante 1/2) verglichen.



**Abb. 28:** Varianten zum Vermahlen der Roggen- und Triticalegrieße

Aufgabegut für die Grießvermahlung werden Dunste, feine und mittlere Grieße aus der Doppelmahlung von Roggen und Triticale im Walzenstuhl sein. Ein Ausmahlen der gröberen Grieße  $>400\ \mu\text{m}$  war aufgrund ihres geringen Anteils und des hohen Mineralstoffgehalts im Rahmen dieser Untersuchungen nicht lohnend. Die benötigten Grieße des II. Schrotetes standen nicht in ausreichender Menge zur Verfügung. Alternativ wurde in den Untersuchungen auf einen 3. Roggengrieß der Eickermühle, Lemgo-Voßheide, zurückgegriffen sowie Triticalegrieß aus Ernteproben unterschiedlicher Sorten selbst hergestellt (Tab.29).

**Tabelle 29:** Roggen- und Triticalegrieß für die Untersuchungen zur Vermahlung

	<b>Roggengrieß</b>	<b>Triticalegrieß</b>
Mineralstoffe (%i.Tr.)	1,43	0,88
mittl. Teilchendurchmesser (mm)	0,28	0,31
Oberfläche (m <sup>2</sup> /kg)	16,85	14,35
Fraktion (µm)	160...450	250...400
davon Anteile (%)	160...250µm: 36,6 250...355µm: 51,3 355...400µm: 8,8 400...450 µm: 3,3	250...315µm: 56,8 315...355µm: 22,0 355...400µm: 21,2

Bei der Auswahl bzw. Herstellung des Versuchsmaterials wurde vorrangig die Korngröße berücksichtigt, die mit den Grießen der Doppelmahlung möglichst übereinstimmen sollte. Auf den Mineralstoffgehalt konnte nach Festlegung der Korngröße kein Einfluss mehr genommen werden. Abweichungen vom Produkt der Doppelmahlung wies vor allem der Roggengrieß auf. Er war um 0,6%i.Tr. mineralstoffreicher.

#### 4.3.2 1. Grießmahlung für Roggen und Triticale

##### 4.3.2.1 Vermahlen im Walzenstuhl

###### 4.3.2.1.1 Versuchsergebnisse

Die Vermahlungsversuche im Walzenstuhl wurden entsprechend dem zusammengesetzten statistischen Versuchsplan 2. Ordnung nach Draper-Lin gestaltet. Als Variablen mit dem größten Einfluss auf das Zerkleinerungsergebnis wurden der Durchsatz, die Umfangsgeschwindigkeit  $v_s$  und Voreilung der schnellen Walze sowie der Mahlpalt zwischen den Walzen bestimmt [74]. Die angewandten Variationsstufen zur Vermahlung von Roggen- und Triticalegrieß sind in Tabelle 30 dargestellt.

**Tabelle 30:** Variablen des Versuchsplans zur 1. Grießmahlung

<b>Variablen</b>	Stufe $-\alpha$	Stufe -1	Stufe 0	Stufe +1	Stufe $+\alpha$
X <sub>1</sub> Durchsatz (kg/h·dm)	49,5	70	100	130	150,5
X <sub>2</sub> Mahlpalt (mm)	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
X <sub>3</sub> Voreilung	2	3	4,5	6	7
X <sub>4</sub> $v_s$ (m/s)	6,7	8,1	10,1	12,1	13,4

Die erreichten Versuchsergebnisse enthält Tabelle 31. Beim Vergleich der Mittelwerte aus den Versuchsplänen fiel die hohe Mehlausbeute von 88% nach der Vermahlung von Triticalegrieß im Walzenstuhl auf. Der Mineralstoffgehalt wies dabei mit 0,62%i.Tr. einen für Triti-

calemehl niedrigen Wert auf. Die leichte Auflösung von Triticalegrieß zu Mehl erforderte auch einen geringeren Zerkleinerungsaufwand als bei Roggengrieß. Trotz weniger Zerkleinerungsarbeit wurden höhere Zerkleinerungsgrade erreicht. Der dunklere Roggengrieß mit einem höheren Anteil an zähen Bestandteilen der Schale setzte den Zerkleinerungskräften einen größeren Widerstand entgegen. Im Mittel wurden nur 38% Mehl mit einem Mineralstoffgehalt um die 1,0%i.Tr. gewonnen. Auch die Trennung noch vorhandener Mehlkörperteilchen von der Schale verlief beim Roggengrieß nicht so erfolgreich wie beim Triticalegrieß, wie die geringeren Unterschiede im Mineralstoffgehalt der größeren Fraktionen zeigten.

**Tabelle 31:** Ausgewählte Antwortgrößen der Versuchspläne zur 1. Grießmahlung

	Roggen			Triticale				
	$\bar{x}$	Min	Max	$\bar{x}$	Min	Max		
<b>Massenanteile in %</b>								
Mehl	<160	37,9	11,4	59,9	<180	87,7	78,3	92,5
Dunst	160...250	39,6	29,3	47,2	180...250	8,0	3,8	16,9
>250 $\mu\text{m}$		22,4	10,9	45,6		4,3	3,6	5,2
<b>Mineralstoffgehalte (%i.Tr.)</b>								
Mehl	<160	1,03	0,94	1,13	<180	0,62	0,57	0,70
Dunst	160...250	1,36	1,10	1,60	180...250	2,04	1,23	2,75
>250 $\mu\text{m}$		2,77	1,89	3,52		4,62	4,11	5,02
<b>Zusammengesetzte Größen</b>								
$P_Z$ (kW)		1,02	0,38	2,45		0,67	0,32	1,15
$W_{Zm}$ (kJ/kg)		35,3	18,2	67,3		23,7	16,4	31,7
$W_{ZA0}$ (kJ/m <sup>2</sup> )		3,55	1,21	16,07		0,84	0,58	1,07
ZG $D_m/d_m$		1,54	1,10	1,95		2,91	2,63	3,07
$AWZ_{\text{Mehl}}$		3480	1779	8236		715	617	859

#### 4.3.2.1.2 Einfluss der Variablen auf den Mehlanfall und -mineralstoffgehalt

Bei Konstanz von drei Variablen am Nullpunkt des Versuchsraumes wurde die Wirkung auf die Ausbeute und den Mineralstoffgehalt der Grießmehle bei Änderung der vierten Variable berechnet und veranschaulicht.

Bei der Vermahlung von Roggen- und Triticalegrieß bestimmte vor allem die Zerkleinerungsintensität die Grießmehlausbeute (Abb.29). Ein zunehmender Durchsatz und Mahlpalt sowie niedrigere Walzenumfangsgeschwindigkeiten verringerten den Mehlanfall. Ein Maximum des Roggenmehlanfalls in Abhängigkeit von der Voreilung wurde bei Einstellung der Stufe -0,25 festgestellt, höhere Voreilungen verminderten den Mehlanfall um bis zu 24%. Der Triticalemehlanfall nahm über den gesamten Versuchsraum mit höherer Voreilung zu. Auf die Rog-

genmehlausbeute besaßen der Durchsatz und die Walzenumfangsgeschwindigkeit den größten Einfluss; sie bewirkten Änderungen um bis zu 34%. Die Spanne der Änderungen im Triticalemehl anfall war gegenüber dem Roggengrieß deutlich geringer. Dabei hing der Triticalemehl anfall vor allem vom Mahlpalt ab. Die Differenz zwischen der höchsten Ausbeute beim engsten Mahlpalt und der niedrigsten beim weitesten Mahlpalt betrug 12%.

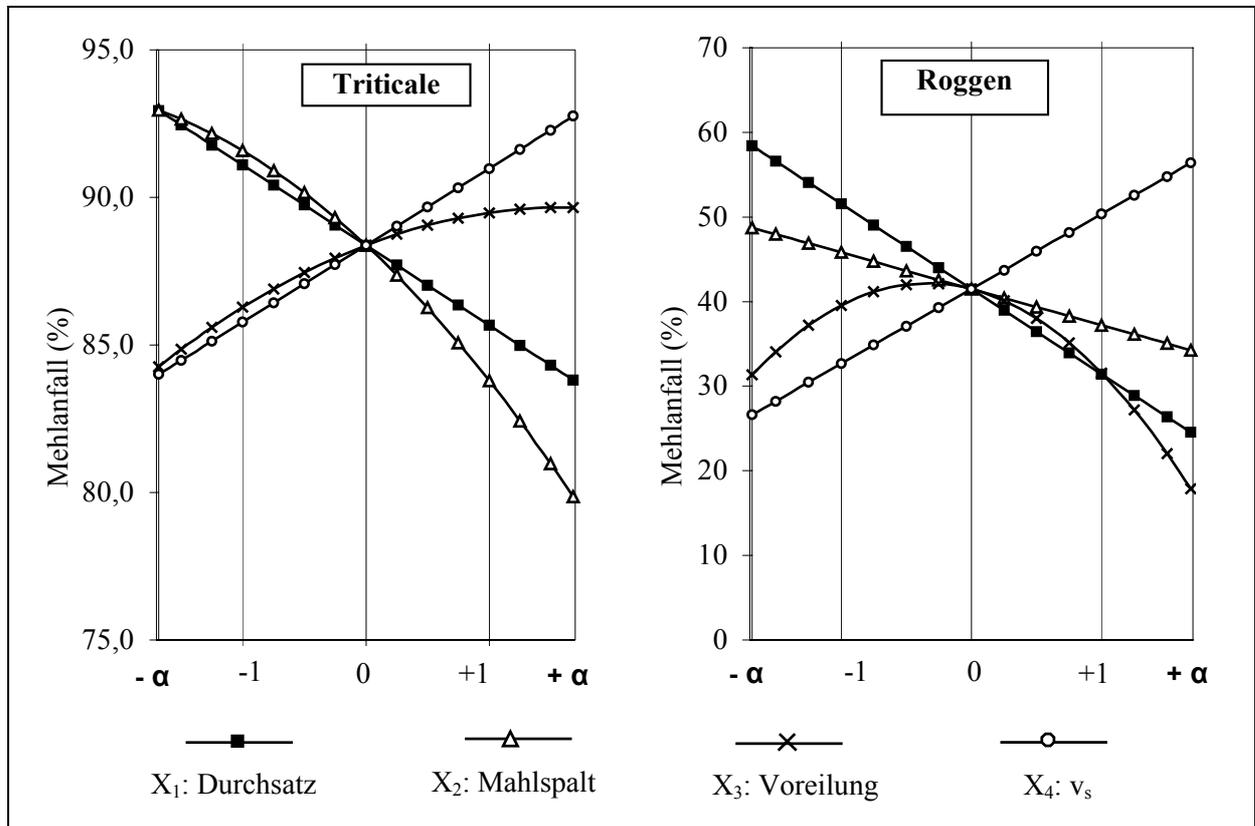
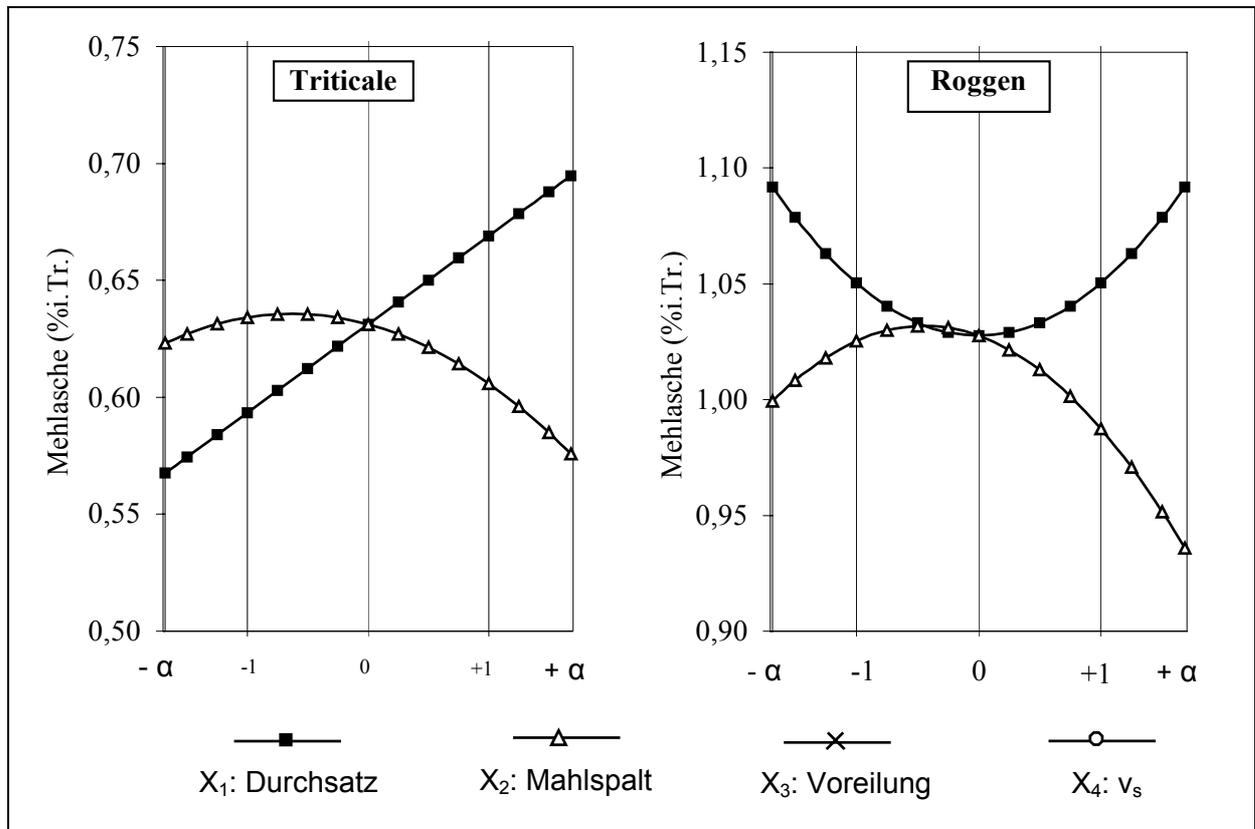


Abb. 29: Einfluss der Variablen auf den Mehl anfall der 1. Grießmahlung

Der Mineralstoffgehalt der Roggen- und Triticalegrießmehle (Abb.30) änderte sich bei Variation der Voreilung und der Umfangsgeschwindigkeit der schnellen Walze nicht signifikant. Er war nur vom Durchsatz und vom eingestellten Mahlpalt abhängig. Der Mineralstoffgehalt erreichte bei der Einstellungsstufe -0,5 ein Maximum. Höhere Mahlpalte als 0,055 mm führten bei abnehmender Zerkleinerungsintensität im Roggenmehl zu einer Erniedrigung des Mineralstoffgehalts um bis zu 0,09% i.Tr., im Triticalemehl um 0,06% i.Tr.. Mit zunehmend engeren Mahlpalten nahmen auch der Zerkleinerungsgrad und der Anteil mineralstoffärmerer Endospermteilchen in Mehlgröße zu. Der Mineralstoffgehalt lag am Rande des Versuchsraumes um bis zu 0,03% i.Tr. unter dem Maximalwert. Auf den Mineralstoffgehalt des Triticalemehles besaß der Durchsatz den größten Einfluss; mit zunehmenden Durchsätzen wurde das Mehl um bis zu 0,12% i.Tr. mineralstoffreicher. Das Roggenmehl wies in Abhängigkeit vom Durchsatz am Nullpunkt ein Minimum im Mineralstoffgehalt auf. Sowohl höhere als auch

niedrigere Durchsätze als 100 kg/h·dm bewirkten eine Zunahme des Mineralstoffgehalts um bis zu 0,07% i.Tr.



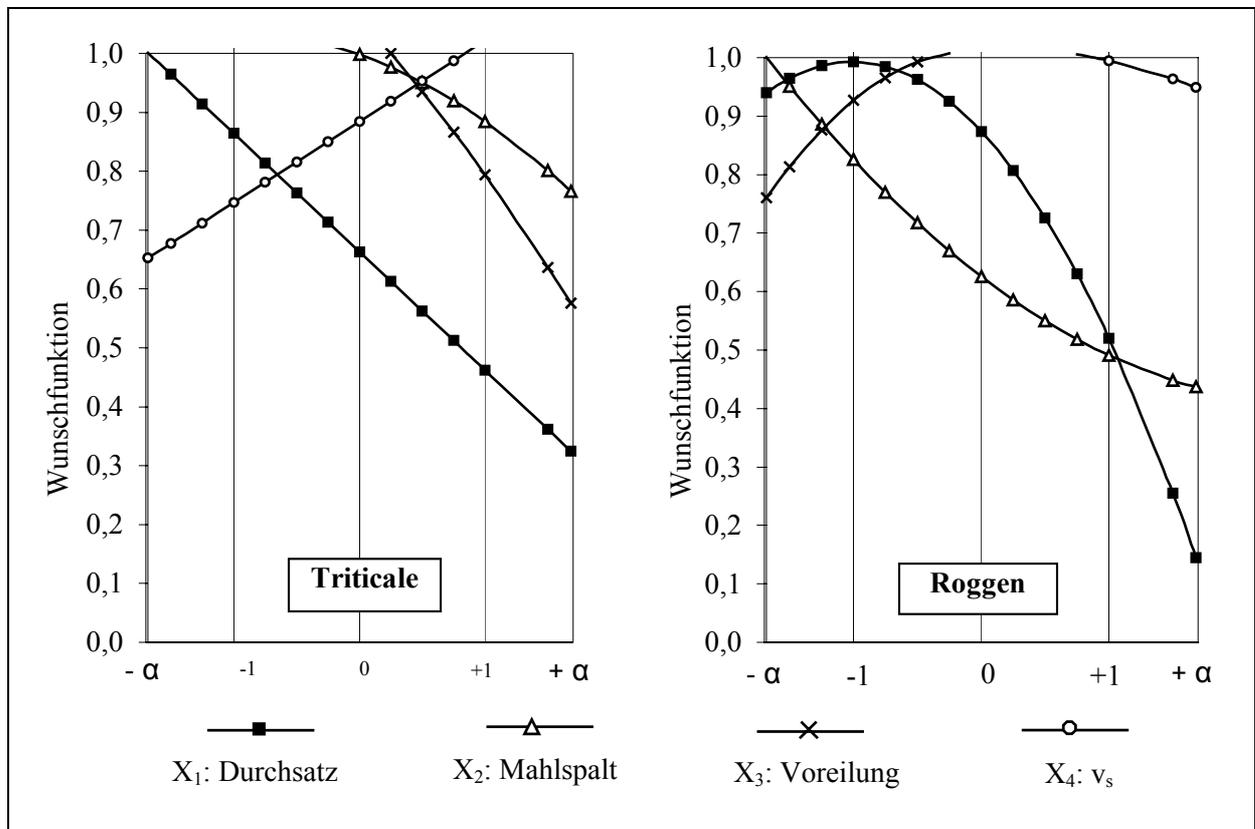
**Abb. 30:** Einfluss der Variablen auf den Mineralstoffgehalt der Mehle aus der 1. Gießmahlung

Vorraussetzung für eine erfolgreiche Roggengießmahlung waren Walzenstuhleinstellungen, die eine effektive Zerkleinerung gewährleisteten und der plastischen Verformung mit Flockenbildung entgegenwirken. Im Gegensatz zum Triticalegieß gingen einige Versuchseinstellungen der Roggengießmahlung über den geeigneten Bereich hinaus. In den Versuchsplänen waren die Ausprägungen der Antwortgrößen zwar unterschiedlich, aber die Variablen beeinflussten die Ergebnisse der Roggen- und Triticalegießvermahlung in vergleichbare Richtungen. Niedrige Durchsätze und Mahlspalte, hohe Umfangsgeschwindigkeiten der schnellen Walze sowie mittlere Voreilungen begünstigten die Gewinnung einer hohen Mehlausbeute mit möglichst niedrigem Mineralstoffgehalt.

#### 4.3.2.1.3 Optimierungsergebnisse

Zur Ermittlung der jeweils optimalen Zerkleinerungsparameter für die Roggen- und Triticalegießmahlung ist das Maximum einer Wunschfunktion innerhalb des Versuchsraumes berechnet worden. Für die Roggengieß- wie auch für die Triticalegießmahlung wurde das bestmögliche Ergebnis mit einem Wert der Wunschfunktion von 1,0 erreicht. Die Wunsch-

funktion wurde aus den Funktionen zur Maximierung des Mehlanfalls und zur Minimierung des Mehlmehlstoffgehalts in gleicher Wichtung gebildet. Das Ergebnis der Wunschfunktion in Abhängigkeit von den Variableneinstellungen am Optimum zeigt Abbildung 31.



**Abb. 31:** Einfluss der Variablen auf die Wunschfunktion am Optimum der 1. Grießvermahlung

Den größten Einfluss auf das Ergebnis der Wunschfunktion wies der Durchsatz auf. Bei der Roggengrießmahlung trat ein Maximum nahe der Variableneinstellung -1 auf. Für den Durchsatz der Triticalegrießmahlung galt, je weniger, desto günstiger für das Zerkleinerungsergebnis. Bei Konstanz der Variablen am Optimum war der minimale Mahlsplatt für die Roggengrießmahlung am günstigsten, für Triticalegrieß ein größerer Mahlsplatt nahe dem Mittelpunkt des Versuchsplanes. Die optimalen Umfangsgeschwindigkeiten der schnellen Walze wurden für beide Grieße nahe der Stufe +1 ermittelt, die optimalen Voreilungen lagen im Bereich um 0. Die berechneten und die erreichten Ergebnisse aus den Bestätigungsversuchen enthält Tabelle 32.

In den Bestätigungsversuchen lagen die Zerkleinerungsleistungen und -arbeiten unter den berechneten Werten. Dennoch wurden die theoretisch möglichen Mehlanfälle annähernd erreicht. Die Mehle waren etwas mineralstoffreicher; insbesondere das Roggengrießmehl wies einen um 0,1% i.Tr. höheren Mineralstoffgehalt auf. Nach der 1. Triticalegrießmahlung



**Tabelle 33:** Ergebnisse der Prallzerkleinerung von Roggen- und Triticalegrieß

$v_u$ (m/s)	Roggengrieß			Triticalegrieß				
	70	90	110	70	90	110		
<b>Massenanteile in %</b>								
Mehl	<160	46,7	61,6	69,8	<180	65,4	83,7	90,7
Dunst	160...250	37,6	28,6	22,7	180...250	15,2	11,4	6,0
>250 $\mu$ m		15,6	9,9	7,4		19,4	5,0	3,3
<b>Mineralstoffgehalte (%i.Tr.)</b>								
Mehl	<160	1,23	1,20	1,21	<180	0,77	0,76	0,77
Dunst	160...250	1,33	1,44	1,62	180...250	0,86	1,27	1,67
>250 $\mu$ m		2,50	2,88	3,22		1,40	2,25	3,16
<b>Zusammengesetzte Größen</b>								
$P_Z$ (kW)		0,06	0,08	0,18		0,08	0,15	0,18
$W_{Zm}$ (kJ/kg)		6,2	9,3	14,6		8,1	13,0	19,1
$W_{ZA0}$ (kJ/m <sup>2</sup> )		0,35	0,41	0,58		0,37	0,48	0,66
ZG $D_m/d_m$		1,71	2,01	2,22		2,13	2,75	3,01
AWZ <sub>Mehl</sub>		2623	1946	1733		1172	903	850

Die mit der Umfangsgeschwindigkeit zunehmende oberflächenbezogene Zerkleinerungsarbeit zeigte, dass die Zerkleinerung von Grießbestandteilen geringeren Korndurchmessers einen höheren Arbeitsaufwand erforderte. Kleinere Partikel besaßen aufgrund ihrer geringeren Masse eine niedrigere kinetische Energie; um diese zu steigern, war eine Zunahme der Relativgeschwindigkeit der Teilchen durch höhere Geschwindigkeiten der Mahlelemente notwendig. Dadurch nahm der Mehlanfall mit Erhöhung der Geschwindigkeit des Rotorstiftkreises bei der Roggen- und Triticalegrießmahlung zu, aber die Steigerungsraten wurden niedriger (Abb.32). Der Roggenmehlanfall war bei der Prallvermahlung mit 90m/s um 15% im Vergleich zu 70m/s erhöht. Eine nochmalige Zunahme der Geschwindigkeit um 20 m/s erbrachte 8% mehr Mehl. Bei der Triticalegrießmahlung nahm die Mehlausbeute um 18% (90m/s) und um 7% (110 m/s) zu. Der steigende Mehlanfall ging mit einer Verringerung des Anteils der anderen Fraktionen einher. Bei der Triticalegrießmahlung betraf das vor allem die Fraktion >250  $\mu$ m, während bei Roggengrieß eine gleichmäßigere Abnahme aller Fraktionen zu verzeichnen war. Der Verschiebung der Massenanteile hin zu höherer Feinheit bei zunehmender Geschwindigkeit des Rotorstiftkreises folgte eine entsprechende Erhöhung der Mineralstoffgehalte in den gröberen Fraktionen (Abb.33).

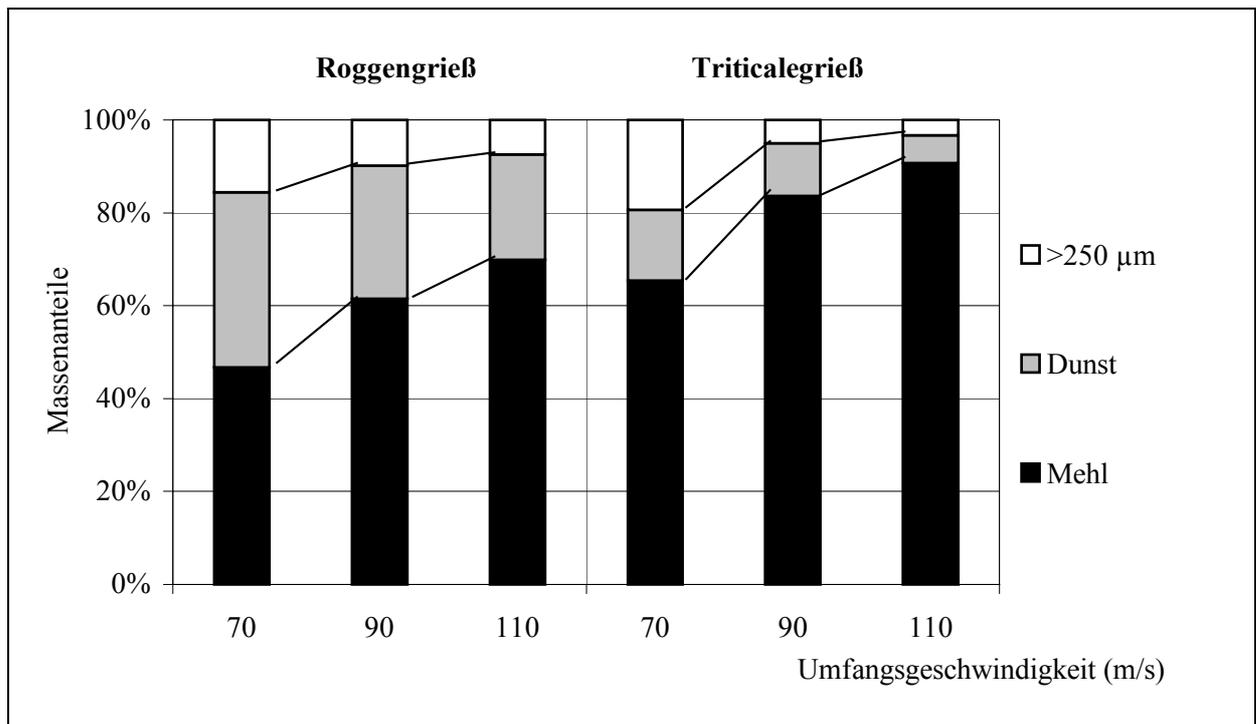


Abb. 32: Massenanteile der Fraktionen aus der Prallvermahlung der Grieße

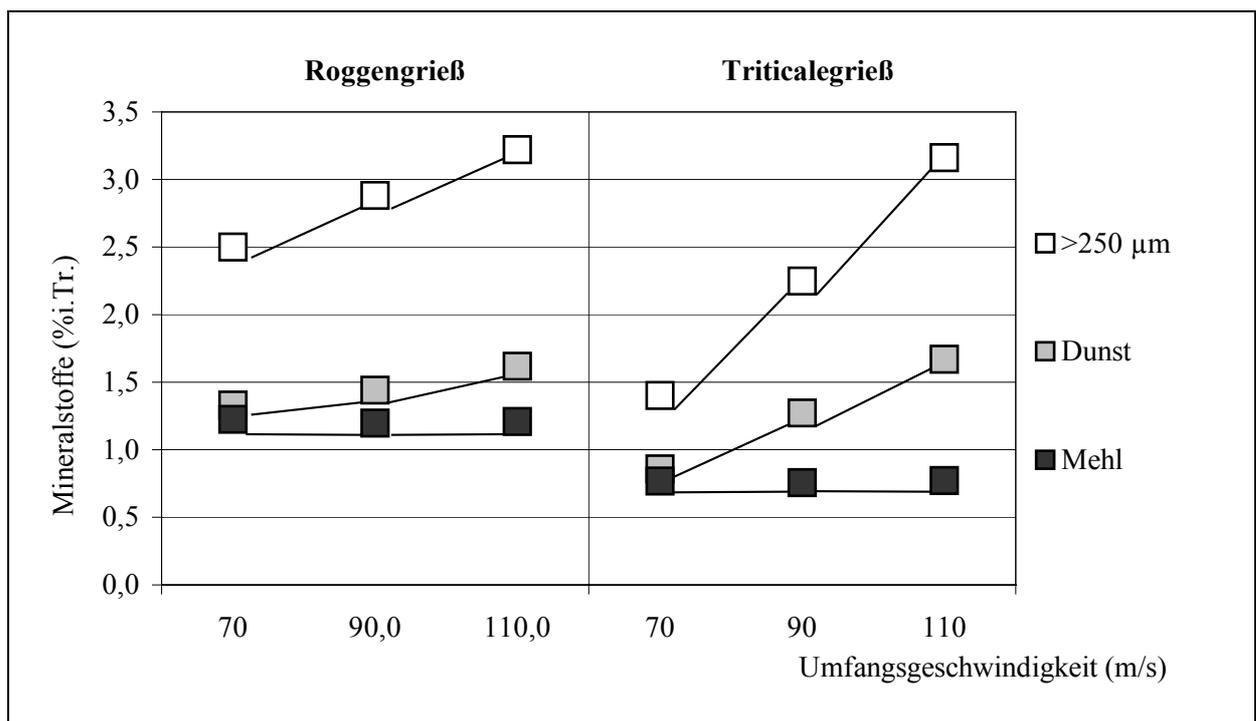


Abb. 33: Mineralstoffgehalte der Fraktionen aus der Prallvermahlung der Grieße

Eine stärkere Abreicherung an mineralstoffarmen Mehlkörperteilchen als Folge der intensiveren Prallvermahlung fand in den Triticalefraktionen  $>180\ \mu\text{m}$  statt, die Mineralstoffgehalte nahmen in der Dunstfraktion um jeweils  $0,4\% \text{ i. Tr.}$ , in der Fraktion  $>250\ \mu\text{m}$  um  $0,9\% \text{ i. Tr.}$  zu. Bei der Roggengrießmahlung stiegen die Mineralstoffgehalte bei höheren Geschwindigkeiten

des Stiftkreises in der Dunstfraktion um maximal 0,2%i.Tr., in der Fraktion >250 µm um 0,4%i.Tr..

Charakteristisch für beide Vermahlungen in der Stiftmühle war der annähernd konstante Mineralstoffgehalt der Grießmehle. Auch bei zunehmender Zerkleinerungsintensität gelangte kein höherer Anteil mineralstoffreicher Schaleilchen in die Mehlfraktionen. Die günstigsten Zerkleinerungsergebnisse mit der jeweils niedrigsten Aschewertzahl erbrachte die Prallvermahlung in der Stiftmühle bei der maximalen Umfangsgeschwindigkeit der äußeren Stiftreihe von 110 m/s.

#### 4.3.2.3 Diskussion: Eignung der Verfahrensvarianten zur 1. Grießmahlung

Für einen Vergleich wurden die Ergebnisse der optimierten 1. Grießmahlung im Walzenstuhl sowie der Prallvermahlung mit der günstigsten Aschewertzahl<sub>Mehl</sub> in Tabelle 34 zusammengefasst.

**Tabelle 34:** Ergebnisse der 1. Grießmahlung im Walzenstuhl und in der Stiftmühle

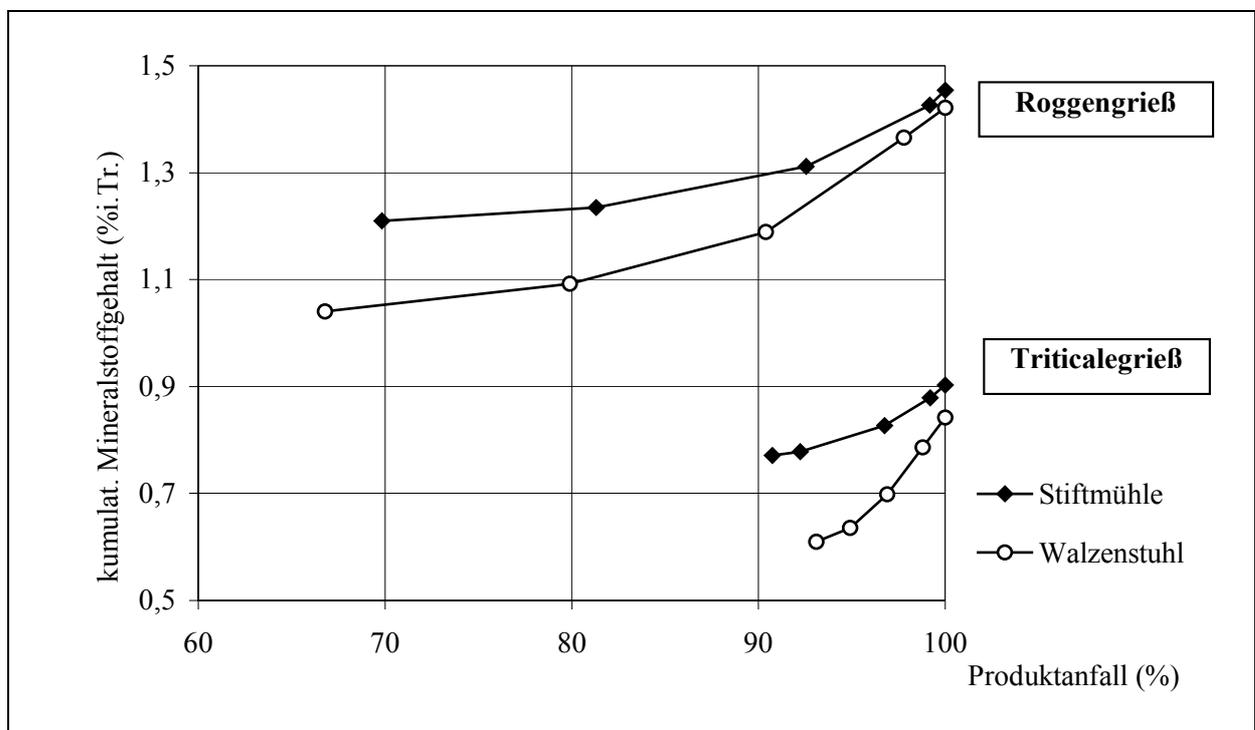
	Roggengrieß		Triticalegrieß	
	Walzenstuhl	Stiftmühle	Walzenstuhl	Stiftmühle
Durchsatz (kg/h·dm)	74	40	50	40
Mahlspalt (mm)	0,04		0,06	
Voreilung	4,0		4,9	
V <sub>u</sub> (m/s)*	12,2	110	11,9	110
	Mehl <160 µm		Mehl <180 µm	
Anteil (%)	66,8	69,8	93,1	90,7
Mineralstoffe (%i.Tr.)	1,04	1,21	0,61	0,77
	>160 µm		>180 µm	
Anteil (%)	33,2	30,2	6,9	9,3
Mineralstoffe (%i.Tr.)	2,19	2,02	3,97	2,19
P <sub>Z</sub> (kW)	0,60	0,18	0,27	0,18
W <sub>Zm</sub> (kJ/kg)	29,2	14,6	19,2	19,1
W <sub>ZA0</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	1,20	0,57	0,79	0,66
ZG D <sub>m</sub> /d <sub>m</sub>	2,11	2,22	3,11	3,01
AWZ <sub>Mehl</sub>	1558	1733	655	850

\*: Umfangsgeschwindigkeit, Walzenstuhl: der schnellen Walze, Stiftmühle: der äußeren Stiftreihe

Die Zielstellung der Grießmahlung, eine maximale Mehlausbeute mit minimalem Mineralstoffgehalt in der 1. Vermahlungsstufe, führte zu Einstellungen, die eine intensive Zerkleinerung der Roggen- und Triticalegrieße begünstigten. Bei der Walzenstuhlvermahlung wurden hohe Walzenvoreilungen und –geschwindigkeiten in Verbindung mit niedrigen Durchsätzen, bei der Prallzerkleinerung die maximale Geschwindigkeit des Rotorstiftkreises angewandt.

Damit wurden vergleichbare Mehlausbeuten mit beiden Beanspruchungsarten erzielt. Im Vergleich zur Walzenstuhlvermahlung erfolgte die Zerkleinerung der Grieße in der Stiftmühle effektiver, bei der Roggengrießmahlung wurde mit geringerem Zerkleinerungsaufwand ein höherer Zerkleinerungsgrad erreicht. Die oberflächenbezogene Zerkleinerungsarbeit für die Triticalegrießmahlung in der Stiftmühle lag ebenfalls unter dem Wert für die Walzenstuhlvermahlung, aber der Zerkleinerungsgrad des Mahlprodukts übertraf den Wert der Prallvermahlung. Entsprechend wurde durch die Walzenstuhlvermahlung der Triticalegrieße eine um 2,4% höhere Mehlausbeute erreicht, während der Roggenmehlanteil nach der Prallzerkleinerung mit 3% über der Walzenstuhlvermahlung lag.

Der Vorteil der Vermahlung im Walzenstuhl, eine bessere Trennung der mineralstoffarmen Mehlkörperteilchen von den Schalebestandteilen, war trotz der intensiven Zerkleinerung an den günstigeren Verläufen der Produkthanfall-Asche-Kurven (Abb.34) zu erkennen. Die Mineralstoffgehalte der Grießmehle aus der Walzenstuhlvermahlung waren um ca. 0,2% i.Tr. niedriger als aus der Stiftmühle. Die Aschewertzahlen der Walzenstuhlmehle lagen mit einer Differenz von ca. 200 unter denen der Prallmehle. Insgesamt wurden durch die Walzenstuhlvermahlung bessere Mahlergebnisse als bei der Prallvermahlung in der Stiftmühle erzielt.



**Abb. 34:** Produkthanfall-Asche-Kurven der 1. Grießmahlung

Auch in Hinblick auf die Verwendung als Rohstoff zur kationischen Modifizierung erwiesen sich die Mehle aus der Walzenstuhlvermahlung den prallvermahlenden Mehlen überlegen. Die

von Mitarbeitern der Fachhochschule Anhalt durchgeführten Untersuchungen an Grießmehlen gleicher Bearbeitungsstufe zeigten signifikant niedrigere Ladungshöhen der modifizierten Roggen- und Triticalemehle aus der Prallzerkleinerung. Abgesehen vom erhöhten Mineralstoffgehalt der Prallmehle war die Inhaltsstoffverteilung mit den Grießmehlen aus der Walzenstuhlvermahlung vergleichbar. Die genauen Ursachen der verminderten Modifizierungsfähigkeit von Mehl aus der Stiftmühle sind noch ungeklärt. Für die Gewinnung von Roggen- und Triticalemehl als Rohstoff für die chemische Modifizierung erwies sich die Grießvermahlung im Walzenstuhl als das geeignetere Zerkleinerungsprinzip.

### 4.3.3 2. Roggengrießmahlung im Walzenstuhl

#### 4.3.3.1 Versuchsergebnisse

Die Untersuchungen zur 2. Grießmahlung beinhalteten die weitere Ausmahlung der Mahlprodukte nach der 1. Roggengrießmahlung mit und ohne abgeseibten Mehllanteil mit dem Ziel, die Roggenmehlausbeute unter Berücksichtigung des Mineralstoffgehalts zu erhöhen. Der Einfluss des Mahlspaltes, der Voreilung und der Umfangsgeschwindigkeit der schnellen Walze ( $v_s$ ) auf das Zerkleinerungsergebnis wurde mit Hilfe eines statistischen Versuchsplanes untersucht (Tab.35). Der Durchsatz entsprach dem Anfall des Aufgabegutes nach der 1. Grießmahlung am Optimum; er betrug für die Doppelmahlung 74 kg/h·dm bzw. 25 kg/h·dm für die Variante mit Mehlabseibung. Angewandt wurde ein zentraler zusammengesetzter Versuchsplan. Mittelwerte und Spannweiten der Versuchsergebnisse nach der 2. Roggengrießmahlung enthält Tabelle 36.

**Tabelle 35:** Variablen des Versuchsplans zur 2. Roggengrießmahlung

Variablen	Stufe $-\alpha$	Stufe -1	Stufe 0	Stufe +1	Stufe $+\alpha$
$X_1$ $v_s$ (m/s)	7,5	9,1	11,5	13,9	15,5
$X_2$ Voreilung	2	3	4,5	6	7
$X_3$ Mahlspalt (mm)	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12

Das Mehl aus der 2. Grießmahlung beeinflusste mit einem Anteil von durchschnittlich 9 bis 10% die Gesamtbilanz in geringem Maße, so dass die Änderungen und Spannweiten der Antwortgrößen entsprechend niedrig waren. Unterschiede zwischen den Varianten der Roggengrießmahlung waren dennoch erkennbar. Die Doppelmahlung führte unter gleichen Versuchsbedingungen trotz höheren Arbeitsaufwandes zu einem etwas niedrigeren Zerkleinerungsgrad. Mit einher ging ein verringerter Mehlanfall mit einem niedrigeren Mineralstoffge-

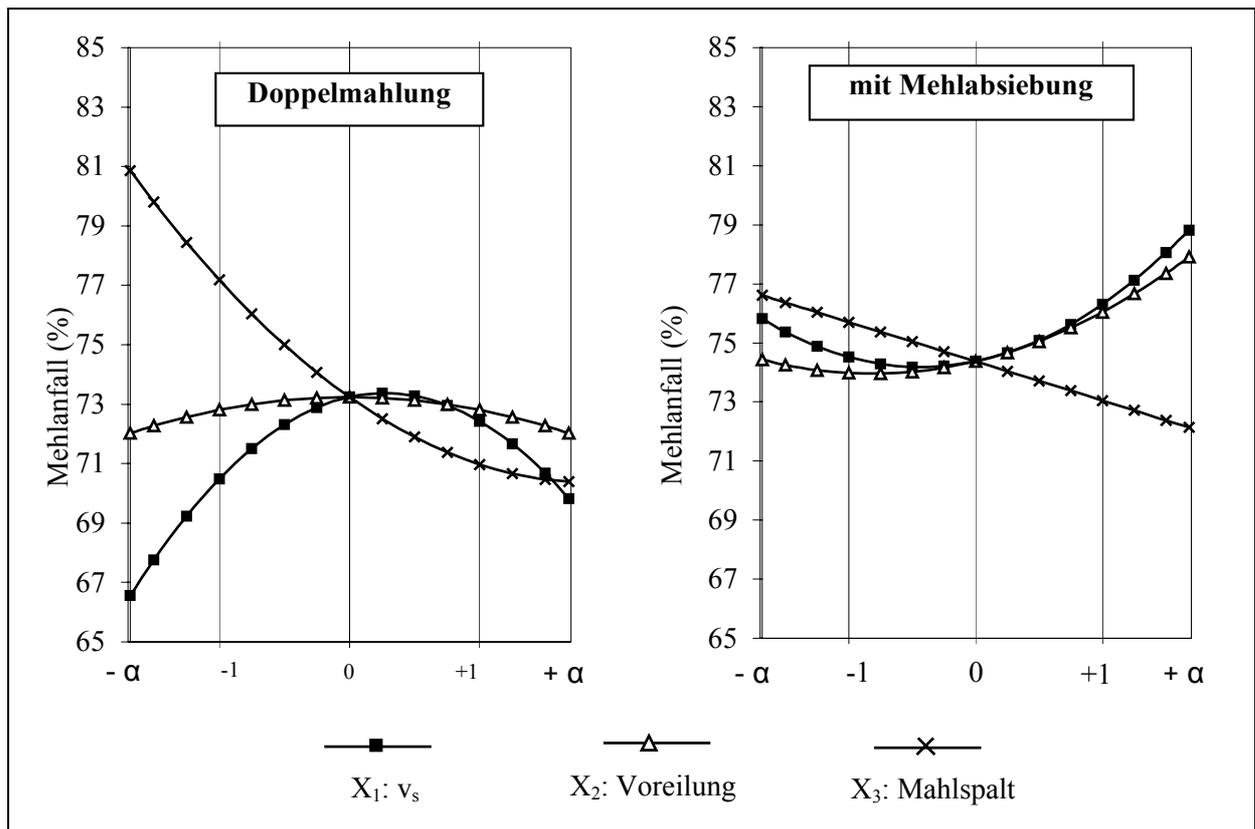
halt. Die Fraktionen  $>160 \mu\text{m}$  der Vermahlung mit vorheriger MehlabSiebung besaßen eine höheren Mineralstoffgehalt. Sie waren weiter ausgemahlen und enthielten weniger Mehlkörperreste als die Fraktionen der Doppelmahlung.

**Tabelle 36:** Ausgewählte Antwortgrößen der Versuchspläne zur 2. Roggengrießmahlung

Roggengrieß	mit MehlabSiebung			Doppelmahlung		
	$\bar{x}$	Min	Max	$\bar{x}$	Min	Max
<b>Massenanteile in %</b>						
Mehl $<160\mu\text{m}$	75,4	70,5	79,6	73,7	69,3	82,2
Dunst 160...250 $\mu\text{m}$	18,0	14,8	21,4	19,1	13,1	22,5
$>250\mu\text{m}$	6,7	5,7	8,2	7,1	4,8	8,7
<b>Mineralstoffgehalte (%i.Tr.)</b>						
Mehl $<160\mu\text{m}$	1,08	1,06	1,11	1,06	1,00	1,14
Dunst 160...250 $\mu\text{m}$	2,00	1,76	2,23	1,60	1,48	1,88
$>250\mu\text{m}$	4,24	3,78	4,54	3,59	3,28	4,15
<b>Zusammengesetzte Größen</b>						
$P_Z$ (kW)	0,68	0,63	0,84	0,76	0,64	1,14
$W_{Zm}$ (kJ/kg)	33,0	30,6	40,9	36,8	31,0	55,5
$W_{ZA0}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	1,22	1,11	1,44	1,39	1,16	2,09
ZG $D_m/d_m$	2,36	2,21	2,49	2,31	2,18	2,59
$AWZ_{\text{Mehl}}$	1440	1391	1511	1435	1334	1527

#### 4.3.3.2 Einfluss der Variablen auf den Mehlanfall und -mineralstoffgehalt

Die Änderung des Mehlanfalls und des Mineralstoffgehalts in Abhängigkeit von einer Variablen wurde für den Mittelpunkt des Versuchsraums dargestellt. Die größten Änderungen im Mehlanfall (Abb.35) wurden durch Variation der Einstellungen des Mahlspalts verursacht. Mit zunehmendem Mahlspalt verringerte sich wie auch der Zerkleinerungsgrad der Mehlanfall. Auf die Mehlausbeute der Doppelmahlung besaß der Mahlspalt einen größeren Einfluss als bei der Vermahlung mit MehlabSiebung, die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Mehlanfall betrug 10,5% im Vergleich zu 4,5%. Höhere Voreilungen und Umfangsgeschwindigkeiten der schnellen Walze begünstigten die Mehlausbeute der Roggengrieß-Vermahlung mit MehlabSiebung. Dabei traten in den Verläufen der Mehlanfälle Minima bei den Einstellungen der Stufe  $-0,5$  und  $-0,75$  auf. Im dargestellten Mittelpunkt des Versuchsraums blieb die Voreilung für die Mehlausbeute der Doppelmahlung ohne großen Einfluss, während für die Einstellung der Walzenumfangsgeschwindigkeit ein ausgeprägtes Maximum bei Stufe  $+0,25$  existierte. Abnehmende Geschwindigkeiten der schnellen Walze unter  $12,5 \text{ m/s}$  führten zur Verringerung des Mehlanfalls um bis zu 7%.



**Abb. 35:** Einfluss der Variablen auf den Mehlanfall der 2. Roggengrießmahlung

Auch auf den Mineralstoffgehalt der Grießmehle (Abb.36) besaß der Mahlspalt den größten Einfluss. Der Mahlspaltverringern folgte eine intensivere Zerkleinerung auch der mineralstoffreicheren Schaleteilchen der Roggengrieße, die Mehle beider Mahlungsvarianten wiesen eine Erhöhung des Mineralstoffgehaltes um bis zu 0,1% i.Tr. auf. Bei der Vermahlung mit Mehlabseibung führten abnehmende Voreilungen und Geschwindigkeiten der schnellen Walze ebenfalls zu einem Anstieg des Mineralstoffgehaltes. Ein Maximum des Mineralstoffgehaltes im Mehl der Doppelmahlung trat bei der Einstellung der Voreilung im Nullpunkt auf, die ebenfalls bei dieser Stufe aufgetretenen Maxima der oberflächenbezogenen Zerkleinerungsarbeit und des Mehlanfall zeigen eine besonders intensive Schalezerkleinerung bei einer Voreilung von 4,5 an. Von der Umfangsgeschwindigkeit der schnellen Walze wurde der Mineralstoffgehalt des Roggenmehls aus der Doppelmahlung nicht beeinflusst.

Bei der 2. Roggengrießmahlung erwiesen sich für die Gewinnung einer möglichst hohen Mehlausbeute mit niedrigem Mineralstoffgehalt hohe Zerkleinerungsgrade durch höhere Umfangsgeschwindigkeiten und Voreilungen der schnellen Walze als günstig. Engen Mahlspalten standen hohe Mineralstoffgehalte der Roggenmehle gegenüber, mit Hilfe der Mehrfachoptimierung wurde der beste Kompromiss für die Mahlspalteinstellung der Roggengrießmahlung mit und ohne Mehlabseibung ermittelt.

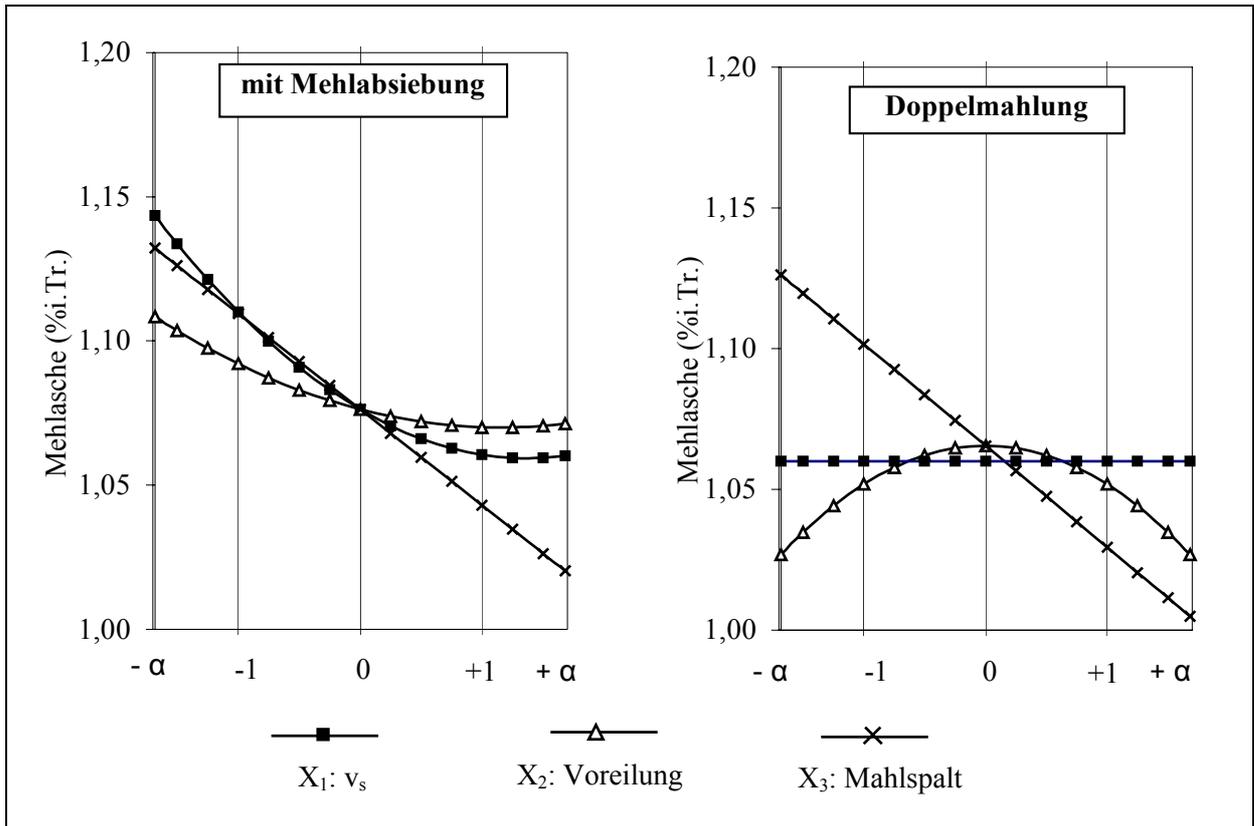


Abb. 36: Einfluss der Variablen auf den Mineralstoffgehalt der Roggenmehle der 2. Gießmahlung

#### 4.3.3.3 Optimierungsergebnisse

Die Mehrfachoptimierung beinhaltete die Ermittlung des jeweiligen Maximums der Wunschfunktionen aus den 2. Roggengießmahlungen mit und ohne MehlabSiebung. Die dimensionslose Wunschfunktion bestand aus den Funktionen zur Maximierung des Mehlanfalls und zur Minimierung des Mehlmehlaschegehalts in gleicher Wichtigkeit. Das Optimierungsergebnis für die Gießmahlung mit MehlabSiebung war mit einem maximalen Wert der Wunschfunktion von 0,68 noch als gut zu bezeichnen, während das Ergebnis für die Doppelmahlung mit 0,54 nicht zufrieden stellen konnte (Abb.37).

Die optimalen Einstellungen sowie die theoretisch möglichen und tatsächlich erreichten Mahlergebnisse enthält Tabelle 37. Charakteristisch für beide Vermahlungsvarianten war eine Verbesserung der Optimierungsergebnisse mit Zunahme der Umfangsgeschwindigkeit der schnellen Walze. Der lineare Verlauf deutete auf eine erfolgreichere Vermahlung bei Geschwindigkeiten hin, die über den Versuchsraum hinausgehen.

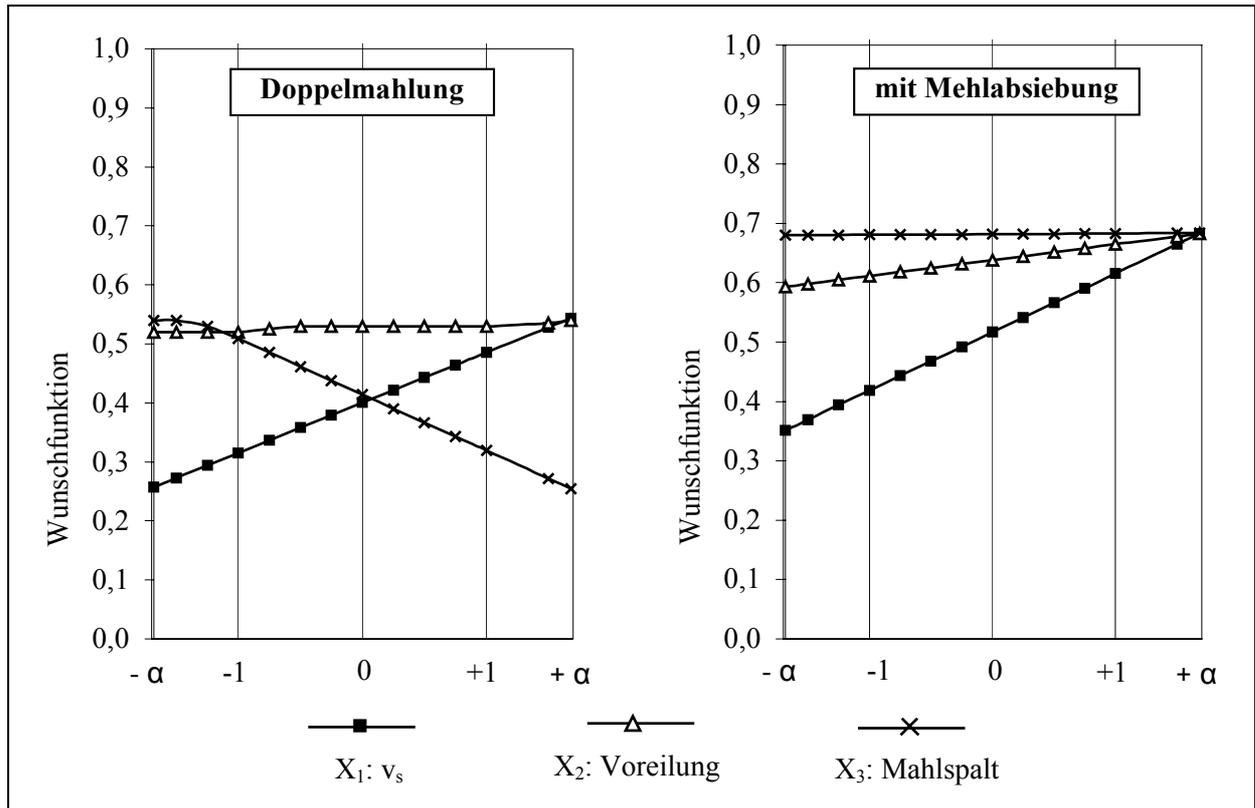


Abb. 37: Einfluss der Variablen auf die Wunschfunktion am Optimum der 2. Roggengrießmahlung

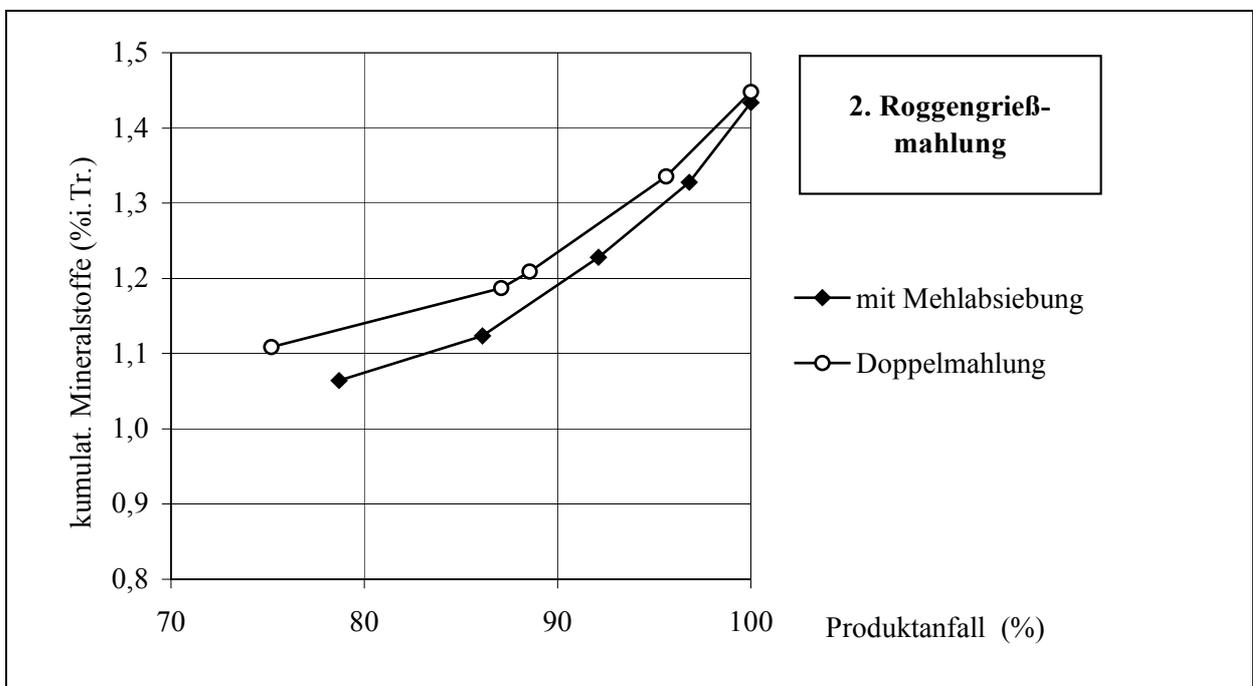
Tabelle 37: Ausgewählte Ergebnisse der Optimierung zur 2. Roggengrießmahlung

Variablen	2. Roggengrieß mit Mehlababsiebung		2. Roggengrieß Doppelmahlung	
	berechnet	erreicht	berechnet	erreicht
$X_1: v_s$ (m/s)	15,5		15,5	
$X_2: i$	7		7	
$X_3: a$ (mm)	0,1		0,05	
<b>Massenanteile in %</b>				
Mehl <160 $\mu\text{m}$	79,7	78,7	74,4	75,2
Dunst 160...250 $\mu\text{m}$	14,9	13,5	14,2	13,4
>250 $\mu\text{m}$	6,2	7,8	8,1	11,4
<b>Mineralstoffgehalte (%i.Tr.)</b>				
Mehl <160 $\mu\text{m}$	1,03	1,06	1,04	1,11
Dunst 160...250 $\mu\text{m}$	2,18	2,18	1,70	1,77
>250 $\mu\text{m}$	4,26	4,21	3,93	3,79
<b>Zusammengesetzte Größen</b>				
$P_Z$ (kW)	0,71	0,70	1,08	1,06
$W_{Zm}$ (kJ/kg)	34,4	33,9	52,6	51,6
$W_{ZA0}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	1,23	1,22	1,73	1,92
ZG $D_m/d_m$	2,47	2,36	2,54	2,26
AWZ <sub>Mehl</sub>	1292	1353	1401	1475

Die in den Versuchen verwendete maximale Umfangsgeschwindigkeit der schnellen Walze von 15,5 m/s übertraf schon praxisübliche Einstellungen. Noch höhere Werte liegen über einem realisierbaren Bereich. Auch die optimalen Voreilungen von 7 überstiegen die für Roggenmahlungen üblichen Einstellungen von maximal 3,5 [63]. Für die Vermahlung des schalehaltigen Roggengrießes war eine maximale Steigerung des Scherkraftanteils durch die Zunahme der Walzengeschwindigkeit und –voreilung günstig, um einen hohen Mehlannteil zu erreichen.

#### 4.3.3.4 Diskussion: Vergleich der konventionellen zweistufigen Vermahlung mit der Doppelmahlung von Roggengrieß

Bei der Doppelmahlung fing das im Aufgabegut enthaltene Mehl einen Teil der Zerkleinerungskräfte auf und behinderte die Zerkleinerung noch vorhandener größerer Teilchen. Eine mit der Variante mit MehlabSiebung vergleichbare Mehlausbeute war nur durch die Erhöhung der Zerkleinerungsintensität bei engerem Mahlpalt zu erreichen. Dabei stieg der benötigte Arbeits- und Leistungsaufwand der Doppelmahlung und das Mehl wurde durch einen höheren Anteil an zerkleinerter Schale mineralstoffreicher. Im Gegensatz zum Aufschrotten bewirkte die Doppelmahlung für die Vermahlung der Roggengrieße eine Verschlechterung des Mahlergebnisses (Abb.38).



**Abb. 38:** Mahlversuche im Walzenstuhl: Produkthanfall-Asche-Kurven der 2.Roggengrieß-mahlung mit und ohne MehlabSiebung nach dem 1.Grieß

Eine zweistufige Vermahlung mit Zwischenabsiebung der Mehlfraktion erwies sich als günstigere Variante. Nach der Doppelmahlung wurde dunkleres Roggenmehl in niedrigerer Ausbeute als bei der Vermahlung mit Mehlab-siebung erhalten. Der hohe Feinanteil verminderte die Wirkung der Zerkleinerungskräfte und führte zu einer uneffektiveren Zerkleinerung. Die oberflächenbezogene Zerkleinerungsarbeit lag über dem Wert der Vermahlung mit Mehlab-siebung. Zur Überprüfung dieser Ergebnisse wurde der Grieß aus der Doppelmahlung von Roggen aus dem Anbau konventioneller und reduzierter Intensität zweistufig mit und ohne Zwischenabsiebung des Mehls unter optimierten Einstellungen im Walzenstuhl zerkleinert.

#### **4.3.4 Anwendung der optimierten Verfahrensvarianten auf die Grießmahlung von Roggen und Triticale unterschiedlicher Anbauintensität**

Aufgrund der Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung zwischen den verwendeten Roggen- und Triticalegrießen für die Ermittlung optimaler Zerkleinerungsparameter und den Grießen aus der Doppelmahlung der Getreide wurden zur Sicherung der bisherigen Ergebnisse auch die Grieße nach dem II. Schrot von Roggen und Triticale aus dem Anbau konventioneller und reduzierter Intensität im Walzenstuhl mit optimierten Einstellungen und in der Stiftmühle mit höchster Zerkleinerungsintensität vermahlen. Für die 1.Grießmahlung standen nach dem II. Schrot aus der Roggendoppelmahlung die Fraktionen 160-400 µm mit einem Anteil von 29,2% (konventioneller Anbau) bzw. 14,5% (reduzierter Anbau) zur Verfügung. Die Mineralstoffgehalte der Roggengrieße aus dem Anbau konventioneller und reduzierter Intensität lagen mit 0,97 und 0,93%i.Tr. nahe beieinander. Das Aufschroten von Triticale konventioneller Anbauintensität lieferte 21,8% Grieß der Korngröße 250-355 µm, der Grießanfall bei Triticale des reduzierten Anbaus betrug 17,0%. Unabhängig von der Anbauintensität wiesen die Triticalegrieße einen Mineralstoffgehalt von 0,82%i.Tr. auf. Die Ergebnisse bestätigten, dass bei der Vermahlung in der Stiftmühle die Roggengrieße intensiver zerkleinert werden, die Zerkleinerungsgrade in den Mahlprodukten sowie die Mehlanfälle lagen über den Ergebnisses im Walzenstuhl (Tab.38). Wie auch in den Schrotpassagen, fiel der Grieß aus Roggen reduzierter Anbauintensität durch ungünstigere Mahleigenschaften besonders bei der Walzenstuhlzerkleinerung im Vergleich zum konventionellen Roggengrieß auf. Der Mehlanfall nach der Grießvermahlung im Walzenstuhl war mit 76% um 7% niedriger, in der Stiftmühle mit 85% noch um 3% niedriger als beim konventionellen Roggengrieß. Zudem wiesen die Grießmehle des Roggens reduzierter Anbauintensität höhere Mineralstoffgehalte auf, obwohl der vermahlene Grieß mineralstoffärmer als der konventionelle Grieß war.

**Tabelle 38:** Ergebnisse der 1. Roggengrießmahlung

Roggengrieß	Walzenstuhl		Stiftmühle	
	konventionell	reduziert	konventionell	reduziert
<b>Anbauintensität</b>				
Mahlprodukte bez. I.				
Aufgabegut	160-400µm		160-400µm	
Anteil (%)	29,2	14,5	29,2	14,5
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,97	0,93	0,97	0,93
Mehl	<160µm		<160µm	
Anteil (%)	24,2	11,0	25,6	12,3
Auflösung (%)	82,9	75,9	87,7	84,8
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,73	0,87	0,83	0,92
Zwischenprodukte	160-250µm		160-250µm	
Anteil (%)	4,0	2,7	3,0	1,9
Mineralstoffe (%i.Tr.)	1,50	1,28	1,50	1,55
Übergang	>250µm		>250µm	
Anteil (%)	1,0	0,8	0,5	0,3
Mineralstoffe (%i.Tr.)	2,50	2,28	2,41	2,67
<b>Zerkleinerung</b>				
P <sub>z</sub> (kW)	0,63	0,38	0,14	0,13
W <sub>Zm</sub> bez.I. (kJ/kg)	8,9	2,7	4,7	1,9
W <sub>ZA0</sub> bez. I (kJ/m <sup>2</sup> )	9,41	4,35	9,90	4,78
ZG Dm/dm	2,80	2,58	3,03	2,94

Im Vergleich zu Roggengrieß zeichnete sich der Triticalegrieß wiederum durch ein besseres Auflösungsvermögen bei der Walzenstuhlzerkleinerung aus (Tab.39). Bei der Vermahlung der Triticalegrieße wurden im Walzenstuhl mit 89% etwas höhere Mehlausbeuten erreicht als in der Stiftmühle mit 87%. Die Zerkleinerungsgrade in den Mahlprodukten des Walzenstuhls waren gegenüber der Stiftmühle geringfügig erhöht. Bedingt durch eine selektivere Zerkleinerung, enthielten auch hier die Walzenstuhlmehle einen geringeren Anteil zerkleinerter Schaleilchen. Die Mineralstoffgehalte der Mehle lagen unter denen der vergleichbaren Prallmehle. Die Vermahlung der Grieße von Roggen und Triticale unterschiedlicher Anbauintensität mit unterschiedlichen Zerkleinerungsprinzipien bestätigte die Resultate bisheriger Untersuchungen, dass die Walzenstuhlvermahlung zur Gewinnung von Mehlen für die chemische Modifizierung geeigneter ist als die Prallbeanspruchung.

**Tabelle 39:** Ergebnisse der 1. Triticalegrießmahlung

Triticalegrieß	Walzenstuhl		Stiftmühle	
	konventionell	reduziert	konventionell	reduziert
<b>Anbauintensität</b>				
Mahlprodukte bez. I.	250-355µm		250-355µm	
Aufgabegut				
Anteil (%)	21,8	17,0	21,8	17,0
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,82	0,82	0,82	0,82
Mehl	<180µm		<180µm	
Anteil (%)	19,5	15,2	19,0	14,8
Auflösung (%)	89,4	89,4	87,2	87,1
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,66	0,63	0,80	0,77
Zwischenprodukte	180-250µm		180-250µm	
Anteil (%)	1,6	1,3	1,9	1,7
Mineralstoffe (%i.Tr.)	2,12	2,21	1,06	1,46
Übergang	>250µm		>250µm	
Anteil (%)	0,7	0,6	0,9	0,4
Mineralstoffe (%i.Tr.)	2,91	3,17	2,29	3,12
<b>Zerkleinerung</b>				
P <sub>z</sub> (kW)	0,34	0,28	0,18	0,18
W <sub>Zm</sub> bez.I. (kJ/kg)	5,4	3,4	4,1	3,1
W <sub>ZA0</sub> bez. I (kJ/m <sup>2</sup> )	6,58	5,15	6,46	5,07
ZG Dm/dm	2,96	2,95	2,89	2,90

Im Gegensatz zum Roggengrieß erwies sich aufgrund des geringen Anteils und des hohen Aschegehalts eine weitere Mahlung der Triticalegrieße als nicht notwendig. Die Resultate der 2. Roggengrießmahlung bestätigten für die Roggengrieße beider Anbauintensitäten die Schlussfolgerung aus bisherigen Versuchen, dass die Variante der Walzenstuhlzerkleinerung mit dazwischengeschalteter MehlabSiebung für die Mehlgewinnung geeigneter ist (Tab.40). Die Mehlanfälle lagen über den Ergebnissen der Doppelmahlung bei vergleichbarem oder, im Falle des konventionellen Roggengrießes, niedrigerem Mineralstoffgehalt des Mehls. Bei der Doppelmahlung behinderte der hohe Mehanteil im Aufgabegut den Angriff der Zerkleinerungskräfte auf noch vorhandene Grießteilchen und führte zur Verringerung der Grießauflösungsgrade um ca. 5%. Die in ähnlicher Höhe wie bei der Variante mit MehlabSiebung aufgewendete massebezogene Zerkleinerungsarbeit wurde weniger erfolgreich in die Reduzierung der Teilchengröße umgesetzt, die Zerkleinerungsgrade und Oberflächenzunahmen waren niedriger und die oberflächenbezogene Zerkleinerungsarbeit nahm zu. Die kleineren Roggenkörner aus der reduzierten Anbauintensität mit erhöhtem Schale- und verringertem Mehlkörperanteil führten im Vergleich zum konventionell angebauten Roggen in den Aufschrotvarianten zu einem niedrigeren Grießanfall. Bei der Vermahlung erbrachte dieser Roggengrieß auch ein ungünstigeres Zerkleinerungsergebnis. Es wurden geringere Auflösungsgrade und niedrigere Mehlanfälle erreicht als mit konventionellem Roggengrieß,

niedrigere Mehlanfälle erreicht als mit konventionellem Roggengrieß, zudem waren die Grießmehle mineralstoffreicher.

**Tabelle 40:** Ergebnisse nach der 2. Grießmahlung Roggen unterschiedlicher Anbauintensität

Walzenstuhl	Doppelmahlung		mit MehlabSiebung	
	konventionell	reduziert	konventionell	reduziert
Mahlprodukte bez. I.				
Aufgabegut	160-400µm		160-400µm	
Anteil (%)	29,2	14,5	5,0	3,5
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,97	0,93	1,61	1,51
Mehl 1.+2.Gr.	<160µm		<160µm	
Anteil (%)	26,3	12,4	27,6	13,1
Auflösung (%)	90,2	85,4	94,6	90,4
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,80	0,86	0,76	0,87
Zwischenprodukte	160-250µm		160-250µm	
Anteil (%)	2,2	1,7	1,3	1,2
Mineralstoffe (%i.Tr.)	1,74	1,57	1,92	1,47
Übergang	>250µm		>250µm	
Anteil (%)	0,6	0,4	0,3	0,2
Mineralstoffe (%i.Tr.)	2,87	2,67	3,55	2,82
Zerkleinerung				
P <sub>z</sub> (kW)	0,80	0,51	0,78	0,53
W <sub>Zm</sub> bez.I. (kJ/kg)	11,3	3,6	10,0	3,4
W <sub>ZA0</sub> bez. I (kJ/m <sup>2</sup> )	1,12	0,75	0,96	0,68
ZG Dm/dm	3,09	2,94	3,33	3,23

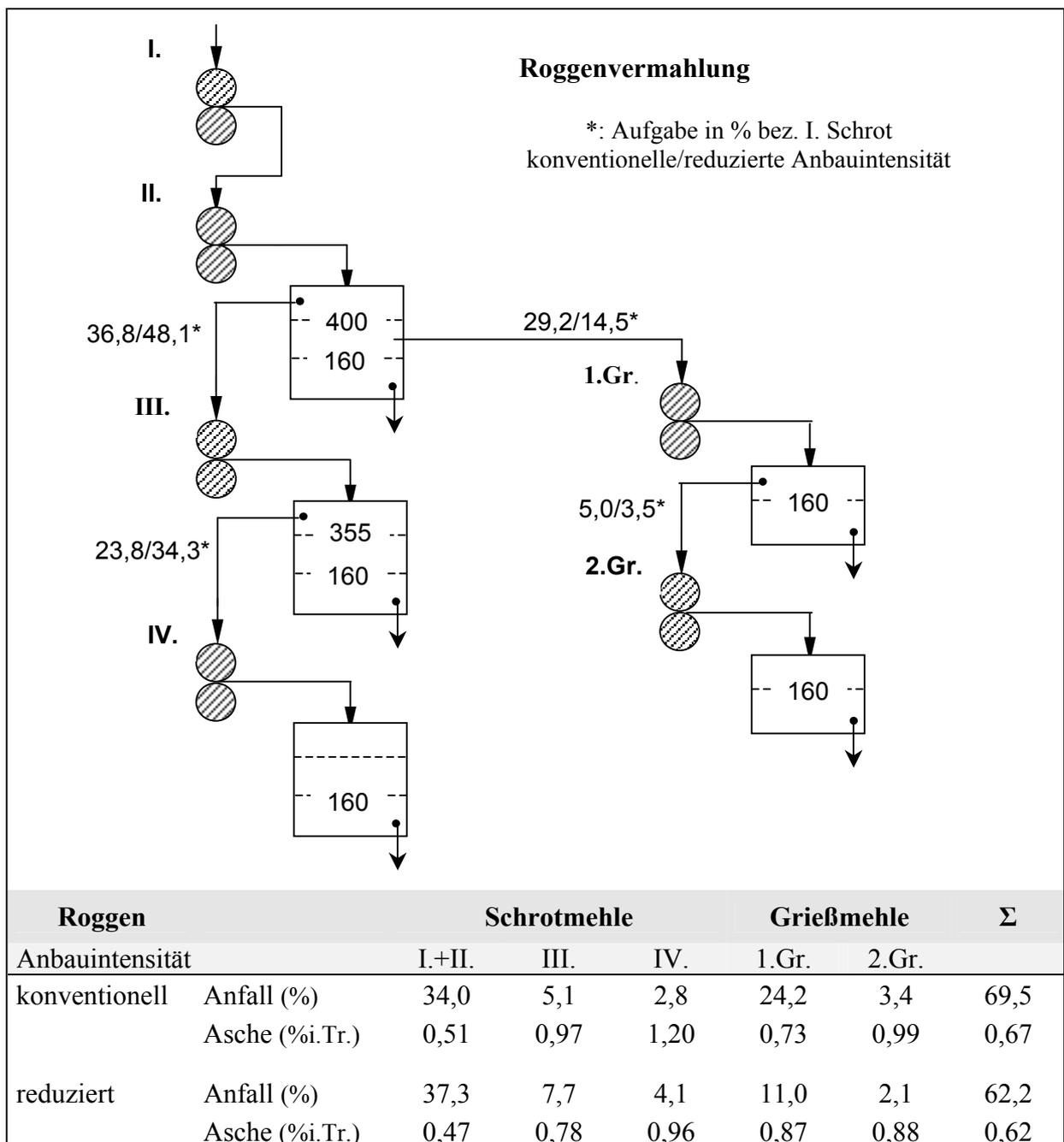
\*Umfangsgeschwindigkeit schnelle Walze

#### 4.4 Diagrammvorschläge zur Vermahlung von Roggen und Triticale unterschiedlicher Anbauintensität

##### 4.4.1 Vermahlungsabläufe und Bilanzen

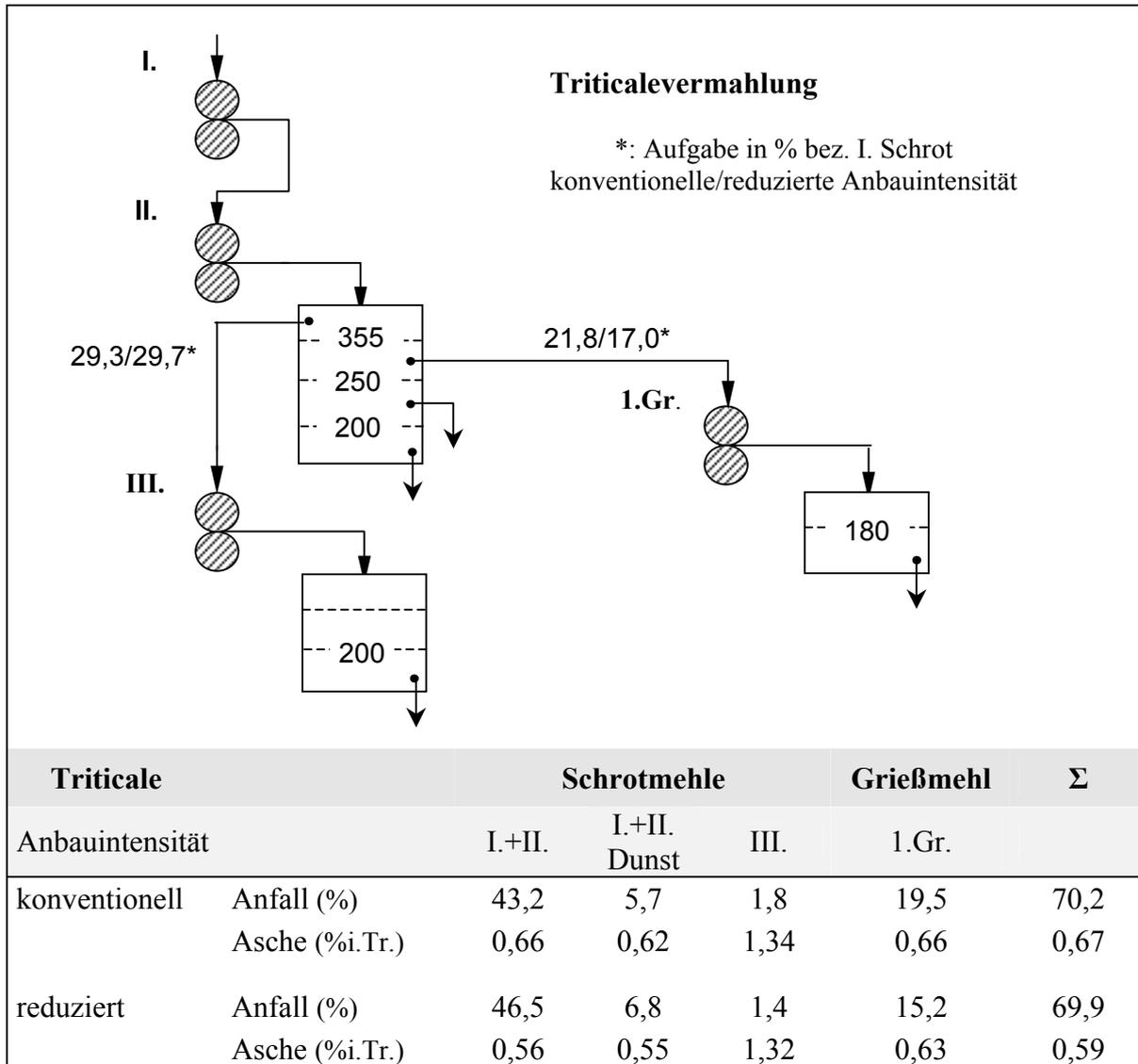
Die Aufgabe der Vermahlung von Roggen und Triticale, eine maximale Ausbeute an mineralstoffarmem Mehl zu erzielen, sollte innerhalb eines möglichst kurzen Diagramms erreicht werden. Ausgehend von den Mahlergebnissen aus den unter optimierten Zerkleinerungsbedingungen vorgenommenen Vermahlungen der Getreide unterschiedlicher Anbauintensität wurde für Roggen (Abb.39) und für Triticale (Abb.40) dazu jeweils ein Vermahlungsablauf der Walzenstuhlzerkleinerung entwickelt. Die Prallvermahlung erwies sich in dieser Untersuchung als weniger geeignetes Zerkleinerungsprinzip. Die Mahlergebnisse und Mehlqualitäten lagen unter denen der Walzenstuhlvermahlungen.

Für die Vermahlung des Roggens wurden vier Schrotpassagen und zwei Grießmahlungen vorgeschlagen. Der I. und II. Schrot sind als Doppelmahlung ohne Zwischenabsiebung des Feingutes geführt, während bei der zweistufigen Grießmahlung die Absiebung des Mehlan- teils nach dem 1. Grieß notwendig war. Die Vermahlung des konventionell angebauten Rog- gens erbrachte damit ca. 70% Mehlausbeute mit 0,67%i.Tr. Mehlasche. Die mangelnde Korn- ausbildung mit niedrigerem Mehlkörperanteil des Roggens aus der reduzierten Anbauintensi- tät verhinderte eine ähnlich hohe Mehlausbeute. Es wurden nur 62% erreicht. Der Mineral- stoffgehalt des Roggenmehls war dabei niedriger und betrug 0,62%i.Tr..



**Abb. 39:** Vermahlungsablauf für Roggen

Die Vermahlung von Triticale konnte im Vergleich zu Roggen weiter vereinfacht und verkürzt werden. Drei Schrotpassagen, der I. und II. Schrot ebenfalls als Doppelmahlung, sowie eine Grießmahlung waren ausreichend, um eine vergleichbare Mehlausbeute von etwa 70% zu erzielen.

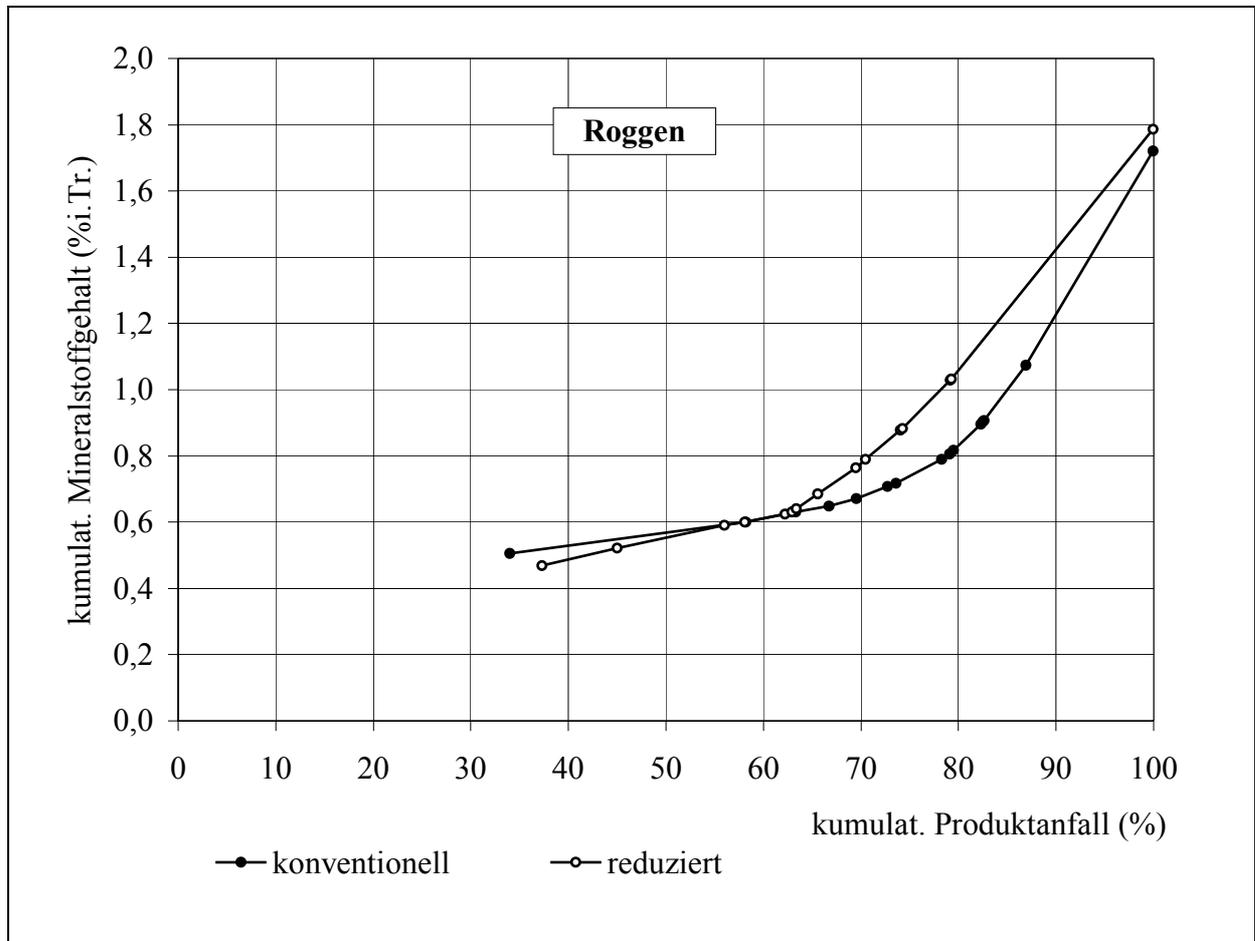


**Abb. 40:** Vermahlungsablauf für Triticale

Die kürzere Vermahlung von Triticale wurde durch deren günstige Mahleigenschaften ermöglicht. Die Trennung der Schaleschichten vom Mehlkörper während der Vermahlung gelang aufgrund der fehlenden roggentypischen Zähigkeit einfacher und vollständiger. Die weiche Kornbeschaffenheit und gute Auflösbarkeit der Grieße führten zu hohen Mehlanfällen in vorderen Zerkleinerungsstufen. Im Gegensatz zu Roggen konnten die Triticalemehle gröber abgeseibt werden. Auch wiesen die Triticalemehle und Dunste nach dem II. Schrot vergleichbare Mineralstoffgehalte auf und wurden zusammengefasst. Ebenso wie bei Roggen, wies das Mehl aus der Vermahlung konventionell angebauter Triticale einen Mineralstoffgehalt von

0,67%i.Tr. auf, während das Triticalemehl aus Getreide reduzierter Anbauintensität mit 0,59%i.Tr. mineralstoffärmer war.

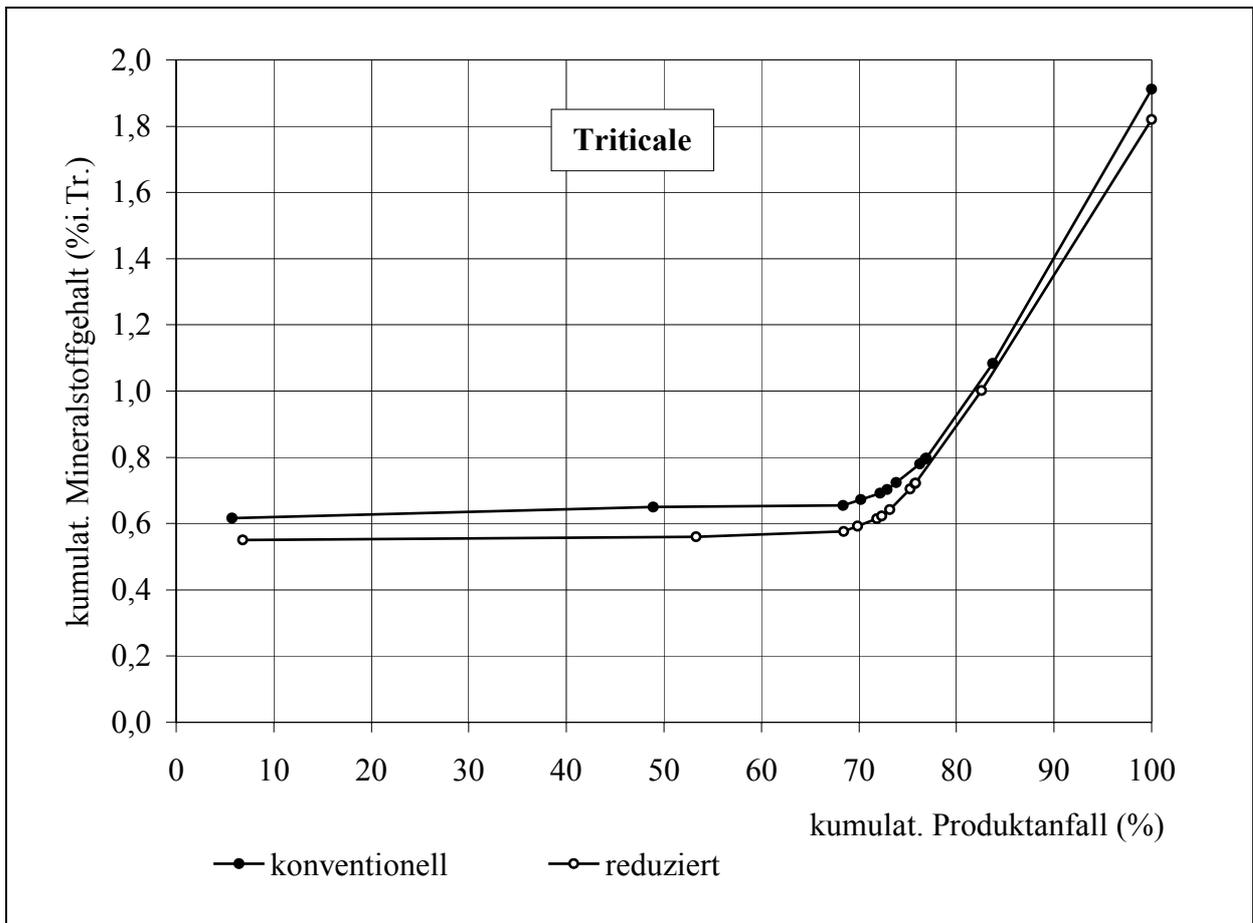
Die Produkthanfall-Asche-Kurven für Roggen (Abb.41) und Triticale (Abb.42) unterschiedlicher Anbauintensität zeigen für die Getreide aus dem Anbau reduzierter Intensität einen günstigeren Verlauf im Bereich niedriger bis mittlerer Ausmahlung.



**Abb. 41:** Produkthanfall-Asche-Kurven der Vermahlung von Roggen aus konventioneller und reduzierter Anbauintensität

Bei der Beanspruchung durch Zerkleinerungskräfte löste sich aufgrund der geringeren Packungsdichte die Stärke-Proteinmatrix im Endosperm leichter auf, es fielen mehr Teilchen in Mehlgröße an. Die weichere Beschaffenheit des Korns aus der reduzierten Anbauintensität führte bei Roggen und Triticale zu höheren Mehlanfällen und niedrigeren Mehlaschen in den ersten Schrotpassagen. Mit der Verschiebung hin zu feineren Mahlprodukten ging eine Reduzierung des Grießanteils und damit des Grießmehlanfalls einher, so dass bei höherer Ausmahlung keine Steigerung der Gesamtmehlausbeute gegenüber dem konventionell angebaute Getreide zu verzeichnen war. Bei Roggen aus dem Anbau reduzierter Intensität wurde die Gesamtmehlausbeute zusätzlich durch die Kleinkörnigkeit und den geringeren Mehlkörperan-

teil im Korn negativ beeinflusst. Bei einer Ausmahlung über ca. 55% nahm der Mineralstoffgehalt in den Mahlprodukten so stark zu, dass die Aschekurve über der aus der Vermahlung des konventionell angebauten Roggens verläuft. Bei Triticale hingegen blieb infolge niedrigerer Mineralstoffgehalte in den Mahlprodukten ein deutlich günstigerer Verlauf der Aschekurve aus der Vermahlung des Getreides reduzierter Anbauintensität bis zu einer Ausmahlung von etwa 75% erhalten.



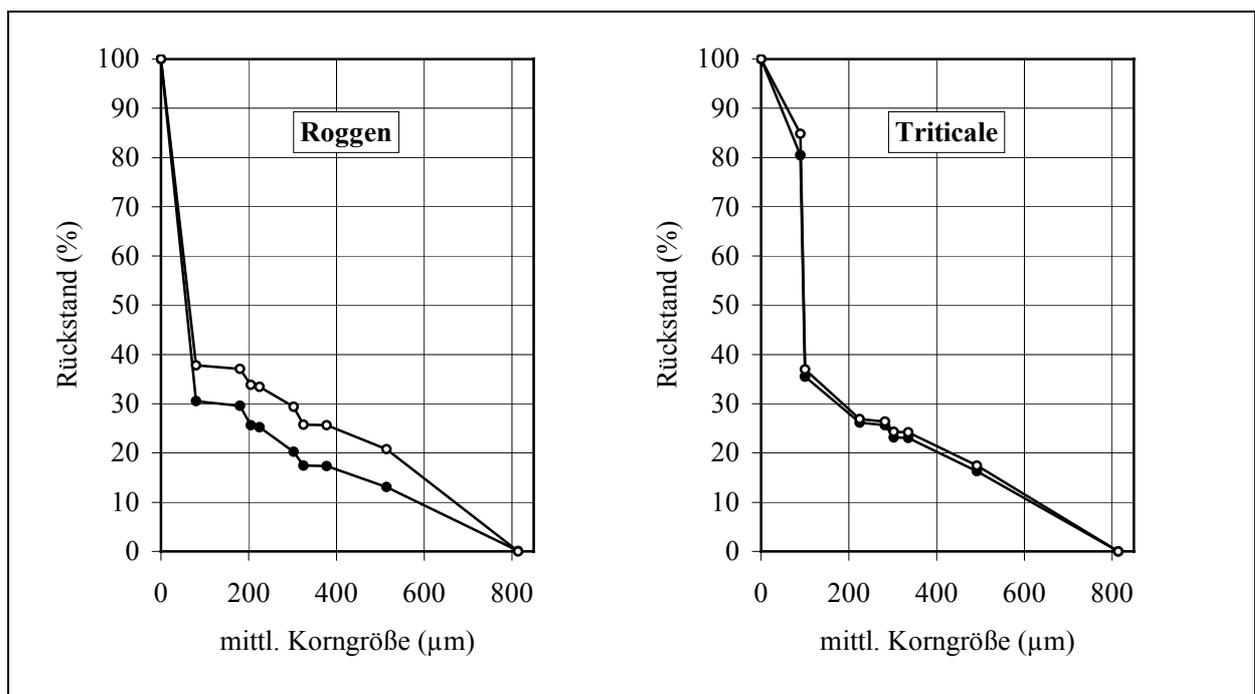
**Abb. 42:** Produkthanfall-Asche-Kurven der Vermahlung von Triticale aus konventioneller und reduzierter Anbauintensität

Die Produkthanfall-Asche-Kurven der Triticalevermahlung sind denen einer Weizenvermahlung ähnlicher als einer Roggenvermahlung. Die Mineralstoffgehalte der ersten Schrotmehle und der Grießmehle liegen auf gleichem Niveau, so dass bis zu einer Mehlausbeute von 68% die Kurven annähernd horizontal verlaufen. Die Mineralstoffgehalte der Mahlprodukte hinterer Zerkleinerungsstufen waren demgegenüber verdoppelt. Der Anstieg der Kurven verläuft wesentlich steiler als bei Roggen.

#### 4.4.2 Zerkleinerungsaufwand der Vermahlung

Einen Überblick über einige den Zerkleinerungsaufwand und -erfolg charakterisierende Ergebnisse bietet Tabelle 41. Die prozentuale Verteilung der massenbezogenen Zerkleinerungsarbeit innerhalb der Vermahlungsstufen ist in Abbildung 44 dargestellt.

Im Vergleich zu Triticale war die Roggenvermahlung um zwei Walzenstuhlpassagen erweitert. Die spezifischen Walzenlängen betragen 10-11 mm·d/dt. Für Triticale wurden nur etwa 8 mm·d/dt berechnet. Die Mehraufwendung an massebezogener Zerkleinerungsarbeit für die Roggenvermahlung führte nicht zu einer intensiveren Zerkleinerung; der Zerkleinerungsgrad im Roggenmahlprodukt nahm gegenüber dem Zerkleinerungsgrad im Triticalemahlprodukt nur wenig zu (bei Roggen des konventionellen Anbaus) oder lag darunter (bei Roggen aus der reduzierten Anbauintensität). Die höhere Oberflächenzunahme bei der Roggenvermahlung wurde durch eine höhere Feinheit der Mehlfraktionen bewirkt (Abb.43).

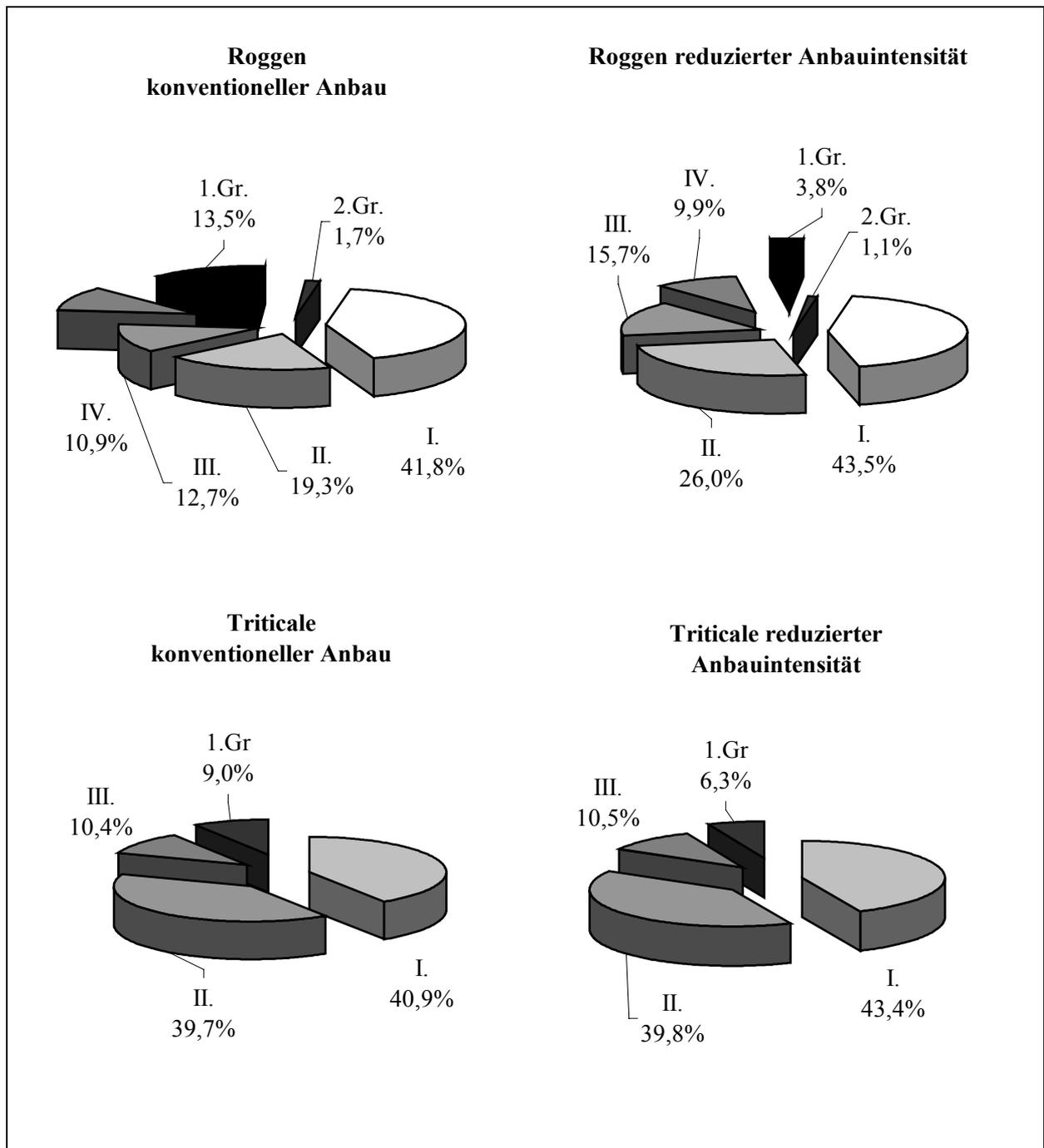


**Abb. 43:** Rückstandssummenverteilung der Mahlprodukte aus der Roggen- und Triticalevermahlung

Bei der Vermahlung des Roggens aus dem Anbau reduzierter Intensität wurde ein höherer Betrag an Zerkleinerungsarbeit als beim konventionellen Roggen aufgewendet. Trotzdem erfolgte eine geringere Zerkleinerung mit niedrigeren Mehl- und Feingutanfällen. Der im Vergleich zum Roggen des konventionellen Anbaus niedrigere Anfall an Zwischenprodukten führte zur Verringerung des Anteils der Zerkleinerungsarbeit aus der Gießvermahlung an der Gesamtbilanz (Abb.44).

**Tabelle 41:** Zerkleinerungsaufwand und -erfolg der Vermahlung von Roggen und Triticale

aus Anbauintensität	Roggen		Triticale	
	konventionell	reduziert	konventionell	reduziert
spez. Walzenlänge (mm·d/dt)	10,8	9,7	8,0	7,7
Zerkleinerungsarbeit				
massebezogen (kJ/kg)	66,0	70,5	59,8	53,7
oberflächenbezogen (kJ/m <sup>2</sup> )	1,68	1,98	1,92	1,76
Oberflächenzunahme (m <sup>2</sup> /kg)	39,3	35,6	31,1	30,4
Zerkleinerungsgrad Dm/dm	15,9	10,7	14,5	13,5

**Abb. 44:** Anteile der Vermahlungsstufen an der aufgewendeten massebezogenen Zerkleinerungsarbeit

Bei Triticale bestanden zwischen den Anbauintensitäten in Hinsicht auf das Mahlverhalten nur geringe Unterschiede. Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität setzten den Zerkleinerungskräften einen geringeren Widerstand entgegen. Die aufgewendete Zerkleinerungsarbeit lag unter der, die für konventionell angebautes Getreide notwendig war. Im Vergleich zu Triticale des konventionellen Anbaus bewirkte die einfachere Auflösung des Endosperms von Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität eine Verlagerung der Zerkleinerung auf vorde-re Vermahlungsstufen.

#### **4.4.3 Inhaltsstoffverteilung in den Mahlprodukten**

Zur Ermittlung der Inhaltsstoffverteilung in den Mahlprodukten nach der Zerkleinerung von Getreide aus dem Anbau konventioneller und reduzierter Intensität wurden die Gehalte an Rohprotein, Stärke und Pentosan in den Endprodukten der Vermahlung bestimmt.

Die Produkthanfall-Protein-Verteilungskurven von Roggen (Abb.45) lassen für das konventionell angebaute Getreide einen annähernd gleichmäßigen Anstieg des Rohproteingehalts bis 13,7%i.Tr. in der letzten Schrotkleie im Zuge der Kornausmahlung von innen nach außen erkennen. Bei der Vermahlung des mit reduzierter Intensität angebauten Roggens fielen prote-inreichere Fraktionen in höheren Anteilen an. Die dunklen Grieße der Korngröße 160...250 µm nach dem III. und IV. Schrot besaßen Proteingehalte über 16%, maximal 17,3%i.Tr..

Am deutlichsten kommt die größere Spannweite der Inhaltsstoffe in den Mahlprodukten des Roggens aus dem Anbau reduzierter Intensität in der Stärke-Verteilung (Abb.46) zum Ausdruck. Obwohl dieser Roggen im Korn einen niedrigeren Stärkegehalt aufwies, war das erste anfallende Schrotmehl mit 87,4%i.Tr. wesentlich stärkereicher als das Mehl aus konventionel-lem Roggen. Auch die Abnahme der Stärkegehalte in den Fraktionen >160µm war stärker ausgeprägt als beim konventionellen Roggen.

Die Pentosanverteilung in den Roggenmahlprodukten (Abb.47) unterschied sich bezüglich ihres Verlaufs nicht zwischen den verschiedenen Anbauintensitäten. Nach dem niedrigsten Wert im ersten Schrotmehl erhöhte sich der Pentosangehalt der nachfolgenden Mehle, bei konventionell angebautem Roggen in stärkerem Maße als beim Roggen der reduzierten Anbauintensität. Nach annähernd gleichen Pentosangehalten in den weiteren Schrot- und Grieß-mehlen nahmen die Pentosananteile in den Fraktionen >160µm stark zu bis auf Höchstwerte von ca. 18,5%i.Tr. in der IV. Schrotkleie des Korngrößenbereichs von 400-630µm.

Zwischen der Verteilung der Inhaltsstoffe in den Mahlprodukten von Triticale waren keine deutlichen Unterschiede in Abhängigkeit von der Anbauintensität anzutreffen. Die Spannweite der Rohproteingehalte (Abb.45) in den Triticale-Mahlprodukten des Getreides aus reduzierter Anbauintensität war größer als beim konventionellen Getreide, wurde aber hauptsächlich durch den höheren Gesamtproteingehalt hervorgerufen. Die Verläufe der Verteilung von Stärke (Abb.46) und Pentosan (Abb.47) in den Mahlprodukten lagen auch aufgrund der vergleichbaren Gesamtmehlanfälle der Triticale aus den verschiedenen Anbauintensitäten dicht beieinander. Die Verringerung der Stärkegehalte sowie die Zunahme der Pentosangehalte war bei Triticale weitaus stärker als bei Roggen ausgeprägt, Ausdruck einer besseren Trennung des Mehlkörpers aus den Schaleschichten.

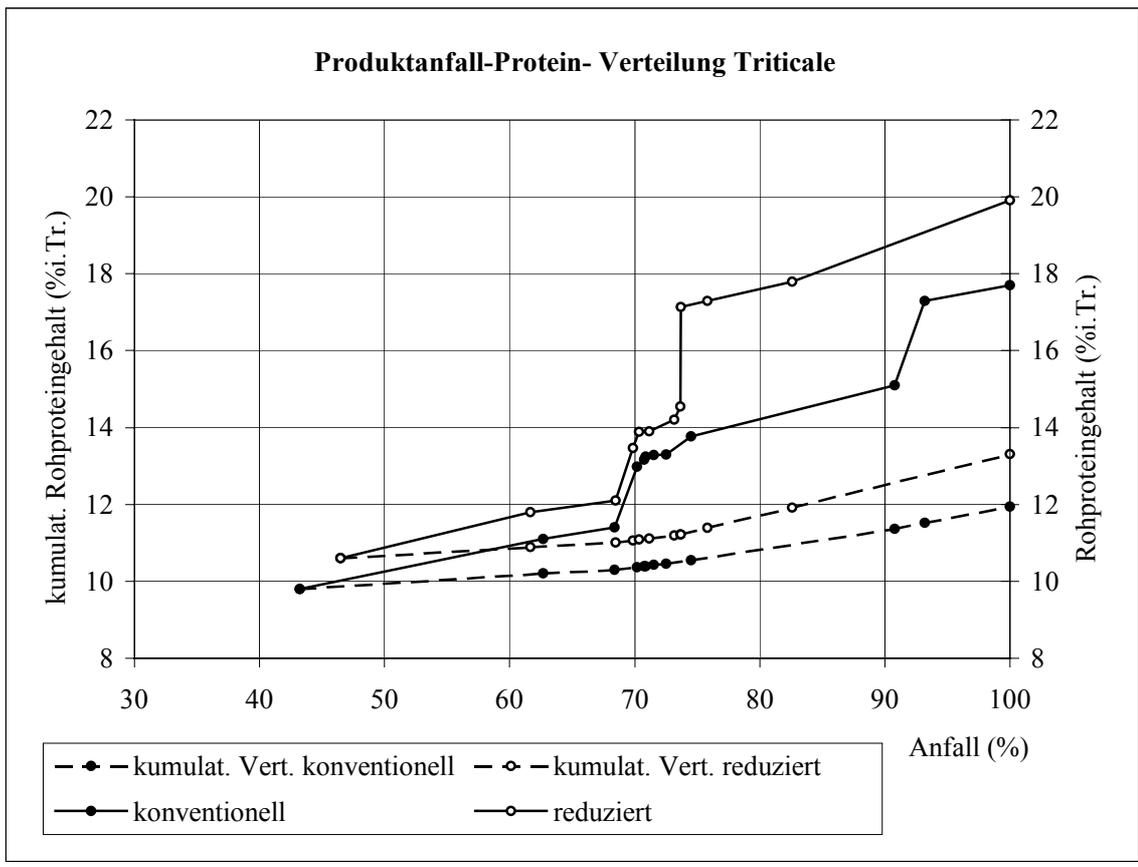
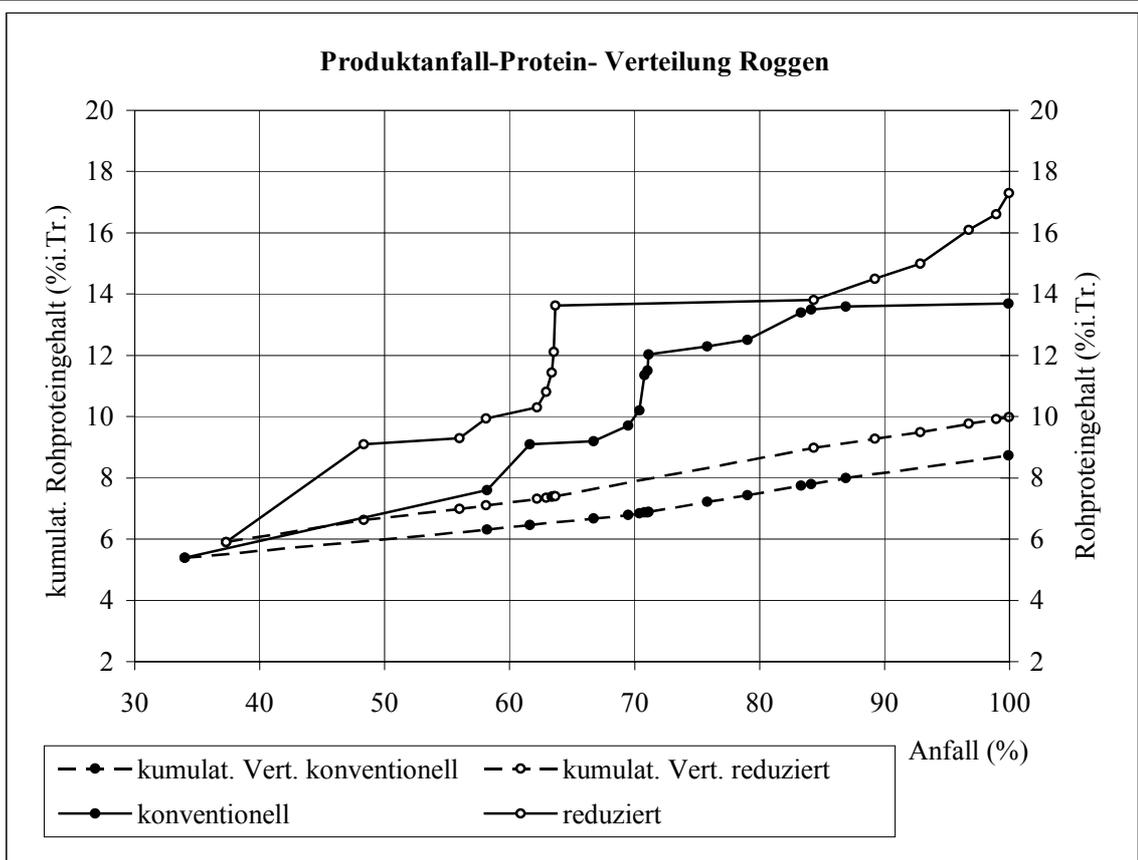


Abb. 45: Verteilung von Rohprotein in den Roggen- und Triticale-Mahlprodukten

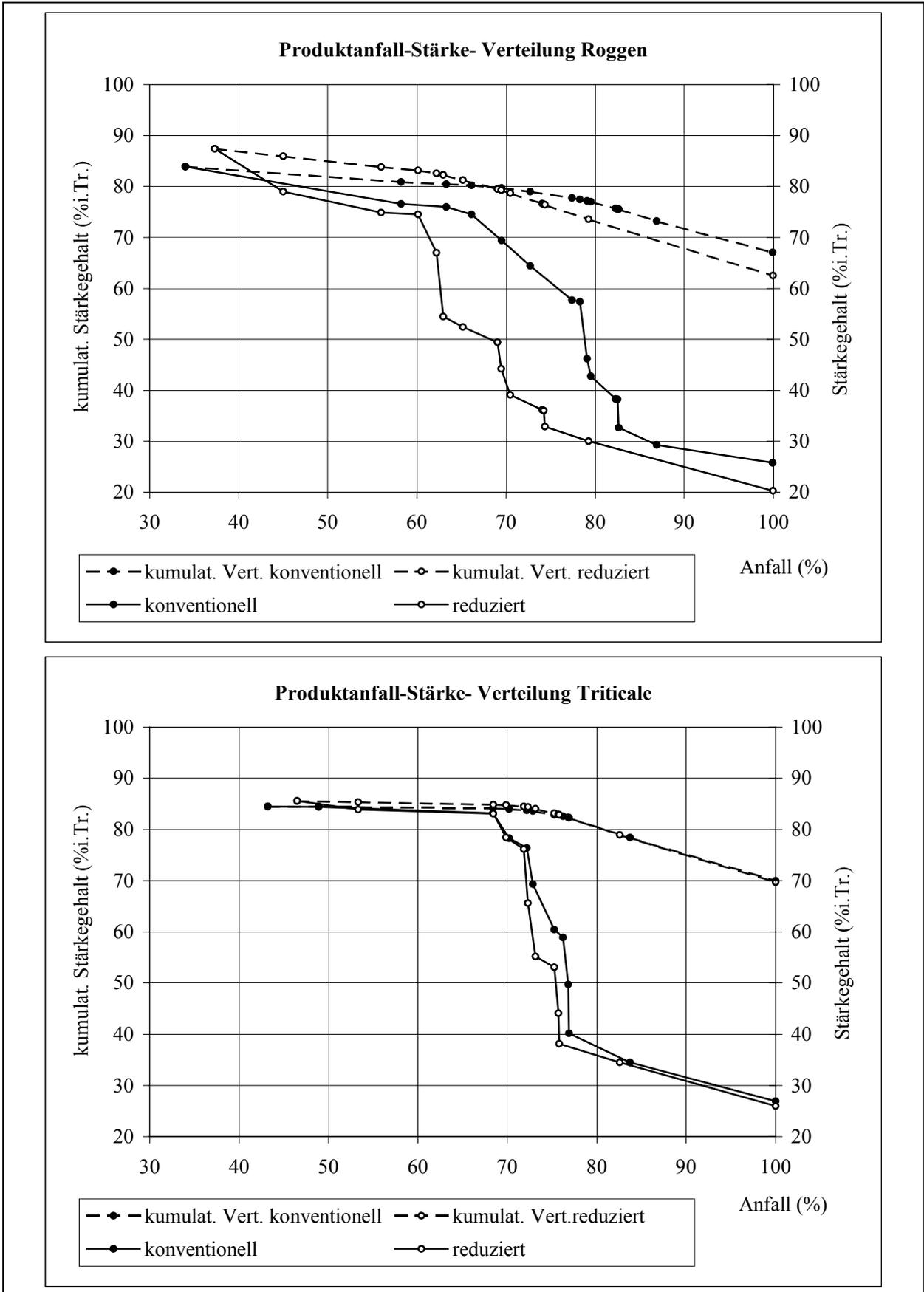


Abb. 46: Verteilung der Stärke in den Roggen- und Triticale-Mahlprodukten

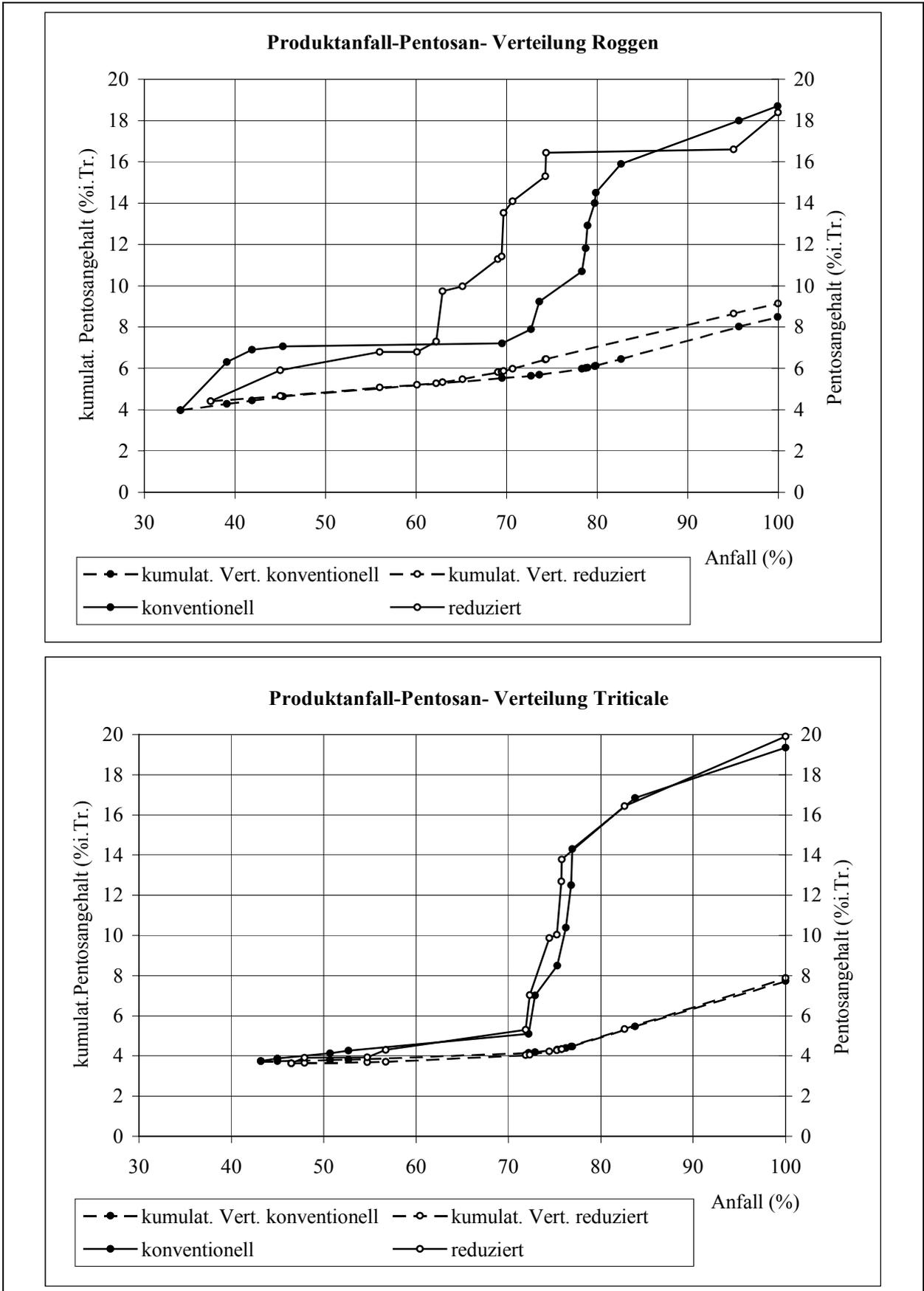


Abb. 47: Verteilung von Pentosan in den Roggen- und Triticale-Mahlprodukten

Einen Vergleich der Anteile an Rohprotein, Stärke und Pentosan im Korn und in den Mehlen zeigt Tabelle 42:

**Tabelle 42:** Inhaltsstoffverteilung nach der Vermahlung

<b>Roggen</b>	Ganzkorn	I./II.	III.	IV.	1.Gr.	2.Gr.
konventionelle Anbauintensität						
Mineralstoffe (%i.Tr.)	1,87	0,51	0,97	1,20	0,73	0,99
Stärke (%i.Tr.)	66,4	83,9	76,0	74,5	76,6	69,4
Rohprotein (%i.Tr.)	9,2	5,4	9,2	9,7	7,6	9,1
Pentosane (%i.Tr.)	8,7	4,0	6,3	6,9	7,2	7,1
reduzierte Anbauintensität						
Mineralstoffe (%i.Tr.)	1,77	0,47	0,78	0,96	0,87	0,88
Stärke (%i.Tr.)	64,6	<u>87,4</u>	79,0	74,5	74,9	67,0
Rohprotein (%i.Tr.)	9,4	5,9	9,3	10,3	9,1	9,9
Pentosane (%i.Tr.)	9,9	4,4	5,9	6,8	6,8	7,3
<b>Triticale</b>	Ganzkorn	I./II.	III.		1.Gr.	
konventionelle Anbauintensität						
Mineralstoffe (%i.Tr.)	1,91	0,66	1,34		0,66	
Stärke (%i.Tr.)	69,7	84,5	78,3		83,2	
Rohprotein (%i.Tr.)	11,8	9,8	13,0		11,1	
Pentosane (%i.Tr.)	7,5	3,8	3,9		5,1	
reduzierte Anbauintensität						
Mineralstoffe (%i.Tr.)	1,86	0,56	1,32		0,63	
Stärke (%i.Tr.)	69,4	<u>85,6</u>	78,5		83,1	
Rohprotein (%i.Tr.)	12,5	10,6	13,5		11,8	
Pentosane (%i.Tr.)	7,9	3,6	3,9		5,3	

Unabhängig von der Anbauintensität des vermahlenden Getreides war das Schrotmehl nach der Doppelmahlung sowohl bei Roggen als auch bei Triticale jeweils am stärkereichsten und enthielt die niedrigsten Rohprotein- und Pentosananteile. Ein Vergleich der Inhaltsstoffe im Korn und im Schrotmehl ergab dabei für Roggen und Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität eine höheres Maß an Stärkeanreicherung als für konventionell angebautes Getreide. Die Verringerung des Proteingehaltes im Triticalemehl fiel für beide Anbauintensitäten gleich aus, während die Abnahme des Rohproteingehaltes im Mehl des Roggens aus reduzierter Anbauintensität gegenüber dem konventionellen Mehl etwas geringer ausgeprägt war. Nach der Doppelmahlung war das Mehl von Triticale der reduzierten Intensität um 1% stärkereicher, aber auch um bis zu 0,8% proteinreicher als das des konventionellen Anbaus. Die um maximal 0,5% proteinreicheren Roggenmehle der Doppelmahlung und des III. Schrottes von Getreide reduzierter Anbauintensität wiesen einen um 3% höheren Stärkegehalt gegenüber

treide reduzierter Anbauintensität wiesen einen um 3% höheren Stärkegehalt gegenüber dem konventionellen Roggen auf.

#### 4.5 Untersuchungen zum Windsichten von Roggen- und Triticalemehl

##### 4.5.1 Sichtversuche zur Bestimmung der Trennschnitte

##### 4.5.1.1 Versuchsmaterial und -ergebnisse

Für die Untersuchungen zum Windsichten ist Roggen- und Triticalemehl mit folgender stofflicher Zusammensetzung verwendet worden (Tab.43):

**Tabelle 43:** Inhaltsstoffe der Mehle für die Versuche zum Windsichten

	<b>Roggenmehl</b> <160 µm	<b>Triticalemehl</b> <200 µm
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,42	0,61
Stärke (%i.Tr.)	84,8	82,4
Rohprotein (%i.Tr.)	5,1	12,2

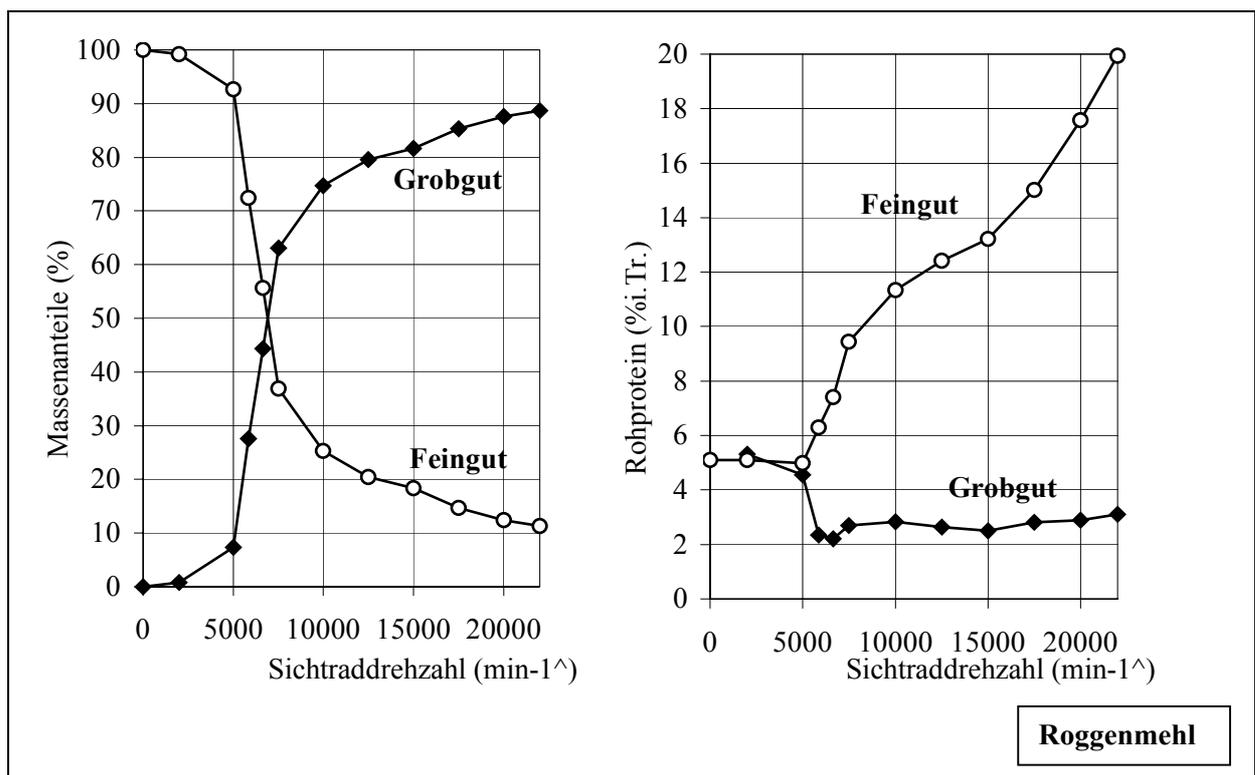
Vor dem Fraktionieren wurden die Mehle durch eine Prallvermahlung nachzerkleinert, um vorhandene Endospermzellen weitestgehend aufzulösen und den Anteil freier Stärkekörner und Proteinteilchen zu erhöhen, die einer Sichtung zugänglich sind. Die Prallzerkleinerung in der Stiftmühle<sup>37</sup> wurde mit der höchstmöglichen Zerkleinerungsintensität bei einer Umfangsgeschwindigkeit der äußeren Stiftreihe von 193 m/s durchgeführt, der Durchsatz betrug 70 kg/h. Die Überprüfung des Zerkleinerungserfolgs durch eine Siebung mit dem Luftstrahlsieb ergab eine Verringerung des Anteils >40 µm im Roggenmehl von 31 auf 8,0%, im griffigeren Triticalemehl von 66 auf 14%.

Das Ziel der Windsichtung bestand in der Gewinnung einer proteinangereicherten und stärke-reichen Mehlfraktion in möglichst hoher Ausbeute. Beim verwendeten Turboplex-Feinstsichter wurde die Trenngrenze zwischen zwei Mehlfraktionen primär durch die Sicht-raddrehzahl bestimmt. Je höher die Sicht-raddrehzahl war, um so feiner wurde getrennt. Auf-gabe der Untersuchung war, für Roggen- und Triticalemehl geeignete Sicht-raddrehzahlen zu ermitteln, bei der durch die Abtrennung proteinreicher Fraktionen eine möglichst hohe Stär-keanreicherung in einer Fraktion erreicht wurde. Als Kriterium zur Auswahl der Trennschnit-te wurden der Rohproteingehalt und der Massenanteil der Fraktionen in Abhängigkeit von der

<sup>37</sup> Typ 224, Gebr. Nelmlich, Nossen

Sichtraddrehzahl bestimmt. Damit wurden ohne Umweg über die Trennkorngröße die eigentlichen Zielgrößen Ausbeute und Rohproteingehalt untersucht.

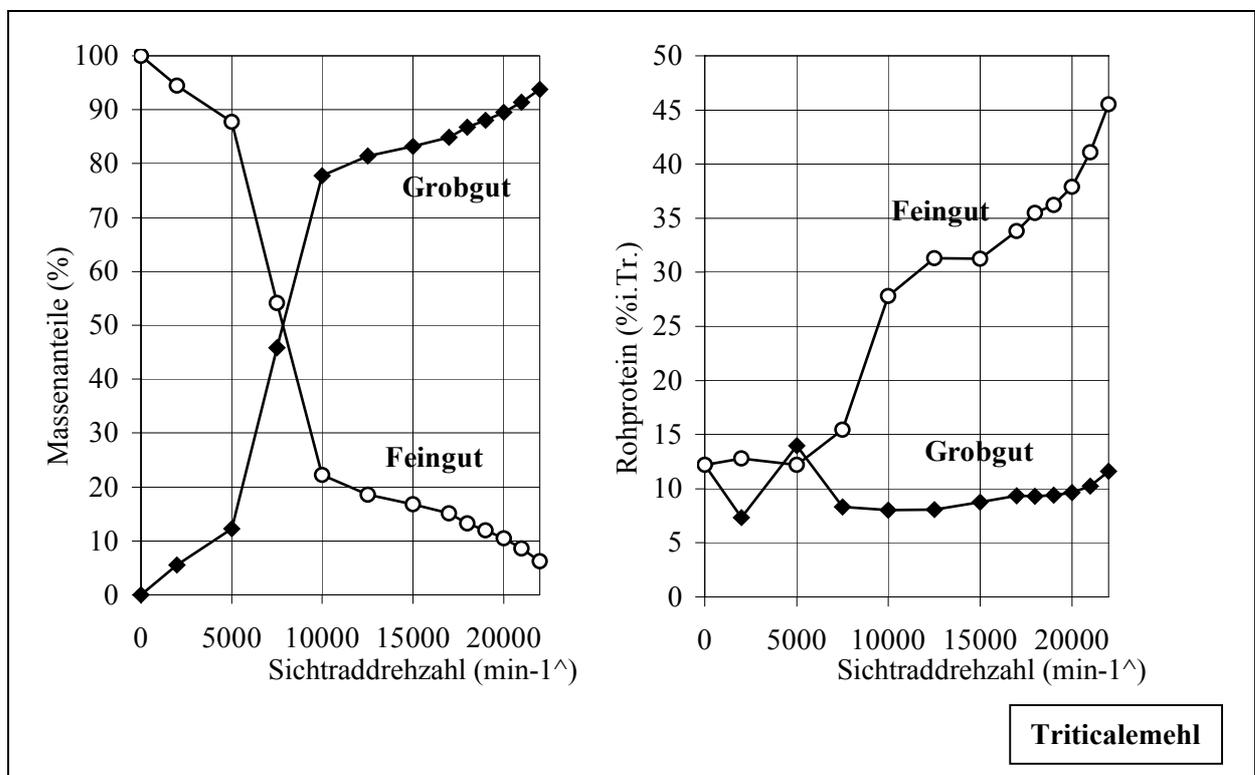
Beim Sichten von Roggenmehl mit zunehmender Sichtraddrehzahl fand die größte Änderung der Massenanteile der Fraktionen im Bereich von 5000 bis 10000 $\text{min}^{-1}$  statt (Abb. 48). Bei einer Drehzahl von 5000 $\text{min}^{-1}$  betrug der Grobgutanteil nur 7%, bei ca. 7000 $\text{min}^{-1}$  fielen schon jeweils 50% Fein- und Grobgut an. Ebenso wie der Massenanteil änderte sich der Rohproteingehalt des Feingutes aus Roggenmehl erst ab einer Sichtraddrehzahl von 5000  $\text{min}^{-1}$ . Mit höheren Drehzahlen nahm der Rohproteingehalt bis auf maximal 19,9% i.Tr. bei der höchstmöglichen Drehzahl von 22000  $\text{min}^{-1}$  zu; der Feingutanteil betrug dabei 11%. Der Rohproteingehalt des Grobgutes blieb bis zu der Drehzahl von 5000 $\text{min}^{-1}$  ebenfalls auf dem Ausgangsniveau. Dabei war in dieser Fraktion eine Anreicherung an dunklen Schaleilchen zu beobachten. Eine wirksame Proteinabreicherung trat bei Sichtraddrehzahlen über 5000  $\text{min}^{-1}$  ein. Mit 2,2% i.Tr. wurde der niedrigste Proteingehalt im Grobgut bei 6650  $\text{min}^{-1}$  ermittelt.



**Abb. 48:** Massenanteile und Rohproteingehalte der Roggenmehlfractionen in Abhängigkeit von der Sichtraddrehzahl

Beim Windsichten des Triticalemehls fand die größte Verschiebung der Massenanteile wie auch beim Roggenmehl bei Sichtraddrehzahlen zwischen 5000 und 10000  $\text{min}^{-1}$  statt (Abb.49). Jeweils 50% Fein- und Grobgut wurde bei ca. 8000  $\text{min}^{-1}$  erreicht. Eine kontinuierliche Zu-

nahme des Rohproteingehalts in der Feingutfraktion konnte bei Sichtraddrehzahlen ab 5000  $\text{min}^{-1}$  festgestellt werden. Die mit 45,5% i.Tr. proteinreichste Triticalemehlfraktion wurde bei der Maximaldrehzahl des Sichters von 22000  $\text{min}^{-1}$  mit einem Anteil von 6% erhalten. Anders als beim Roggenmehl, änderte sich beim Sichten von Triticalemehl der Rohproteingehalt des Grobgutes schon bei niedrigen Sichtraddrehzahlen unter 5000  $\text{min}^{-1}$ . Das bei 2000  $\text{min}^{-1}$  anfallende helle Feingut wies den niedrigsten Proteingehalt mit 7,3% i.Tr. auf. Bei 5000  $\text{min}^{-1}$  fiel das mit 14% i.Tr. über den Ausgangswert liegende proteinreichste Grobgut an. Es enthielt auffällig viele Schauteilchen und wurde aus gelblichen griffigeren Triticalemehlteilchen gebildet. Bei zunehmender Sichtraddrehwindigkeit nahm der Rohproteingehalt infolge der Abtrennung proteinhaltiger feinerer Mehlteilchen bis auf 8% i.Tr. ab.



**Abb. 49:** Massenanteile und Rohproteingehalte der Triticalemehlfraktionen in Abhängigkeit von der Sichtraddrehzahl

#### 4.5.1.3 Lage der Trennschnitte

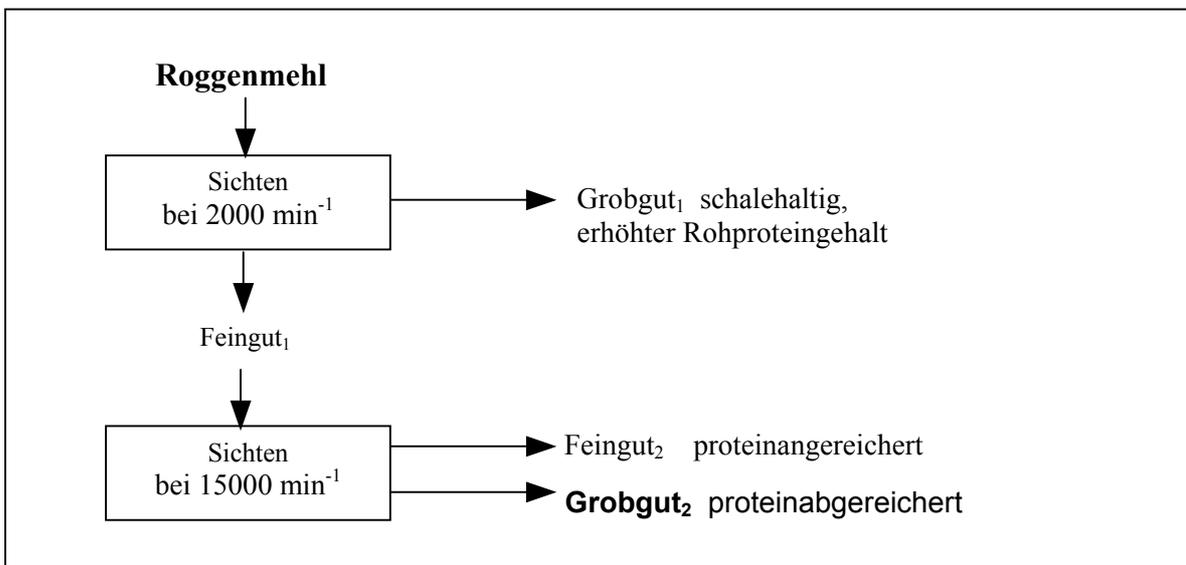
Die Ermittlung einer geeigneten Sichtraddrehzahl für das Abtrennen der proteinreichen Fraktion aus Roggen- und Triticalemehl erfolgte auf Grundlage des Verhältnisses zwischen Rohproteingehalt und Massenanteil der Grogutfraktionen (Tab.44).

**Tabelle 44:** Quotienten aus Rohproteingehalt und Massenanteil des Grobgutes aus Roggen- und Triticalemehl in Abhängigkeit von der Sichtraddrehzahl

	Quotient aus Rohproteingehalt : Massenanteil <sub>Grobgut</sub>										
Sichtraddrehzahl (min <sup>-1</sup> )	2000	5000	5850	6650	7500	10000	12500	15000	17500	20000	22000
<b>Roggenmehl</b>	6,808	0,617	0,085	0,050	0,043	0,038	0,033	0,031	0,033	0,033	0,035
Sichtraddrehzahl (min <sup>-1</sup> )	2000	5000	7500	10000	12500	15000	17000	18000	20000	21000	22000
<b>Triticalemehl</b>	1,323	1,135	0,181	0,103	0,099	0,106	0,110	0,107	0,108	0,112	0,124

Für das Sichten von Roggenmehl nahm der Quotient seinen niedrigsten Wert bei einer Sichtraddrehzahl von 15000 min<sup>-1</sup> an. Der minimale Rohproteingehalt wurde dabei in der Roggenmehlfraction um 0,3%i.Tr. überschritten, dafür stieg die Ausbeute an der proteinarmen Fraktion um 37%. Das günstigste Protein-Anteil-Verhältnis im Triticalegrobgut trat beim niedrigsten Rohproteingehalt und der Sichtraddrehzahl von 12500 min<sup>-1</sup> auf.

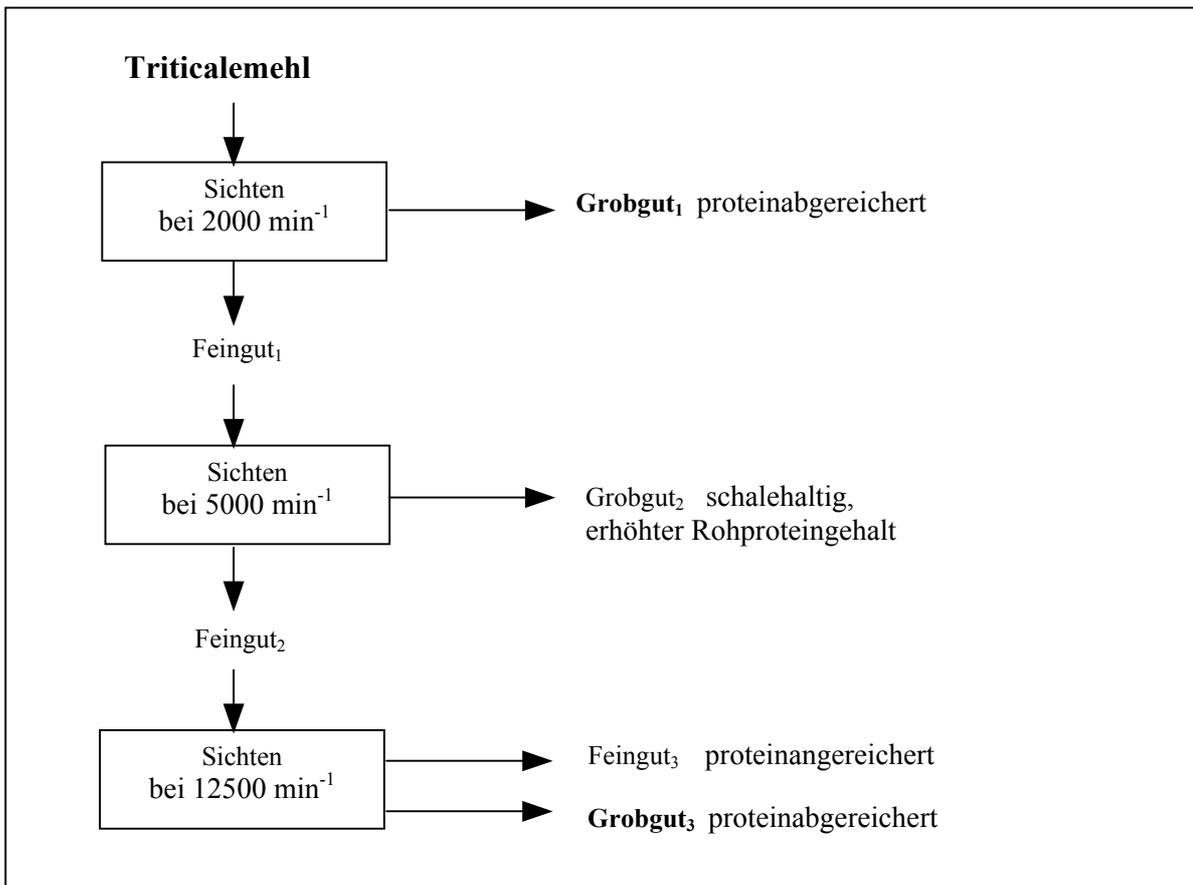
In den Abbildungen 50 und 51 sind die erforderlichen Trennschnitte zur Fraktionierung von Roggen- und Triticalemehl zusammengefasst.



**Abb. 50:** Schema zum Windsichten von Roggenmehl

Roggenmehl wurde zweimal, Triticalemehl dreimal gesichtet. Als Endprodukt der Windsichtung ließen sich 75,6% Roggenmehl mit einem Rohproteingehalt von 2,5%i.Tr. sowie 73,1%

des Triticalemehl mit 7,6% i.Tr. gewinnen. Damit verminderte sich der Rohproteingehalt im Roggenmehl um 51%, im Triticalemehl um 38%.



**Abb. 51:** Schema zum Windsichten von Triticalemehl

## 4.5.2 Anwendung der Prozessbedingungen auf das Windsichten der Mehle

### 4.5.2.1 Nachzerkleinern der Mehle

Die Nachzerkleinerung der Roggen- und Triticalemehle hatte das Ziel, die im Mahlprodukt vorhandenen, noch durch Protein verkitteten Stärkekörner aus der Matrix zu lösen und den Anteil freier Proteinteilchen und Stärkekörner zu erhöhen. Ausgehend vom möglichen Durchmesser der Stärkekörner, wurde mit Hilfe der intensiven Prallbeanspruchung in der Stiftmühle mit hoher Umfangsgeschwindigkeit eine Verringerung der Korngröße der Mehle auf  $< 50 \mu\text{m}$  angestrebt [44].

Für die Windsichtung wurden die stärkereichsten Mehle der Roggen- und Triticalevermahlung, die Mehle nach dem II. Schrot der Walzenstuhlvermahlung, verwendet; in Tabelle 45 ist deren stoffliche Zusammensetzung enthalten.

**Tabelle 45:** Stoffliche Zusammensetzung der Mehle für das Windsichten

aus Anbauintensität	Roggenmehl <160 µm		Triticalemehl <200 µm	
	konventionell	reduziert	konventionell	reduziert
Mineralstoffe (%i.Tr.)	0,506	0,469	0,655	0,562
Stärke (%i.Tr.)	83,9	87,4	84,5	85,6
Rohprotein (%i.Tr.)	5,4	5,9	9,8	10,6
Pentosan (%i.Tr.)	4,0	4,4	3,8	3,6

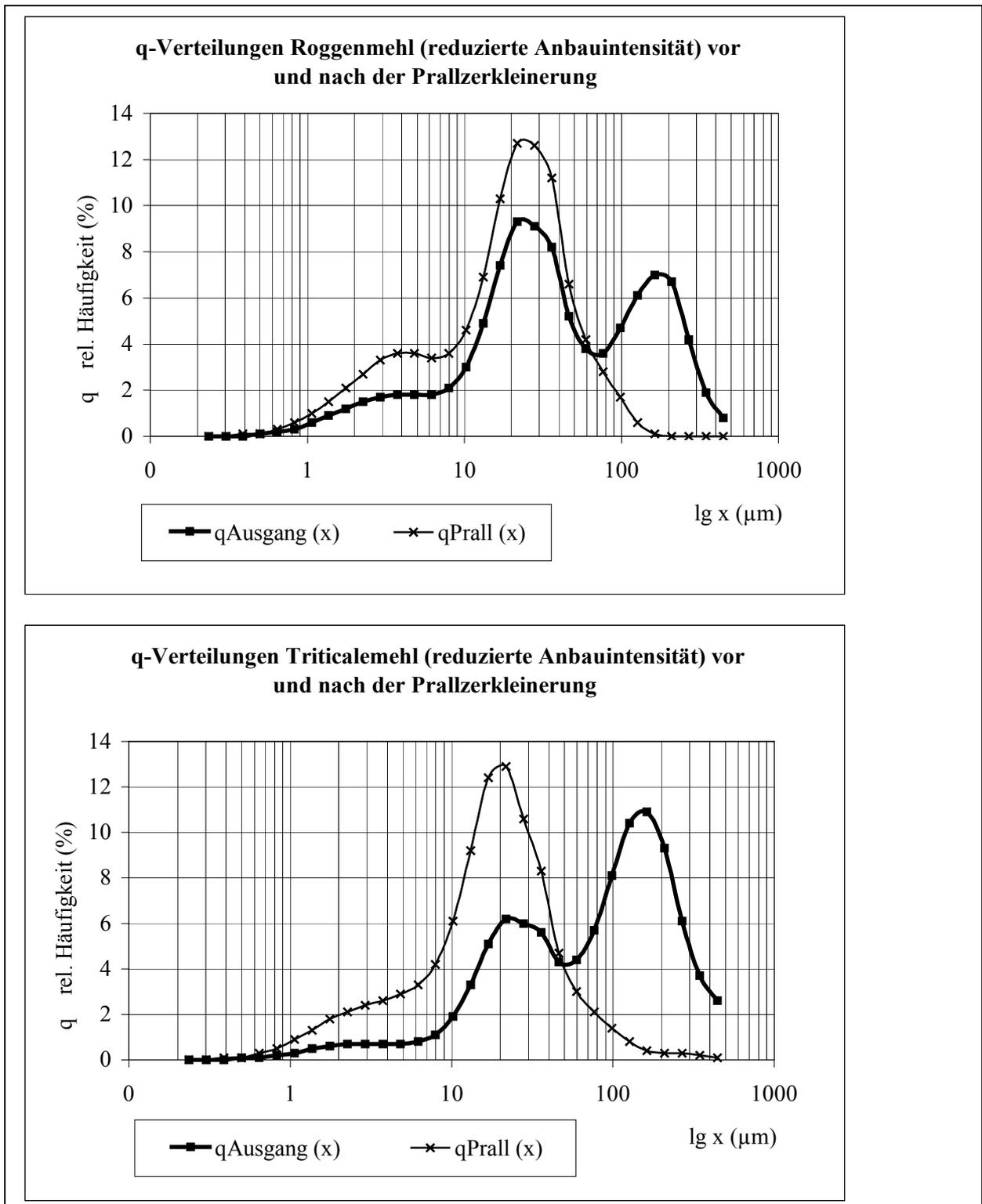
Nach der Walzenstuhlvermahlung betrug der für die Windsichtung zugängliche Anteil an Teilchen der Größe <50 µm im Roggenmehl 45-60%, im Triticalemehl nur 33-38% (Tab.46). Die Nachzerkleinerung der Mehle in der Stiftmühle führte zu einer Erhöhung des Anteils <50 µm auf mindestens 80% in allen Mehlen. Die Mehle aus Getreide der reduzierten Anbauintensität wiesen sowohl vor als auch nach der Vermahlung in der Stiftmühle eine höhere Feinheit und eine niedrigere Stärkebeschädigung als die konventionellen Mehle auf.

**Tabelle 46:** Ergebnisse der Nachzerkleinerung von Roggen- und Triticalemehlen in der Stiftmühle

aus Anbauintensität	Roggenmehl		Triticalemehl	
	konventionell	reduziert	konventionell	reduziert
Zerkleinerungsarbeit massebezogen (kJ/kg)	16,2	15,0	18,7	16,7
oberflächenbezogen (kJ/m <sup>2</sup> )	0,060	0,065	0,059	0,052
mittl. Korndurchmesser (µm)				
D <sub>m</sub>	119,9	76,9	126,6	114,9
d <sub>m</sub>	43,6	24,8	36,6	24,8
Abnahme um (%)		63,6	67,8	71,1
Zerkleinerungsgrad D <sub>m</sub> /d <sub>m</sub>		2,8	3,1	3,4
Anteil <50µm (%)				
Ausgang	45,2	60,0	33,0	38,0
nachzerkleinert	79,8	89,4	83,4	86,0
Zunahme um (%)		34,6	29,4	50,4
Oberfläche (m <sup>2</sup> /kg)				
A <sub>1</sub>	263,6	352,7	186,9	208,2
A <sub>2</sub>	533,0	583,0	502,8	528,6
Zunahme um (%)		102,2	65,3	169,0
Stärkebeschädigung (BV/gStärke i.Tr.)				
Ausgang	5,78	2,13	2,58	2,31
nachzerkleinert	8,75	4,85	3,69	2,98
Zunahme		2,97	2,72	1,11

Bei der Prallvermahlung wurden im Roggenmehl insbesondere Mehlteilchen >70 µm, im Triticalemehl >50 µm zugunsten des Anteils an Teilchen im Korngrößenbereich von 10-50µm zerkleinert. Am Beispiel der Dichteverteilungen q(x) für ein Roggen- und Triticalemehl in

Abbildung 52 ist erkennbar, dass sich dabei die bimodale Verteilung der Walzenstuhlmehle einer Normalverteilung annähert.



**Abb. 52:** q-Verteilungen vor und nach der Prallzerkleinerung von Roggen- und Triticalemehl (reduzierte Anbauintensität)

Aufgrund der weicheren Endospermstruktur löste sich unter Einwirkung der Zerkleinerungskräfte die Stärke-Protein-Matrix von Roggen und Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität leichter auf. Der geringere Widerstand führte zu niedrigeren mechanischen Beanspruchungen der Stärke. Im Vergleich zu Roggen wurde Triticalestärke bei der Nachzerkleinerung in geringerem Maße beschädigt. Die Vermahlung in der Stiftmühle bewirkte vorrangig einen Abbau vorhandener Mehlkörperteilchen im gröber abgeseibten Triticalemehl. In den Roggenmehlen mit einem höheren Anteil an kleinen Teilchen  $<50 \mu\text{m}$  erforderte eine weitere Korngrößenverringerng einen höheren Betrag an kinetischer Energie. Diese führte zu einer verstärkten mechanischen Beanspruchung und Beschädigung der Stärkekörner. Auch die mikroskopischen Aufnahmen bestätigten die weitere Auflösung der Mehlteilchen infolge der Nachzerkleinerung (Anhang, Abb.A1). Die im Roggen- und Triticalemehl noch vorhandenen größeren Stärke-Protein-Verbände waren im nachzerkleinertem Mehl nicht mehr anzutreffen. Ebenfalls nahm die Anzahl agglomerierter Stärkekörner verschiedener Größe ab.

#### 4.5.2.2 Sichtergebnisse

Bei der Windsichtung der beiden Roggenmehle unterschiedlicher Anbauintensität fielen als Endprodukt zwei Grobgutfraktionen ( $g_1$  und  $g_2$ ) und eine Feingutfraktion ( $f$ ) an. Der Teil des Feingutes, der nicht im Zyklon abgeschieden und im Feingutbehälter gesammelt werden konnte, wurde dem nachgeschalteten Filter als Filtermehl ( $f_m$ ) entnommen. In der Massenbilanz erreichte bei der Sichtung von Roggenmehl das Filtermehl einen Anteil von 2 bis 3%. Das Filtermehl wurde als Teilmenge der Feingutfraktion erfasst. Endprodukte der Triticalemehlsichtung waren drei Grobgutfraktionen ( $g_1$ ,  $g_2$  und  $g_3$ ) sowie eine Feingutfraktion ( $f$ ). Das Filtermehl konnte aufgrund seines geringen Massenanteils von 0,1 bis 0,3% in der Gesamtbilanz vernachlässigt werden. Zwischen den Massenanteilen und mittleren Korngrößen der Sichtfraktionen (Tab.47) bestanden in Abhängigkeit von der Anbauintensität nur geringe Unterschiede; sie wurden von der unterschiedlichen Korngrößenverteilung im Aufgabegut verursacht. Bei den Roggenmehlen wies das nachzerkleinerte Ausgangsmehl der reduzierten Anbauintensität eine höhere Feinheit auf; beim Sichten fielen im Vergleich zum Roggenmehl der konventionellen Anbauintensität entsprechend 1,3% mehr Feingut und 2,3% weniger Grobgut an. Bei Triticale besaß das Mehl aus konventionell angebautem Getreide einen geringfügig niedrigeren mittleren Korndurchmesser als das Mehl des reduzierten Anbaus und erbrachte beim Sichten einen um 0,5% höheren Feingutanfall. Das Feingut wies dabei einen um  $1,2 \mu\text{m}$  niedrigeren Korndurchmesser auf. Dagegen lag im Triticalemehl der reduzierten Anbauinten-

sität der Anteil an Teilchen  $>50 \mu\text{m}$  im Aufgabegut unter dem des konventionellen Mehles und bewirkte einen um 2,2% geringeren 2. Grobgutanfall.

**Tabelle 47:** Massenanteile und mittlere Korndurchmesser der Sichtfraktionen der Mehle aus Roggen und Triticale unterschiedlicher Anbauintensität

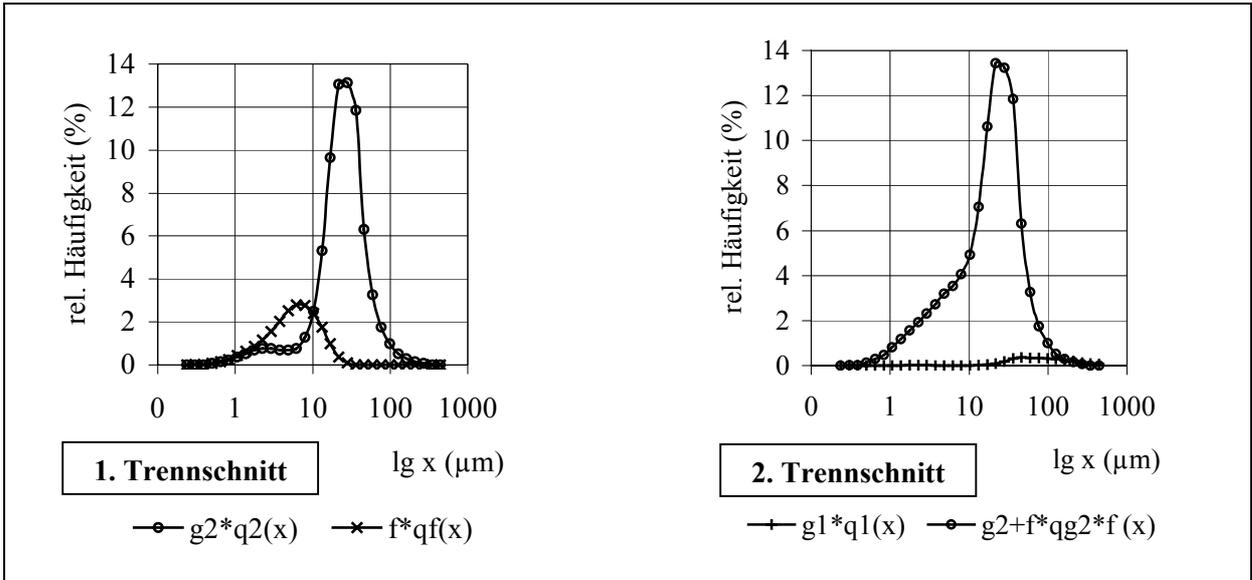
aus Anbauintensität	Roggenmehlfractionen				Triticalemehlfractionen			
	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	f	fm	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>3</sub>	f
<u>Massenanteile (%)</u>								
reduziert	3,1	76,0	18,3	2,7	1,5	9,9	69,8	18,7
konventionell	5,4	75,2	16,9	2,4	0,4	12,1	68,4	19,2
<u>mittlere Korngröße (<math>\mu\text{m}</math>)</u>								
reduziert	105,4	29,6	6,9	7,2	35,1	95,4	22,8	8,6
konventionell	101,9	29,2	7,1	8,2	35,8	101,3	21,4	7,4

Die Untersuchung der Korngrößenverteilung in den Fraktionen ergab, dass weitere Trennmerkmale, wie Teilchenform und -dichte, bei der ersten Sichtung von Roggen- und Triticalemehl einen größeren Einfluss auf die Trennung besaßen als die Teilchengröße (Tab. 48).

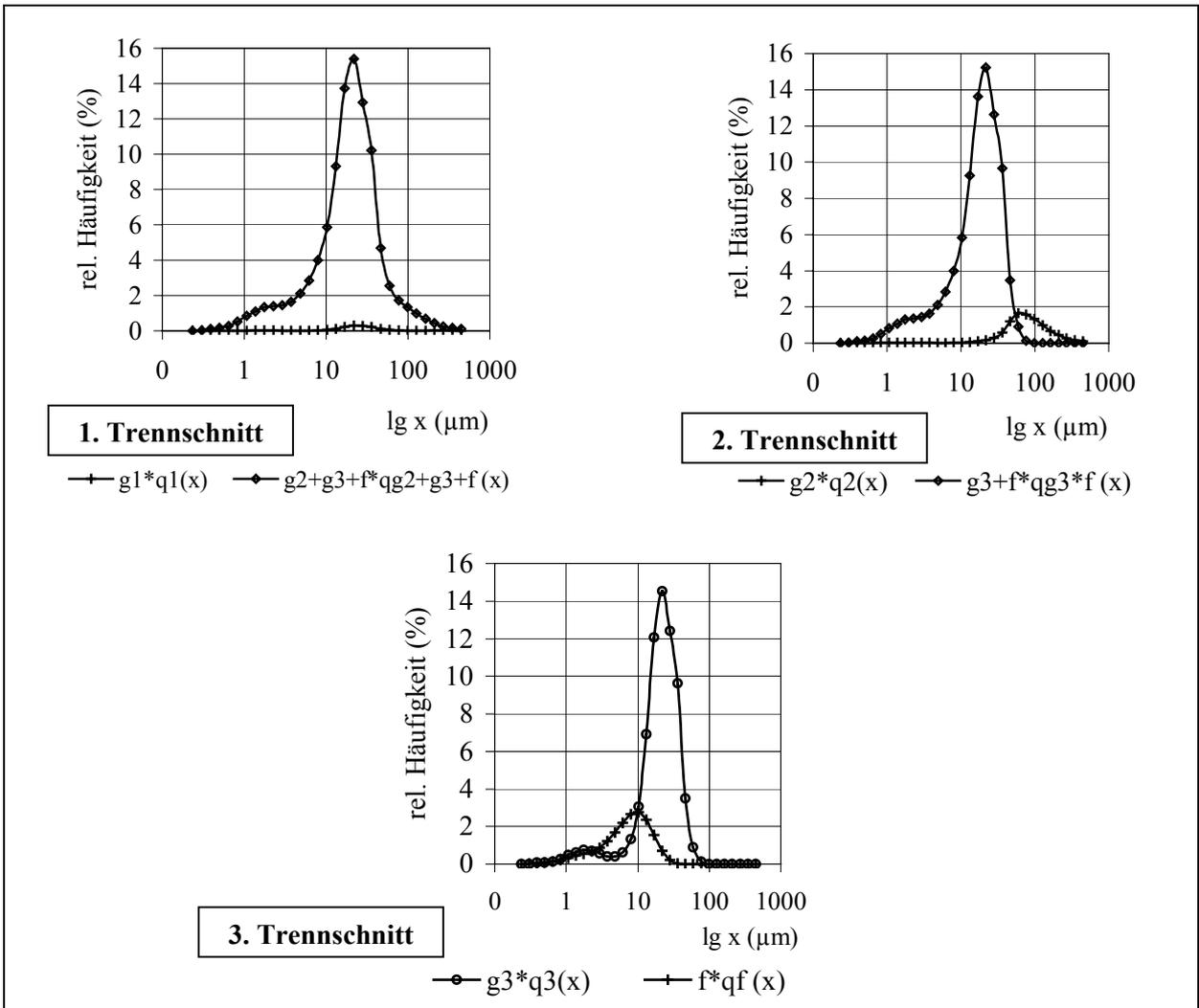
**Tabelle 48:** Trennschnitte und Trenngrenzen der Windsichtung von Roggen- und Triticalemehlen

aus Anbauintensität	Roggenmehl		Triticalemehl	
	konventionell	reduziert	konventionell	reduziert
1. Sichtraddrehzahl $n$ ( $\text{min}^{-1}$ )	5000		2000	
Trenngrenze ( $\mu\text{m}$ )	93	188	keine	keine
2. Sichtraddrehzahl $n$ ( $\text{min}^{-1}$ )	15000		5000	
Trenngrenze ( $\mu\text{m}$ )	10	10	50	54
3. Sichtraddrehzahl $n$ ( $\text{min}^{-1}$ )			12500	
Trenngrenze ( $\mu\text{m}$ )			9	10

Das erste Grobgut ( $g_1$ ) der Windsichtung von Roggenmehl reduzierter Anbauintensität wies z.B. ein sehr weites Korngrößenband von  $x_{10}$  28  $\mu\text{m}$  bis  $x_{90}$  232  $\mu\text{m}$  auf und lag damit fast vollständig im Korngrößenbereich des Feingutes (Abb.53). Noch deutlicher wurde der geringe Einfluss der Korngröße beim 1. Trennschnitt der Triticalemehle. Das Korngrößenspektrum des abgetrennten Grobgutes lag vollständig im Feingutbereich, so dass die Angabe einer Trenngrenze als Wert einer bestimmten Korngröße nicht möglich ist (Abb. 54).



**Abb. 53:** Volumenverteilungsdichten der Sichtfraktionen von Roggenmehl aus reduzierter Anbauintensität

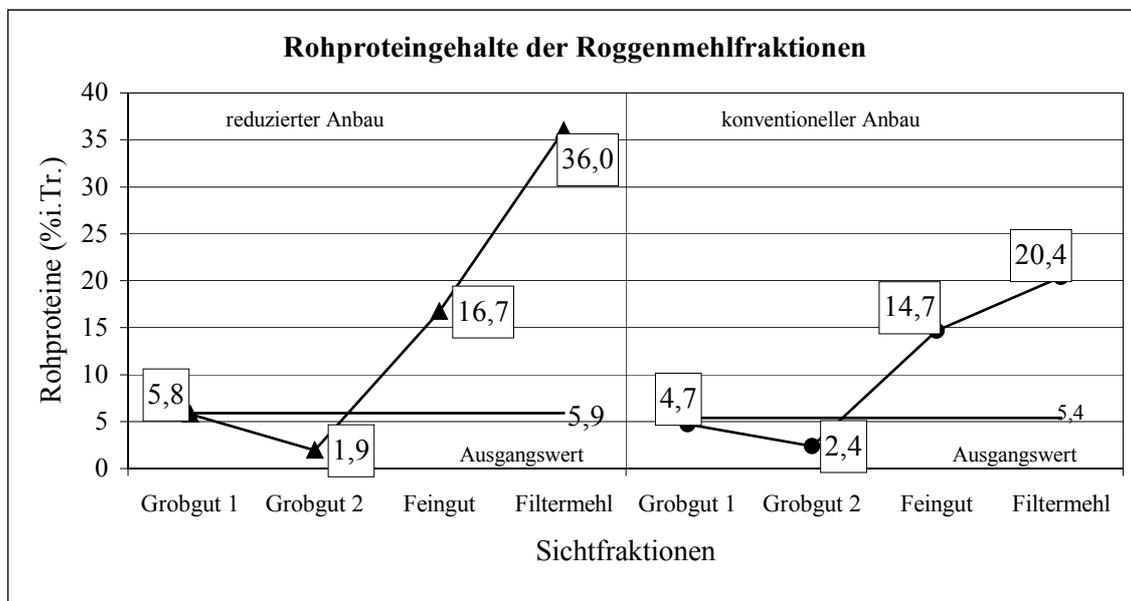


**Abb. 54:** Volumenverteilungsdichten der Sichtfraktionen von Triticalemehl aus reduzierter Anbauintensität

Die nachfolgenden Trennschnitte fraktionierten das Aufgabegut vorwiegend nach der Teilchengröße. Die untere Trenngrenze betrug trotz verschiedener Sichtraddrehzahlen in allen Mehlen ca. 10 µm.

#### 4.5.3 Inhaltsstoffverteilung in den Sichtfraktionen

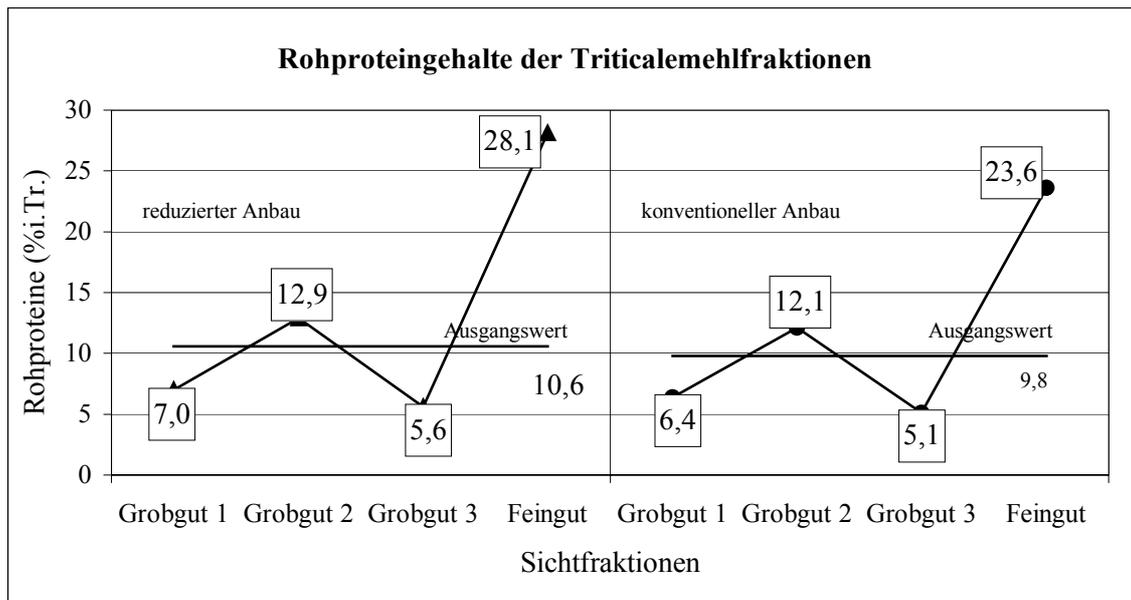
Die beim Windsichten angestrebte Verringerung des Rohproteingehalts war bei Roggenmehl in der 2. Grobgrutfraktion anzutreffen. Diese Mehlfraktionen enthielten den jeweils niedrigsten Rohproteingehalt (Abb.55). Im Roggenmehl der reduzierten Anbauintensität wurde eine Verminderung um 66,7% erreicht. Im Gegenzug dazu fand im Feingut <10 µm und besonders im Filtermehl eine deutliche Proteinanreicherung statt. Das Filtermehl enthielt 17% des gesamten Rohproteins, bei einem Massenanteil dieser Fraktion von nur 2,7%. In der 1. Grobgrutfraktion wurde keine Veränderung im Rohproteingehalt festgestellt. Die Abtrennung proteinhaltiger Teilchen aus der 2. Grobgrutfraktion gelang beim Sichten des konventionellen Roggenmehls trotz eines etwas niedrigeren Ausgangsgehaltes an Rohprotein in geringerem Maße als beim Mehl des reduzierten Anbaus, die Abreicherung betrug 55,5%. Dementsprechend niedriger fiel auch die Proteinanreicherung in den Feingutfraktionen aus. Wie auch beim Sichten des Roggenmehls reduzierter Anbauintensität, wies das 1. Grobgrut einen Rohproteinanteil nahe dem Ausgangswert auf.



**Abb. 55:** Rohproteingehalte der Sichtfraktionen – Roggenmehle

Bei der Windsichtung der Triticalemehle wurden zwei proteinabgereicherte Mehlfraktionen, Grobgrut 1 und 3, gewonnen (Abb.56). Das 1.Grobgrut fiel nur in einer Menge von höchstens

1,5% (Mehl reduzierter Anbauintensität) an und enthielt im Vergleich zum 3. Grobgut einen um ca. 1% höheren Rohproteingehalt. Bei der Trennung der Fraktionen durch Sichten wurden bei den Triticalemehlen aus unterschiedlicher Anbauintensität vergleichbare Ab- und Anreicherungsraten erzielt. In der 3. Grobgutfraktion des Korngrößenbereichs 50/54...10 µm wurde eine Verminderung des Proteinanteils um ca. 48% ermittelt. Neben einer geringen Erhöhung des Rohproteingehalts in den 2. Grobgutfraktionen fand die Anreicherung hauptsächlich in den Feingutfraktionen <10 µm statt. Sie enthielten bis zu 50% des gesamten Rohproteins.

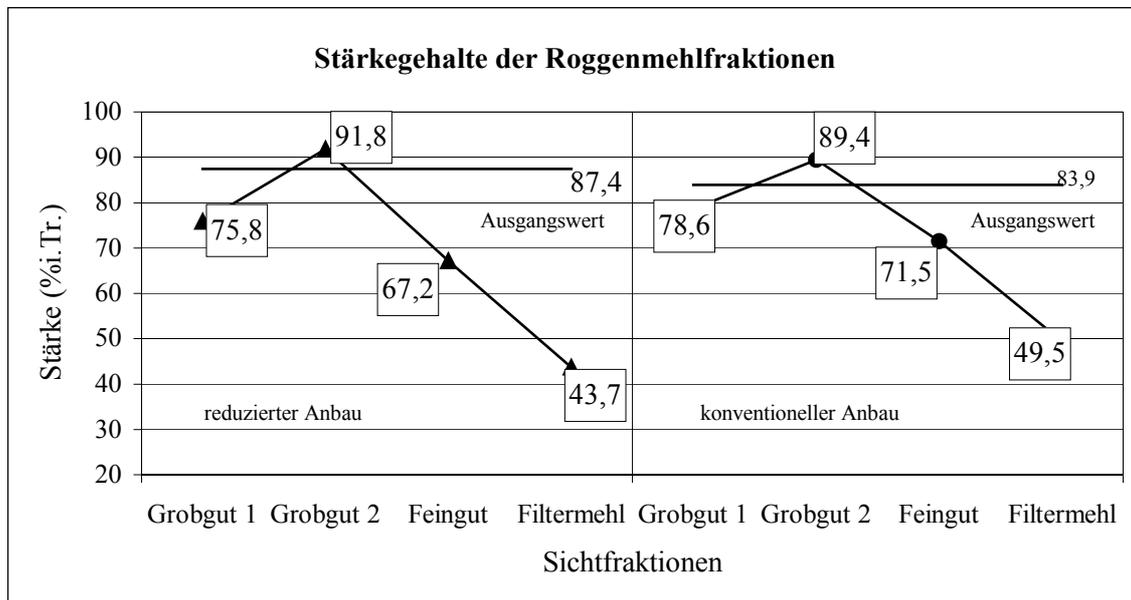


**Abb. 56:** Rohproteingehalte der Sichtfraktionen – Triticalemehle

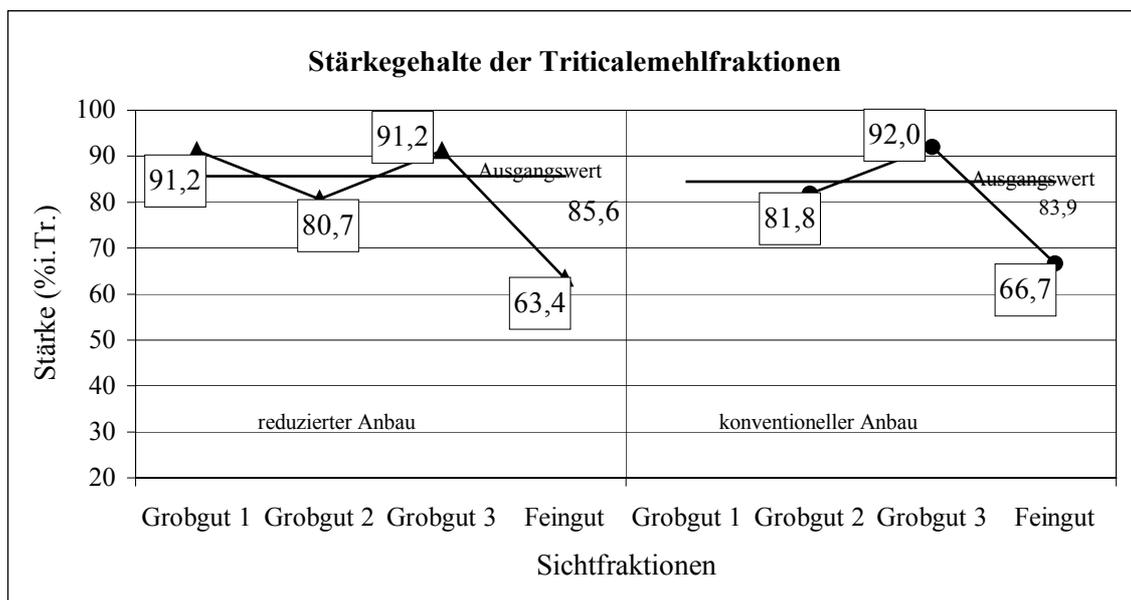
Analog der Verschiebung des Rohproteingehalts änderte sich der Stärkegehalt in den Sichtfraktionen. Beim Windsichten der nachzerkleinerten Roggenmehle wurden in den proteinärmsten 2. Grobgutfraktion die höchsten Stärkegehalte ermittelt (Abb.57). Im Roggenmehl des konventionellen Anbaus stieg der Stärkeanteil um 5,5%. Im Roggenmehl des reduzierten Anbaus fiel die Erhöhung des Stärkegehalts mit 4,4% etwas niedriger aus. Dennoch ist diese Mehlfraction aufgrund des höheren Ausgangsgehaltes stärkereicher als Mehl des konventionellen Anbaus. In den anderen Sichtfraktionen lag der Stärkegehalt unterhalb des Ausgangsniveaus. Die stark proteinangereicherten Filtermehle wiesen dabei die niedrigsten Stärkeanteile auf. Aber auch in den größten Fraktionen (Grobgut 1) mit unveränderten Rohproteingehalten waren verminderte Stärkegehalte zu verzeichnen.

Beim Windsichten der nachzerkleinerten Triticalemehle wurden maximale Stärkegehalte in den proteinabgereicherten Grobgutfraktionen 1 und 3 erreicht (Abb.58). Dabei nahm im Triticalemehl des konventionellen Anbaus der Stärkegehalt beim Sichten um 7,5% zu. In der ent-

sprechenden Mehlfraktion des reduzierten Anbaus lag die Steigerung mit 5,5% bei höherem Ausgangsstärkegehalt darunter. Die niedrigsten Stärkegehalte wurden wiederum in den proteingereicherten Feingutfraktionen <10 µm festgestellt.

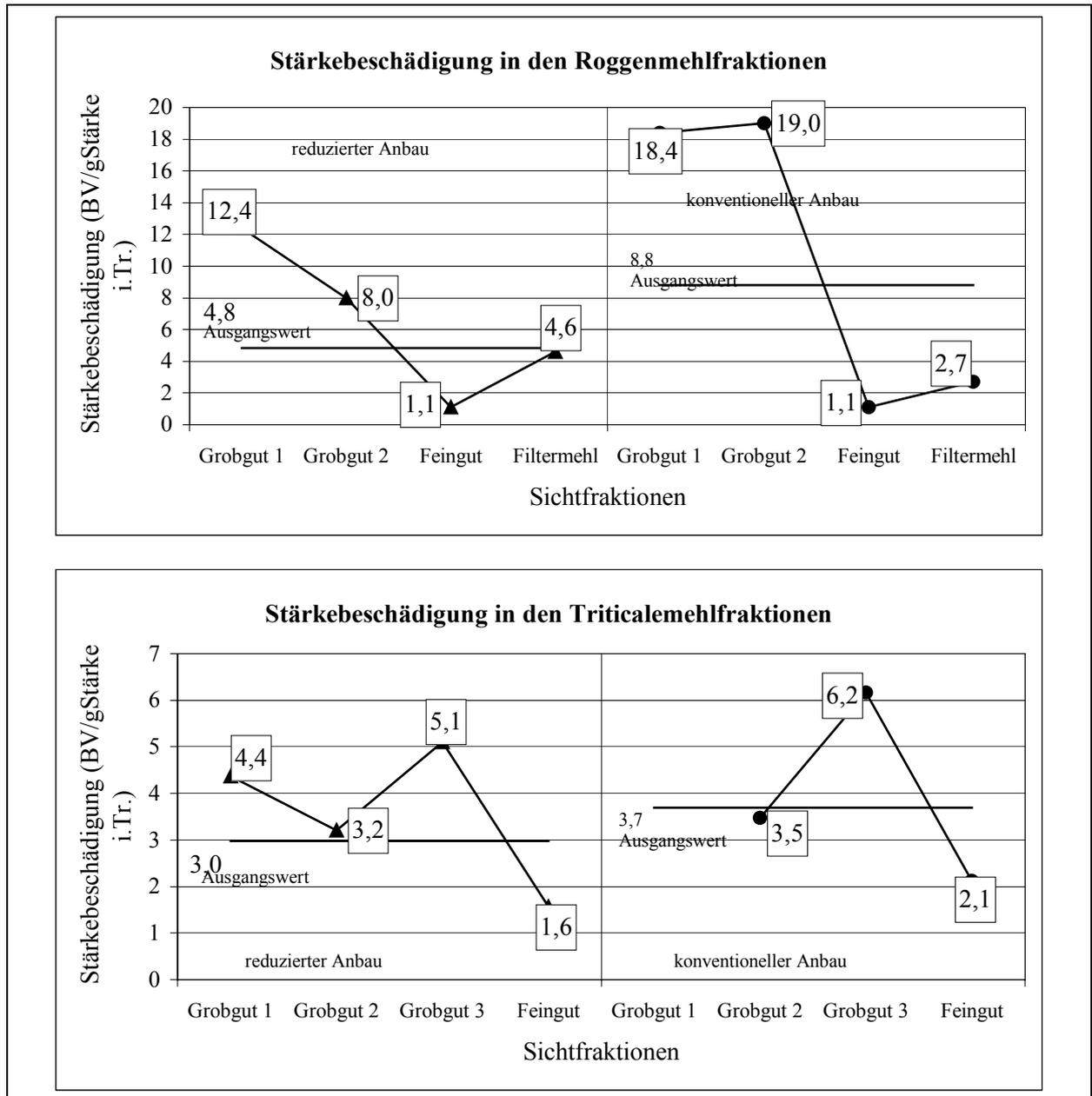


**Abb. 57:** Stärkegehalte der Sichtfraktionen – Roggenmehle



**Abb. 58:** Stärkegehalte der Sichtfraktionen – Triticalemehle

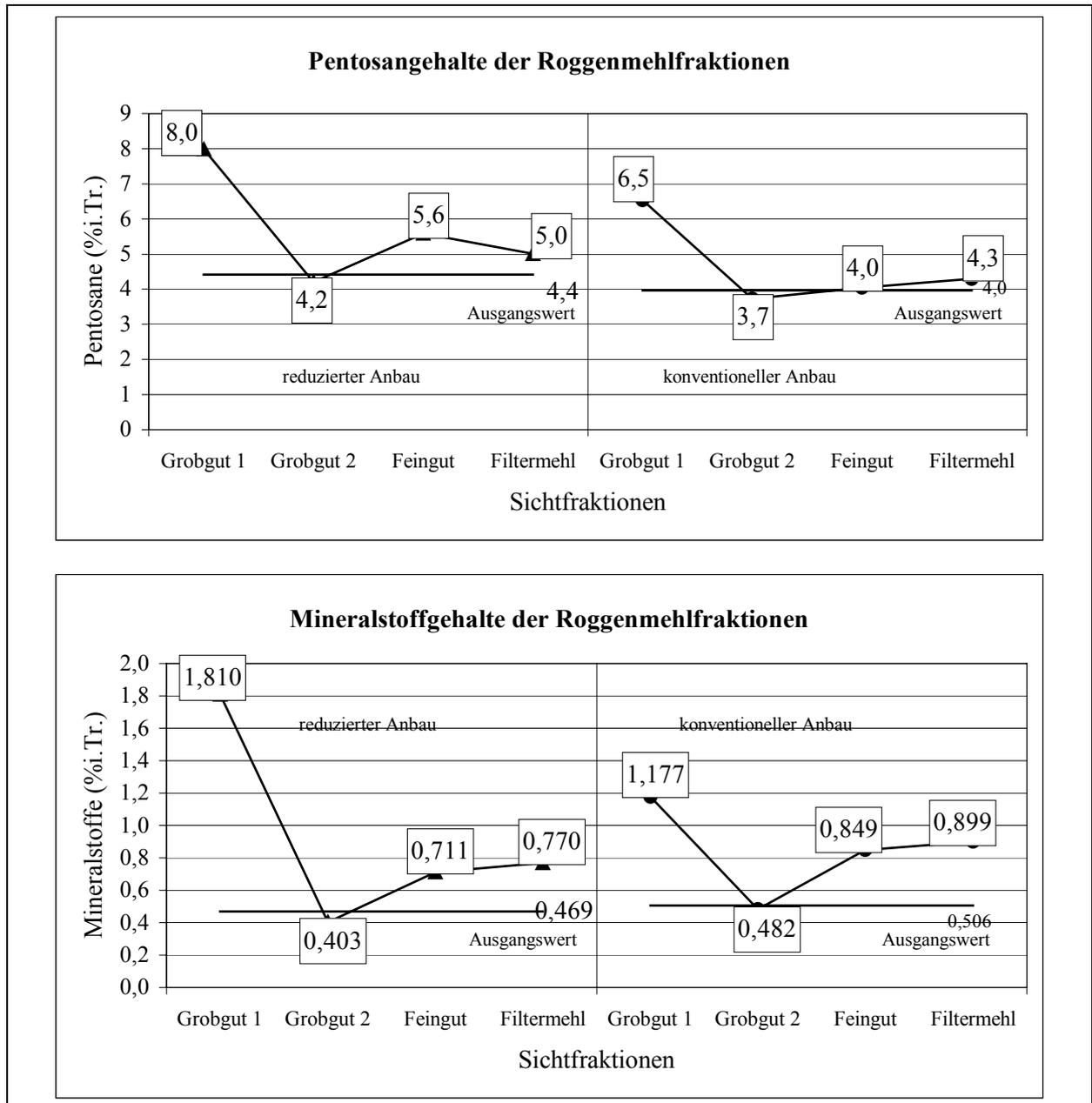
Die Untersuchung der mechanischen Stärkebeschädigung der unterschiedlichen Mehlfraktionen (Abb.59) zeigte, dass das Ausmaß der Stärkekornmodifizierung von der Korngröße und vom Aufschlussgrad der Endospermzellen abhängig war.



**Abb. 59:** Stärkebeschädigung in den Sichtfraktionen – Roggen- und Triticalemehle

Die Feingutfractionen  $<10 \mu\text{m}$  wiesen die jeweils niedrigsten Werte auf. Sie enthielten die kleinkörnigen, nur mit höherem Aufwand an kinetischer Energie zu modifizierenden und nach dem Vermahlen, Nachzerkleinern sowie Sichten noch gering beschädigten Stärken. Die wieder ansteigenden Werte für die Stärkebeschädigung in den Filtermehlen der Roggenmehlsichtung zeigte aber, dass neben wenig beschädigter Kleinkornstärke auch Bruchstücke größerer Stärkekörner in das Feingut gelangten. In den Sichtfraktionen mit einem hohen Anteil an freien Stärkekörnern  $>10 \mu\text{m}$  wurden die höchsten Werte der Stärkebeschädigung ermittelt. Das insgesamt höhere Niveau der Stärkebeschädigung nach dem Sichten weist darauf hin, dass bei der Abtrennung des Groggutes vom Feingut während des Sichtvorgangs freie Stärkekörner mechanisch beschädigt wurden. Bestätigt wird die Vermutung anhand der annähernd unver-

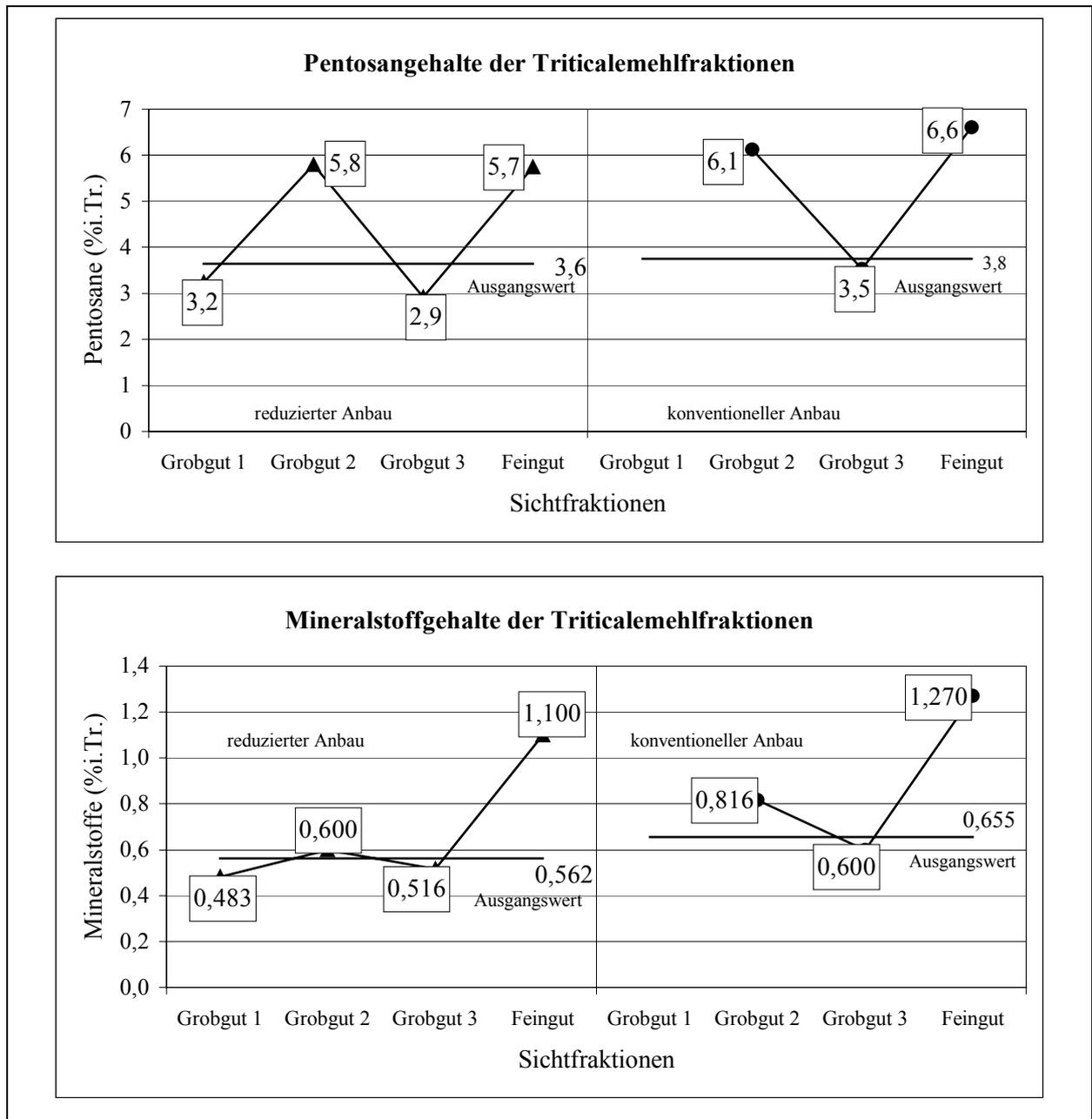
ändert gebliebenen Werte der Stärkebeschädigung in den Triticalemehlfractionen des 2. Grobgutes. In diesen Fraktionen, bestehend aus Teilchen  $>50/54 \mu\text{m}$ , lagen die Stärkekörner seltener frei vor und waren durch den Verbund mit anderen Zellinhaltsstoffen vor mechanischer Beschädigung z.B. durch das Sichtrad besser geschützt.



**Abb. 60:** Pentosan- und Mineralstoffgehalte der Sichtfraktionen - Roggenmehl

Neben der beabsichtigten Proteinab- und Stärkeanreicherung konnten auch die Anteile an Pentosan und Mineralstoffen in den zu gewinnenden Mehlfractionen durch Fraktionierung verringert werden. Bei der Sichtung von Roggenmehl befanden sich im 1. Grobgut die höchsten Pentosan- und Mineralstoffgehalte (Abb.60). Eine weitere deutliche Anreicherung an Mineralstoffen und Pentosanen war im Korngrößenbereich  $<10 \mu\text{m}$  im Feingut und im Filter-

mehl festzustellen. Die Abtrennung dieser Fraktionen bewirkte eine geringfügige Verminderung des Gehalts an Pentosanen und Mineralstoffen in der 2. Grobgrutfraktion.



**Abb. 61:** Pentosan- und Mineralstoffgehalte der Sichtfraktionen – Triticalemehle

Die Windsichtung der Triticalemehle führte zu einer Anreicherung an Pentosanen und Mineralstoffen sowohl im 2. Grobgrut > 50/54  $\mu\text{m}$  als auch im Feingut <10  $\mu\text{m}$  (Abb.61). Die höchste Zunahme des Mineralstoffgehalts wurde in den Feingutfractionen der Triticalemehle festgestellt. Sie waren gegenüber den Ausgangswerten um etwa das Doppelte angestiegen. Ebenso wie bei den Roggenmehlen erfolgte eine Abreicherung an Pentosanen und Mineralstoffen in den stärkereichen und proteinarmen Triticalemehlfractionen des Korngrößenbereichs 50/54 ...10  $\mu\text{m}$ .

Mit Hilfe mikroskopischer Aufnahmen wurden die bisherigen Ergebnisse zur Zusammensetzung der Sichtfraktionen überprüft und bestätigt. Einige Aufnahmen der Sichtfraktionen sind im Anhang enthalten.

Für den Einsatz als Rohstoff zur chemischen Modifizierung waren die Stärke-angereicherten und Protein-verminderten Mehlfraktionen, also das 2. Grobgut der Roggenmehlsichtung sowie das 3. Grobgut der Triticalemehlsichtung, vorgesehen. Die erreichten Inhaltsstoffverschiebungen gegenüber den Ausgangsmehlen sind in Tabelle 49 zusammengefasst. Bezogen auf die zur Vermahlung eingesetzte Getreidemenge, waren die Ausbeuten an stärkereichen und proteinverminderten Mehlen aus Roggen und Triticale aus dem reduzierten Anbau höher als aus konventionellem Anbau. Bei vergleichbaren Anfällen der Fraktionen beim Windsichten wurden die besseren Ausbeuten durch die höheren Mehlanfälle bei der Vermahlung der Getreide reduzierter Anbauintensität verursacht.

Die Abtrennung proteinreicherer Fraktionen beim Windsichten bewirkte eine deutliche Proteinverminderung und Stärkeanreicherung in allen Mehlen. Die Höhe der Inhaltsstoffverschiebung war abhängig vom Gehalt des Inhaltsstoffs im Ausgangsmehl. Die Mehle aus Getreide reduzierter Anbauintensität besaßen vor dem Windsichten einen höheren Protein- und Stärkegehalt als die Mehle des konventionellen Anbaus. In diesen Mehlen konnte eine höhere Proteinanreicherung, aber auch eine geringere Stärkeanreicherung als bei konventionellen Mehlen festgestellt werden. Insgesamt nahmen die Unterschiede in den Protein- und Stärkegehalten zwischen den Mehlen aus Getreide unterschiedlicher Anbauintensität durch das Windsichten ab. Das Roggenmehl des reduzierten Anbaus war nach dem Windsichten proteinärmer und noch immer stärkereicher als das Mehl des konventionellen Anbaus. Der Mineralstoffgehalt ist durch die Abtrennung schaleangereicherter Fraktionen in stärkerem Maße als im konventionellen Mehl vermindert worden. Auffällig ist die deutlich höhere mechanische Beschädigung der Stärke im Mehl aus Roggen konventionellen Anbaus. Das mineralstoffärmere gesichtete Triticalemehl des reduzierten Anbaus besaß einen nur noch gering höheren Proteingehalt und einen etwas niedrigeren Stärkegehalt als das konventionelle Mehl. Die Pentosanabreicherung war im Mehl reduzierter Anbauintensität stärker ausgeprägt. Die ermittelte mechanische Stärkebeschädigung lag unter dem Wert des Mehls aus konventionell angebauter Triticale. Der Unterschied zwischen den Mehlen aus Triticale verschiedener Anbauintensitäten war dabei geringer als bei den Roggenmehlen.

**Tabelle 49:** Inhaltsstoffverschiebung in den gesichteten Roggen- und Triticalemehlen

aus Anbauintensität		Roggen		Triticale	
		konventionell	reduziert	konventionell	reduziert
<b>Ausbeute</b> (%)	Ausgangsmehl	34,0	37,3	43,2	46,5
	Mehl gesichtet	25,6	28,3	29,5	32,4
<b>dm</b> (µm)	Ausgangsmehl	120,2	77,8	127,6	115,6
	Mehl gesichtet	29,4	30,1	21,5	23,0
<b>Rohprotein</b> (%i.Tr.)	Ausgangsmehl	5,4	5,9	9,8	10,6
	Mehl gesichtet	2,4	1,9	5,1	5,6
	Differenz	- 3,0	- 4,0	- 4,7	- 5,0
<b>Stärke</b> (%i.Tr.)	Ausgangsmehl	83,9	87,4	84,5	85,6
	Mehl gesichtet	89,4	91,8	92,0	91,2
	Differenz	+ 5,5	+ 4,4	+ 7,5	+ 5,6
<b>Stärkebe- schädigung</b> (BV/g <sub>Stärke</sub> )	Ausgangsmehl	5,8	2,2	2,6	2,3
	nachzerkleinert	8,8	4,9	3,7	3,0
	Mehl gesichtet	19,0	8,0	6,2	5,1
	Differenz	+ 13,2	+ 5,8	+ 3,6	+ 2,8
<b>Pentosan</b> (%i.Tr.)	Ausgangsmehl	4,0	4,4	3,8	3,6
	Mehl gesichtet	3,7	4,2	3,5	2,9
	Differenz	- 0,3	- 0,2	- 0,3	- 0,7
<b>Mineral- stoffe</b> (%i.Tr.)	Ausgangsmehl	0,506	0,469	0,655	0,562
	Mehl gesichtet	0,482	0,403	0,600	0,516
	Differenz	- 0,02	- 0,07	- 0,06	- 0,05

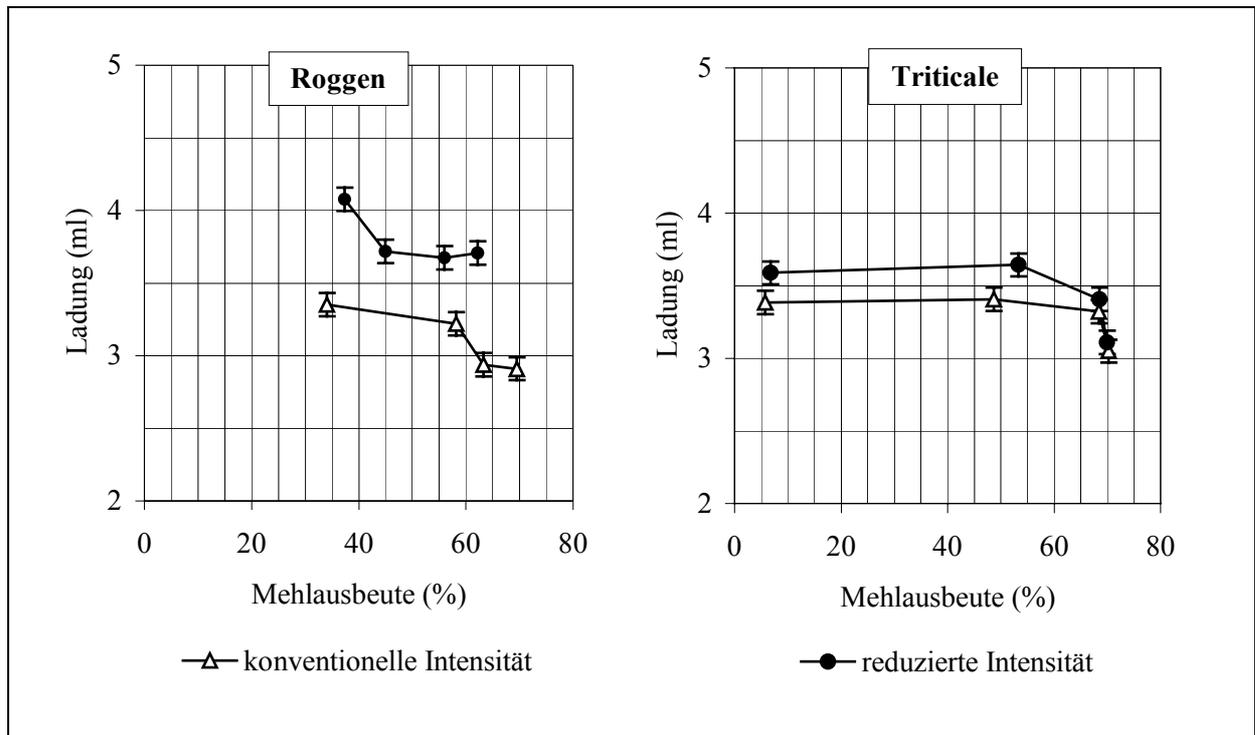
#### 4.6 Chemische Modifizierung der Roggen- und Triticalemehle

##### 4.6.1 Modifizierungsergebnisse in Abhängigkeit von der Anbauintensität

Als Rohstoff für die chemische Modifizierung wurden die Mehle der ausgewählten Vermahlungsvariante für Roggen und Triticale verwendet. Die Roggen- und Triticalemehle sind nach aufsteigendem Mineralstoffgehalt entsprechend dem jeweiligen Anfall in den Passagen gemischt und die Änderung der Ladung bei zunehmender Ausmahlung untersucht<sup>38</sup> worden (Abb.62). Übereinstimmend für Roggen und Triticale zeigten die Ergebnisse eine bessere Modifizierungseignung der Mehle von Getreide aus der reduzierten Anbauintensität. Diese Mehle erreichten höhere Ladungen als die Mehle von Getreide aus konventionellem Anbau. Dabei wiesen die modifizierten Mehle aus Roggen der reduzierten Anbauintensität in allen Vermahlungsstufen höhere Ladungen auf als die des konventionell angebauten Roggens. Bei Triticale verminderten sich die Unterschiede in den Modifikatladungen bei zunehmender

<sup>38</sup> Mehlmofifizierung und Ermittlung der Ladungen: Fachhochschule Anhalt, Bernburg

Ausmahlung. Ab einer Mehlausbeute von 60% wurden in den modifizierten Triticalemehlen beider Anbauintensitäten gleiche Ladungen ermittelt.

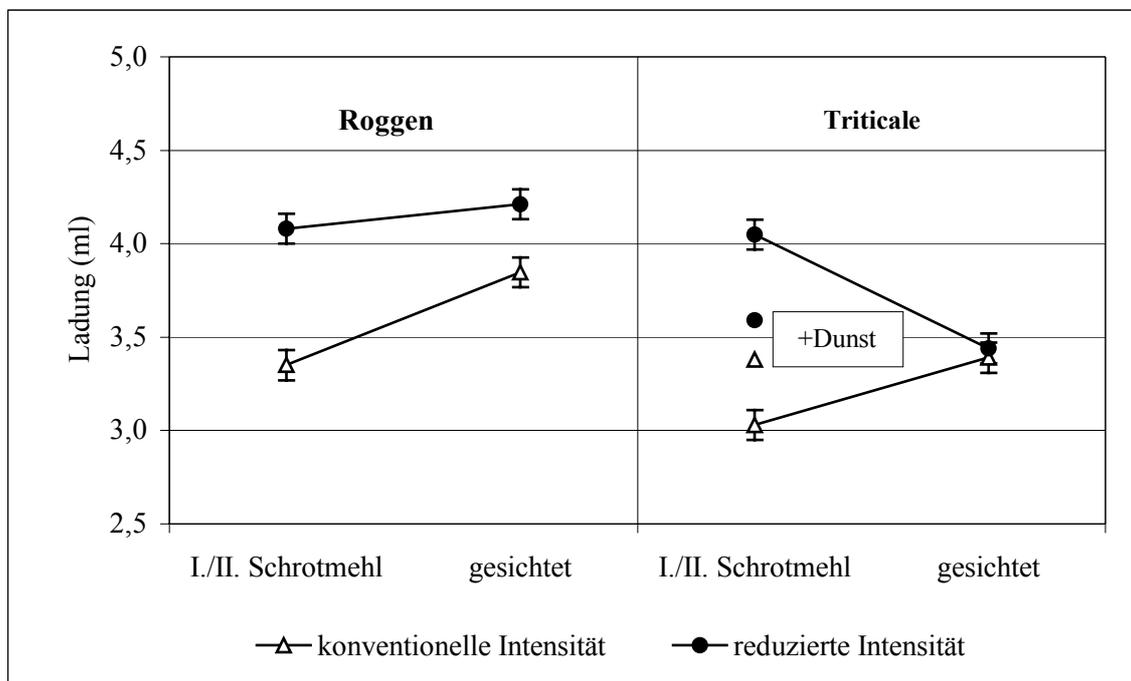


**Abb. 62:** Ladungen modifizierter Roggen- und Triticalemehle bei zunehmender Ausmahlung

Bei allen Vermahlungen nahmen die Ladungen in den modifizierten Mehlen bei steigender Mehlausbeute ab. Während bei Roggen schon ab einer Mehlausbeute von ca. 40% (reduzierte Intensität) bzw. 60% (konventionelle Intensität) eine signifikante Verringerung der Ladungshöhe eintrat, blieben die Ladungen der Modifikate aus Triticalemehl bis in den Bereich von 60-70% Mehlausbeute auf einem Niveau konstant. Ursache dafür war die angewandte Methode, die Mehle zur Modifizierung entsprechend der Ausbeute-Asche-Kurve aus der jeweiligen Vermahlung vorzubereiten. Das für die chemische Modifizierung vermutlich geeignetste Triticalemehl mit dem höchsten Stärkeanteil und dem niedrigstem Protein- und Pentosengehalt, das I./II. Schrotmehl, enthielt nur den zweitniedrigsten Mineralstoffanteil. Damit stand im Gegensatz zur Roggenvermahlung nicht das I./II. Schrotmehl, sondern der ebenfalls nach dem I./II. Schrot anfallende Dunst am Anfang der Ausbeute-Asche-Kurve. Infolge der Vermischung mit dem proteinreicheren Dunst kam das mögliche Ladungspotential der Triticalemehle nach dem I./II. Schrot nicht zum Tragen. Eine separate Modifizierung und Bestimmung der Ladungen<sup>39</sup> in den I./II. Schrotmehlen wurde für die Bewertung des Windsichtens vorgenommen (Abb.63). Das Schrotmehl von Triticale aus der reduzierten Anbauintensität ermöglichte eine signifikant höhere Modifikatladung als in Mischung mit dem Dunst. Hingegen ist

im modifizierten Schrotmehl von Triticale des konventionellen Anbaus eine verringerte Ladung festgestellt worden. Der Unterschied zwischen den erreichbaren Ladungshöhen nahm in den Triticalemehlmodifikaten in Abhängigkeit von der Anbauintensität des Getreides weiter zu.

Bei der chemischen Modifizierung der nachzerkleinerten und windgesichteten Mehle wurden in drei der vier Modifikate höhere Ladungen als in den Ausgangsmehlen erreicht (Abb.63). Eine Ausnahme bildete das windgesichtete Mehl von Triticale der reduzierten Anbauintensität; die ermittelte Ladungshöhe lag signifikant unter der des I./II. Schrotmehles vor der Fraktionierung. Das Abtrennen der proteinreichen Mehlfraktionen verbesserte das Modifizierungsergebnis vor allem in den Mehlen aus Roggen und Triticale des konventionellen Anbaus. Durch die Annäherung der Inhaltsstoffverteilung in den Mehlen aus Roggen und Triticale verschiedener Anbauintensitäten nach dem Windsichten nahmen auch die Unterschiede in der Modifizierbarkeit ab. Mit dem gesichteten Mehl von Roggen der reduzierten Anbauintensität wurde noch eine signifikant höhere Ladung als im Roggenmehl des konventionellen Anbaus erzielt. Zwischen den Triticalemehlmodifikaten war dagegen nach dem Windsichten keine signifikante Ladungsdifferenz mehr festzustellen.



**Abb. 63:** Ladungen modifizierter Roggen- und Triticalemehle vor und nach der Windsichtung

#### 4.6.2 Modifizierungsergebnisse in Abhängigkeit von den Mehlarakteristika

Mit zunehmender Ausmahlung des Getreidekorns von innen nach außen verringerte sich der Stärkehalt und erhöhten sich gleichzeitig die Anteile an Rohprotein, Mineralstoffen und Pentosan. Die veränderte Inhaltsstoffverteilung wirkte sich auf die Ladungshöhe des modifizierten Mehles aus. In modifizierten Mischungen aus kommerzieller Weizenstärke, feinzerkleinerter mineralstoffreicher Weizenkleie und Vitalgluten zeigte sich deutlich die ladungsvermindernde Wirkung der beiden Nichtstärkebestandteile (Tab. 50). An der einem Weizenmehl ähnlichsten Mischung 4 war zu erkennen, dass sich bei gleichzeitiger Erhöhung des Protein- und Mineralstoffanteils die negativen Einflüsse auf die Modifikatladung jedoch nicht summieren.

Der Einfluss der bei fortschreitender Bearbeitung zunehmenden mechanischen Stärkebeschädigung und der Verringerung der Partikelgröße wurde am Beispiel einer Weizenstärke untersucht. Zur Erhöhung der mechanischen Stärkebeschädigung ist das Material bis zu zweimal in einer Stiftscheibenmühle nachzerkleinert und anschließend mit Hilfe eines Luftstrahlsiebes fraktioniert worden. Während bei höheren Werten der Stärkebeschädigung eine Verringerung der Ladung in den Modifikaten festgestellt werden konnte, blieb die zunehmende Feinheit ohne Einfluss auf das Ergebnis.

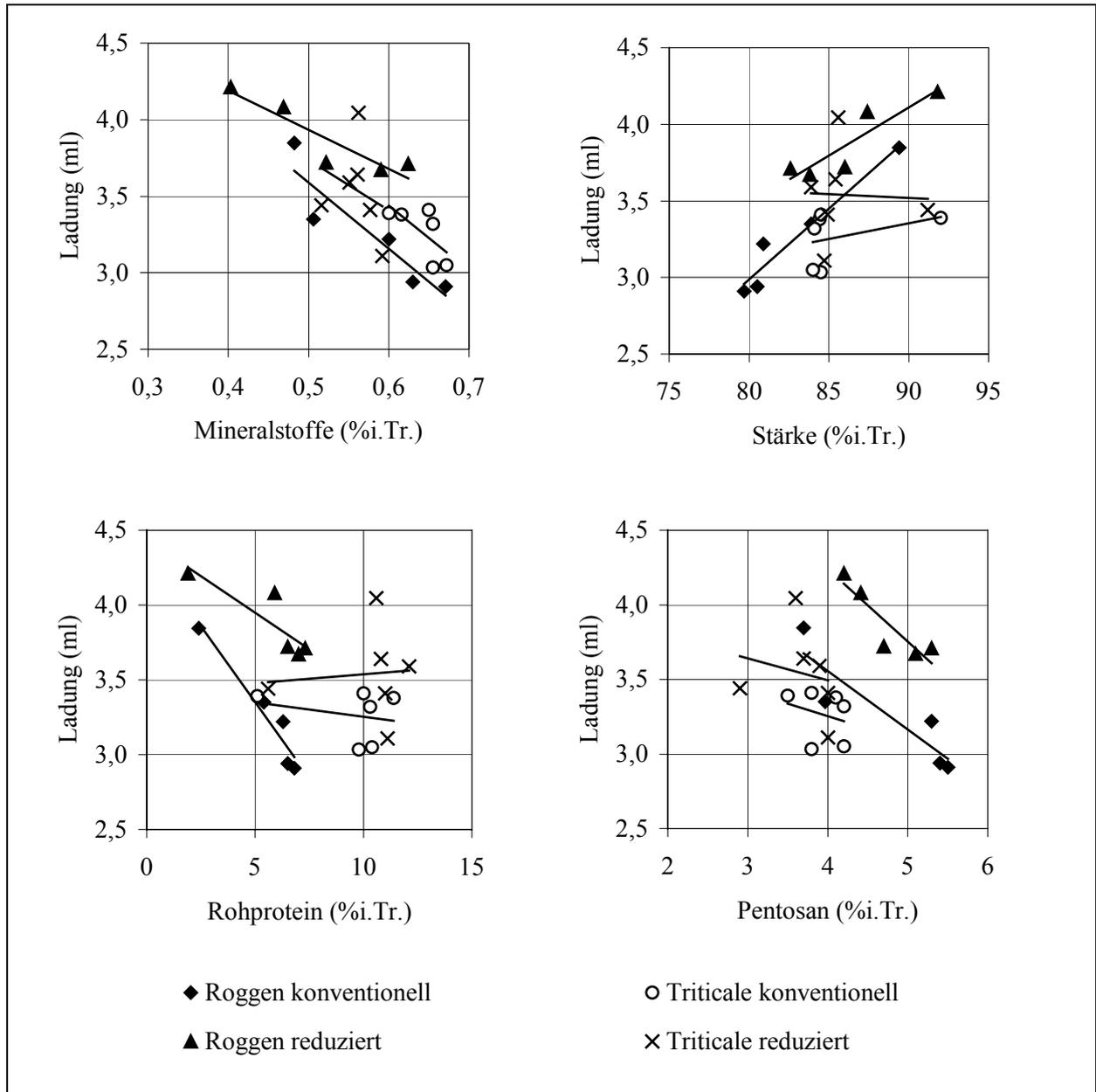
**Tabelle 50:** Ladungen modifizierter Modellmischungen mit Weizenstärke

<b>Variation der Inhaltsstoffe</b>					
Mischung	Weizenstärke (%)	Vitalgluten (%)	Mineralstoffe (%i.Tr.)	Ladung (ml)	Differenz
0	100	0	< 0,3	5,34	
1	85	15	< 0,3	4,24	-1,10*
2	100	0	0,5-0,8	4,88	-0,46*
3	100	0	> 0,8	4,46	-0,88*
4	85	15	0,5-0,8	4,49	-0,85*
<b>Variation der mechanischen Stärkebeschädigung</b>					
Mischung	Fraktion (>32 µm)	Fraktion (< 32 µm)	Stärkebeschädigung (BV/gMehl i.Tr.)	Ladung (ml)	Differenz
0	54,7	45,3	0,625	4,92	
1	100	0	0,652	5,06	+0,14
2	0	100	0,652	4,92	±0
3	0	100	0,925	4,62	-0,30*
4	0	100	1,600	4,68	-0,24*

\*: signifikante Abweichungen > 0,16 ml

#### 4.6.3 Diskussion: Einflussfaktoren der Modifizierbarkeit

Die Modifizierungsergebnisse der Mehle aus der Vermahlung und Windsichtung mit einer komplexeren Zusammensetzung unterstützen die an einzelnen Inhaltsstoffen festgestellten Zusammenhänge nur bedingt. In den Roggenmehlen korrelierten die Ladungen gut mit den ermittelten Inhaltsstoffgehalten (Abb.64). Für die Triticalemehle konnte der Zusammenhang zwischen den Inhaltsstoffen und der erreichten Ladung im Modifikat nicht belegt werden. Die Korrelationskoeffizienten lagen, bis auf eine Ausnahme, unter 0,5 (Tabelle 51).



**Abb. 64:** Zusammenhang zwischen Inhaltsstoffgehalt und Ladung der modifizierten Roggen- und Triticalemehle

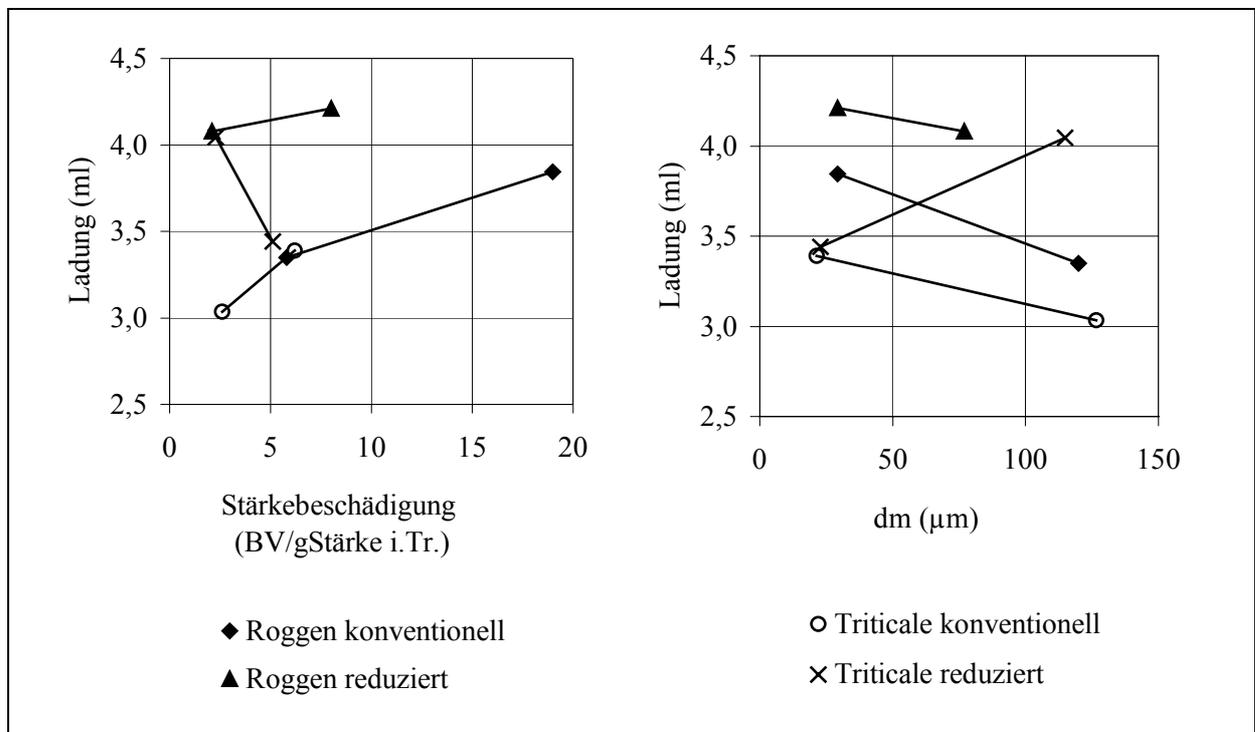
**Tabelle 51:** Richtung und Stärke des Zusammenhangs zwischen den Mehlinhaltsstoffen und der Ladungshöhe in den Mehlmodifikaten

Anbauintensität	Roggenmehle				Triticalemehle			
	konventionell		reduziert		konventionell		reduziert	
Ladung und	r*	R <sup>2**</sup>	r*	R <sup>2**</sup>	r*	R <sup>2**</sup>	r*	R <sup>2**</sup>
-Mineralstoffgehalt	-0,92	0,84	-0,92	0,84	-0,66	0,44	-0,27	0,07
-Stärkegehalt	0,97	0,94	0,91	0,82	0,37	0,14	-0,04	0,00
-Rohproteingehalt	-0,96	0,93	-0,86	0,74	-0,25	0,06	0,09	0,01
-Pentosengehalt	-0,90	0,80	-0,89	0,80	-0,27	0,07	-0,20	0,04

\*: Korrelationskoeffizient

\*\* : Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden

Der Einfluss der mechanischen Stärkebeschädigung und der Teilchengröße in den zu modifizierenden Mehlen auf die Ladungshöhe ist auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse nicht zu beurteilen. In den Modellmischungen war eine negative Wirkung der mechanischen Stärkebeschädigung sowie kein Einfluss der Partikelgröße auf das Modifizierungsergebnis vermutet worden. Die bei der Vermahlung in der Stiftmühle nachzerkleinerten und danach gesichteten Mehle wiesen trotz zunehmender Stärkebeschädigung meist höhere Ladungen auf als die Ausgangsmehle (Abb.65).



**Abb. 65:** Zusammenhang zwischen der mechanischen Stärkebeschädigung sowie der Teilchengröße und der Ladung modifizierter Roggen- und Triticalemehle

Die Änderung der Inhaltsstoffverteilung in den Sichtfraktionen übte eine größere Wirkung auf das Modifizierungsergebnis aus als eventuell vorhandene Einflüsse der mechanischen Stärkebeschädigung oder Teilchengröße. Die wenigen Ergebnisse ließen keine Aussagen über die Einzelwirkungen der Inhaltsstoffe oder anderer Stoffeigenschaften auf die Modifizierung zu. Auch möglicherweise vorhandene Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Einflussgrößen waren nicht zu bestimmen.

## 5 Schlussfolgerungen

Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand die Frage, wie sich aus Roggen und Triticale geeignete Ausgangsmehle für die Non-Food-Anwendung gewinnen lassen. Erkenntnisse über die Beeinflussung der Korn- und Mahleigenschaften bei unterschiedlicher Anbauintensität lieferten die Untersuchung der Roggen- und Triticalevollkornproben verschiedener Sorten aus dreijährigen Anbauversuchen<sup>40</sup>. Die extensive und auch noch die reduzierte Anbauintensitätsstufe brachten aufgrund der im Vergleich zum konventionellen Anbau verringerten exogenen Stickstoffzufuhr verbesserte Rohstoffqualitäten für den Non-Food-Einsatz hervor. Mit Reduzierung der Stickstoffdüngung nahmen die Rohproteingehalte im Korn ab, die Stärkeanteile zu. Die Pentosangehalte dagegen blieben unverändert. Als Folge der verminderten Proteineinlagerung sanken mit dem Rückgang der Stickstoffgabe auch die Korndichten. Das lockere Korngefüge führte zu höheren Mehlanfällen in den Standardvermahlungen; die Mehle waren stärkereicher und proteinärmer. In Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit ist ein an die Getreideart angepasster optimierter Anbau reduzierter Intensität den anderen Anbaustufen vorzuziehen. Er verursachte die niedrigsten Produktionskosten bei noch guten Erträgen und verringerten Aufwendungen.

Als mögliche Verfahrensvarianten für das Aufschroten des Korns wurden die zweistufige Walzenstuhlvermahlung mit Absiebung des Feingutes vor dem II. Schrot, die Doppelmahlung und die Prallvermahlung in der Stiftmühle von im Walzenstuhl gequetschter Roggen- und Triticalekörner untersucht und dafür jeweils optimale Zerkleinerungsparameter ermittelt. Gegenüber dem Schroten im Walzenstuhl zeichnete sich die Variante Quetschen und Prallvermahlen durch eine effektivere Umsetzung der aufgewandten Zerkleinerungsarbeit in die Verringerung der Teilchengröße aus. Jedoch die intensivere Zerkleinerung auch der Schaleschichten führte zum Anstieg des Mineralstoffgehalts in allen Fraktionen, besonders deutlich in den Grießen und Übergängen >630 µm. Das Mahlergebnis ließ sich durch die Erhöhung des Feuchteanteils in den gequetschten Roggen- und Triticalekörnern verbessern. Bei höherer Vermahlungsfeuchte wurden die zäh-plastischeren Schaleschichten in geringerem Maße zerkleinert, und der Vorteil des darauf hin abnehmenden Mineralstoffgehalts im Feingut überwog den Nachteil der gesunkenen Ausbeute. Bei Triticale bewirkte zudem die Feuchteerhöhung ein mürberes Endosperm und einen zunehmenden Mehlanfall. Dennoch führte die selektivere Vermahlung im Walzenstuhl zu günstigeren Mahlergebnissen mit mineralstoffärmeren Mehlen und Dunsten als die Kombination aus Quetschen im Walzenstuhl und Prallzerklei-

---

<sup>40</sup> Verbundvorhaben: Einfluss des low input-Anbaus auf die Applikationseigenschaften von Getreide im non food-Bereich, gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., FKZ: 95NR088-F, 1996-1999

nern. Zudem zeigten die Ergebnisse der chemischen Modifizierung eine signifikant geringere Eignung des prallvermahlenden Mehles an.

Die optimierten Einstellungen für das Schrotten im Walzenstuhl zielten durch niedrige Durchsätze, enge Mahlspalte und hohe Walzenumfangsgeschwindigkeiten auf eine intensive Zerkleinerung hin. Dabei ist die Doppelmahlung der Schrotführung mit Zwischenabsiebung des Feingutes vorzuziehen; es fallen mehr Mehle und Dunste mit geringerem Mineralstoffgehalt an. Weitere Vorteile lagen in der Einsparung der Klassierung nach dem I. Schrot und im verringerten Griebenfall, so dass die nachfolgenden Bearbeitungsstufen verkürzt werden können.

Auch für die Griebmahlung ist die Zerkleinerung im Walzenstuhl geeigneter als die Prallvermahlung in der Stiftmühle. Bei der Griebmahlung in der Stiftmühle bewirkte eine wachsende Beanspruchung durch gesteigerte Umfangsgeschwindigkeiten des Stiftrotors zwar einen zunehmenden Mehlanfall, ohne dass der Mineralstoffgehalt der Mehle signifikant anstieg; so ließen sich bei der Prallvermahlung mit maximaler Intensität hohe Mehlausbeuten bei effektiverer Zerkleinerung erzielen. Die Mineralstoffgehalte lagen dabei aber über den Werten der Walzenstuhlmehle. Der entscheidende Nachteil war jedoch die signifikant niedrigere Modifizierbarkeit der Prallmehle.

Die optimierten Parameter der Griebmahlung im Walzenstuhl bewirkten durch niedrige Durchsätze, hohe Walzenumfangsgeschwindigkeiten und Voreilungen in Verbindung mit engen bis mittleren Mahlspalten eine intensive Zerkleinerung mit hohem Mehlanfall. Bei Triticalegrieß ist aufgrund der hohen Auflösbarkeit der Endospermpartikel eine Stufe der Griebmahlung ausreichend. Die mineralstoffreichen Übergänge der Triticalegrießmahlung fielen in geringer Menge an, eine weitere Ausmahlung erscheint nicht sinnvoll. Für die 2. Roggengrießmahlung erwies sich die Doppelmahlung als ungeeignete Variante. Die hohe Ausgangsfeinheit der Grieße sowie der verbliebene Feinanteil im Aufgabegut behinderten die Zerkleinerung derart, dass mit der Doppelmahlung die Mehlausbeuten der zweistufigen Mahlung mit Mehlabseibung nicht zu erreichen und die Mehle mineralstoffreicher waren. Die besten Ergebnisse der optimierten 2. Roggengrießmahlung sind bei hohen Walzenumfangsgeschwindigkeiten und einem engen Mahlspalt zu erhalten.

Die Vermahlung von Roggen und Triticale unterschiedlicher Anbauintensität unter optimierten Zerkleinerungsbedingungen im Technikummaßstab bewies die schon in den Standardmahlversuchen festgestellten verbesserten Mahleigenschaften der Getreide aus dem Anbau reduzierter Intensität. Sehr günstige Mahleigenschaften wurden bei Triticale festgestellt. Die einfachere Abtrennung der Schaleschichten sowie eine hohe Auflösbarkeit des Mehlkörpers

ermöglichte eine kürzere Vermahlung mit drei Schrotungen und einer Grießmahlung. Roggen benötigte, um eine ähnliche Mehlausbeute zu erreichen, vier Schrotpassagen und zwei Grießmahlungen. Die weichere Beschaffenheit der Körner aus dem Anbau reduzierter Intensität gegenüber dem konventionell angebauten Getreide führten bei Roggen und Triticale zu steigenden Mehlanfällen und niedrigeren Mineralstoffgehalten in den ersten Schrotpassagen auf Kosten des Grießanteils. Durch den niedrigeren Mineralstoffgehalt der Mehle ergab sich dann ein günstigerer Vermahlungsverlauf für Roggen und Triticale reduzierter Anbauintensität, auch wenn sich die Gesamtmehlausbeute aufgrund des reduzierten Grießmehlanfalls nicht über das Ergebnis der konventionellen Anbauvariante steigern ließ. Bei der Vermahlung des Roggens aus dem Anbau reduzierter Intensität wirkte sich dessen Kleinkörnigkeit mit vermindertem Mehlkörperanteil, verbunden mit verstärkt zähen Eigenschaften des Korns, negativ auf die Mehlausbeute aus.

Die günstigsten Voraussetzungen für den Non-Food-Einsatz besaßen die Schrotmehle aus der Doppelmahlung im Walzenstuhl. Sie wiesen den jeweils höchsten Stärkegehalt sowie den niedrigsten Rohprotein- und Pentosangehalt auf und erreichten bei der chemischen Modifizierung die besten Resultate. Die Modifizierungseignung der Mehle nahm mit steigender Ausmahlung ab. Dabei erbrachten die Mehle reduzierter Anbauintensität gegenüber dem Vergleichsmehl konstant höhere Modifikatladungen.

Eine Verbesserung der Modifizierungsfähigkeit der Getreidemehle lässt sich mittels Windsichten erreichen. Die Abtrennung proteinreicher Fraktionen führte zur Erhöhung des Stärkegehalts. In den Mehlen aus Roggen und Triticale der beiden untersuchten Anbauintensitäten bewirkte das Windsichten eine Angleichung der Inhaltsstoffverteilung. Damit nahmen auch die Unterschiede in der Modifizierbarkeit in Abhängigkeit von der Anbauintensität ab. Eine Verbesserung der Modifizierbarkeit wurde vor allem in den Mehlen aus Getreide des konventionellen Anbaus festgestellt.

Die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Eigenschaften der Mehle und ihrer Modifizierbarkeit konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht differenziert ermittelt werden. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass vorrangig die Inhaltsstoffverteilung im Mehl, primär der Stärkegehalt, das Modifizierungsergebnis bestimmt. Weiterhin konnte vermutet werden, dass sich mit steigender mechanischer Beschädigung der Stärke die erreichbaren Modifikatladungen vermindern. Zum Einfluss der Korngrößenverteilung im Mehl auf das Modifizierungsergebnis war keine Aussage möglich.

Aus den Untersuchungsergebnissen lässt sich der Schluss ziehen, dass der Vermahlungsablauf auf die Gewinnung eines möglichst hohen Anteils an Mehl aus dem Korninneren ausgerichtet sein muss. Dafür war die Doppelmahlung im Walzenstuhl durch das Prinzip des Aufschrotens des Korns von „innen nach außen“ am besten geeignet. Auch für die Grießvermahlung erwies sich die selektivere Zerkleinerung im Walzenstuhl als günstigste Variante. Die Vermahlung von Roggen und Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität erbrachte stärkereichere Mehle in höherer Ausbeute mit besseren Modifizierungseigenschaften als konventionell angebautes Getreide. Bei weiterer Ausmahlung des Korns nahm mit dem Stärkegehalt der Mehle deren Modifizierungseignung signifikant ab. Für die Herstellung von Roggen- und Triticalemehl als Rohstoff für die chemische Modifizierung waren daher Mehlausbeuten bis nur ca. 60% sinnvoll. Bei normaler Kornausbildung von Roggen und Triticale ist dafür eine sehr kurze Vermahlung, bestehend aus dem I/II. Schrot und einer Grießmahlung, ausreichend. Eine weitere Stärkeanreicherung und Proteinverminderung durch das Windsichten der stärkereichen Mehle verbessert die Modifizierbarkeit nur in geringem Maße.

## 6 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war, einen optimierten Vermahlungsablauf für die Gewinnung von Roggen- und Triticalemehl als Rohstoff der chemischen Modifizierung zu entwickeln. Dabei stand im Vordergrund, die Eignung von Roggen und Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität dafür zu untersuchen. Für den Einsatz der chemisch modifizierten Getreidemehle als kationischen Zuschlagstoff in der Papierfertigung sind ein möglichst hoher Stärkegehalt sowie niedrige Protein- und Mineralstoffgehalte im Mahlprodukt anzustreben.

Die Auswertung der Anbauversuche<sup>41</sup> belegte, dass im Vergleich zum konventionellen Anbau mit der reduzierten Intensität eine Verbesserung der Korn- und Mahleigenschaften erreicht werden kann. In der für Roggen und Triticale jeweils optimalen reduzierten Intensitätsstufe lagen trotz niedrigerer Erträge die Produktionskosten bei geringeren Aufwendungen unter denen des konventionellen Anbaus. Die niedrigere Bestandsdichte bot für die Kornausbildung günstigere Bedingungen und die reduzierte Stickstoffzufuhr führte zur Verschiebung der Protein-Stärke-Verteilung im Korn zu Gunsten der Stärke. Im Standardmahlversuch lieferten Roggen und Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität um 1-2% höhere Mehlanfälle. Die Mehle enthielten etwa 1% mehr Stärke und waren um mindestens 2% proteinärmer als die Mehle des konventionellen Anbaus.

In Mahlversuchen wurde mit Hilfe statistischer Versuchspläne untersucht, mit welchen Verfahrensvarianten und unter welchen Zerkleinerungsparametern eine hohe Ausbeute an Roggen- und Triticalemehlen mit den gewünschten Eigenschaften zu erreichen ist. Die Vermahlung im Walzenstuhl erwies sich gegenüber der Prallvermahlung als das geeignetere Zerkleinerungsprinzip. Dabei führte die Doppelmahlung beim Aufschroten des Korns zur Erhöhung der Ausbeute an mineralstoffärmeren Zwischenprodukten und zur Verkürzung des Diagramms. Anhand der Optimierungsergebnisse ist jeweils ein Mahlverfahren für Roggen und Triticale vorgeschlagen und mit Getreide aus dem Anbau konventioneller und reduzierter Intensität im kleintechnischen Maßstab durchgeführt worden. Die Roggenvermahlung bestand aus vier Schrotpassagen sowie zwei Gießmahlungen und führte zu einer Mehlausbeute von etwa 70% bei einem Mineralstoffgehalt von 0,67%i.Tr.. Der im betreffenden Erntejahr kleinvüchsige Roggen aus dem Anbau reduzierter Intensität lieferte mit 62% eine niedrigere Mehlausbeute. Das Roggenmehl war aber mit einem Mineralstoffgehalt von 0,62%i.Tr. ascheärmer. Die im Vergleich zu Roggen günstigeren Mahleigenschaften von Triticale ermöglichten Mehlausbeuten von ca. 70% schon nach drei Schrotpassagen und einer Gießmahlung.

---

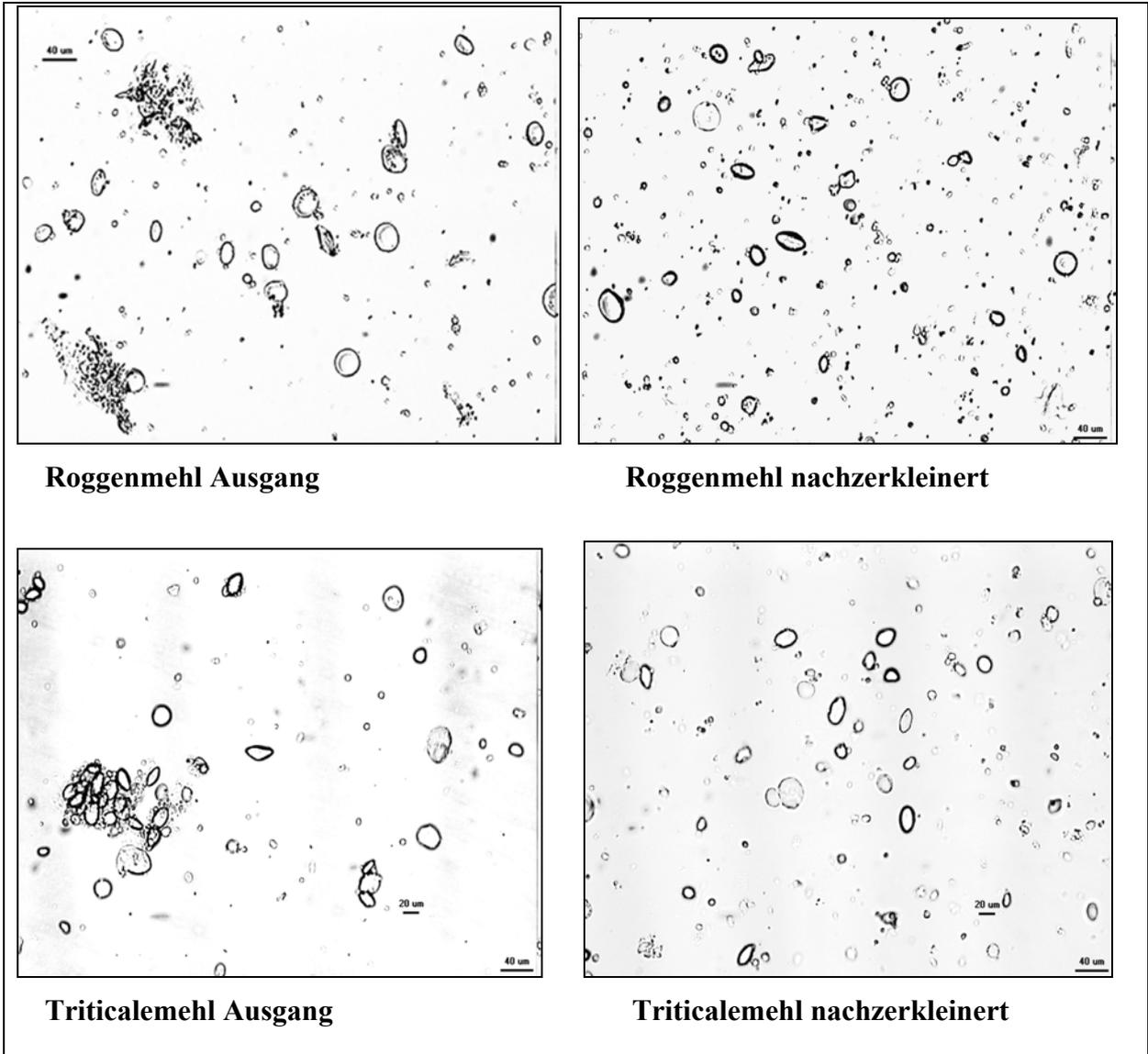
<sup>41</sup>Verbundvorhaben: Einfluss des low input-Anbaus auf die Applikationseigenschaften von Getreide im non food-Bereich, gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., FKZ: 95NR088-F, 1996-1999

Auch bei Triticale war das Mehl reduzierter Anbauintensität mit 0,59% i.Tr. ascheärmer als das konventionelle Mehl mit 0,67% i.Tr.. Die verbesserten Mahleigenschaften der Getreide aus dem Anbau reduzierter Intensität zeigten sich insbesondere in den ersten Zerkleinerungsstufen. Bei der Vermahlung von Getreide des reduzierten Anbaus fielen um 1% (Triticale) bis 3,5% (Roggen) stärkereiche Mehle in höherer Ausbeute an. Diese Roggen- und Triticalemehle erreichten bei der chemischen Modifizierung signifikant bessere Ergebnisse gegenüber Mehl aus Getreide konventionellen Anbaus. Die Modifizierungseignung der Mehle nahm mit steigender Ausmahlung ab. Bei Roggen verschlechterte sich das Modifizierungsergebnis bei Mehlausbeuten über ca. 40 bis 55%. Die Modifizierungseigenschaften der Triticalemehle blieben bis zu einer Ausbeute von 68% auf gleichem Niveau. Die Modifizierungsergebnisse vor allem der konventionellen Mehle ließen sich durch die weitere Stärkeanreicherung und Proteinverminderung mittels Windsichten tendenziell verbessern. Die Abtrennung proteinreicher Mehlfraktionen führte zu einer Angleichung der Inhaltsstoffverteilung zwischen den Mehlen der Anbauintensitäten und zu Stärkegehalten von 89 bis 92% i.Tr..

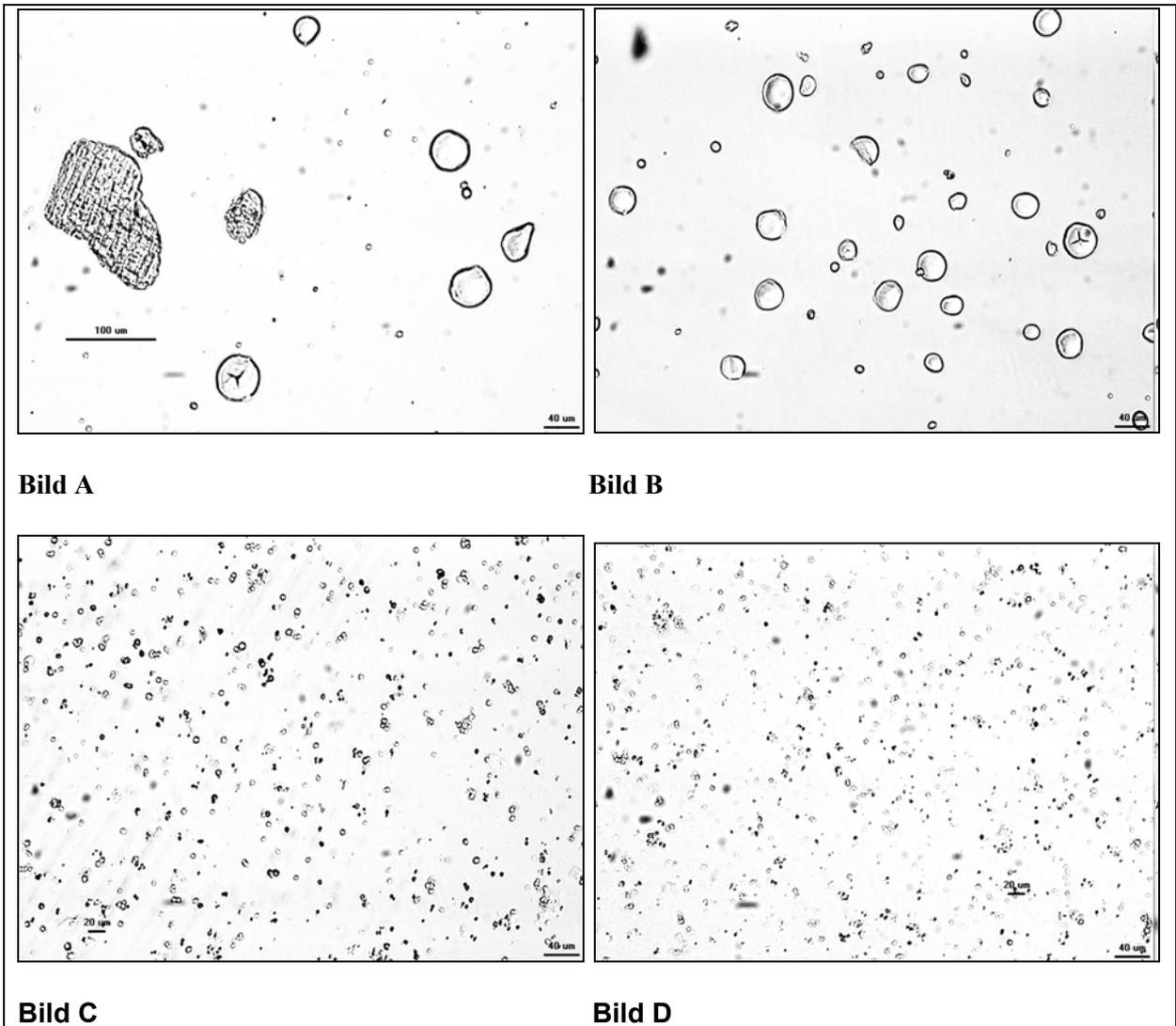
Insgesamt zeigten die Untersuchungen, dass eine kurze und intensive Vermahlung im Walzenstuhl von Roggen und Triticale aus dem Anbau reduzierter Intensität mit weicherer Kornbeschaffenheit und höherem Stärkegehalt, ausgerichtet auf einen hohen Anfall an stärkereichem Schrotmehl, die qualitativ geeignetsten Mehle für die chemische Modifizierung liefert. Noch offen blieben die quantitativen Wirkungen der Inhaltsstoffe auf das Modifizierungsergebnis, sowie eventuelle Einflüsse, z.B. der mechanischen Stärkebeschädigung und der Partikelgröße in den Mehlen, auf die Eignung zur chemischen Modifizierung. Erst bei Kenntnis dieser Zusammenhänge können spezielle Anforderungen an Roggen- und Triticalemehl genauer definiert und die Mahlverfahren dementsprechend weiter verbessert werden.

## 7 Anhang

## Mikroskopische Aufnahmen



**Abb. A1:** Roggen- und Triticalemehle (reduzierte Anbauintensität) 100fache Vergrößerung - vor und nach der Nachzerkleinerung in der Stiftmühle

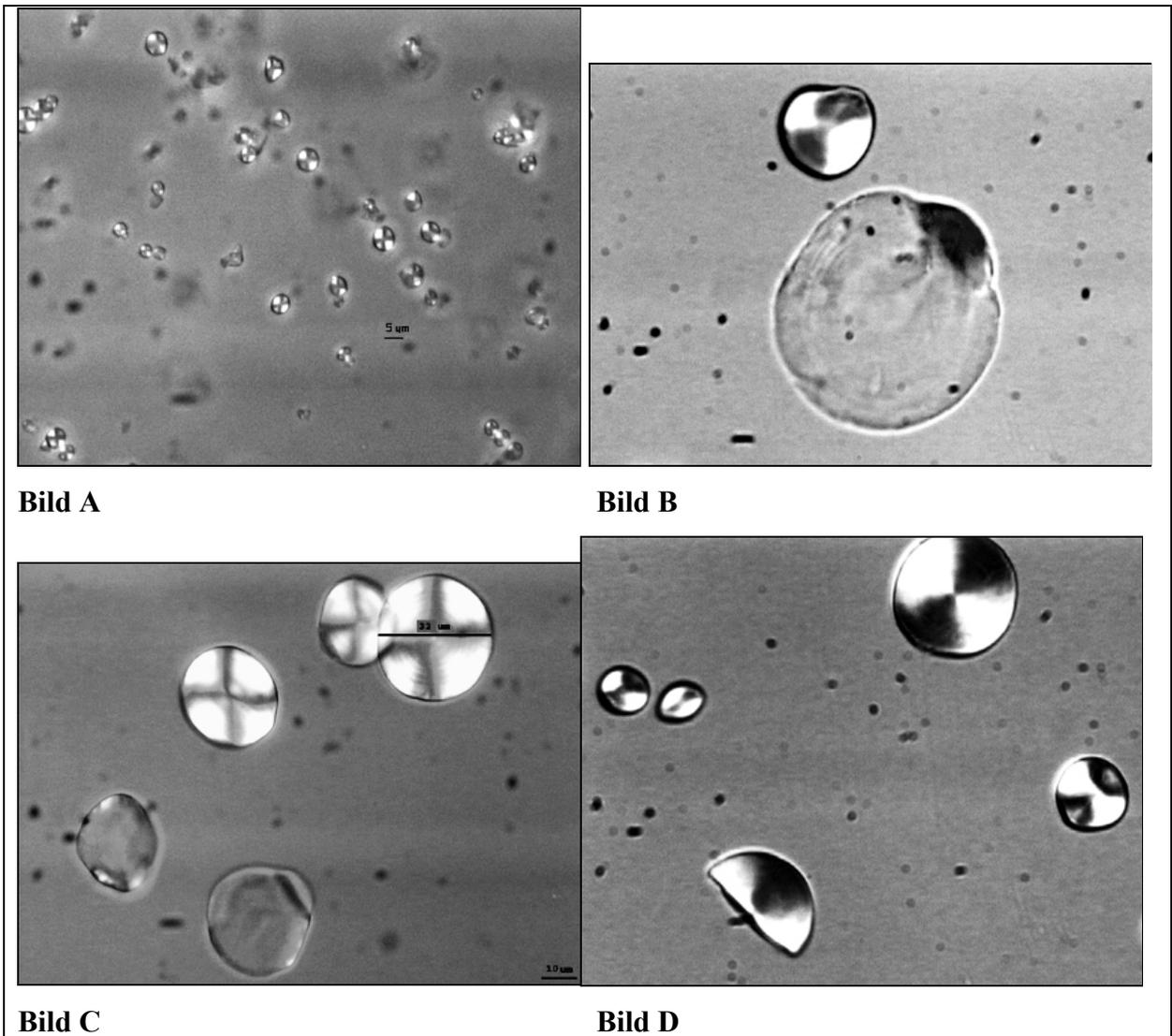


**Abb. A2:** Sichtfraktionen 100fache Vergrößerung – Mehl aus Roggen reduzierter Anbauintensität

Bild A: 1.Grobgut,  $d_{50}=106 \mu\text{m}$ ; große, freiliegende Stärkekörner neben Kleinkornstärken und Kleieilchen

Bild B: 2.Grobgut,  $d_{50}=30 \mu\text{m}$ ; hauptsächlich freiliegende große und mittelgroße Stärkekörner, teilweise beschädigt, seltener kleinkörnige Stärken

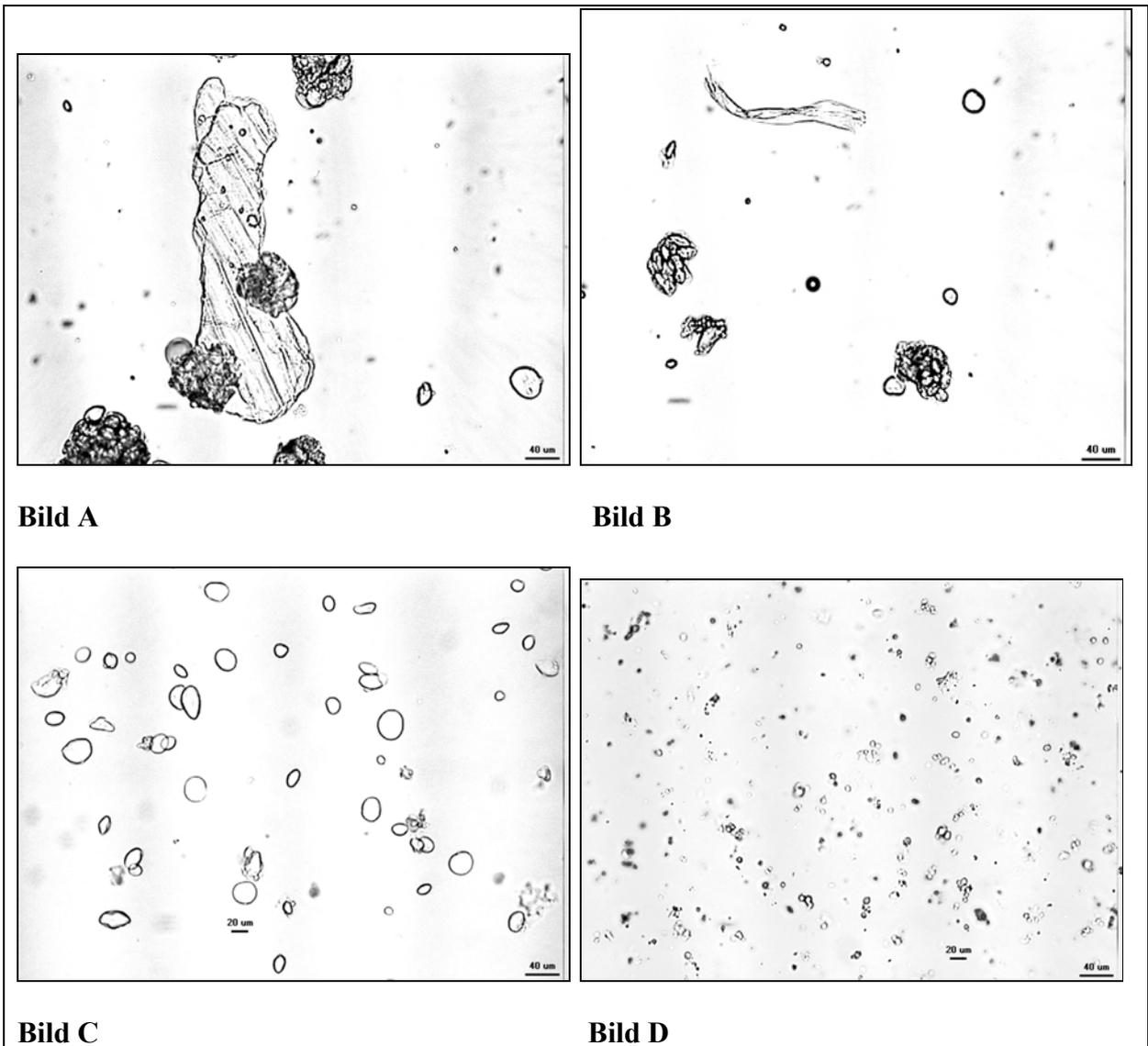
Bild C und D: Feingut,  $d_{50}=7 \mu\text{m}$ ; Kleinkornstärken, auch miteinander verbundene, protein- und mineralstoffreiche Zellwandreste und Agglomerate



**Abb. A3:** Sichtfraktionen 400fache Vergrößerung mit Polarisationsfilter – Mehl aus Roggen reduzierter Anbauintensität

Bild A: Feingut,  $d_{50}=7 \mu\text{m}$ ; im polarisierten Licht sichtbare Kleinkornstärken

Bild B, C und D: 2.Grobgut,  $d_{50}=30 \mu\text{m}$ ; neben intakten Stärkekörnern mit vollständigem Polarisationskreuz unterschiedlich mechanisch beschädigte Stärken: ohne äußere Beschädigung kein oder partiell auftretendes Polarisationskreuz, intakte Doppelbrechung bei gebrochenem Stärkekorn

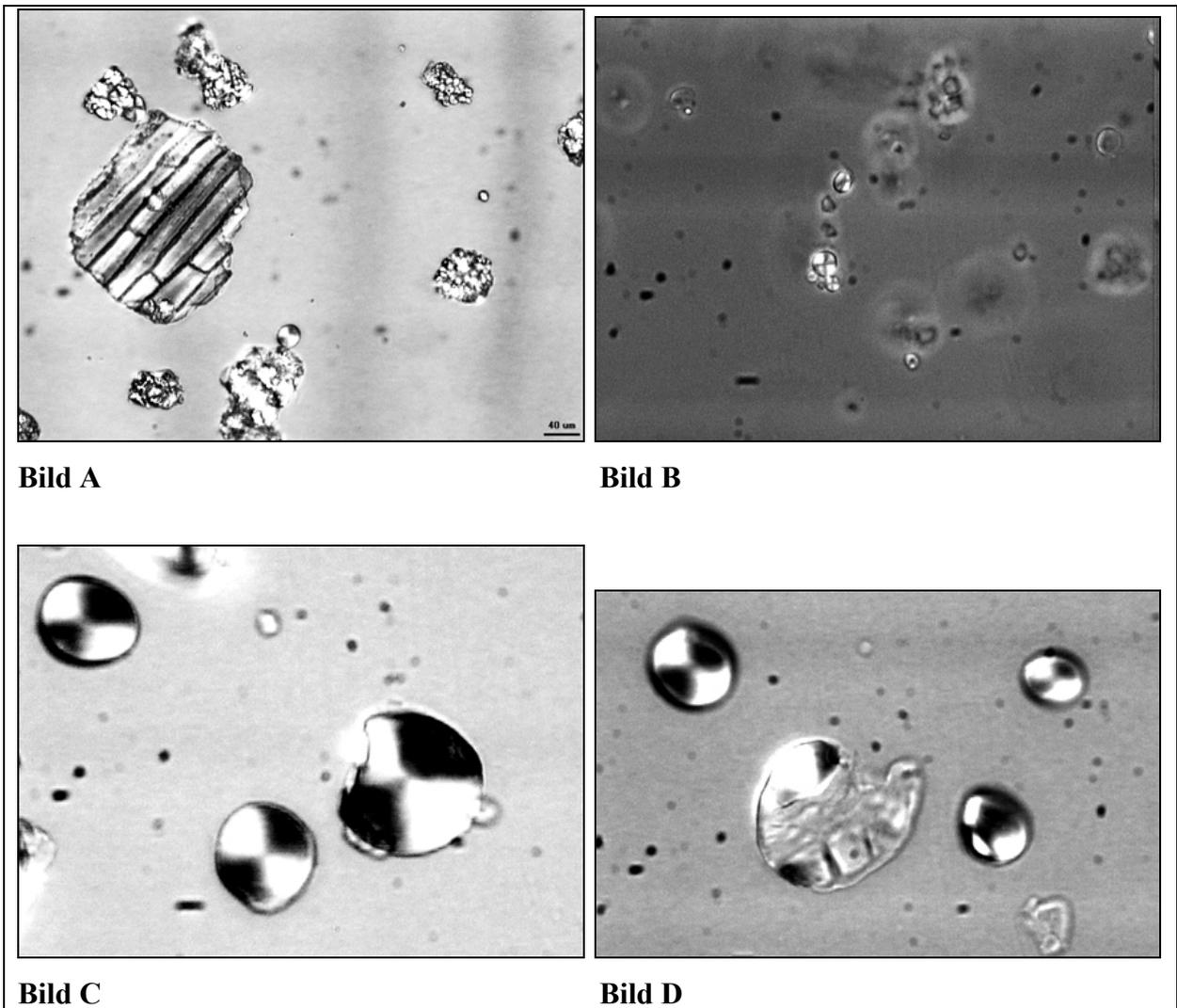


**Abb. A4:** Sichtfraktionen 100fache Vergrößerung - Mehl aus Triticale reduzierter Anbauintensität;

Bild A und B: 2.Grobgut,  $d_{50}=96 \mu\text{m}$ ; wenige freiliegende Stärkekörner, meist noch nicht aufgelöste Mehlkörperzellen mit eingebetteten Stärken, Schaleteilchen

Bild C: 3.Grobgut,  $d_{50}=23 \mu\text{m}$ ; freie große und mittlere Stärkekörner, oft oval, auch kleinere Agglomerate

Bild D: Feingut,  $d_{50}=9 \mu\text{m}$ ; zusammenhängende kleine, seltener mittelgroße Stärkekörner, protein- und mineralstoffreiche Agglomerate und Zellwandbestandteile

**Bild A****Bild B****Bild C****Bild D**

**Abb. A5:** Sichtfraktionen 100/400fache Vergrößerung mit Polarisationsfilter – Mehl aus Triticale reduzierter Anbauintensität;

Bild A: 100fach, 2.Grobgut,  $d_{50}=96 \mu\text{m}$ ; auch mit Polarisationsfilter sind die Stärkekörner in den Agglomeraten nicht eindeutig zu erkennen

Bild B: 400fach, Feingut,  $d_{50}=9 \mu\text{m}$ ; Kleinkornstärken

Bild C und D: 400fach, 3.Grobgut,  $d_{50}=23 \mu\text{m}$ ; freiliegende größere Stärkekörner, mit Schädigung der Kornform und dabei erhaltener bzw. noch teilweise vorhandener Doppelbrechung des polarisierten Lichtes

## 8 Literaturverzeichnis

- 1 Frede, W. (Hrg.):  
Taschenbuch für Lebensmittelchemiker und –technologien. Band 1. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1991
- 2 IENICA (Interactive European Network for Industrial Crops and their Applications):  
Summary Report for European Union. Carbohydrate Crops. August 2000. [online]  
<http://www.csl.gov.uk/ienica> (Stand 08.02.2002).
- 3 Pedersen, S.M.:  
Economic analysis of dry milled and chemically modified wheat flour as a starch product in the paper industry. In: Proceedings from the Conference: Fourth European Symposium on Industrial Crops and Products Together with the Sixth Symposium on Renewable Resources for the Chemical Industry, 23-24 March 1999 Bonn, Germany.
- 4 Tegge, G.:  
Stärke und Stärkederivate. Behr's Verlag Hamburg, 1984
- 5 Gruber, E.:  
Entwicklung von modifizierten Zellstoffen und Stärken zur Entfernung von Störstoffen aus Papier-Fabrikationswässern bzw. zur Fixierung im Papier. Abschlussbericht über das AiF-Projekt Nr. 11421N, Technische Universität, Darmstadt, 2000
- 6 Drews, E.:  
Mahleigenschaften in Abhängigkeit von der Kornbeschaffenheit und ihre Auswirkungen auf die Mehlqualität. Mühle und Mischfüttertechnik 116 (1979) 23, S. 311-316
- 7 Spicher, G.:  
Handbuch Sauerteig: Biologie, Biochemie, Technologie. Behr's Verlag Hamburg, 1993
- 8 Weipert, D.:  
Mahlverhalten von Roggen und Trockenseparierung stärke- und quellstoffreicher Mahlprodukte als Ausgangsrohstoffe. Die Mühle und Mischfüttertechnik 135 (1998) 7, S. 209-213
- 9 Zimmermann, G.:  
Ertrags- und Qualitätseigenschaften von Weizen bei reduziertem Düngungs- und Pflanzenschutz Aufwand. Getreide Mehl und Brot 45 (1991) 11, S. 323-327
- 10 Brümmer, J.-M. und W. Seibel:  
Extensivierter Weizenanbau und seine Auswirkungen auf die Müllerei. Getreide Mehl und Brot 46 (1992) 4, S. 99-102
- 11 Rychener, M. und J.-D. Tieche:  
Vergleich der Qualität von Weizen aus konventionellem und extensivem Anbau. Getreide Mehl und Brot 50 (1996) 4, S. 201-208
- 12 Statistisches Bundesamt:  
Landwirtschaft Deutschlands weiterhin in strukturellem Wandel. Amtliche Statistik Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. [online] Aktuelle Ergebnisse im Überblick.  
<http://www.destatis.de/> (Stand 15.06.2003).
- 13 Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL):  
Vorläufige Ergebnisse der Besonderen Ernteterminung. [online]. Mitteilung vom 30.08.2001.  
<http://www.verbraucherministerium.de> (Stand 07.02.2002).

- 14 Informationsdienst der Landwirtschaftsverwaltung Baden-Württemberg:  
Agrarmärkte 2002. [online]. Mitteilung vom 28.10.2002.  
<http://www.infodienst-mlr.bwl.de> (Stand 29.06.2003).
- 15 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.:  
Nachwachsende Rohstoffe-alter Hut auf neuen Köpfen. [online].  
<http://www.fnr.de> (Stand 07.02.2002).
- 16 Fleischer, L.-G.:  
Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe in der Energie-  
und Stoffwirtschaft. In: Kolloquiumsbeiträge Nachwachsende Energieträger und Roh-  
stoffe, Fachbereich Lebensmitteltechnologie, Humboldt-Universität zu Berlin, 1992
- 17 Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern:  
Agrarkonzept 2000. Die Pflanzenproduktion auf Grenzstandorten. Nachwachsende Roh-  
stoffe als Anbaualternativen. [online]. Informationsdienst.  
<http://www.landwirtschaft-mv.de> (Stand 08.02.2002).
- 18 Lund, G.:  
Cereals: an alternative energy source. CADDET Renewable Energy Newsletter. [online].  
<http://www.caddet-re.org> (Stand 22.05.2001)
- 19 Schierbaum, F., S. Radosta, M. Richter, B. Kettlitz und Ch. Gernat:  
Studies on Rye Starch Properties and Modification. Part I: Composition and Properties  
of Rye Starch Granules. *Starch/Stärke* 43 (1991) 9, S. 331-339
- 20 Wilhelm, E. und W. Kempf:  
Hafer, Gerste und Triticale – Eigenschaften und Chancen für die technische Stärkege-  
winnung. *Starch/Stärke* 39 (1987) 5, S. 153-157
- 21 IGV Institut für Getreideverarbeitung GmbH:  
Jahresbericht 1999/2000 der IGV Institut für Getreideverarbeitung GmbH. [online].  
<http://www.igv-gmbh.de> (Stand 07.02.2002).
- 22 Cobbelsdorfer Naturstoff GmbH:  
Herstellung und Vertrieb eines Dämmstoffes auf der Basis von Roggen als nachwach-  
sender Rohstoff, Publikation zur „Grünen Woche“ in Berlin, 2002
- 23 Lehrack, U. und Volk, J.:  
Ceralith-ein technischer Wärmedämmstoff auf Basis von Getreide. 2. Innovationssemi-  
nar, Beckmann-Akademie, Wildau, 18.11.1998, Vortrag
- 24 Roggenforum e.V.  
Roggen als nachwachsender Rohstoff. [online].  
<http://www.roggenforum.de> (Stand 13.02.2002)
- 25 Bushuk, W. (Hrsg.):  
Rye: Production, Chemistry, and Technology. Monograph Series Volume V. American  
Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, 1976
- 26 Pieper, H.-J.:  
Alkoholproduktion aus Triticale. [online]. Universität Hohenheim, Institut für Lebens-  
mitteltechnologie. 09.09.2000.  
<http://www.uni-hohenheim.de> (Stand 04.02.2002)
- 27 Wang, S., K.C. Thomas, W.M. Ingledew, K. Sosulski und F.W. Sosulski:  
Rye and Triticale as Feedstock for Fuel Ethanol Production. *Cereal Chem.* 74 (1997) 5,  
S. 621-625

- 28 Seibel, W. und W. Steller (Hrsg.):  
Roggen: Anbau - Verarbeitung – Markt. Behr's Verlag Hamburg, 1988
- 29 Gerecke, K.H.:  
Vademekum. Technische Werte der Getreideverarbeitung und Futtermitteltechnik. Teil 2: Mahlverfahren, Mischen und Wiegen. Verlag Moritz Schäfer Detmold, 1985/1990
- 30 Weipert, D., H. Zwingelberg und H. Stephan:  
Müllereitechnische Aspekte bei der Verarbeitung von Triticale. Getreide Mehl und Brot (1986) 4, S. 107-116
- 31 Varughese, G., W. H. Pfeifer und R. J. Pena:  
Triticale: a successful alternative crop (part 1). Cereal Foods World 41 (1996) 6, S. 474-480
- 32 Glattes, H. und A. Mar:  
Triticale im praktischen Mahl- und Backversuch. 1. Teil: Mahlversuche. Getreide Mehl und Brot 37 (1983) 12, S. 359-362
- 33 Haber, T.:  
Charakteristik und Verwendungsmöglichkeiten der polnischen Triticalesorten. Getreide Mehl und Brot 48 (1994), S. 9-13
- 34 Handreck, B. et al.:  
Vermahlungstechnischer Aufschluß von non food-Getreide aus dem low input-Anbau. Abschlußbericht zum Projekt 96 NR 119F der FNR, Institut für Lebensmitteltechnologie II, Technische Universität Berlin, 2000
- 35 Drews, E., D. Weipert und D. Meyer:  
Orientierende Untersuchungen über die Verarbeitungseigenschaften von inländischem Triticale. Getreide Mehl und Brot 30 (1976) 11, S.285-291
- 36 Weipert, D.:  
Roggen: Sorten und ihre Verarbeitungswerte. Profile der deutschen Winterroggensorten. Mühle und Mischfuttertechnik 136 (1999) 15, S. 441-447
- 37 Farrell, E.P., C. C. Tsen und W. J. Hoover: Milling Triticales into Flour. In: Tsen, C. C. (Hrsg.), Triticale: First Man-Made Cereal, American Association of cereal chemists, St. Paul, Minnesota, 1974
- 38 Anderson, R. A., A. C. Stringfellow, J. S. Wall und E. L. Griffin:  
Milling characteristics of Triticale. Food Technol. 28 (1974), S. 66-76
- 39 Greenwell, P. und D. Schofield:  
The chemical basis of grain hardness and softness. In: Salovaara, H. (Hrsg.), Proceedings of ICC Symposium End-use quality, Lahti, Finland 1989
- 40 Müller, U. und V. Schneeweiß:  
Optimierte Mehle-Teil 1. Brot und Backwaren. (2001) 11, S. 32-34
- 41 Zwingelberg, H.:  
Prallzerkleinerung und Windsichtung integriert in ein Vermahlungssystem. Die Mühle + Mischfuttertechnik. 135 (1998) 12, S. 389-394
- 40 Batel, W.:  
Einführung in die Korngrößenmeßtechnik. Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1964

- 41 Cleve, H.:  
Möglichkeiten der Beeinflussung der Mehlqualität durch Windsichtung. Die Getreidemühle. (1960) 6, S. 151
- 42 Cleve, H.:  
Analytische Befunde an windgesichteten Mehlen. Getreide und Mehl. (1959) 9, S. 81-86
- 43 Thomasson, J. R.:  
Grass starch grains. Fort Hays State University, Department of Biological Sciences, Hays/Kansas, 1997. [online].  
[http:// www.hfsu.edu/biology/thomasson/starch.htm](http://www.hfsu.edu/biology/thomasson/starch.htm) (Stand 04.03.2002).
- 44 D'Appolonia, B. L.:  
A review of the starch of Triticale. In: Tsen, C. C. (Hrsg.), Triticale: First Man-Made Cereal, American Association of cereal chemists, St. Paul, Minnesota, 1974
- 45 Gassner, G.:  
Mikroskopische Untersuchung pflanzlicher Lebensmittel. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1989
- 46 Godon, B. und C. Willm (Hrsg.):  
Primary cereal processing: a comprehensive sourcebook. VCH Verlagsgesellschaft Weinheim, 1994
- 47 Posner, E. S. und A. N. Hibbs:  
Wheat flour milling. American Association of Cereal Chemists St. Paul, Minnesota, 1997
- 48 Pomeranz, Y. (Hrsg.):  
Wheat: chemistry and technology. Volume II. American Association of Cereal Chemists St. Paul, Minnesota, 1988
- 49 Hosney, R. C.:  
Principles of cereal science and technology. Second edition. American Association of Cereal Chemists St. Paul, Minnesota, 1994
- 50 Kratzsch, G.:  
Optimierung der Rohstoffherzeugung bei Industriegetreide unter low-input-Bedingungen. Abschlußbericht zum Projekt 96 NR 118F der FNR, Professor Hellriegel Institut e.V. Bernburg an der FH Anhalt , 2000
- 51 Rohrlich, M. und G. Brückner:  
Das Getreide, II.Teil. Verlag Paul Parey in Berlin und Hamburg, 1967
- 52 Pelshenke, P.F.:  
Pflanzenbau 8 (1931), S. 65, zitiert in [7]
- 53 Arbeitsgemeinschaft Getreideforschung e.V.:  
Standard-Methoden für Getreide, Mehl und Brot. Verlag Moritz Schäfer GmbH & Co.KG, Detmold 1994
- 54 Lelievre, J.:  
Starch damage. Starch/Stärke 26 (1974) 3, S. 85
- 55 Meuser, F., R.W. Klingler und E.A. Niedik:  
Characterisation of mechanically modified starch. Starch/Stärke 30 (1978) 11, S.376-384

- 56 McDermott, E.E.:  
The rapid nonenzymic determination of damaged starch in flour. *J. Sci. Food Agriculture* 31 (1980) 4, S. 405-413
- 57 Redemann, E.:  
Wirkung verschiedener Zerkleinerungsprinzipien auf die mechanische Beschädigung der Stärke in unterschiedlichen Mehlfraktionen. Diplomarbeit, Institut Lebensmitteltechnologie II, TU Berlin 1993
- 58 Dörfer, J. et al.:  
Vermahlungstechnischer Aufschluß von non food-Getreide aus dem low input-Anbau. Zwischenbericht zum Projekt 96 NR 119F der FNR, Institut für Lebensmitteltechnologie II, TU Berlin, 1997
- 59 Schober, T.:  
Diplomarbeit, Institut für Lebensmitteltechnologie, Universität Hohenheim, 1995
- 60 Hashimoto, S., M.D. Shogren und Y. Pomeranz:  
*Cereal Chem.* 64 (1987) 1, S. 30-34
- 61 Handreck, B.:  
Verfahren der Mühlenindustrie. Lehrbriefe für das Hochschulfernstudium. Humboldt Universität zu Berlin, 1984
- 62 Gerecke, K.H.:  
Vademekum. Technische Werte der Getreideverarbeitung und Futtermitteltechnik. Teil 1: Reinigung, Vorbereitung, Trocknung und Kühlung, Aspiration, Vermahlung. Verlag Moritz Schäfer Detmold, 1974/1984
- 63 Tschiersch, R.:  
Zerkleinerung von Nahrungs- und Futtergetreide in Walzenstühlen. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1982
- 64 Höffl, K.:  
Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1985
- 65 Alpine AG:  
Turboplex®-Feinstsichter. Prospekt 37/1d
- 66 Schirner, R.:  
Direktmodifizierung von low-input-Getreidemahlprodukten im kleintechnischen Maßstab. Zwischenbericht zum Projekt 96 NR 120-F, Ceresan GmbH, Markranstädt, 1999
- 67 Gottstein, D.:  
Labortechnische Derivatisierung komplexer Getreidemahlprodukte aus dem low input-Anbau, Abschlußbericht zum Projekt 96 NR 088-F, Fachhochschule Anhalt, Bernburg, 2000
- 68 Scheffler, E.:  
Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1986
- 69 Nagler, J.:  
Optimierung der I. Schrot passage einer Hartweizenvermahlungsanlage durch Untersuchungen am Versuchswalzenstuhl. Diplomarbeit, Bereich Technologie der Getreideverarbeitung, Humboldt-Universität zu Berlin, 1991

- 70 Kettner, U.:  
Optimierung der Roggenvermahlung in der I. Schrot passage. Diplomarbeit, Institut Lebensmitteltechnologie II, TU Berlin, 1993
- 71 Handreck, B., L. Thamm und G. Kratzsch:  
Vermahlung von Roggen und Triticale aus dem low input-Anbau für den non food-Bereich. Mühle und Mischfutter 137 (2000) 26, S. 841-846
- 72 Kratzsch, G.:  
Einfluss der Anbauintensität auf Ertrag und Kornqualität von Winterroggen für die industrielle Verwertung. pers. Mitteilung (1998)
- 73 Zwingelberg, H.:  
Untersuchungen zur Verkürzung der Roggenvermahlung. Getreide Mehl und Brot 45 (1991) 12, S.371-376
- 74 Handreck, B. und L. Pötschke:  
Auflösen von Weizengriß mit und ohne Zwischenabsieben. Die Mühle + Mischfuttertechnik 131 (1994) 37, S. 485-487

## 9 Verzeichnis der Abbildungen

Abb.		Seite
1	Bedarf an Stärkeprodukten nach ihrer Verwendung im Jahr 2000	7
2	Roggenvermahlungsdiagramm	17
3	Getreidekörner: Roggen, Triticale, Weizen	18
4	Ausschnitt aus einer Endospermzelle von Weizen, REM-Aufnahme	22
5	Proteingehalte in den Mehlfraktionen von Roggen, Weichweizen und Triticale nach dem Windsichten	24
6	Ergebnisse der Standardmahlversuche von Roggen und Triticale in Abhängigkeit von der Abstezeit	34
7	Anfall-Asche-Kurven unterschiedlicher Walzenpaare	36
8	Tausendkornmasse (TKM) und mittlere Korndicke von Roggen und Triticale in Abhängigkeit von der Anbauintensität	47
9	Vollkornmineralstoff- und Pentosangehalte von Roggen und Triticale in Abhängigkeit von der Anbauintensität	48
10	Stärke- und Rohproteingehalte von Roggen und Triticale in Abhängigkeit von der Anbauintensität	49
11	Zusammenhang zwischen dem Rohprotein- und Stärkegehalt in Roggen- und Triticalekörnern	49
12	Korndichten von Roggen und Triticale in Abhängigkeit von der Anbauintensität	50
13	Zusammenhang zwischen der Korndichte von Roggen- und Triticalekörnern und dem Rohproteingehalt sowie der Tausendkornmasse (TKM)	51
14	gemittelte Ausbeute-Asche-Kurven der Roggen-Standardmahlversuche	53
15	gemittelte Ausbeute-Asche-Kurven der Triticale-Standardmahlversuche	54
16	Stärke- und Rohproteingehalte der Roggen- und Triticalemehle aus den Standardmahlversuchen, Mineralstoffgehalt der Mehle 0,7%i.Tr.	54
17	Varianten zum Aufschroten von Roggen und Triticale	57
18	Mahlversuche zum I. Schrot: Effekte auf den Zerkleinerungsgrad und auf die Aschewertzahl <sub>Feingut</sub>	60
19	Mahlversuche zum II. Schrot: Effekte auf den Zerkleinerungsgrad und auf die Aschewertzahl <sub>Feingut</sub>	66
20	Massenanteile der Fraktionen nach der Prallzerkleinerung gequetschten Roggens	70
21	Mineralstoffgehalte der Fraktionen nach der Prallzerkleinerung gequetschten Roggens	70
22	Massenanteile der Fraktionen nach der Prallzerkleinerung gequetschter Triticale	71
23	Mineralstoffgehalte der Fraktionen nach der Prallzerkleinerung gequetschter Triticale	72
24	Zerkleinerungsgrade und Aschewertzahlen <sub>Feingut</sub> nach der Prallzerkleinerung der gequetschten Getreide	74

Abb.		Seite
25	Ausbeute-Asche-Kurven von Triticale nach der 2. Zerkleinerungsstufe	76
26	Ausbeute-Asche-Kurven von Roggen nach der 2. Zerkleinerungsstufe	77
27	Mineralstoffgehalte der Feingutfraktionen von Roggen und Triticale nach der 2. Zerkleinerungsstufe	78
28	Varianten zum Vermahlen der Roggen- und Triticalegrieße	85
29	Einfluss der Variablen auf den Mehlanfall der 1. Grießmahlung	88
30	Einfluss der Variablen auf den Mineralstoffgehalt der Mehle der 1. Grießmahlung	89
31	Einfluss der Variablen auf die Wunschfunktion am Optimum der 1. Grießvermahlung	90
32	Massenanteile der Fraktionen aus der Prallvermahlung der Grieße	93
33	Mineralstoffgehalte der Fraktionen aus der Prallvermahlung der Grieße	93
34	Produktanfall-Asche-Kurven der 1. Grießmahlungen	95
35	Einfluss der Variablen auf den Mehlanfall der 2. Roggengrießmahlung	98
36	Einfluss der Variablen auf den Mineralstoffgehalt der Roggenmehle der 2. Grießmahlung	99
37	Einfluss der Variablen auf die Wunschfunktion am Optimum der 2. Roggengrießvermahlung	100
38	Mahlversuche im Walzenstuhl: Produkthanfall-Asche-Kurven der 2. Roggengrießmahlung mit und ohne Mehlabseibung nach dem 1. Grieß	101
39	Vermahlungsablauf für Roggen	106
40	Vermahlungsablauf für Triticale	107
41	Produkthanfall-Asche-Kurven der Vermahlung von Roggen aus konventioneller und reduzierter Anbauintensität	108
42	Produkthanfall-Asche-Kurven der Vermahlung von Triticale aus konventioneller und reduzierter Anbauintensität	109
43	Rückstandssummenverteilung der Mahlprodukte aus der Roggen- und Triticalevermahlung	110
44	Anteile der Vermahlungsstufen an der aufgewendeten massebezogenen Zerkleinerungsarbeit	111
45	Verteilung von Rohprotein in den Roggen- und Triticale-Mahlprodukten	114
46	Verteilung der Stärke in den Roggen- und Triticale-Mahlprodukten	115
47	Verteilung von Pentosan in den Roggen- und Triticale-Mahlprodukten	116
48	Massenanteile und Rohproteingehalte der Roggenmehlfraktionen in Abhängigkeit von der Sichtraddrehzahl	119
49	Massenanteile und Rohproteingehalte der Triticalemehlfraktionen in Abhängigkeit von der Sichtraddrehzahl	120
50	Schema zum Windsichten von Roggenmehl	121

Abb.		Seite
51	Schema zum Windsichten von Triticalemehl	122
52	q-Verteilungen vor und nach der Prallzerkleinerung von Roggen- und Triticalemehl (reduzierte Anbauintensität)	124
53	Volumenverteilungsdichten der Sichtfraktionen von Roggenmehl aus reduzierter Anbauintensität	127
54	Volumenverteilungsdichten der Sichtfraktionen von Triticalemehl aus reduzierter Anbauintensität	127
55	Rohproteingehalte der Sichtfraktionen – Roggenmehle	128
56	Rohproteingehalte der Sichtfraktionen – Triticalemehle	129
57	Stärkegehalte der Sichtfraktionen – Roggenmehle	130
58	Stärkegehalte der Sichtfraktionen – Triticalemehle	130
59	Stärkebeschädigung in den Sichtfraktionen – Roggen- und Triticalemehle	131
60	Pentosan- und Mineralstoffgehalte der Sichtfraktionen - Roggenmehl	132
61	Pentosan- und Mineralstoffgehalte der Sichtfraktionen – Triticalemehle	133
62	Ladungen modifizierter Roggen- und Triticalemehle bei zunehmender Ausmahlung	136
63	Ladungen modifizierter Roggen- und Triticalemehle vor und nach der Windsichtung	137
64	Zusammenhang zwischen Inhaltsstoffgehalt und Ladung der modifizierten Roggen- und Triticalemehle	139
65	Zusammenhang zwischen der mechanischen Stärkebeschädigung sowie der Teilchengröße und der Ladung modifizierter Roggen- und Triticalemehle	140

## 10 Verzeichnis der Tabellen

Tab.		Seite
1	Getreideversorgung in Deutschland	11
2	Anbau nachwachsender Rohstoffe auf stillgelegten Flächen	12
3	Industrielle Hauptanwendungen nachwachsender Rohstoffe	13
4	Kornbeschaffenheit von Roggen und Triticale	19
5	Korngrößenverteilung von Getreidestärken	23
6	Kennwerte der Walzenpaare zur Roggen- und Triticalevermahlung	35
7	Mahlelemente der Stiftmühle Record A	38
8	Mahlelemente der Stiftmühle 224	39
9	Versuchsordnung zur Optimierung des Anbaus von Roggen und Triticale als Industriegetreide	46
10	Erträge und Produktionskosten in Abhängigkeit von der Anbauintensität	52
11	Ergebnisse der Standardmahlversuche mit Roggen und Triticale	52
12	Veränderungen der Anbauergebnisse, Korneigenschaften und Mahlergebnisse bei reduzierter Anbauintensität	56
13	Roggen und Triticale für die Untersuchungen zum Aufschroten	58
14	Variablen des Versuchsplans zum I. Schrot	58
15	Ausgewählte Antwortgrößen des Versuchsplans zum I. Schrot	59
16	Ausgewählte Ergebnisse der Optimierung zum I. Schrot	62
17	Variablen des Versuchsplans zum II. Schrot	63
18	Ausgewählte Antwortgrößen der Versuchspläne zum II. Schrot Roggen	64
19	Ausgewählte Antwortgrößen der Versuchspläne zum II. Schrot Triticale	65
20	Ausgewählte Ergebnisse der Optimierung zum II. Schrot	68
21	Zerkleinerungsergebnisse bei Prallbeanspruchung der gequetschten Getreide	69
22	Zerkleinerungsaufwand und –erfolg bei Prallbeanspruchung der gequetschten Getreide	73
23	Zusammenfassung: Zerkleinerungsbedingungen für eine minimale Aschewertzahl <sub>Feingut</sub>	75
24	Zerkleinerungsgrade und –arbeiten nach der 2. Zerkleinerungsstufe	76
25	Produktanfälle nach der 2. Zerkleinerungsstufe	79
26	Analysenergebnisse zur Charakterisierung der Getreide für die Vermahlung	81
27	Ergebnisse des Schrotens von Roggen unterschiedlicher Anbauintensität	83
28	Ergebnisse des Schrotens von Triticale unterschiedlicher Anbauintensität	84
29	Roggen- und Triticalegrieß für die Untersuchungen zur Vermahlung	86
30	Variablen des Versuchsplans zur 1.Grießmahlung	86

Tab.		Seite
31	Ausgewählte Antwortgrößen der Versuchspläne zur 1.Grießvermahlung	87
32	Ausgewählte Ergebnisse der Optimierung zur 1.Grießvermahlung	91
33	Ergebnisse der Prallzerkleinerung von Roggen- und Triticalegrieß	92
34	Ergebnisse der 1. Grießmahlung im Walzenstuhl und in der Stiftmühle	94
35	Variablen des Versuchsplans zur 2. Roggengrießvermahlung	96
36	Ausgewählte Antwortgrößen der Versuchspläne zur 2. Roggengrießvermahlung	97
37	Ausgewählte Ergebnisse der Optimierung zur 2. Roggengrießvermahlung	100
38	Ergebnisse der 1. Roggengrießvermahlung	103
39	Ergebnisse der 1. Triticalegrießvermahlung	104
40	Ergebnisse nach der 2. Grießmahlung Roggen unterschiedlicher Anbauintensität	105
41	Zerkleinerungsaufwand und –erfolg der Vermahlung von Roggen und Triticale	111
42	Inhaltsstoffverteilung nach der Vermahlung	117
43	Inhaltsstoffe der Mehle für die Versuche zum Windsichten	118
44	Quotienten aus Rohproteingehalt und Massenanteil des Grobgutes aus Roggen- und Triticalemehl in Abhängigkeit von der Sichtraddrehzahl	121
45	Stoffliche Zusammensetzung der Mehle für das Windsichten	123
46	Ergebnisse der Nachzerkleinerung von Roggen- und Triticalemehlen in der Stiftmühle	123
47	Massenanteile und mittlere Korndurchmesser der Sichtfraktionen der Mehle aus Roggen und Triticale unterschiedlicher Anbauintensität	126
48	Trennschnitte und Trenngrenzen der Windsichtung von Roggen- und Triticalemehlen	126
49	Inhaltsstoffverschiebung in den gesichteten Roggen- und Triticalemehlen	135
50	Ladungen modifizierter Modellmischungen mit Weizenstärke	138
51	Richtung und Stärke des Zusammenhangs zwischen den Mehlinhaltsstoffen und der Ladungshöhe in den Mehlmodifikaten	140

## 11 Lebenslauf

Lydia Thamm, geb. Howorka  
geboren am 15.07.1970 in Berlin.

### Schulbildung:

1977 - 1987	Polytechnische Oberschule in Berlin
1987 - 1989	Erweiterte Oberschule in Berlin, Abschluss: Abitur

### Studium:

1990 - 1995	Lebensmitteltechnologie an der Humboldt-Universität zu Berlin und an der Technischen Universität Berlin, Spezialisierungsrichtung Getreideverarbeitung und Backwarenherstellung, Abschluss: Dipl.-Ing. für Lebensmitteltechnologie
-------------	---

### beruflicher Werdegang:

1995 - 1997	Mitarbeiterin der Qualitätssicherung bei den Schwartauer Werken, Kakao Verarbeitung Berlin GmbH
1997 - 2002	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Lebensmitteltechnologie der Technischen Universität Berlin
2002	Technologin und QMB bei der Oderfrucht TKK, Frankfurt (Oder)
2002 - 2003	ISO/HACCP-Koordinatorin bei Kraft Foods Deutschland, Bad Fallingb. bostel
seit Mai 2003	Leiterin Qualitätssicherung Moll Marzipan GmbH, Berlin

Berlin, 08.12.2003