

Physiko-chemische und mikroskopische
Untersuchungen
an Mehl-Wasser-Systemen

von Master of Science
Ljiljana Unbehend
aus Osijek, Kroatien

Von der Fakultät III – Prozeßwissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Ingenieurwissenschaften
-Dr.-Ing.-

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. sc. techn. B. Senge

Gutachter: Prof. Dr. Dr. e. h. F. Meuser

Gutachter: Dr. M. G. Lindhauer

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 15. März 2002

Berlin 2002

D 83

Dem Heiligen Geist

Svetom Duhu

In den vier Jahren, in denen ich mich mit meiner Promotion beschäftigt habe, haben mich einige Menschen begleitet und mein Leben über die Zeit der Promotion hinausgehend geprägt. Alle haben Steine in das Mosaik meiner Doktorarbeit eingelegt und mir geholfen, am 15. 03. 2002 meine Doktorarbeit erfolgreich zu verteidigen. Ihnen möchte ich danken.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Dr. e.h. Friedrich Meuser danke ich herzlich für die Betreuung meiner Arbeit und die fordernde wissenschaftliche Diskussion während der schriftlichen Ausarbeitung.

Ein Dank gilt Herrn Dr. Meinolf G. Lindhauer, der mir optimale Bedingungen an der Bundesanstalt für Getreide-, Kartoffel- und Fettforschung in Detmold einräumte und mich während dieser vier Jahre unterstützt hat.

Herrn Dr. Peter Suckow danke ich für die mir entgegengebrachte fachliche und menschliche Hilfe, sowie für die wertvollen Anmerkungen während der schriftlichen Ausarbeitung meiner Dissertation.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr. Hans-Josef Kersting, der durch seine stets gewährte, uneigennützige Unterstützung, durch wertvolle Anregungen und Diskussionen diese Arbeit förderte.

Den Mitarbeitern der Bundesanstalt für Getreide-, Kartoffel- und Fettforschung möchte ich meinen herzlichen Dank für die gute Zusammenarbeit und die tatkräftige Unterstützung aussprechen. Besonders: Herrn Dr. Dietrich Meyer für Hilfe bei der mikroskopischen Aufnahmen, Frau Ute Biere, Frau Doris Kagerer, Frau Anette Kettig, Frau Karin Maschke, Herrn Heinrich Schröder, Frau Anke Stüwe und all den anderen namentlich hier nicht aufgeführten Mitarbeitern der Bundesanstalt in Detmold.

Frau Universitätsrektorin Prof. Dr. Kralik, die stets an mich geglaubt und mich bei der Beantragung des Auslandsstipendiums entscheidend unterstützt hat, vielen Dank. Gospodji rektorici prof. dr. Kralik, koja je u mene uvijek vjerovala i u odlucujucim trenucima mi pomogla pri prijavi za stipendiju u inozemstvu, puno hvala.

Meinen Freunden Dr. Dorian und Elke Weipert möchte ich für ihre elterliche Aufnahme und für alles was sie für mich getan haben, danken. Sie waren in den entscheidenden Momenten immer für mich da.

Meiner Familie danke ich für das in mich gesetzte unendliche Vertrauen. Nur mit ihrer Fürsorge und Liebe konnte ich das Erreichte schaffen. Dafür vielen, vielen Dank liebe Eltern Marko und Anica. Auch meinem Bruder Ivan danke ich für alles, was er für mich getan hat. Mojoj obitelji se zahvaljujem na neograničenom povjerenju u mene. Samo sam uz njihovu briznost i ljubav mogla postignuto ostvariti. Puno, puno hvala dragi roditelji Marko i Anice. Takodjer se zahvaljujem mom bratu Ivanu za sve što je učinio za mene.

Es gibt diese Wörter nicht, mit denen ich aussprechen könnte, wieviel mir deine Geduld und Unterstützung während der schwierigsten Zeit meiner Promotion bedeutet haben. Dir, mein lieber Günter, möchte ich sagen: „Nur Liebe kann so gut sein“. Danke.

Und zum Schluss möchte ich mich bei Gott für seinen Segen, für meine Gesundheit, seine stille Begleitung und alles Andere bedanken.

Verzeichnis der verwendeten Einheiten und Abkürzungen

Einheiten

°C	Grad Celsius = $T [K] - 273,16 [K]$
AE	Amylogrammeinheiten
BE	Brabendereinheit
FE	Farinogrammeinheit
g	Erdbeschleunigung [$9,81 \text{ ms}^{-2}$]
U	REM-Maßstab = Units = $1 \mu\text{m} = 0,000001 \text{ m}$
mm Ws	= $9,81 \text{ Pa}$

Alle übrigen verwendeten Einheiten entsprechen dem Système International d'Unités (SI).

Abkürzungen

Ω'	Umdrehung [upm]
A'	Fläche unter der Farinogrammkurve [cm^2]
Abb.	Abbildung
b'	Skalenwert [gfcM/FE]
E	Energie [J]
E^*	Komplexmodul eines oszillierenden Dehnungsversuches [Pa]
E'	Speicheranteil oder Speichermodul (Elastizitätsmodul) eines oszillierenden Dehnungsversuches [Pa]
E''	Verlustanteil oder Verlustmodul (Viskositätsmodul) eines oszillierenden Dehnungsversuches [Pa]
F	Statistische Prüfgröße in der Varianzanalyse
G^*	Komplexschermodul [Pa]
$G'(\omega)$	Speicheranteil oder Speichermodul einer oszillierenden Schermessung (Elastizitätsmodul) [Pa]
$G''(\omega)$	Verlustanteil oder Verlustmodul einer oszillierenden Schermessung (Viskositätsmodul) [Pa]
ggf.	Gegebenenfalls
Gl.	Gleichung

h	Höhe, um die der Körper gehoben wird [m]
h	Papierbreite pro FE-Einheit [cm/BU]
HMW	High molecular weight
HPLC	High pressure liquid chromatography
HUM	Hydratisiertes ungeknetetes Mehl
ICC	International Association for Cereal Chemistry and Technology
L	Länge der Kurve (Dehnbarkeit) aus dem Alveogramm [mm]
LMW	Low molecular weight
m	Masse [kg]
M	Teigmasse [kg]
N	Normalität
NaCl	Natriumchlorid
p	Statistische Wahrscheinlichkeit
t	Statistische Prüfgröße im t-Test
Tan Delta	Verlusttangens
Teig 20/45	Teig hergestellt mit einer 20-minütigen Knetung
Teig ICC	Teig hergestellt mit einer Knetung bis zur Teigentwicklung
v'	Geschwindigkeit des Papiertransportes [cm/min]
W	Deformationsenergie im Alveographen [J]
Wp	potentielle Energie [J]
Wl	latente chemische Energie [J]
ΔH	Enthalpie [J]
ΔG	freie Energie, Gibbsche Energie [J]
T	Temperatur [K]
ΔS	Entropie [J/K]
P	Dehnwiderstand im Alveographen [mm H ₂ O = mm Ws]
Teig 300	Teig hergestellt mit einer Knetung mit Abbruch bei 300 FE
Teig 400	Teig hergestellt mit einer Knetung mit Abbruch bei 400 FE
Teig 500	Teig hergestellt mit einer Knetung mit Abbruch bei 500 FE

Inhaltsverzeichnis

I	Einleitung und Problemstellung	1
II	Aktueller Kenntnisstand zu Teigstruktur und Teigentwicklung	3
III	Vereinfachtes Arbeitsmodell zur Erfassung von Strukturen und Entwicklungen von Mehl-Wasser-Systemen	6
IV	Anmerkungen zur Methodenwahl	10
	1. Bestimmung der Mehleigenschaften.....	10
	2. Beschreibung der Systemstruktur.....	11
	2.1. Fraktionierung der Proteine.....	12
	2.2. Physikalische Eigenschaften.....	13
	2.2.1. Knetversuch.....	14
	2.2.2. Dehnungsmessungen.....	16
	2.2.3. Oszillationsmessungen.....	18
	2.3. System- und Proteinmorphologie.....	21
	2.3.1. Mikroskopische Untersuchungen.....	21
V	Material und Methoden	23
	1. Material.....	23
	2. Methoden.....	23
	2.1. Bestimmung der Mehleigenschaften.....	23
	2.2. Herstellung von Mehl-Wasser-Systemen und Berechnung des Energieeintrages.....	24
	2.2.1. HUM-Systeme.....	24
	2.2.2. Teig.....	26
	2.3. Fraktionierung nach Osborne.....	28
	2.4. Dehnungsmessungen (Extensograph und Alveograph).....	30
	2.5. Oszillationsmessungen.....	30
	2.5.1. Deformationsversuch.....	31
	2.5.2. Frequenzversuch.....	31
	2.6. Knetversuch.....	32
	2.7. Mikroskopische Untersuchungen an Mehl-Wasser-Systemen und deren Proteingerüsten.....	33
	2.8. Statistische Auswertung.....	34
VI	Ergebnisse	36
	1. Mehleigenschaften.....	36

2.	Fraktionierung der Proteine	39
3.	Physikalische Eigenschaften.....	52
3.1.	Dehnungsmessungen.....	52
3.1.1.	Extensogramm.....	52
3.1.2.	Alveogramm.....	56
3.2.	Oszillationsmessungen.....	60
3.2.1.	Deformationsversuch.....	60
3.2.2.	Frequenzversuch.....	68
3.3.	Knetversuch.....	74
4.	System- und Proteinmorphologie.....	88
VII	Diskussion.....	96
1.	Mehleigenschaften.....	97
2.	Beschreibung der Systemstruktur.....	98
2.1.	Fraktionierung der Proteine.....	98
2.2.	Physikalische Eigenschaften.....	101
2.3.	System- und Proteinmorphologie.....	104
3.	Klärung der Systembildung.....	106
3.1.	HUM-System.....	106
3.2.	Teig-System.....	108
VIII	Zusammenfassung.....	110
IX	Literatur.....	114
X	Anhang.....	125

I Einleitung und Problemstellung

Backwaren nehmen einen wichtigen Platz in der menschlichen Ernährung ein. Sie sind auch heute eine der wichtigen Grundlagen für eine gesunderhaltende Ernährung. Brot und Kleingebäck werden aus verschiedenen Getreide hergestellt, wobei der Weizen eine besondere Rolle spielt. Diese Rolle beruht auf der Fähigkeit des Weizenmehles durch Zugabe von Wasser und Zuführung von mechanischer Energie durch Mischen und Kneten eine viskoelastische Masse auszubilden, die als Teig bezeichnet wird, aus dem sich die verschiedenen Gebäcke herstellen lassen.

Die Teigbildung beruht auf den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Proteine des Weizenglutens, die sich in ihrem Löslichkeitsverhalten gegenüber Wasser und anderen Lösungsmitteln unterscheiden und danach charakterisiert werden können (1). Gluten besteht zu 75 - 85 % aus den wasserunlöslichen Proteinen Gliadin und Glutenin, die ihrerseits nach molekularen Untereinheiten differenziert werden können (2). Während der Teigbildung entsteht aus den Kleberproteinen eine zur Filmbildung geeignete Masse, in welche die anderen Mehlbestandteile, darunter insbesondere der Hauptbestandteil, die Stärkekörner, in ein Netzwerk eingelagert werden. Die wichtigste Eigenschaft des dabei gebildeten Proteinfilmes ist die Gashaltung während der Herstellung der Gebäcke (3). Trotz vieler Untersuchungen an Teigen (4, 5, 6) ist die Teigbildung noch immer nicht vollständig aufgeklärt, weil die Proteine der Weizensorten eine sehr heterogene Zusammensetzung aufweisen, aus denen sich unterschiedliche Teigeigenschaften ergeben. Das Problem zur Aufklärung der Teigbildung besteht darin, dass es aufgrund der Heterogenität der Zusammensetzung der Proteine der einzelnen Weizensorten schwer ist, die Teigbildung differenziert nach physikalisch-chemischen Eigenschaften der einzelnen Proteine daran zu beschreiben.

Die Proteinzusammensetzung ist ein wichtiges Merkmal einer Weizensorte. Alle Weizenproteine haben eigene Eigenschaften, welche von vielen Autoren untersucht wurden (4, 7, 8). Abhängig von der Proteinzusammensetzung werden die Proteinnetzentwicklung und somit die funktionellen Eigenschaften des Teiges (9, 10) beeinflusst. Aus der Löslichkeit der Glutenproteine können wichtige Rückschlüsse auf die sich ausbildende Teigstruktur gezogen werden (4,11).

Rheologische Untersuchungen haben Erkenntnisse gebracht, welche zur Klärung von Teigstrukturen beigetragen haben (1,12,13,14,15). Traditionelle Methoden und Geräte, wie Farinograph, Extensograph und Alveograph, werden vor allem zur Beschreibung der qualitativen Eigenschaften von Teigen genutzt. Die Messprinzipien sind praxisorientiert und sind weniger auf die Darstellung oder Aufklärung des Zusammenhangs zwischen chemischer Eigenschaft sowie Struktur und physikalischer Eigenschaft und Struktur gerichtet. Der schnelle Fortschritt in der chemischen Strukturaufklärung der Glutenproteine erfordert eine gleichwertige Entwicklung in der Aufklärung der physikalischen Eigenschaften der mit Wasser und Knetung entwickelten Glutenproteine. Sie wurden in der Anwendung sogenannter fundamentalrheometrischer Methoden gefunden (15, 16, 17).

Eine weitere Möglichkeit zur Aufklärung der Teigbildung besteht darin, diese durch Mikroskopie sichtbar zu machen. Die Mikroskopie hat den Vorteil, die physikalischen Abläufe der Teigbildung mehr oder weniger direkt zu beobachten. Obwohl die mikroskopischen Untersuchungen mit vielen Problemen, vor allem hinsichtlich der Präparation des komplexen Materials behaftet sind, kommt ihnen in der Beschreibung von Teigen ein hoher Stellenwert zu. Mit Hilfe mikroskopischer Methoden wurden große Fortschritte bei der Erklärung der Glutenbildung erzielt (6, 18, 19, 20).

Mit dieser Arbeit wird versucht, einen Beitrag zur Aufklärung des Mechanismus der Bildung von Weizenteigen mit Hilfe einer neuen Methode zu leisten. Die Methode beruht darauf, durch eine besondere Art der Zugabe von Wasser zu Mehl ohne Eintrag von Energie durch Mischen und Kneten ein Mehl-Wasser-System darzustellen, in dem der Mechanismus der Teigbildung beobachtet werden kann. Zum Vergleich werden konventionell im Knetter hergestellte Teige unter gleichen Kriterien untersucht.

Die Eigenschaften des Mehl-Wasser-Systems wurden im Vergleich zu denen des konventionellen Teiges mit chemischen, rheologischen und mikroskopischen Untersuchungen erfasst. Außerdem wurde die Veränderung der Löslichkeit der Proteine durch Fraktionierung der Proteine nach Osborne untersucht. Die rheologischen Untersuchungen sollten das Verhalten der Systeme unter verschiedenen Beanspruchungen beleuchten. Elektronenmikroskopische Aufnahmen dienten der Aufklärung morphologischer Strukturen der Mehl-Wasser-Systeme.

II Aktueller Kenntnisstand zu Teigstruktur und Teigentwicklung

Die Wissenschaft befaßt sich, seit Beccari aus Teig den Weizenkleber, auch Gluten genannt, isolierte, mit großer Intensität mit der Thematik der Teigstrukturbildung. Besonders intensiv wurde seitdem die Glutenstruktur untersucht, und es wurden dafür Funktionsmodelle entwickelt. Die Betrachtung des rheologischen Verhaltens und der mikroskopischen Aufnahmen des Glutens aus verschiedenen Weizenmehlen bzw. -sorten haben zur Erstellung von Gluten-Modellen beigetragen (12). Der Gluten besteht aus zwei voneinander verschiedenen Proteingruppen, die als Gliadin und Glutenin bezeichnet werden. Diese Proteine können mit chromatographischen Methoden nach dem Molekulargewicht ihrer Konstituenten differenziert werden.

Über die Struktur von Glutenin sind verschiedene Hypothesen erarbeitet worden, wobei noch nicht endgültig geklärt werden konnte, welche die richtige These ist (12). Nach Ewart entsteht Glutenin aus 50 Peptidketten, die zu einem großen Molekül polymerisieren (21, 22). Diese Hypothese wurde auch von anderen Autoren unterstützt (23, 24, 25). Glutenin kann sowohl zu einem großen Molekül mit einer relativen Molekülmasse über 20 Millionen als auch zu einem kleineren Molekül mit einer relativen Molekülmasse von 1-5 Millionen polymerisieren. Das kleinste Glutenin soll ein Monomer mit der relativen Molekülmasse von einer Million sein (4, 26). Bei der Polymerisation der Gluteninproteine (oft Untereinheiten genannt) werden die einzelne Polypeptide durch intermolekulare Disulfid-Bindungen polymerisiert (27).

Es wird angenommen, dass Gliadine globuläre Proteine sind, welche durch intramolekulare Disulfid-Bindungen stabilisiert werden (12). Die Tendenz zur weiteren Aggregation wird durch nicht kovalente Bindungen verursacht (28).

Über die Funktionalität der Glutenproteine existieren unterschiedliche Ansichten. Einige Autoren vertreten die Meinung, dass die Funktionalität der Glutenproteine nur von Gluteninen abhängig ist und dass Gliadine bei der Glutenfunktionalität keine große Rolle spielen (29, 30, 31). Andere Autoren schreiben auch den Gliadinen eine größere Wirkung zu, da mit den Gluteninen allein die Qualitätsunterschiede bei Weizen nicht erklärt werden können (32, 33, 34).

Die Glutenfunktionalität wird auch durch Wechselwirkungen zwischen Proteinen und anderen Komponenten des Weizens, wie z.B. Stärke und Lipiden beeinflusst (35). Die Weizenstärkekörner unterscheiden sich von Stärkekörnern anderer Getreidearten. Der Unterschied liegt in der besonderen Oberfläche der Weizenstärkekörner (36, 37). Bestimmte Erkenntnisse unterstützen die Hypothese, dass die Stärke bei der Glutennetzentwicklung aktiv teilnimmt (36, 38). Die Hypothese beruht teilweise auf den rheologischen Untersuchungen an Teigmodellen, welche über Mischungen aus Gluten und Stärke unterschiedlicher Getreidearten hergestellt wurden. Dabei wurden die rheologischen Eigenschaften der Modellteige wesentlich von der Variation der Weizenstärke beeinflusst (39). Weiterhin wurden mit SDS-Lösung zwei Proteingruppen extrahiert, die wahrscheinlich mit der Stärkeoberfläche assoziieren und dadurch ein Teil des Stärkekorns sind (27, 40). Anhand dessen wurde ein Modell von Nierle und Kersting erstellt, welches der Stärke eine größere Rolle bei der Teigentwicklung zuschreibt (40).

Schon in den vierziger Jahren wurde der Lipideinfluss auf die Glutenbildung untersucht (41). Es ist bewiesen worden, dass Gluten auch mit Lipiden aggregiert (42, 43). Die Lipid-Protein-Aggregation ist zudem reversibel (44). Dabei wird der Gluten zu einem Polyphasensystem, bei welchem drei Arten von Wechselwirkungen auftreten: Protein-Protein, Lipid-Lipid und Lipid-Protein (45).

Die Prozesse bei der Teigbildung waren Gegenstand von Untersuchungen verschiedener Autoren. Graveland (4) untersuchte die Vorgänge in Gluteninfraktionen bei der Teigbildung. Er fand, dass die Gluteninteilchen mit den Stärkekörnern Cluster (traubenförmige Strukturen) bilden. Während des Knetens wird die ursprüngliche Struktur beschädigt, die festen Stärke-Protein-Cluster fallen auseinander, und die Proteinteilchen werden dissoziiert. Dabei strecken sich die Gluteninmolekülketten, und die Glutene bilden mit den Gliadinen ein geschlossenes Proteinnetz im Teig (4). Hierbei werden die Gluteninmoleküle in kleinere Bruchstücke gespalten (Depolymerisation), so dass die Teigfestigkeit abnimmt. Die Teigruhe ermöglicht über die Ausbildung von Disulfidbrücken eine Repolymerisation (4, 46, 47).

Durch diese Teigentwicklungsprozesse entwickelt sich eine quartäre Glutenstruktur. Die beiden Proteinfractionen (Gliadin und Glutenin) sind durch kovalente Bindungen, Wasserstoffbrücken, wie auch durch ionogene und hydrophobe Wechselwirkungen fest miteinander verbunden (4). Seit Jahren wird angenommen, dass die Teigentwicklung durch die Disulfid-Bindungen am meisten beeinflusst wird. Schon in den vierziger Jahren hat Sullivan (48) das erste Mal berichtet, dass die Thiol-Gruppen und Disulfid-Bindungen für die Teigentwicklung

verantwortlich sind. Später formulierten Frater et al. (49) die Hypothese, dass die Teigeigenschaften von Thiol-Gruppen und Disulfid-Bindungen sowie deren Verhältnis zueinander abhängen. Neue Erkenntnisse schreiben dem Tyrosin eine große Rolle zu, welches regelmäßig in den Gluteninen vorkommt (50). Tilley et al. (50) haben bewiesen, dass die Entwicklung der Tyrosin-Bindungen sowohl während der Knetung, als auch während des Backprozesses wichtig sind. Sie beeinflussen die Glutennetzentwicklung und deren Struktur.

Einige Autoren haben versucht, über die Veränderung der Proteinlöslichkeit während der Teigherstellung Erkenntnisse über Teig- bzw. Glutenentwicklung zu gewinnen (5, 51, 52, 53). Sie fanden, dass die Glutennetzentwicklung stark sortenspezifisch ist, was sich in den sortenabhängigen Veränderungen der Proteineigenschaften (verändertes Löslichkeitsvermögen eines Proteins in gleichem Lösungsmittel) widerspiegelt. Andererseits steigt die Löslichkeit in Essigsäure als Folge der Depolymerisation der Glutenine während der Knetung, und dies unabhängig von den Sorteneinflüssen (5).

Des Weiteren wurde in mikroskopischen Untersuchungen beobachtet, dass sich im Augenblick des Wasserkontaktes aus Mehlpartikeln heraus Proteinfäden bilden, welche sich im Wasser ausbreiten (6, 19). Daraus schloss Amend (54), dass in Mehlpartikeln das Protein in Form eines Gerüstwerkes aus Proteinsträngen vorliegt, in welchem die Stärkekörner eingebettet sind. Beim Anteigen werden die Mehlpartikeln immer wieder auseinandergesprengt, gegeneinander bewegt und wieder zusammengepresst. Die adhäsiven zellulären Klebnetzwerke haften dabei immer stärker zusammen und es entsteht schließlich ein den gesamten Teig durchziehendes Klebnetz, das „aggregierte Klebnetzwerk“ (54).

Die Mehlnqualität wird allgemein durch vier Modellparameter beschrieben: Mehlnart, Proteinquantität, Proteineigenschaften und Verkleisterungsverhalten der Stärke. Die Qualität des Mehles beeinflusst somit sowohl die Systementwicklung als auch die Systemstruktur.

Der Eintrag von Energie stellt ein weiteres definiertes Modellelement dar, der sich auf die Systementwicklung auswirkt und die Systemstruktur bestimmt.

Systementwicklung wirkt sich ganz allgemein auf die Systemstruktur aus, so dass aus der Summe aller Einflussgrößen auf die Systementwicklung die Systemstruktur resultiert.

Von der Systemstruktur hängen die Modellparameter System- und Proteinmorphologie, Fraktionierungsverhalten der Proteine und deren physikalische Eigenschaften ab. Mit der messtechnischen Erfassung dieser Modellparameter kann folglich die Systemstruktur beschrieben werden.

Im Modell sind die unabhängigen Modellelemente Energie, Wasser und Weizenqualität frei wählbar. Daraus ergibt sich die Dynamik des Modells. Anhand des Betrages und der Art der Energie entstehen Mehl-Wasser-Systeme unterschiedlicher Struktur (Abb. 2). Die Systemstruktur I entsteht durch Hydratisierung ohne Misch- und Knetenergie. Dabei wird lediglich ein minimaler Energieeintrag durch die potentielle Energie (W_p , Änderung der Lage des Wassers) und die Freisetzung der latenten chemischen Energie (W_l) in das Mehl-Wasser-System eingebracht. Der Energiebetrag W_l tritt auch bei einer Systementwicklung mit mechanischer Energiezufuhr auf, ist jedoch gegenüber dieser sehr viel kleiner.

Das System I wird HUM-System (hydratisiertes, ungeknetetes Mehl) genannt. Das System II ist definitionsgemäß ein Teig.

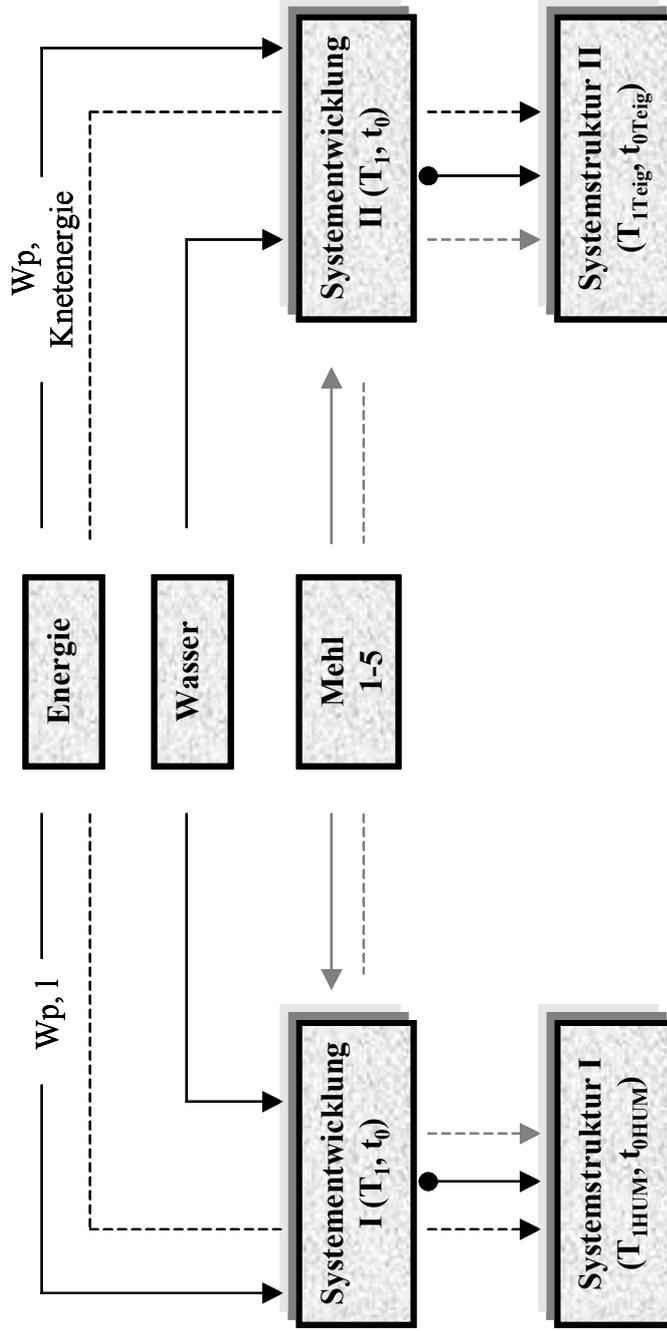


Abb. 2: Modell zur Entwicklung und Struktur von Mehl-Wasser-Systemen ohne und mit Eintragung von mechanischer Energie.

Ziel der Arbeit war es, die Strukturbildung des Mehl-Wasser-Systems ohne gegen die mit mechanischer Energieeintragung zu differenzieren, um daraus Hinweise auf die von den Proteinen abhängigen Teigeigenschaften zu erhalten. Ein Ansatz für die Lösung dieser Aufgabe wurde darin gesehen, dass in vorausgegangenen Experimenten, bei denen lediglich eine Benetzung des Mehls ohne mechanische Energieeintragung erfolgte, eine zeitabhängige in situ Bildung visko-elastischer Struktur in solchen Mehl-Wasser-Systemen festgestellt worden war. Daraus wurde geschlossen, die im Mehl vorhandene matrixartige Ablagerung der Proteine um die Stärkekörner bedürfte keiner mechanischen Energiezufuhr, um die Proteinmoleküle des Gliadins und des Glutenins unter Ausnutzung des latenten chemischen Potentials so miteinander reagieren zu lassen, dass daraus eine Proteinstruktur mit visko-elastischen Eigenschaften entsteht. Diese Schlussfolgerung eröffnete den experimentellen Ansatz für diese Arbeit, der darin besteht, die Teigbildungseigenschaften der Proteine von Weizenmehlen sozusagen im nativen Zustand zu beobachten und zu charakterisieren und diese den Teigbildungseigenschaften unter mechanischer Energieeintragung vergleichend gegenüber zu stellen.

IV Anmerkungen zur Methodenwahl

1. Bestimmung der Mehleigenschaften

Die Qualität eines Mehles wird üblicherweise durch Bestimmung seiner Inhaltsstoffzusammensetzung und ihrer Eigenschaften beschrieben (Abb. 3). Die Weizenmehlqualität hängt stark vom Proteingehalt sowie der Zusammensetzung und den Eigenschaften der Proteine ab (1). Darüber hinaus ist für die Mehqualität insbesondere auch das Verkleisterungsverhalten der Stärke entscheidend, weil es das Backverhalten der Teige bestimmt. Die Charakterisierung zum Backen geeigneter Weizenmehle kann nach den in der nachstehenden Abbildung 3 aufgeführten analytischen Kriterien erfolgen (Abb. 3).

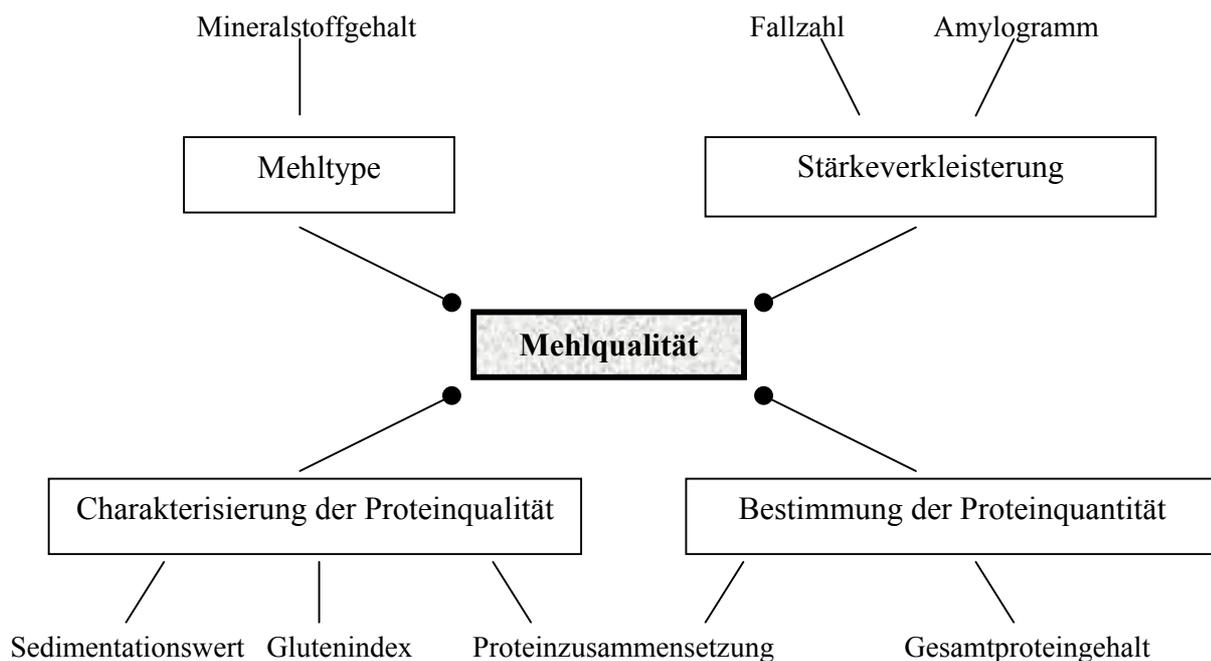


Abb. 3: Beschreibung der Mehqualität anhand analytischer Kriterien.

2. Beschreibung der Systemstruktur

Die Systemstruktur kann über seine physikalischen und chemischen Eigenschaften beschrieben werden; die entsprechenden Methoden sind zugänglich. Außerdem kann sie durch Mikroskopie sichtbar gemacht werden. In Abbildung 4 ist ein Modell zur Beschreibung der Systemstruktur mit Hilfe entsprechender direkter und indirekter Methoden dargestellt (Abb. 4).

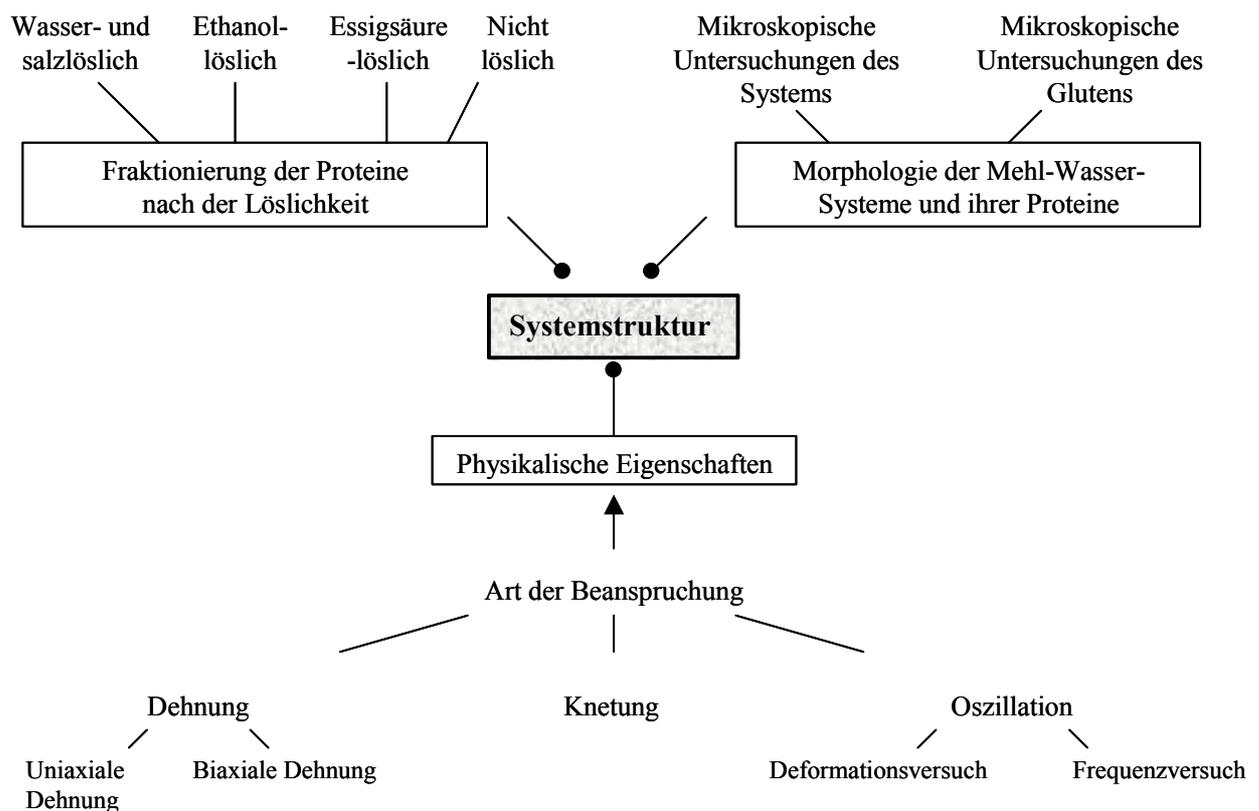


Abb. 4: Modell zur Beschreibung der Systemstruktur.

2.1. Fraktionierung der Proteine

Weizenproteine werden anhand ihrer Löslichkeit in unterschiedlichen Lösungsmitteln gemäß der Fraktionierung nach Osborne in Albumin, Globulin, Gliadin, lösliches Glutenin und unlösliches Glutenin unterteilt (2). Jede dieser Proteinfractionen besteht aus weiteren Untereinheiten (12).

Albumine und Globuline sind sogenannte „lösliche Proteine“. Albumin ist in Wasser und Globulin in einer wässrigen Salzlösung löslich. Albumin und Globulin haben kleine Molekulargewichte, Albumin eines von 12.000 und Globulin eines von 25.000 (7, 55). Teile der Proteinfractionen besitzen als Enzyme eine biologische Funktionalität (2). Hosoney et al. (38) fanden, dass Albumin und Globulin keine Bedeutung für die Backqualität eines Weizenmehles haben. Tanaka (56) bewies, dass sie den Knetprozess nicht beeinflussen.

Gliadin ist in Ethanol löslich. Die Gliadinfraktion hat ein Molekulargewicht von 30.000 bis 80.000. Nach dem Unterschied in der elektrophoretischen Beweglichkeit der Komponenten der Gliadinfraktion im unteren pH-Bereich werden diese in alpha-, beta-, gamma- und omega-Gliadine unterteilt (12).

Glutenin ist teilweise in verdünnter Essigsäure löslich. Nach Dialyse des gelösten Anteils verbleibt eine Fraktion, die als unlösliches Glutenin bezeichnet wird. Die Gluteninfraktionen werden nach Beweglichkeit ihrer Komponenten in SDS-Page in hochmolekulargewichtige (HMW) und niedermolekulargewichtige (LMW) aufgeteilt. Sie weisen Molekulargewichte von 10.000 bis 130.000 auf (4, 8).

Für die experimentelle Durchführung dieser Arbeit und die daraus zu ziehenden Schlussfolgerungen war es von großer Bedeutung, dass sich die Löslichkeit der Proteine während der Teigbereitung ändert. Durch komplexe Prozesse der Teigbildung kommt es zur Ausbildung eines geschlossenen Proteinnetzes. Dabei verändert sich die Berührungsfläche zwischen Proteinen und Lösungsmitteln, was sich auf die Extrahierbarkeit der Glutenproteine auswirkt. So wurde es nachgewiesen, dass die Löslichkeit der Gliadine und Globuline im Mehl größer ist als im Teig (51). Umgekehrtes gilt für die Albumine (51). Die Löslichkeit der Glutenine steigt während der Knetung, und diese Löslichkeitsänderung wird als Folge einer Depolymerisation erklärt (25, 57).

Hinsichtlich der Löslichkeit besteht zwischen starken und schwachen Weizensorten ein wesentlicher Unterschied. Er besteht darin, dass sich Gliadine aus weicheren Weizen leichter extrahieren lassen als aus härteren Weizen (4). Dafür sind zwei Faktoren verantwortlich: die Größe der Gluteninmoleküle und die Bindungskräfte zwischen den Gluteninmolekülen (4). Weiterhin wurde festgestellt, dass der lösliche Anteil der Proteine bei schwachen Weizensorten während des Knetens stärker in Lösung geht als bei starken. Es ist außerdem bekannt, dass sich die Löslichkeit der Proteine während des Backens ändert (5, 51, 58).

Mit dem Kneten wird allerdings unlösliches Glutenin noch weniger löslich (5, 51, 52), wobei die Löslichkeit des Glutenins im Teig größer als im Mehl ist (51). Die Löslichkeit der HMW- und LMW-Fraktionen fallen durch das Kneten und die der MMW-Fraktion steigt dadurch an (11). Wechselwirkungen zwischen Glutenin und Gliadin scheinen die Löslichkeit in Essigsäure zu beeinflussen, wobei die stärkeren Wechselwirkungen größere Löslichkeit verursachen (53). Im Teig ist ein Teil der Glutenine in Wasser löslich, da während des Knetens die ursprüngliche Struktur verändert wird, wobei in Abhängigkeit von der Knetzeit ein Teil der Gluteninmoleküle in kleinere Bruchstücke aufgespalten wird (4).

Wie die Literaturübersicht zeigte, können die Änderungen in der Extrahierbarkeit der Glutenproteine in Mehl-Wasser-Systemen im Vergleich zu der in Mehl wichtige Informationen sein. Daraus kann man indirekte Rückschlüsse auf Unterschiede in den Strukturen von Mehl-Wasser-Systemen ziehen.

2.2. Physikalische Eigenschaften

Üblicherweise werden die physikalischen Eigenschaften eines Weizenteiges bzw. eines Mehl-Wasser-Systems mit rheologischen Messinstrumenten dargestellt. Dabei ist man bemüht, visko-elastische Eigenschaften der Teige zu beschreiben. Diese treten in Abhängigkeit von der Beanspruchungsart und den Beanspruchungsbedingungen als Stoffeigenschaft in Erscheinung (59). Für die Beschreibung der Systemstruktur sind nach Tscheuschner (59) die mikrorheologischen Eigenschaften besonders wichtig. Die Mikrorheologie betrachtet Stoffe in ihrem molekularen Aufbau und unter Berücksichtigung der Art, Form, Größe, Konzentration sowie der Wechselwirkungen der Komponenten während des Deformationsvorganges (59).

Für die Darstellung der rheologischen Eigenschaften der Mehl-Wasser-Systeme sind in dieser Arbeit drei verschiedene Messarten, das Kneten, die Dehnung und letztlich die dynamische

oszillierende Scherung gewählt worden (Abb. 4). Zur Begründung der Wahl muss angemerkt werden, dass die beiden zuerst genannten praxisbezogenen Messmethoden ausreichend genaue Hinweise auf den Verarbeitungswert eines Weizenmehles bieten und daher sehr verbreitet sind. Vom Messprinzip her wenden sie große äussere Kräfte an, die die Eigenschaften und die Struktur der Stoffe während der Messung beeinflussen. Da sie immer die Messung nur unter einer Messbedingung (eine konstante Knetgeschwindigkeit, eine konstante Dehnungsgeschwindigkeit) vornehmen, nehmen sie den Charakter einer Ein-Punkt-Messung ein. Die dynamische oszillierende Messart kann hingegen beliebig niedrige Kräfte anwenden, die eine exakte Messung der genannten rheologischen Eigenschaften ermöglicht. Darüber hinaus sind in einem Rheometer mehrere Messbedingungen an einer Messprobe programmierbar. Dadurch werden die physikalischen Eigenschaften des zu untersuchenden Stoffes besser und ausführlicher beschrieben. Mit diesen Messarten ist es dennoch möglich, sowohl die Reaktion als auch Veränderungen der Stoffe zu betrachten.

2.2.1. Knetversuch

Mit dem Brabender Farinograph werden im Laboratoriumsmaßstab aus Weizenmehl und Wasser Teige hergestellt, die von gleicher Konsistenz sind, wie die Teige in der Praxis der Brotherstellung. Mit diesem Knetter werden darüber hinaus über die Messung des Drehmoments die eingebrachte Energie und die Veränderungen der Konsistenz des Teiges kontinuierlich registriert. Ein so aufgezeichnetes Zeit-Kraft-Diagramm (Abb. 5) beschreibt die Entwicklung eines Teiges in Abhängigkeit von den Mehleigenschaften durch den Eintrag der mechanischen Energie sowie weitere Reaktionen als Funktion der Knetdauer bei einer konstanten Knetgeschwindigkeit (15, 60). Die wichtigsten Merkmale der Farinogramme sind die Wasseraufnahme die zur Erreichung einer Teigkonsistenz entsprechend 500 FE (Farinogramm-Einheiten) erforderlich ist, Teigentwicklungszeit, Stabilität und Teigerweichung (Abb. 5).

Der Farinograph ist oft zur Beschreibung und Erklärung der Struktur der Weizenteige mit Erfolg eingesetzt worden. In Veröffentlichungen wurde gezeigt, dass die rheologischen Eigenschaften eines Teiges vom Knetsystem und der Dauer der Knetung abhängig sind (61). Bei der Anwendung einer schonenden Knetung über 15 und 25 Minuten wurde eine enge positive Korrelation zwischen Proteingehalt und Volumenausbeute der Gebäcke gefunden (62).

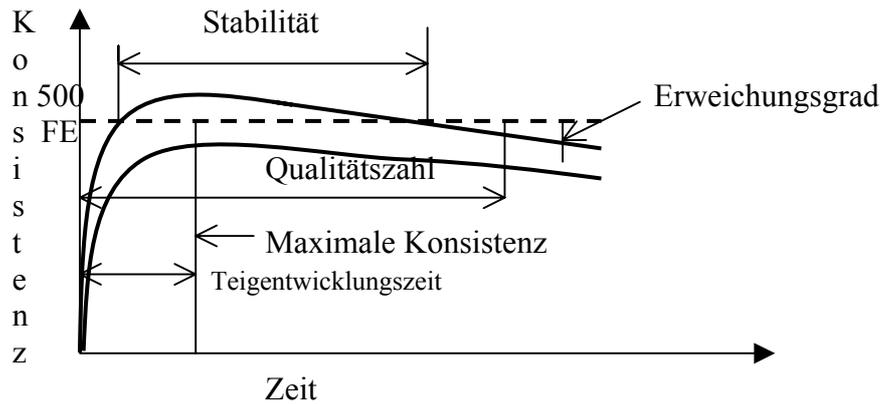


Abb. 5: Farinogrammcurve.

Es wurde gezeigt, dass sowohl die Proteinzusammensetzung als auch die Eigenschaften der Proteine das Verhalten der Teige während des Knetens beeinflussen. Je höher der Gehalt an Glutenin im Mehl, desto länger war die Teigentwicklungszeit (63). Es wurde weiterhin beobachtet, dass die Knettoleranz bzw. die Teigstabilität vom Verhältnis der kovalenten Disulfid-Bindungen und nicht kovalenten Wasserstoffbrücken im entwickelten Gluteninnetz abhängig war (64). Die Teigentwicklungszeit war stark beeinflusst vom Verhältnis Glutenin / Gliadin. Sowohl der Anstieg des Proteingehaltes bei einem konstanten Glutenin / Gliadin Verhältnis, als auch der Anstieg des Glutenin / Gliadin - Verhältnisses bei einem konstanten Proteingehalt im Mehl verlängerten die Teigentwicklungszeit (65).

Mit dem Farinographkneteter wurden normal geknetete, voll entwickelte, und unterknetete „nicht entwickelte“ Teige hergestellt. Die Autoren definierten den nicht entwickelten Teig als einen Teig, bei dem der Knetprozess vor dem Maximum im Farinogramm unterbrochen wurde (66). Sie beobachteten, dass der nicht entwickelte Teig durch Anwendung einer weiteren Knetung in einen normalen Teig überführt wurde (66, 67).

Der Farinograph ist für die Betrachtung der Thematik dieser Arbeit insofern gut geeignet, da er nicht nur Veränderungen der Konsistenz der Teige während der Knetung registriert, sondern darüber hinaus die Möglichkeit bietet, den Energieeintrag in jedem Punkt der Kurve abzulesen bzw. zu berechnen.

2.2.2. Dehnungsmessungen

Die visko-elastischen Eigenschaften der Weizenteige können durch Dehnungsversuche mit dem Brabender Extensograph und Chopin Alveograph beschrieben werden. Hierbei wird ein in einem externen Knetter hergestellter und vorbereiteter Teig einem Zug-Dehnungs-Versuch unterzogen und seine visko-elastischen Eigenschaften in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Extensogramm bzw. Alveogramm, wiedergegeben (15). Die Anwendung der Methoden mit den Geräten ist in den ICC Standards 114/1 und 121 beschrieben. Theorie und Praxis dieser Methoden wurden in Handbüchern aber auch in zahlreichen Veröffentlichungen mit ihren Vorteilen und Nachteilen diskutiert (68, 69).

Im Wesentlichen unterscheiden sich die beiden Methoden durch die Bereitung der Teige: konstante Konsistenz bei dem Extensographen und konstante Wasserzugabmenge bei dem Alveograph. Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass die Methode Extensograph drei Messungen an einem Teig (nach 45, 90 und 135 Minuten Ruhezeit) ermöglicht, während die Methode Alveograph nur eine Messung (nach 28 Minuten vom Anteigen) gestattet. Dies ist für das Messergebnis relevant, da die durch Knetung und Formung im Teig entstandene Spannung erst nach 45 Minuten so weit abgeklungen ist. Daher eignet sich die Methode Extensogramm durch komplexe Betrachtung der Charakteristika der Dehnungskurven zur Beurteilung der Teige besser, als die Bewertung nur einzelner Messdaten (70).

Die Deformation der Teige erfolgt im Extensograph durch eine uniaxiale Dehnung eines Teigstranges, während im Alveograph an einem zu einer dünnen Platte laminierten Teig eine biaxiale Dehnung mittels Luftdrucks erfolgt (15). Als Messergebnis werden Dehnungskurven erhalten, deren Auswertung nach analogen Prinzipien erfolgt (Abb. 6 und 7).

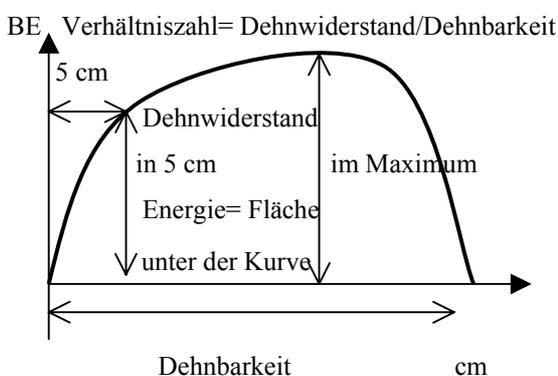


Abb. 6: Extensogrammkurve.

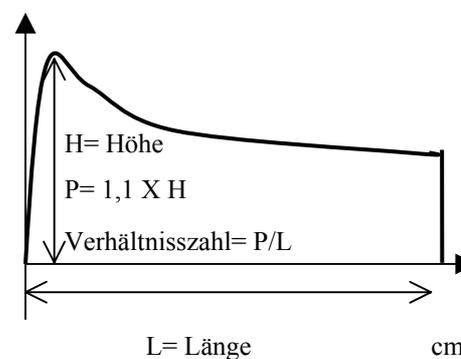


Abb. 7: Alveogrammkurve.

Den Kurven ist zunächst der Dehnwiderstand (DW bei 5cm bzw. im Maximum beim Extensogramm) und der maximale Druck P (beim Alveogramm) zu entnehmen. Sie können die Festigkeit oder Steifheit des Teiges beschreiben und als elastische Komponente seiner visko-elastischen Eigenschaften angesehen werden. Die Dehnbarkeit der Teige wird in den beiden Kurven mit der Länge (DB im Extensogramm und L-Wert im Alveographen) angezeigt. Demzufolge wird das visko-elastische Verhalten des Teiges am deutlichsten mit der Verhältniszahl DW / DB oder P / L - Wert angezeigt. Die Deformationsarbeit wird aus der Fläche unter der Kurve errechnet und als Gashaltevermögen eines Teiges angesehen. Eine gute Mehqualität wird im allgemeinen durch hohe Werte für Energie bei optimalen Verhältniszahlen beschrieben.

Ungeachtet der kritischen Anmerkungen haben die beiden Methoden der Getreidewissenschaft und Praxis gute Dienste geleistet. In Veröffentlichungen wurde berichtet, dass die visko-elastischen Eigenschaften der Teige, angezeigt durch die Verhältniszahl aus Elastizität und Dehnbarkeit, sowohl von Typ und Menge der Gluteninuntereinheiten, als auch von Typ und Menge der Gliadine abhängig sind (71, 72, 73, 74).

Weiterhin wurde festgestellt, dass der Gluteninanteil im Protein des Mehles den Dehnwiderstand und die Dehnbarkeit des Teiges beeinflusst (75, 76, 77). Die Dehnbarkeit eines Teiges, insbesondere nach längerer Teigruhe von 90 bzw. 135 min, korreliert besser mit dem Gluteningehalt im Mehl als mit dem Gluteningehalt im Gluten. Dahingegen korreliert der Dehnwiderstand besser mit dem Gluteningehalt im Gluten als mit dem Gluteningehalt im Mehl (63). Die HMW-Gluteninuntereinheiten beeinflussen den Erweichungsgrad und den Dehnwiderstand der Teige, nicht aber seine Dehnbarkeit (78). Es wurde weiterhin über eine positive Korrelation zwischen den Gluteninmakropolymeren und dem Maximum der Extensogramme nach 45 min Ruhezeit berichtet (57). Der Polymergehalt (SE-HPLC) beeinflusst die rheologischen Eigenschaften der Teige, dargestellt mit den P- und W-Werten des Alveogramms, nur teilweise signifikant (79). Ebenso beeinflussen die löslichen Polymere der SDS-Lösung die P- und die W-Werte negativ, wenn auch nur teilweise signifikant, aber die L-Werte positiv (79). Eine Zugabe von Gluteninmonomeren mindert den Dehnwiderstand und erhöht die Dehnbarkeit im Extensogramm (80).

Es wurde weiterhin beobachtet, dass ein Zusatz von alpha-, beta-, gamma- und omega- Gliadinen beim Kneten der Teige zu einer Minderung des Dehnwiderstandes im Extensogramm

führte (81). Lagudah und Mitarbeiter (78) haben dagegen keinen Einfluß von Gliadinen auf die rheologischen Eigenschaften der Teige gefunden.

Bei einem konstanten Glutenin / Gliadin-Verhältnis bewirkte ein zunehmender Proteingehalt einen Anstieg des Dehnwiderstandes und der Dehnbarkeit der Teige im Extensogramm. Ein Anstieg des Glutenin / Gliadin-Verhältnisses bei konstantem Proteingehalt wirkt in gleicher Weise (65).

Der Energieeintrag bei der Teigzubereitung, d.h. die aufgewendete mechanische Energie, wirkt sich erwartungsgemäß auf die rheologischen Eigenschaften der Teige aus. Das Extensogrammmaximum bei Teigen, die mit größerem Energieeintrag hergestellt wurden, war kleiner (60). Wooding (82) berichtet, dass mit dem Anstieg der Teigentwicklungszeit (im Farinogramm) auch der Dehnwiderstand (im Extensogramm) steigt.

Die Dehnungsmessungen mit dem Extensograph und dem Alveograph sind für diese Arbeit gewählt worden, da einerseits die Eigenschaften der verwendeten Mehle mit diesen Methoden charakterisiert wurden, und da sie andererseits einen Vergleich der Mehl-Wasser-Systeme untereinander ebenfalls ermöglichen.

2.2.3. Oszillationsmessungen

Die dynamisch-mechanische Analyse (DMA) wird als relativ neue, aussagekräftige und leistungsfähige Methode zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften der Stoffe angesehen (15). Dynamischer Elastizitätsmodul und dynamischer Viskositätsmodul treten auf, wenn die Spannung oder Dehnung als Funktion der Zeit nicht konstant sind, sondern sich sinusförmig mit der Zeit ändern (Abb. 8) (59). Aus der Größe des Antwortsignals wird aus der Phasenverschiebung der Antwort in Relation zu Beanspruchung auf das visko-elastische Verhalten geschlossen.

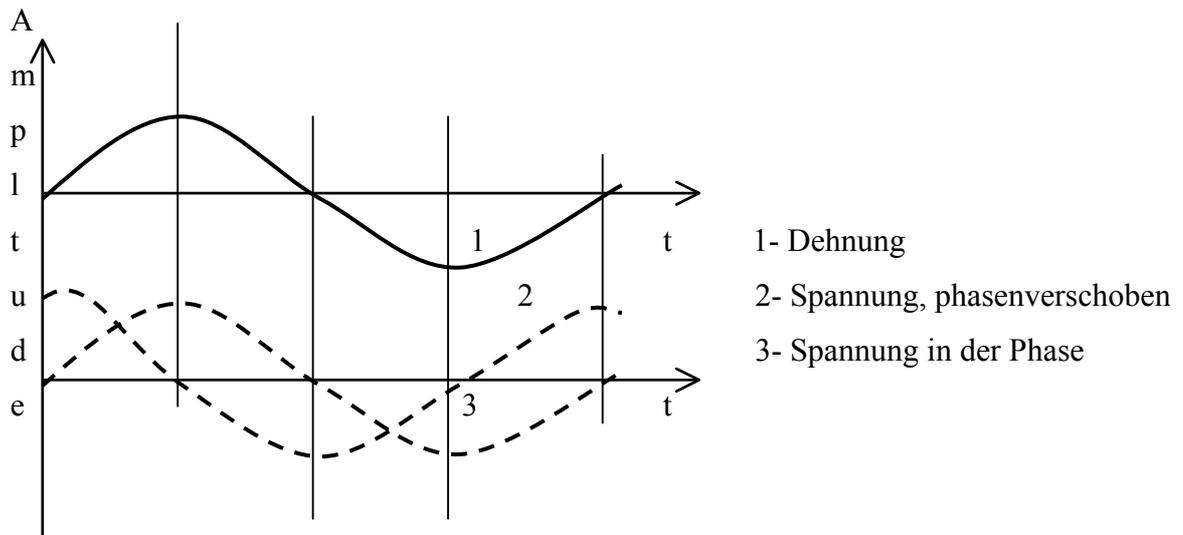


Abb. 8: Schnelle sinusförmige Änderung von Spannung und Dehnung bei viskoelastischen Körpern (59).

Als Messgrößen werden die komplexen Moduli G^* in Scherung bzw. E^* in Dehnung registriert. Als zweite wichtige Messgröße wird der Speichermodul G' bzw. E' registriert, der den elastischen Anteil des komplexen Moduls beschreibt. Aus der Differenz der komplexen Moduli und der Speichermoduli errechnet sich der imaginäre Verlustmodul G'' bzw. E'' , der die viskosen Eigenschaften der Messprobe beschreibt. Die visko-elastischen Eigenschaften der Messprobe werden durch den Tangens Delta bzw. den Verlustwinkel angezeigt, der als Quotient aus G''/G' bzw. E''/E' dargestellt wird. Folglich beschreibt ein kleines Tan Delta einen Stoff von ausgeprägteren elastischen Eigenschaften als ein großer.

Diese, zu der fundamentalen Rheometrie zählende Messart, wendet beliebig kleine bis große Deformationskräfte in einem Amplitudenversuch (bei einer konstanten Frequenz) oder in einem Frequenzversuch (bei einer konstanten Amplitude) an. Auf diese Weise werden die rheologischen Eigenschaften eines Stoffes bei definiert steigenden oder fallenden Beanspruchungen beobachtet. Die Beanspruchung kann durch die Scherung in koaxialen Zylindern (für flüssige, niederviskose Stoffe) oder in einem Platte-Kegel- bzw. Platte-Platte- (bei festen bzw. halb festen Körpern) erfolgen.

Der Deformationsversuch wird angewandt, um ein lineares viskoelastisches Verhalten zu registrieren, wobei die rheologischen Eigenschaften von der Beanspruchung nicht abhängig sind (14). Der Frequenzversuch zeigt, in welcher Weise sich viskoses bzw. elastisches Verhalten mit der Häufigkeit der Beanspruchung ändern (14).

Derartige Frequenz- und Amplitudenversuche sind ferner vorgenommen worden, um den Einfluss der Handelsqualität, des Proteingehaltes und der Wasserzugussmenge auf das Fließverhalten der Weizenteige zu zeigen (16, 83). Der Einfluss von Wasserzugussmenge wurde von anderen Autoren ebenso untersucht, und es wurde gezeigt, dass mit dem Anstieg der Wassermenge im Teig die registrierenden Moduli G' (Elastizitätsmodul) und G'' (Viskositätsmodul) sinken (17, 84, 85).

Gluten und die wasserlösliche Komponenten der Weizenproteine beeinflussen ebenfalls die in dynamischer Weise gemessenen Eigenschaften der Teige. Mit der Zugabe von wasserlöslichen Proteinen sind die G' - und G'' -Werte gestiegen (10). Gluten zeigt ein bei kleinen Belastungen lineares Verhalten, während durch höhere Belastungen die Moduliwerte ein nichtlineares Verhalten annehmen (86, 87).

Weiterhin wurde versucht, einen Beitrag zur Aufklärung der Glutenstruktur anhand der Beschreibung der rheologischen Eigenschaften des Glutens und seiner isolierten Komponenten Glutenin und Gliadin in getrennten Messungen zu leisten (88). Dabei wurde zunächst festgestellt, dass Gluten von starker elastischer Struktur höhere Werte für G' und G'' aufgewiesen hat als Gluten von schwacher und dehnbarer Struktur. Außerdem wurde beobachtet, dass die G' - und G'' -Werte des Glutenins wesentlich höher lagen als die des Gliadins. Die G' - und G'' -Werte des Glutens lagen jeweils intermediär zwischen den Werten seiner Komponenten Glutenin und Gliadin. Diese Messungen haben die Auffassung, dass Glutenin die elastischen und Gliadin die viskosen Eigenschaften eines Glutens darstellen, untermauert.

Tsiami und Mitarbeiter (89) haben rheologische Eigenschaften von Gluteninuntereinheiten mit der mechanisch-dynamischen Meßweise untersucht und festgestellt, dass die ansteigenden HMW-Gehalte zu höheren Moduliwerten führten. Die Moduliwerte fielen, sobald der Gehalt an LMW anstieg. Auch diese Beobachtung unterstützt die These, dass HMW-Glutenin die elastischen Eigenschaften der Teige und der Mehl-Wasser-Systeme erhöht.

Campos (90) hat die dynamisch-oszillierende Messmethode bei der Betrachtung der Eigenschaften der „entwickelten“ und der „nicht entwickelten“ Teige eingesetzt. Die von ihm als nicht-entwickelten Teige bezeichneten Mehl-Wasser-Systeme wurden durch Mixen von eingefrorenem Mehl und Eis zubereitet. Dabei hat er beobachtet, dass die nicht entwickelten Teige kleinere Komplexmoduli aufwiesen als die entwickelten, und dass sie weniger resistent gegenüber der mechanischen Beanspruchung waren.

Die dynamisch-mechanische Analyse (DMA) ist zur Darstellung der rheologischen Eigenschaften der Mehl-Wasser-Systeme wegen ihrer Vorteile gegenüber den Methoden der imitierenden Rheometrie verwendet worden. Diese sind in der Tatsache begründet, dass sie die rheologischen Eigenschaften der Messproben sehr genau und ausführlich in einem Messansatz erfassen ohne die Struktur der Messprobe zu stören.

2.3. System- und Proteinmorphologie

2.3.1. Mikroskopische Untersuchungen

Mikroskopische Untersuchungen werden mit dem Ziel angewandt, morphologische Strukturen von Stoffen, beispielsweise von Mehl-Wasser-Systemen, direkt zu beobachten. Mit diesen Untersuchungen sind bereits wichtige Fortschritte in der Erklärung der Gluten- und Teigsystembildung erzielt worden (6, 20, 91).

Die Hydratisierung von Mehlpartikeln war Gegenstand von Untersuchungen von Bernardin und Kasarda (6). Sie beobachteten, dass sich im Augenblick des Wasserkontaktes aus den Mehlpartikeln heraus Proteinfäden bilden, die sich im Wasser ausbreiten. Seckinger und Wolf (19) kamen zum gleichen Ergebnis und berichteten von fibrillären Strukturen, die sich an der Wasseroberfläche aus den Mehlpartikeln bilden. Auch andere Autoren beobachteten bei der Untersuchung von Teig und Gluten filmartige Proteinstrukturen, die in Verbindung mit fibrillären Formen stehen und ineinander umgewandelt werden können (20, 91, 92).

Weitere Erklärungen dazu hat Amend gegeben (54, 93). Er beobachtete, dass durch Kneten Proteinstränge des Gerüstwerkes gedehnt und zu Filmen auseinandergezogen werden. Diese Filme bilden in einem optimal entwickelten Teig und im Gluten übereinander liegende Schichten, wodurch sich auf diese Weise Membranen aufbauen. Durch Überkneten werden die Filme zerstört, und es bildet sich wieder ein Netzwerk aus (93). Den in Mehlpartikeln vorhandenen Kleber bezeichnete er als „zellulären Kleber“, aus dem bei der Teigherstellung ein den gesamten Teig durchziehender „aggregierter Kleber“ entsteht (54).

Von Pomeranz et al. (94) durchgeführte rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen von Teigen bestätigten, dass die Struktur des Weizenteiges auf den glutenbildenden Eigenschaften der Weizenproteine beruht, wobei Interaktionen zwischen Protein und Stärke ebenfalls eine Rolle spielen.

Paredes-Lopez und Bushuk (95) stellten Unterschiede in der Struktur der Teige in Abhängigkeit von der Knetung fest. Dabei besaßen relativ wenig geknetete Teige eine „zerbrochene“, nicht gleichmäßig ausgebildete Struktur, die als Ergebnis der Aggregation der Proteine entstanden war, die bei weiterer Knetung und Teigentwicklung in Membranstrukturen überging (95).

Bezogen auf die vorzitierten Ergebnisse ist es nun von Interesse, dass Bachie und Donald (96) mit Hilfe des Environmental Scanning Elektronenmikroskops (ESEM) Gluten im hydratisierten Zustand untersuchten. Sie fanden im Gegensatz zu den zitierten Arbeiten keine fibrilläre Struktur des Glutens. Sie deuteten die von den anderen Autoren beobachtete fibrilläre Struktur als Folge der Dehydratation bei der Gefriertrocknung.

Der Literaturüberblick über die Anwendung mikroskopischer Untersuchungen zur Klärung der Strukturen von Teigen zeigt deutlich die Problematik in der Betrachtung der sichtbar gemachten Strukturen auf. Es erweist sich insbesondere als problematisch, die Kleberbildung als Folge der mechanischen Energieeintragung in Teig zu interpretieren, weil die nach der Gefriertrocknung der Teige sichtbar werdenden Strukturen in Abhängigkeit von der Sublimation des Wassers entstehen. Obwohl die Anwendung der Rasterelektronenmikroskopie diese Nachteile aufweist, wurde sie benutzt, um Unterschiede in den Strukturen der hier zu untersuchenden HUM-Systeme gegenüber Teigen zu zeigen. Das Auftreten von Artefakten bei der Vorbereitung der Proben zur Rasterelektronenmikroskopie kann hierbei insofern vernachlässigt werden, als in die HUM-Systeme keine mechanische Energie eingetragen wird. Die Hydratisierung des Klebers erfolgt deshalb *in situ*. Diese Vorgehensweise ist fundamental von der Teigbildung verschieden und sollte deshalb allein in Unterschieden in der Verteilung des Proteins in Gluten-Systemen durch Rasterelektronenmikroskopie sichtbar gemacht werden können.

V Material und Methoden

1. Material

Für die Durchführung dieser Arbeit wurden fünf Weizenmehle eingesetzt, die aus sortenreinen Weizen unterschiedlicher Qualitätseinstufung mit einem Bühlerautomaten hergestellt worden waren. Die Weizensorten waren Bussard und Zentos, beide E-Weizensorten (Eliteweizen), Batis, eine A-Weizensorte (Aufmischweizen), Ritmo, eine B-Weizensorte (Brotweizen oder Backweizen) und Contra, eine C-Weizensorte mit schlechten Backeigenschaften. Alle Weizensorten waren aus der Ernte 1998. Alle fünf Sorten sind im Anbau verbreitet und somit ist bei der Wahl dieser Weizensorten auch dem Qualitätsbild des Weizenanbaues in Deutschland Rechnung getragen worden.

2. Methoden

2.1. Bestimmung der Mehleigenschaften

Die Mehle wurden nach den in der Abbildung 3 genannten Methoden charakterisiert. Es handelt sich dabei um ICC Standardmethoden, die in der Praxis und Wissenschaft der Getreideverarbeitung Anwendung finden (97). Im einzelnen wurden:

der Mineralstoffgehalt nach der ICC Standardmethode Nr. 104/1,

der Gesamtproteingehalt nach ICC Standardmethode Nr. 105/5 bestimmt,

das Versuchsmehl für den Sedimentationswert nach ICC Standardmethode Nr. 118 ermahlen,

der Sedimentationswert nach ICC Standardmethode Nr. 116,

der Feuchtglutengehalt und der Glutenindex nach der ICC Standardmethode Nr. 155,

sowie das Verkleisterungsverhalten der Stärke in den Mehlen mit

der ICC Standardmethode Nr. 107/1 (Fallzahl) und

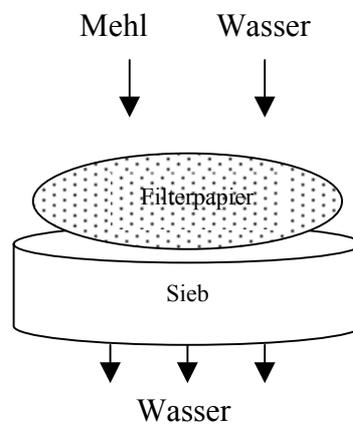
der ICC Standardmethode Nr. 126/1 (Amylograph) bestimmt.

2.2. Herstellung von Mehl-Wasser-Systemen und Berechnung des Energieeintrages

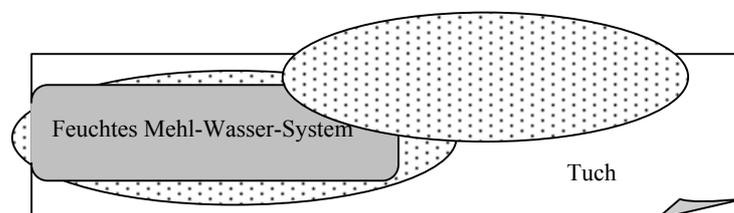
2.2.1. HUM-Systeme

Die HUM-Systeme wurden ohne externen Energieeintrag hergestellt. Dazu wurde Filterpapier (595 1/2 Faltenfilter) auf einem Sieb ausgelegt und leicht mit destilliertem Wasser befeuchtet. Anschließend wurde eine definierte Mehlmenge (abhängig von der nachfolgenden Messung) in einer dünnen Schicht (von etwa 0,5 cm) auf dem Filterpapier gleichmäßig verteilt (Abb. 9). Das HUM-System wurde hergestellt, indem man über die dünne ausgebreitete Mehlschicht destilliertes Wasser im Überschuss (Mehl-Wasser-Verhältnis 1 : 5) goß. Die Höhe der aufgebrauchten Wasserschicht über der Mehlschicht war gering. Nachdem das Wasser den Mehlfilm durchdrungen hatte und der Überschuss abgelaufen war, wurde das noch sehr feuchte Mehl-Wasser-System aus dem Sieb herausgenommen und in ein trockenes Tuch vorsichtig eingepackt. Nach einer von der Mehlmenge abhängigen Abstehtzeit wurde das HUM-System erzeugt und wies angestrebte Wassermenge auf. Der Wassergehalt des HUM-Systems wurde durch Auswiegen bestimmt.

1.



2.



3.

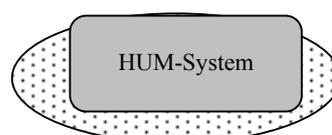


Abb. 9: Schematische Darstellung der Herstellung der HUM (hydratisierte ungeknetete Mehl)-Systeme.

Der minimale Energieeintrag bei der HUM-Systembereitung resultierte aus der potentiellen Energie (W_p) des Wassers durch die Veränderung der Lage, durch den hydraulischen Druck der Wasserschicht über der Mehlschicht beim Durchfließen durch den Mehlfilm. Insbesondere der hydraulische Druck änderte sich mit der Zeit des Wasserfließens durch das HUM-System kontinuierlich mit dem Absinken des Wasserpegels, so dass eine genaue Berechnung des ohnehin geringen Energieeintrages sowie die Korrektur der errechneten potentiellen Energie vernachlässigt werden kann. Die Möglichkeit, dass die latente chemische Energie (W_l) der Mehlinhaltsstoffe an der Entstehung des HUM-Systems durch einen Energieeintrag beteiligt sein könnte, ist nicht außer Acht gelassen worden. Die gemessenen Temperaturveränderungen während der Entstehung der HUM-Systeme und die somit daraus resultierende Freisetzung der latenten chemischen Energie (W_l) der Mehlinhaltsstoffe in das HUM-System waren äußerst klein. Der gemessene bzw. errechnete Energieeintrag durch die potentielle und chemische Energie ist außerordentlich gering, so dass er im Vergleich zu der durch das Kneten der Teige eingetragenen Energie vernachlässigt werden kann. Somit dürfen HUM-Systeme als Systeme, die ohne Energieeintrag entstanden sind, angesehen und bezeichnet werden.

Der Energieeintrag der potentiellen Energie bei der Veränderung der Lage des Wassers:

$$W_p = m \cdot g \cdot h \quad (98) \quad (\text{Gl. 1})$$

W_p potentielle Energie [J]

m Masse des Körpers (des Wassers) [kg]

h Höhe, um die der Körper (das Wasser) gehoben wird bzw.
die Dicke der Mehlschicht [m]

g Fallbeschleunigung = $9,81 \text{ m/s}^2$

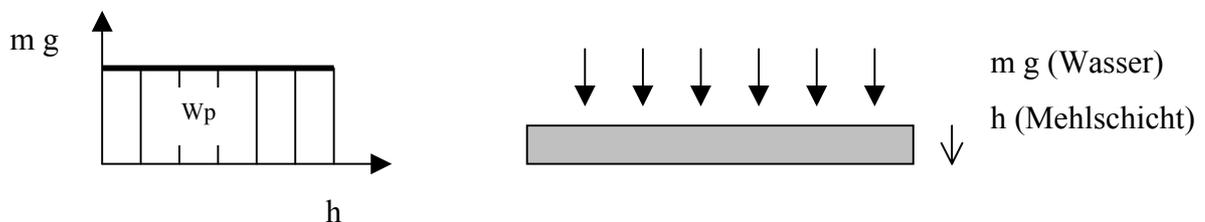


Abb. 10: Schematische Darstellung der Berechnung der potentiellen Energie.

$$\begin{aligned} W_p &= 0,005 \cdot 0,005 \cdot 9,81 \\ &= 0,00025 \text{ J} \end{aligned}$$

Bezogen auf 1 g Mehl bzw. 5 cm³ Wasser wird mit dem Durchlaufen des Wassers eine Energie von 0,00025 J/g Mehl eingebracht.

2.2.2. Teige

Die den konventionellen Teigen entsprechenden Mehl-Wasser-Systeme wurden in einem Farinographknetter nach der ICC Nr. 115/1 (97) hergestellt. Dabei erfolgten auch die Temperaturmessungen. Der Energieeintrag wurde unter Einbeziehung des aufgezeichneten Kurvenverlaufs in der Teigentwicklungsphase berechnet. Die Berechnung erfolgte nach einer von der Fa. Brabender, Hersteller des Farinographs, mitgeteilten Gleichung (99):

$$E/M = 9,81 \cdot 10^{-5} \cdot 2\pi/60 \cdot 60 \cdot b' \Omega' / M h v' \cdot A' \quad (\text{Gl. 2})$$

$$E/M = 6,16 \cdot 10^{-4} \cdot b' \Omega' / M h v' \cdot A' \quad (\text{Gl. 3})$$

E	Energie [J]
M	Teigmasse [kg]
b'	Skalawert [gfc/cm/FE]
Ω'	Umdrehungen [upm]
v'	Geschwindigkeit des Papiertransportes [cm/min]
h	Papierbreite pro FE-Einheit [cm/FE]
A'	Fläche unter der Kurve [cm ²]

Im einzelnen wurden für die als Ausgangsmaterial gewählten Sortenmehle Energieeinträge errechnet:

mit dem Mehl der Sorte Bussard :

$$E/M = 6,16 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 63 \cdot 31,1/0,4833 \cdot 0,0178 \cdot 1$$

$$E/M = 14029,65 \text{ J/kg}$$

$$E/M = 14,03 \text{ J/g}$$

mit dem Mehl der Sorte Zentos:

$$E/M = 3,8808 \cdot 29,15/0,474 \cdot 0,0178 \cdot 1$$

$$E/M = 13407,92 \text{ J/kg}$$

$$E/M = 13,41 \text{ J/g}$$

mit dem Mehl der Sorte Batis:

$$E/M = 3,8808 \cdot 9/0,4821 \cdot 0,0178 \cdot 1$$

$$E/M = 4070,96 \text{ J/kg}$$

$$E/M = 4,07 \text{ J/g}$$

mit dem Mehl der Sorte Ritmo:

$$E/M = 3,8808 \cdot 11,9/0,4779 \cdot 0,0178 \cdot 1$$

$$E/M = 5428,90 \text{ J/kg}$$

$$E/M = 5,43 \text{ J/g}$$

mit dem Mehl der Sorte Contra:

$$E/M = 3,8808 \cdot 5/0,4608 \cdot 0,0178 \cdot 1$$

$$E/M = 2365,71 \text{ J/kg}$$

$$E/M = 2,37 \text{ J/g}$$

Stellt man die errechneten Energiewerte tabellarisch zusammen, so ergibt sich ein Bild, das den Energieeintrag beim Kneten der Teige im Vergleich zum HUM-System ohne Eintrag der mechanischen Energie deutlich differenziert (Tab.1). Der unterschiedliche Energiebedarf für Entwicklung und Herstellung der Teige von solcher Konsistenz, wie sie bei der Brotherstellung erforderlich ist, zeigt die unterschiedliche Glutenstruktur der Weizensorten auf. Dabei hatte die Temperaturänderungen bei der Herstellung der Teige positives Vorzeichen, was auf die Energieeinbindung hinwies. Die HUM-Systeme wiesen demgegenüber äußerst geringe Werte für den Energieeintrag auf, die um den Faktor 10^4 niedriger lagen als der Energieeintrag in den Teigen mit mechanischer Knetenergie hergestellt. Während der HUM-Systementwicklung ergab die Temperaturänderungen negatives Vorzeichen. Diese Zahlen verdeutlichen die bereits getroffene Feststellung, dass die HUM-Systeme ohne Energieeintrag entstanden sind.

Tabelle 1: Energieeintrag errechnet als mechanische Energie beim Kneten der Teige im Farinograph bis zu Teigentwicklung im Farinogramm und latente chemische Energie gegenüber der errechneten potentiellen und latenten chemischen Energie bei Entstehung der HUM-Systeme.

	Bussard	Zentos	Batis	Ritmo	Contra
EM J/g	14,03	13,41	4,07	5,43	2,37
WI als Δt_{Teig}^1 °C	1,5	0,8	0,7	0,8	0,4
Wp J/g	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025
WI als Δt_{HUM}^2 °C	- 2	- 1,7	- 1,4	- 1,6	- 1,2

¹⁾ $t_2 - t_1$ = Temperatur des Teiges – Temperatur des Wassers bzw. Temperatur des Mehles

²⁾ $t_2 - t_1$ = Temperatur des HUM-Systems – Temperatur des Wassers bzw. Temperatur des Mehles

2.3. Fraktionierung nach Osborne

Die Proteine der in dieser Arbeit eingesetzten Mehle wurden nach der modifizierten Osborne-Methode fraktioniert (100, 101). Die Untersuchung des Fraktionierungsverhaltens der Proteine in den Teigen und den HUM-Systemen aus den Mehlen wurde nach der gleichen Methode durchgeführt, um Veränderungen in der Proteinlöslichkeit differenzieren zu können. Dazu wurden die Proteine aus gekneteten Teigen und HUM-Systemen fraktioniert. Die Teige waren aus 50 g Mehl durch Zugabe von destilliertem Wasser im Farinographknetter bis zur Teigentwicklung hergestellt worden.

Die HUM-Systeme wurden ebenso aus 50 g Mehl durch Zugabe von destilliertem Wasser zubereitet. Sie wurden vorsichtig ohne Anwendung von mechanischer Beanspruchung dem ersten Extraktionsschritt zugeführt.

Die Fraktionierung der Proteine aus den Mehlen, Teigen und HUM-Systemen ist gleichermaßen nach dem in Abbildung 11 dargestellten Schema vorgenommen worden. Jede Extraktion wurde dreimal wiederholt. Die Extraktionsschritte wurden mit 10 ml des entsprechenden Lösungsmittels angesetzt, 15 min geschüttelt und danach zentrifugiert. Das Zentrifugieren erfolgte in einer Beckman Avanti J-25 Zentrifuge bei 10° C und 9000 U/min während 15 min. Die extrahierten Proteinfraktionen wurden drei Tage gegen Wasser dialysiert. Nach der Dialyse wurden sie bei -40 °C in einer Christ Beta 1-8k Gefrieranlage eingefroren und bei -30° C unter 0,37 mbar gefriergetrocknet. Zur Quantifizierung der Verteilung der Proteine auf die Proteinfraktionen wurde der N-Gehalt in den Fraktionen nach der Kjeldahl-Methode (ICC Standardmethode Nr. 105) (97) bestimmt und auf den N-Gehalt des Ausgangsmaterials (Mehl, Teig, HUM-System) bezogen.

Die Albumine und Globuline wurden durch Addition der Stickstoffgehalte der anderen Proteinfraktionen und Differenzbildung zum Gesamtstickstoffgehalt berechnet.

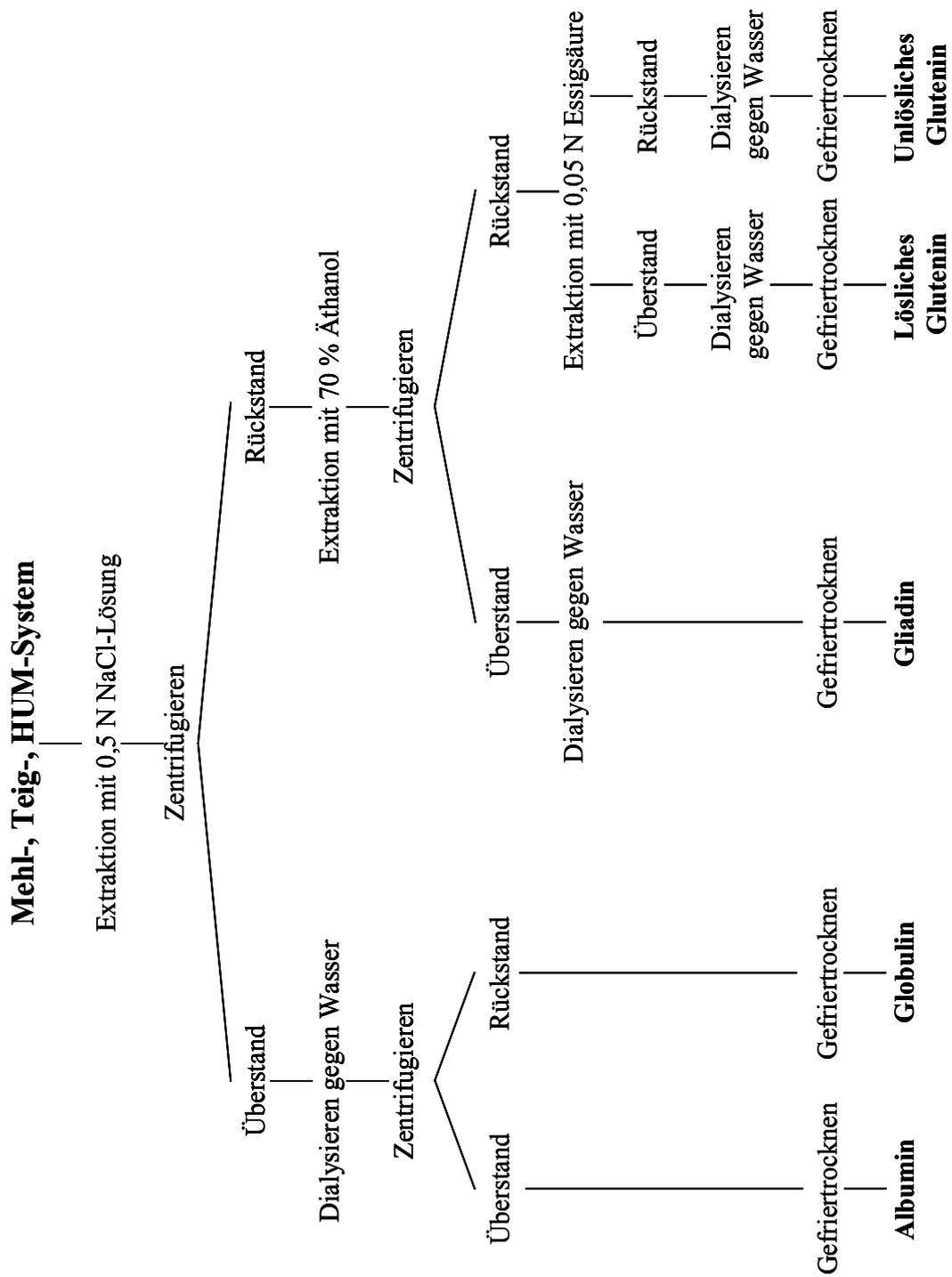


Abb. 1.1: Modifizierte Fraktionierung der Proteine der Mehle sowie der Proteine in den Teigen und HUM-Systemen aus den Mehlen nach Osborne (100).

2.4. Dehnungsmessungen (Extensograph und Alveograph)

Die Dehnungsmessungen der Teige und der HUM-Systeme wurden mit dem Extensograph (ICC Standardmethode Nr. 114/1) und Alveograph (ICC Standardmethode Nr. 121) (97) durchgeführt. Die beiden Methoden sehen vor, die Bereitung der Teige für die Messung mit der Zugabe von destilliertem Wasser und von NaCl vorzunehmen. Um auch bei den HUM-Systemen vergleichbare Bedingungen in der Messprobe zu erhalten, war es daher erforderlich, die in Abb. 9 dargestellte Herstellung der HUM-Systeme dahin zu modifizieren. An Stelle von destilliertem Wasser wurde eine NaCl-Lösung verwendet. Hierzu wurde in der Schüttflüssigkeit unter Berücksichtigung der im Farinographen bestimmten Wasseraufnahme eine definierte Menge NaCl gelöst, so dass im HUM-System eine gleiche Menge an NaCl wie bei den Teigen vorlag. Die HUM-Systeme wurden nach Abstehtzeit, wie in Abb. 9 beschrieben, vorsichtig gefaltet und in der Messvorrichtung des Extensographs befestigt. Als Messergebnis wurden nur die Extensogramme nach 45 min Ruhezeit ausgewertet.

Bei den Alveographmessungen war die Wasserzugussmenge von 50 % bezogen auf die Mehlmenge konstant. Die HUM-Systeme wurden unter Berücksichtigung der Wasserzugussmenge von 50 % wie bei der Teigherstellung für Extensographmessungen zubereitet. Die Teiglinge für die Messungen der HUM-Systeme wurden aus einem vorsichtig dünn gefalteten Teigstück gewonnen.

Durch die Verwendung von NaCl-Lösungen als Schüttflüssigkeit bei der Herstellung von HUM-Systemen wurden Mehl-Wasser-Systeme hinsichtlich des NaCl-Gehaltes angeglichen. Damit war ein direkter Vergleich der Ergebnisse der Dehnungsmessungen möglich.

2.5. Oszillationsmessungen

Die Oszillationmessungen erfolgten in einem Platte-Platte-System (Gabo Eplexor). Dazu sind Teige aus 10 g Mehl durch Zugabe von destilliertem Wasser hergestellt worden. Die HUM-Systeme sind nach dem in Abb. 9 beschriebenen Verfahren hergestellt worden und nach vorsichtigem Falten in das Messsystem von definiertem Meßspalt eingespannt worden.

2.5.1. Deformationsversuch

In einer dynamischen Deformationsmessung ändert sich mit der Zeit die Deformation bei einer konstanten Frequenz (Abb. 12).

Die dynamische Dehnung wurde im Deformationsversuch von 0,05 % auf 10 % erhöht. Prozentuale Angaben sind im Gerät definiert und beziehen sich auf 5 mm Dehnung. Die Frequenz war während der Messung konstant bei 5 Hz. Dabei wurden die dynamischen Moduli aufgezeichnet (E' , E'' , E^* , $\tan \Delta$).

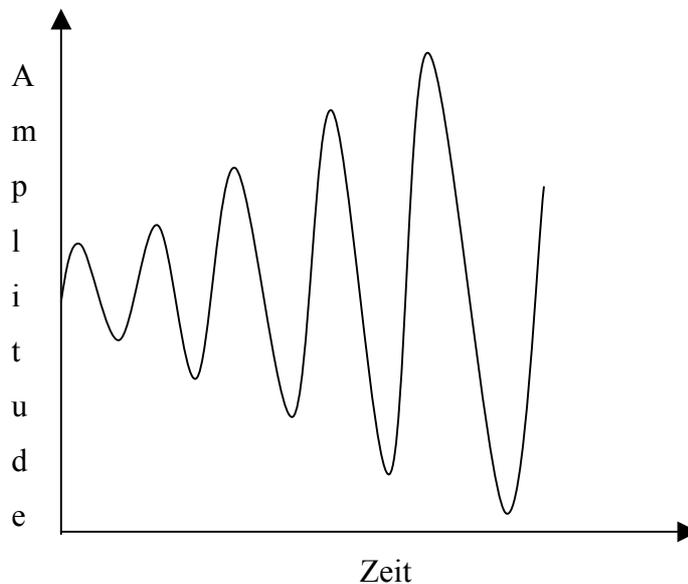


Abb. 12: Deformationsversuch in einer dynamischen Messung (14).

2.5.2. Frequenzversuch

Die Messung im Frequenzversuch wird mit konstanter Amplitude und steigender Frequenz durchgeführt (Abb.13).

Die Mehl-Wasser-Systeme wurden bei der Messung mit einer konstanten Dehnung von 0,5 % beansprucht, während die Frequenz während des Dehnprozesses von 0,1 auf 100 Hz anstieg. Elastizitätsmoduli (E') und Viskositätsmoduli (E''), Komplexmoduli (E^*) und Tan-Delta-Werte wurden während der Messung registriert.

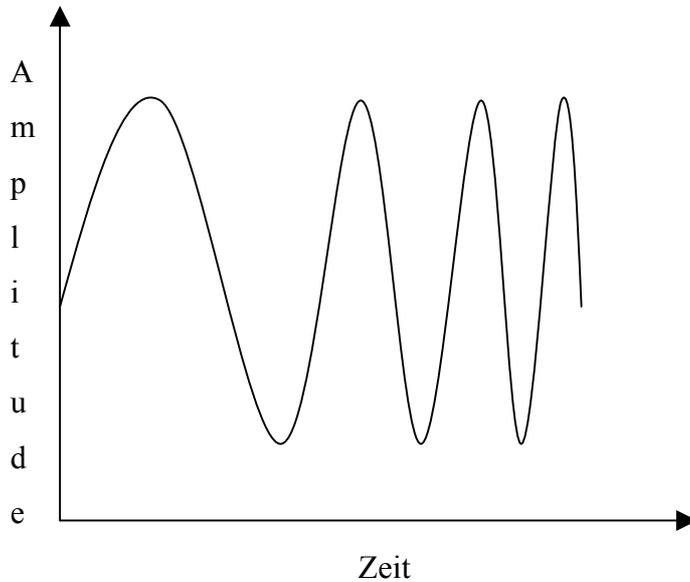


Abb. 13: Frequenzversuch in einer dynamischen Messung (14).

2.6. Knetversuch

Alle Mehle wurden nach der ICC-Methode Nr. 115/1 (97), unter Verwendung des Brabender-Farinographen, zur Bestimmung der Wasseraufnahme und des Knetverhaltens eines aus diesen Mehlen hergestellten Teiges, untersucht.

HUM-Systeme wurden unter Berücksichtigung der nach der ICC-Methode Nr. 115/1 (97) ermittelten Wasseraufnahme hergestellt. Die fertigen HUM-Systeme wurden einer 20 minütigen Nachknetung im Farinographen unterzogen.

Um die Entstehung und Entwicklung der Mehl-Wasser-Systeme bei unterschiedlichen Knetenergieeinträgen zu beobachten, wurden mit dem Farinograph zusätzliche Knetversuche durchgeführt. Dabei wurde die Knetung der Teige in verschiedenen Phasen der Teigentwicklung und Teigentwicklung bei einer Konsistenz von 300 FE (Farinogramm-Einheiten), 400 FE, 500 FE (voll entwickelter Teig) und nach einer Knetung von 20 min Knetzeit unterbrochen. Nach der Unterbrechung wurden die Teige in eine Folie eingepackt und in einer Kammer bei 30° C für 45 min gelagert. Nach 45 min Ruhezeit wurde der Knetprozess für 20 min fortgesetzt.

Durch die Betrachtung der im Farinograph registrierten Kurvenverläufe der Nachknetung war es möglich, Schlüsse über die Bedeutung des Energieeintrages für die Entstehung und Eigenschaften der Mehl-Wasser-Systeme zu erkennen.

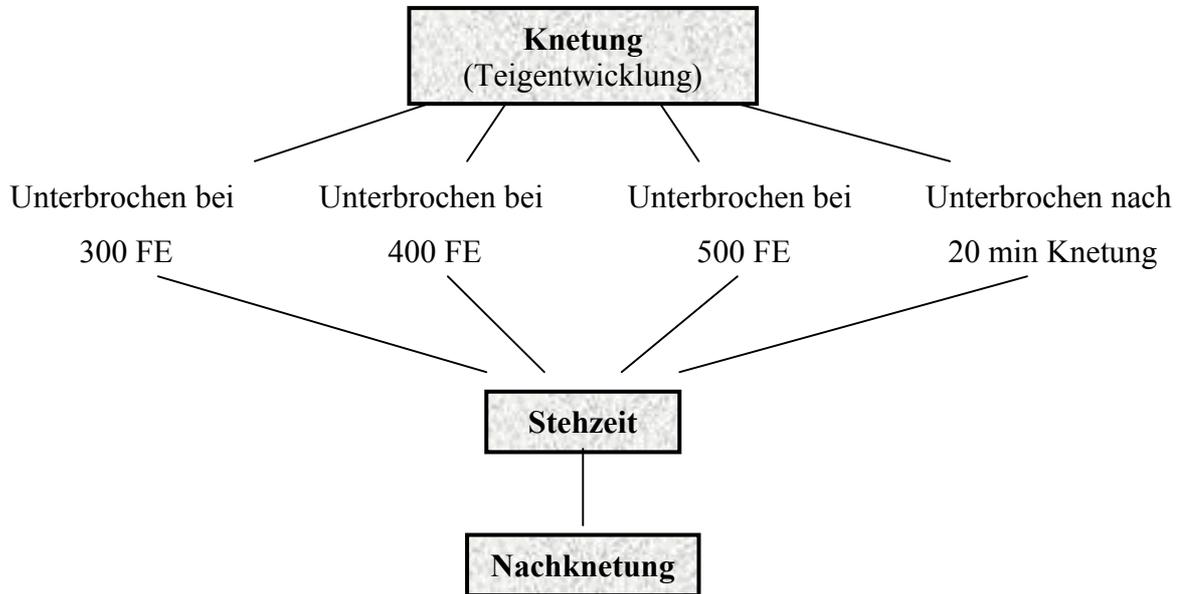


Abb. 14: Schematische Darstellung zur Durchführung der modifizierten Knetversuche im Farinographen.

2.7. Mikroskopische Untersuchungen an Mehl-Wasser-Systemen und deren Proteingerüsten

Die Struktur von Teigen und HUM-Systemen sowie von den Proteingerüsten von auf unterschiedliche Weise gewonnenen Mehl-Wasser-Systemen wurden mikroskopisch untersucht. Damit wurden die in dieser Arbeit durch chemische und physikalische Untersuchungen gewonnenen Meßergebnisse durch Sichtbarmachung untermauert.

Für die mikroskopischen Untersuchungen der Struktur von Teigen und HUM-Systemen wurden Proben, hergestellt aus dem Mehl von nur einer Weizensorte, der A-Sorte Batis, gewählt. Die Proben von Teig und HUM-System sind sofort nach der Herstellung entnommen und für die Untersuchung vorbereitet worden.

Für die mikroskopischen Untersuchungen der Glutengerüste sind durch Auswaschen der Stärke aus den Mehl-Wasser-Systemen Proben gewonnen worden. Das Auswaschen der Stärkekörner aus den durch Kneten entstandenen Teigen erfolgte per Hand. Um einen unerwünschten Energieeintrag beim Auswaschen der Stärkekörner beim HUM-System zu vermeiden, wurde das frisch hergestellte HUM-System sofort in einen Baumwollstoff eingewickelt und auf ein kleines Sieb gelegt. Über das Sieb mit der HUM-Systemprobe ist das Wasser in kurzen Zeitabständen vorsichtig zugegeben worden. Auf diese Weise wurde das Proteingerüst des HUM-Systems nach 12 Std. ohne Energieeintrag gewonnen.

Die wie beschrieben gewonnenen Proben wurden bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingefroren und anschließend in einer Christ Beta 1-8K Gefriertrocknungsanlage bei $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ gefriergetrocknet. Aus den getrockneten Proben wurden Stücke von 1 cm Durchmesser herausgebrochen und mit einer leitfähigen Masse (Leit C) auf einen Probenteller so geklebt, daß die Bruchflächen sichtbar waren. Die Proben wurden mit Gold in einer Schicht von ca. 200 Å bedampft und im Rasterelektronenmikroskop Leitz AMR 1 600 T bei einer Beschleunigungsspannung von 20 KV unter verschiedenen Vergrößerungen untersucht und photographiert.

Diese überall übliche und angewandte Vorbereitungsmethode wurde auch von anderen Autoren angewendet. Dennoch ist es nicht ausgeschlossen, dass man bei der Betrachtung und dem Studium mikroskopischer Bilder Artefakte einbezieht. Die falschen Schlussfolgerungen lassen sich jedoch vermeiden, wenn man nur Effekte, die oft vorkommen und somit überwiegen, in Betracht zieht und wenn man Effekte an gleichartig vorbereiteten Proben vergleicht. Ungeachtet dessen, waren die Beobachtungen und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen plausibel und trugen somit zu dem Kenntnisstand des Wissens und der Erfahrungen über die Entwicklung der Teige mit und ohne Energieeintrag bei.

2.8. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung hatte zum Ziel, die Signifikanz und Zuverlässigkeit der gewonnenen Ergebnisse zu prüfen und sie als eine relevante Basis für Schlussfolgerungen zu bestätigen.

Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe des Statistikpaketes Statistika 6.0 (102). Die Testwahl war auf die vorliegenden Messergebnisse und die erforderliche Aussage abgestimmt. Bei der Ergebnisauswertung der Osborne-Fraktionierung und der

Dehnungsmessungen wurde die mehrfaktorielle Varianzanalyse mit dem Ziel, Unterschiede in Abhängigkeit von System und Sorte zu bestimmen, angewandt. Die Unterschiede aus den Oszillationmessungen wurden mit Hilfe des t-Testes überprüft. Die Signifikanzprüfung wurde innerhalb der jeweiligen Sorte durchgeführt. Mit den Ergebnissen der Knetversuche wurde keine statistische Auswertung durchgeführt, da die Unterschiede über den Kurvenverlauf hinreichend deutlich wurden.

VI Ergebnisse

1. Mehleigenschaften

Die Eigenschaften der fünf verwendeten sortenreinen Weizenmehle wurden zunächst nach den in der Verarbeitung von Getreide üblichen Methoden untersucht und in der Tabelle 1 wiedergegeben (Tab. 2).

Die im Bereich von 0,44 bis 0,49 % liegenden Mineralstoffgehalte aller Mehle weisen darauf hin, dass die Mehle nur aus Schrot- und Ausmahlungspassagen der Vermahlung entstanden sind und keine Zusätze von Nachmehlen zur Einstellung der Mineralstoffgehalte entsprechend der Mehlmehle 550 beinhalten. Die Mehle konnten deshalb als reine Endospermmehle angesehen werden.

Die Qualität der gewählten Weizensorten (vor der Vermahlung zu Mehl) wird mit den Sedimentationswerten im Bereich von 26 bis 69 ml gut differenziert dargestellt. Die E-Sorten Bussard und Zentos wiesen dabei wesentlich höhere Werte als die C-Sorte Contra auf. Die Proteingehalte der Mehle der E-Sorten Bussard und Zentos mit 15,6 und 14,3 % lagen ebenfalls deutlich höher als die der B-Sorte Ritmo und der C-Sorte Contra. Entsprechend der Qualitätsstufe und dem Proteingehalt wurden Feuchtglutengehalte von 40,0 % bei dem Mehl der Sorte Bussard, um 30 % für die Mehle aus den Sorten Zentos, Batis und Ritmo, sowie nur 27,2 % für das Mehl der Sorte Contra festgestellt. Die Glutenstruktur, seine Festigkeit, lag insgesamt in einem Bereich, der eine normale gut dehnbare Struktur der Feuchtgluten anzeigt. Die Sorten Zentos und Batis mit festerem Feuchtgluten lagen dabei im oberen Teil des als normal bezeichneten Bereiches, die Sorten Ritmo und Bussard hingegen in dem unteren.

Anhand der Verkleisterungsmaxima wurden die Weizenmehle in zwei Gruppen unterteilt, wobei die Mehle der Sorten Bussard, Contra und Ritmo zu der Gruppe mit höheren (von 1355 bis 1420 AE) und die Sorten Ritmo und Batis (610 und 725 AE) zu der Gruppe mit niedrigeren Viskositäten im Verkleisterungsmaximum gehörten.

Tab. 2: Ergebnisse der analytischen und rheologischen Analysen der verwendeten Mehle

Sorte	Mineralstoff- gehalt (%) ¹⁾	Gesamt- proteingehalt (N X 5,7) (%) ¹⁾	Sedimenta- tionswert (ml)	Feuchtgluten (%) ²⁾	Gluten- Index (%) ³⁾	Amylogramm- maximum (AE)	Temperatur im Verkleisterungs- maximum (°C)	FZ ⁴⁾
Bussard	0,44	15,6	69,1	40,0	53,9	1420	88,0	450
Zentos	0,49	14,3	59,1	31,8	72,1	1355	88,5	460
Batis	0,46	12,9	46,8	29,9	70,6	725	86,0	315
Ritmo	0,46	12,3	33,0	28,4	43,1	610	89,5	345
Contra	0,47	12,4	25,5	27,2	59,1	1420	91,0	325

¹⁾ Bezogen auf die Trockensubstanz

²⁾ Bezogen auf eine Mehlfuchtigkeit von 14 %

³⁾ Bezogen auf den Feuchtglutengehalt

⁴⁾ FZ = Fallzahl

Die Proteinzusammensetzung der Mehle der verwendeten Sorten wurde mittels der Fraktionierung nach Osborne untersucht und die Ergebnisse in der Tabelle 3 aufgeführt. Den Fraktionen Gliadin und Glutenin (löslich und unlöslich) wurde besonderer Augenmerk geschenkt, da diese die Hauptkomponenten des Glutens bilden und seine Eigenschaften definieren.

Der höchste Gliadiningehalt wurde aus der Sorte Contra (23,7 %) und der niedrigste aus der Sorte Bussard (9,9 %) extrahiert. In den Sorten Zentos, Batis und Ritmo wurden Gliadinmengen von 11,1, 12,6 und 19,3 % nachgewiesen.

An löslichen Gluteninen zeigten die Sorten Bussard und Zentos die Mengen von 5,6 und 6,2 %. Die Sorte Ritmo wies mit 9,6 % den höchsten Gehalt an löslichen Gluteninen auf. Aus der Sorte Contra wurden 7,7 % löslichen Glutenine isoliert.

Der höchste Anteil an unlöslichen Gluteninen wurde aus den E-Sorten (Bussard und Zentos) extrahiert. 54,5 % an unlöslichen Gluteninen wurden bei der Sorte Contra ermittelt, während bei der Sorte Ritmo 58,5 % dieser Proteine nachgewiesen wurden. Bei der Sorte Batis wurden 63,3 % an unlöslichen Gluteninen im Mehl gefunden.

NaCl-lösliche Proteine (Albumine und Globuline) lagen am höchsten bei der Sorte Batis und am niedrigsten bei den Sorten Zentos und Bussard, während die anderen Sorten mittlere Gehalte dieser Proteine ergaben.

Tab. 3: Proteinzusammensetzung der Mehle entsprechend der Fraktionierung nach Osborne.

Sorte	Gehalt an Gliadinen (%) ¹⁾	Gehalt an löslichen Gluteninen (%) ¹⁾	Gehalt an unlöslichen Gluteninen (%) ¹⁾	Gehalt an NaCl-löslichen Proteinen (%) ¹⁾	Gliadin/ Glutenin Verhältnis
Bussard	9,9	5,6	79,0	5,5	0,12
Zentos	11,1	6,2	77,9	4,8	0,13
Batis	12,6	6,5	63,3	17,6	0,18
Ritmo	19,3	9,6	58,5	12,6	0,28
Contra	23,7	7,7	54,5	14,1	0,38

¹⁾ Bezogen auf den Gesamtproteingehalt

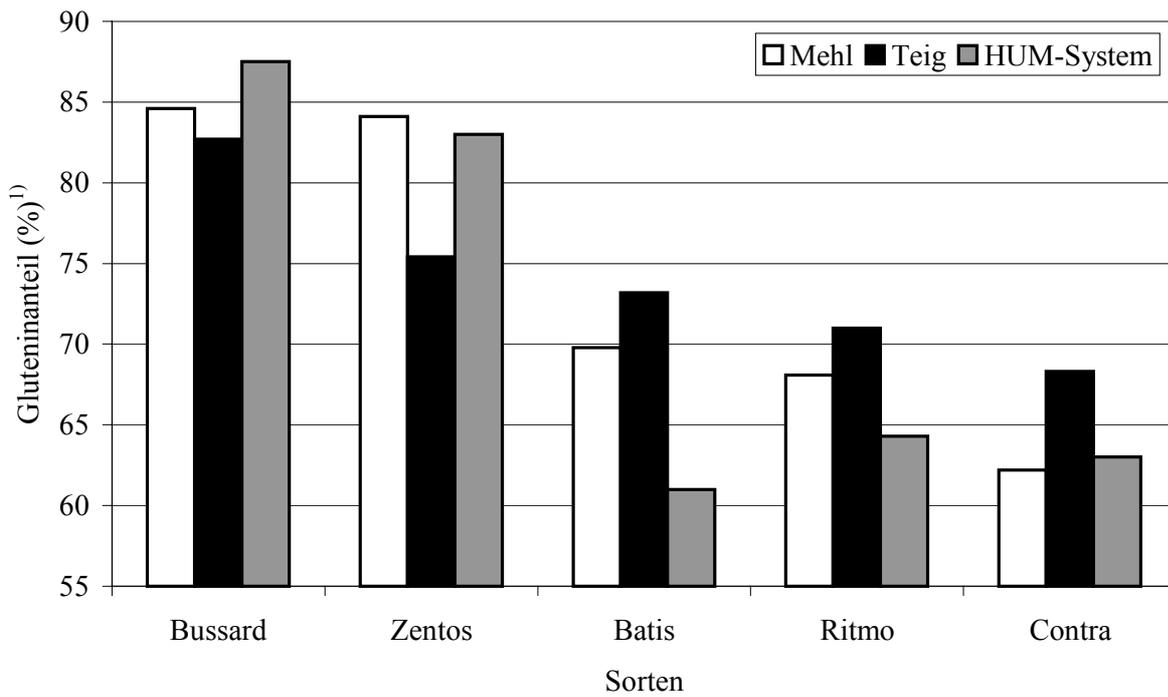
Das rechnerisch gebildete Gliadin/Glutenin-Verhältnis zeigt deutlich, dass die Mehle der E-Sorten Bussard und Zentos sowie der A-Sorte Batis höhere Gehalte an Glutenin als die der B-Sorte Ritmo und vor allem der C-Sorte Contra aufwiesen.

2. Fraktionierung der Proteine

Die vorgestellten Ergebnisse resultieren aus einer einfach durchgeführten modifizierten Fraktionierung nach Osborne. Die Ergebnisse sind jeweils als Mittelwerte aus Doppelbestimmungen der Proteingehalte in jeder Fraktion angegeben. In den Abbildungen von 15 bis 19 wird beobachtet, wie sich die Löslichkeit der Proteine abhängig von der Bereitung der Mehl-Wasser-Systeme im Vergleich zu Mehl ändert. Die aufgetretenen Phänomene werden im Anschluss in dem Kapitel Diskussion besprochen.

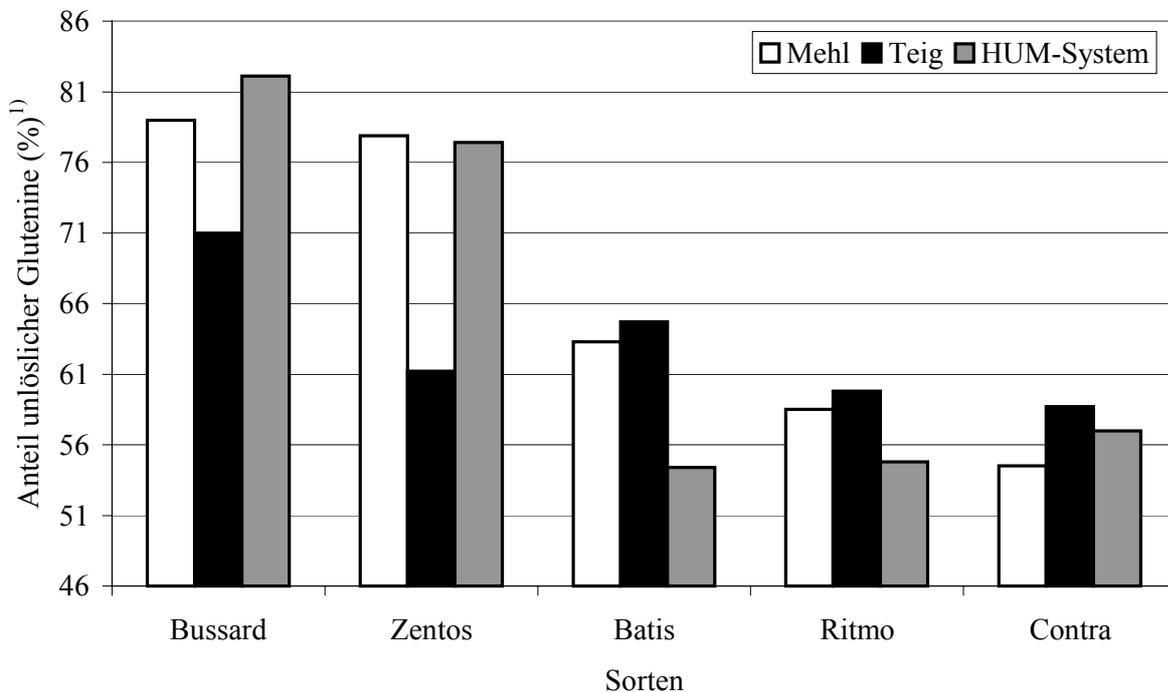
In der Abbildung 15 sind im Vergleich die Gehalte an Gesamtgluteninen der Mehle, der HUM-Systeme und Teige dargestellt. Bei den Sorten Bussard und Zentos kam es, bezogen auf den Anteil im Mehl, zu einer Verminderung des Gesamtgluteninanteils im Teig, wobei dies bei der Sorte Zentos stärker ausgeprägt war. Der Anteil an Gesamtgluteninen war beim HUM-System der Sorte Bussard gegenüber dem im Mehl etwas erhöht, während dieser Anteil bei der Sorte Zentos fast unverändert blieb. Die Sorten Batis und Ritmo zeigten ein andersartiges Verhalten. Bei diesen Sorten wurden die Anteile an Gesamtgluteninen im Teig höher, im HUM-System dagegen kleiner als im Mehl. Die Sorte Contra zeigte eine Steigerung des Gehaltes an Gesamtgluteninen im Teig im Vergleich zum Mehl; der Anteil an Gluteninen im HUM-System verblieb auf dem Niveau des Mehles.

Der Gehalt an unlöslichen Gluteninen der Sorten Bussard und Zentos ging bei der konventionellen Teigbereitung gegenüber dem im Mehl zurück (Abb. 16). Bei der Sorte Bussard erhöhte sich der Anteil an unlöslichen Gluteninen, wenn das HUM-System zubereitet wurde. Dagegen zeigten sich bei der Sorte Zentos nur minimale Veränderungen. Die Sorten Batis, Ritmo und Contra wiesen einen erhöhten Anteil an unlöslichen Gluteninen im Teig, jeweils bezogen auf das Ausgangsmaterial Mehl, auf. In den HUM-Systemen der Sorten Batis und Ritmo wurden geringere Anteile an unlöslichen Gluteninen ermittelt. Ein im Vergleich zum Mehl erhöhter Gehalt an unlöslichen Gluteninen zeigte sich beim HUM-System aus der Weizensorte Contra.



¹⁾ Bezogen auf den Gesamtproteingehalt

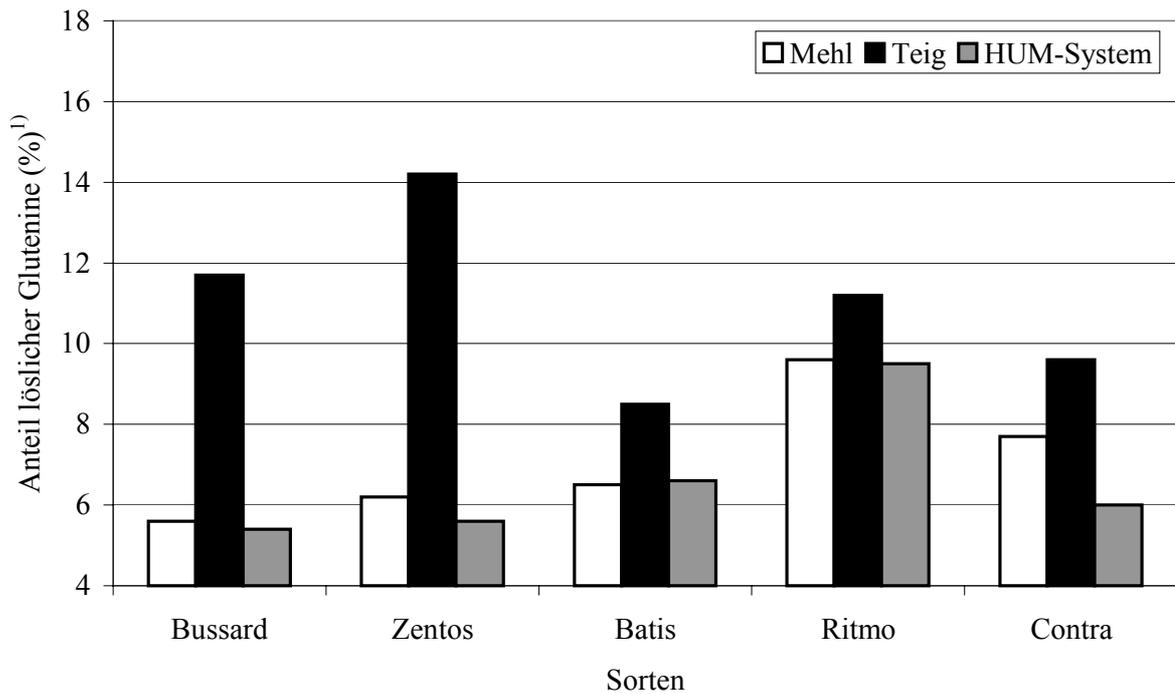
Abb. 15: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Gehalt an Gesamtgluteninen in den HUM-Systemen und Teigen im Vergleich zu den Ausgangsmehlen.



¹⁾ Bezogen auf den Gesamtproteingehalt

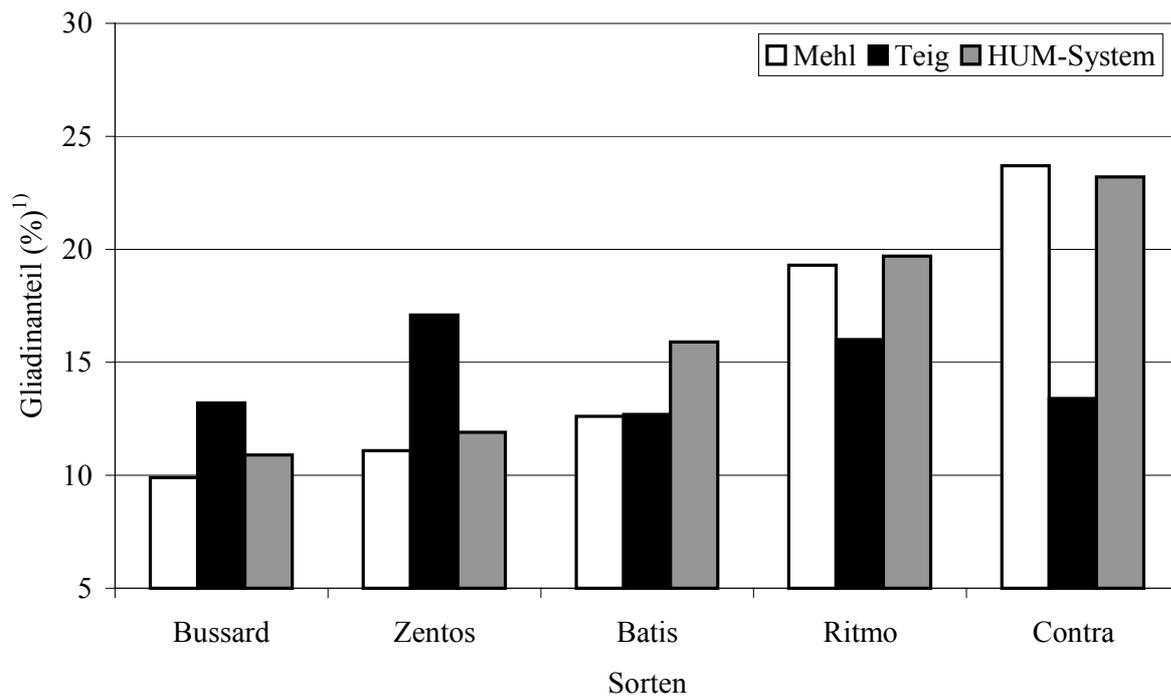
Abb. 16: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Gehalt an unlöslichen Gluteninen in den HUM-Systemen und Teigen im Vergleich zu den Ausgangsmehlen.

Die Abbildung 17 zeigt die Anteile der in Essigsäure löslichen Glutenine in den verschiedenen Substraten. Bei allen Sorten wurden höhere Anteile dieser Glutenine aus den Teig-Systemen als aus den Mehlen extrahiert. Dabei lag der größte Unterschied bei den Sorten Bussard und Zentos. Aus den HUM-Systemen wurde bei der Sorte Contra die höchste Differenz an essigsäurelöslichen Gluteninen in Mehl und im HUM-System nachgewiesen. Die Unterschiede zwischen Mehl und HUM-System bei den essigsäurelöslichen Gluteninen waren bei den Sorten Bussard, Zentos, Batis und Ritmo nicht so deutlich ausgeprägt.



¹⁾ Bezogen auf den Gesamtproteingehalt

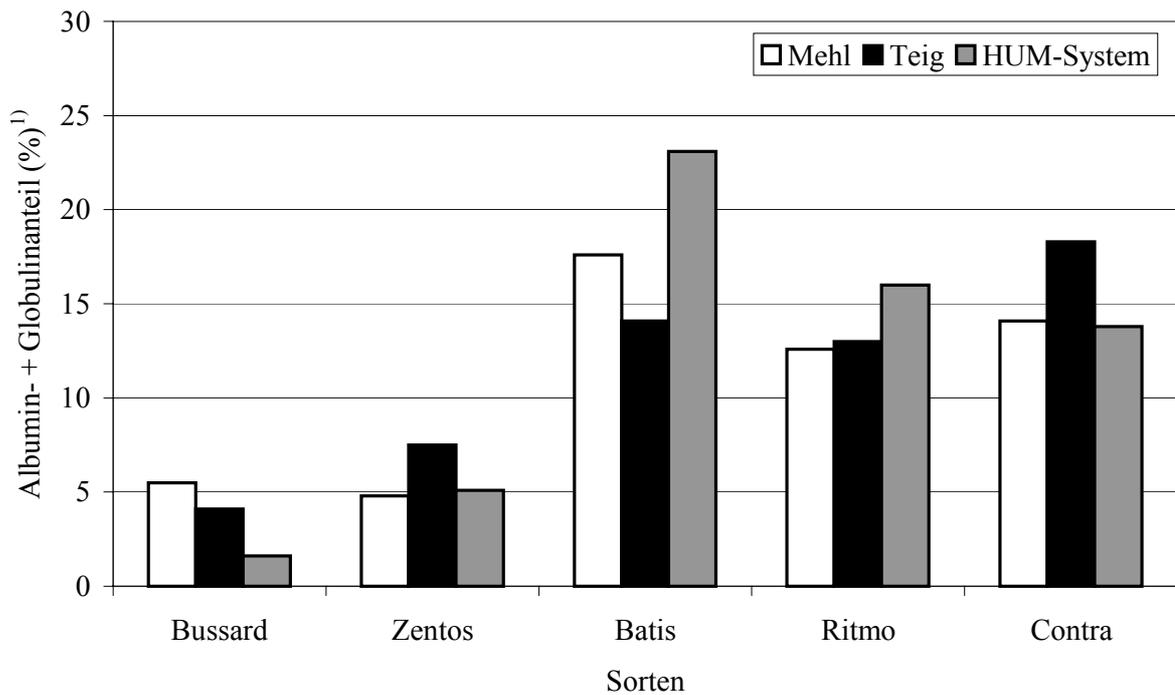
Abb. 17: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Gehalt an löslichen Gluteninen in den HUM-Systemen und Teigen im Vergleich zu den Ausgangsmehlen.



¹⁾ Bezogen auf den Gesamtproteingehalt

Abb. 18: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Gehalt an Gliadinen in den HUM-Systemen und Teigen im Vergleich zu den Ausgangsmehlen.

Der extrahierte Anteil an Gliadinen war in den Teig-Systemen der Sorten Bussard, Zentos und Batis größer als der aus den Mehlen (Abb. 18). Bei den Teig-Systemen aus den Sorten Ritmo und Contra war der Gliadinanteil im Vergleich zu dem in den Mehlen kleiner, wobei dieser Unterschied bei der Sorte Contra viel ausgeprägter war. Während die Gliadinegehalte im Vergleich zwischen Mehl und HUM-Systemen bei den Sorten Bussard, Zentos, Ritmo und Contra nur geringfügige Unterschiede zeigten, wies Batis einen deutlich höheren Gliadinegehalt im HUM-System als im Mehl auf.



¹⁾ Bezogen auf den Gesamtproteingehalt

Abb. 19: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Gehalt an Albuminen und Globulinen in den HUM-Systemen und Teigen im Vergleich zu den Ausgangsmehlen.

Die Sorten Bussard und Batis zeigten niedrigere Gehalte an Albuminen und Globulinen in den Teigen im Vergleich zu denen in Mehlen (Abb. 19). Die Anteile an NaCl-löslichen Proteinen in den Teigen der Sorten Zentos und Contra waren höher als die in den Mehlen. Die Sorte Ritmo zeigte keine deutlichen Unterschiede zwischen den Gehalten im Mehl und im Teig. Das HUM-System der Sorte Bussard wies eine Verminderung der Anteils an Albuminen und Globulinen im Vergleich zu dem im Mehl auf. Die Sorten Zentos und Contra zeigten keine Unterschiede zwischen den Gehalten an Albuminen und Globulinen in den Mehlen und in den HUM-Systemen. Die Anteile an Albuminen und Globulinen waren in den HUM-Systemen der Sorten Batis und Ritmo größer als die in den Mehlen.

Zusätzliche Informationen über die Systemstruktur werden durch die Bildung von Verhältnissen von extrahierten Proteinen erhalten. Sie stellen die Unterschiede in der Glutenstruktur dar. Die wichtigsten Ergebnisse sind in den Abbildungen von 20 bis 23 dargestellt.

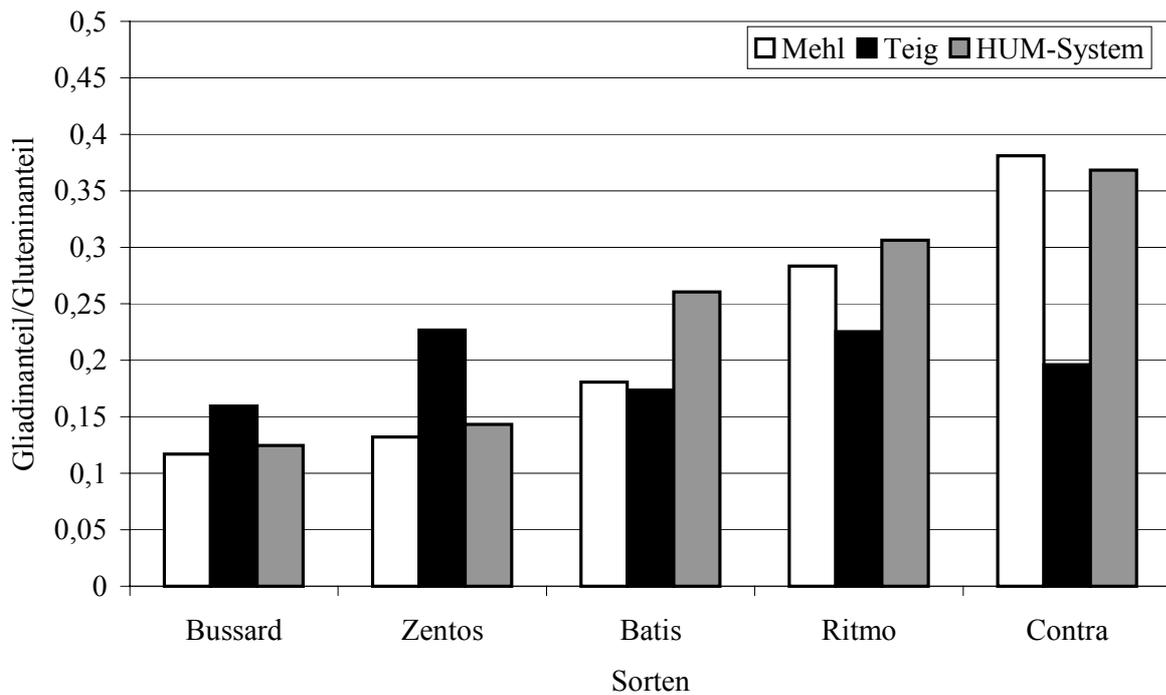


Abb. 20: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Verhältnis von Gliadinen zu Gluteninen der Mehle und daraus hergestellter HUM-Systeme und Teige.

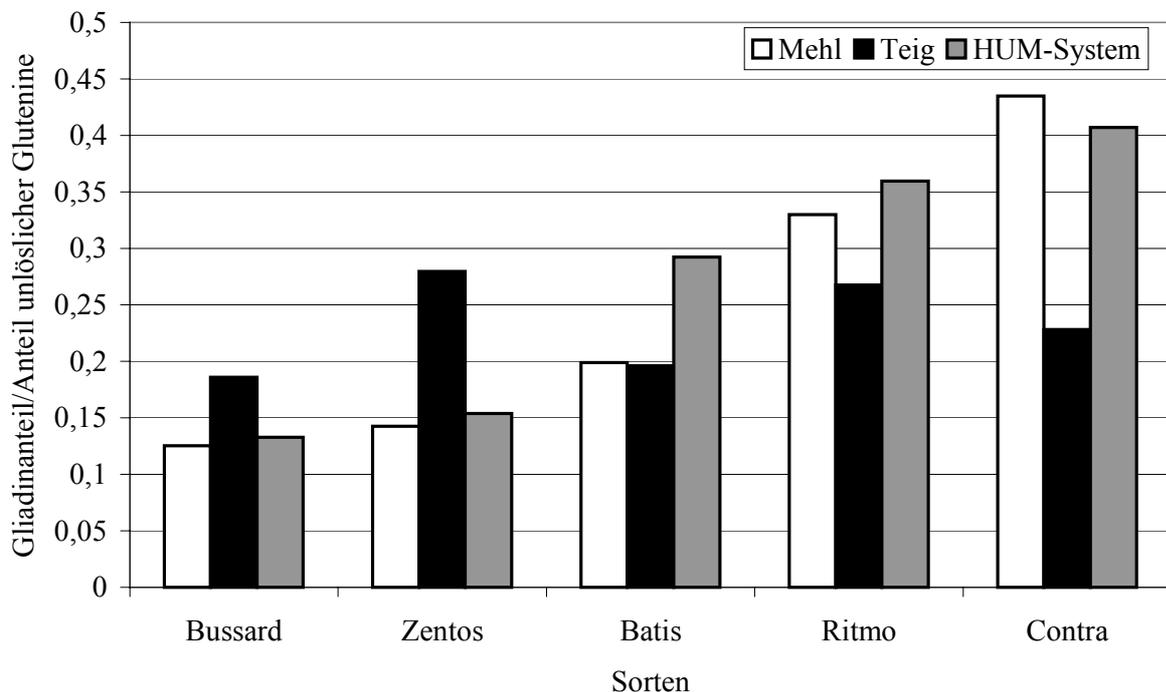


Abb. 21: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Verhältnis von Gliadinen zu unlöslichen Gluteninen in den HUM-Systemen und Teigen im Vergleich zu den Ausgangsmehlen.

In Abbildung 20 ist das Verhältnis von Gliadinen zu Gluteninen dargestellt. Die E-Sorten Bussard und Zentos sind tendenziös vergleichbar. Bei allen Teigen ist diese Charakteristik im

Vergleich zu den in den Mehlen größer; bei den HUM-Systemen hingegen ergab sich ein geringfügiger Unterschied. Bei den Sorten Ritmo und Contra waren die Verhältnisse von Gliadinen zu Gluteninen, bei den Teigen niedriger als die Verhältnisse im Mehl. Bei den HUM-Systemen unterschied sich das Gliadin-Glutenin-Verhältnis bei den Sorten Bussard, Zentos, Ritmo und Contra im Vergleich zum Mehl nicht deutlich. Die Sorte Batis stellt eine Ausnahme dar. Bei dem HUM-System dieser Sorte kam es zum Anstieg des Verhältnisses im Vergleich zum Mehl. Dagegen war dieses Verhältnis beim Mehl und Teig annähernd gleich. Die gleiche Tendenz konnte man bei den Verhältnissen Gliadinen zu unlöslichen Gluteninen beobachten (Abb. 21).

Ein vermindertes Gliadin-lösliches Glutenin-Verhältnis wurde bei allen untersuchten Weizensorten in den Teigen im Vergleich zu denen in den Mehlen festgestellt (Abb. 22). Im Vergleich zu Mehl erhöhten sich die Verhältnisse von Gliadin zu löslichem Glutenin bei den HUM-Systemen, wobei eine ausgeprägte Steigerung nur bei der Sorte Contra festgestellt werden konnte.

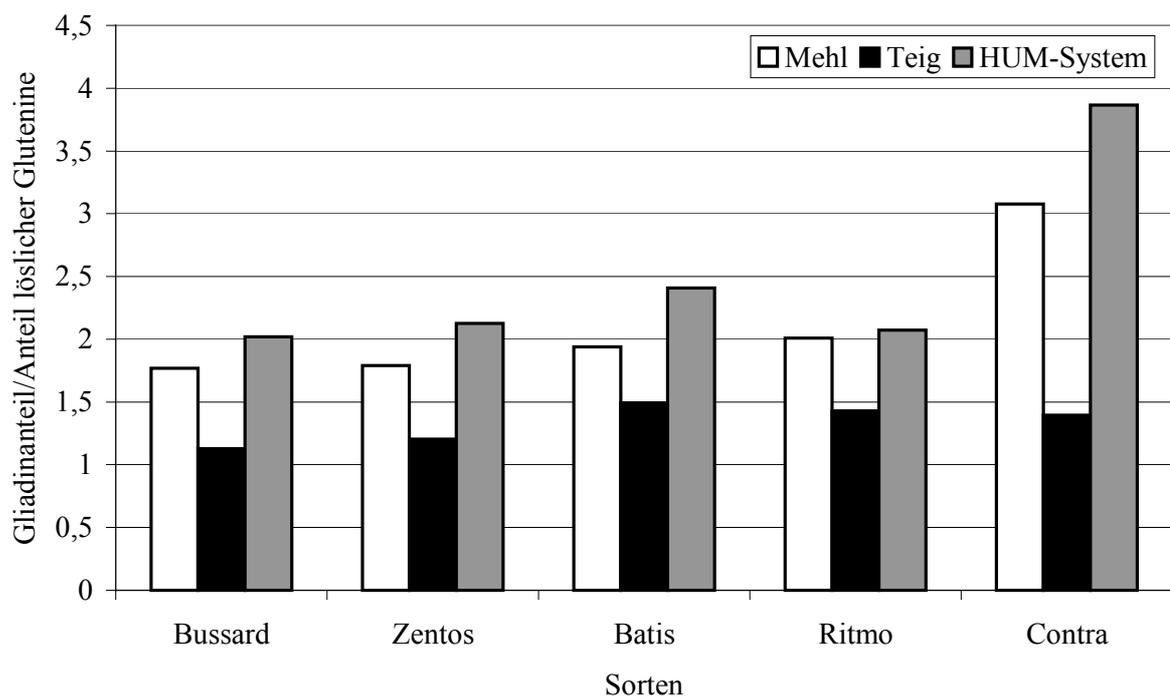


Abb. 22: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Verhältnis von Gliadinen zu löslichen Gluteninen in den HUM-Systemen und Teigen im Vergleich zu den Ausgangsmehlen.

Beim Vergleich der Verhältnisse von löslichen zu unlöslichen Gluteninen zeigte sich, dass diese gegenüber denen im Weizenmehl größer werden, sofern die Systeme über Knetung zubereitet werden (Abb. 23). Die größten Unterschiede wurden bei den Sorten Bussard und Zentos

errechnet. Die HUM-Systeme der Sorten Bussard, Zentos und Contra zeigten im Vergleich zu den reinen Mehlen reduzierte Verhältnisse von löslichen zu unlöslichen Gluteninen, die Sorten Batis und Ritmo hingegen zeigten bei den HUM-Systemen keinen deutlichen Anstieg.

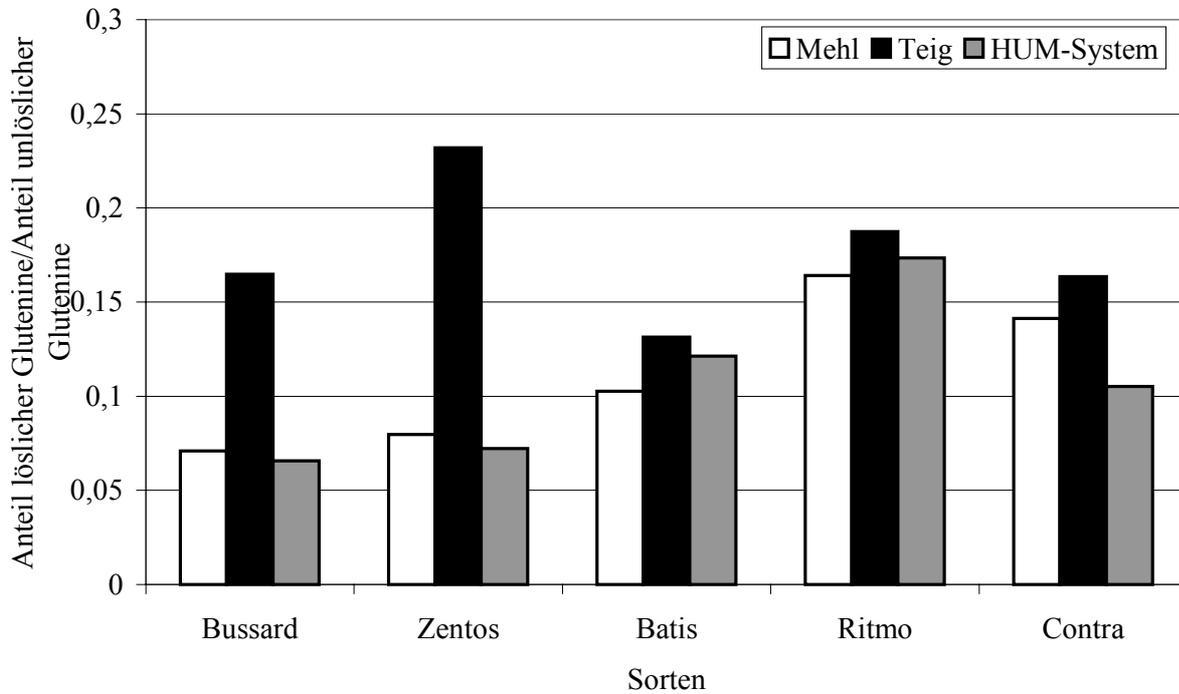


Abb. 23: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Verhältnis von löslichen Gluteninen zu unlöslichen Gluteninen in den HUM-Systemen und Teigen im Vergleich zu den Ausgangsmehlen.

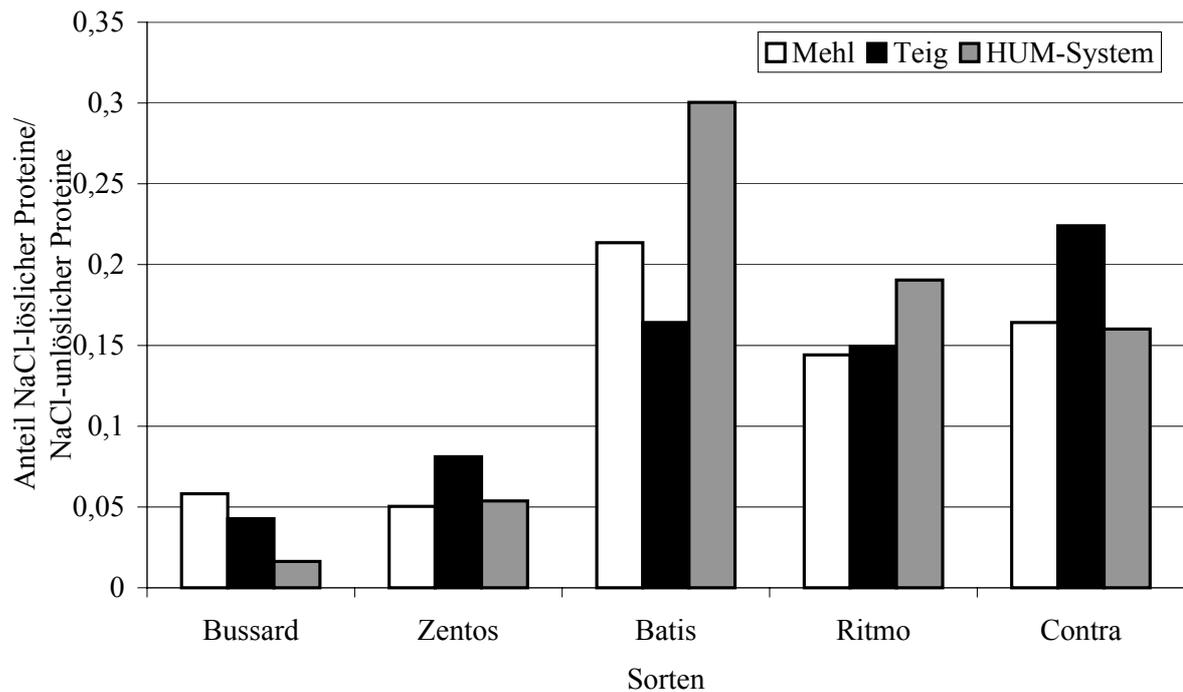


Abb. 24: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Verhältnis von NaCl-löslichen Proteinen zu NaCl-unlöslichen Proteinen in den HUM-Systemen und Teigen im Vergleich zu den Ausgangsmehlen.

In der Abbildung 24 werden die Relationen von NaCl-löslichen Proteinen zu den NaCl-unlöslichen Proteinen dargestellt. Bei den Teigen der Sorten Bussard und Batis kam es zu einer Verminderung im Vergleich zu denen in Mehlen. Die Sorten Contra und Zentos zeigten eine erhöhte Verhältniszahl, während die Sorte Ritmo fast keinen Unterschied im Verhältnis bei Teig und Mehl aufwies. Die HUM-Systeme der Sorten Batis und Ritmo zeigten höhere Verhältnisse im Vergleich zu den Verhältniswerten der Mehle. Die Systembereitung ohne Knetung führte bei der Sorte Bussard zu einer Absenkung der Verhältniswerte. Kein Unterschied konnte zwischen Mehlen und HUM-Systemen in den Verhältnissen bei den Sorten Zentos und Contra beobachtet werden.

Weitere Ergebnisse und Darstellungen zum Fraktionierungsverhalten der Proteine sind im Anhang aufgeführt (Abb. 89-95).

Um die Signifikanz der Unterschiede zu prüfen, wurde eine Varianzanalyse durchgeführt (Tab. 4 und Tab. 5).

Tab. 4: Ergebnisse der Varianzanalyse: Signifikanz der Unterschiede zwischen den Proteinanteilen im Mehl und im HUM-System bzw. Teig in Abhängigkeit von Sorte, System und Wechselwirkung Sorte * System.

Proteingruppe	Systeme	Sorte		System		Sorte * System	
		F	p	F	P	F	P
Gesamtglutenine	Mehl/HUM-System	13897	0,000000	583,00	0,000000	582	0,000000
	Mehl/Teig	15129	0,000000	43,00	0,000063	2291	0,000000
	HUM-System/Teig	10603	0,000000	1011	0,000000	2399	0,000000
Unlösliche Glutenine	Mehl/HUM-System	471,83	0,000000	11,73	0,006501	21,86	0,000062
	Mehl/Teig	430,20	0,000000	117,50	0,000001	144,00	0,000000
	HUM-System/Teig	148,45	0,000000	9,01	0,014910	76,98	0,000001
Lösliche Glutenine	Mehl/HUM-System	2944,50	0,000000	372,30	0,000000	158,10	0,000000
	Mehl/Teig	856,80	0,000000	10661,90	0,000000	1276,20	0,000000
	HUM-System/Teig	1404,60	0,000000	20277,20	0,000000	1895,60	0,000000
Gliadine	Mehl/HUM-System	9643,70	0,000000	392,20	0,000000	155,50	0,000000
	Mehl/Teig	970,30	0,000000	79,10	0,000005	1072,50	0,000000
	HUM-System/Teig	691,90	0,000000	406,70	0,000000	890,30	0,000000
Albumine + Globuline	Mehl/HUM-System	202,67	0,000000	5,56	0,040017	12,32	0,000704
	Mehl/Teig	304,94	0,000000	5,14	0,046890	25,73	0,000014
	HUM-System/Teig	343,18	0,000000	5,77	0,037147	60,81	0,000001

Aus der Varianzanalyse (Tab. 4) wird deutlich, dass die Unterschiede zwischen dem Mehl und HUM-System in allen Proteingruppen signifikant und von der Sorte und vom System abhängig waren. Dabei waren diese Unterschiede stärker sortenabhängig. Die Varianzanalyse zeigte auch signifikante Unterschiede zwischen Mehl und Teig. Ebenso waren die Ergebnisse aus der Fraktionierung nach Osborne zwischen den Teigen und HUM-Systemen signifikant unterschiedlich.

Die gleichen Tendenzen hat die Varianzanalyse der Proteinverhältnisse aufgewiesen (Tab. 5).

Tab. 5: Ergebnisse der Varianzanalyse: Signifikanz der Unterschiede zwischen den Proteinverhältnissen in Mehl, HUM-System bzw. Teig in Abhängigkeit von Sorte, System und Wechselwirkung Sorte * System.

Verhältnis	Systeme	Sorte		System		Sorte * System	
		F	p	F	p	F	P
Gliadine/ Gesamtglutenine	Mehl/HUM-System	4582,70	0,000000	242,00	0,000000	124,60	0,000000
	Mehl/Teig	1504,25	0,000000	231,97	0,000000	1132,62	0,000000
	HUM-System/Teig	874,07	0,000000	630,26	0,000000	702,15	0,000000
Gliadine/ Unlösliche Glutenine	Mehl/HUM-System	3715,59	0,000000	149,34	0,000000	117,14	0,000000
	Mehl/Teig	1881,30	0,000000	89,20	0,000003	1515,10	0,000000
	HUM-System/Teig	804,19	0,000000	306,81	0,000000	707,13	0,000000
Gliadine/ Lösliche Glutenine	Mehl/HUM-System	6712,00	0,000000	2885,20	0,000000	317,20	0,000000
	Mehl/Teig	1117,00	0,000000	8331,90	0,000000	650,50	0,000000
	HUM-System/Teig	2017,10	0,000000	17099,00	0,000000	1478,50	0,000000
Lösliche Glutenine/ Unlösliche Glutenine	Mehl/HUM-System	1591,37	0,000000	22,28	0,000817	106,40	0,000000
	Mehl/Teig	512,53	0,000000	3942,00	0,000000	694,81	0,000000
	HUM-System/Teig	371,34	0,000000	3205,10	0,000000	559,17	0,000000
NaCl lösliche Proteine/NaCl Unlösliche Proteine	Mehl/HUM-System	368,50	0,000000	18,71	0,001499	25,43	0,000032
	Mehl/Teig	497,23	0,000000	7,46	0,021129	49,03	0,000002
	HUM-System/Teig	267,93	0,000000	5,24	0,045146	55,37	0,000001

Die rechnerisch gebildeten Differenzen zwischen den Proteingruppen im System zu den Proteingruppen im Mehl haben ermöglicht, die Verschiebungen der Proteine zu beobachten. In den Tabellen 6 und 7 sind die Fraktionsverschiebungen der beiden Systeme im Vergleich zum Mehl einer jeden Sorte dargestellt. Die möglichen Verschiebungen bzw. Übergänge wurden mit Pfeilen angedeutet.

Beim Teig der Sorte Bussard kam es zur Verschiebung der im Mehl unlöslichen Proteine hin zu den Fraktionen der löslichen Glutenine und der Gliadine. Die in der NaCl-Lösung löslichen Proteine haben sich entweder in den Fraktionen der löslichen Glutenine und der Gliadine oder in einer von den beiden verteilt. Ein Teil (17 % bezogen auf Gesamtproteingehalt) der im Mehl unlöslichen Proteine wurde im Teig der Sorte Zentos löslich in allen angewandten Lösungsmitteln wiedergefunden. Die im Mehl NaCL-löslichen Proteine wurden im Teig der Sorte Batis zum Teil in Ethanol löslich und zum Teil blieben sie in der Fraktion der unlöslichen Glutenine. Die Teige der Sorten Ritmo und Contra zeigten ähnliches Verhalten. Die Proteine, welche im Mehl ethanollöslich waren, wurden zum Teil in anderen Lösungsmitteln löslich und zum Teil verblieben sie in der unlöslichen Fraktion.

Tab. 6: Verschiebung von Fraktionen der Proteine im Teig im Vergleich zum Mehl.

Sorte	Differenz zwischen Teig und dem Mehl (%) ^{1,2)}			
	Unlösliche Glutenine	Lösliche Glutenine	Gliadine	Albumine + Globuline
Bussard	- 8	6,1	3,3	- 1,4
Zentos	-16,7	8	6	2,7
Batis	1,4	2	0,1	-3,5
Ritmo	1,3	1,6	-3,3	0,4
Contra	4,2	1,9	- 10,3	4,2

¹⁾ Bezogen auf den Gesamtproteingehalt

²⁾ Gehalt der Proteingruppe im Teig – Gehalt der Proteingruppe im Mehl

Obwohl die statistische Auswertung die Signifikanz der Unterschiede bestätigt hat, sind bei den HUM-Systemen die Verschiebungen nicht so stark ausgeprägt wie bei den Teigen. Das HUM-System der Sorte Zentos zeigte geringe Änderungen im Löslichkeitsvermögen der Proteine im Vergleich zum Mehl. Eine Zuordnung wie beim gekneteten Teig war hier nicht möglich. Bei den Sorten Batis und Ritmo verteilten sich Proteine, welche in den Mehlen unlöslich waren, am meisten in die NaCl-Fractionen. Im HUM-System der Sorte Contra wurde ein Teil von vorher in Ethanol löslichen Proteinen unlöslich. Negative quantitative Verschiebungen erlitten im HUM-System der Sorte Bussard nur Proteine, welche im Mehl in der NaCl-Lösung löslich waren.

Tab. 7: Verschiebung von Fraktionen der Proteine im HUM-System im Vergleich zum Mehl.

Sorte	Differenz zwischen HUM-System und dem Mehl (%) ^{1,2)}			
	Unlösliche Glutenine	Lösliche Glutenine	Gliadine	Albumine + Globuline
Bussard	3,1	- 0,2	1	- 3,9
Zentos	- 0,5	- 0,6	0,8	0,3
Batis	- 8,9	0,1	3,3	5,5
Ritmo	- 3,7	- 0,1	0,4	3,4
Contra	2,5	- 1,7	- 0,5	- 0,3

¹⁾ Bezogen auf den Gesamtproteingehalt

²⁾ Gehalt der Proteingruppe im HUM-System – Gehalt der Proteingruppe im Mehl

3. Physikalische Eigenschaften

3.1. Dehnungsmessungen

3.1.1. Extensogramm

Der besseren Übersicht wegen werden nachfolgend jeweils die gemittelten Kurvenverläufe dargestellt. Die Verläufe von Extensogrammkurven in den Abbildungen 25 bis 29 zeigen die viskoelastischen Eigenschaften der Mehl-Wasser-Systeme und beschreiben damit die Systemstruktur.

In Abbildung 25 stehen die Extensogrammkurven der Teige und HUM-Systeme aus dem Mehl der Sorte Bussard gegenüber. Der geknetete Teig hatte einen niedrigeren Dehnwiderstand im Vergleich zum HUM-System. Die Dehnbarkeit des Teiges war größer als die des HUM-Systems. Die Energie war beim Teig kleiner als beim HUM-System. Das HUM-System erreichte sein Maximum bei 382 BE und der Teig bei 173 BE. Die Verhältniszahl lag beim HUM-System bei 1,5, beim Teig bei 0,6.

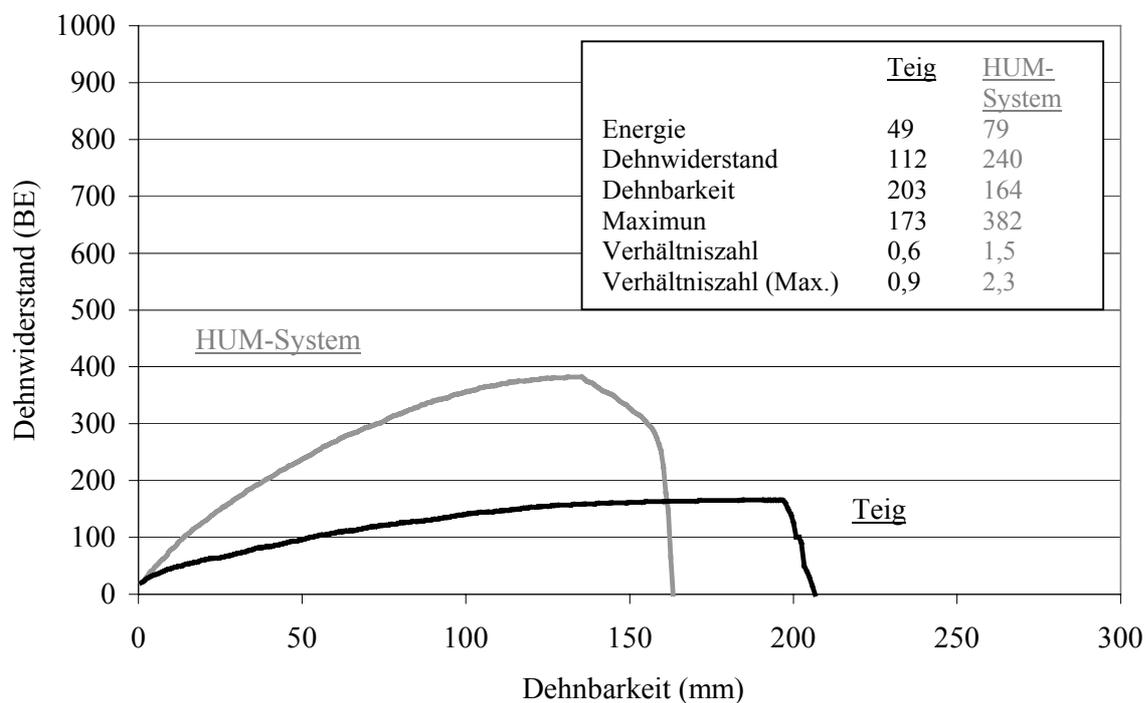


Abb. 25: Ergebnisse der Dehnungsmessungen: Extensogramme der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Bussard**.

Die Mehle aus der Sorte Zentos hatten ein ähnliches Dehnverhalten wie die der Sorte Bussard (Abb.26). Das HUM-System hatte eine kürzere Dehnbarkeit und einen höheren Dehnwider

stand als Teig. Dementsprechend war die berechnete Verhältniszahl bei HUM größer als beim Teig. Die gemessenen Energien waren fast gleich groß.

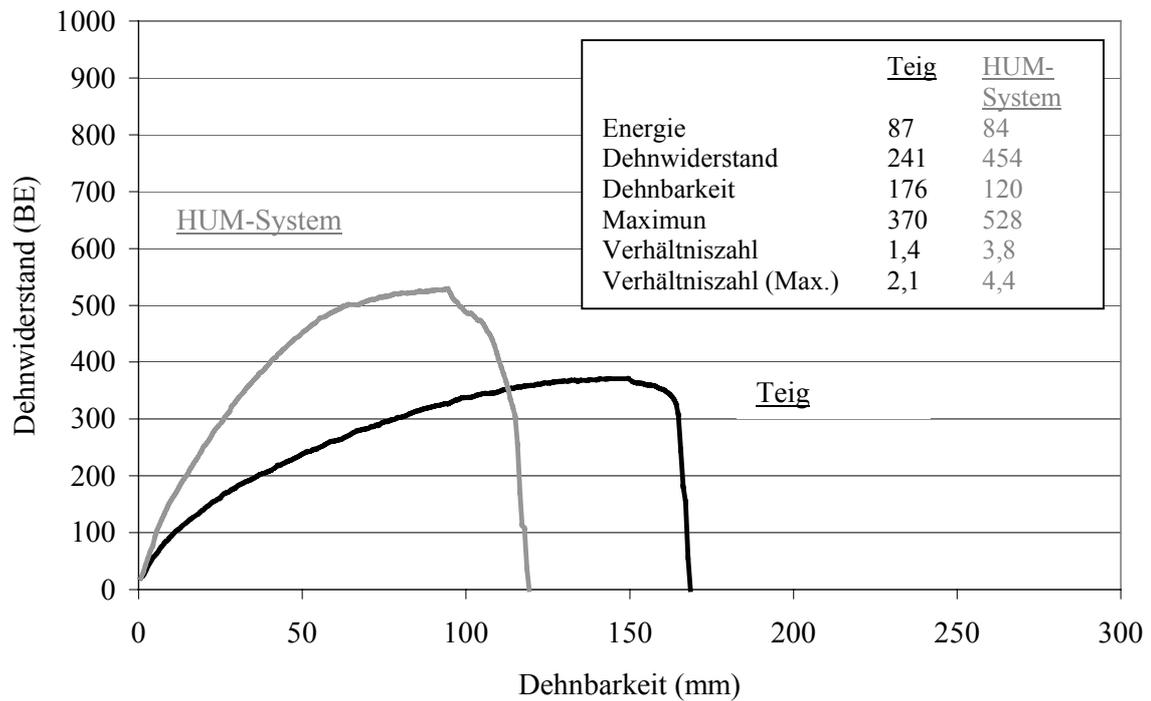


Abb. 26: Ergebnisse der Dehnungsmessungen: Extensogramme der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Zentos**.

In der Abbildung 27 und 28 sind die Extensogrammkurven den Sorten Batis und Ritmo dargestellt. Die Teige zeigten niedrigere Widerstände bei gleichzeitig verlängerten Dehnbarkeiten als die HUM-Systeme. Wie bei den Ergebnissen der anderen Weizensorten zeigten die HUM-Systeme höhere Verhältniszahlen als die Teige. Die Energien der HUM-Systeme und Teige waren bei der Sorte Batis gleich, während die Energie des HUM-Systemes der Sorte Ritmo größer als beim Teig war.

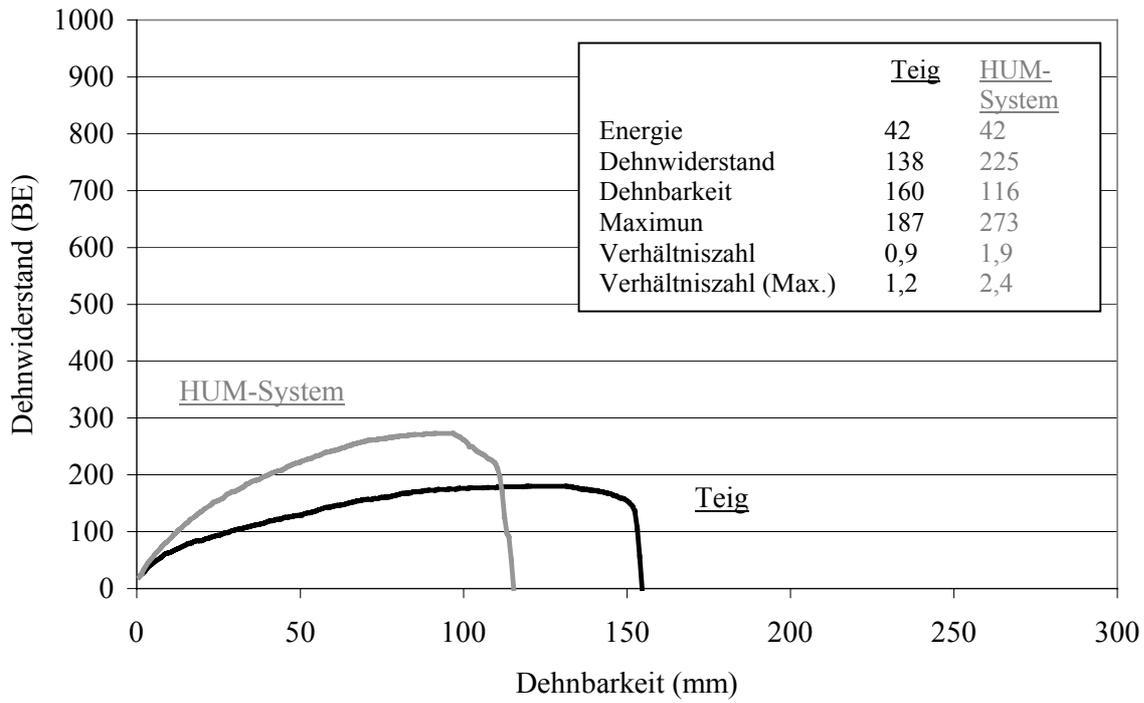


Abb. 27: Ergebnisse der Dehnungsmessungen: Extensogramme der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Batis**.

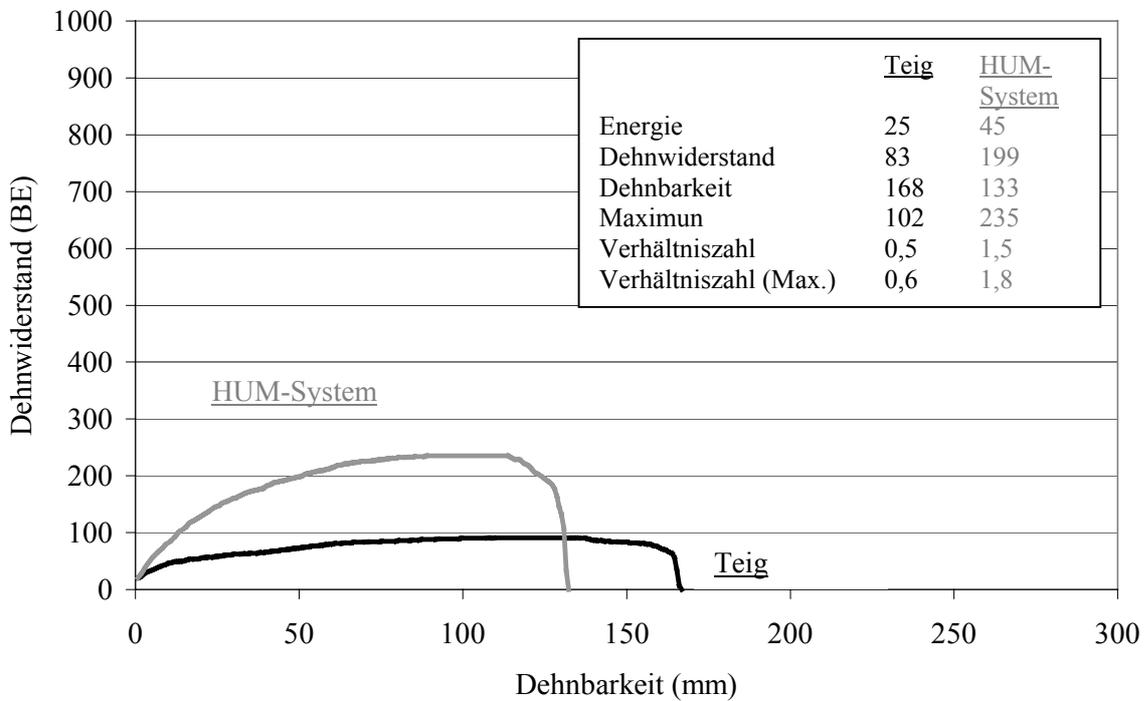


Abb. 28: Ergebnisse der Dehnungsmessungen: Extensogramme der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Ritmo**.

Wurde die Sorte Contra im Knetter verarbeitet, wies sie einen kleinen Dehnwiderstand auf (Abb. 29). Der Widerstand vergrößerte sich deutlich, wenn das System ohne Knetung hergestellt wurde. Entsprechend war die Dehnbarkeit beim Teig etwas größer als bei dem HUM-System. Die registrierte Energie des HUM-Systems betrug 35 cm^2 , was einen Anstieg zum Teig darstellte. Die Sorte Contra erreichte ein Kurvenmaximum von 259 BE (HUM-System) bzw. von 89 BE (Teig). Die daraus resultierende Verhältniszahl ergab 2,7 beim HUM-System bzw. 0,7 beim Teig.

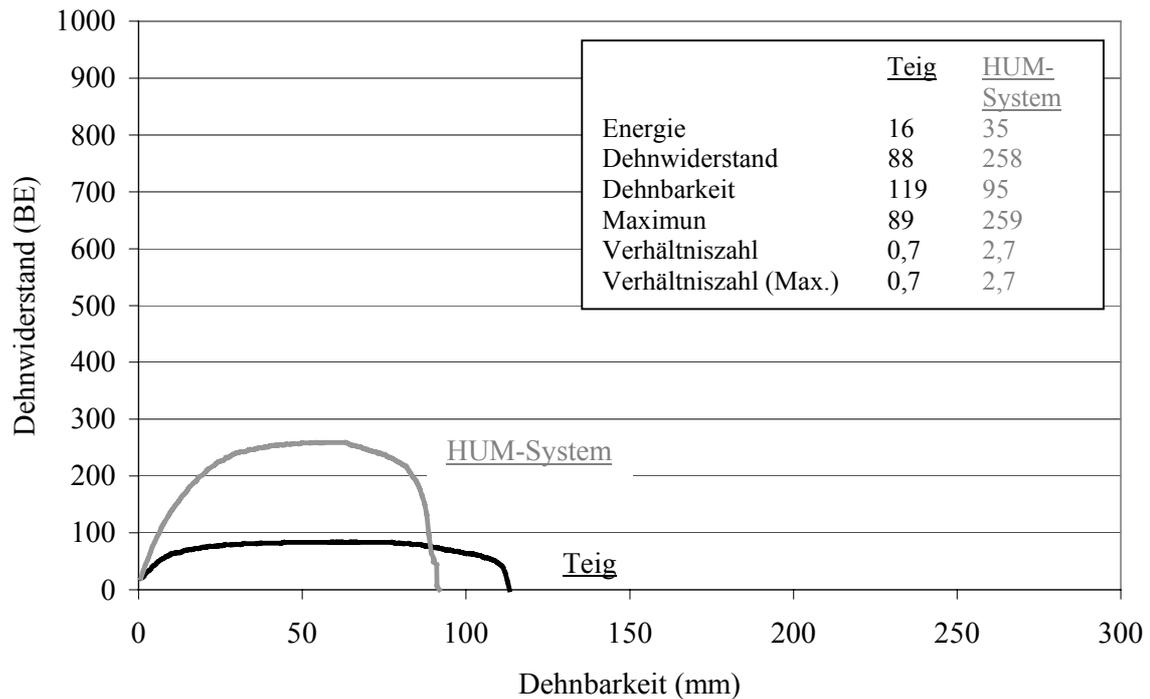


Abb. 29: Ergebnisse der Dehnungsmessungen: Extensogramme der der HUM-System und Teige der Sorte **Contra**.

Für die Auswertung der Ergebnisse wurde eine Varianzanalyse mit Ergebnissen aus zwei Messungen (Doppelbestimmung) durchgeführt (Tab. 8). Anhand der Varianzanalyse kann man sehen, dass alle Parameter der Dehnungsmessungen im Extensographen signifikante Unterschiede zwischen HUM-Systemen und Teigen aufwiesen. Dabei werden diese Unterschiede in etwa gleich stark von Sorte und System beeinflusst.

Tab. 8: Ergebnisse der Varianzanalyse: Signifikanz der Unterschiede zwischen den Extensogrammparametern im HUM-System und Teig in Abhängigkeit von Sorte, System und Wechselwirkung Sorte * System.

Parameter	Systeme	Sorte		System		Sorte * System	
		F	P	F	p	F	p
Energie	HUM-System/Teig	422,24	0,000000	130,13	0,000000	25,23	0,000033
Dehnbarkeit	HUM-System/Teig	140,29	0,000000	279,39	0,000000	4,86	0,019424
Dehnwiderstand	HUM-System/Teig	168,98	0,000000	535,85	0,000000	21,02	0,000000
Maximum	HUM-System/Teig	132,10	0,000000	241,03	0,000003	5,11	0,000000
Verhältniszahl	HUM-System/Teig	98,94	0,000000	513,91	0,000000	32,71	0,000000
Verhältniszahl im Maximum	HUM-System/Teig	62,40	0,000000	271,46	0,000000	9,88	0,000000

3.1.2. Alveogramm

Die Abbildungen 30 bis 33 stellen die Mittelwerte aus drei Alveographmessungen vor. Sie zeigen, wie sich die Mehl-Wasser-Systeme in einer biaxialen Dehnung verhalten und somit informieren sie über die Systemstruktur.

In der Abbildung 30 sind die P-Werte für geknetete Teige und HUM-Systeme aller Sorten graphisch dargestellt. Alle Sorten, außer der Sorte Batis, wiesen deutlich höhere P-Werte bei den HUM-Systemen als bei den Teigen aufgewiesen. Der größte Unterschied lag bei den Sorten Bussard und Contra. Die Sorte Batis zeigte dagegen einen kleinen Abfall im P-Wert bei nicht geknetetem Teig.

Alle untersuchten HUM-Systeme hatten deutlich kleinere L-Werte als Teige (Abb. 31). Die Sorten Bussard und Zentos wiesen die größten L-Werte bei den Teigen und die größeren Unterschiede zu den L-Werten der HUM-Systeme auf. Batis und Ritmo hatten fast gleich hohe L-Werte bei den Teigen. Die kleinsten L-Werte wurden bei der Sorte Contra registriert.

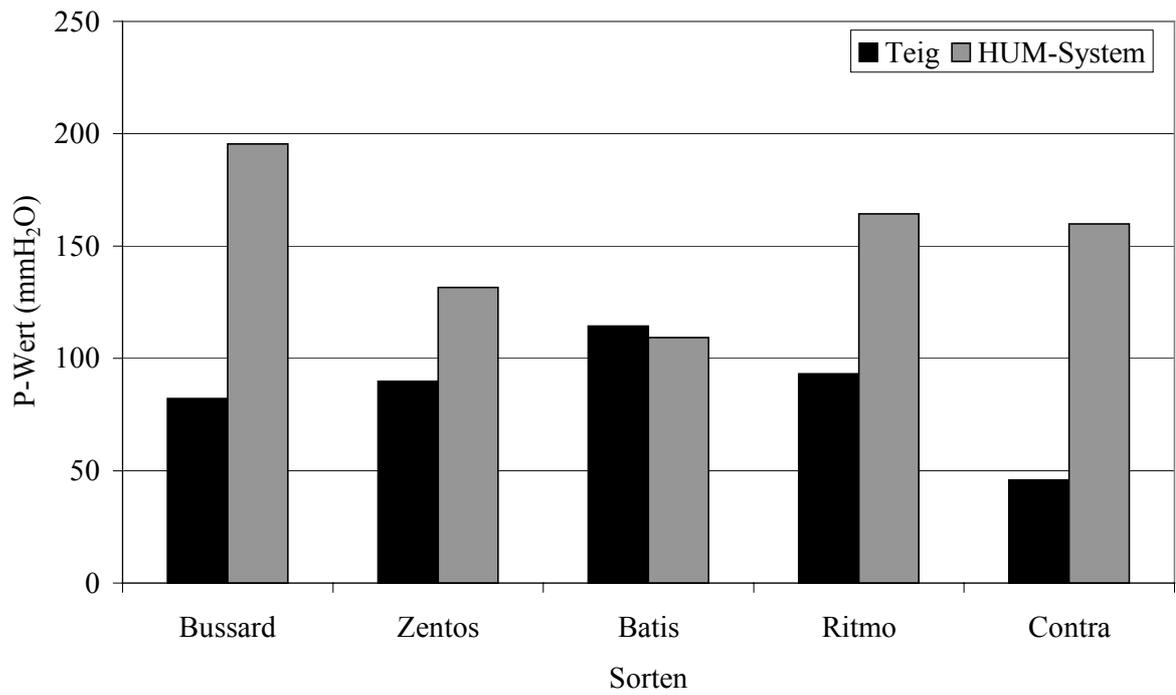


Abb. 30: Ergebnisse der Dehnungsmessungen: P-Werte aus dem Alveogramm.

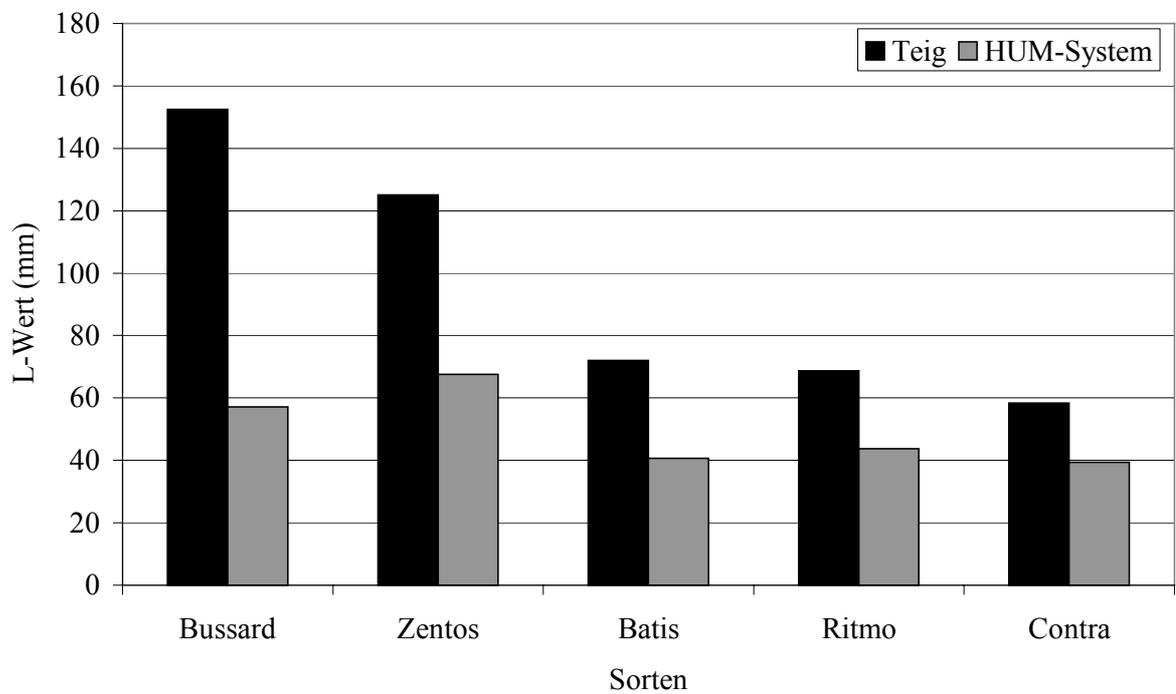


Abb. 31: Ergebnisse der Dehnungsmessungen: L-Werte aus dem Alveogramm.

Das P/L-Verhältnis war bei allen HUM-Systemen deutlich höher als bei den Teigen (Abb. 32). Bei den Sorten Bussard und Contra sind die Werte von 0,54 bzw. 0,79 der Teige auf 3,91 bzw. 4,06 der HUM-Systeme angestiegen. Bei den anderen Weizensorten war der Anstieg zwar deutlich, allerdings nicht so hoch.

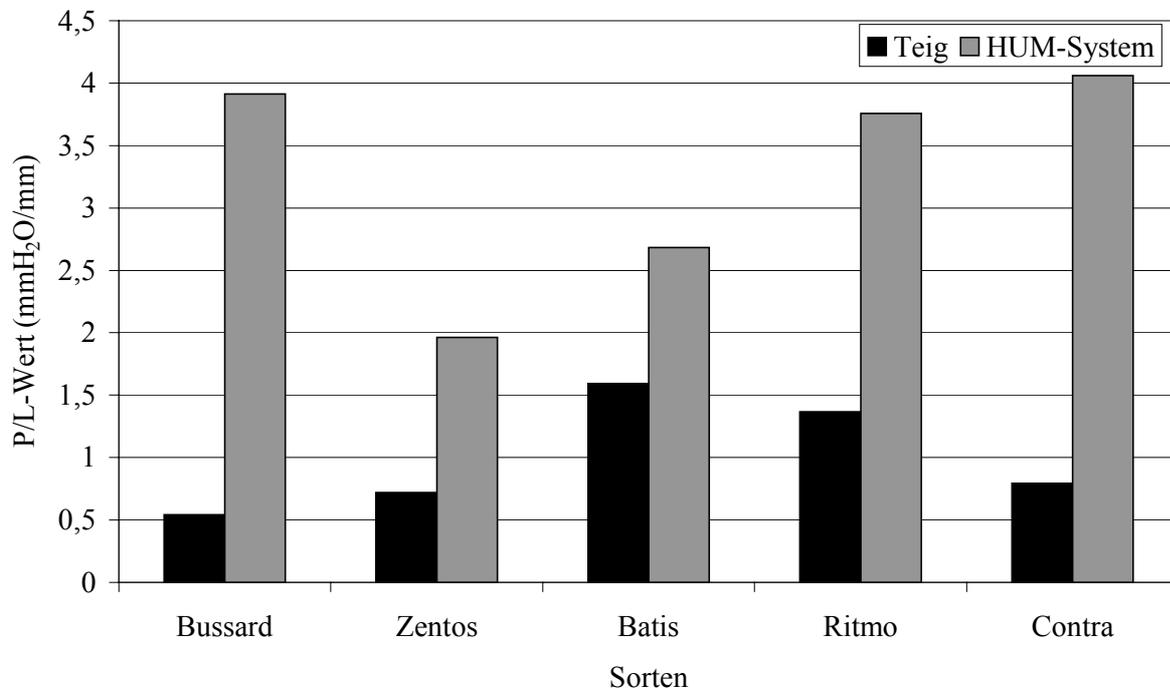


Abb. 32: Ergebnisse der Dehnungsmessungen: P/L-Werte aus dem Alveogramm.

Die Abbildung 33 zeigt die W-Werte. Diese Werte waren höher bei den Untersuchungen an HUM-Systemen, mit Ausnahme der Sorte Batis, als bei den Untersuchungen an Teigen.

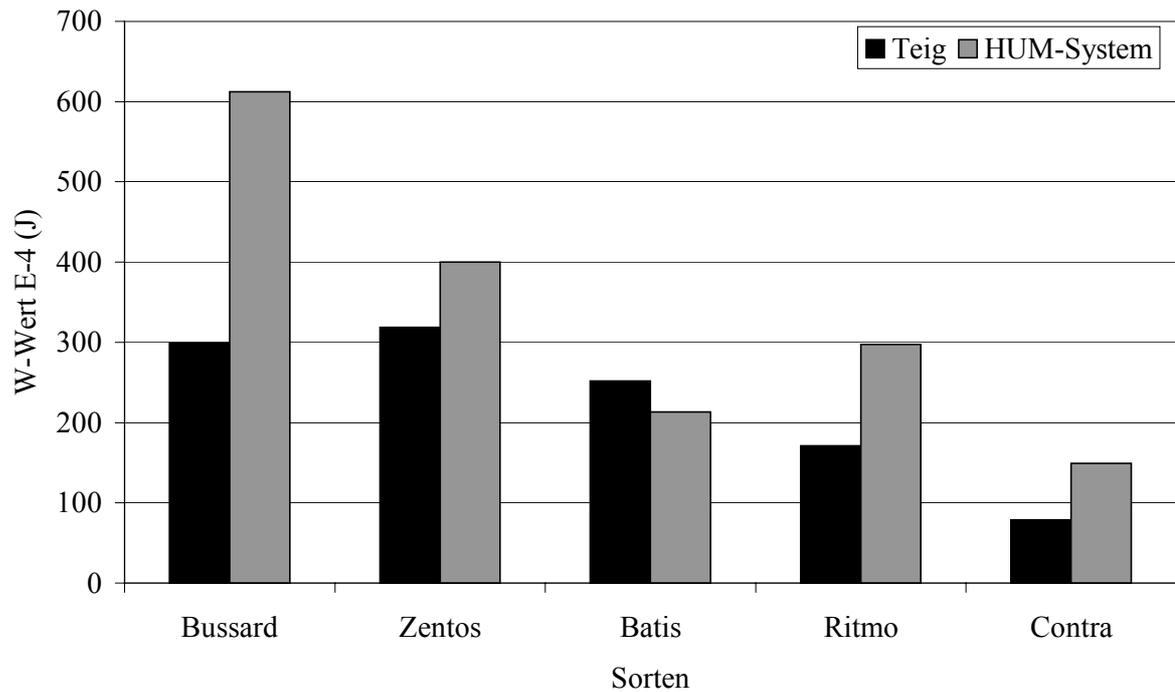


Abb. 33: Ergebnisse der Dehnungsmessungen: W-Werte aus dem Alveogramm.

Die Varianzanalyse in der Tabelle 9 zeigt die Signifikanz der Unterschiede zwischen dem HUM-System und dem Teig. Es wird deutlich, dass sich die Alveogrammparameter abhängig von Sorte und System signifikant unterschieden haben. Dabei wurden die Ergebnisse mehr vom System als von der Sorte beeinflusst.

Tab. 9: Ergebnisse der Varianzanalyse: Signifikanz der Unterschiede zwischen den Alveogrammparametern im HUM-System und Teig in Abhängigkeit von Sorte, System und Wechselwirkung Sorte * System.

Parameter	Systeme	Sorte		System		Sorte * System	
		F	p	F	p	F	p
P-Wert	HUM-System/Teig	173,48	0,000000	3395,06	0,000000	276,28	0,000000
L-Wert	HUM-System/Teig	882,98	0,000000	2079,72	0,000000	223,51	0,000000
P/L-Wert	HUM-System/Teig	176,25	0,000000	2723,97	0,000000	212,43	0,000000
W-Wert	HUM-System/Teig	5002,40	0,000000	4758,40	0,000003	1232,60	0,000000

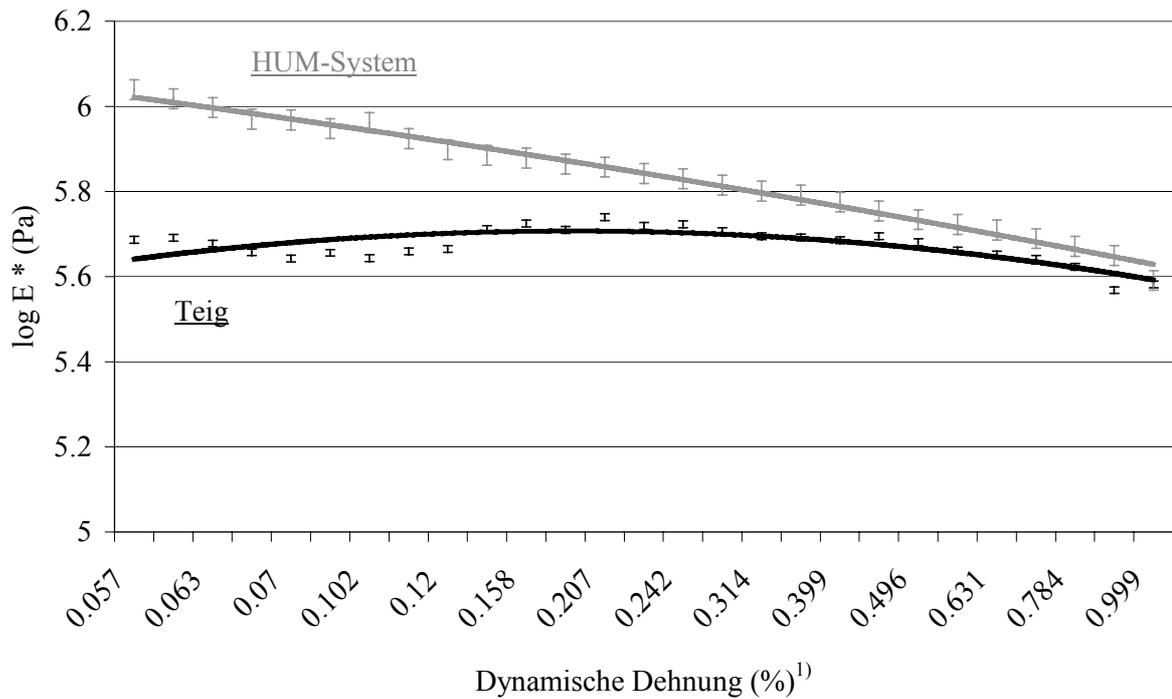
3.2. Oszillationsmessungen

3.2.1. Deformationsversuch

Signifikante Unterschiede im Deformationsversuch haben sich im Dehnungsbereich von 0,01 bis 1 % gezeigt. Daher wird nur dieser Bereich vorgestellt. Aus jeder Messung wird der besseren Übersicht wegen, die aus zwei Messkurven gemittelte Kurve dargestellt.

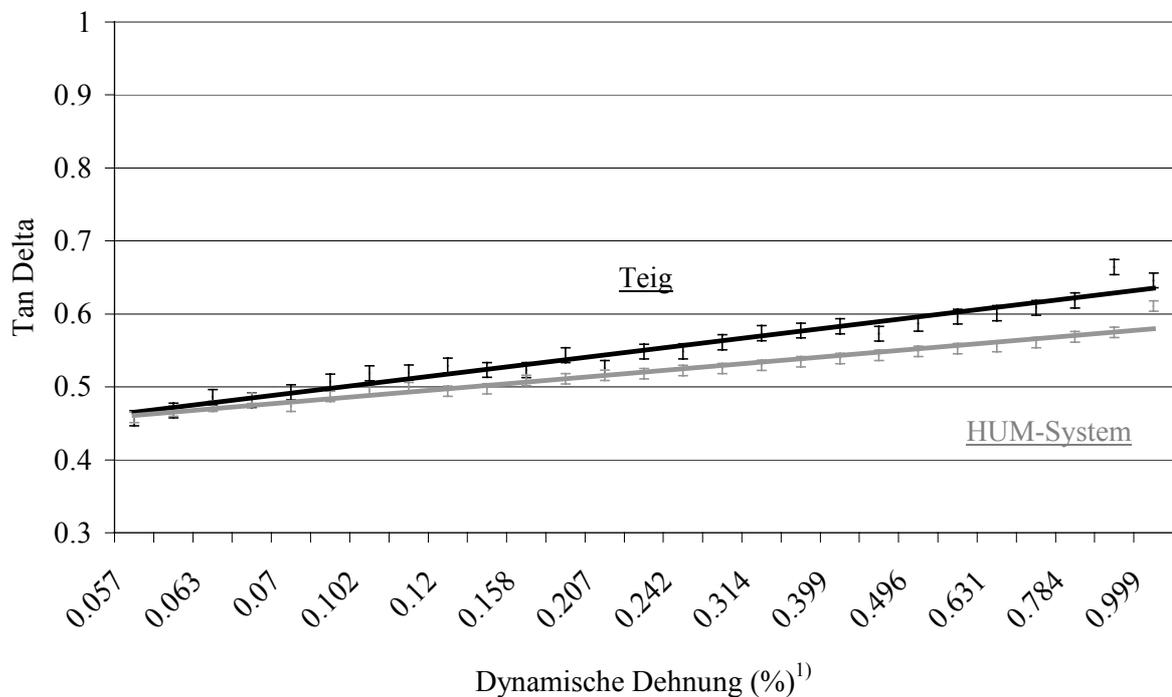
Die Abbildungen 34 bis 43 stellen die Kurvenverläufe der Komplexmoduli- und Tan-Delta-Werte von untersuchten Mehl-Wasser-Systemen aus den verschiedenen Mehlen in Deformationsversuchen vor. Sie zeigen viskoelastisches Verhalten der Mehl-Wasser-Systeme bzw. Reaktion auf die Steigung der Beanspruchung.

Das HUM-System aus dem Mehl der Sorte Bussard zeigte im ganzen Bereich der Messung höhere Komplexmoduli als Teig (Abb. 34). Mit dem Anstieg der dynamischen Dehnung zeigte Teig einen Bereich, in welchem sich die Komplexmodulwerte nur geringfügig ändern. Im Gegensatz zu dem Teig zeigte das HUM-System schon ab dem ersten Messpunkt eine sinkende Tendenz der Viskoelastizität. Die Kurve der Tan-Delta-Werte des HUM-Systems lag insgesamt unterhalb der Kurve des Teiges (Abb. 35). Dabei unterschieden sich die Werte am Anfang der Messung kaum, mit zunehmender Dehnung wurden die Unterschiede deutlicher.



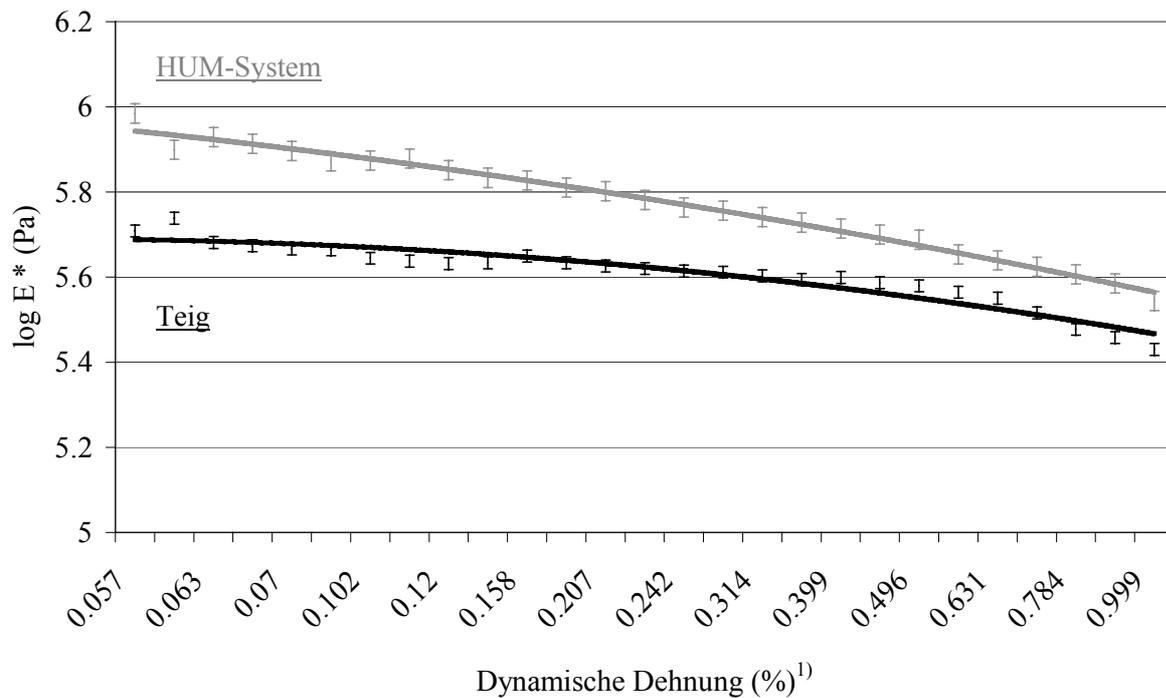
¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 34: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Komplexmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Bussard** im Deformationsversuch.



¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

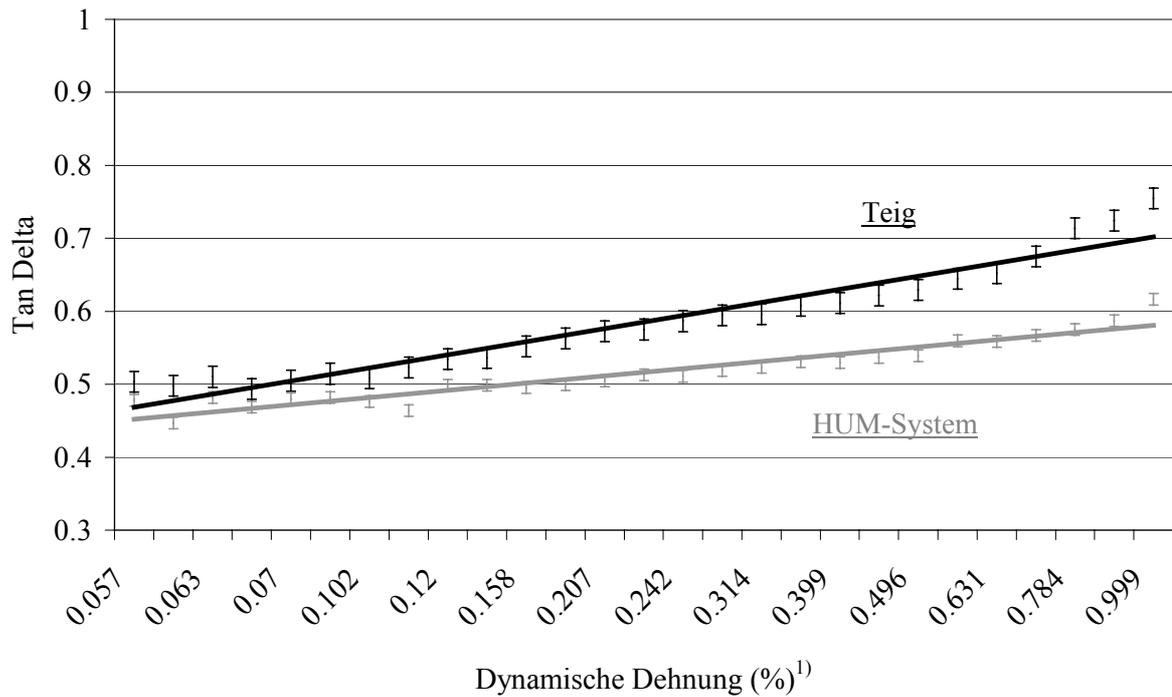
Abb. 35: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Tan Delta der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Bussard** im Deformationsversuch.



¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

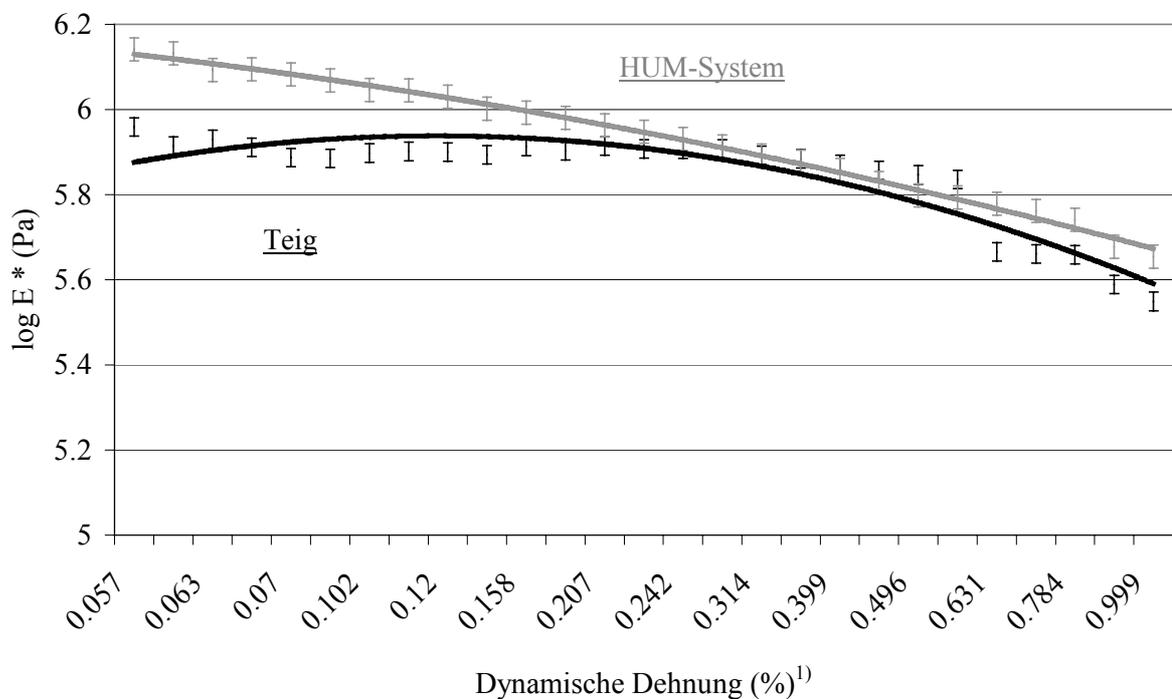
Abb. 36: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Komplexmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Zentos** im Deformationsversuch.

In den Abbildungen 36 und 37 sind die Kurvenverläufe der Komplexmodulwerte und Tan-Delta-Werte von HUM-Systemen und Teigen aus dem Mehl der Sorte Zentos aufgezeichnet. Die Viskoelastizität war bei dem HUM-System höher als bei dem Teig. Mit steigender Dehnung sind die Komplexmoduli bei beiden Systemen gesunken, wobei der Abfall bei dem HUM-System steiler als bei dem Teig war. Die Tan-Delta-Werte des HUM-Systems waren im ganzen Bereich niedriger als die des Teiges.



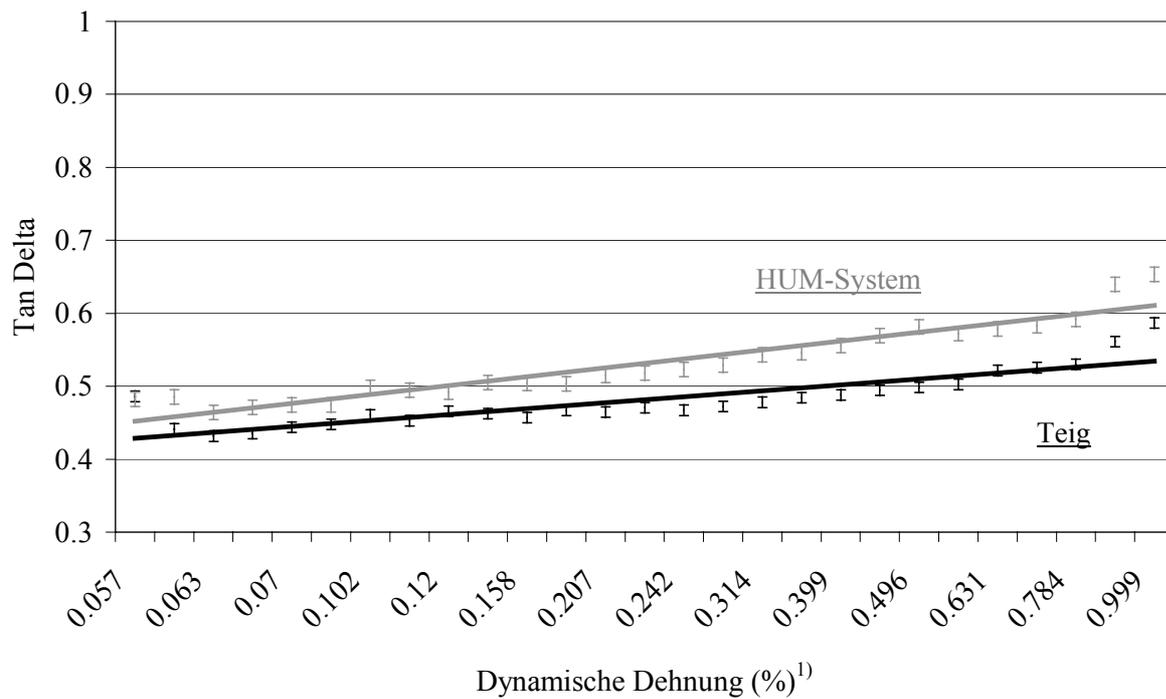
¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 37: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Tan Delta der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Zentos** im Deformationsversuch.



¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 38: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Komplexmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Batis** im Deformationsversuch.

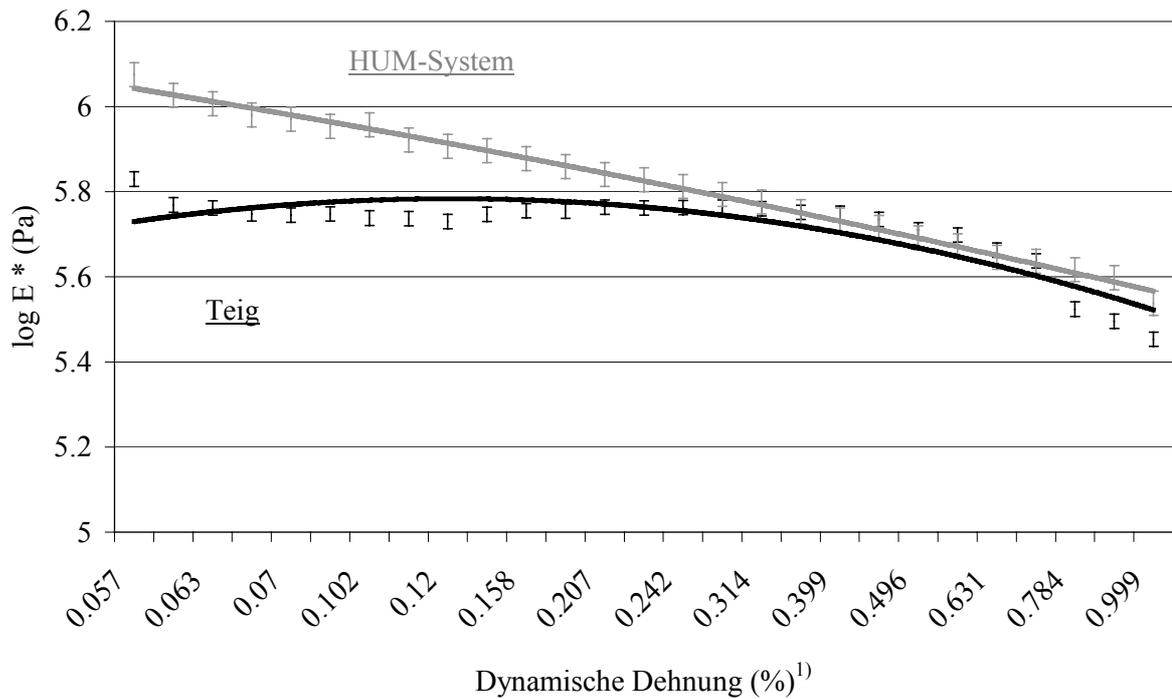


¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 39: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Tan Delta der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Batis** im Deformationsversuch.

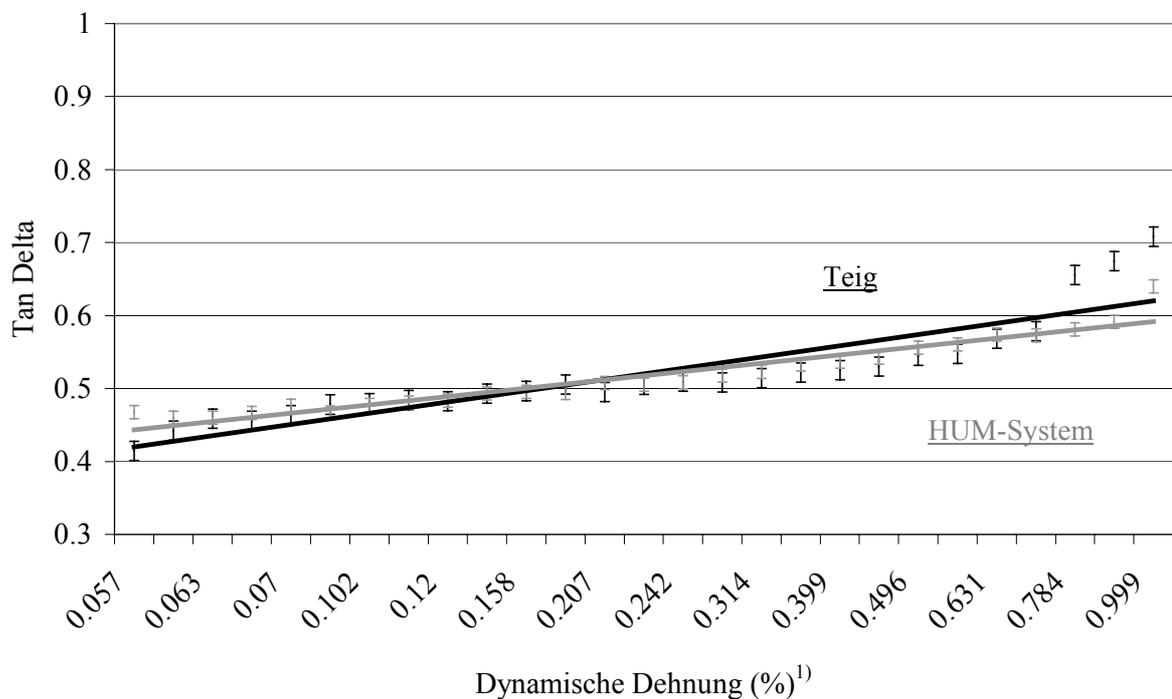
Die Viskoelastizität des HUM-Systems aus dem Mehl der Sorte Batis war am Anfang der Messung höher als die des Teiges (Abb. 38). Mit steigender Dehnung näherten sich beide Kurven zunächst an. Mit weiterer Dehnbelastung divergierten die Messkurven wiederum. Das Verhältnis Viskosität-Elastizität des HUM-Systems war im ganzen Bereich im Vergleich zu dem Teig höher (Abb. 39).

Die Mehl-Wasser-Systeme aus der Sorte Ritmo zeigten in der Viskoelastizität (Komplexmoduli) Ähnlichkeiten zu den anderen untersuchten Weizensorten (Abb. 40). Die Viskoelastizität des HUM-Systems war höher als die Viskoelastizität des Teige-Systems, wobei das HUM-System eine stärker abfallende Tendenz aufwies. Zwischen beiden Systemen konnten keine signifikanten Unterschiede für Tan-Delta-Werte registriert werden. (Abb. 41).



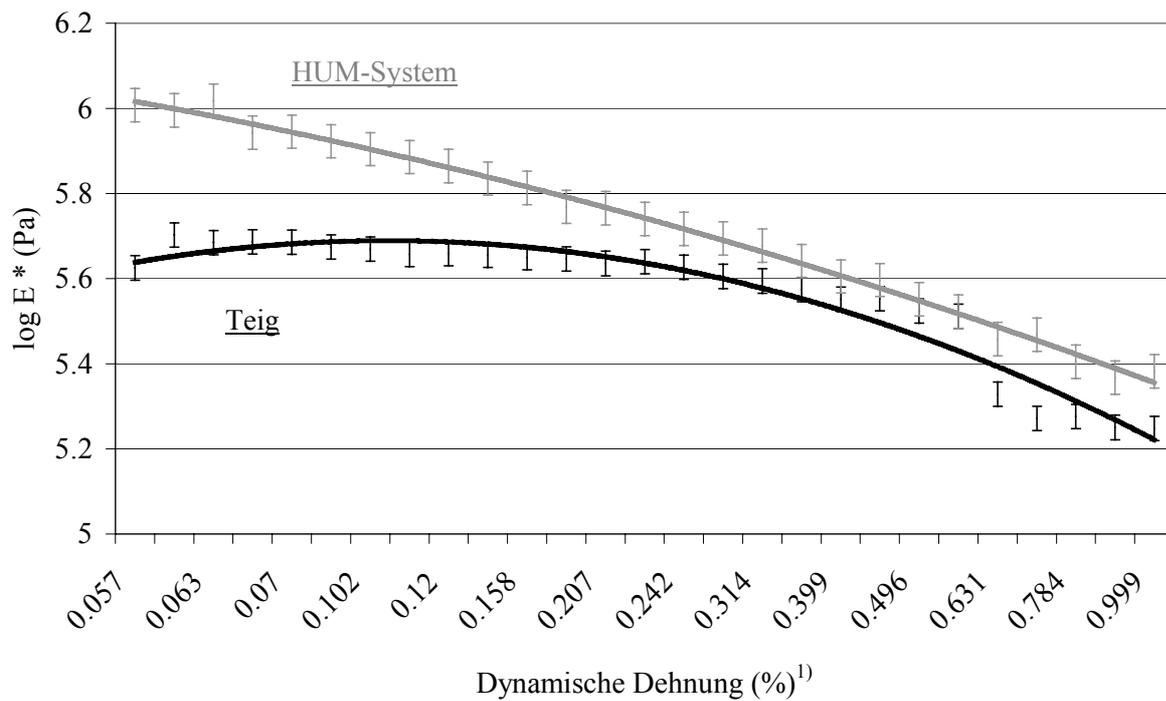
¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 40: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Komplexmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Ritmo** im Deformationsversuch.



¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 41: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Tan Delta der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Ritmo** im Deformationsversuch.

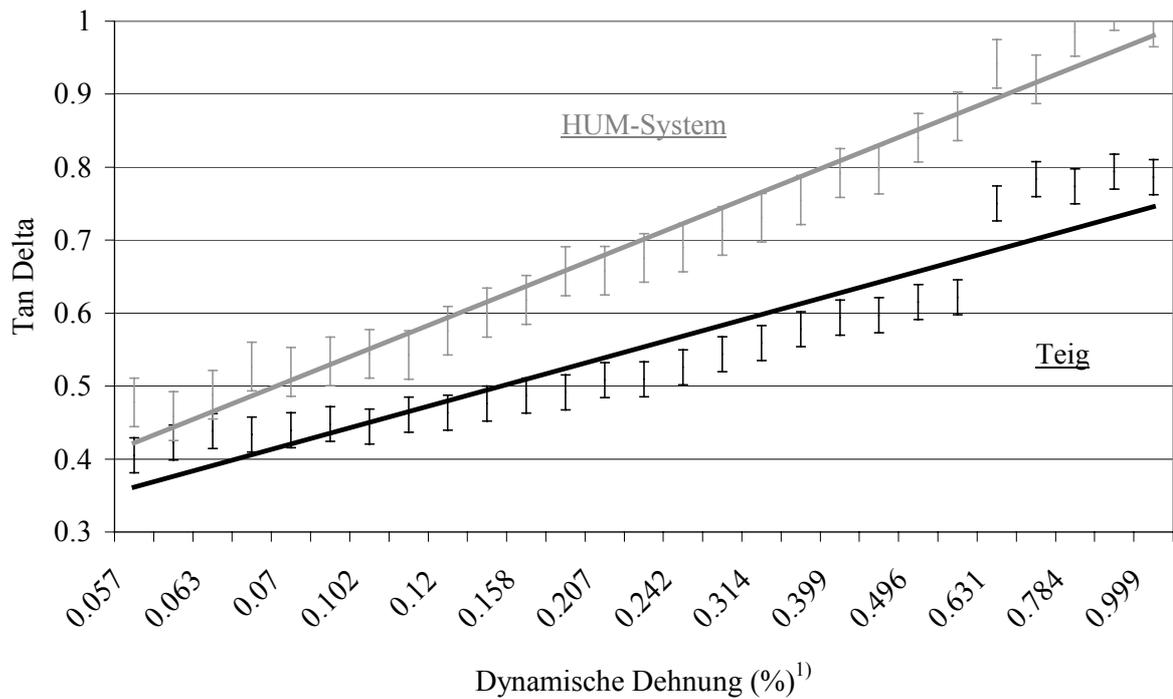


¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 42: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Komplexmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Contra** im Deformationsversuch.

In Abbildung 42 werden die Komplexmoduli-Kurven der HUM-Systeme und Teige aus dem Mehl der Sorte Contra dargestellt. Die HUM-Systeme und Teige dieser Sorte zeigten im Vergleich zu den anderen Sorten den stärksten Viskoelastizitätsabfall. Dabei war der Abfall der Viskoelastizität beim HUM-System größer als beim Teig. Die Tan-Delta-Werte des HUM-Systems waren im ganzen Messbereich höher als die des Teiges (Abb. 43).

Die Darstellung der Kurvenverläufe von Elastizität und Viskosität befinden sich im Anhang (Abb. 96-105).



¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 43: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Tan Delta der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Contra** im Deformationsversuch.

Der t-Test zeigte, dass sich die Kurvenverläufe der Komplexmoduli-Werte bei allen Sorten signifikant unterschieden haben (Tab. 10). Die Tan-Delta-Werte waren nur bei der Sorte Ritmo nicht signifikant unterschiedlich. Alle anderen Sorten zeigten auch bei diesem Parameter statistisch deutliche Unterschiede.

Tab. 10: Ergebnisse des t-Tests: Signifikanz der Unterschiede bei den E*- und Tan-Delta-Werten aus dem Deformationsversuch zwischen HUM-System und Teig für alle untersuchten Sorten.

Sorte	System	E*		Tan Delta	
		t	p	t	p
Bussard	HUM-System/Teig	6,642	0,000000	-2,427	0,018702
Zentos	HUM-System/Teig	6,303	0,000000	-4,229	0,000095
Batis	HUM-System/Teig	2,436	0,018309	4,104	0,000143
Ritmo	HUM-System/Teig	3,148	0,002718	-0,157	0,875183
Contra	HUM-System/Teig	3,296	0,001769	3,594	0,000724

3.2.2. Frequenzversuch

Im Frequenzbereich von 0,1 bis 10 Hz zeigten sich die signifikanten Unterschiede, und aus diesem Grund wird gerade dieser Bereich dargestellt. Wie bei der Darstellung der Ergebnisse aus dem Deformationsversuch, wird auch hier die gemittelte Kurve aus jeweils zwei Messungen präsentiert. Damit wird die Reaktion der Mehl-Wasser-Systeme auf steigende Häufigkeit der Beanspruchung dargestellt.

In den Abbildungen 44 und 45 sind die Ergebnisse aus den Frequenzversuchen mit den Mehl-Wasser-Systemen aus dem Mehl der Weizensorte Bussard enthalten. Die Anfangsviskoelastizität war beim HUM-System höher als beim gekneteten Teig. Mit steigender Frequenz stiegen die Komplexmoduli, allerdings ohne signifikanten Unterschiede (Abb.44) an. Die Tan-Delta-Werte des HUM-Systems verliefen fast unverändert, während die des Teiges eine abfallende Tendenz aufwiesen (Abb. 45). Dabei bildete sich ein Schnittpunkt aus.

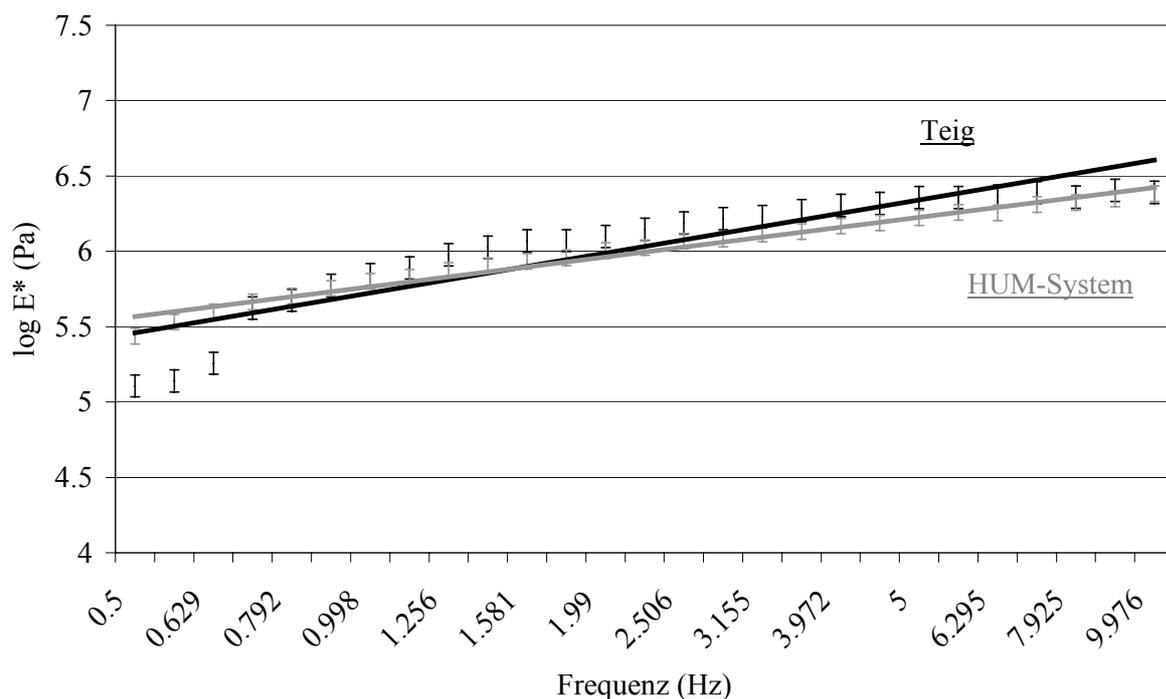


Abb. 44: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Komplexmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Bussard** im Frequenzversuch.

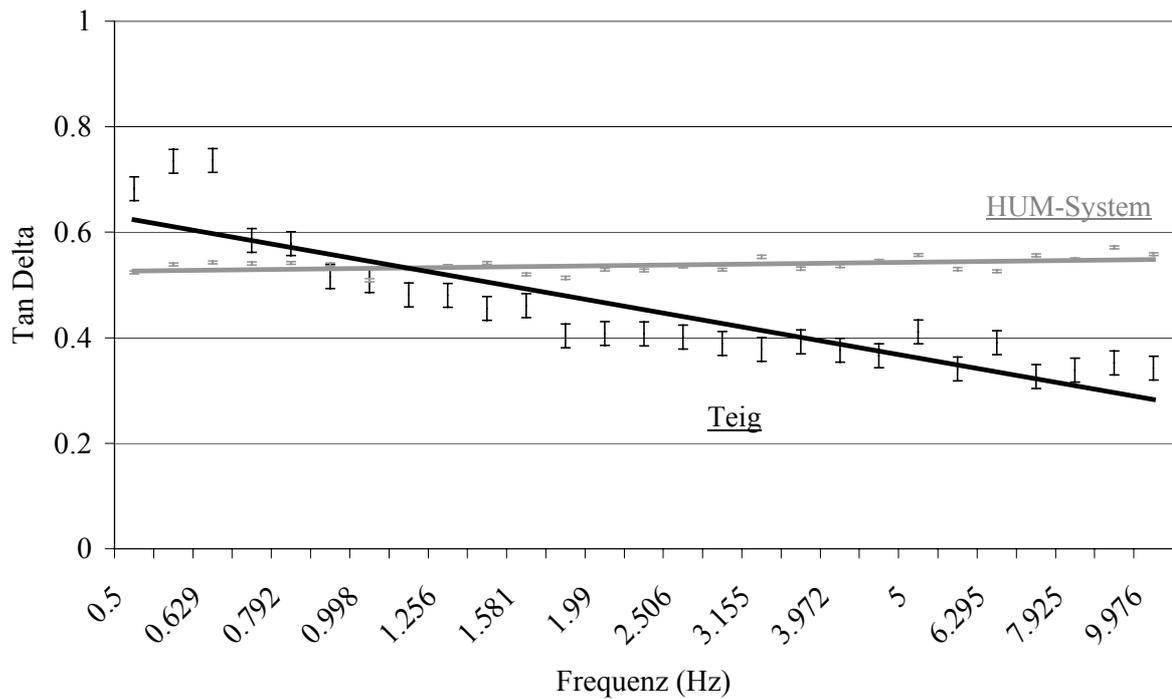


Abb. 45: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Tan Delta der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Bussard** im Frequenzversuch.

Die HUM-Systeme und Teige aus dem Mehl der Sorte Zentos wiesen ein rheologisch ähnliches Verhalten wie die der Sorte Bussard auf (Abb. 46 und 47).

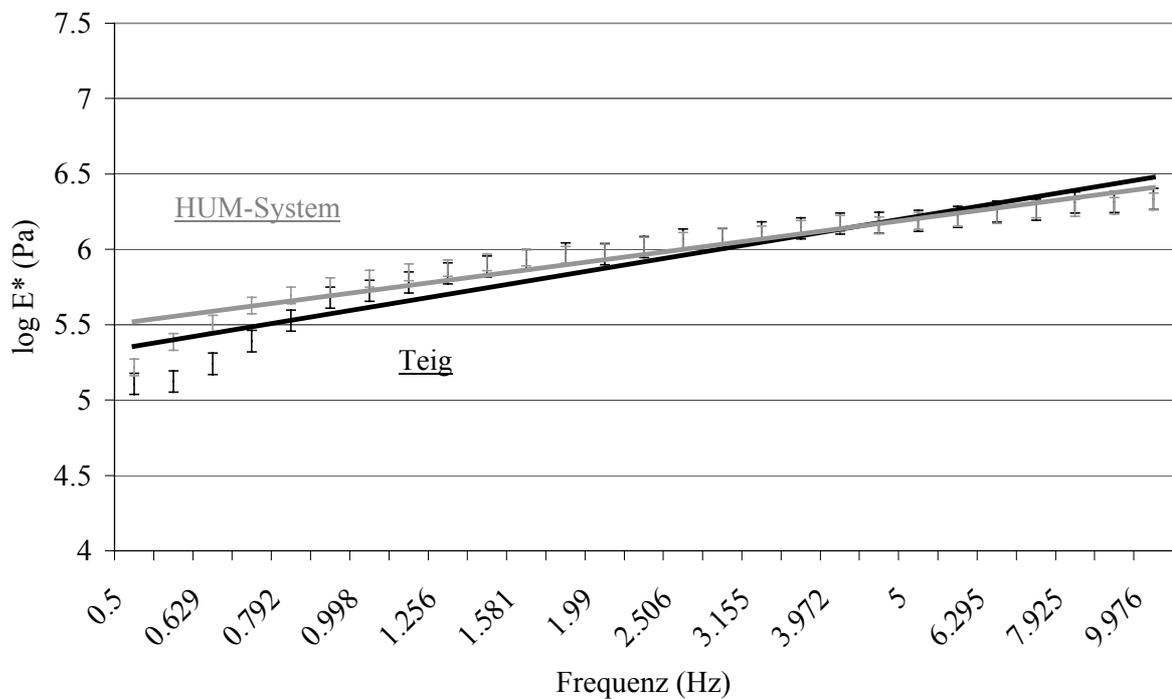


Abb. 46: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Komplexmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Zentos** im Frequenzversuch.

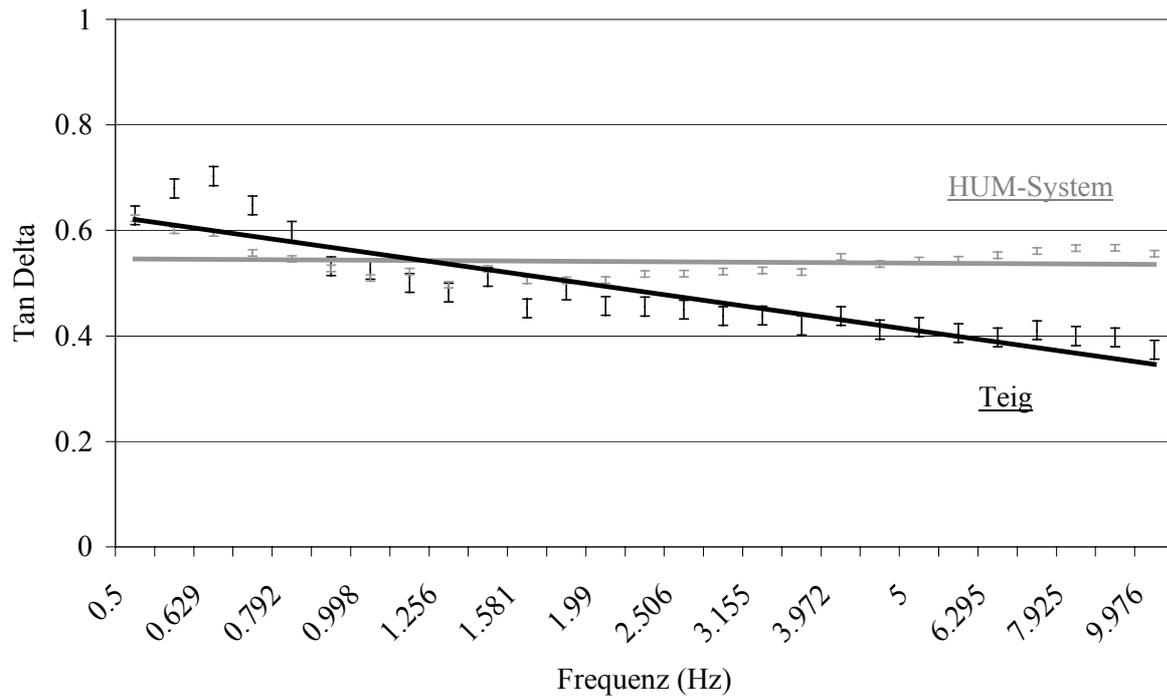


Abb. 47: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Tan Delta der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Zentos** im Frequenzversuch.

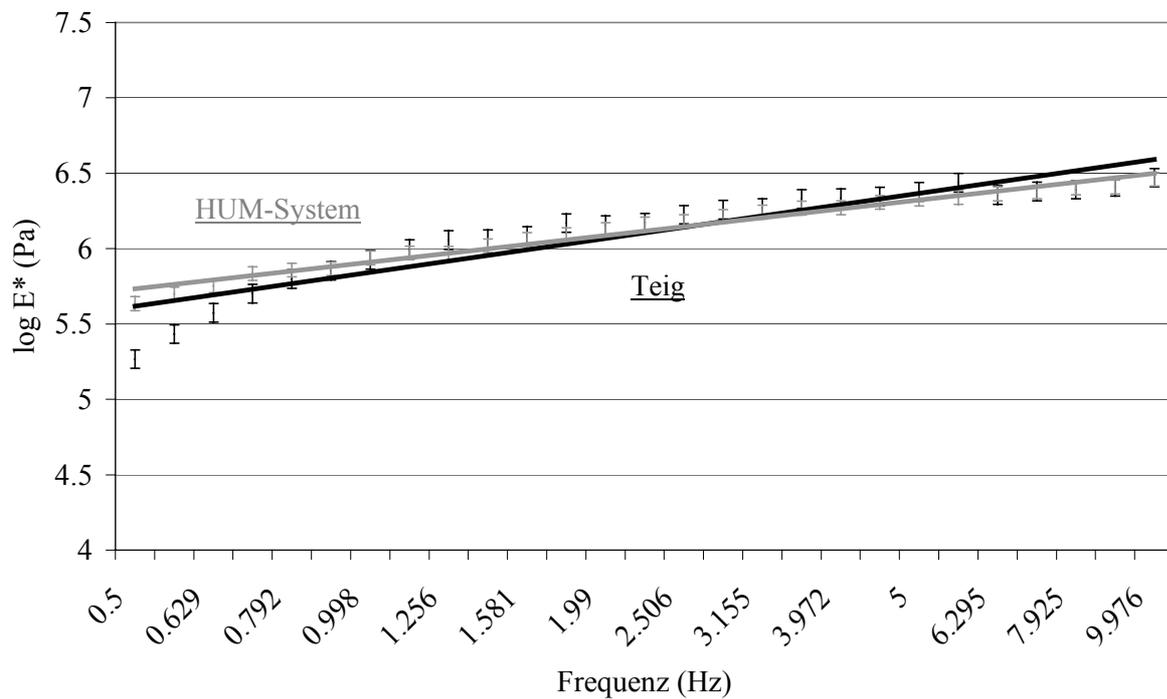


Abb. 48: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Komplexmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Batis** im Frequenzversuch.

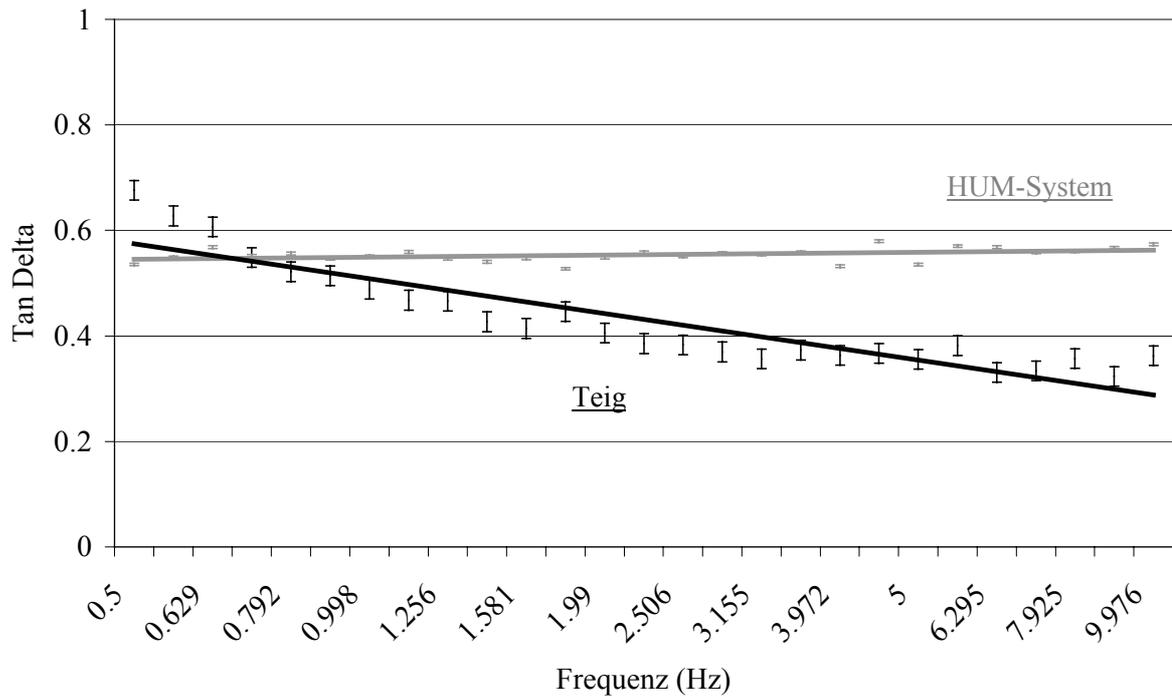


Abb. 49: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Tan Delta der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Batis** im Frequenzversuch.

Die Abbildungen 48 und 49 zeigen das dynamische Verhalten von HUM-Systemen und Teigen aus dem Mehl der Sorte Batis. Nur am Anfang der Messung wies das HUM-System eine höhere Viskoelastizität als Teig aus. Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. Die Tan-Delta-Werte des HUM-Systems waren fast im ganzen Bereich höher als die des Teiges (Abb. 49).

Bei der Sorte Ritmo wurde der Schnittpunkt der Kurven der Viskoelastizität sehr schnell erreicht (Abb. 50). So lag die Messkurve des HUM-Systems fast im ganzen Bereich unterhalb der Kurve des Teiges, ohne signifikanten Unterschiede, zu zeigen. Die Kurve der Tan-Delta-Werte des HUM-Systems wurde durch eine abfallende Tendenz charakterisiert, wobei diese nicht so steil wie bei dem Teig war (Abb. 51). Nach dem Schnittpunkt waren die Tan-Delta-Werte des HUM-Systems höher. Die Messwerte des Teiges streuten stärker als bei den Sorten Bussard, Zentos und Batis, was sich auch während der vierfachen Bestimmung wiederholte.

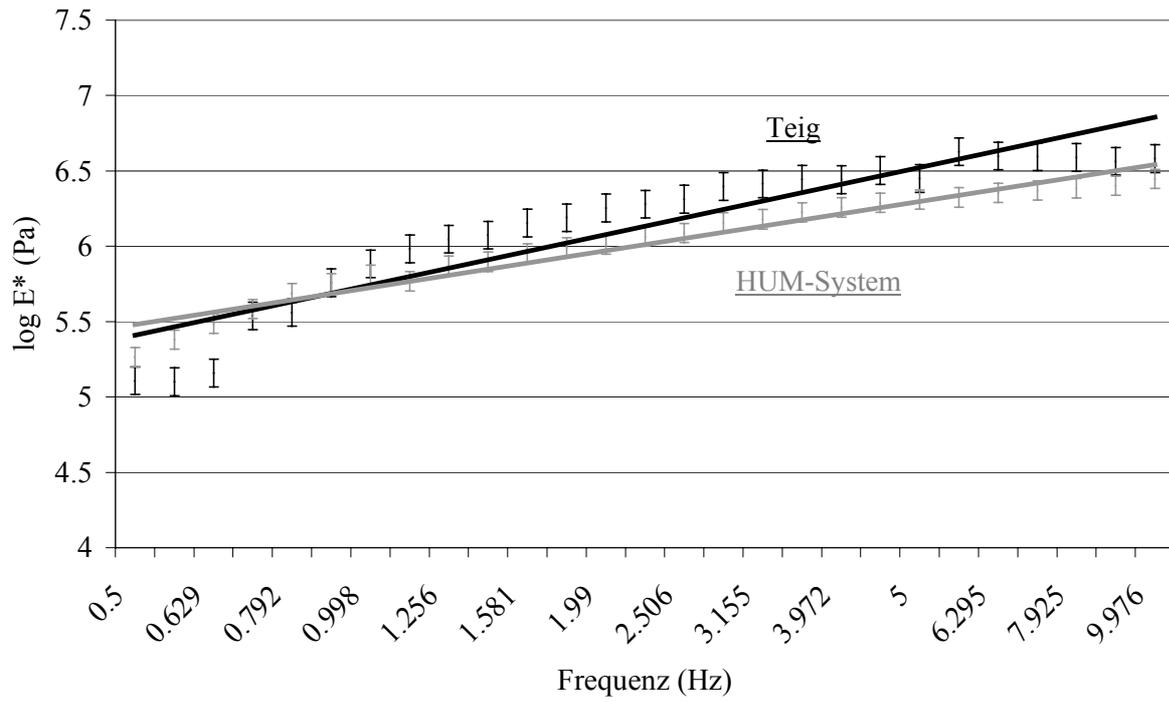


Abb. 50: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Komplexmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Ritmo** im Frequenzversuch.

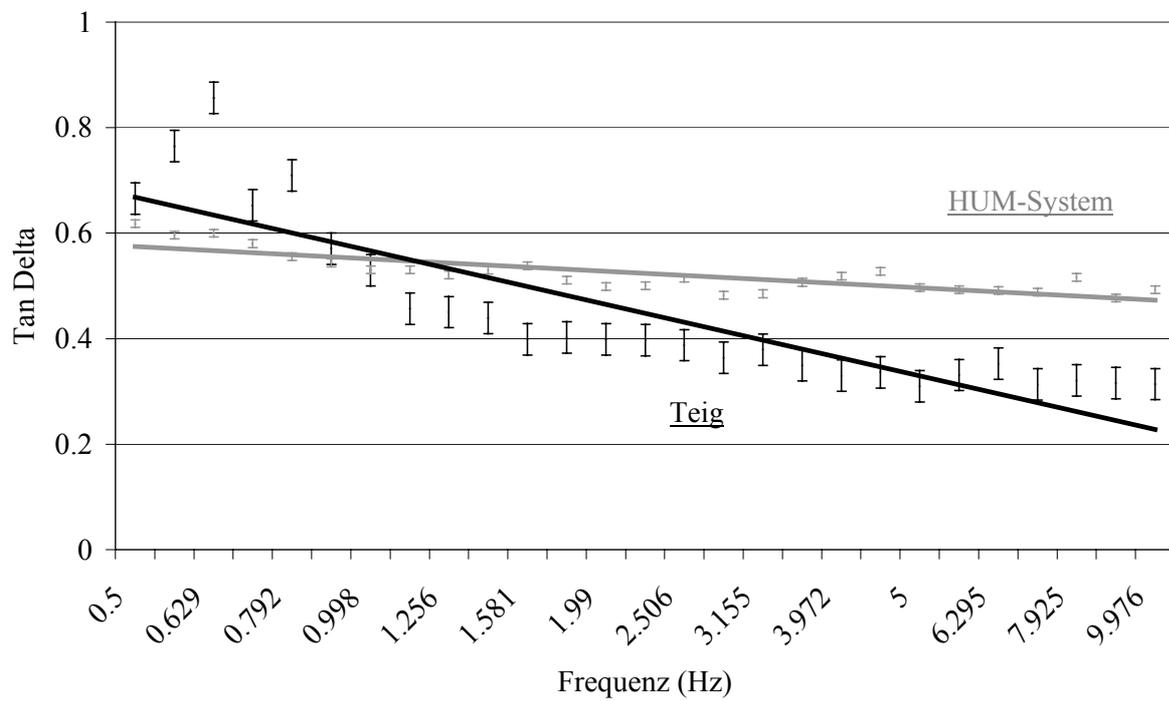


Abb. 51: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Tan Delta der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Ritmo** im Frequenzversuch.

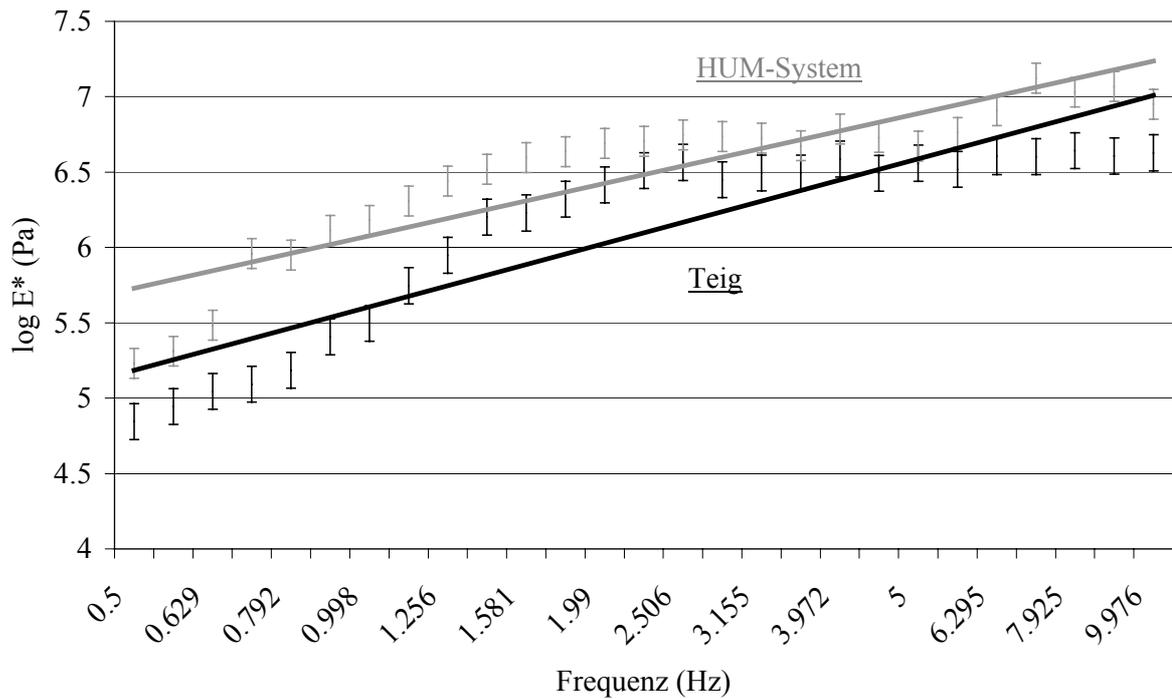


Abb. 52: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Komplexmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Contra** im Frequenzversuch.

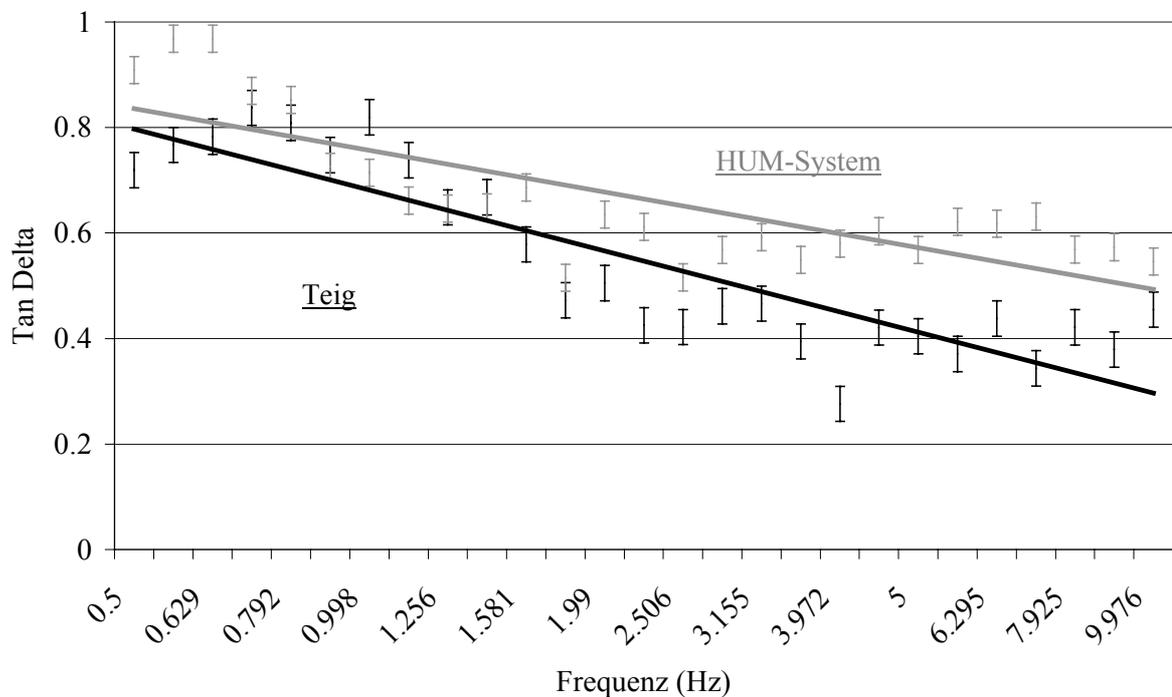


Abb. 53: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Tan Delta der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Contra** im Frequenzversuch.

Der größte Unterschied in der Anfangsviskoelastizität zwischen HUM-System und Teig zeigte sich bei dem Mehl der Sorte Contra (Abb. 52). Der Kurvenverlauf des HUM-Systems

lag im betrachteten Bereich stets höher als bei dem Teig. Die Komplexmoduli-Werte beider Systeme charakterisierte eine ähnliche Steigung, wenn auch mit einer gewissen Neigung zur Divergenz. Charakteristisch für die Kurvenverläufe von Tan-Delta-Werten der Sorte Contra war keine Ausbildung eines Schnittpunktes (Abb. 53). Beide Kurven zeigten als Tendenz einen sinkenden Verlauf. Die mehrfache Bestimmung bestätigte den unruhigen Verlauf der Messung.

Die Tabelle 11 zeigt, dass sich die Unterschiede zwischen dem HUM-System und Teig in den Tan-Delta-Werten besser widerspiegeln.

Tab. 11: Ergebnisse des t-Tests: Signifikanz der Unterschiede bei den E*- und Tan-Delta-Werten aus dem Frequenzversuch zwischen HUM-System und Teig, für alle untersuchten Sorten.

Sorte	System	E*		Tan Delta	
		t	p	t	p
Bussard	HUM-System/Teig	-0,406	0,686529	3,688	0,000541
Zentos	HUM-System/Teig	0,513	0,610429	3,051	0,003582
Batis	HUM-System/Teig	0,564	0,879660	6,538	0,000000
Ritmo	HUM-System/Teig	-1,089	0,280972	2,483	0,016310
Contra	HUM-System/Teig	2,493	0,015895	2,792	0,007318

Im Anhang sind die Darstellungen der Kurvenverläufe der Elastizitäts- und Viskositätsmoduli aufgeführt (Abb. 106-115).

3.3. Knetversuch

Im Kapitel Material und Methoden wurde unter 2.6 die Durchführung der Knetversuche beschrieben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Teige nachfolgend auf folgende Weise bezeichnet: Teig ICC (Vergleichsversuch), Teig 300 (Abbruch bei 300 FE), Teig 400 (Abbruch bei 400 FE), Teig 500 (Abbruch bei 500 FE), Teig 20/45 (Abbruch nach 20 min).

Die Ergebnisse zeigen das Knetverhalten der Mehl-Wasser-Systeme und dadurch den Einfluss des Knetenergieeintrages auf die Systembildung.

Die Farinogrammkurve des Teiges ICC aus dem Mehl der Sorte Bussard ist in der Abbildung 54 dargestellt. Das Mehl dieser Sorte hatte eine Wasseraufnahme von 61,1 % und eine Teigentwicklungszeit von 5 min aufgewiesen. Der Teig war 8,6 min stabil, während er eine Teigerweichung von 56 FE 12 min nach Maximum zeigte.

Das HUM-System der Sorte Bussard zeigte bei der Nachknetung erst einen Konsistenzabfall und nachher eine konstante Konsistenzsteigerung (Abb. 55). Dabei wurden weder eine Teigentwicklungszeit, noch eine Stabilität registriert.

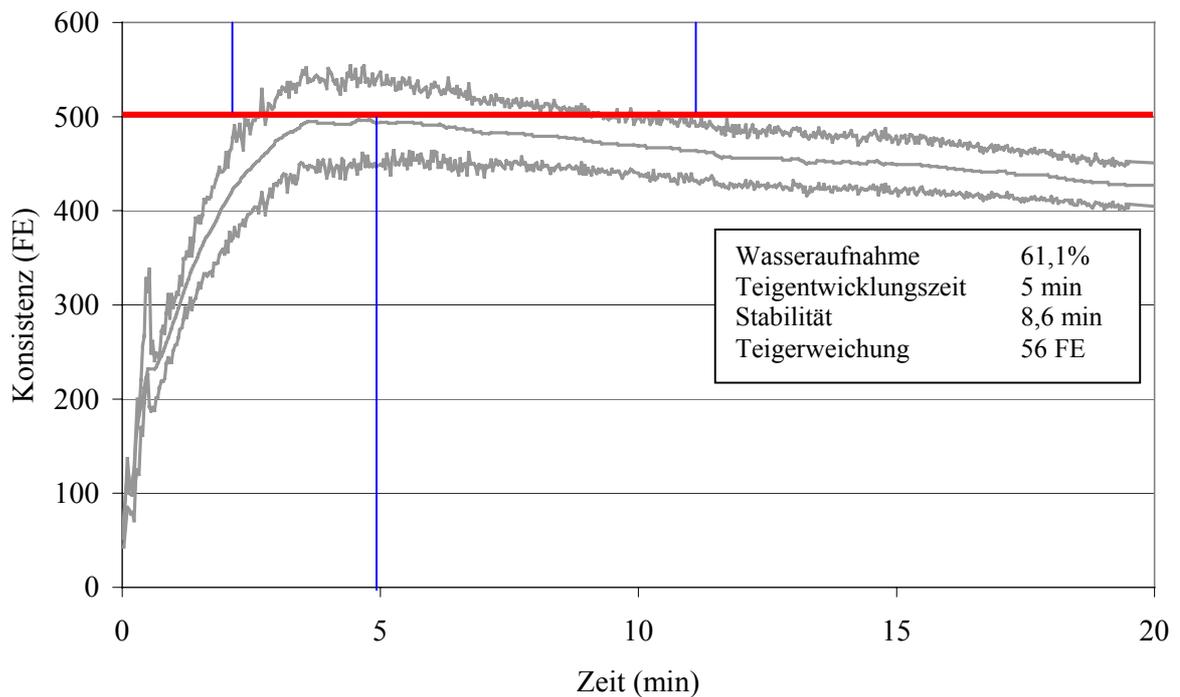


Abb. 54: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten des Teiges aus dem Mehl der Sorte **Bussard** nach der ICC-Methode.

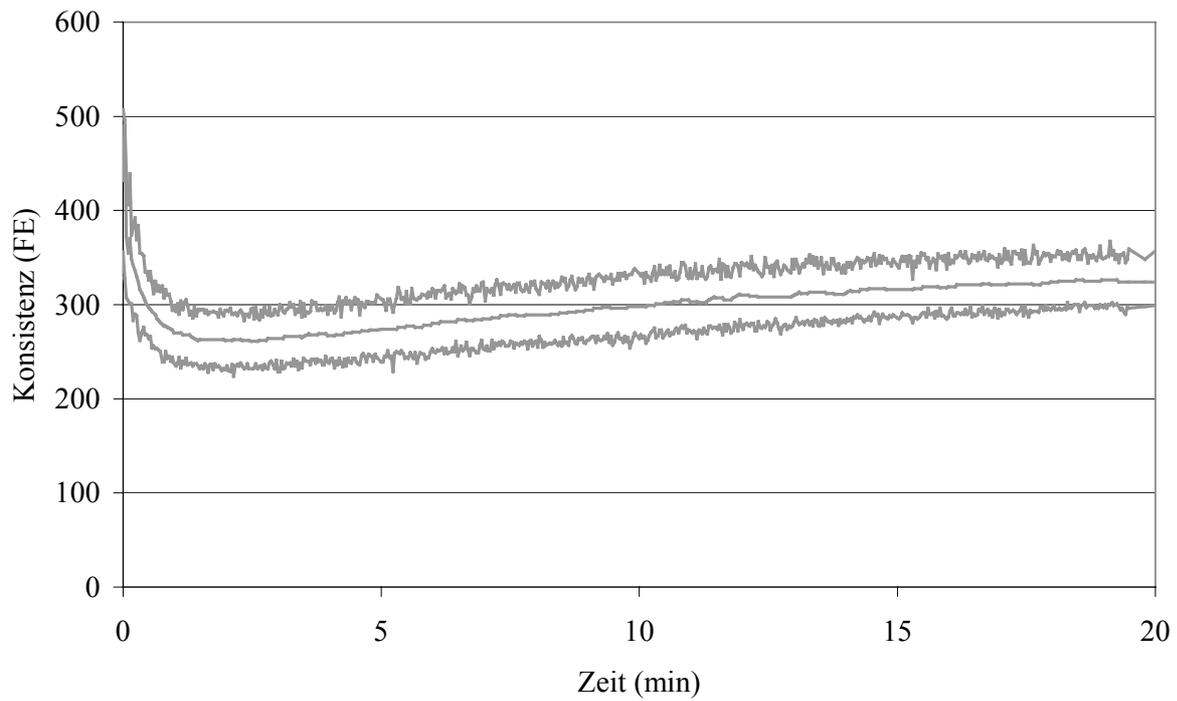


Abb. 55: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten des HUM-Systems der Sorte **Bussard**.

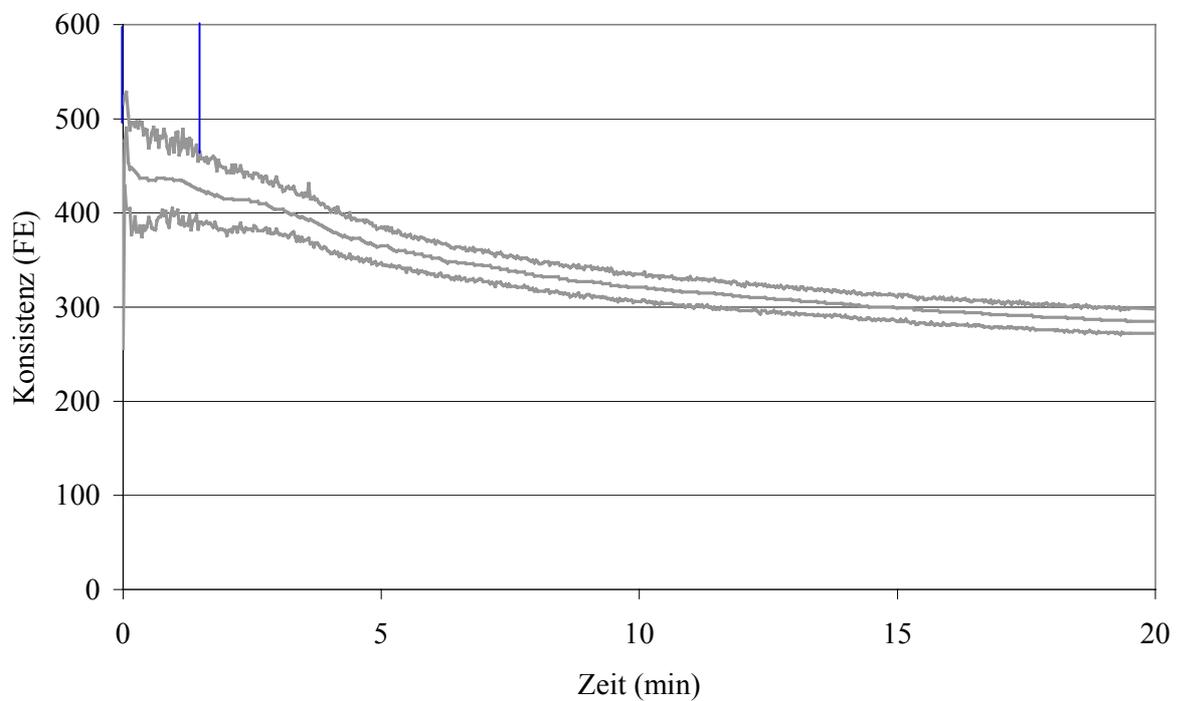


Abb. 56: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten bei der Nachknetung des Teiges der Sorte **Bussard** nach 20 min Vorknetung und 45 min Ruhepause.

Die Anfangskonsistenz des Teiges 20/40 lag etwas unterhalb von 500 FE und der Teig hatte eine Stabilität von 1,9 min (Abb. 56). Nach einer kurzen Stabilitätsphase wies der Teig einen kontinuierlichen Konsistenzabfall bei einer sich gleichzeitig verjüngenden Kurve auf.

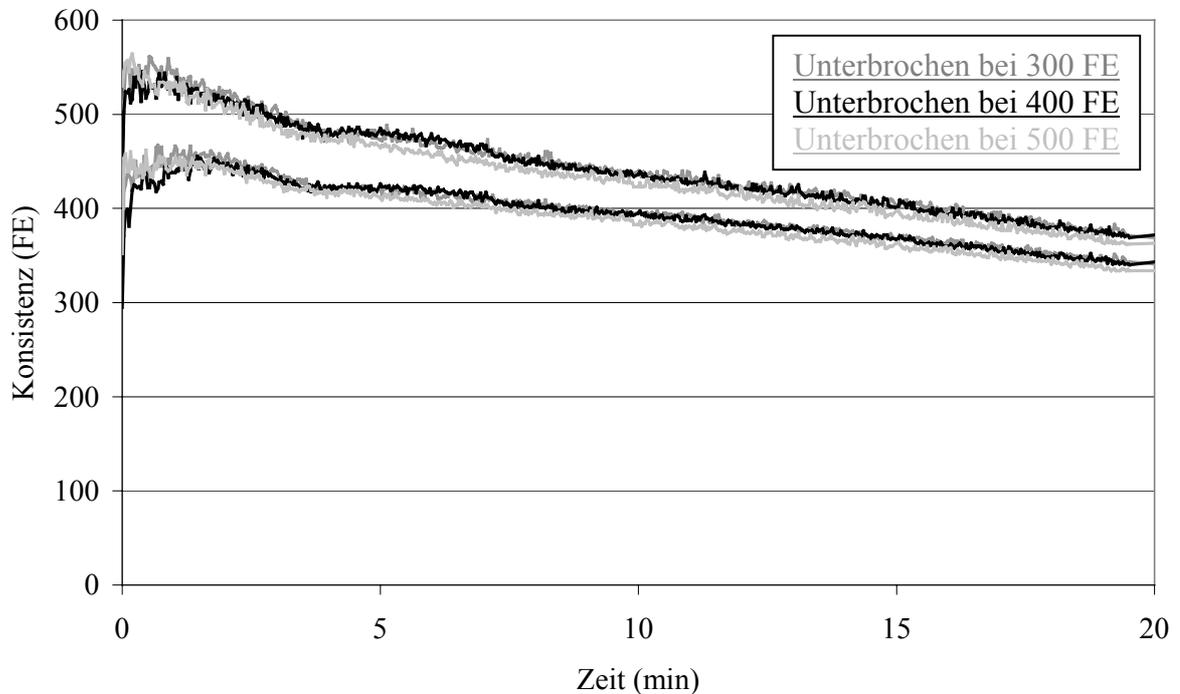


Abb. 57: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten bei den Nachknetungen der Teige der Sorte **Bussard** nach den Unterbrechungen der Vorknetungen bei 300, 400 und 500 FE und 45 min Ruhepause.

Die Ergebnisse der Knetversuche von Teig 300, Teig 400 und Teig 500 sind in der Abbildung 57 für die Sorte Bussard zusammengefasst. Bei der zweiten Knetung lag die Anfangskonsistenz aller Teige bei 500 FE, unabhängig von der Konsistenz beim Abbruch der ersten Knetung. Die Stabilität war im Vergleich zur normalen Knetung wesentlich kürzer, und die Erweichung ist größer geworden. Die Kurvenverläufe der Teige unterscheiden sich nur unwesentlich.

Der Teig ICC der Sorte Zentos wies einen vergleichbaren Kurvenverlauf zum Teig ICC der Sorte Bussard auf (Abb. 58). Die Wasseraufnahme betrug 58,0 % und die Teigentwicklungszeit lag bei 4,7 min. Der Teig hatte eine Stabilität von 9,4 min und eine Erweichung von 60 FE 12 min nach dem Maximum.

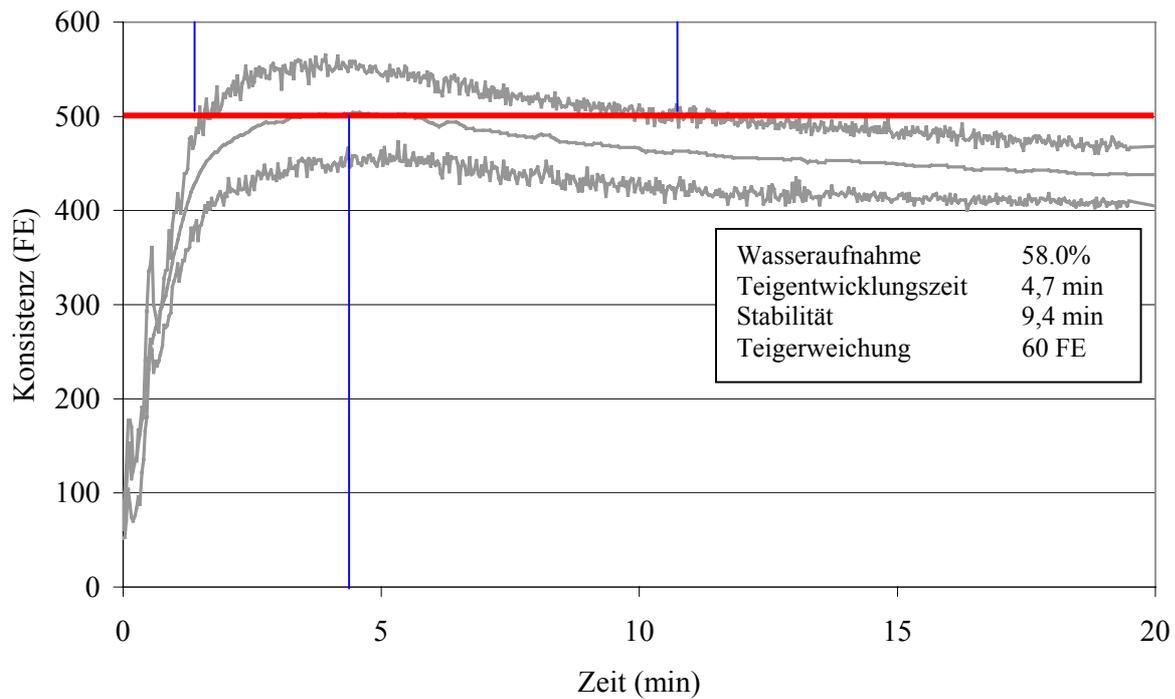


Abb. 58: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten der Sorte **Zentos** nach der ICC-Methode.

Die Abbildung 59 stellt die Kurve des HUM-Systems vor. Am Anfang der Knetung sank die Konsistenz, um nach einer Weiterknetung anzusteigen. Der Teig hatte weder eine Teigentwicklungs- noch eine Stabilitätsphase.

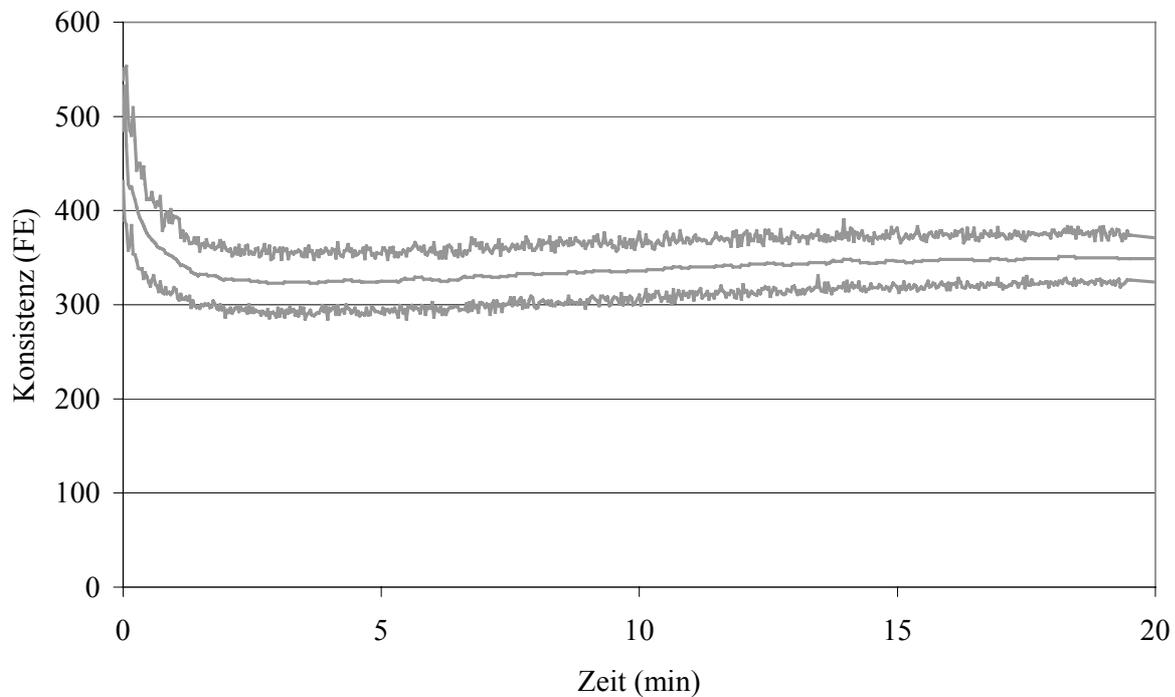


Abb. 59: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten des HUM-Systems der Sorte **Zentos**.

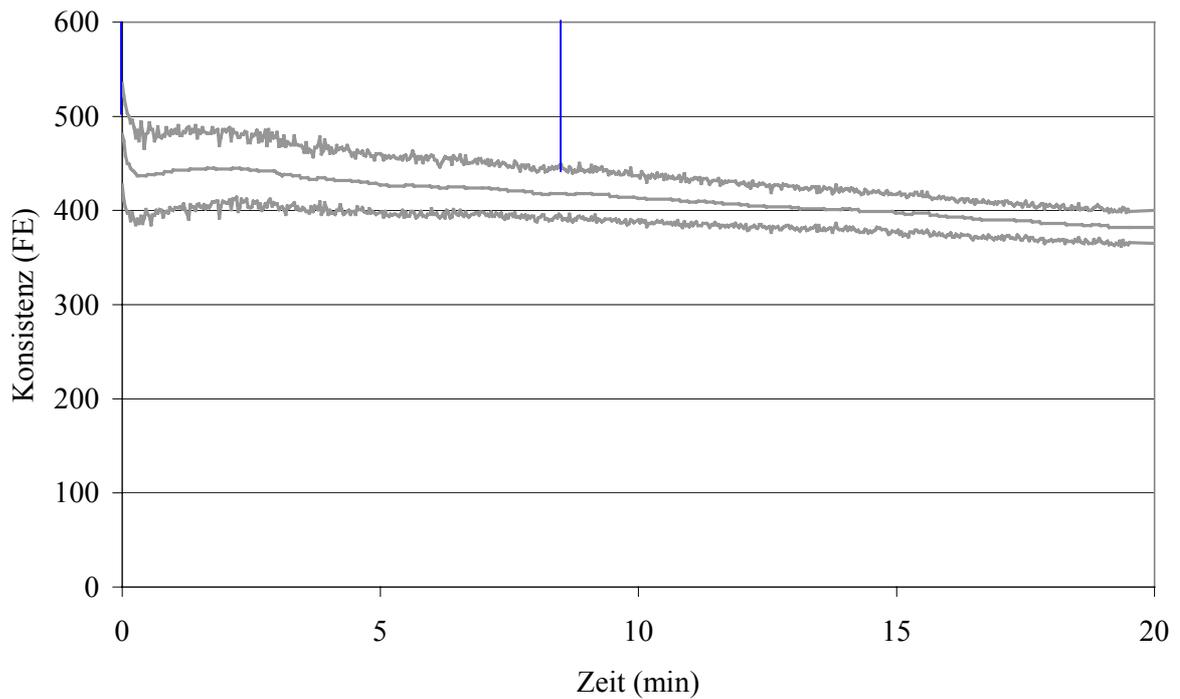


Abb. 60: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten bei der Nachknetung des Teiges der Sorte **Zentos** nach 20 min Vorknetung und 45 min Ruhepause.

Der Teig 20/45 wies eine Stabilität von 8,6 min und eine kleine Erweichung auf, wobei die Anfangskonsistenz bei 500 FE lag (Abb. 60).

Die Farinogrammkurven der Teige 400, 500 zeigten keine signifikanten Unterschiede, während der Teig 300 am Anfang der Nachknetung einen kurzen Konsistenzanstieg zeigte (Abb. 61).

Das Mehl aus der Sorte Batis hat nach der ICC Methode 60,7 % Wasser aufgenommen und dabei eine Teigentwicklung von 1,8 min, eine Stabilität von 4,3 min und eine Erweichung von 96 FE aufgewiesen (Abb. 62).

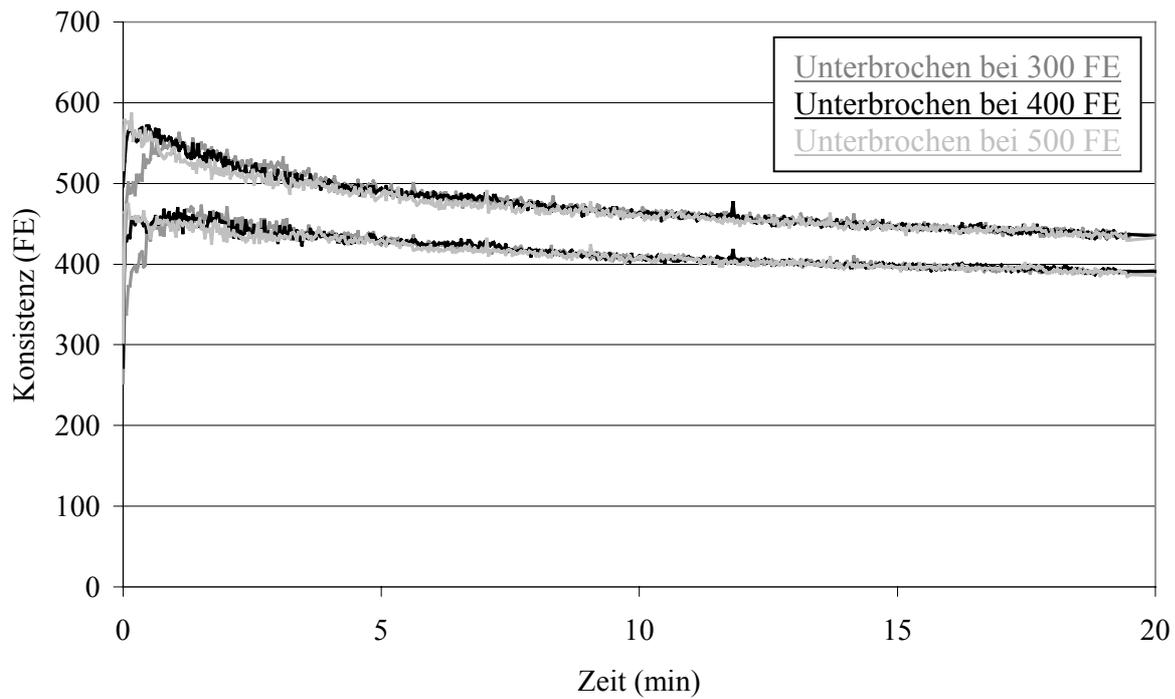


Abbildung 61: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten bei den Nachknetungen der Teige der Sorte **Zentos** nach den Unterbrechungen der Vorknetungen bei 300, 400 und 500 FE und 45 min Ruhepause.

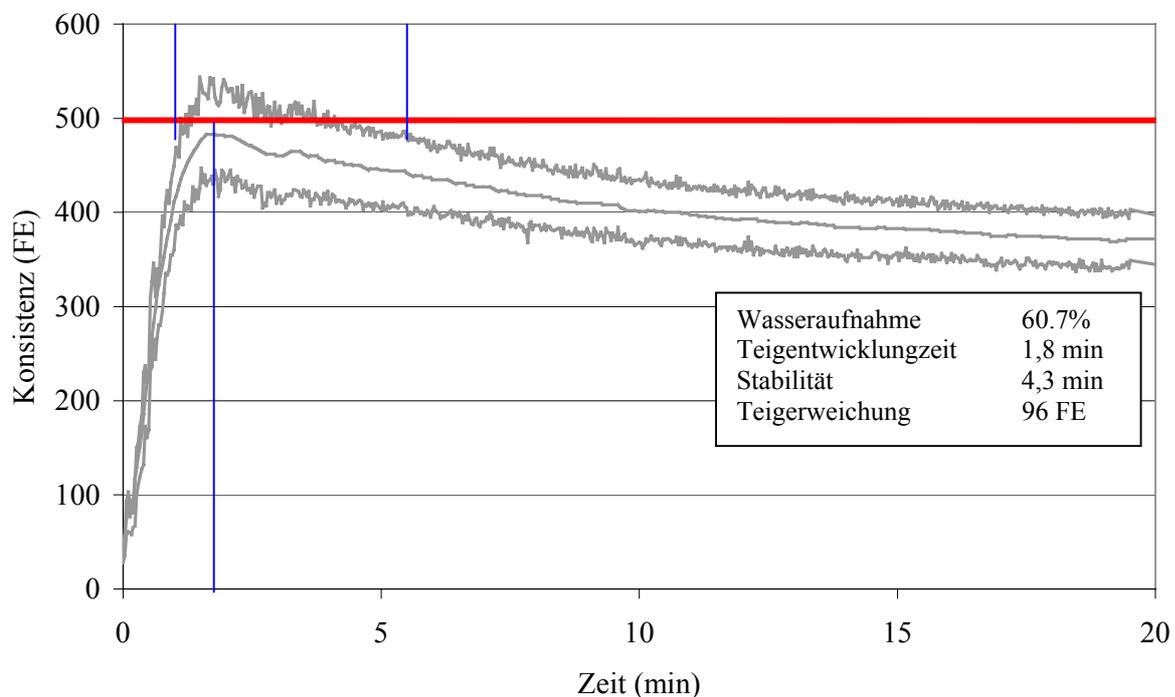


Abb. 62: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten der Sorte **Batis** nach der ICC-Methode.

Das HUM-System aus dem Mehl der Weizensorte Batis zeigte ein anderes Verhalten als die HUM-Systeme der beiden bereits beschriebenen Sorten. Dieses System wies keine Teig-

wicklung und keine Stabilität bei 500 FE auf. Die Konsistenz hatte während der ganzen Messung abfallende Tendenz, wobei der größte Konsistenzabfall am Anfang der Knetung stattfand (Abb. 63).

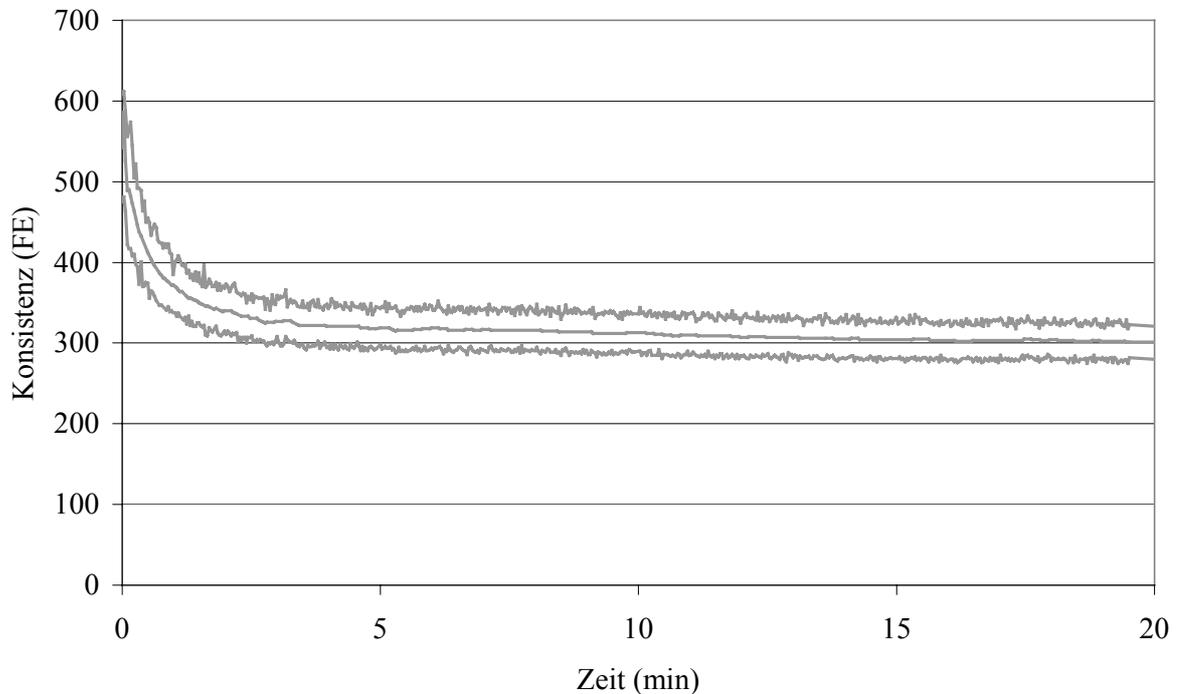


Abb. 63: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten des HUM-Systems der Sorte **Batis**.

Der Kurvenverlauf des Teiges 20/45 in Abb. 64 zeigte im ganzen Bereich einen leichten Abfall in der Konsistenz. Die Anfangskonsistenz lag bei 500 FE. Der Teig wies eine Stabilität von 1,6 min auf.

Bei den Teigen 300, 400 und 500 sind fast identische Kurven registriert worden (Abb. 65). Kleine Unterschiede gab es lediglich zu Beginn der Knetung.

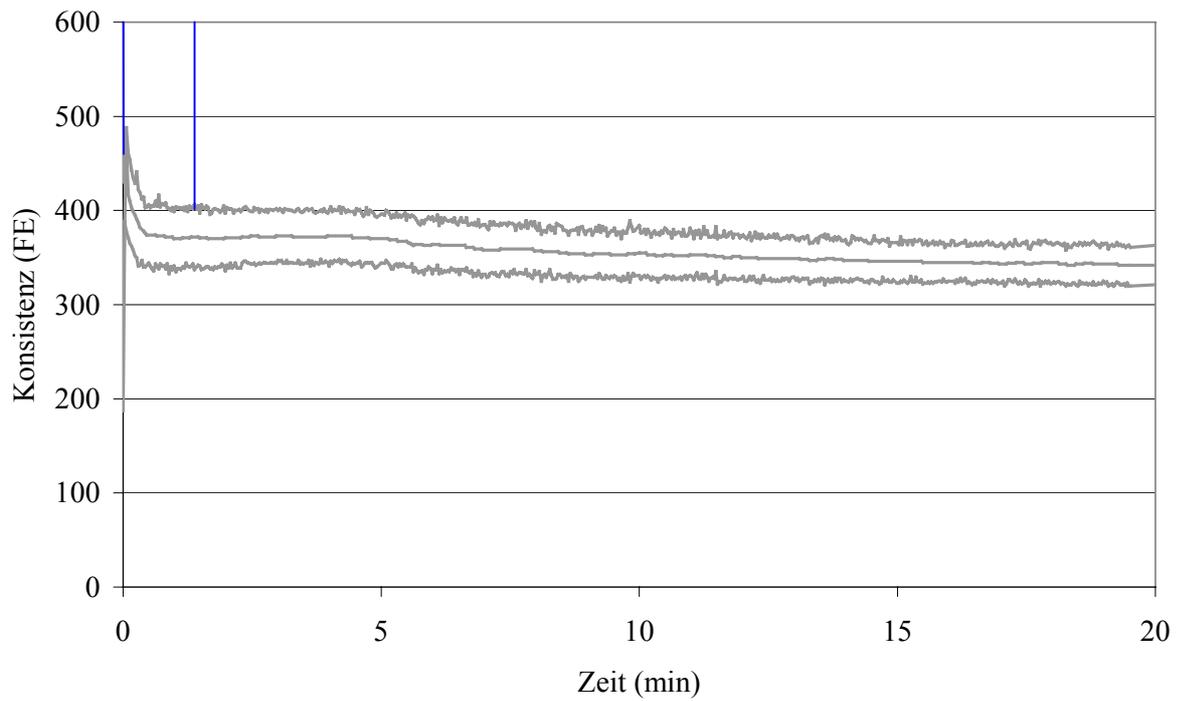


Abb. 64: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten bei der Nachknetung des Teiges der Sorte **Batis** nach 20 min Vorknetung und 45 min Ruhepause.

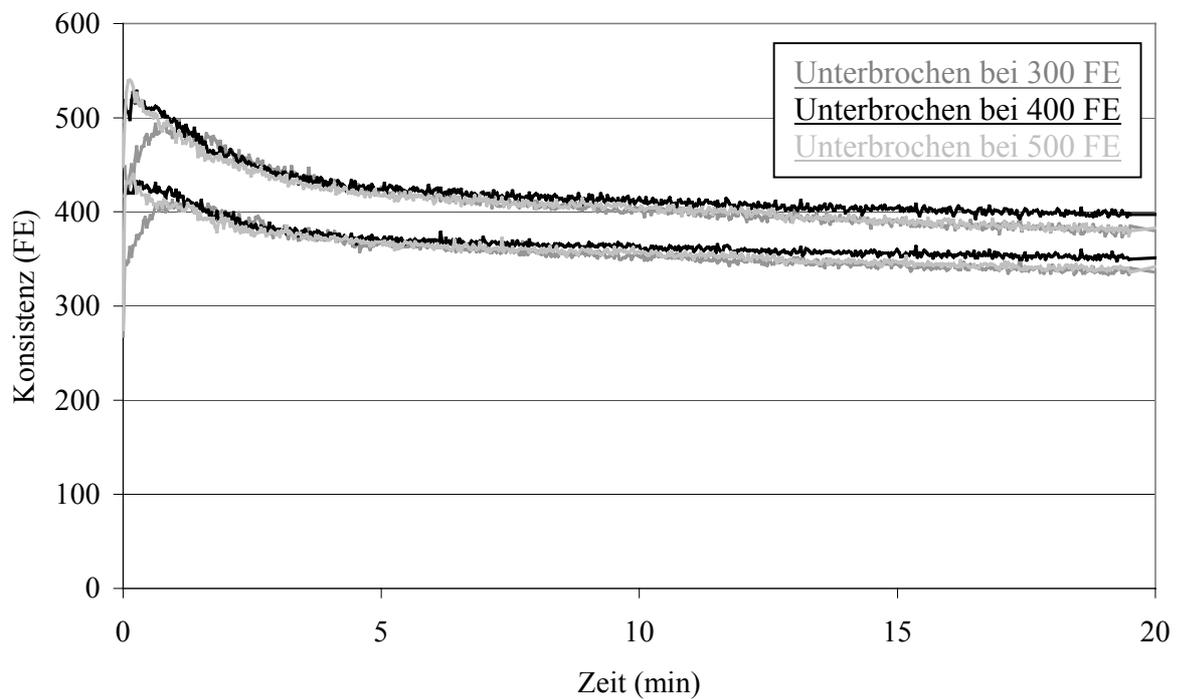


Abb. 65: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten bei den Nachknetungen der Teige der Sorte **Batis** nach den Unterbrechungen der Vorknetungen bei 300, 400 und 500 FE und 45 min Ruhepause.

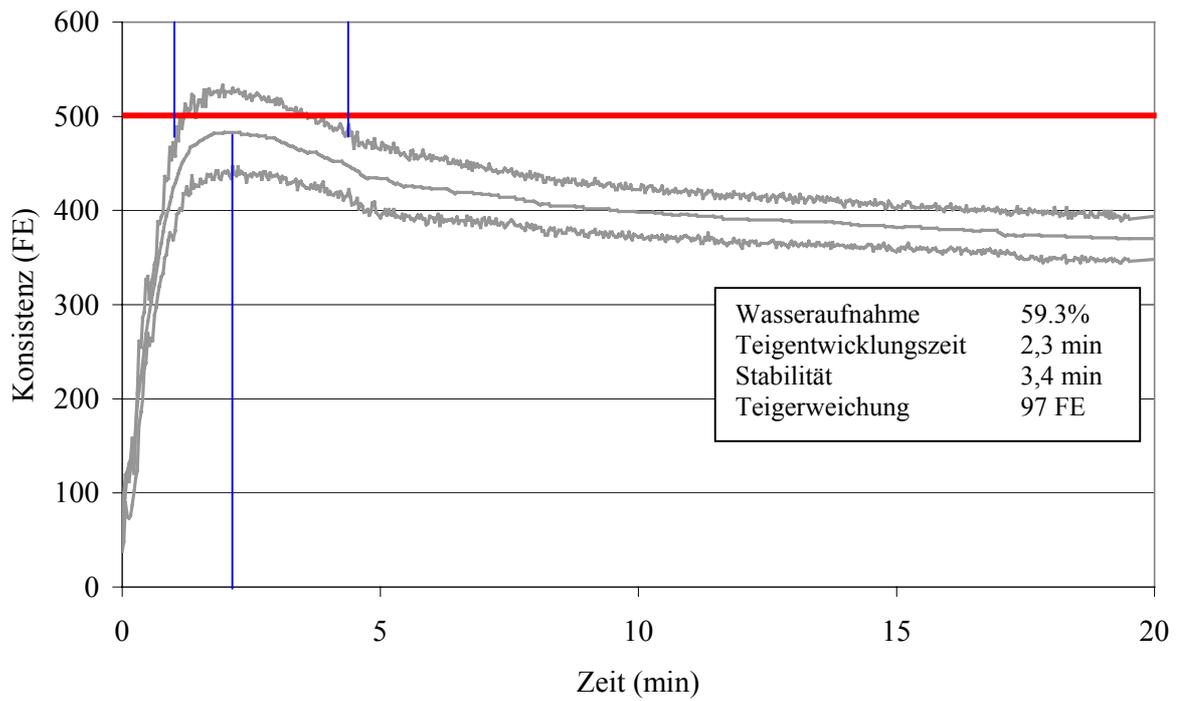


Abb. 66: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten der Sorte **Ritmo** nach der ICC-Methode.

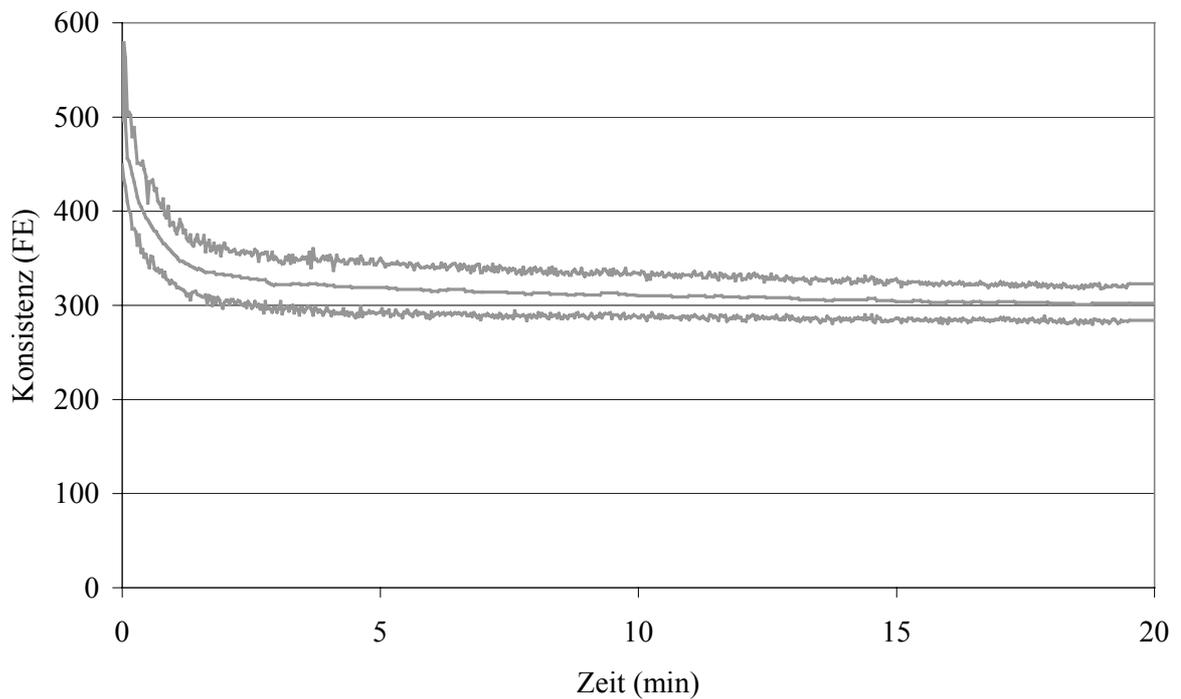


Abb. 67: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten des HUM-Systems der Sorte **Ritmo**.

Die Mehle aus der Sorte Ritmo verhielten sich im Knetverlauf ähnlich wie die Mehle der Sorte Batis. Der Teig ICC konnte 59,3 % Wasser aufnehmen, und der Teig entwickelte sich innerhalb von 2,3 min. Die Stabilität betrug 3,4 min und die Erweichung lag bei 97 FE (Abb. 66).

Beim HUM-System wurde nach einem anfänglich stärkeren Konsistenzabfall eine gleichbleibende geringe Konsistenzverminderung, ebenfalls ohne Stabilität und Teigentwicklung, registriert (Abb. 67).

Der Teig 20/45 zeigte eine Stabilität von 2,5 min, danach ergab sich eine konstant abfallende Konsistenz (Abb. 68).

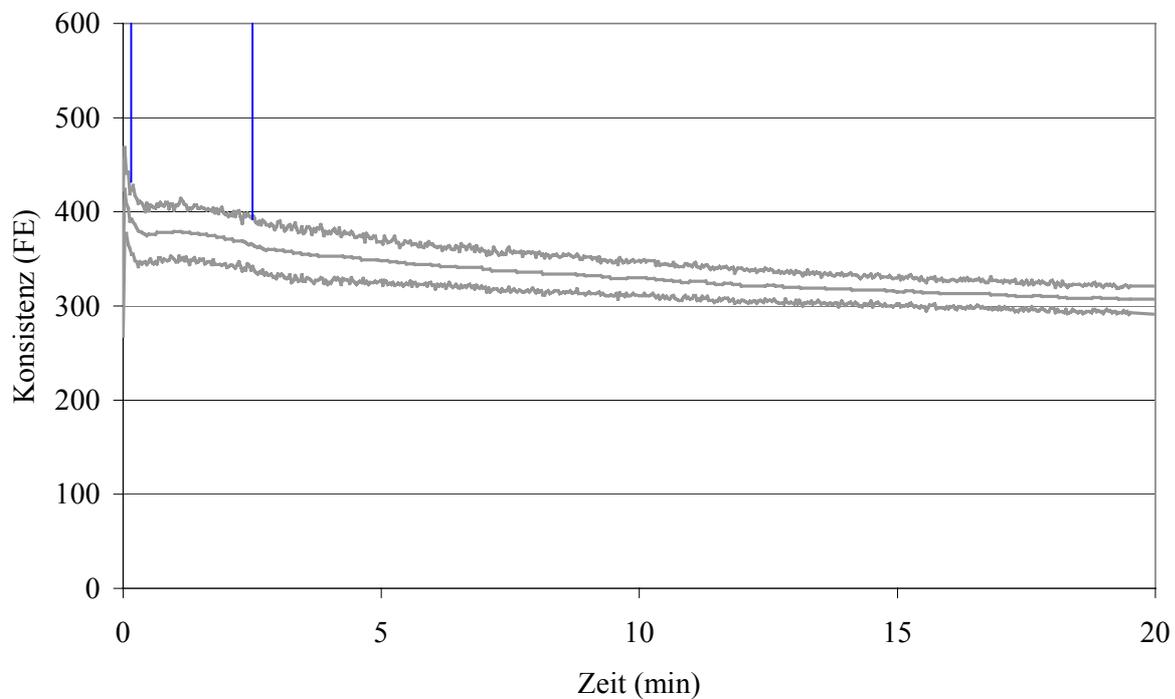


Abb. 68: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten bei der Nachknetung des Teiges der Sorte **Ritmo** nach 20 min Vorknetung und 45 min Ruhepause.

Ab der zweiten Minute der Knetung verlaufen die Kurven der Teige 300, 400 und 500 gleichförmig (Abb. 69). In der Anfangsphase haben sich die Teige 400 und 500 fast identisch verhalten. Der Teig 300 zeigte Abweichungen in der Konsistenz im Vergleich zu den anderen beiden Teigen.

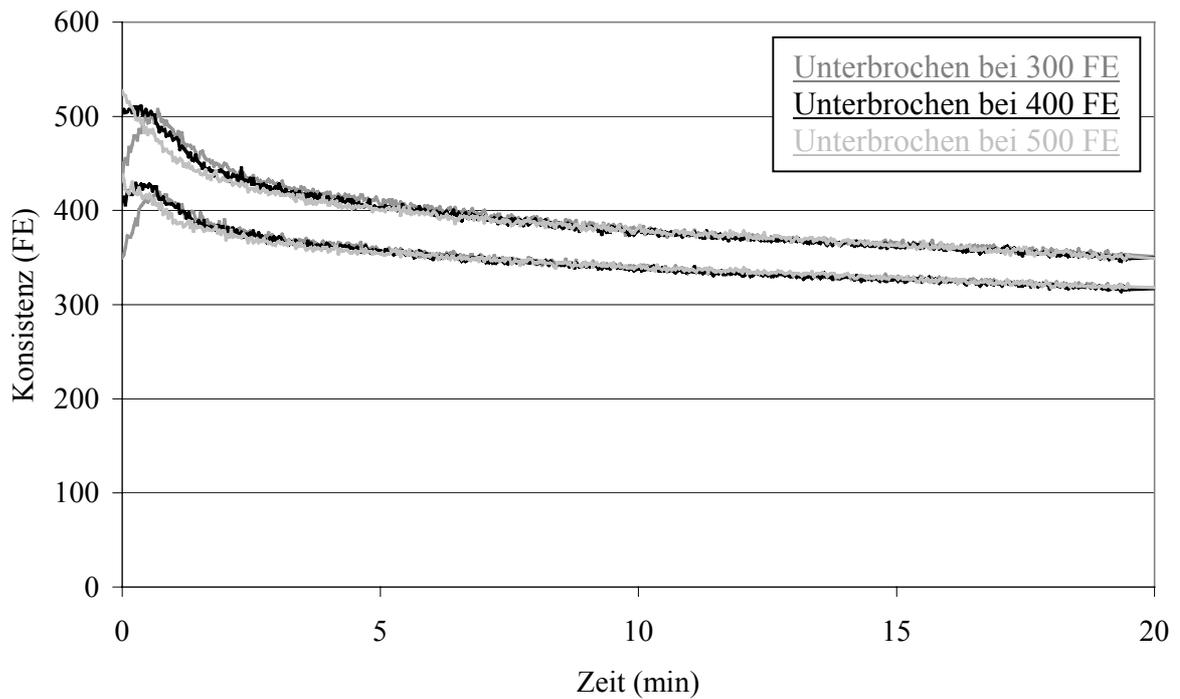


Abb. 69: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten bei den Nachknetungen der Teige der Sorte **Ritmo** nach den Unterbrechungen der Vorknetungen bei 300, 400 und 500 FE und 45 min Ruhepause.

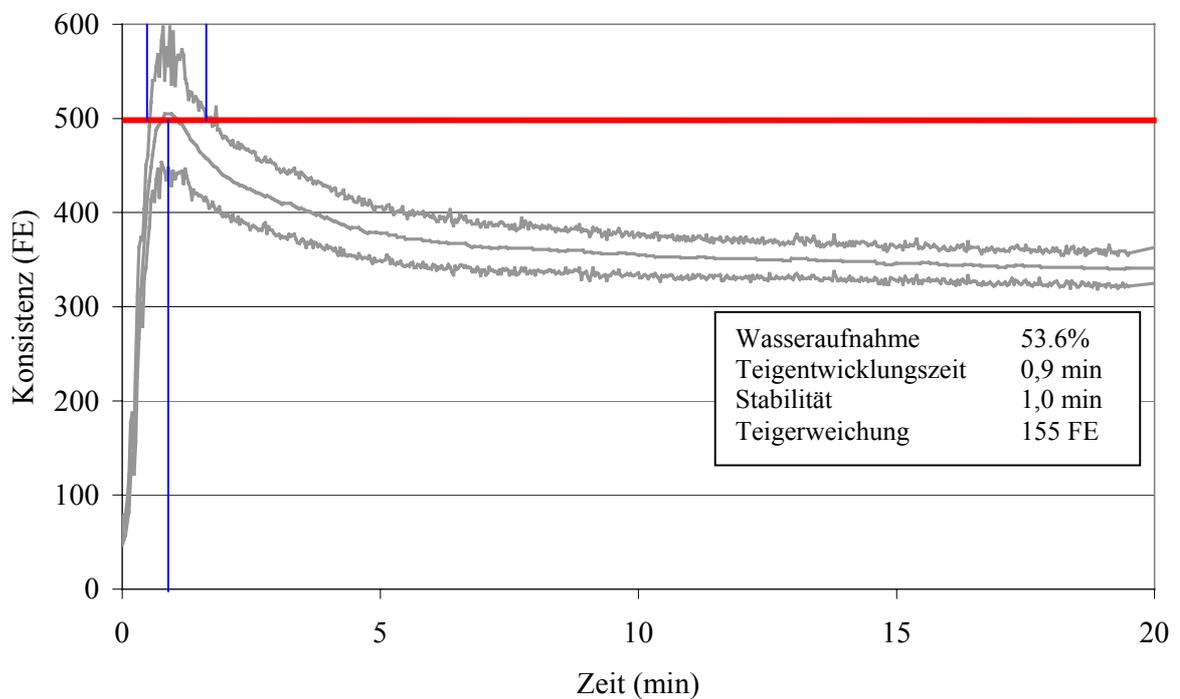


Abb. 70: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten der Sorte **Contra** nach der ICC-Methode.

Die Ergebnisse der Knetversuche mit dem Mehl der Sorte Contra werden in den Abbildungen 70 bis 73 vorgestellt. Eine Wasseraufnahme von 53,6 % wurde bei einer Teigentwicklungszeit

von nur 0,9 min ermittelt (Abb. 70). Der Teig war eine Minute stabil und erweichte dann um 155 FE innerhalb der zwanzigminütigen Knetzeit.

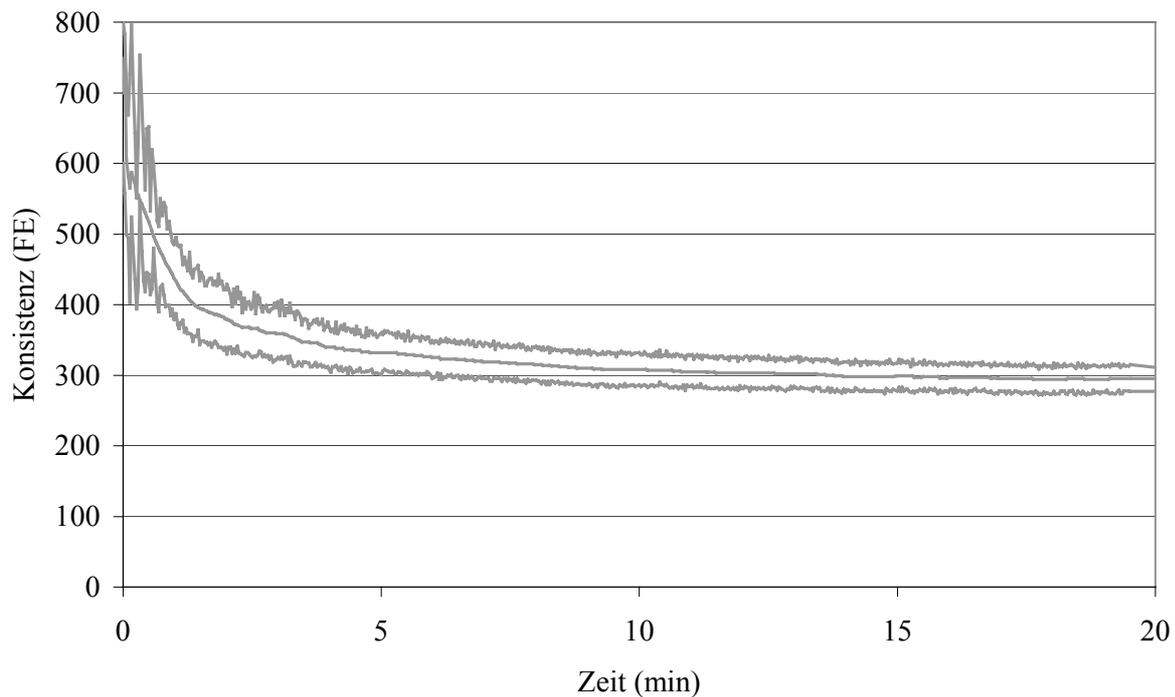


Abb. 71: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten des HUM-Systems der Sorte **Contra**.

Das HUM-System hatte eine sehr hohe Anfangskonsistenz, die mit zunehmender Knetzeit abfiel (Abb. 71).

Während des Knetens des Teiges 20/45 wurde eine sehr schmale Kurvenbreite mit der Anfangskonsistenz von 400 FE aufgezeichnet (Abb. 72).

Die Kurvenverläufe der Teige 300, 400 und 500 waren fast identisch, wobei der Teig 300 in der ersten Minute (Abb. 73) eine niedrigere Konsistenz hatte.

Weitere Ergebnisse und Darstellungen von Knetversuchen werden im Anhang präsentiert (Abb. 116-130).

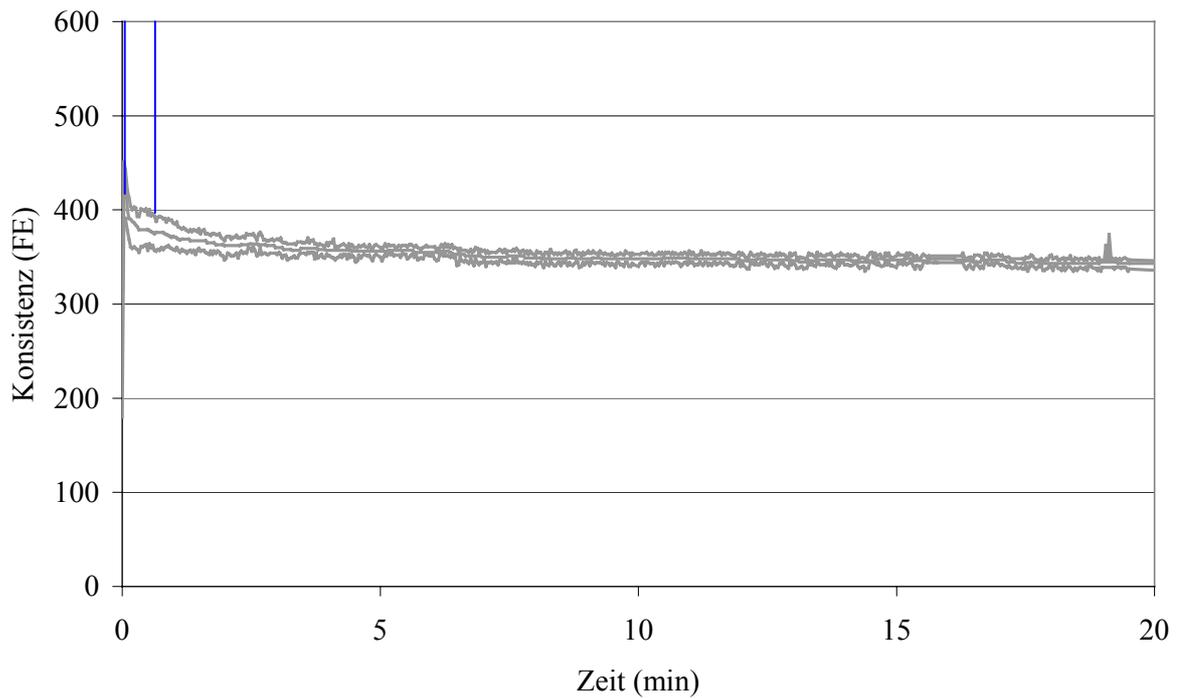


Abb. 72: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten bei der Nachknetung des Teiges der Sorte **Contra** nach 20 min Vorknetung und 45 min Ruhepause.

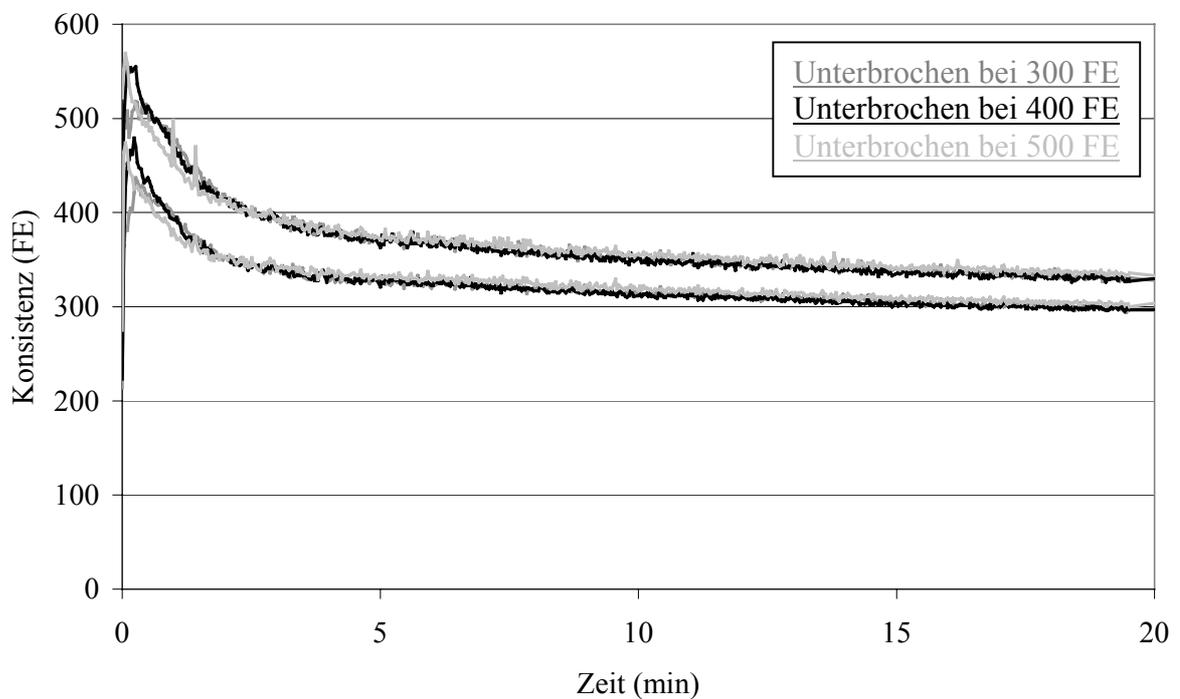


Abb. 73: Ergebnisse der Knetversuche: Knetverhalten bei den Nachknetungen der Teige der Sorte **Contra** nach den Unterbrechungen der Vorknetungen bei 300, 400 und 500 FE und 45 min Ruhepause.

3. System- und Proteinmorphologie

In den Abbildungen 74-87 werden rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von gefriergetrockneten HUM-Systemen und Teigen sowie Proteingerüste, die durch Auswaschen von HUM-Systemen und Teigen und anschließendes Gefriertrocknen hergestellt wurden, bei verschiedenen Vergrößerungen dargestellt. Damit wurden morphologische Strukturen sichtbar gemacht, welche nach dem Entzug des Wassers zurückblieben.

In den Abbildungen 74 und 75 sind HUM-System und Teig in 444 -facher Vergrößerung aufgenommen worden. Beide Systeme zeigten kontinuierliche Strukturen, welche sich in der Art des Aufbaus unterschieden.

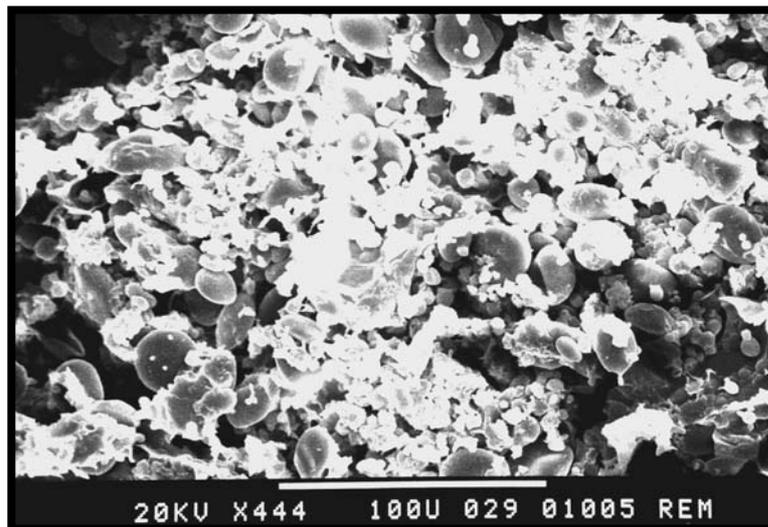


Abb. 74: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten HUM-Systems bei einer Vergrößerung von 444 X.

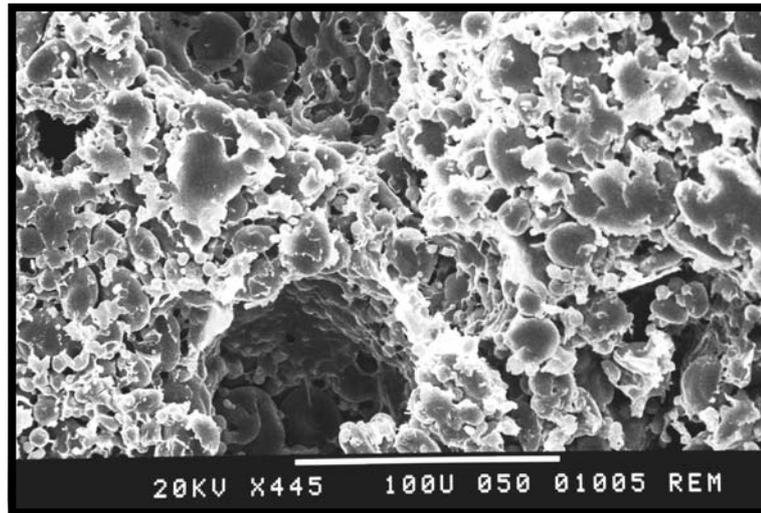


Abb. 75: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten Teiges bei einer Vergrößerung von 445 X.

Bei stärkerer Vergrößerung wird deutlich, dass Proteinfilme beim HUM-System nur wenig ausgebildet wurden (Abb. 76). Es ergaben sich überwiegend Proteinaggregate. Proteinstränge wurden kaum beobachtet.

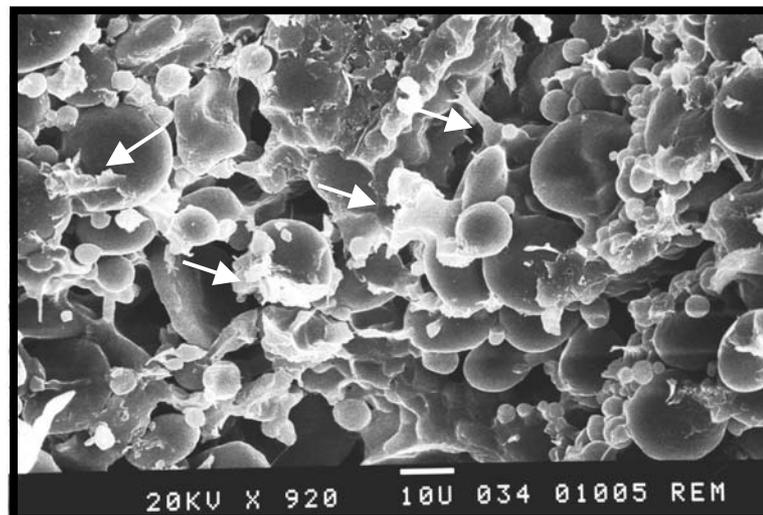


Abb. 76: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten HUM-Systems bei einer Vergrößerung von 920 X.

Die Proteinfilme im Teig waren vollständig ausgebildet und betteten Stärkekörner ein (Abb. 77).

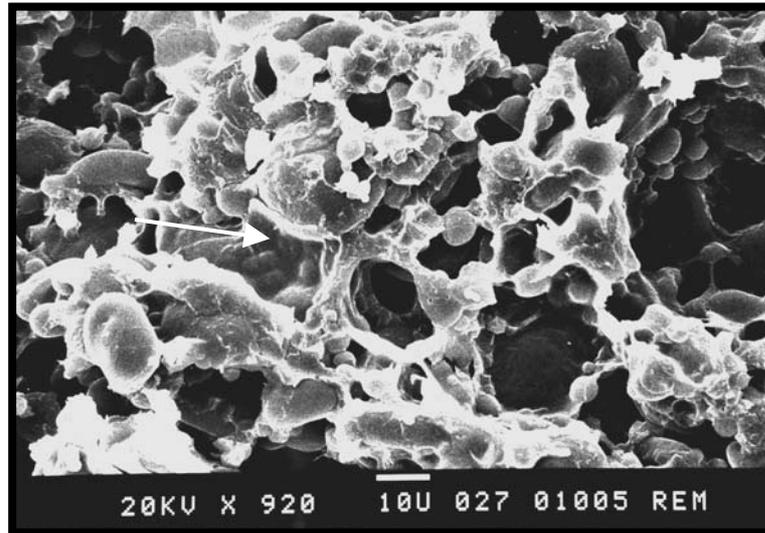


Abb. 77: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten Teiges bei einer Vergrößerung von 920 X.

Bei stärkerer Vergrößerung konnte beobachtet werden, dass bei dem HUM-System nur eine Teilfläche der Stärkekörner mit Proteinen bedeckt war (Abb. 78). Die Aggregate hatten eine unregelmäßige, partikuläre Form und bildeten keinen Oberflächenfilm auf Stärkekörnern aus. Einige Stärkekörner waren jedoch durch dünne Proteinfilme brückenartig miteinander verbunden.

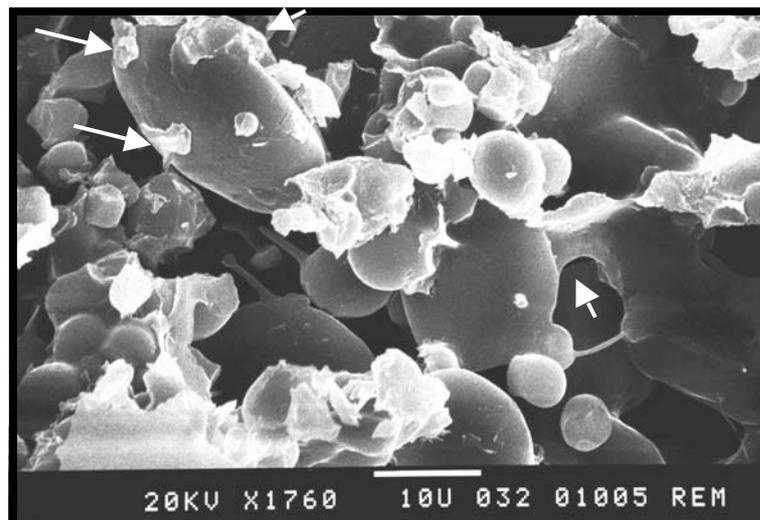


Abb. 78: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten HUM-Systems bei einer Vergrößerung von 1760 X.

Die Stärkekörner des Teiges waren auf der Oberfläche überwiegend mit einem Proteinfilm bedeckt (Abb. 79). Der Proteinfilm umschloss häufig mehrere Stärkekörner. Partikulär ausgebildete Proteinaggregate wurden auf der Stärkekornoberfläche im Teig kaum beobachtet.

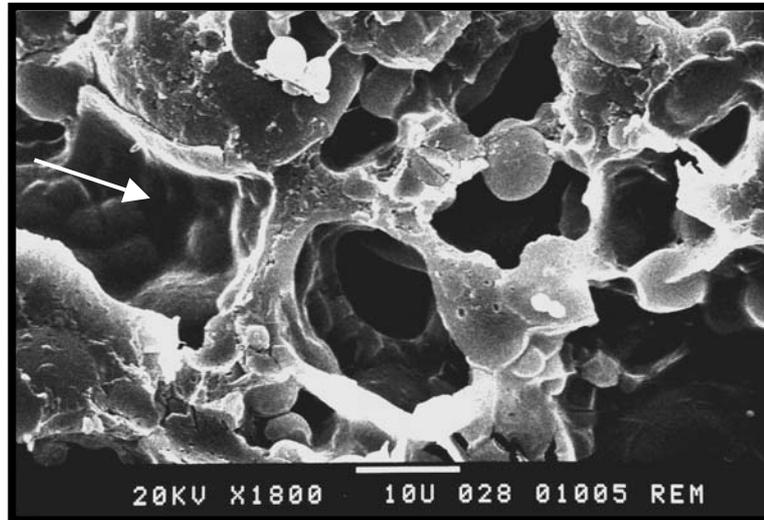


Abb. 79: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten Teiges bei einer Vergrößerung von 1800 X.

Die Abbildungen 80 bis 87 zeigen die elektronenmikroskopischen Aufnahmen der aus HUM-Systemen und Teigen isolierten Proteingerüste nach der Gefriertrocknung.

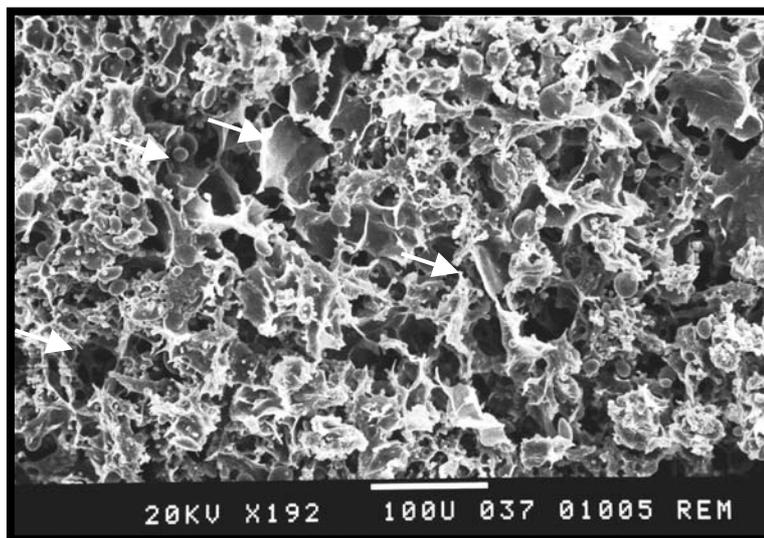


Abb. 80: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten Proteingerüsts aus dem HUM-System bei einer Vergrößerung von 192 X.

Das Glutengerüst aus dem HUM-System zeigte eine Netzstruktur, welche unregelmäßig und locker aufgebaut war (Abb. 80, 82). Neben aggregierten, partikulären Strukturen waren viele kleine und dünne Proteinfilme vorhanden, welche nicht netzwerkartig miteinander verbunden waren. In der Gesamtstruktur waren aufgrund der Präparationstechnik noch viele kleine Stärkekörner vorhanden. Der Vergleich der Struktur des gefriergetrockneten HUM-Systems mit der des ausgewaschenen und gefriergetrockneten Glutens zeigt, dass durch den Präparationsschritt des Auswaschens eine gewisse Verdichtung des in HUM-System partikulär aggregierten Glutens zu einer Netzwerkstruktur erfolgt war. Außerdem wurde durch die Präparationstechnik die in situ Struktur des Proteins im HUM-System sichtbar. Das ergibt sich aus den Distanzen zwischen den Proteinaggregaten und Filmen (vgl. dazu in den Abbildungen angegebenen Maßstab).

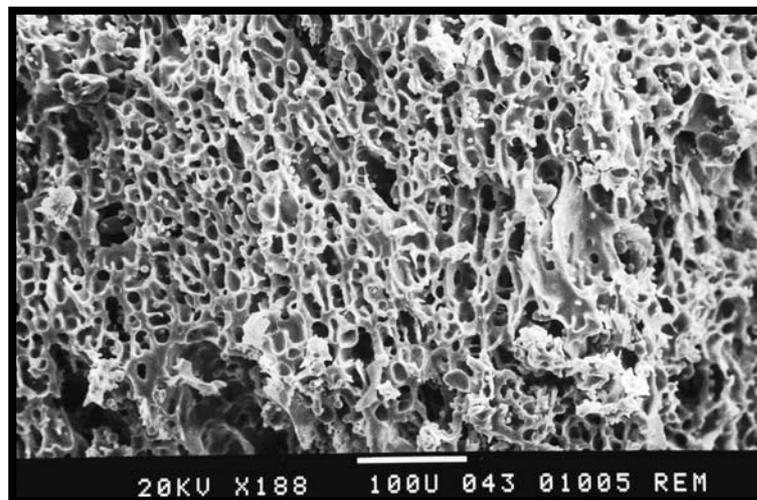


Abb. 81: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten Proteingerüstes aus dem Teig bei einer Vergrößerung von 188 X.

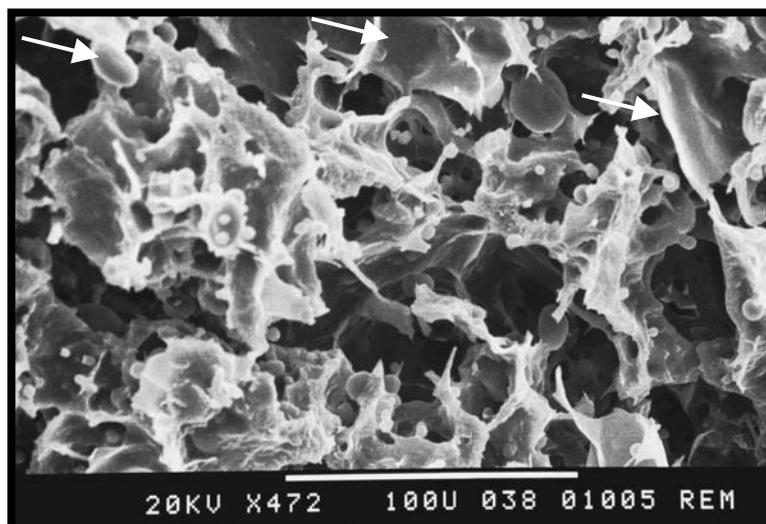


Abb. 82: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten Proteingerüstes aus dem HUM-System bei einer Vergrößerung von 472 X.

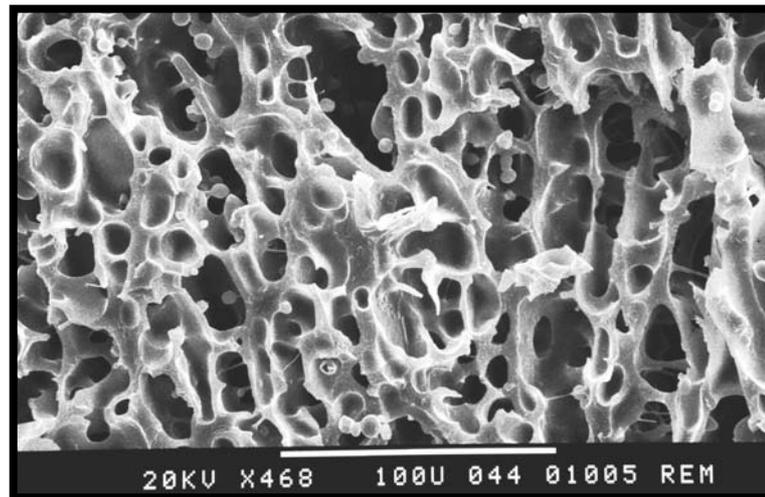


Abb. 83: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten Proteingerüstes aus dem Teig bei einer Vergrößerung von 468 X.

In den Abbildungen 81 und 83 ist das Glutennetz aus dem ausgewaschenen und gefriergetrockneten Teig dargestellt. Das Netz zeichnete sich durch eine homogene, zusammenhängende und gerichtete Struktur aus, die im Gegensatz zum HUM-Proteinnetzwerk keinen Rückschluss auf die Anordnung des Proteins im ursprünglichen Teig zulässt. Auch diese Aussage ist durch die Distanz zwischen den Porenwänden, die wesentlich kleiner ist als der Durchmesser großer Stärkekörner, belegt.

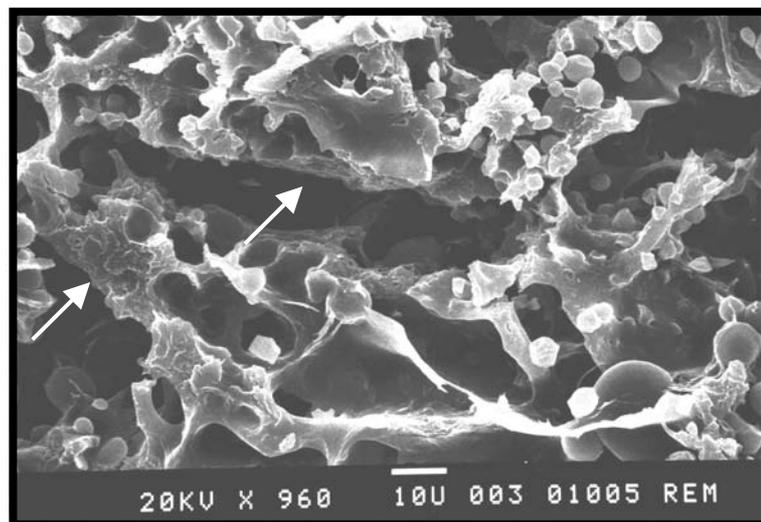


Abb. 84: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten Proteingerüstes aus dem HUM-System bei einer Vergrößerung von 960 X.

Durch eine weitere Vergrößerung wurde sichtbar, dass das Glutennetz aus dem HUM-System eine ungleichmäßig strukturierte (raue) Oberfläche besaß (Abb. 84 und 86).

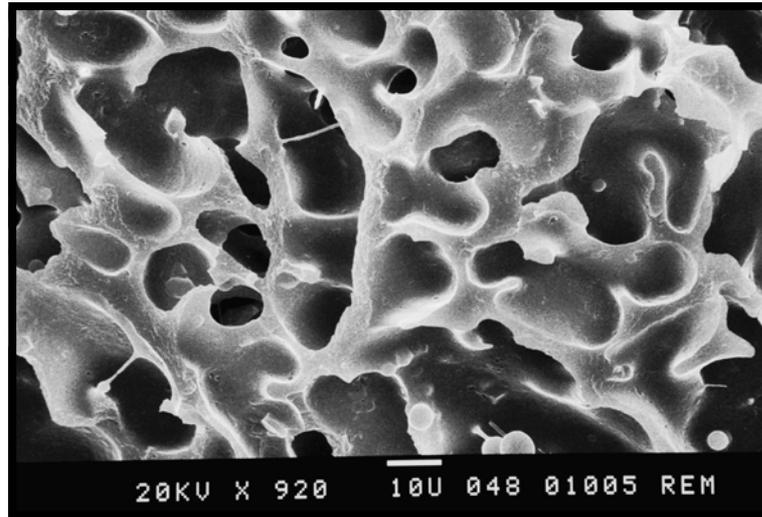


Abb. 85: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten Proteingerüstes aus dem Teig bei einer Vergrößerung von 920 X.

Im Gegensatz zum HUM-System hatte das Glutennetz aus dem Teig eine gleichmäßig strukturierte (glatte) Oberfläche, wobei die Oberfläche einige unregelmäßige Teilbereiche aufwies (Abb. 85 und 87).

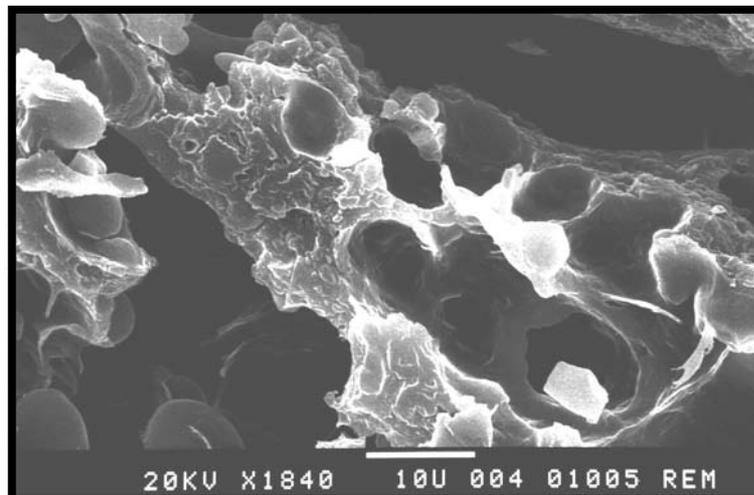


Abb. 86: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten Proteingerüstes aus dem HUM-System bei einer Vergrößerung von 1840 X.

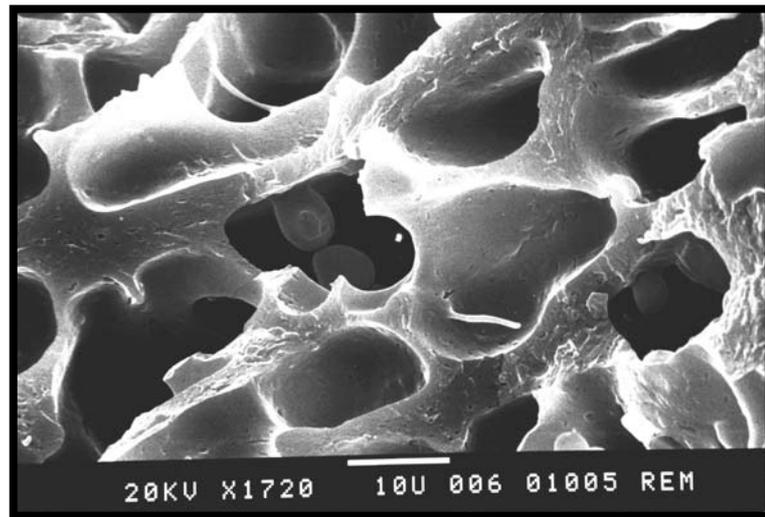


Abb. 87: Elektronenmikroskopische Aufnahme des gefriergetrockneten Proteingerüstes aus dem Teig bei einer Vergrößerung von 1720 X.

VII Diskussion

Bei konstantem Druck besteht die Energie bzw. Enthalpie (H) eines Systems aus freier und gebundener Energie. Die freie Energie (G) wird als Gibbsche Energie bezeichnet und stellt die Energie dar, welche in Arbeit umgewandelt werden kann. Die gebundene Energie ist im System als Wärmeenergie für Molekülbewegungen gebunden. Sie ist der Entropie (S) und Temperatur (T) proportional. Die Entropie (S) ist das Maß für die Unordnung eines Systems. Daraus ergibt sich, dass die Änderung der Enthalpie gleich der Summe der Änderungen von freier und gebundener Energie ist:

$$\Delta H = \Delta G + T \Delta S \quad (\text{Gl. 4})$$

Jedes System versucht spontan den Zustand der größten Unordnung, welche der Energie dieses Systems entspricht, und den Zustand der kleinsten freien Energie zu erreichen. Dabei enthält die Entropie ihr Maximum und die Gibbsche Energie ihr Minimum. Die Entropieänderung und die Änderung der freien Energie ergeben gleich Null. Das heißt: das System ist im Gleichgewicht, und somit im energetisch günstigsten Zustand:

$$\Delta G = 0 \quad (\text{Gl. 5})$$

$$\Delta S = 0 \quad (\text{Gl. 6})$$

Die Entstehung eines neuen Systems ist ein Vorgang, welcher mit der Veränderung der freien Energie und Entropie verbunden ist.

Wird das Mehl-System mit Wasser gemischt und geknetet, bildet sich durch komplexe biochemisch-energetische Vorgänge ein neues System, ein Teig, aus.



Läuft Wasser durch ein Mehl-System hindurch, wird das Mehl befeuchtet und nachdem das überschüssige Wasser abgegeben wird, ein HUM-System ausgebildet.



Die beiden Vorgänge unterscheiden sich bei der Systemerzeugung in der Energiezufuhr und beeinflussen damit die Veränderungen der freien Energie und Entropie. Der Unterschied zwischen beiden Vorgängen hat sich mit den Temperaturmessungen bei der Entstehung der Mehl-Wasser-Systeme bestätigt. Aus diesem Ergebnis kann man feststellen, dass:

$$\Delta G_1 \neq \Delta G_2 \quad \text{und} \quad \Delta S_1 \neq \Delta S_2 \quad (\text{Gl. 9})$$

An der Ausbildung eines Teiges nehmen chemisch unterschiedliche Komponenten teil. Die Glutenproteine stellen eine wichtige Komponente dar. Außer Proteinen befinden sich in einem Teig- bzw. Mehl-System die anderen wichtigen Komponenten wie Stärke, Lipide, Pentosane, welche alle unterschiedliche Wechselwirkungen mit Proteinen haben (35, 36, 37). Durch äußere Beanspruchung ändern sich die Struktur der Proteine und infolge dessen die Wechselwirkungen mit den anderen Mehlinhaltstoffen. Die veränderten Wechselwirkungen beeinflussen die weitere Raumstrukturänderung des Systems mit dem Ziel, den energetisch günstigsten Zustand des ganzen Systems zu erhalten.

1. Mehleigenschaften

Die in der Untersuchung eingesetzten sortenreinen Weizenmehle wurden aus verschiedenen Qualitätsniveaus (Tab. 1) ausgewählt. Sie zeigten in Proteinqualität und Proteinquantität (Proteingehalte, Feuchtglutengehalte, Sedimentationswerte) Unterschiede. Mit der Ermittlung des Gluten-Indexes konnten keine extremen Gluteneigenschaften nachgewiesen werden. Obwohl die im Amylographen thermisch induzierte Stärkeverkleisterung nicht direkt die Teigentwicklung und deren Eigenschaften beeinflusst, wird dieser Parameter oft bei der Beschreibung von Mehlqualitäten angewandt. Dieser Parameter liefert über die Verkleisterungseigenschaften Informationen zum Zustand der Stärke im Mehl. Dieser beeinflusst sowohl die Teigeigenschaften als auch die Teigentwicklung. So erhöhen z.B. beschädigte Stärkekörner die Wasseraufnahme und dadurch beeinflussen sie die Teigeigenschaften. Die registrierten Unterschiede im Amylogrammmaximum deuten so auf die unterschiedlichen Stärkeeigenschaften bei den verwendeten Weizenmehle hin.

Die festgestellten und hiermit beschriebenen Qualitätscharakteristika der Mehle waren für die verwendeten Sorten typisch. Die Bandbreite der Qualitätscharakteristika deckte die Qualität der in Deutschland angebauten Weizensorten ab.

Die ausgewählten Weizensorten unterschieden sich auch in der Proteinzusammensetzung der Mehle. Bei den E-Sorten (Bussard, Zentos) wurden höhere Gehalte an unlöslichen Gluteninen und niedrigere Gehalte an Gliadinen als bei den anderen Sorten nachgewiesen. Dementsprechend waren auch die Gliadin/Glutenin Verhältnisse sortenspezifisch. Geht man davon aus, dass die Fraktion Glutenin dem Gluten die Festigkeit und Elastizität, die Fraktion Gliadin hingegen lediglich die Viskosität verleihen, so erklärt diese Charakteristik die unterschiedliche Struktur des Glutens. Bei den anderen Proteingruppen (lösliche Glutenine und Albumine + Globuline) zeigten sich ebenfalls signifikante Sortenunterschiede, ein direkter Zusammenhang mit den Qualitätgruppen konnte jedoch nicht aufgezeigt werden.

2. Beschreibung der Systemstruktur

2.1. Fraktionierung der Proteine

Die Proteine wurden mit Hilfe einer modifizierten Osborne Methode fraktioniert. Weizenproteine werden dabei anhand ihrer Löslichkeit in unterschiedlichen Lösungsmitteln zerlegt. Thermodynamisch betrachtet, hängt die Löslichkeit der Proteine von der Dissoziation der Proteinmoleküle und damit von einer via Dispersion gewonnenen, maximalen Kontaktfläche zwischen Protein und Lösungsmittel ab (103). Um sich zu lösen, muss ein Protein deshalb in möglichst intensiven Kontakt mit dem Lösungsmittel gebracht werden (103). Dabei hängt das Löslichkeitsverhalten von der Anzahl polarer und apolarer Gruppen und von deren Anordnung im Molekül ab (104).

Unter der Raumstruktur eines Proteins versteht man die Orientierung des Moleküles im Raum. Im Gegensatz zu Primär- und Sekundärstruktur darf man die Raumstruktur nicht starr betrachten (105). Die Löslichkeit eines Proteins in einem System beruht unter anderem auf der räumlichen Orientierung des ganzen Moleküles und der damit gewonnenen Kontaktfläche mit dem Lösungsmittel. Anhand der Veränderung der Löslichkeit der Proteine in einem Lösungsmittel können indirekt wichtige Informationen über die Strukturveränderungen erhalten werden.

Beim Übergang vom Mehl in das HUM-System wird die Extrahierbarkeit der Proteine verändert. Dies deutet auf einen im Vergleich zum Mehl veränderten Zustand der Proteine im HUM-System hin. Bei diesem Systemübergang wird die Kontaktfläche mit den Lösungsmitteln und die Anzahl an polaren und apolaren Gruppen verändert, was sich in einer veränderten Extrahierbarkeit widerspiegelte (Abb. 15-19, Tab. 6). Bei der Sorte Bussard verblieb ein Teil

der NaCl-löslichen Proteine in der unlöslichen Fraktion. Daraus kann man schließen, dass sie in das Glutennetz eingeschlossen sind und somit mit diesem in eine NaCl-unlösliche Form übergehen. Ein kleiner Teil wird in Ethanol löslich. Skerritt et al. (46) vermuten, dass ein Teil der „S-rich Albumine“ während des Knetens mit den Gluteninen reagieren kann. Da bei dem HUM-System keine Knetung angewandt wird, deutet dieses Ergebnis darauf hin, dass die Albumine mit den Glutenproteinen auch ohne Knetung reagieren können.

Im Vergleich zu der Sorte Bussard unterliegen die Proteine der Sorte Zentos nur wenigen Strukturveränderungen (Abb. 15-19, Tab. 6).

Der Anteil an unlöslichen Gluteninen in den Sorten Batis und Ritmo ist bei den HUM-Systemen gesunken und die Anteile an NaCl-löslichen Proteinen sind deutlich angestiegen (Abb. 15-19, Tab. 6). Dies deutet darauf hin, dass sich durch die Entwicklung der HUM-Systeme die Kontaktfläche der unlöslichen Glutenine zu der NaCl-Lösung vergrößert hat. Bei beiden Weizensorten geht ein Teil der unlöslichen Glutenine auch in die in Ethanol lösliche Form über, wobei bei der Sorte Batis dieser Anteil viel stärker ausgeprägt war.

Aus der Verschiebung der Fraktionen bei der Sorte Contra wird deutlich, dass der Anteil an unlöslichen Gluteninen im HUM-System erhöht war. Aus diesem Ergebnis geht hervor, dass die unlöslichen Glutenine mit anderen Proteingruppen geschlossene Aggregate bilden, welche zur Verminderung der Kontaktfläche zwischen Proteinen und Lösungsmitteln und zur Veränderung der Anzahl an polaren und apolaren Gruppen führen. (Abb. 15-19, Tab. 6).

Die Extrahierbarkeit der Proteine änderte sich deutlich durch die Herstellung des Teiges (Abb. 15-19, Tab. 5). Alle gekneteten Teige haben eine erhöhte Löslichkeit in Essigsäure aufgewiesen. Dies wurde in der Literatur als Folge der Depolymerisation erklärt (4, 25, 46). Auch die Wechselwirkungen zwischen Glutenin und Gliadin scheinen die Löslichkeit von Gluteninen in Essigsäure zu beeinflussen (53). Die Verstärkung der Löslichkeit in Essigsäure war sortenspezifisch unterschiedlich. Die Sorten Bussard und Zentos hatten die höchsten Gehalte an unlöslichen Gluteninen und zeigten die größte Verstärkung der Löslichkeit in Essigsäure.

Die Teige aus den Sorten Bussard und Zentos wiesen reduzierte Gehalte an unlöslichen Gluteninen auf. Dabei sind diese als Folge der Depolymerisation in die essigsäurelösliche und auch in die ethanollösliche Fraktion übergegangen.

Die Erkenntnisse aus der Literatur belegen, dass sich der Anteil an unlöslichen Gluteninen mit dem Kneten bei einigen Sorten erhöht (5, 51, 52). Dies hat sich bei den Sorten Batis, Ritmo und Contra bestätigt. Das bedeutet, dass die anderen Proteine im Gluten nicht mehr für die verwendeten Lösungsmitteln verfügbar sind und dass sie als ein Teil der unlöslichen Komponente nach der Fraktionierung zurückbleiben.

Skerritt et. al (46) vermuten, dass die schwefelreichen Albumine während des Knetens mit Glutenproteinen Polypeptide ausbilden. Dies kann die Verminderung in der Proteinlöslichkeit in NaCl-Lösung bei den Sorten Bussard und Batis erklären.

Die Sorten Contra und Ritmo hatten im Vergleich zu den anderen Sorten den höchsten Gliadinegehalt. Im Teig wurde diese Proteingruppe am meisten verändert, besonders bei der Sorte Contra. Ein Teil der Gliadine wurde in NaCl löslich, ein Teil essigsäurelöslich und ein großer Teil bleibt im Glutennetz unlöslich eingeschlossen. Gliadine werden als Monomere und dadurch als sehr bewegliche Proteine betrachtet. Durch ihre Beweglichkeit sind sie während des Knetens mit anderen Proteinen stark eingeschlossen (5). Dies kann die Veränderungen in dieser Fraktion bei der gliadinreichsten Sorte erklären. Die Veränderung dieser Fraktion durch den Knetprozess wurde von Hahn und Grosch (51) ebenfalls untersucht und im Ergebnis wurden gleiche Tendenzen aufgezeigt.

Anhand der Ergebnisse aus der Fraktionierung nach Osborne wird deutlich, dass das Ausgangsmaterial eine große Rolle spielt. Dabei sind die Proteinzusammensetzung sowie die Proteinstruktur des Mehles von großer Bedeutung. So unterliegen die Gliadine bei den Sorten Contra und Ritmo bei der Entwicklung der Teige den größten Veränderungen. Im Gegensatz dazu unterliegen die unlöslichen Glutenine bei den Sorten Bussard und Zentos bei der Teigentwicklung den größten Veränderungen. Bei der Entwicklung der HUM-Systeme konnten diese Phänomene so nicht beobachtet werden. Die Strukturänderungen sind bei den Teigen größer als bei den HUM-Systemen.

Zusammenfassend aus den Ergebnissen der Osborne-Fraktionierung lässt sich schließen, dass sich die Struktur der Proteine in beiden Mehl-Wasser-Systemen, im Vergleich zu der Struktur der Proteine im Mehl, verändert hat. Zu diesen Veränderungen kam es durch Wechselwirkungen zwischen den Proteinen und Wechselwirkungen zwischen Proteinen und anderen Mehlhaltstoffen während der Systementwicklung.

2. 2. Physikalische Eigenschaften

Wirkt eine äußere Kraft auf einen Körper ein, so erleidet dieser eine Deformation. Diese Deformation steht im Gleichgewicht mit den inneren Spannungen, welche das Resultat der Wechselwirkungen zwischen den Molekülen oder dispersen Teilchen des Körpers darstellen (15, 59). So können über das Deformationsverhalten Grundlagen zum molekularen bzw. dispersen Aufbau und zur Struktur eines Systems näher geklärt werden.

Ein Teig verhält sich unter der Wirkung äußerer Kräfte viskoelastisch (59). Der viskose bzw. elastische Anteil treten bei gleicher Beanspruchungsart, abhängig von der Struktur, unterschiedlich auf.

Graveland (4) schrieb, dass die ursprüngliche Struktur während der Teigbildung verändert wird. Die festen Stärke-Protein-Cluster fallen auseinander, und die Eiweißteilchen dissoziieren. Dabei strecken sich die Gluteninmolekülketten, und die Glutenine bilden mit den Gliadinen ein geschlossenes Proteinnetz im Teig (4). Hierbei werden die Gluteninmoleküle in kleinere Bruchstücke gespalten (Depolymerisation), so dass die Teigfestigkeit mit zunehmender Bearbeitung abnimmt (4). Er erklärte weiter, dass die Gluteninmoleküle die Träger des Proteinnetzes sind. Je größer die Gluteninmoleküle sind, desto größer ist die Zahl Berührungsstellen pro Molekül, und je höher die Konzentration ist, desto größer ist die Zahl der Berührungsstellen pro Teigvolumen (4). Die Gliadine können die unmittelbare Berührung der Gluteninmoleküle unterbrechen, was auch eine Verminderung der Festigkeit des Glutens zur Folge hat (4). Daraus lässt sich schließen, dass die Festigkeit durch die ursprüngliche Struktur (Stärke-Protein-Cluster), durch die Größe der Gluteninmoleküle und die Zahl der Berührungsstellen pro Volumen überwiegend bestimmt ist. Die Ergebnisse der eigenen Messungen zeigten, sowohl in Extensograph- und Alveograph- als auch in Oszillationsmessungen, dass HUM-Systeme eine wesentlich größere Festigkeit aufwiesen als Teige. Diese Festigkeit drückte sich bei den HUM-Systemen in hohen Verhältniszahlen und Energien bei den Extensographmessungen (Abb. 25-29) bzw. in den hohen P/L Verhältnis-Werten bei den Alveographmessungen aus (Abb. 32). Auch in den hohen Anfangswerten von Elastizitäts-, Viskositäts- und damit den Komplexmoduli aus den Oszillationsmessungen werden hohe Festigkeiten ausgewiesen (Abb. 34-53). Dies weist darauf hin, dass hinsichtlich der Erklärung der Teigbildung nach Graveland, die ursprünglich feste Struktur überwiegend erhalten blieb und die Gluteninmoleküle ihre Ausgangsgröße in HUM-Systemen beibehalten. Die wasserlöslichen Substanzen des Mehles wirken mit einer Verringerung der Festigkeit auf die Teigeigen

schaften (10). Bei der Zubereitung der HUM-Systeme wird ein Teil dieser Substanzen (Albumine, lösliche Pentosane, lösliche Zucker und Mineralstoffe) ausgewaschen, was sich auf die Festigkeit des Systems mit auswirkt.

Mit dem Deformationsversuch wird ein lineares viskoelastisches Verhalten des Teiges registriert, in dem die rheologischen Eigenschaften von der Beanspruchung nicht abhängig sind (14). Die HUM-Systeme zeigten kein lineares viskoelastisches Verhalten bzw. keine stabile Phase im Deformationsversuch (Abb. 34, 36, 38, 40, 42). Diese Ergebnisse lassen auf eine wenig stabile Struktur schließen. Der geknetete Teig enthält dagegen eine stabilere Struktur, welche für die stabile Phase im Deformationsversuch verantwortlich ist (Abb. 34, 36, 38, 40, 42). Wenn sich die Gluteninmoleküle während der Knetung und Depolymerisation strecken, haben sie weniger intramolekulare dafür aber mehr intermolekulare Berührungsstellen. Dies führt zu einer weniger festen aber stabilen Struktur, weil sich die Konzentration der Bindungen zwischen den unterschiedlichen Proteinmolekülen erhöht, aber damit die Steifheit der Glutenine abnimmt. Während der HUM-System-Entwicklung kommt es nicht zur Depolymerisation und Streckung der Glutenine, womit die mögliche Berührungsfläche zwischen Proteinen nicht groß ist. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit zur Entwicklung der zwischenmolekularen Bindungen kleiner. Aus dem Grund zeigt HUM-System kein Bereich, in dem die viskoelastische Eigenschaften nicht von der Beanspruchung abhängig sind.

Tan-Delta-Werte zeigen die viskoelastischen Verhältnisse in den Mehl-Wasser-Systemen (Abb. 35, 37, 39, 41, 43). Sie waren mit steigender Beanspruchung sortenspezifisch. Sie stimmen mit den Ergebnissen der Osborne-Fraktionierung überein (Abb. 20, 21). Die ethanollösliche Fraktion (Gliadine) wird als Fraktion der Monomere betrachtet und ist für viskose Teigeigenschaften verantwortlich (4, 5). Dagegen geben die polymeren Glutenine dem Teig überwiegend die elastischen Eigenschaften (4, 5). Vergleicht man die Verhältnisse Gliadine/Glutenine und Gliadine/unlösliche Glutenine mit den Tan-Delta-Werten aus den Deformationsversuchen, wird diese Theorie bestätigt. So haben die Sorten Bussard und Zentos in Teigen höhere Verhältnisse im Vergleich zu den HUM-Systemen aufgewiesen. Gleichzeitig zeigten diese Sorten in den Verhältnissen Viskosität/Elastizität die gleiche Tendenz. Die Sorten Ritmo und Contra haben das gegenteilige Verhalten gezeigt. Bei der Sorte Batis konnten keine signifikanten Unterschiede in den Tan-Delta-Werten ermittelt werden.

Über den Eintrag von Knetenergie werden die Teige gebildet, und diese erfahren während der kontinuierlichen weiteren Knetung eine unterschiedliche Stabilität (Abb. 54, 58, 62, 66, 70).

Von einigen Autoren (66, 67) wurden unterknetete bzw. nicht entwickelte Teige, bei denen eine geringe Knetung mit minimaler Knetgeschwindigkeit angewandt wurde, untersucht. Sie zeigten, dass sich nicht entwickelte Teige durch Anwendung der normalen Nachknetung mit normaler Knetgeschwindigkeit in normal entwickelte Teige umwandeln ließen. In dieser Arbeit wurde die Teigentwicklung in unterschiedlichen Phasen unterbrochen, und nach einer Ruhepause wurden die Teige nachgeknetet (Abb. 57, 61, 65, 69, 73). Es war nicht möglich, bei der Nachknetung normal entwickelte Teige zu erzeugen. Zwischen den Teigen mit Unterbrechung der Knetung bei 300, 400 und 500 FE ergaben sich mit der Nachknetung nur geringfügige Unterschiede. Sie haben eine viel kürzere Stabilität als die gekneteten Teige aufgewiesen. Die Teige mit einer Ruhephase erreichen eine Endstruktur, die von der Vorgeschichte des Systems abhängig ist. Werden diese Teige nachgeknetet, unterliegen sie einer Beanspruchung. Diese Knetbeanspruchung führt zu neuen Teigsystemen, welche andere Eigenschaften als normal geknetete Teigsysteme haben.

Die HUM-Systeme reagieren auf das Kneten mit sofortigem Abfall der Konsistenz bzw. zeigen im Knetversuch keine Stabilität (Abb. 55, 59, 63, 67, 71). Dabei führte die Nachknetung nicht zu normal gekneteten und dadurch entwickelten Teigen. Dieses Verhalten der HUM-Systeme deutet daraufhin, dass die Anwendung zusätzlicher Knetenergie nur eine äußere Beanspruchung auf die gebildete Struktur bedeutet und zu neuen Strukturen führt.

Die überkneteten Teige haben am Ende der ersten Knetung eine niedrigere Konsistenz als 500 FE. Nach einer Ruhephase und nach Anwendung einer Nachknetung zeigen diese Teige höhere Konsistenzen als am Ende der ersten Messung (Abb. 56, 60, 64, 65, 72). Sie weisen eine kurze Stabilität und nach der Stabilitätsphase einen Konsistenzabfall mit einer engeren Kurvenbreite auf. Einige Arbeiten (4, 46, 47) wiesen auf eine Repolymerisation während der Teigruhe nach dem Kneten hin. Anhand der Literaturangaben und der gewonnenen Ergebnisse kann man feststellen, dass die Repolymerisation bei überkneteten Teigen während der Ruhepause nur zum Teil stattgefunden hat.

Diese Ergebnisse beweisen, dass man mit der Intensität der Knetung bzw. des Energieeintrages eine gezielte Teigstruktur mit gewünschten Eigenschaften erreichen kann. Dabei gibt es die HUM-Struktur, die optimal geknetete, die unterknetete, die überknetete Teigstruktur sowie die Strukturen, welche durch Nachknetung entstehen können.

Das Knetverhalten ist sehr stark von der Qualität der Weizensorten abhängig. Bei den HUM-Systemen der im Sinne der Backqualität guten Sorten Bussard und Zentos kam es erst zu einer Konsistenzabnahme und danach zu einer kontinuierlichen Konsistenzzunahme, was bei den anderen Sorten nicht festgestellt werden konnte (Abb. 55 und 59). Dies weist darauf hin, dass bei den Eliteweizensorten mehr Strukturmöglichkeiten bzw. Systeme als bei anderen Weizensorten vorhanden sind.

Die physikalischen Messungen zeigten zwischen den beiden untersuchten Mehl-Wasser-Systemen Unterschiede. Sie bewiesen aber auch, dass es sich beim HUM-System um einen viskoelastischen Körper handelt. Dabei ist die Ausprägung der Grunddeformationsarten bei den untersuchten Mehl-Wasser-Systemen während der gleichen Beanspruchungen unterschiedlich. Dies deutet ebenfalls auf Strukturunterschiede von Mehl-Wasser-Systemen, hin.

2. 3. System- und Proteinmorphologie

Da die Hydratisierung des Klebers in situ erfolgte und damit diese Vorgehensweise fundamental von der Teigbildung verschieden ist, konnten die Unterschiede in den hier durch Rasterelektronenmikroskopie untersuchten Strukturen sichtbar gemacht werden. Dabei wurden morphologische Strukturen gefriergetrockneter Proben dargestellt.

Die Hydratisierung von Mehlpartikeln wurde von anderen Autoren (6, 18, 19) bereits früher sowohl durch Lichtmikroskopie als auch durch Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass bei der Hydratisierung einzelner Mehlpartikel auf einer Wasseroberfläche augenblicklich Proteinstränge ausgebildet werden (20, 92). Amend (18) beobachtete bei der Hydratisierung von Mehlpartikeln auf einem Objektträger, dass durch Bewegen des Deckglases aus Proteinsträngen kompakte Massen entstanden, in denen Proteinstrukturen unregelmäßig angeordnet vorkamen. Er beschrieb diese Strukturen als Aggregate aus Proteinsträngen. Durch Kneten werden solche Proteinaggregate gedehnt und zu Filmen auseinandergezogen. Diese Filme bilden in einem optimal entwickelten Teig und im Kleber übereinanderliegende Schichten. Auf diese Weise bauen sich Membranen auf (18). Diese Erklärungen stimmen mit den Ergebnissen von Paredes-Lopez und Bushuk überein (95). Diese Autoren haben bei der Untersuchung wenig gekneteter Teige eine „unterbrochene“, nicht stark vernetzte Struktur beobachtet, welche sie als Aggregation der Proteine erklärt haben. Sie zeigten außerdem, dass in optimal gekneteten Teigen aggregierte Proteinstrukturen in eine Membranstruktur übergehen.

Proteinstränge waren im HUM-System selten vorhanden (Abb. 74, 76), beim gekneteten Teig kamen sie nicht vor (Abb. 75, 77). Im Rahmen dieser Arbeit wurden die von Amend (18) beschriebenen Filmstrukturen im gefriergetrockneten Teig gefunden, was auf eine mechanische Ausbildung von Proteinfilmen während des Knetens hindeutet. Die Filme überzogen oft mehrere Stärkekörner (Abb. 77). Da es bei der Entstehung der nicht gekneteten HUM-Struktur zu keiner mechanischen Dehnung der Proteine kam, entstanden folglich keine in den Teigen vergleichbare Filme. Proteine waren im HUM-System in partikulären Aggregaten vorhanden und deckten nur einen Teil der Stärkekornoberfläche (Abb. 78) ab. Diese Aggregate hatten Ähnlichkeit mit Proteinaggregaten, wie sie auch von anderen Autoren bereits beschrieben wurden (18, 95). Nach dem Entzug des Wassers durch Gefriertrocknung wurde deutlich, dass die Struktur des HUM-Systems nicht homogen war. Daraus kann geschlossen werden, dass die Proteine im HUM-System überwiegend der in situ Lokalisation in den Mehlpartikeln entsprach. Sie hatten durch die Wasseraufnahme nur geringfügige Veränderungen durch spontane Aggregation erlitten. Beim HUM-System gab es jedoch einige Bereiche mit dünnen Filmstrukturen. Das deutet auf die Anwesenheit dünner filmartiger Proteinablagerungen in den Mehlpartikeln hin.

Nach dem Auswaschen der Stärkekörner aus dem Teig und Gefriertrocknung des verbliebenen Glutens ergab sich ein regelmäßig aufgebautes Proteingerüst (Netzwerk) (Abb. 81 und 83). Die Proteinoberflächen des Netzes war regelmäßig (glatt) (Abb. 85, 87). Dieses wird auf die homogenisierende Wirkung des Knetens zurückgeführt, die zur Verteilung und Aggregation der Proteine in der Gesamtmasse des Klebers führte (kontinuierliche Phase).

Die Struktur und die Oberfläche des Proteingerüsts der HUM-Systeme war nach dem Stärkeauswaschen und der Gefriertrocknung des schwammartigen Proteingerüsts unregelmäßig (rau) (Abb. 84 und 86). Das deutet darauf hin, dass die Lokalisation der Proteinstruktur der im HUM-System entsprach.

3. Klärung der Systembildung

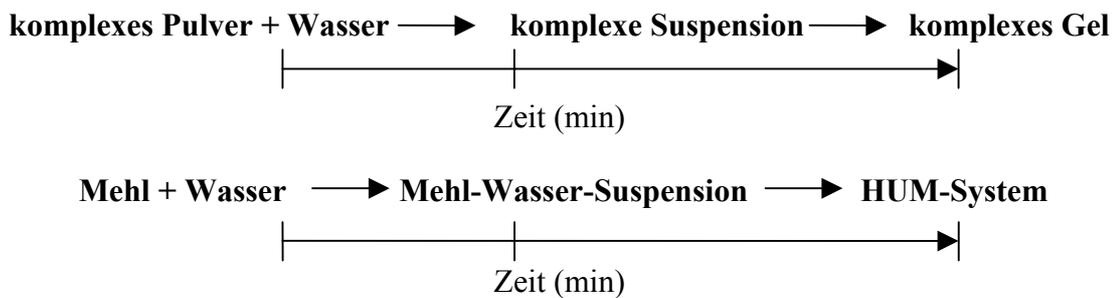
Lebensmittelstoffe sind zwei- oder mehrphasig und unterliegen damit den Gesetzen disperser Systeme. Sie stellen meist disperse Systeme verschiedenartiger Komponenten dar (106). Komplexe disperse Systeme lassen sich deshalb nur bedingt nach Hauptmerkmalen in die Grundtypen disperser Systeme einordnen (106). So stellt das Mehl ein komplexes Pulver und

ein Teig ein komplexes Gel dar (106). Gleichzeitig ist ein Teig eine kolloidale Dispersion, weil die Teilchengröße dispergierter Phasen im kolloidalen Bereich liegt ($1\text{-}10^2$ nm).

3.1. HUM-System

Das HUM-System ist als disperses System ein komplexes Gel, das aus einem komplexen Feststoffaerosol (Pulver) durch Zugabe von Wasser entstanden ist. Dabei sind mehrere Vorgänge notwendig.

Mit dem Einbringen und Verteilen pulverförmiger Festkörper in Flüssigkeiten ändert sich bei konstanter Temperatur und konstantem Druck die freie Enthalpie infolge der Differenz der Grenzflächenspannung beim Austausch der Gasphase gegen die Flüssigkeitsphase (106). Wird dem komplexen Pulver, dem Mehl-System, Wasser im Überschuss zugegeben, wird eine komplexe Suspension erzeugt. Dabei werden augenblicklich die Proteinstränge aufgebaut (20, 92). Die Proteine beginnen unter Abnahme der freien Energie zu quellen (106). Durch Solvatation der Makromoleküle wird eine Anfangswärme frei (106). Im zweiten Stadium der Quellung wird die Aufnahme des Lösungsmittels durch eine positive Mischungsentropie bedingt, so dass Wärme aufgenommen werden kann (106). Dabei wird das Wasser in das System in drei Formen integriert: als gebundenes Wasser, als immobilisiertes Wasser und als freies Wasser. In den dispersen Systemen herrschen zwischen den Ionen und Molekülen sowie zwischen dispersen Teilchen Abstoßungs- und Anziehungskräfte, welche auf elektrischen Ladungen beruhen (Ionenwechselwirkung, atomare Abstoßungskräfte, KEESOM-Energie, DEBYE-Energie, LONDON-Energie). In realen Dispersionen wirken verschiedenartige Wechselwirkungskräfte gleichzeitig (106). Die resultierenden Wechselwirkungskräfte können in Abhängigkeit von der Entfernung der Teilchen positiv oder negativ sein, da die elementaren Wechselwirkungskräfte unterschiedliche Reichweite und Größe besitzen (106). In der komplexen Suspension hält freies Wasser die befeuchteten, gequollenen Mehlpartikel auf Distanz, so dass die notwendigen Anziehungskräfte zu einer Proteinaggregation nicht ausreichen. Mit der Abnahme des freien Wassers nähern sich die Mehlpartikel, und die Anziehungskräfte zwischen den Proteinen steigen an. Dabei kommt es unter der Änderung der freien Energie zum Austausch der Flüssigkeitsphase gegen die aggregierte Proteinphase als Dispersionsmittel.



Dabei wird ein Teil der im Wasser löslichen Substanzen aus dem System ausgewaschen, wodurch die Prozesse der Systembildung auch beeinflusst werden.

Die Proteine werden aggregiert und füllen die Zwischenräume zwischen den Stärkekörnern, so dass sie ein Teil der Stärkeoberfläche decken. Ein kleiner Teil verbleibt in der Strangform und verbindet einige Stärkekörner. In der Struktur des HUM-Systems werden kleine und dünne Filme aufgebaut, die auch einige Stärkekörner verbinden können. An der Aggregation der Proteine nehmen alle Glutenproteine unter kleiner Veränderung der Struktur teil. Dabei werden wenige intermolekulare Bindungen aufgebaut. Die ohne Depolymerisation verlaufende Aggregatbildung sowie die Abwesenheit der mechanischen Filmbildung führen dazu, dass diese Systeme sehr fest und wenig dehnbar sind.

Wird die Stärke aus dem System ausgewaschen, verbleibt ein zusammenhaltendes Proteingerüst. Dieses Proteingerüst verhält sich beim Eindrücken viskoelastisch, zerfällt aber bei geringer Dehnbeanspruchung in kleine viskoelastische Stücke. Dagegen ist das HUM-System stabiler. Daraus stellt sich die Frage, ob allein der Gluten für die Eigenschaften der Mehl-Wasser-Systeme verantwortlich ist. Es ist anzunehmen, dass die Stärkekörner eingelagert in die Proteinmatrix den Zusammenhalt und die Eigenschaften des HUM-Systems wesentlich beeinflussen.

3.2. Teig

Der Teig stellt ebenfalls ein komplexes Gel dar. Dieses komplexe System entsteht durch Zugabe einer geeigneten Wassermenge unter Anwendung der Energie beim Mischen und Kneten. Beim Übergang aus einem komplexen Pulver-System in das komplexe Gel-System wird die Gasphase gegen die Proteinphase ausgetauscht. Dabei wird die freie Energie unter anderem als Folge der Änderung der Grenzflächenspannung beim Austausch der kontinuierlichen

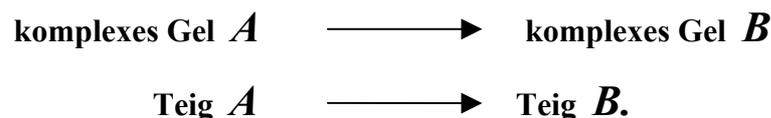
Phase geändert. Neben dieser Energieänderung kommen viele weitere Phänomene mit komplexen energetischen Vorgängen vor.

Eine der Aufgaben des Knetens ist die Wasserverteilung. Die Mehlpartikel werden befeuchtet und gleichzeitig immer wieder sehr stark aufeinander und aneinander gepresst. Dabei wirkt auf die Mehlpartikel ein starker Druck. Die Proteine beginnen zu quellen. Gleichzeitig mit der Proteinquellung kommt es zur weiteren mechanischen Beanspruchung der Proteine und der anderen Mehlinhaltsstoffe. Die Glutenine werden depolymerisiert und gestreckt sowie unter Ausbildung von Bindungen mit anderen Proteinen vernetzt. Parallel verläuft die Ausdehnung der Proteinaggregate und die Ausbildung der Proteinfilme mit übereinander liegenden Proteinschichten. Durch Depolymerisation, Vernetzung und Dehnung ändert sich die Proteinstruktur unter Gewinnung überwiegend glatter Oberflächen. Ein Proteinfilm kann mehrere Stärkekörner bedecken. Diese Vorgänge geschehen unter Zunahme der Konsistenz. Im Stadium der höheren Konsistenz erreicht das ausgebildete Gelsystem seine stabile Phase.



Mit dem Aufbau des Teiges ändern sich unter Strukturänderung die Eigenschaften aller Proteine. Die Proteinänderungen sind dabei stark sortenspezifisch.

Nach der Knetung und einer Ruhephase nimmt der Teig unter gegebenen Bedingungen seine Struktur an. Sie ist von Ausgangsstruktur und Energieeintrag abhängig. Wird der Teig nach einer Ruhephase erneut geknetet, geht es in ein neues Teig-System über. Dabei kommt es zur Strukturänderung in einem komplexen Gel:



Nach dem Stärkeauswaschen wird ein stabiles Proteingerüst gewonnen. Es zeigt stärkere viskoelastische Eigenschaften als Teig. Bei einer Dehnbeanspruchung zeigt das Proteingerüst

einen größeren Widerstand als der Teig und wird beim Überschreiten einer Beanspruchungsgrenze auseinander gerissen.

Physiko-chemische und mikroskopische Untersuchungen am HUM-System und am Teig bewiesen, dass sich auch ohne Knetenergie ein System ausbildet, welches Teigeigenschaften besitzt. Die Ausprägung dieser Eigenschaften beim HUM-System war im Vergleich zum Teig unterschiedlich, was auf Strukturunterschiede hinwies. Mit der Beschreibung der Strukturen wurde es ermöglicht, die Wege zu den Strukturen bzw. die Strukturentwicklungen von Mehl-Wasser-Systemen zu erläutern.

VIII Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, mit Hilfe von physiko-chemischen und mikroskopischen Untersuchungen zwei unterschiedliche Mehl-Wasser-Systeme zu beschreiben. Über die Beschreibung der Systemstrukturen wurde versucht, die Systementwicklung zu erklären. Dafür ist ein Arbeitsmodell erarbeitet worden (Abb. 1 und 2).

In Abbildung 88 ist ein aus dem Arbeitsmodell entwickeltes Modell zur Zusammenfassung dieser Arbeit dargestellt. Das System I wurde mit minimalem Energieeintrag erzeugt, wobei keine Mischung und Knetung angewandt wurden. So wurde eine HUM-Struktur gewonnen, welche im Vergleich zum Mehl bei der Proteinfractionierung kleine, aber signifikante Veränderungen bei der Verteilung der Proteinfractionen gezeigt hat. Diese Veränderungen hängen von der Ausgangsqualität des Mehles bzw. Weizens ab. In den physikalischen Messungen wies die HUM-Struktur eine Festigkeit auf, welche sich in sortenspezifisch hohen Widerständen bei den Dehnungsmessungen widerspiegelte. Dabei erwiesen sich diese Systeme als wenig dehnbar. Alle untersuchten HUM-Systeme zeigten eine hohe Anfangselastizität, Anfangsviskosität und somit hohe Komplexmodulwerte in dynamischen Messungen. Im dynamischen Deformationsversuch und im Knetversuch hatten sie keine Stabilität. Die mikroskopischen Aufnahmen zeigten die Anwesenheit überwiegend partikulärer Proteinaggregate, aber auch die Anwesenheit von kleinen dünnen Filmen und wenigen Strängen, die nach dem Entzug des Wassers zurückblieben. Die Proteinaggregate deckten ein Teil der Stärkeoberfläche. Das dehydratisierte Glutengerüst hatte eine unregelmäßig strukturierte (raue) Oberfläche.

Mit Hilfe dieser Ergebnisse wurde die Struktur des HUM-Systems beschrieben. Die Festigkeit wies auf die Beibehaltung des großen Teiles der ursprünglichen festen Struktur, der Ausgangsgröße der Gluteninmoleküle und den Verlust eines Teiles der wasserlöslichen Substanzen hin. Die geringe Stabilität deutete auf die Ausbildung einer geringeren Anzahl an Bindungen zwischen den aggregierten Proteinen hin. In diesem System befanden sich die Proteine im Vergleich zum Ausgangsrohstoff Mehl in wenig veränderter Struktur. Dies zeigte sich auch in einer im Vergleich zum Mehl veränderten Proteinlöslichkeit. Dabei waren die dehydratisierten Glutenproteine überwiegend in einer partikulären Aggregatstruktur, wobei ein Teil eine kleine und dünne Filmstruktur besaß.

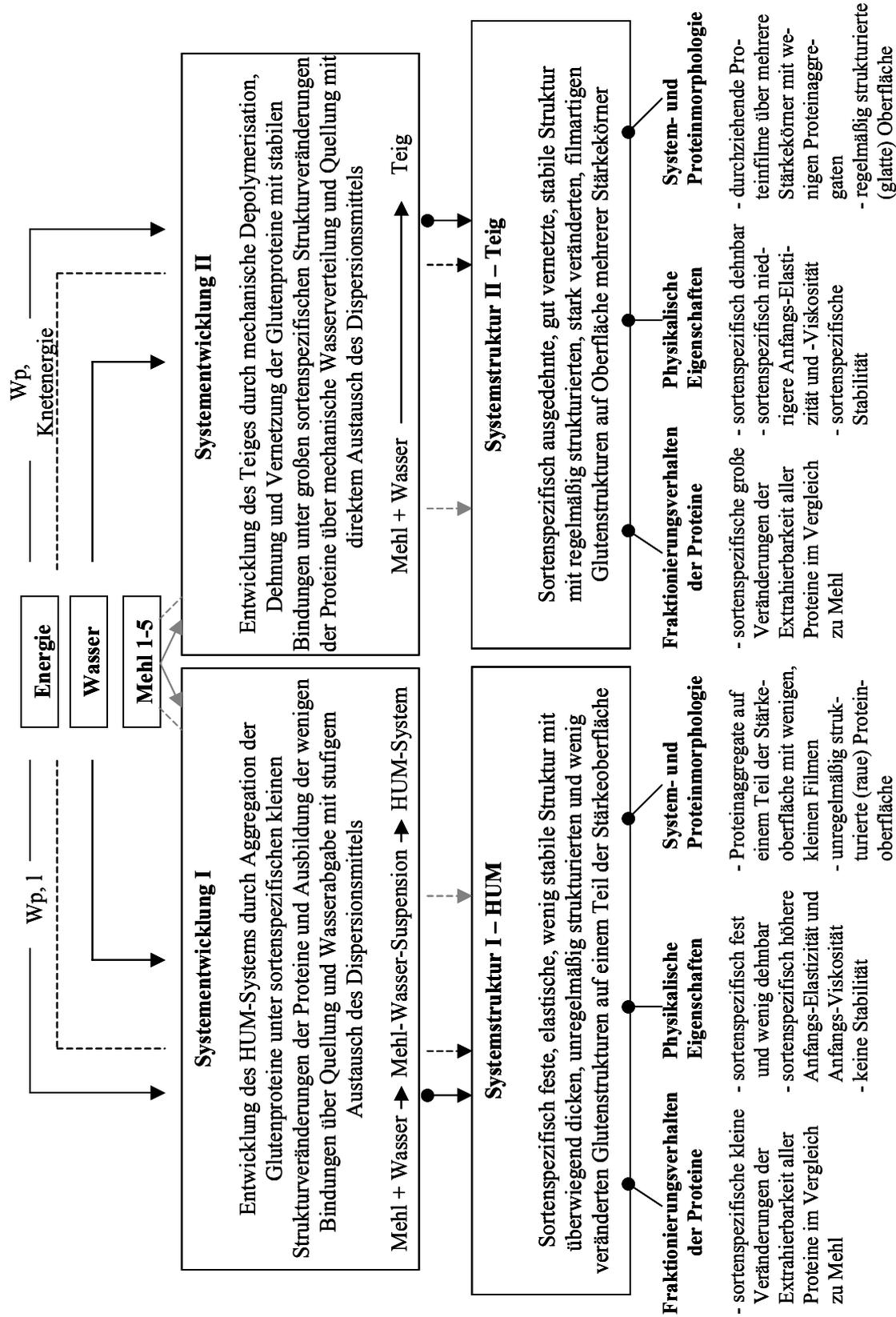


Abb. 88: Zusammenfassendes Modell zur Entwicklung und Struktur von Mehl-Wasser-Systemen ohne und mit Eintragung von mechanischer Energie.

Mit der Anwendung dieses neuen Verfahrens wurde mit minimalem Energieeintrag über stufenweisen Austausch des Dispersionsmittels aus einem Mehl (komplexes Pulver) durch Zugabe von Wasser über eine Mehl-Wasser-Suspension (komplexe Suspension) ein HUM-System (komplexes Gel) erzeugt. Dabei quollen die Glutenproteine und mit der Abgabe des Wasserüberschusses sowie mit dem Verlust der wasserlöslichen Substanzen stiegen die in der Diskussion beschriebenen Anziehungskräfte, die zu einem zusammenhaltenden System führten. Die Aggregationsprozesse erfolgten unter Ausbildung weniger Bindungen mit sortenspezifischen Veränderungen in der Struktur der Glutenproteine. Während der Entstehung dieses Systems vollziehen sich mehrere energetische Vorgänge mit dem Ziel, einen energetisch günstigen Zustand unter gegebenen Bedingungen zu erreichen.

Die Teige zeigten große Unterschiede in der Extrahierbarkeit aller Proteine im Vergleich zu denen der Weizenmehle. Die Ausprägung der Unterschiede war sortenspezifisch. Die Teige erwiesen sich in Dehnungsmessungen als dehnbar. Auf die dynamisch-physikalischen Messungen im Deformationsversuch reagierten sie mit einer Stabilitätsphase, deren Dauer von der Mehlqualität abhing. In beiden dynamischen Messungen, sowohl im Deformationsversuch als auch im Frequenzversuch, zeigten die Teige im Vergleich zu den HUM-Systemen eine niedrigere Anfangselastizität und Anfangsviskosität. In den mikroskopischen Aufnahmen konnten nach der Sublimation des Wassers Filmstrukturen beobachtet werden, welche oft mehrere Stärkekörner bedeckten. Außer den Filmstrukturen wurden wenige, aggregierte Strukturen beobachtet. Der gefriergetrocknete Gluten hatte eine überwiegend regelmäßig strukturierte (glatte) Oberfläche, was nach dem Auswaschen der Stärke deutlicher wurde.

Die Ergebnisse wiesen auf eine gedehnte Struktur hin, in welcher die Anwesenheit stabiler Bindungen eine Stabilität unter einigen Beanspruchungsarten aufwies. Die dehydratisierten Glutenproteine haben im Vergleich zum Ausgangssystem (Mehl) in großem Maße veränderte Strukturen. Sie befinden sich im Teig überwiegend in der Form der Filme mit regelmäßig strukturierten (glatten) Oberflächen.

Aus einem Mehl (komplexes Pulver) entsteht durch Zugabe von Wasser und durch Kneten ein Teig (komplexes Gel). Dabei wird Luft als Dispersionsmittel des Mehles gegen vernetztes Protein als Dispersionsmittel des entstehenden Teiges direkt ausgetauscht. Während des Knetens kommt es zur mechanischen Wasserverteilung und Proteinquellung. Gleichzeitig werden Glutenproteine depolymerisiert, gestreckt und unter Ausbildung von stabilen Bindungen mit anderen Proteinen gedehnt.

In den Knetversuchen zeigte sich die Möglichkeit zur Gewinnung unterschiedlicher Strukturen bzw. Teige. Gleichzeitig wurde bewiesen, dass die HUM-Systeme, die unterkneteten und die überkneteten Teige durch eine Nachknetung nicht in optimal geknetete Teige umgewandelt werden konnten. Damit ist es bewiesen, dass sie eine Endstruktur enthielten, welche sich nicht durch den nachträglichen Energieeintrag in die Struktur des durch optimale Knetung entstandenen Teiges umwandeln kann. Ein Energieeintrag bewirkt nur eine Zerstörung der gebildeten Struktur.

Mit dieser Arbeit wurden die Eigenschaften einer neuen Struktur untersucht. Dabei wurden die Eigenschaften einer Teigstruktur vergleichend gegenüber gestellt. Die Ergebnisse zeigten, dass ein HUM-System die Eigenschaften eines definitionsgemäßen Teiges besitzt. Die Unterschiede spiegelten sich in der Ausprägung der Eigenschaften wider, was auf die Unterschiede in der Struktur und somit in der Entwicklung von beiden Mehl-Wasser-Systemen hindeutet. Die HUM-Struktur enthält einen großen Teil der im Mehl vorliegenden Struktur und deutet auf eine durch Wasser ausgelöste Aggregation hin, wobei nur kleine durch Aggregation hervorgerufene Strukturveränderungen entstehen. Dieser Struktur gegenüber steht eine Teigstruktur, welche durch große Veränderungen der ursprünglichen Struktur bei einer mechanischen Aggregation begleitet mit der Depolymerisation, Streckung und Dehnung der Proteine entsteht. Mit der Strukturbeschreibung von beiden Systemen wurden neue Erkenntnisse über die Bildungsprozesse des Glutens gewonnen sowie neue Fragen aufgeworfen.

IX Literatur

- 1 BLOKSMA, A. H. and BUSHUK, W.: Rheology and Chemistry of Dough. In: POMERANZ, Y. (Ed.). Wheat: Chemistry and technology Vol I 3rd Edition. AACC, St. Paul, (1988).
- 2 WRIGLEY, C. W. and BIETZ, J. A.: Proteins und Amino Acids. In: POMERANZ, Y. (Ed.) Wheat: Chemistry and Technology Vol I. 3rd Edition.: AACC, St. Paul, (1988).
- 3 MEUSER, F.: Wheat utilisation for the production of starch, gluten and extruded products. In: BUSHUK, W. and RASPER, V. F. (Ed.) Wheat Production, Properties and Quality., Blackie Academic & Professional, Glasgow, (1994).
- 4 GRAVELAND, A.: Struktur und funktionelle Eigenschaften von Gluteninen. Getreide Mehl und Brot 42 (1988), 2., 35-38.
- 5 BUSHUK, W., HAY, R. L., LARSEN, N. G., SARA, R. G., SIMMONS, L. D. and SUTTON, K. H.: Effect of Mechanical Dough Development on the Extractability of Storage Proteins from Bread Dough. Cereal Chem. 72 (1997), 4., 389-395.
- 6 BERNARDIN, J. E. and KASARDA, D. D.: Hydrated Protein Fibrils from Wheat Endosperm. Cereal Chem. 50 (1973), S. 529-536.
- 7 PYLER, E. J.: Flour Proteins Role in Baking Performance. Bakers`Digest 57 (1983), 24-33.
- 8 GAO, L., NG, P. K. W. and BUSHUK, W.: Structure of Glutenin Based on Farinograph and Electrophoresis Results. Cereal Chem. 69 (1992), 4., 452-455.
- 9 HUANG, D. Y. and KHAN, K.: Quantitative Determination of High Molecular Weight Glutenin Subunits of Hard Red Spring Wheat by SDS-Page. II. Quantitative Effects of Individual Subunits on Breadmaking Quality Characteristics. Cereal Chem. 74 (1997), 6., 786-790.

- 10 MILLER, K. A. and HOSENEY, R. C.: Dynamic Rheological Properties of Wheat Starch-Gluten Doughs. *Cereal Chem.* 76 (1999), 1., 105-109.
- 11 BORNEO, R. and KHAN, K.: Glutenin Protein Changes During Breadmaking of Flour Spring Wheats: Fractionation by Multistacking SDS Gel Electrophoresis and Quantification with High-Resolution Densitometry. *Cereal Chem.* 76 (1999), 5., 718-726.
- 12 ELIASSON, A-C.: Rheological Properties of Cereal Proteins. In: FARIDI, H. and FAUBION, J. M. (Ed.). *Dough Rheology and Baked Product Texture*. Van Norstrand Reinhold, New York, (1990).
- 13 BUSHUK, W.: Rheology: Theory and Applications to Wheat Flour Dough. In: FARIDI, H. (Ed.) *Rheology of Wheat Products.*, AACCC, St. Paul, (1985).
- 14 STEFFE, J. F.: *Rheological Methods in Food Process Engineering*. Freeman Press, Michigan, (1992).
- 15 WEIPERT, D.: Brotgetreide und seine Produkte. In: D. WEIPERT, TSCHEUSCHNER, H.-D. and WINDHAB (Herausg.) *Rheologie der Lebensmittel*. Behr's Verlag, Hamburg, (1993).
- 16 NAVICKIS, L. L., ANDERSON, R. A., BAGLEY, E. B. and JASBERG, B. K.: Viscoelastic Properties of Wheat Flour Doughs: Variation of Dynamic Moduli with Water and Protein Content. I. *Texture Studies* 13 (1982), 2., 249-264.
- 17 MASI, P., CAVELLA, S. and SEPE, M.: Characterization of Dynamic Viscoelastic Behavior of Wheat Flour Doughs at Different Moisture Content. *Cereal Chem.* 75 (1998), 4., 428-494.
- 18 AMEND, T.: Mikroskopische Untersuchungen zur Teig- und Kleberbildung bei Weizen. Dissertation, TU München (1990).
- 19 SECKINGER, H. L. and WOLF, M. J.: Electron Microscopy of Endosperm Protein from Hard and Soft Wheats. *Cereal Chem.* 47 (1971), 236-243.

- 20 BECHTEL, D. B., POMERANZ, Y. and DE FRANCISCO, A.: Breadmaking Studied by Light and Transmission Electron Microscopy. *Cereal Chem.* 55 (1978), 392-401.
- 21 EWART, J. A. D.: Glutenin Structure. *J. Sci. Food Agric.* 30 (1979), 482-492.
- 22 EWART, J. A. D.: Re-examination of the Linear Glutenin Hypothesis. *J. Sci. Food Agric.* 28 (1977), 191-199.
- 23 KHAN, K. and BUSHUK, W.: Studies of Glutenin. XII. Comparison by Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis of Unreduced and Reduced Glutenin From Various Isolation and Purification Procedures. *Cereal Chem.* 56 (1979), 2., 63-68.
- 24 GRAVELAND, A., BOSVELD, P., LICHTENDONK, W. J., MARSELLE, J. P., MOONEN, J. H. E. and SCHEEPSTRA, A.: A Model for the Molecular Structure of Glutenins from Wheat Flour. *J. Cereal Sci.* 3 (1985), 1-16.
- 25 BELITZ, H.-D., KIEFER, R., SEILMEIER, W. AND WIESER, H.: Structure and Function of Gluten Proteins. *Cereal Chem.* 63 (1986), 4., 337-341.
- 26 GRAVELAND, A., and HENDERSON, M. H: Structure and Functionality of Gluten Proteins. In: LASZTITY, R. AND BEKES, F. (Ed.). *Gluten Proteins.*, World Scientific, Singapore (1987), 238-246.
- 27 SCHOFIELD, J. D.: Wheat proteins: structure and functionality in milling and breadmaking. In: BUSHUK, W. and RASPER, V. F. (Ed.) *Wheat Production, Properties and Quality.*, Blackie Academic & Professional, Glasgow, (1994).
- 28 HUSSAIN, A. and LUKOW, O. M.: Influence of Gliadin-Rich Subfractions of Glenlea Wheat on the Mixing Characteristic of Wheat Flour. *Cereal Chem.* 74 (1997), 791-799.
- 29 CHAKRABORTY, K. and KHAN, K.: Biochemical and Bread-Making Properties of Wheat Protein Components. II. Reconstitution Baking Studies of Protein Fractions from Various Isolation Procedures. *Cereal Chem.* 65 (1988), 3., 340-344.

- 30 LAWRENCE, G. J., MACRITCHIE, F. and WRIGLEY, C. W.: Dough and Baking Quality of Wheat Lines Deficient in Glutenin Subunits Controlled by the Glu-A1, Glu-B1 und Glu-D1 loci. *J. Cereal Sci.* 7 (1988), 109-112.
- 31 WEEGELS, P. L., MARSEILLE, J. P., BOSVELD, P. and HAMER, R. J.: Large-scale Separation of Gliadins and Their Bread-Making Quality. *J. Cereal Sci.* 20 (1994), 253-264.
- 32 VAN LONKHUIJSEN, H. J., HAMER, R. J. and SCHREUDER, C.: Influence of Specific Gliadins on the Breadmaking Quality of Wheat. *Cereal Chem.* 69 (1992), 2. 174-177.
- 33 HUSSAIN, A. and LUKOW, O. M.: Relationship of D-Zone Omega Gliadins to Proteins Associated with Differences in Quality of Durum Wheats. *Cereal Chem.* 70 (1993), 483-487.
- 34 HOU, G., YAMAMOTO, H. and NG, P. K. W.: Relationship of Quality of Gliadin Subgroups of Selected U. S. Soft Wheat Flours to Rheological and Baking Properties. *Cereal Chem.* 73 (1996), 3. 352-357.
- 35 MCMASTER, G. J. and BUSHUK, W.: Protein-Carbohydrate Complex in Gluten: Fractionation and Proximate Composition *J. Cereal Sci.* 1 (1983), 171-184.
- 36 SHELTON, D. R. and D'APPOLONIA, B. L.: Carbohydrate Functionality in the Baking Process. *Cereal Foods World* 30 (1985), 437-442.
- 37 GREENWELL, P. and SCHOFIELD, J. D.: A Starch Granule Protein Associated with Endosperm Softness in Wheat. *Cereal Chem.* 53 (1986), 379-380.
- 38 HOSENEY, R. C., FINNEY, K. F., SHOGREN, M. D. and POMERANZ, Y.: Functional (breadmaking) and Biochemical Properties of Wheat Flour Components. II. Role of Water-Solubles. *Cereal Chem.* 46 (1969), 117-123.

- 39 HOSENEY, R. C., FINNEY, K. F. and POMERANZ, Y.: Functional (Breadmaking) and Biochemical Properties of Wheat Flour Components. VIII. Starch. *Cereal Chem.* 48 (1971), 191-201.
- 40 NIERLE, W., KERSTING, H.-J.: Einflußfaktoren auf Stärke/Proteintrennungen. *Getreide, Mehl und Brot* 53 (1999), 20-26.
- 41 OLCOTT, H. S. and MECHAM, D. K.: Characterisation of Wheat Gluten. I. Protein-Lipid Complex Formation During Doughing of Flours. Lipoprotein Nature of the Glutenin Fraction. *Cereal Chem.* 24 (1947), 407-414.
- 42 BEKES, F., ZAWISTOWSKA, U. and BUSHUK, W.: Protein-Lipid Complex in the Gliadin Fraction. *Cereal Chem.* 60 (1983), 5., 371-378.
- 43 CARCEA, M. and SCHOFIELD, J. D.: Protein-Lipid Interactions in Wheat Gluten: Reassessment of the Occurrence of Lipid-Mediated Aggregation of Protein in the Gliadin Fraction. *J. Cereal Sci.* 24 (1996), 101-113.
- 44 POMERANZ, Y.: Molecular Approach to Breadmaking: An Update and New Perspectives. *Bakers' Dig.* 57 (1983), 72-86.
- 45 MARION, D., LE ROUX, C., AKOKA, S., TELLIER, C. and GALLANT, D.: Lipid-Protein Interactions in Wheat Gluten: a Phosphorus Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy and Freeze-fracture Electron Microscopy Study. *J. Cereal Sci.* 5 (1987), 101-115.
- 46 SKERRITT, J. H., HAC, L. and BEKES, F.: Depolymerisation of the Glutenin Macropolymer During Dough Mixing: I. Changes in Levels, Molecular Weight Distribution, and Overall Composition. *Cereal Chem.* 76 (1999), 3., 395-401.
- 47 SKERRITT, J. H., HAC, L., LINDSAY, M. P. and BEKES, F.: Depolymerisation of the Glutenin Macropolymer During Dough Mixing: II. Differences in Retention of Specific Glutenin Subunits. *Cereal Chem.* 76 (1999), 3., 402-409.

- 48 SULLIVAN, B., HOWE, M., SCHMALZ, F. D. and ASTLEFORD, G. R.: The action of oxidizing and reducing agents on flour. *Cereal Chem.* 17 (1940), 507-528.
- 49 FRATER, R., HIRD, J. F. R., MOSS, H. J. and YATES, J. R. A.: A Role for thiol and disulphide groups in determining the rheological properties of dough made from wheaten flour. *Nature* 186 (1960) 451-454.
- 50 TILLEY, K. A., BENJAMIN, R. E., BAGOROGOZA, K. E., OKOT-KOTBER, B. M., PRAKASH, O. and KWEN, H.: Tyrosine Cross-Links: Molecular Basis of Gluten Structure and Function. *J. Agric. Food Chem.* 49 (2001), 2627-2632.
- 51 HAHN, B. and GROSCH, W.: Distribution of Glutathione in Osborne Fractions as Affected by Additions of Ascorbic Acid, Reduced and Oxidised Glutathione. *J. Cereal Sci.* 27 (1998), 117-125.
- 52 WEEGELS, P. L., HAMER, R. J. and SCHOFIELD, J. D.: Depolymerisation and Repolymerisation of Wheat Glutenin During Dough Processing. II. Changes in Composition. *J. Cereal Sci.* 25 (1997), 155-163.
- 53 DUPUIS, B., BUSHUK, W. and SPIRSTEIN, H. D.: Characterization of Acetic Acid Soluble and Insoluble Fractions of Glutenin of Bread Wheat. *Cereal Chem.* 73 (1996), 1, 131-135.
- 54 AMEND, T.: Der Mechanismus der Teigbildung: Vorstoß in den molekularen Strukturbereich. *Getreide Mehl und Brot* 49 (1995), 6., 359-362.
- 55 WEEGELS, P. L., VAN DE PIJPEKAMP, A. M., GRAVELAND, A., HAMER, R. J. and SCHOFIELD, J. D.: Depolymerisation and Repolymerisation of Wheat Glutenin During Dough Processing. I. Relationship between Glutenin Macropolymer Content and Quality Parameters. *J. Cereal Sci.* 23 (1996), 103-111.
- 56 EWART, J. A. D.: Recent Research and Dough Viscoelasticity. *Bakers' Dig.* 46 (1972), 4., 22-26.

- 57 TANAKA, K. and BUSHUK, W.: Changes in Flour Proteins during Dough-Mixing. II. Gel Filtration and Elektrophoresis Results. *Cereal Chem.* 50 (1973), 597-612.
- 58 BORNEO, R. and KHAN, K.: Protein Changes During Various Stages of Breadmaking of Flour Spring Wheats: Quantification by Size-Exclusion HPLC. *Cereal Chem.* 76 (1999), 5. 711-717.
- 59 TSCHEUSCHNER, H.-D.: Rheologie der Lebensmittel. In: TSCHEUSCHNER, H.-D. (Hrsg.). *Grundzüge der Lebensmitteltechnik*, Behr's Verlag, Hamburg, (1996).
- 60 OLIVER, J. R. and ALLEN, H. M.: The Prediction of Baking Performance Using the Farinograph and Extensograph. *J. Cereal Sci.* 15 (1992), 79-85.
- 61 MANI, K., ELIASSON, A-C., LINDAHL, L. and TRÄGARDH, C.: Rheological Properties and Breadmaking Quality of Wheat Flour Doughs Made with Different Dough Mixers. *Cereal Chem.* 69(1992), 2., 222-225.
- 62 FÆRGESTAD, E. M., MAGNUS, E. M., SAHLSTRÖM, S. and NÆS, T.: Influence of Flour Quality and Baking Process on Hearth Bread Characteristic Made Using Gentle Mixing. *J. Cereal Sci.* 30 (1999), 61-70.
- 63 GUPTA, R. B., BATEY, I. L. and MACRITCHIE, F.: Relationships Between Protein Composition and Funcional Properties of Wheat Flours. *Cereal Chem.* 69 (1992), 2., 125-131.
- 64 BARNES, W. C. and HARE, R. A.: Glutenin Aspects of Dough Mixing Tolerance. In: WRIGLEY, C. W., (Ed.). *Gluten Proteins*. Cereal Chemistry Division, Melbourne, (1996), 272-273.
- 65 UTHAYAKUMARAN, S., GRAS, P. W., STODARD, F. L. and BEKES, F.: Effect of Varying Protein Content and Glutenin-to-Gliadin Ration on the Functional Properties of Wheat Dough. *Cereal Chem.* 76 (1999), 3. 389-394.
- 66 TIPPLES, K. H. and KILBORN, R. H.: „Unmixing“-The Disorientation of Development Bread Dough by Slow Speed Mixing. *Cereal Chem.* 52 (1975), 248-262.

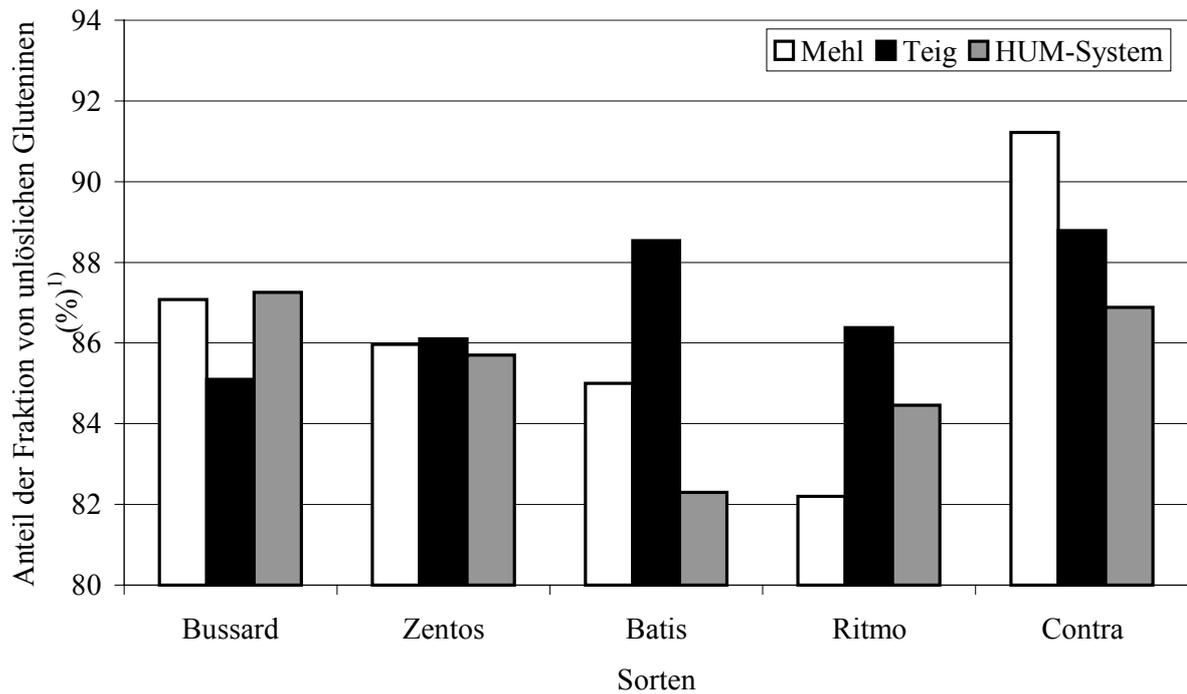
- 67 PAREDES-LOPEZ, O. and BUSHUK, W.: Development and „Undevelopment“ of Wheat Dough by Mixing: Physicochemical Studies. *Cereal Chem.* 60 (1983), 1., 19-23.
- 68 RASPER, V. F. and PRESTON, K. R.: *The Extensograph Handbook*. AACC, St. Paul, (1991).
- 69 FARIDI, H. and RASPER, V. F.: *The Alveograph Handbook*. AACC, St. Paul, (1987).
- 70 WEIPERT, D.: Uniaxiale und Biaxiale Dehnung von Weizenteigen. 2. Teil: Bewertung von Weizensorten und –mahlerzeugnissen durch Extensogramm und Alveogramm. *Getreide Mehl und Brot* 45 (1991), 4. 167-172.
- 71 PAYNE, P. I., SEEKINGS, J. A., KAUR, H., KRATTIGER, A. F. and ROGERS, W. J.: Contribution of Allelic Variation of Glutenin Subunits and Gliadins to Bread-Making Quality. In: BUSHUK, W. and TKACHUK, R. (Ed.). *Gluten Proteins*. AACC, St. Paul, 1990, 504-511.
- 72 GUPTA, R. B. and MacRITCHIE, F.: Allelic Variation at Glutenin Subunits and Gliadin Loci, Glu-1, Glu-3 and Gli-1 of Common Wheats. II. Biochemical Basis of the Allelic Effects on Dough Properties. *J. Cereal Sci.* 19 (1994), 19-29.
- 73 HOU, G., YAMAMOTO, H. and P. K. W. NG: Relationships of Quantity of Gliadin Subgroups of Selected U. S. Soft Wheat Flours to Rheological and Baking Properties. *Cereal Chem.* 73 (1996), 3., 352-357.
- 74 HOU, G., YAMAMOTO, H. and P. K. W. NG: Relationships of Quantity of Glutenin Subunits of Selected U. S. Soft Wheat Flours to Rheological and Baking Properties. *Cereal Chem.* 73 (1996), 3., 358-363.
- 75 SINGH, N. K., DONOVAN, R. and MACRITCHIE, F.: Use of Sonication and Size-exclusion High-Performance Liquid Chromatography in the Study of Wheat Flour Proteins. II. Relative Quantity of Gluten as a Measure of Breadmaking Quality. *Cereal Chem.* 67 (1990), 2., 161-170.

- 76 GUPTA, R. B., BATEY, I. L. and MACRITCHIE, F.: Relationships Between Protein Composition and Functional Properties of Wheat Flours. *Cereal Chem.* 69 (1992), 2. 125-131.
- 77 WEEGELS, P. L., HAMER, R. J. and SCHOFIELD, J. D.: Critical Review: Functional Properties of Wheat Glutenin. *J. Cereal Sci.* 23 (1996), 1-18.
- 78 LAGUDAH, E. S., O'BRIEN, L. and HALLORAN, G. M.: Influence of Gliadin Composition and High Molecular Weight Subunits of Glutenin on Dough Properties in a F₃ Population of Bread Wheat Cross. *J. Cereal Sci.* 7 (1988), 33-42.
- 79 CIAFFI, M., TOZZI, L. and LAFIANDRA, D.: Relationship Between Flour Protein Composition Determined By Size-Exclusion High-Performance Liquid Chromatography and Dough Rheological Parameters. *Cereal Chem.* 73 (1996), 3., 346-351.
- 80 SCHROPP, P. and WIESER, H.: Effects of High Molecular Weight Subunits of Glutenin on the Rheological Properties of Wheat Gluten. *Cereal Chem.* 73 (1996), 3., 410-413.
- 81 FIDO, R. J., BEKES, F., GRAS, P. W. and TATHAM, A. S.: Effects of α -, β -, γ -, ω -Gliadins on the Dough Mixing Properties of Wheat Flour. *J. Cereal Sci.* 26 (1997), 271-277.
- 82 WOODING, A. R., KAVALE, S., MACRITCHIE, F. and STODDARD, F. L.: Link Between Mixing Requirements and Dough Strength. *Cereal Chem.* 76 (1999), 5. 800-806.
- 83 NAVICKIS, L. L., ANDERSON, R. A., BAGLEY, E. B. and JASBERG, B. K.: Viscoelastic Properties of Wheat Flour Doughs: Variation of Dynamic Moduli with Water and Protein Content. *Journal of Texture Studies* 13 (1982), 249-264.
- 84 SZCZESNIAK, A. S., LOH, J. and MANNELE, W. R.: Effect of Moisture Transfer on Dynamic Viscoelastic Parameters of Wheat Flour/Water Systems. *J. Rheol.* 27 (1983), 537-556.

- 85 MITA, T. and MATSUMOTO, H.: Dynamic viscoelastic Properties of Concentrated Dispersions of Gluten and Gluten Methyl Ester Contributions of Glutamine Side Chain. *Cereal Chem.* 61 (1984), 169-173.
- 86 SMITH, J. R., SMITH, T. L. and TSCHOEGL, N. W.: Rheological Properties of Wheat Flour Doughs. III. Dynamic Shear Modulus and its Dependence on Amplitude, Frequency and Dough Composition. *Rheol. Acta* 9 (1970), 239-252.
- 87 RINDE, J. A., TSCHOEGL, N. W. and SMITH, T. L.: Large-Deformation and Rupture Properties of Wheat Flour Gluten. *Cereal Chem.* 47 (1970), 225-235.
- 88 KHATKAR, B. S., BELL, A. E. and SCHOFIELD, J. D.: Dynamic Rheological Approaches to Understanding the Fundamental Basis of Wheat Gluten Viscoelasticity. In: WRIGLEY, C. W., (Ed.). *Gluten Proteins*. Cereal Chemistry Division, Melbourne, (1996), 234-237.
- 89 TSIAMI, A. A., BOT, A. and AGTEROF, W. G. M.: Rheology of Mixtures of Glutenin Subfractions. *J. Cereal Sci.* 27 (1997), 279-287.
- 90 CAMPOS, D. T., STEFFE, J. F. and P. K. W. NG: Rheological Behaviour of Undeveloped and Developed Wheat Dough. *Cereal Chem.* 74 (1997), 4., 489-494.
- 91 BERNARDIN, J. E. and KASARDA, D. D.: The Microstructure of Wheat Protein Fibrils. *Cereal Chem.* 50 (1973), 735-745.
- 92 FRETZDORF, B., BECHTEL, D. B. and POMERANZ, Y.: Freeze-Fracture Ultrastructure of Wheat Flour Ingredients, Dough, and Bread. *Cereal Chem.* 59 (1982), 2., 113-120.
- 93 AMEND, T. and BELITZ, H.-D.: The formation of dough and gluten-a study by scanning electron microscopy. *Z Lebensm Unters Forsch* 190 (1990), 401-409.
- 94 POMERANZ, Y., MEYER, D. and SEIBEL, W.: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen über die Struktur von Weizen(mehl)-, Weizenmisch- und Roggenteigen und Broten. *Getreide Mehl und Brot* (1984), 5., 138-146.

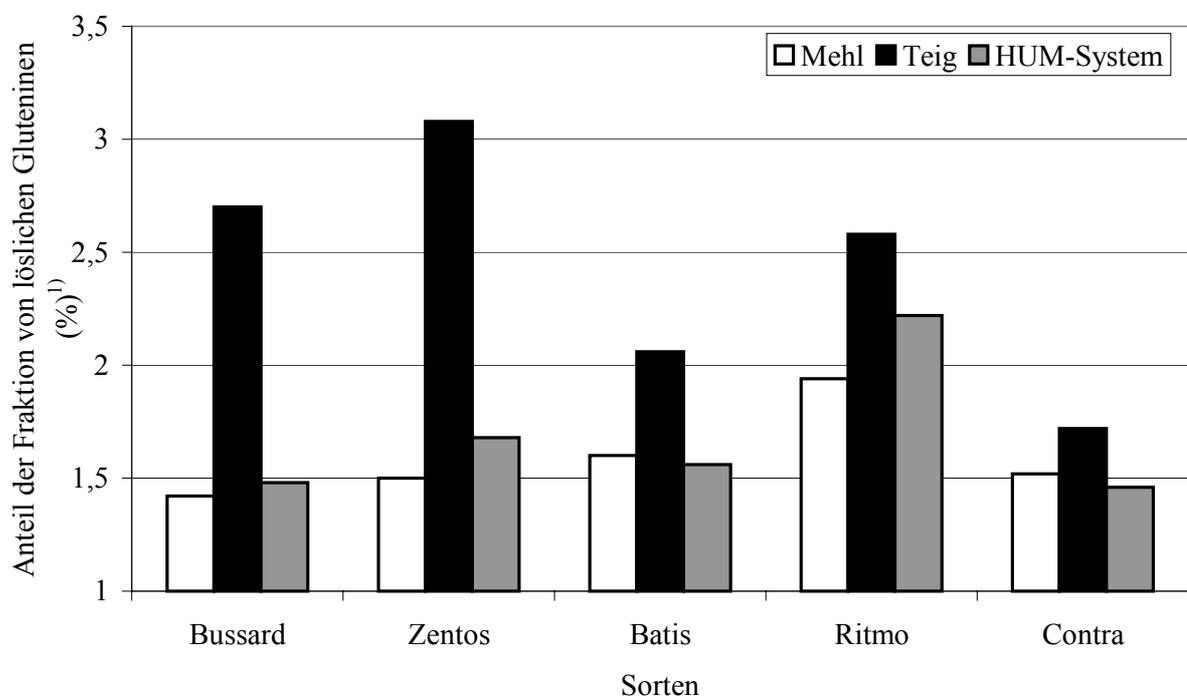
- 95** PAREDES-LOPEZ, O. and BUSHUK, W.: Development and „Undevelopment“ of Wheat Dough by Mixing: Microscopic Structure and its Relations to Bread-making Quality. *Cereal Chem.* 60(1983), 1., 24-27.
- 96** BACHE, I. C. and DONALD, A. M.: The Structure of the Gluten Network in Dough: a Study using Environmental Scanning Electron Microscopy. *J. Cereal Sci.* 28 (1998), 127-133.
- 97** Standard-Methoden der Internationalen Gesellschaft für Getreidechemie (ICC). Verlag Moritz Schäfer, Detmold, (1999).
- 98** KUCHLING, H.: Taschenbuch der Physik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt, (1984).
- 99** D'APOLONIA, B. L., and KUNERTH, W. H.: The Farinograph Handbook. AACC, St. Paul, (1984).
- 100** NIERLE, W.: Löslichkeit und Fraktionierung von Weizenproteinen. *Getreide, Mehl und Brot* 10 (1984), 315-319.
- 101** EWART, J. A. D.: Fractional Extraction of Cereal Flour Proteins. *J. Sci. Fd Agric.*, 19 (1968), 241-245.
- 102** STATISTICA 6.0, StatSoft, Inc., Tulsa, USA, (2001).
- 103** CHEFTEL, J. C., CUQ, J. L., LORIENT, D.: Lebensmittelproteine. Behr's...Verlag, Hamburg, (1992).
- 104** BELITZ, H.-D., GROSCH, W.: Lehrbuch der Lebensmittelchemie. Springer-Verlag, Berlin, (1992).
- 105** KARLSON, P.: Biochemie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, (1988).
- 106** TSCHEUSCHNER, H.-D.: Physiko-chemische Grundlagen disperser Lebensmittelstoffe. In: TSCHEUSCHNER, H.-D. (Hrsg.). Grundzüge der Lebensmitteltechnik, Behr's Verlag, Hamburg, (1996).

X Anhang



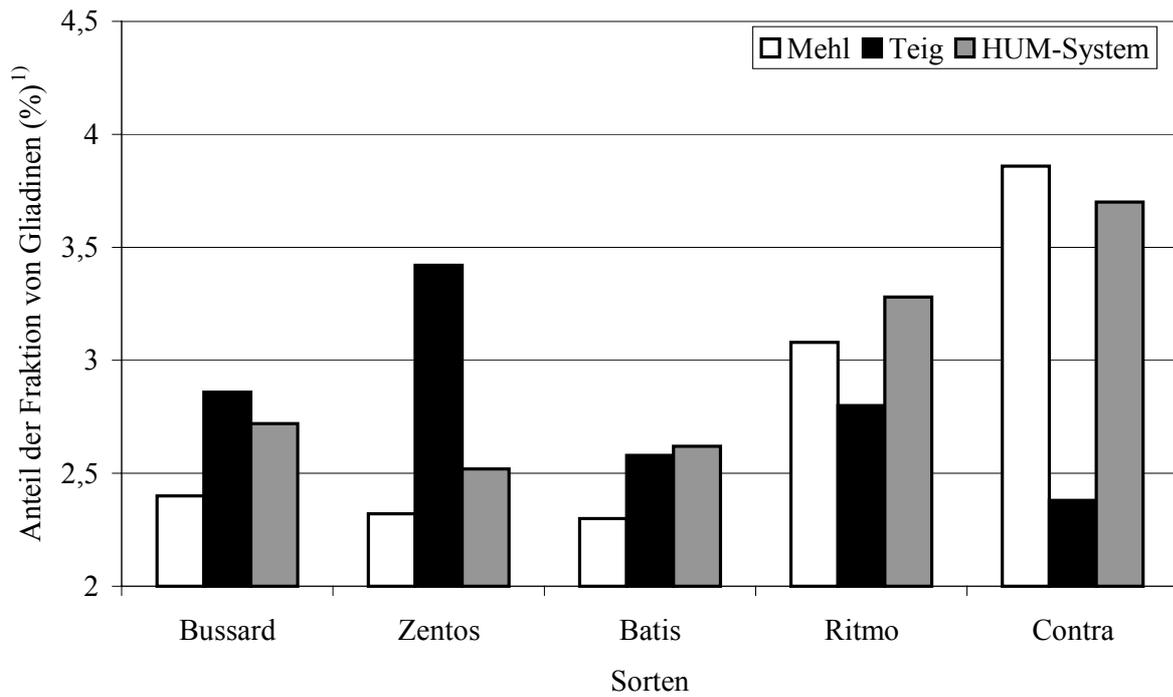
¹⁾ Bezogen auf Trockensubstanz

Abb. 89: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Der Gehalt der Fraktion von unlöslichen Gluteninen.



¹⁾ Bezogen auf Trockensubstanz

Abb. 90: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Der Gehalt der Fraktion von löslichen Gluteninen.



¹⁾ Bezogen auf Trockensubstanz

Abb. 91: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Der Gehalt der Fraktion von Gliadinen.

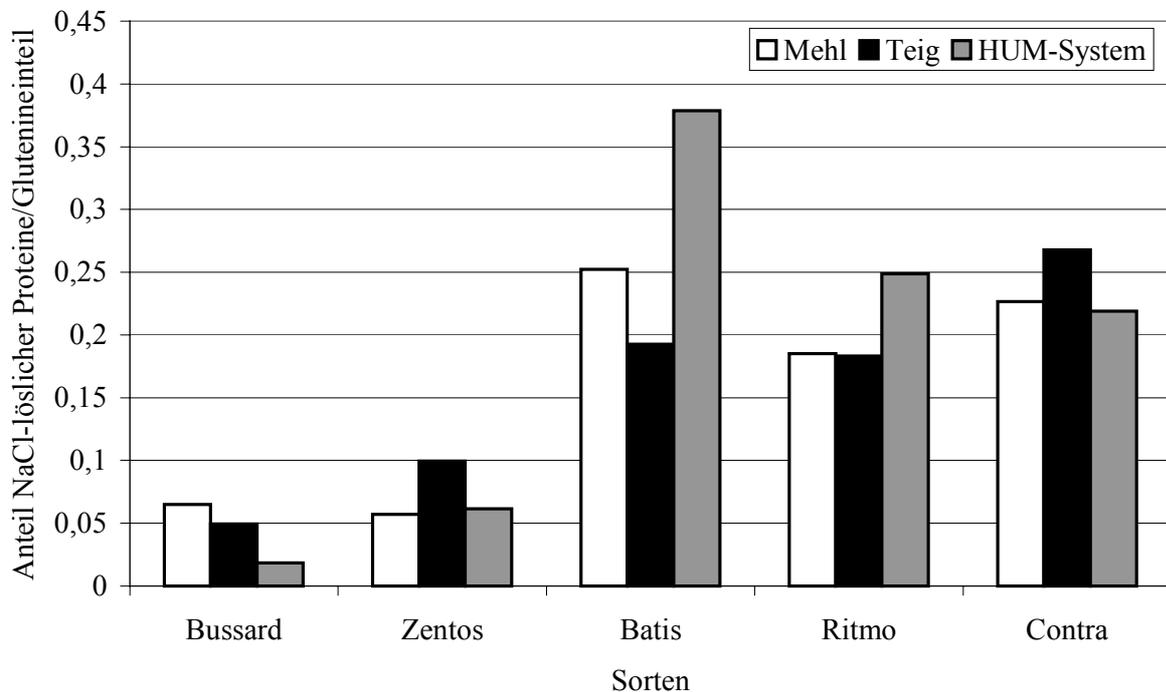


Abb. 92: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Das Verhältniss von den NaCl-löslichen Proteinen zu den Gluteninen.

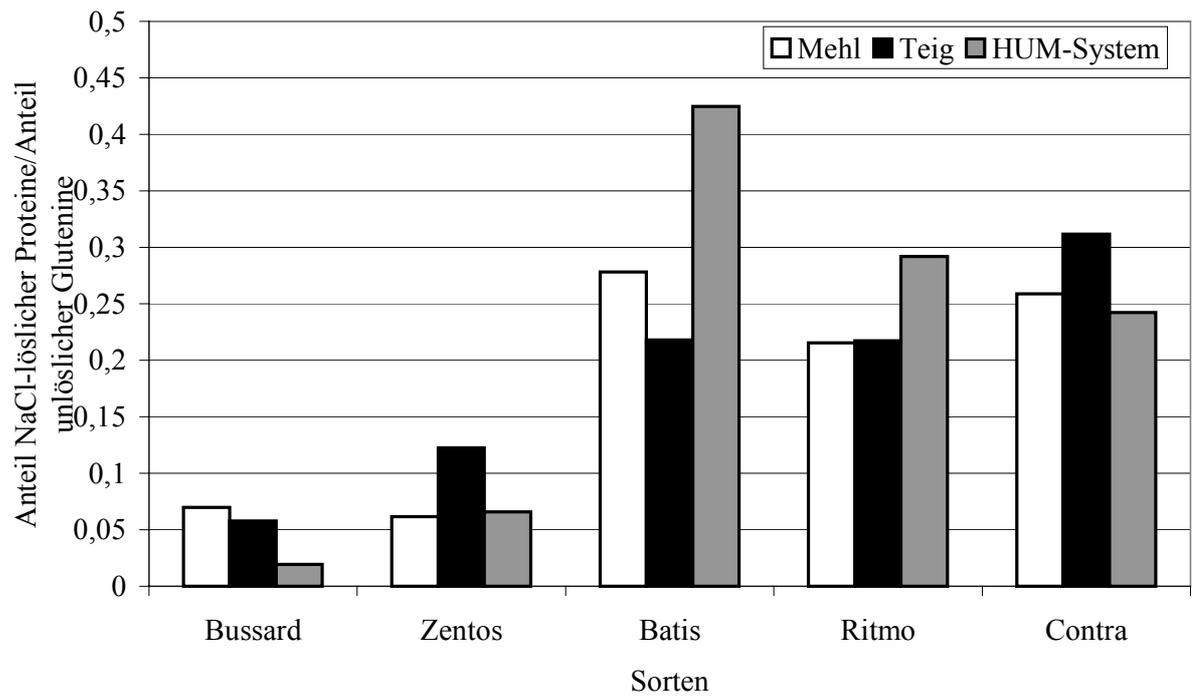


Abb. 93: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Das Verhältniss von den NaCl-löslichen Proteinen zu den unlöslichen Gluteninen.

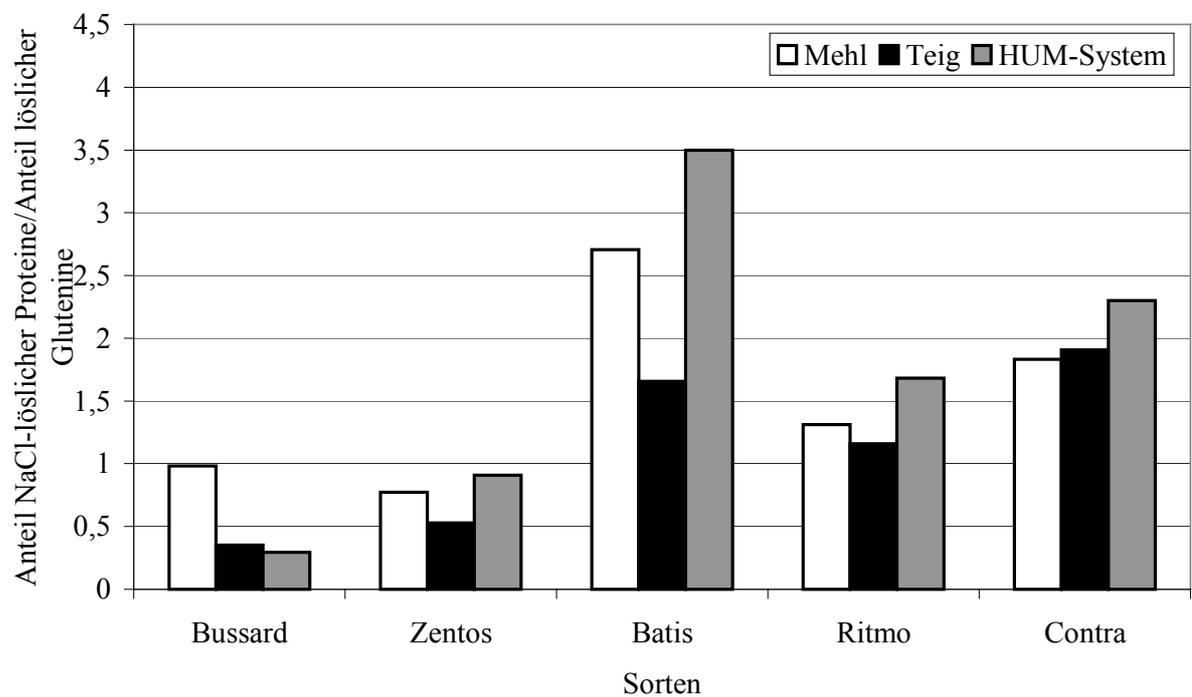


Abb. 94: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Das Verhältniss von den NaCl-löslichen Proteinen zu den löslichen Gluteninen.

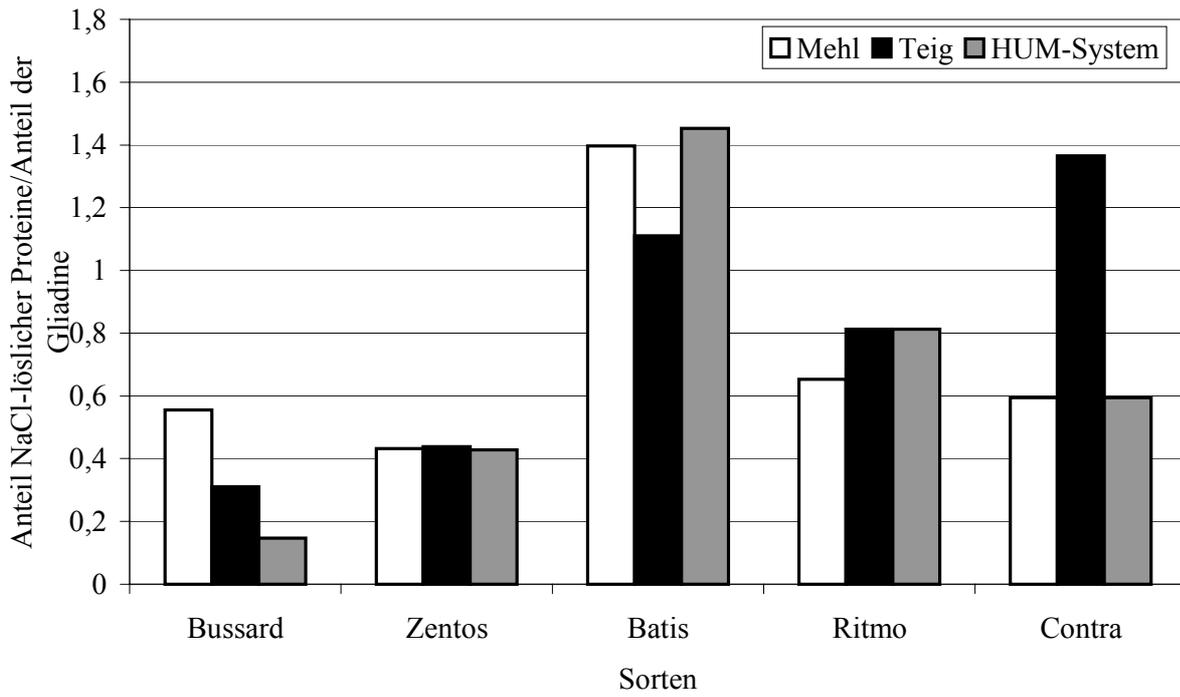
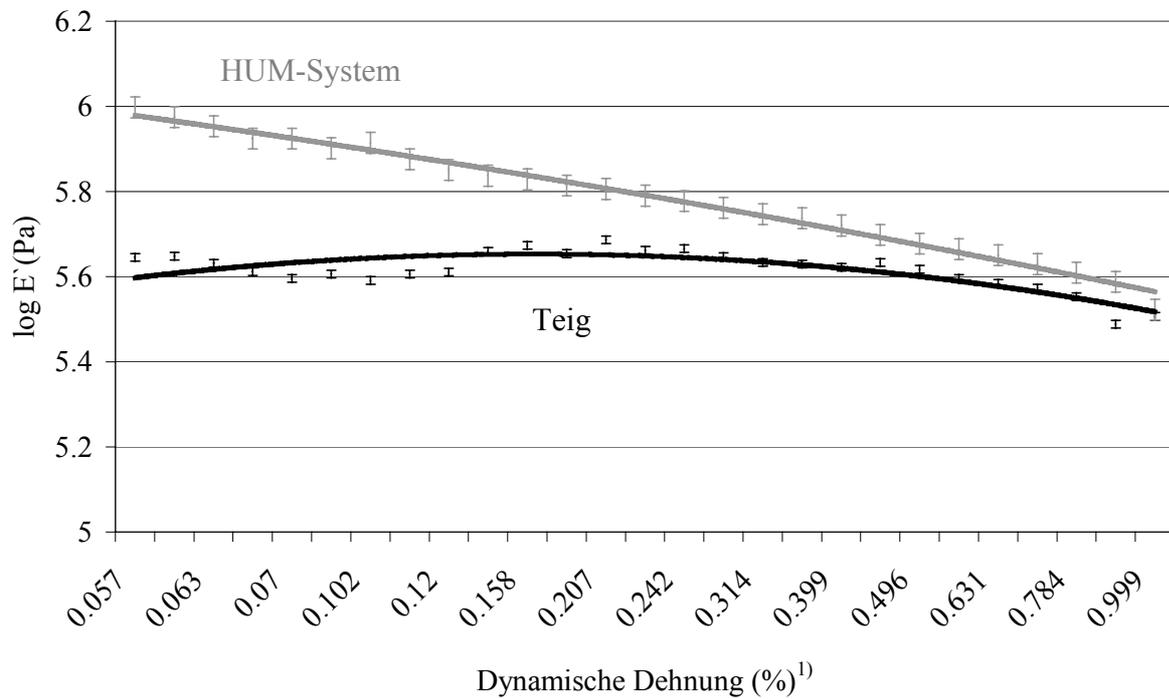
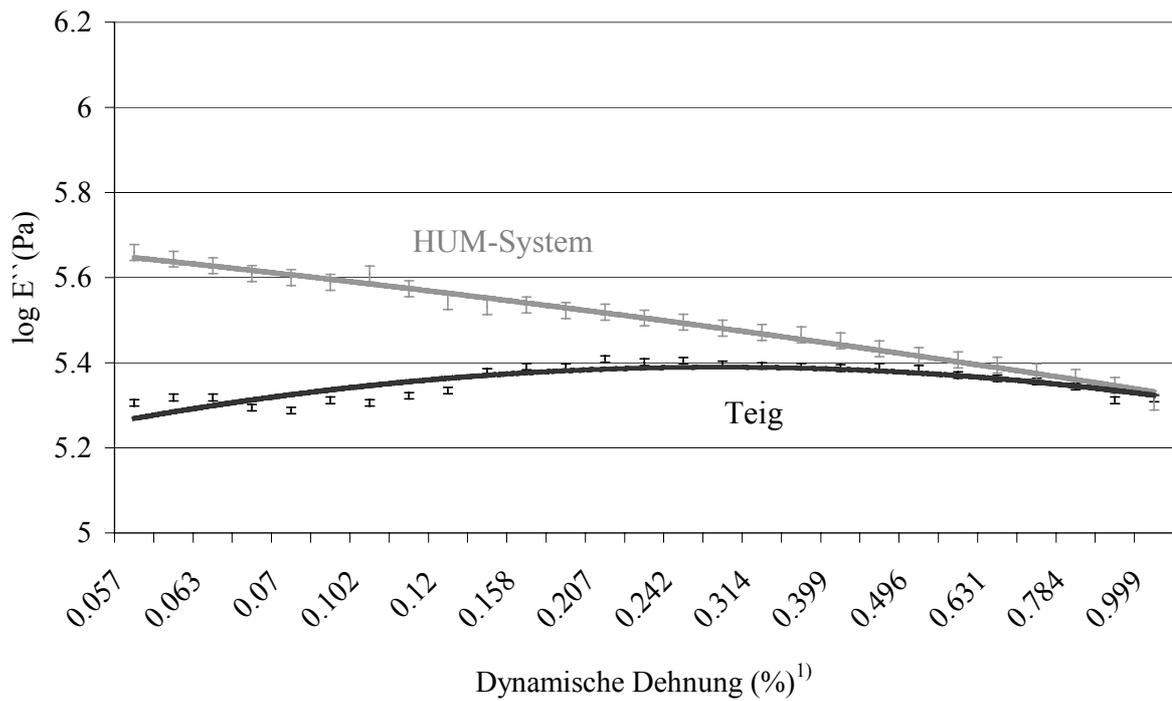


Abb. 95: Ergebnisse der modifizierten Fraktionierung nach Osborne: Das Verhältniss von den NaCl-löslichen Proteinen zu den Gliadinen.



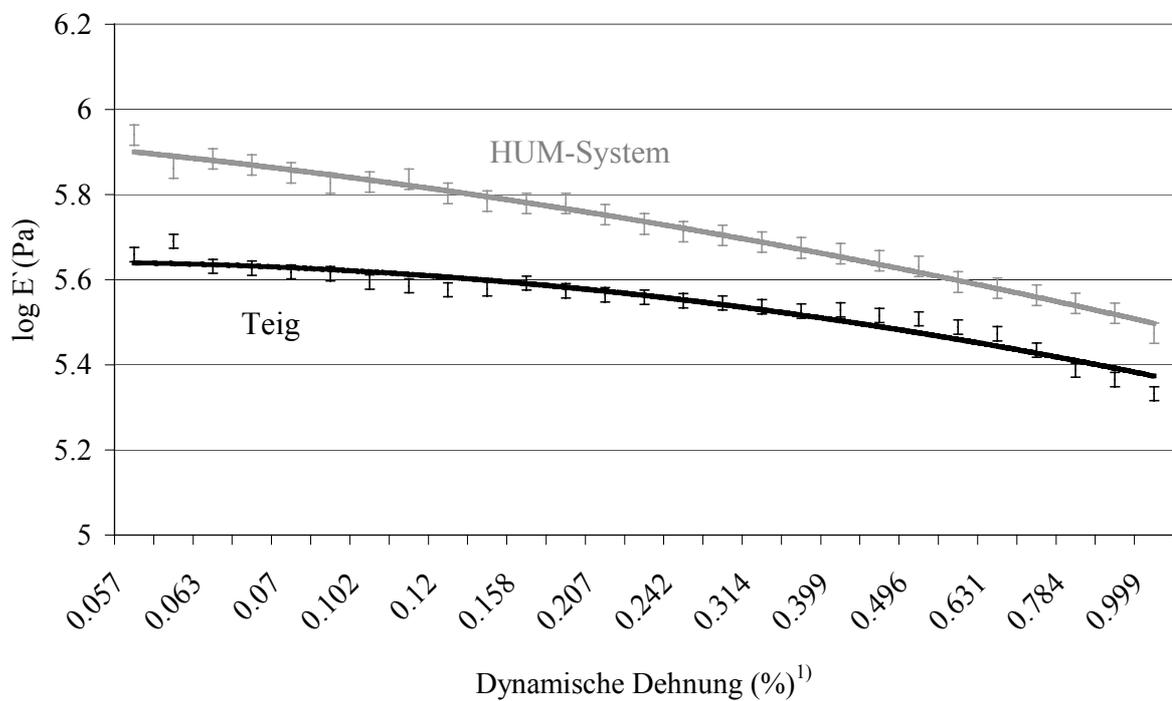
¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 96: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Elastizitätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Bussard** im Deformationsversuch.



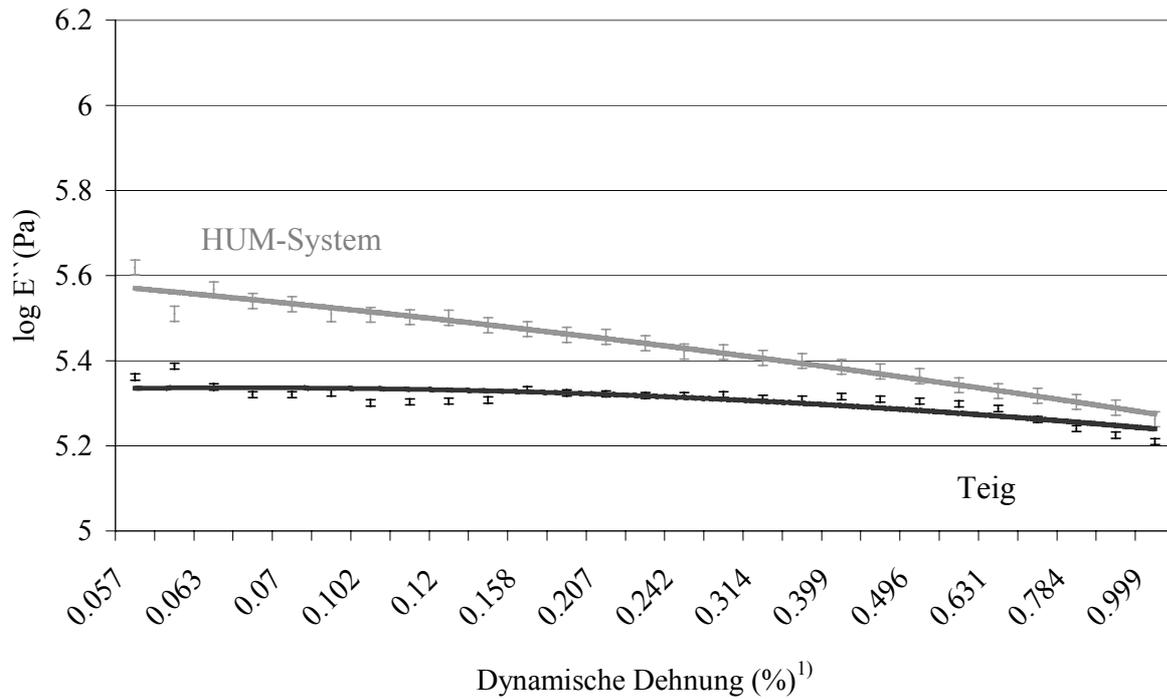
¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 97: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Viskositätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Bussard** im Deformationsversuch.



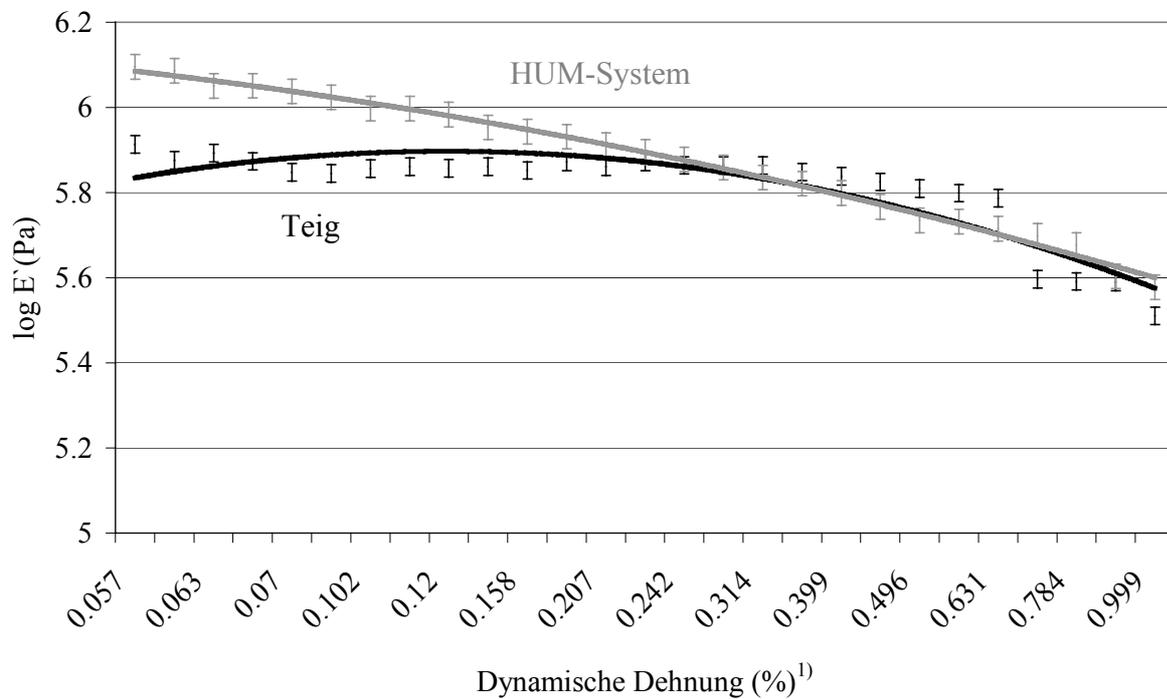
¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 98: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Elastizitätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Zentos** im Deformationsversuch.



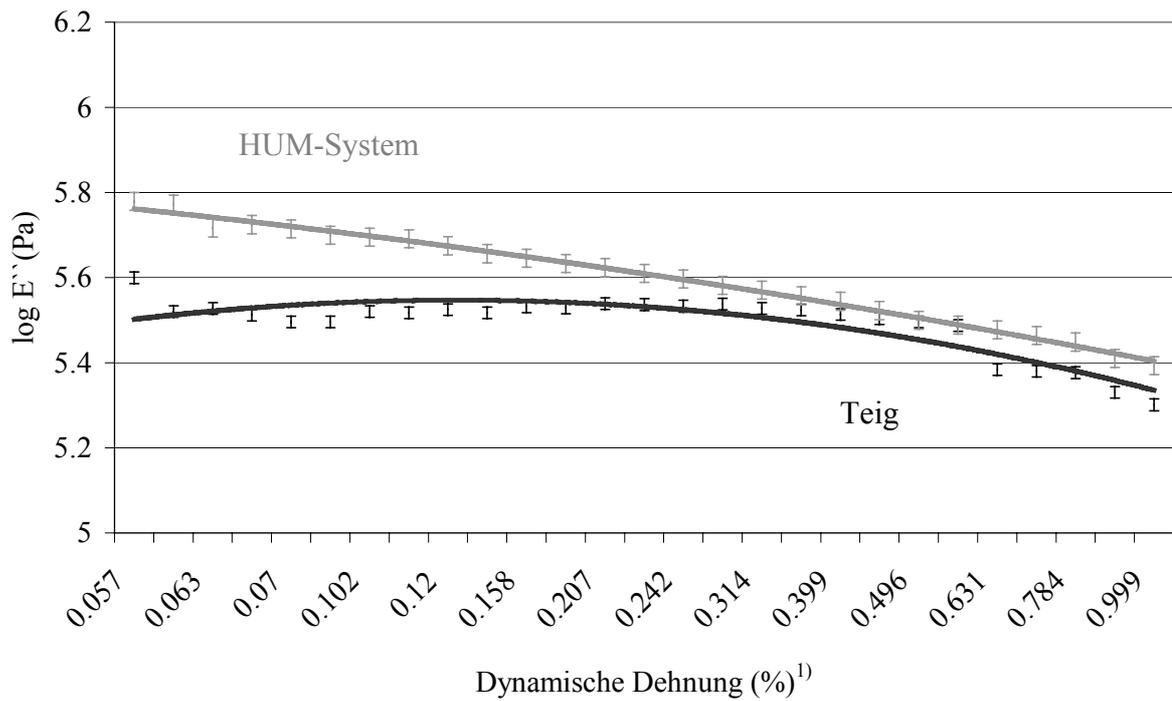
¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 99: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Viskositätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Zentos** im Deformationsversuch.



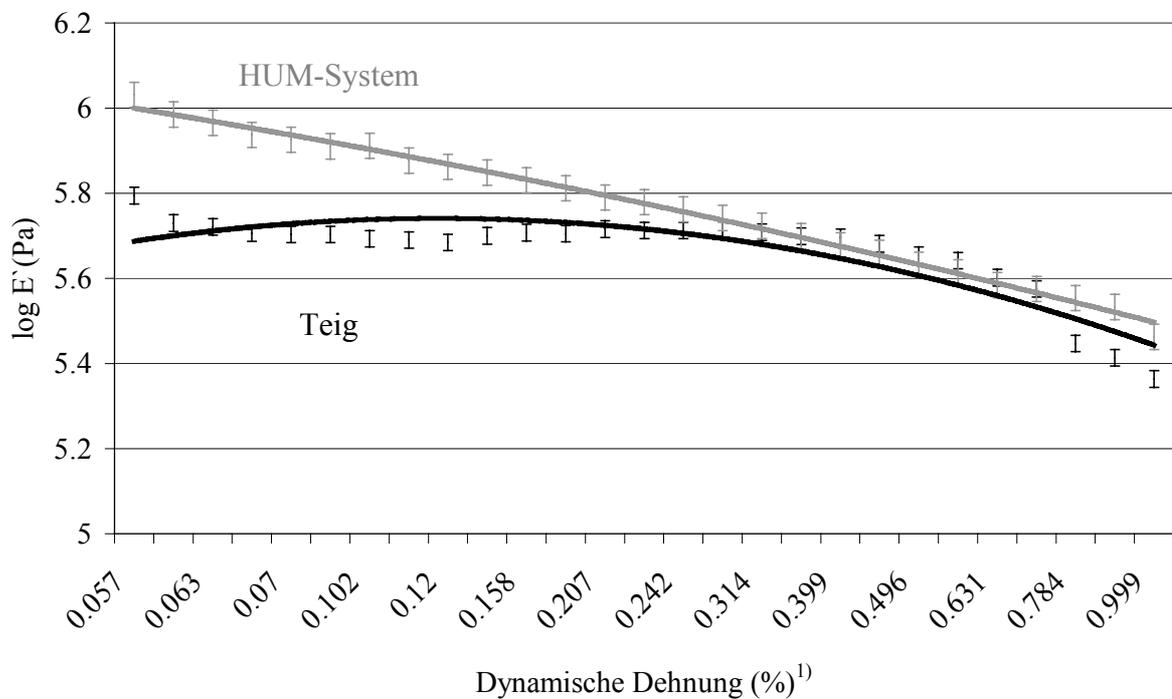
¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 100: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Elastizitätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Batis** im Deformationsversuch.



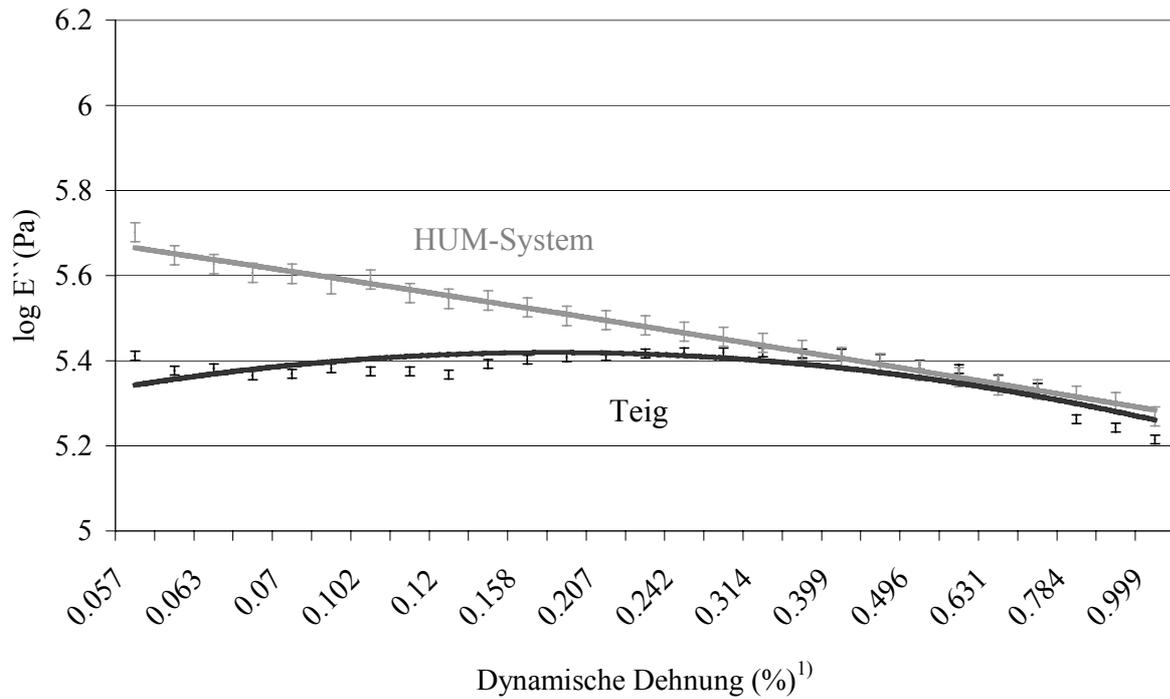
¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 101: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Viskositätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Batis** im Deformationsversuch.



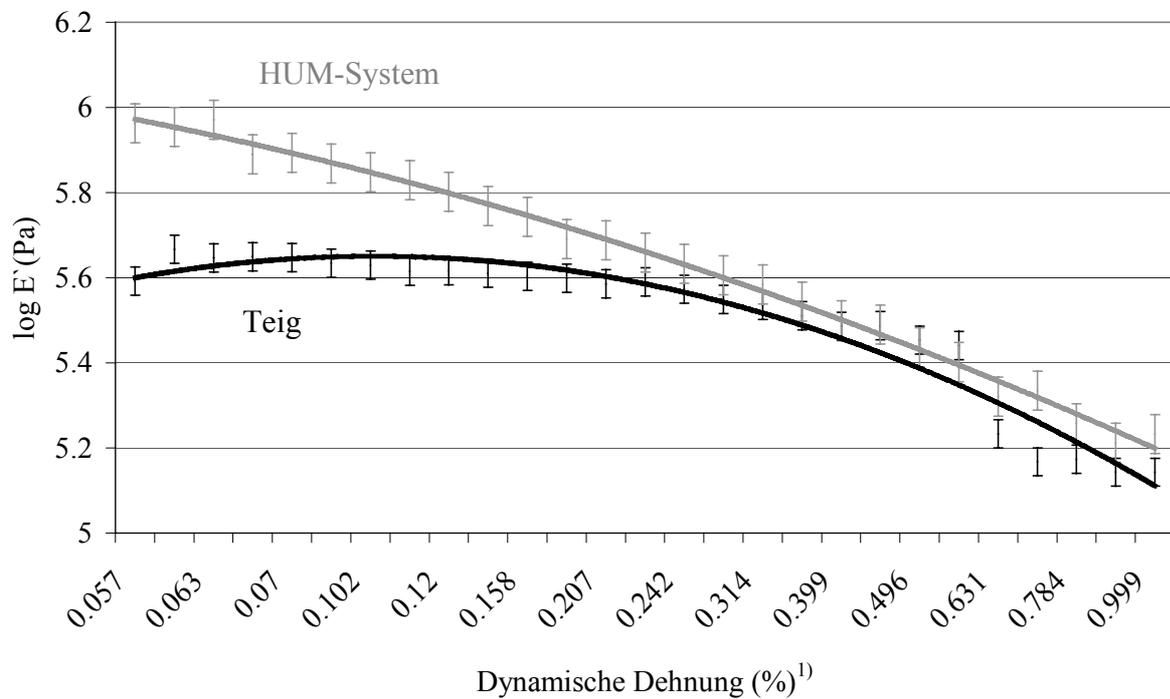
¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 102: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Elastizitätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Ritmo** im Deformationsversuch.



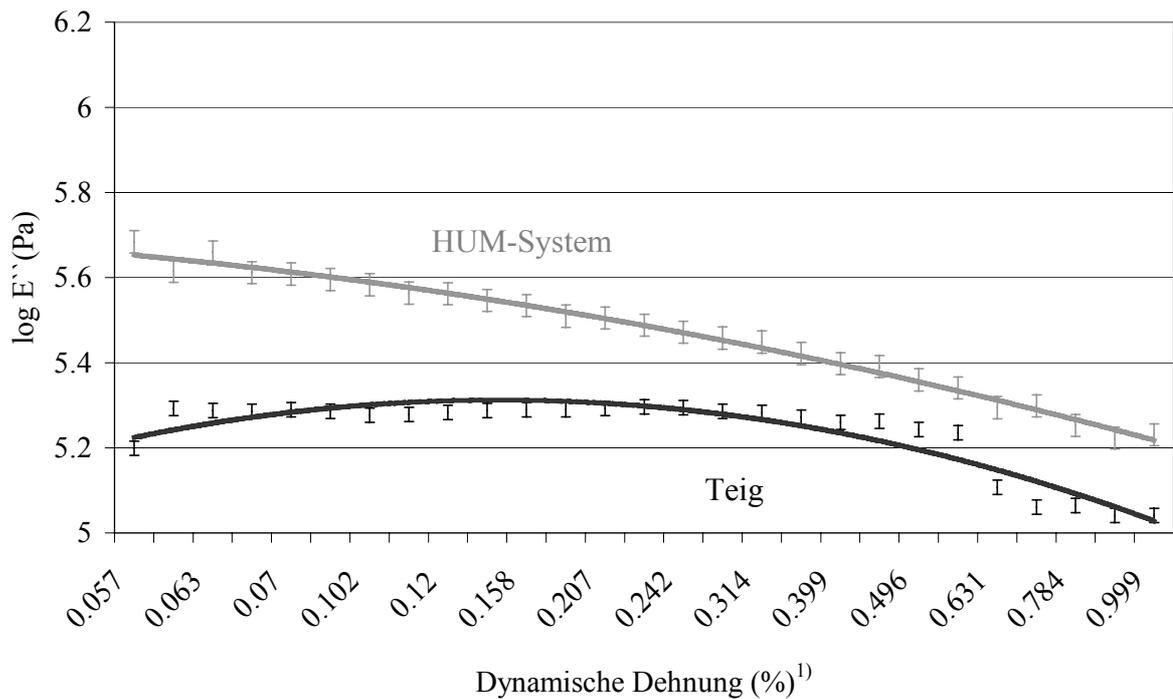
¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 103: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Viskositätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Ritmo** im Deformationsversuch.



¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 104: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Elastizitätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Contra** im Deformationsversuch.



¹⁾ Bezogen auf eine Dehnung von 5 mm

Abb. 105: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Viskositätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Contra** im Deformationsversuch.

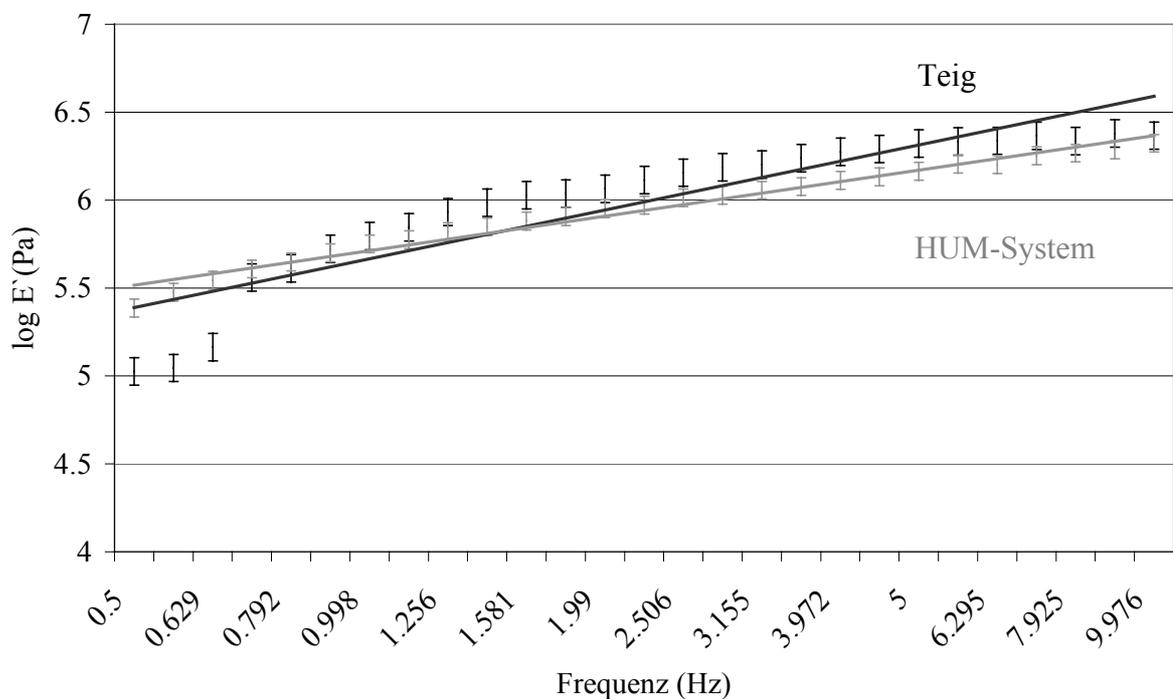


Abb. 106: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Elastizitätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Bussard** im Frequenzversuch.

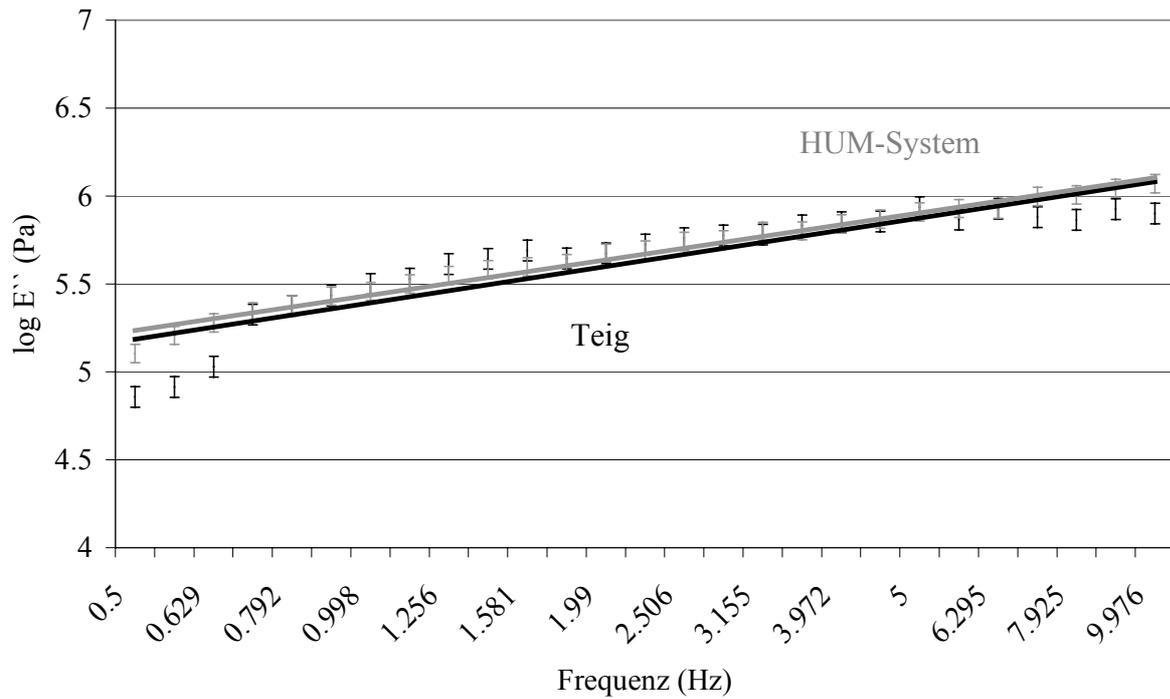


Abb. 107: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Viskositätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Bussard** im Frequenzversuch.

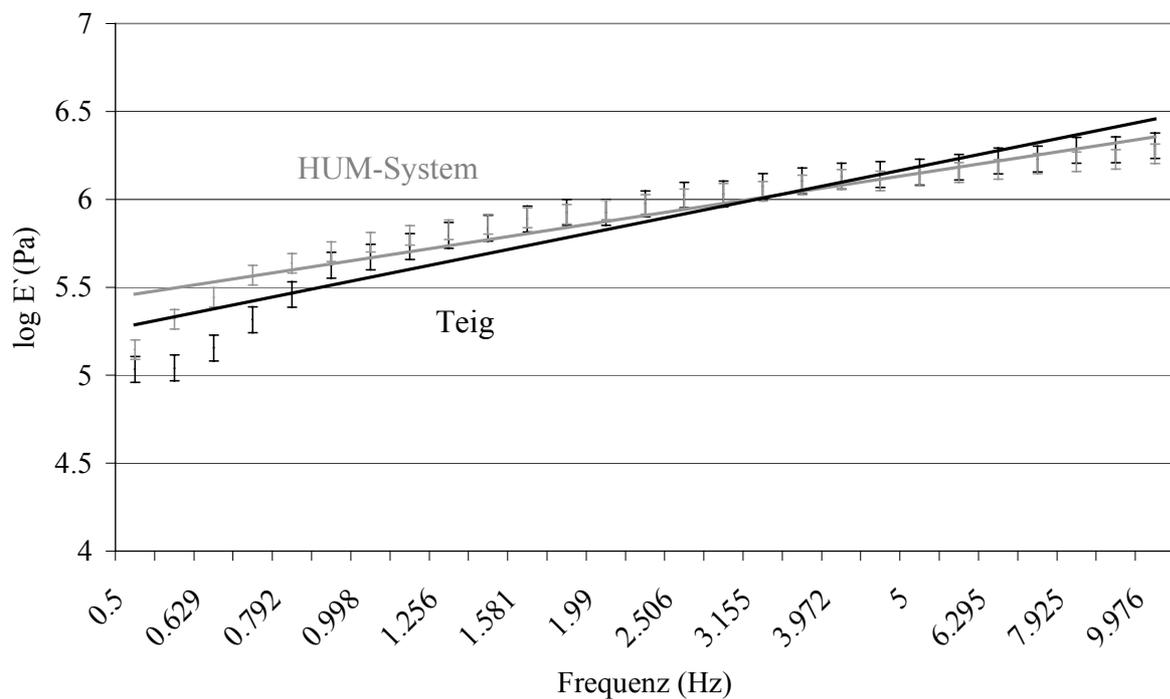


Abb. 108: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Elastizitätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Zentos** im Frequenzversuch.

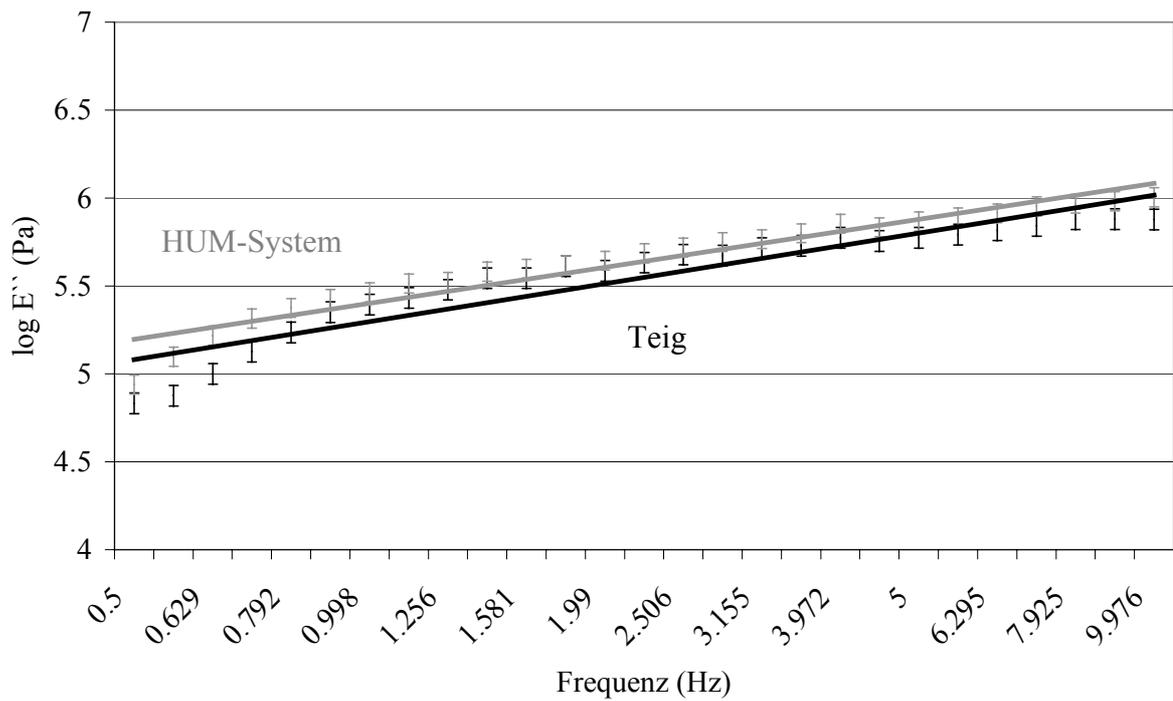


Abb. 109: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Viskositätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Zentos** im Frequenzversuch.

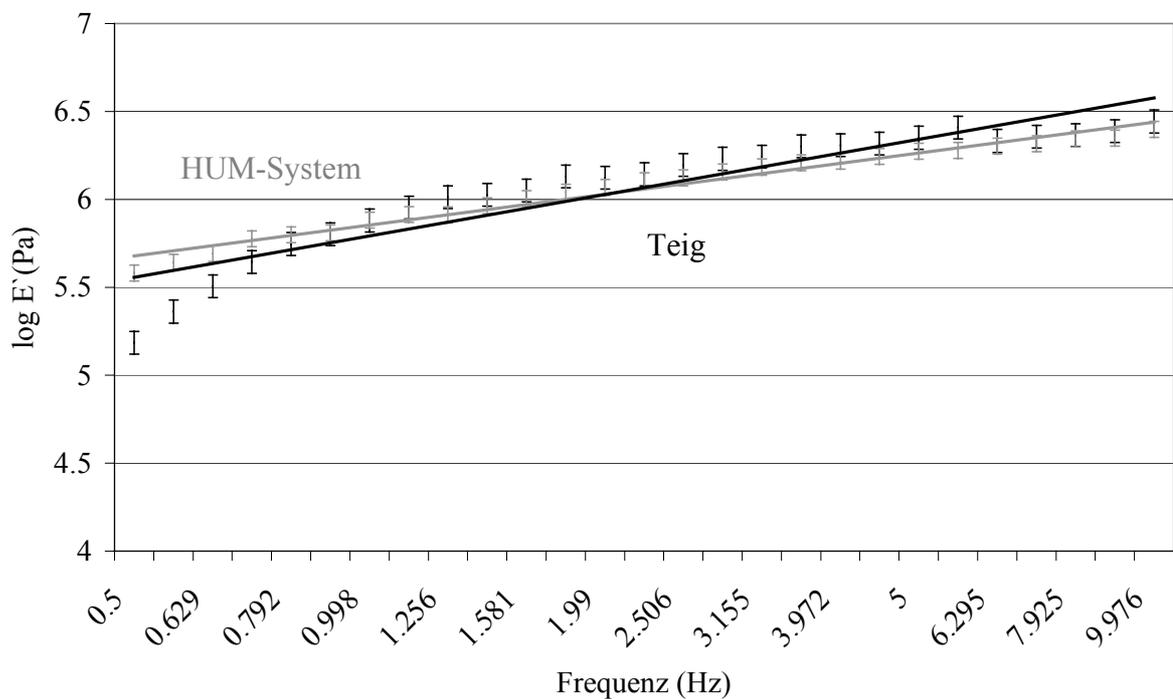


Abb. 110: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Elastizitätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Batis** im Frequenzversuch.

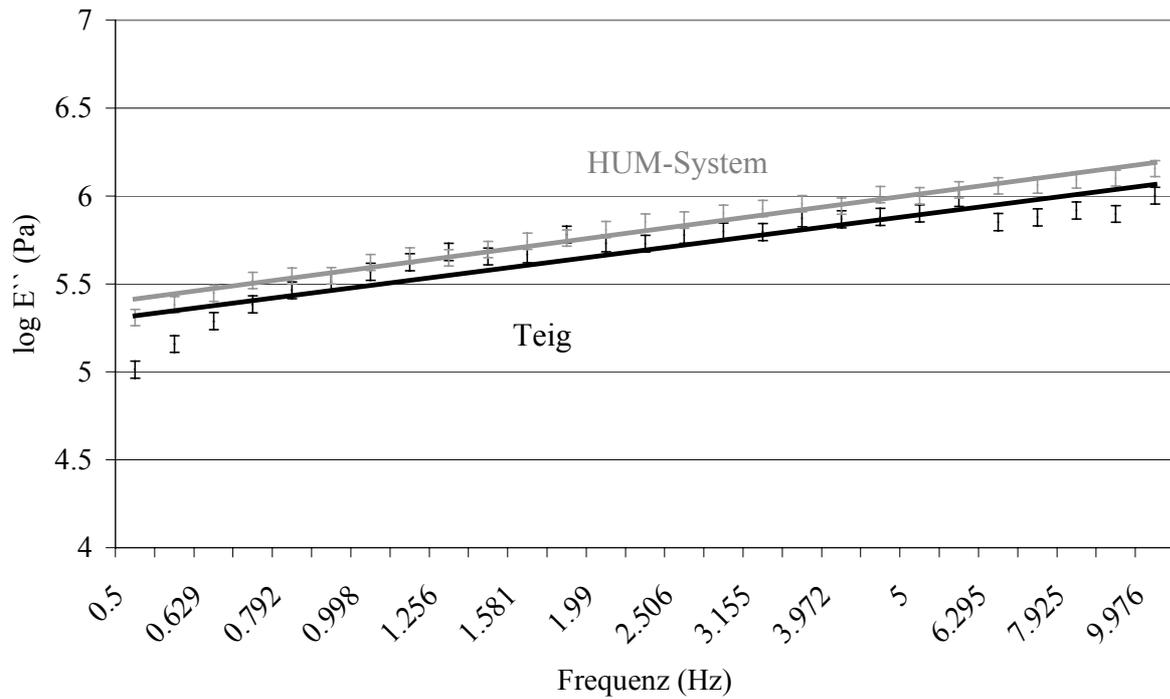


Abb. 111: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Viskositätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Batis** im Frequenzversuch.

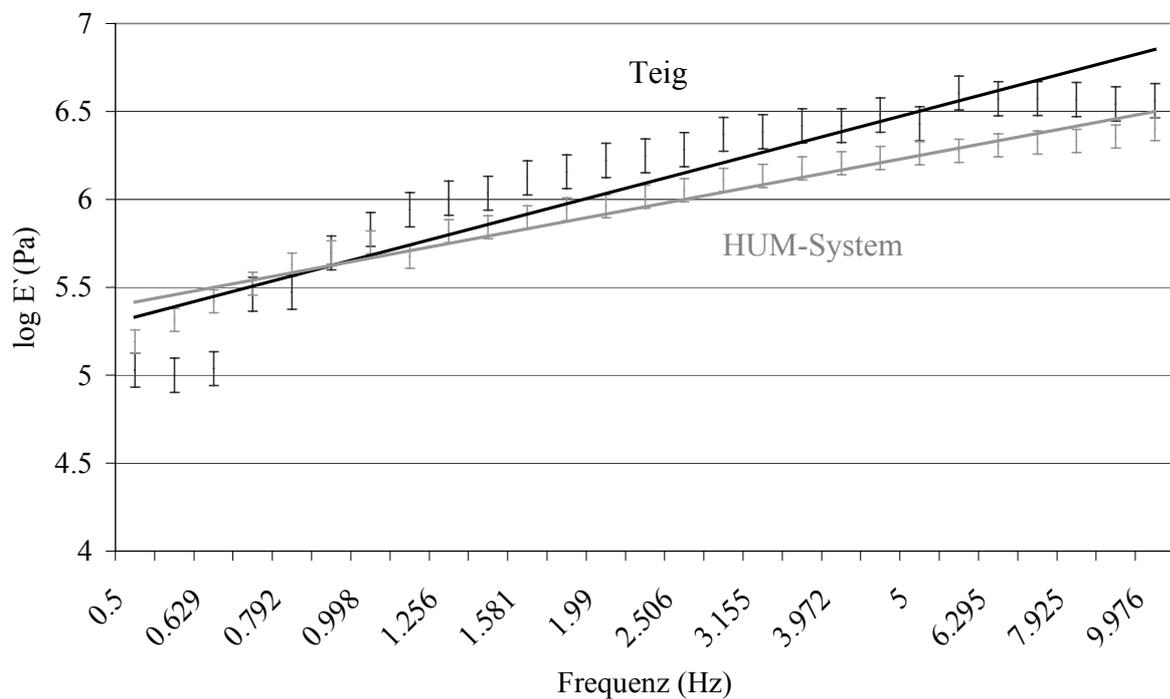


Abb. 112: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Elastizitätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Ritmo** im Frequenzversuch.

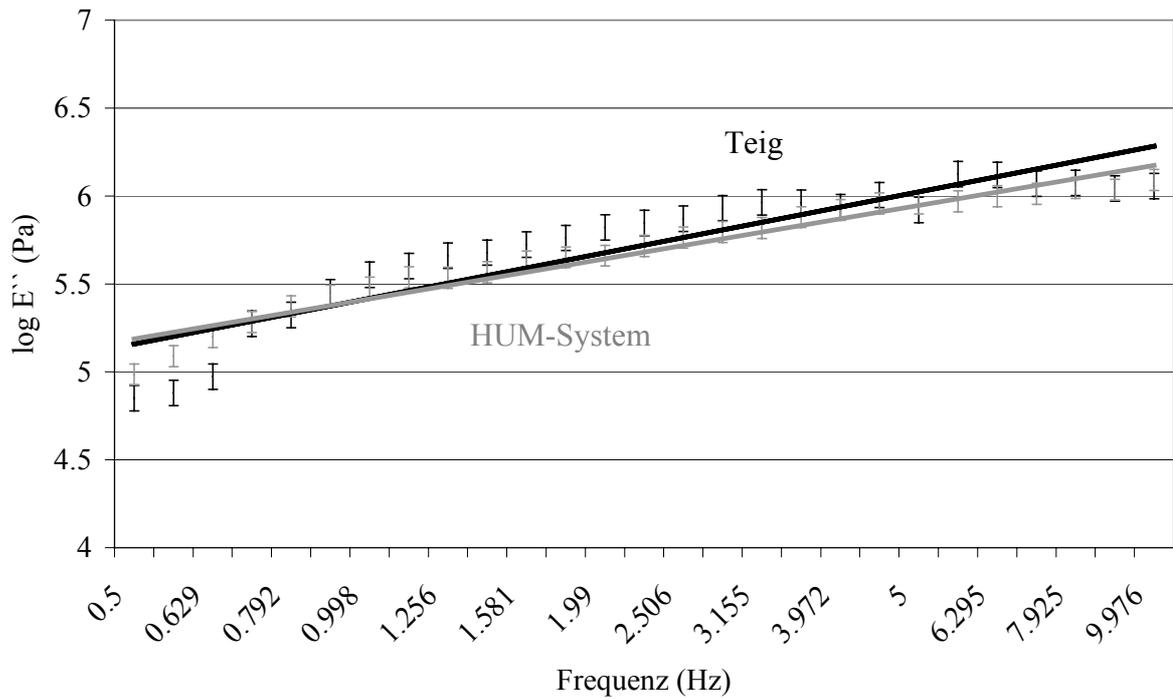


Abb. 113: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Viskositätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Ritmo** im Frequenzversuch.

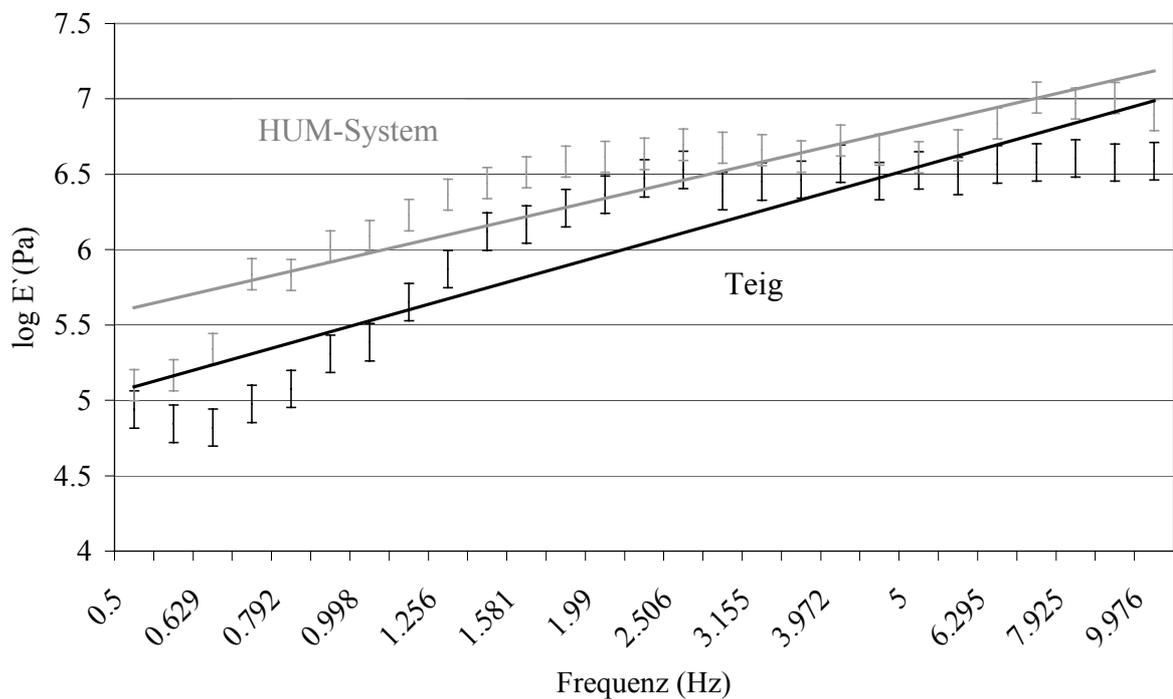


Abb. 114: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Elastizitätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Contra** im Frequenzversuch.

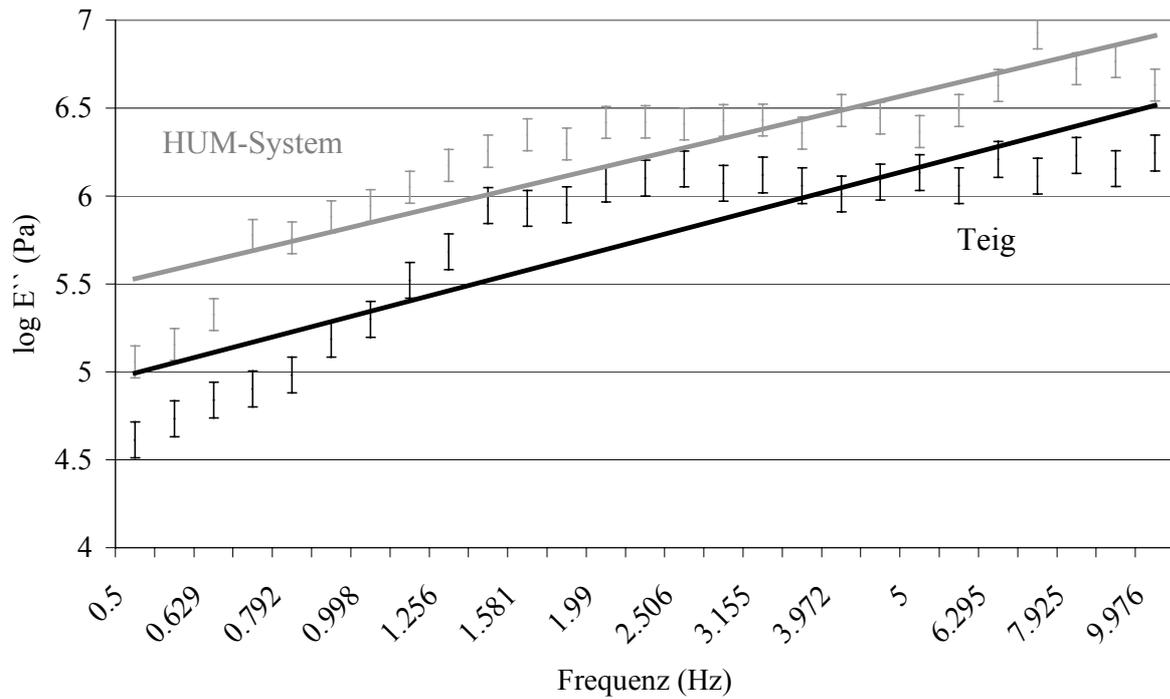


Abb. 115: Ergebnisse der dynamischen Messungen: Viskositätsmoduli der HUM-Systeme und Teige der Sorte **Contra** im Frequenzversuch.

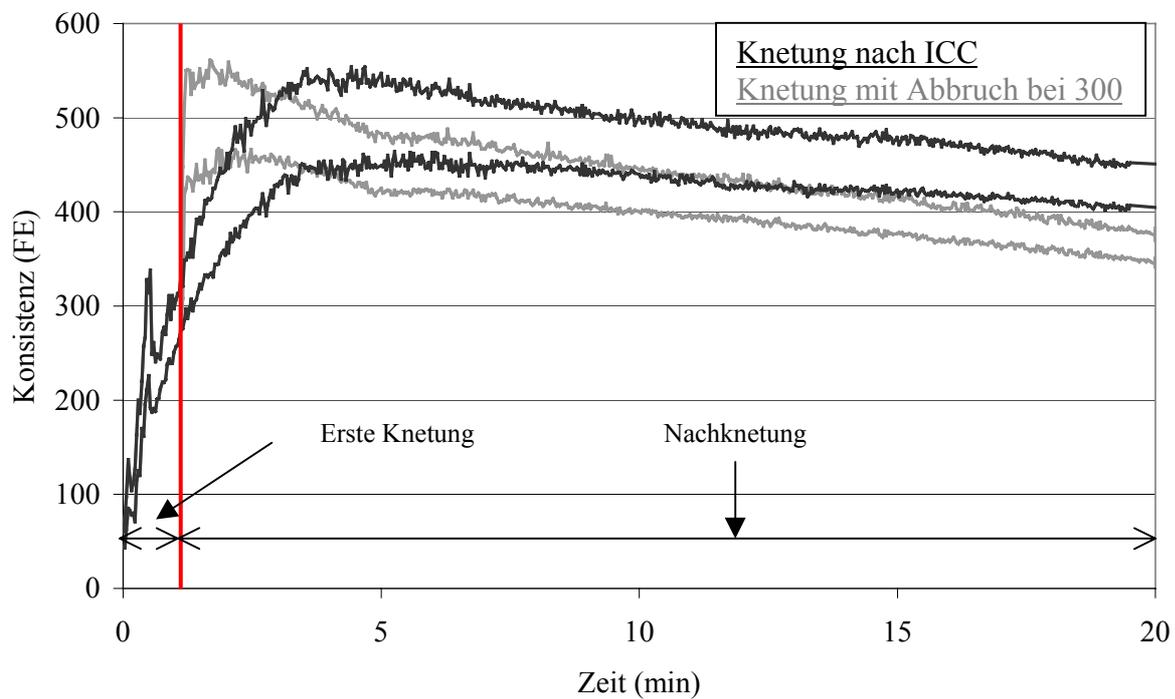


Abb.116: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Bussard** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 300 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

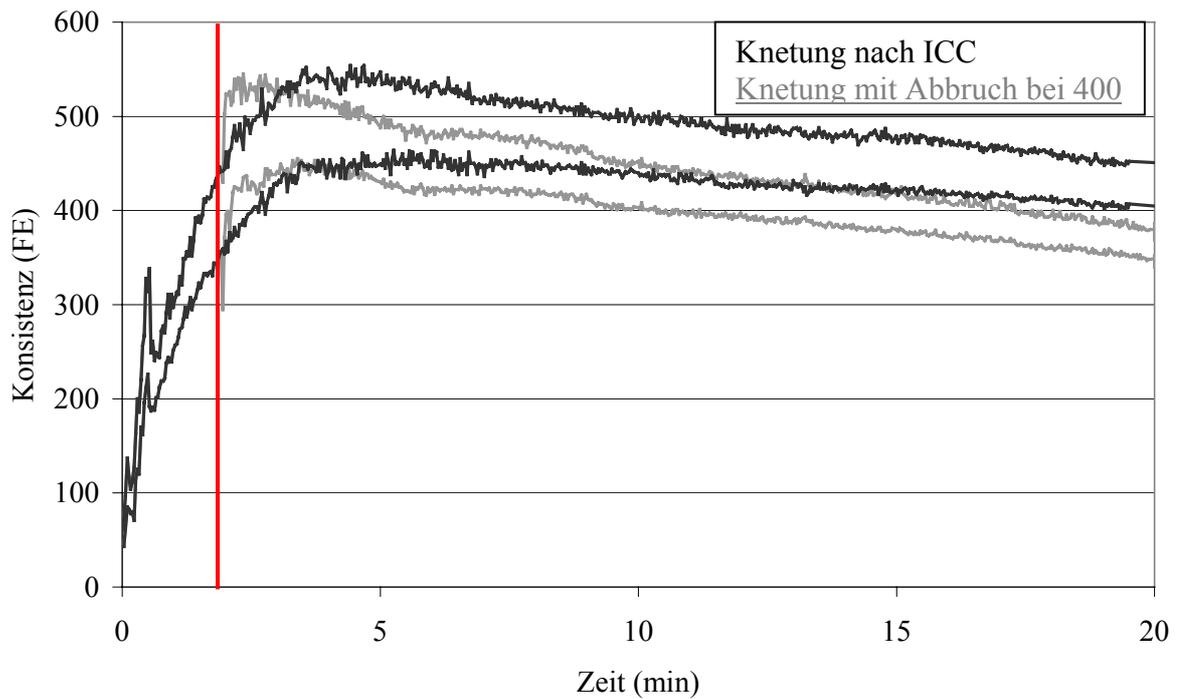


Abb.117: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Bussard** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 400 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

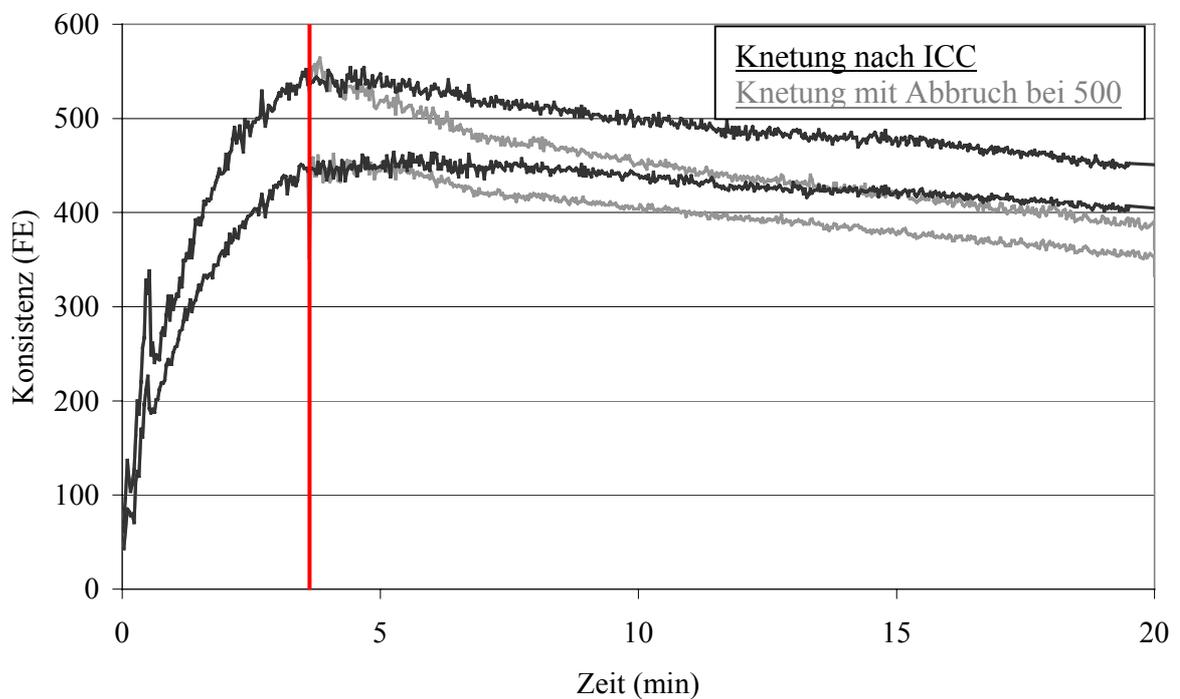


Abb.118: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Bussard** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 500 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

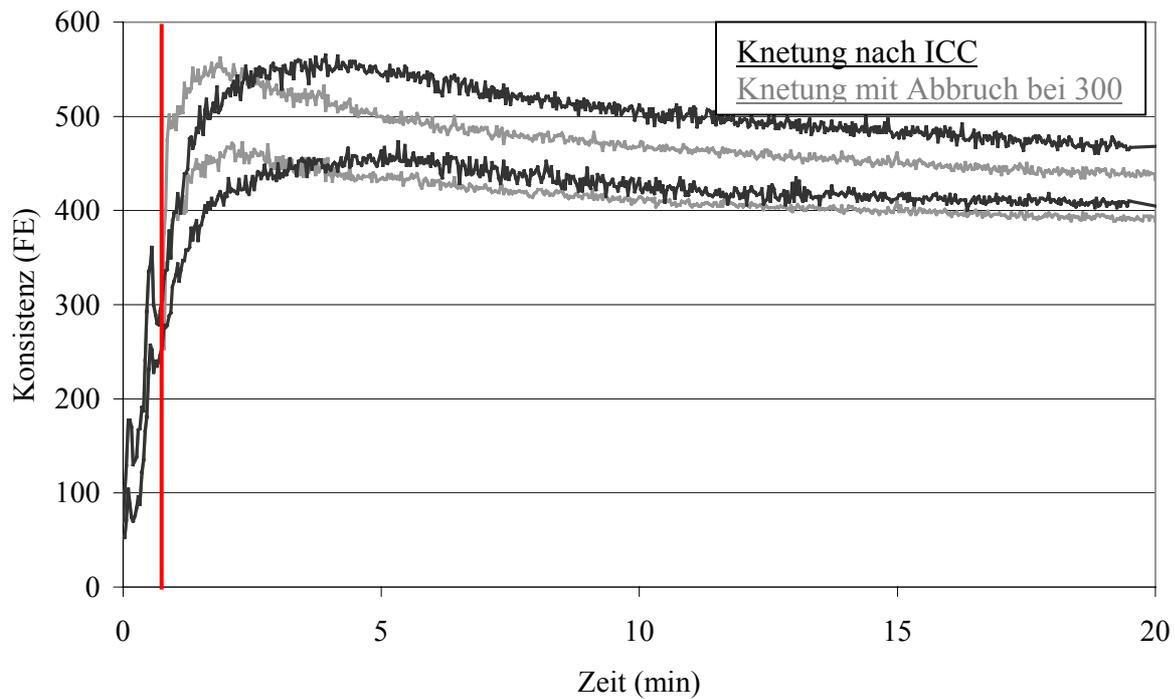


Abb. 119: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Zentos** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 300 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

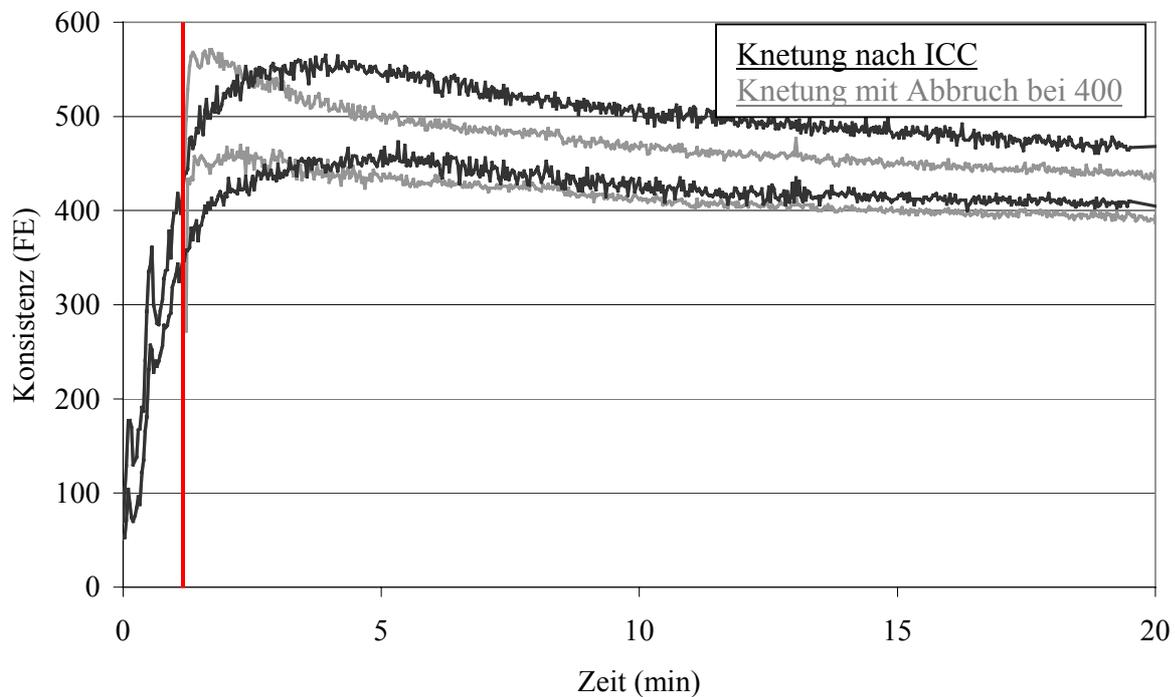


Abb. 120: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Zentos** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 400 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

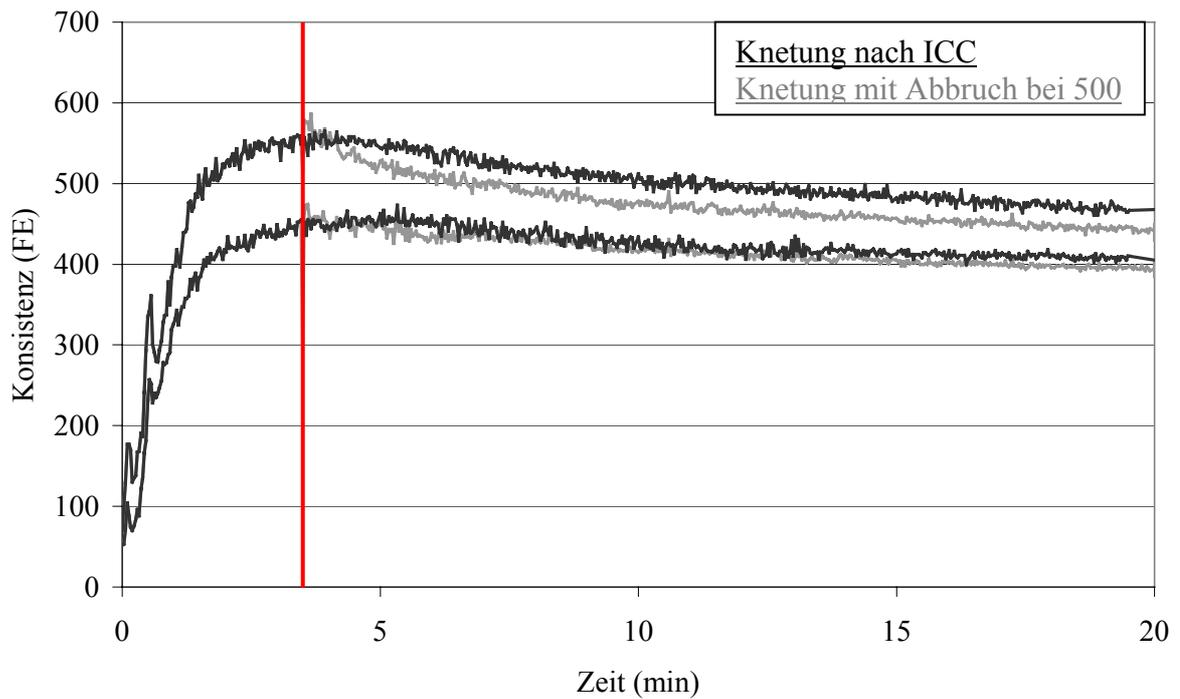


Abb. 121: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Zentos** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 500 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

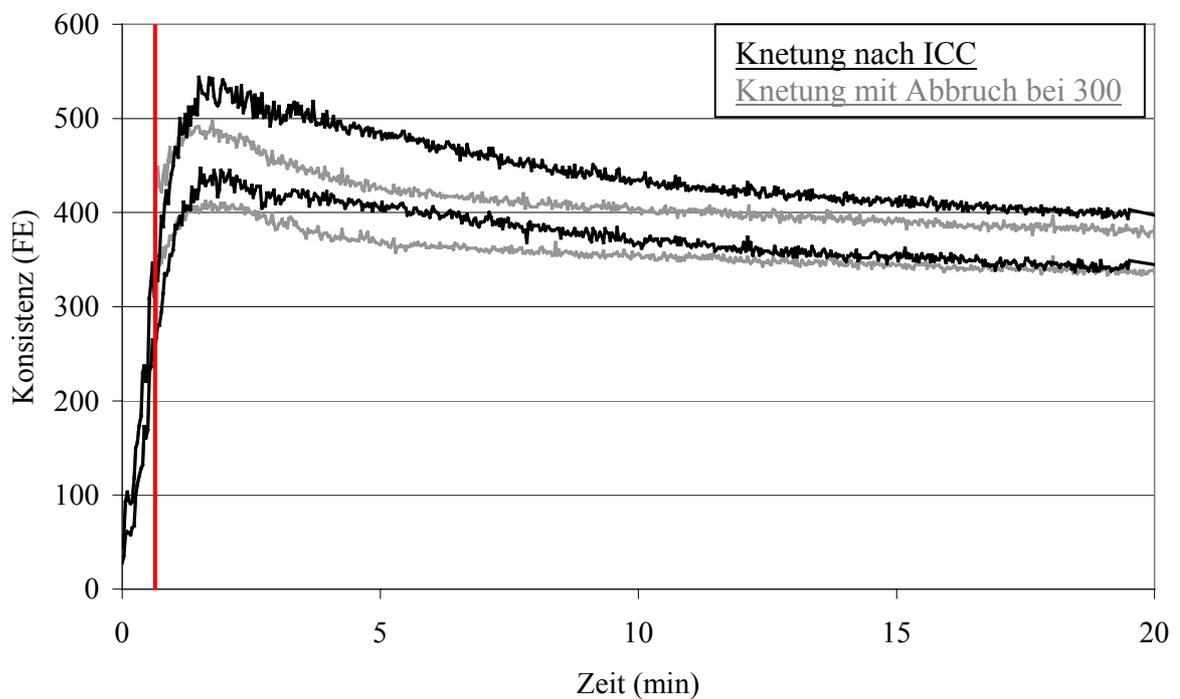


Abb. 122: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Batis** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 300 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

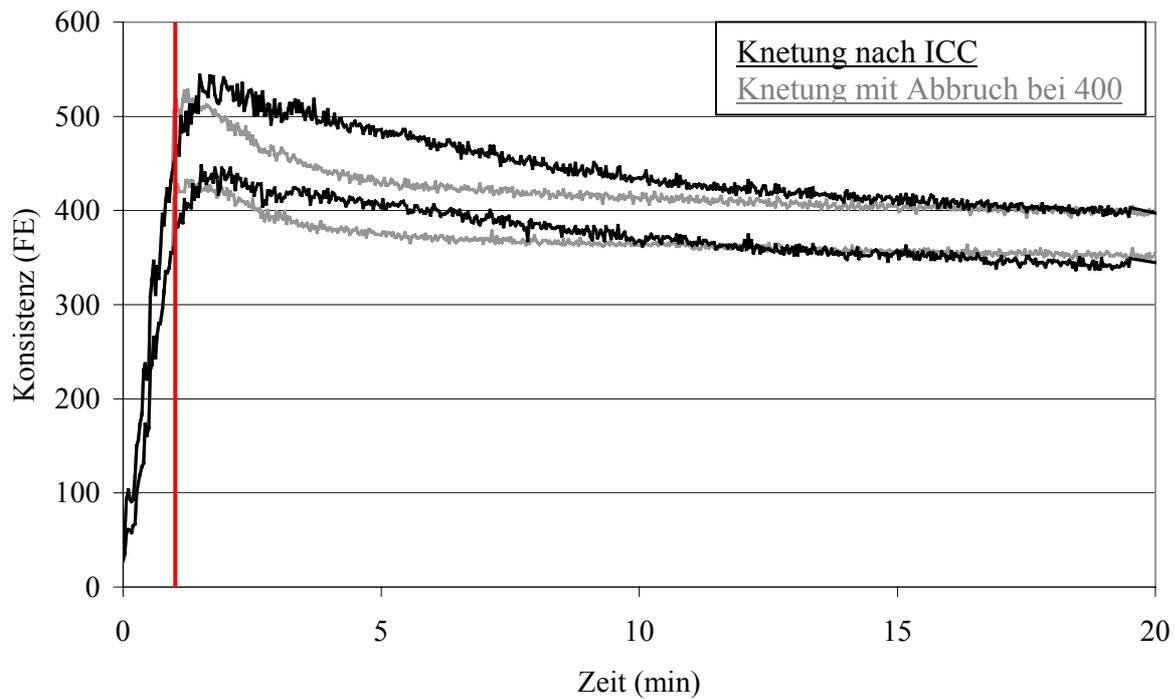


Abb. 123: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Batis** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 400 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

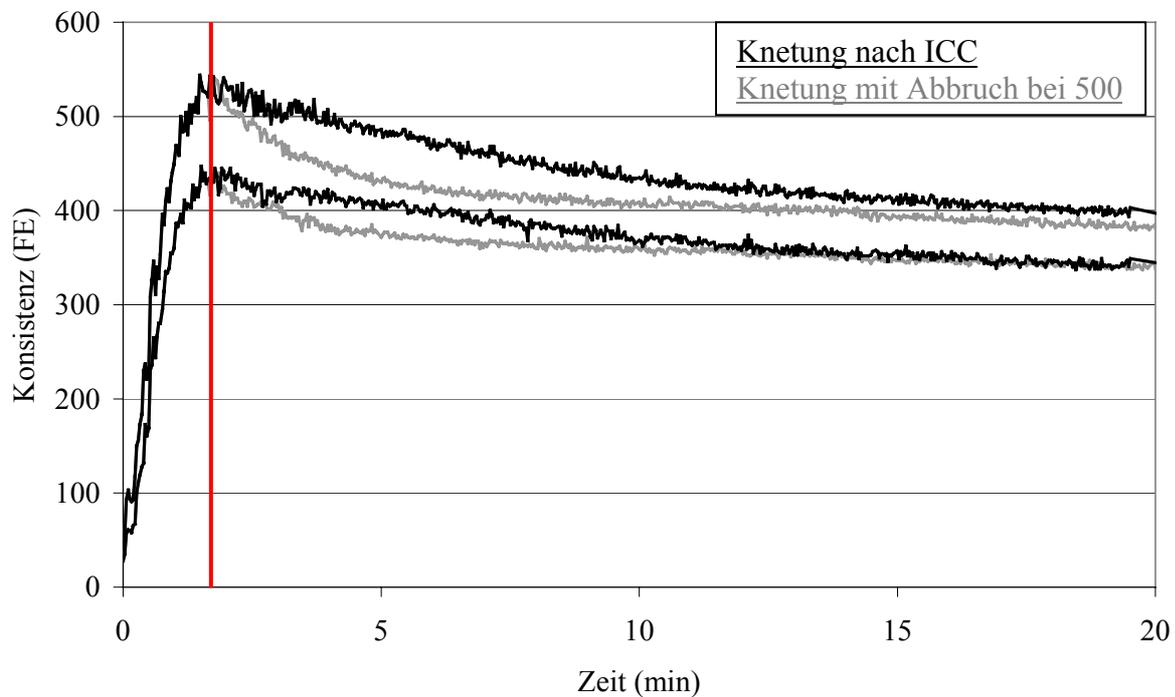


Abb. 124: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Batis** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 500 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

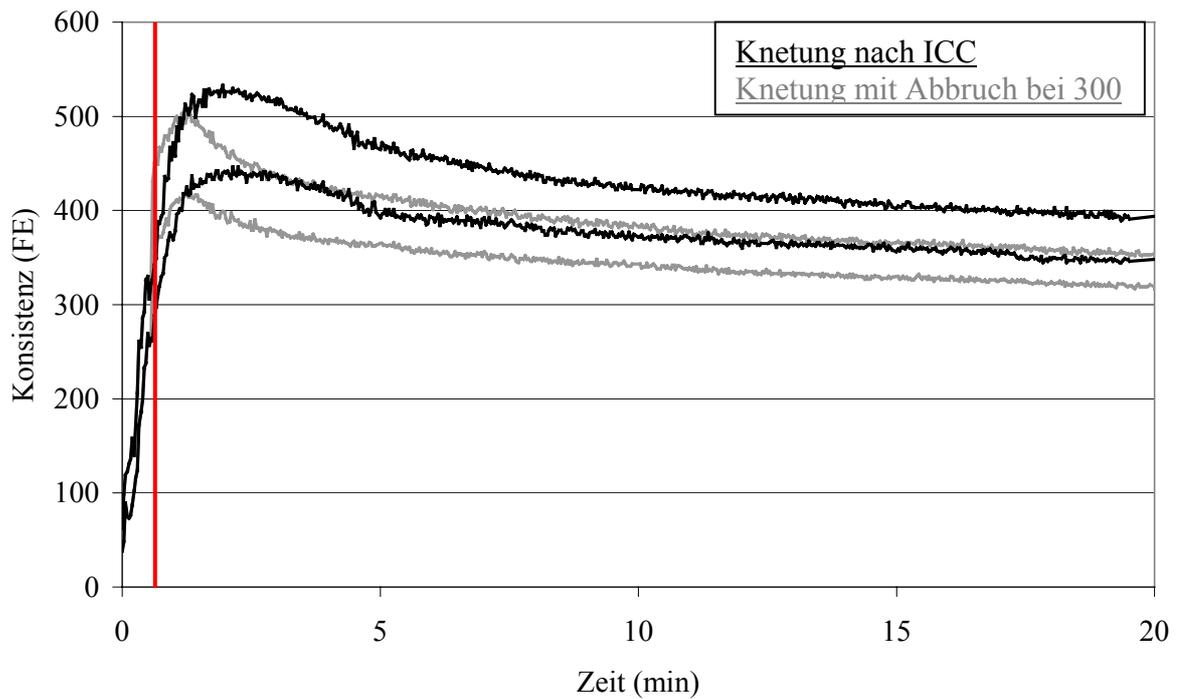


Abb. 125: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Ritmo** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 300 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

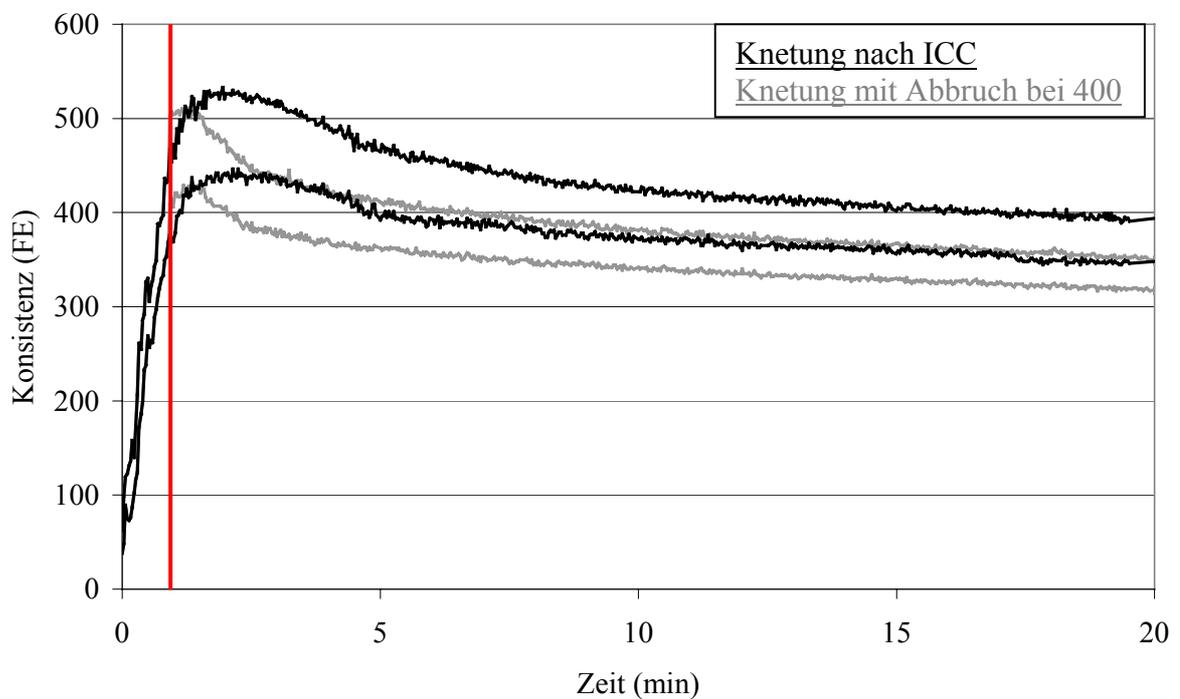


Abb. 126: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Ritmo** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 400 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

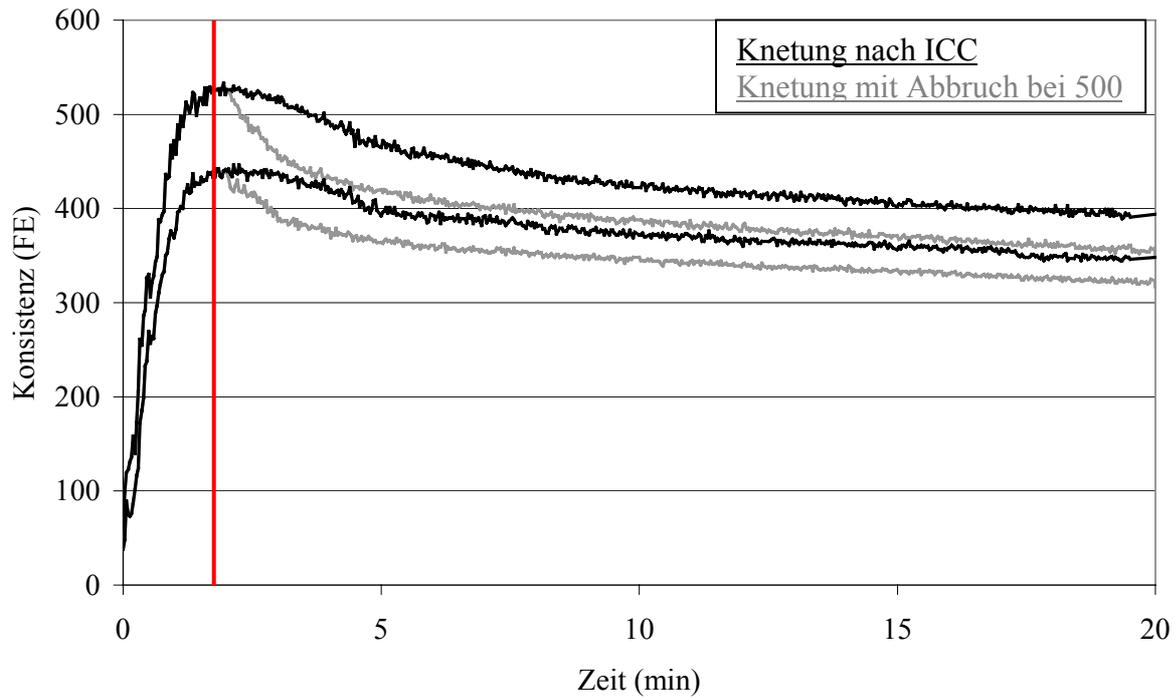


Abb. 127: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Ritmo** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 500 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

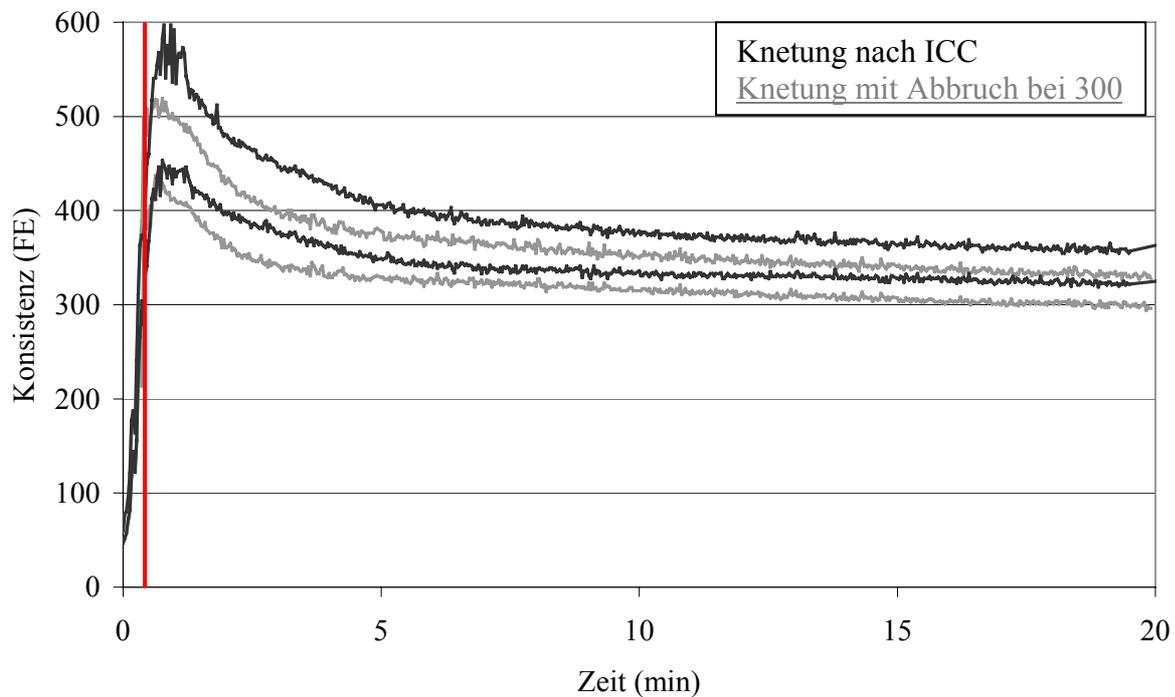


Abb. 128: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Contra** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 300 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

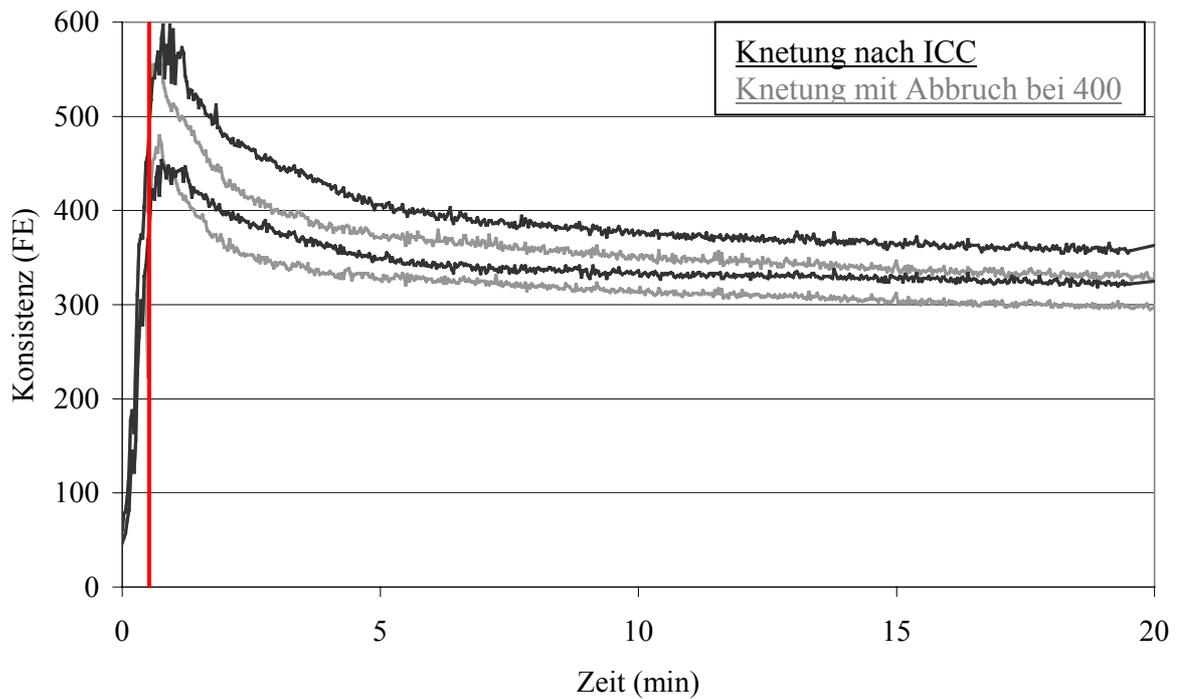


Abb. 129: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Contra** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 400 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

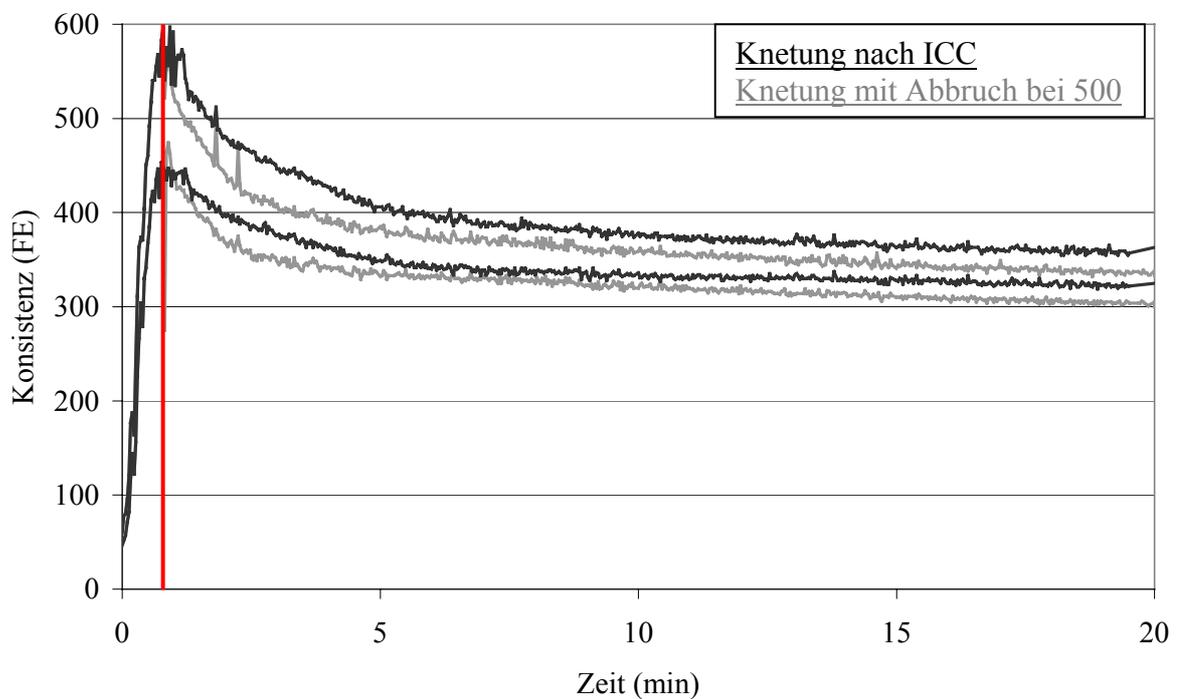


Abb. 130: Ergebnisse der Knetversuche: Vergleich des Knetverhaltens des nach ICC gekneteten Teiges der Sorte **Contra** zu dem Knetverhalten des Teiges mit einer Knetunterbrechung bei 500 FE und mit einer Ruhepause von 45 min.

LJILJANA UNBEHEND

PERSÖNLICHE INFORMATION

- Familienstand: verheiratet
- Staatsangehörigkeit: kroatisch
- Alter: 33
- Geburtsort: Osijek/Kroatien

BERUFSERFAHRUNG

- 03/98 – 03/02 Bundesanstalt für Getreide-, Kartoffel- und Fettforschung,
32756 Detmold
*Wissenschaftliche Mitarbeiterin, gefördert über ein
Stipendium des kroatischen Ministeriums für Wissenschaft
und Technologie in Zagreb, Kroatien*
- 06/93 – 03/98 Fakultät für Lebensmitteltechnologie, J.J. Strossmayer Universität Osijek,
Kroatien
*Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für
Technologie zur Produktion und Verarbeitung von Mehl*

PRAKTIKA

- 1989 Croatia d.d., Osijek, Kroatien
- 6-wöchiges Werkspraktikum in der Teigwarenproduktion

STUDIUM

- 06/93 – 04/96 Fakultät für Ernährung und Biotechnologie, Universität Zagreb, Kroatien,
Postdiplomstudium
- Master of Science der Lebensmitteltechnologie
- 10/87 – 04/93 Fakultät für Lebensmitteltechnologie, J.J. Strossmayer Universität Osijek,
Kroatien
- Diplomingenieurin der Lebensmitteltechnologie

SCHULBILDUNG

- 09/83 – 05/87 Berufsorientierte Mittelschule – Fachrichtung Chemietechnik, Osijek,
Kroatien
- Erwerb der allgemeinen Hochschulreife
 - Chemisch-technologische Facharbeiterin
- 09/75 – 06/83 Grundschule, Osijek, Kroatien