

Probleme der Erfassung mechanischer Eigenschaften pflanzlicher Rohstoffe und deren Verarbeitungsprodukte¹⁾

Horst-Dieter Tscheuschner, Lothar Linke

1. Einleitung

Ernte, Transport und Lagerung pflanzlicher Produkte und deren Verarbeitung zu Lebensmitteln führen zu mechanischen Beanspruchungen der biologischen Stoffsysteme. Die Auslegung der Maschinen und Transportsysteme für die Ernte-, Transport-, Lager- und Verarbeitungsprozesse erfordert die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften. Im Gegensatz zu den meisten Konstruktionswerkstoffen befinden sich biologisch aktive Stoffsysteme und deren Verarbeitungsprodukte thermodynamisch nicht im Gleichgewichtszustand und unterliegen Prozessen des Wachstums, der Reifung, der Fäulnis und der schnellen Alterung.

Diese natürlichen Prozesse bewirken auch schnelle Änderungen der mechanischen Eigenschaften, die dadurch einen dynamischen Charakter erhalten. Die Nichtbeachtung der Besonderheiten der mechanischen Eigenschaften biologisch aktiver Stoffsysteme kann bei der technischen Behandlung der Produkte zu erheblichen Schäden führen.

Mohsenin [12] zeigte, daß außerordentlich hohe Schäden an pflanzlichen Rohstoffen durch unsachgemäße mechanische Beanspruchung der gewachsenen Produkte auftreten, die nur zum Teil äußerlich erkennbar sind und deshalb bei der Ernte oder bei den ersten Verarbeitungsstufen kaum Beachtung finden.

Während äußerlich geschädigte Produkte, wie Kartoffeln und Früchte, leicht erkannt und aussortiert werden können, bleiben innere Schäden zunächst unentdeckt und wirken sich z. B. bei Kartoffeln als schwarze Flecken erst beim Konsumenten aus [27].

Die im biologisch aktiven Stoffsysteme ablaufenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse sind u. a. temperatur- und druckabhängig. Beim Überschreiten bestimmter Grenzwerte für Druck und Temperatur treten irreversible Zustandsänderungen, die sich z. B. als Schäden am Produkt auswirken, auf.

2. Relationen zwischen mechanischen Eigenschaften, Textur und Struktur pflanzlicher Stoffsysteme und daraus hergestellter Lebensmittel

Mechanische Eigenschaften, wie Elastizität, Festigkeit, Fließgrenze, Plastizität, Kompressibilität, wie sie aus der klassischen Mechanik unter Zugrundelegung quasihomogener und isotroper Körper definiert sind, können auf pflanzliche Rohstoffe und deren Verarbeitungsprodukte

nur im erweiterten Sinne übertragen werden. Die Ursache dafür ist der strukturelle Aufbau dieser biologischen Körper und die dynamische Kopplung der ständig ablaufenden biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse in den Elementarstruktureinheiten (Zellen) mit den mechanischen Eigenschaften der sich aus den Zellen konstituierenden pflanzlichen Gebilde.

Die mechanischen Eigenschaften der pflanzlichen Gebilde sind deshalb resultierende Eigenschaften der Elementareinheiten und der strukturellen Verknüpfung dieser Einheiten. Je nach der Betrachtungsebene sind deshalb auch die mechanischen Eigenschaften im Mikrobereich, z. B. einzelne Zelle oder Zellverband, im Makrobereich z. B. die gesamte Frucht (Getreidekorn, Kartoffel, Apfel, Blatt oder Stengel) sowie das mechanische Verhalten eines Haufwerkes von einzelnen Früchten oder Pflanzenteilen verschieden. Zwischen diesen Betrachtungsebenen existieren Beziehungen, die hierarchischen Charakter besitzen.

Bei der Verarbeitung dieser pflanzlichen Rohstoffe kommen weitere Betrachtungsebenen hinzu, die darauf beruhen, daß z. B. durch Zerkleinern, Kompaktieren, Phasentrennen die originäre Struktur partiell oder total zerstört wird und neuartige Strukturen aufgebaut werden, die andere mechanische Eigenschaften bedingen. Bei Lebensmitteln ist deshalb insbesondere bei der Qualitätsbewertung der sensorisch wahrnehmbaren mechanischen Eigenschaften der Begriff Textur üblich geworden [23].

Obwohl dieser Begriff noch nicht hinreichend einheitlich im Bereich der Lebensmittelwissenschaften angewendet wird, liegt die Grundbedeutung in der Charakterisierung der strukturellen Beschaffenheit der Lebensmittelrohstoffe und Verarbeitungsprodukte, die sich sensorisch, kinestetisch, rheologisch und optisch offenbart.

Diese strukturelle Beschaffenheit ist durch Art, Menge und Zustand der konstituierenden Komponenten der Struktur und ihrer physikalisch-chemischen Wechselwirkungen bedingt und unterliegt zeitlichen Veränderungen infolge ablaufender physikalischer, chemischer, biologischer oder mikrobiologischer Prozesse. Der momentane Texturzustand ist optisch durch die Mikro- und Makrostruktur, mechanisch durch das Deformations- und Bruchverhalten und sensorisch durch das kinestetische Verhalten beim Befühlen, Drücken, Zerschneiden, Biegen, Abbeißen, Kauen und Schlucken charakterisierbar.

Die Textur und die mechanischen Eigenschaften pflanzlicher Rohstoffe resultieren aus dem strukturellen Aufbau des Zellverbandes bzw. der einzelnen Zelle und dem physiologischen Zustand zum Erntezeitpunkt. Nach der

1) Überarbeitete Fassung des Vortrages „Textur und mechanische Eigenschaften pflanzlicher Rohstoffe und ihrer Verarbeitungsprodukte“. 15. bis 19. März 1982 Kühlungsborn.

Ernte ist bei nativem pflanzlichem Gewebe die fort-dauernde physiologische Funktion, d. h. die Lebens-tätigkeit, charakteristisch. Stoffwechselforgänge, wie z. B. die Atmung, gehen weiter vonstatten und sind ein Merkmal der Nachreifung. Durch diese Stoffwechsel-prozesse und andere Prozesse, wie Feuchtigkeitsabgabe, verändern sich die Proportionen, der Zustand der struk-turbildenden Komponenten und deren Wechselwirkun-gen und damit die Textur und die mechanischen Eigen-schaften.

3. Struktureller Aufbau des pflanzlichen Gewe-bes und seine Relationen zu den mechani-schen Eigenschaften

Pflanzenzellen sind von polygonaler, häufig isodiametri-scher Bauart, die im ausgewachsenen Zustand eine Längsausdehnung bis zu 500 mm aufweisen können. Der mittlere Durchmesser beträgt dabei etwa 0,01 bis 0,2 mm. Sie sind im Gegensatz zu tierischen Zellen immer von einer Zellwand umgeben, die sowohl eine Schutz- als auch eine Stützfunktion hat und damit das mechanische System der Pflanzen bildet [1]. Im Zellverband grenzen die Zellen entweder lückenlos an-einander an (z. B. die Epidermis) oder bilden Zwischen-räume (Interzellulare) unterschiedlicher Größe, die meist mit Luft gefüllt sind (Bild 1).

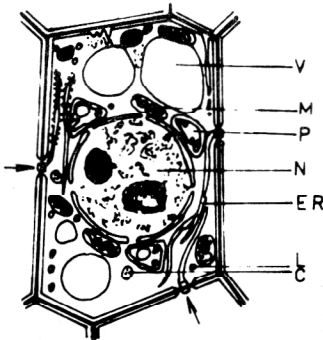


Bild 1
Schematische Darstellung einer jungen Pflanzenzelle
V Vakuolen, M Mitochondrium, P Proplastiden, N Kern mit zwei Nukleonen, ER Endoplasmatisches Retikulum, L Lipidtropfen, C Cytoplasma

Für die Textur und die Festigkeit des Zellgewebes sind die Strukturelemente von besonderer Bedeutung. Hierzu zählt die Zellwand mit ihrem Schichtaufbau (Bild 2).

Die Mittellamelle als gemeinsames Verbindungselement zweier benachbarter Zellen besteht aus Protopektin, d. h. einem kettenförmigen Polymerisat mit Galakturon-säure als Grundbaustein, welches durch Seitenketten aus verschiedenen Zuckern reich verzweigt ist. Das hierdurch fädige Netzwerk liegt in einer Art Gelzustand vor.

Von beiden Seiten an die Mittellamelle angelagert, läßt sich bei der Primärwand eine Gerüstkomponente deutlich erkennen. Aus relativ kurz-kettigen Zellulosemolekülen aus etwa 2000 Glukoseresten bestehen die Mikro-fibrillen (30 % der Primärwand-trockensubstanz). Diese sind in eine Grundmasse oder Wandmatrix, bestehend

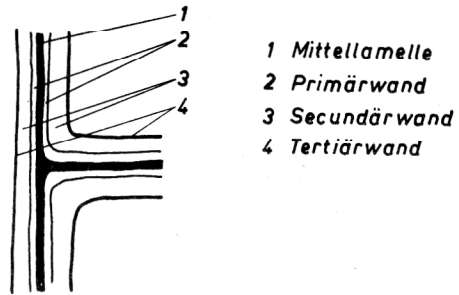


Bild 2
Schichtenaufbau einer Pflanzenzellwand
1 Mittellamelle, 2 Primärwand, 3 Sekundärwand, 4 Tertiärwand

aus Hemizellulose, eingelagert. Die Mikro-fibrillen sind untereinander nicht durch chemische Bindungen verknüpft, sondern werden durch die Wandmatrix zusam-mengehalten. Sie sind meist regellos verflochten und bilden eine sogenannte „Streuungstextur“. Eine gewisse Vorzugsrichtung führt jedoch als flache Schraube fast ringartig um die Zelle, weshalb man von ringförmiger Schraubentextur spricht.

Die Herausbildung eines Systems stabiler Fibrillen aus Zellulose ist in der Mikrostruktur der Zellulosemoleküle

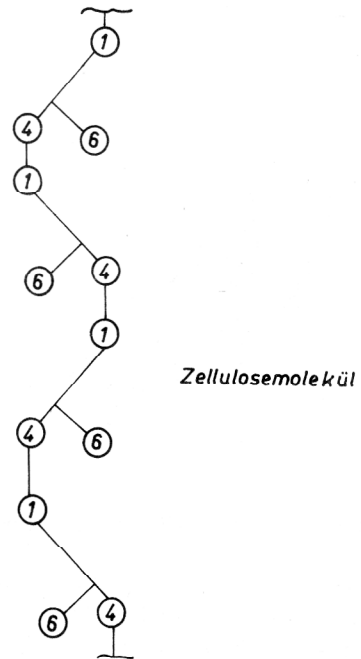
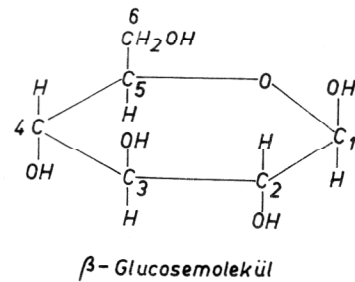


Bild 3
Struktur des *β*-Glucosemoleküls und des Zellulosemoleküls

Tabelle 1
Zellverbändeinlagerungen und ihre Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften

Einlagerungsstoff	Einlagerung in	eigenschaftsverändernde Wirkung
Lignin (Polymerisat von Phenylpropan-derivaten)	Mittellamelle Primärwand	Verholzung, erhöht Festigkeit, vermindert Elastizität
Suberin (Polymerisat verschiedener Karbonsäuren)	Ersatz von Zellulose in der Sekundärwand	Verkorkung Verminderung der Wasserdurchlässigkeit, vermindert Elastizität
Kutin (räumlich vernetztes Polymerisat aus Hydroxymonokarbonsäuren)	zusammen mit Wachs als Kutikula auf die Mittellamelle der Außenwand der Epidermiszellen aufgelagert	vermindert Stoffaustauschvorgänge, erhöht Festigkeit



Bild 4
Tomate, Parenchymzellen und Interzellularen (nach Gassner)

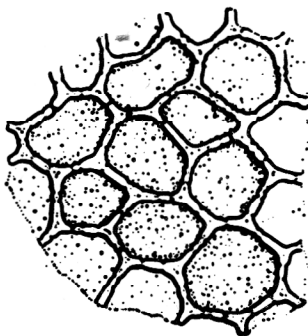


Bild 5
Tomate, Oberhautzellen im Querschnitt (nach Gassner)

begründet. Wie bekannt, besteht Zellulose aus β -D-Glukose in 1,4-Bindung. Das 1. C-Atom eines Glukoserestes ist mit dem 4. C-Atom des nächsten über eine Sauerstoffbrücke verbunden. Weil im β -Glukosemolekül die OH-Gruppen verschiedene Stellungen zur Ringebene des

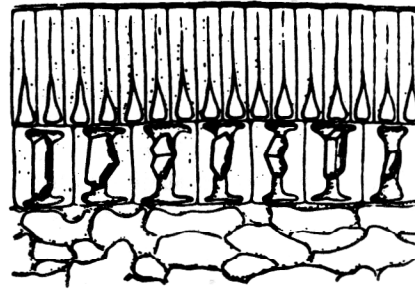


Bild 6
Bohne, äußerer Teil der Samenschale (nach Gassner)

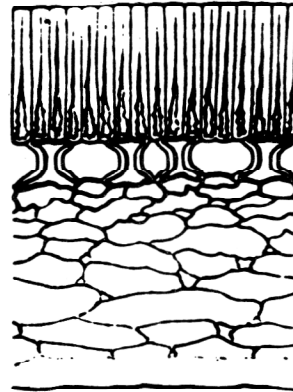


Bild 7
Erbsen, Samenschale im Querschnitt von außen nach innen: Palisadenzellen, Trägerzellen, innere Schichten (nach Gassner)

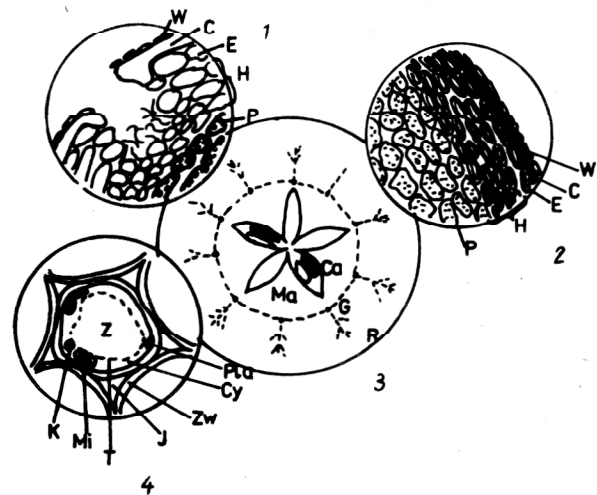


Bild 8
Apfel, Gewebearten und Aufbau einer Parenchymzelle (nach Schulz)

1 Lentizelle, 2 Gewebeschichten, 3 Apfelquerschnitt, 4 Parenchymzelle
C Kutikula, Ca Carpellen, Cy Zytoplasma, E Epidermis, G Gefäßbündel, H Hypodermis, J Interzellularräume, K Zellkern, Ma Mark, Mi Mikrosomen, P Parenchym, Pla Plastiden, R Rinde, T Tonoplast, W Wachsschicht, Z Zellsaftvakuole, Zw Zellwände

Glukosemoleküls einnehmen, sind im Zellulosemolekül benachbarte Glukosereste gegeneinander um 180°

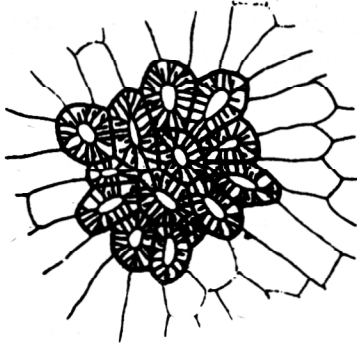


Bild 9
Birne, Steinzellengruppe (nach Gassner)



Bild 10
Kirsche, Fruchtwandoberhaut (nach Gassner)

verdreht. Zudem sind auf Grund der räumlichen Anordnung der H- bzw. OH-Gruppen am Ring die Ringebenen der verketteten Glukosemoleküle leicht zueinander gewinkelt. Die Molekülachse ist dadurch ebenfalls nicht gerade, sondern wechselweise abgewinkelt (Bild 3). Auf Grund dieser Struktureigenschaften ist das Zellulosemolekül zur Bildung sehr stabiler Fibrillen geeignet. Im Gegensatz dazu sind die Stärkemoleküle aus α -D-Glukose in 1,4-Bindung aufgebaut und wegen der gleichsinnigen Stellung der OH-Gruppen am 1. und 4. C-Atom nicht gegeneinander verdreht. Die Stärkemolekülstruktur ist damit nicht imstande, feste Fibrillen zu bilden.

In Abhängigkeit von der Art und vom Alter des pflanzlichen Gewebes kommt es zu Zellwandinlagerungen mit erheblichen Auswirkungen auf die physikalischen, besonders die Festigkeitseigenschaften. Einen Überblick dazu gibt Tabelle 1.

Mechanisch hochbeanspruchte pflanzliche Gewebe (größere Landpflanzen) weisen außerordentlich verdichtete Zellwände auf, wobei es häufig zu einem Absterben der Zellen kommt (Sklerenchyme, z. B. Bastfasern, Flachsfasern, Kollenchyme). Nicht zuletzt soll als wesentlicher festigkeitsbeeinflussender Faktor der Turgordruck einer vakuolenhaltigen Pflanzenzelle bzw. eines Zellgewebes genannt werden.

Einige typische Gewebearten wichtiger pflanzlicher Stoffe zeigen die Bilder 4 bis 10.

4. Veränderung des pflanzlichen Gewebes nach der Ernte und durch Verarbeitungsprozesse

4.1. Veränderungen durch Feuchtigkeitsverlust

Grüne geerntete Pflanzenteile (z. B. verschiedene Gemüsearten) verlieren durch Feuchtigkeitsverdunstung den ursprünglichen Turgordruck und erscheinen welk. Das osmotische Gleichgewicht ist gestört, und es ändern sich damit die mechanischen Eigenschaften, wie Elastizität, Festigkeit, Biofließpunkt.²⁾

Erfolgt die Feuchtigkeitsabgabe durch Trocknung bis zu einer geringen Restfeuchte, z. H. Heu, reife Getreidehalme, ist eine Abnahme des plastischen zugunsten des sprödelastischen Verhaltens zu beobachten. Hierbei wird die osmotische Zellfeuchtigkeit fast vollständig abgegeben und die gequollenen gelartigen makromolekularen Bestandteile nehmen einen dichteren Packungszustand an, wodurch ein kapillarporöser Festkörper entsteht. Die mechanischen Eigenschaften sind dabei von der Restfeuchte abhängig. Absolut trockenes Pflanzengewebe erreicht dabei die höchste Sprödigkeit und Härte.

4.2. Veränderung der stofflichen Zusammensetzung und Struktur durch Atmung, Reifung und Verderb

Bei der technologisch bedingten Zwischenlagerung zwischen Ernte und Verzehr bzw. Ernte und Verarbeitung treten neben Feuchtigkeitsabgabe auch Stoffwechsellvorgänge auf, die zu Veränderungen (Abbau) des pflanzlichen Gewebes führen, wodurch die Elastizität, Plastizität und Festigkeit sich ändern. Bei der Lagerung und Reifung von Obst sind diese Vorgänge gut erforscht worden, und es können Korrelationen zwischen der Änderung mechanischer Eigenschaften und dem Reifungszustand festgestellt werden. Dieser Prozess kann durch Verlust der natürlichen Schutzfunktion in mikrobiellen Verderb übergehen, wodurch sich die mechanischen Eigenschaften sprunghaft durch Abbau des Gewebes, z. B. die Mittellamelle der Zellwände in Richtung plastoviskos, ändern.

4.3. Veränderung des pflanzlichen Gewebes durch mechanische Beanspruchungen beim Transport und im Verarbeitungsprozess

Mechanische Beanspruchungen durch anisotropen Druck (Quetschung, Biegung oder Scherung) werden von pflanzlichen Geweben nur bis zum Biofließpunkt ohne irreversible Veränderungen ertragen. Nach Überschreiten dieses Grenzwertes beginnt die partielle mechanische Zerstörung des Zellgewebes, wobei zunächst der Zusammenhalt der Pflanzenteile noch nicht verlorengeht. Die mechanisch partiell oder vollständig zerstörten Zellen können ihre Lebensfunktion nicht mehr aufrecht erhalten. Es treten zunächst rein physikalische Änderungen

2) Spannung, bei der einzelne Zellen im Innern der Pflanze mechanisch geschädigt werden.

ein, die je nach Art, Zustand und Feuchtigkeit der Pflanze durch autolytische und mikrobielle Prozesse ergänzt werden.

Die mechanischen Beanspruchungen sind teilweise beabsichtigt, z. B. beim Abschneiden oder Zerschneiden, beim Zusammenpressen, Auspressen oder beim Zerkleinern. Häufig sind sie jedoch unerwünscht und müssen in unschädlichen Grenzen gehalten werden, wie z. B. bei der Lagerung und beim Transport druckempfindlicher Obst- und Gemüsearten. Die optimale Gestaltung dieser Prozesse setzt deshalb möglichst genaue Kenntnisse der mechanischen Eigenschaften und der zulässigen bzw. notwendigen Beanspruchungen voraus.

4.4. *Veränderung des pflanzlichen Gewebes durch thermische Prozesse*

Bei der Verarbeitung pflanzlicher Rohstoffe werden diese, je nach dem Verarbeitungsziel, den unterschiedlichsten thermischen Prozessen, wie Blanchieren, Pasteurisieren, Sterilisieren, Garen, unterworfen, wodurch das Zellgewebe tiefgreifend chemisch und physikalisch verändert wird. Je nach Intensität und Dauer der Wärmeinwirkung werden makromolekulare Zellwandsubstanzen hydrolysiert, der Zellverband gelockert und gesprengt. Eiweißstoffe denaturieren, Stärkekörner verkleistern oder verzuckern. Dadurch werden der native Zustand der Zelle vollständig und der strukturelle Zustand der stofflichen Komponenten wesentlich geändert. Beim Blanchieren und Garen sind die damit verbundenen Veränderungen der mechanischen Eigenschaften erwünscht, beim Pasteurisieren oder Sterilisieren sind sie dagegen meist unerwünscht, jedoch im bestimmten Maße unvermeidlich.

4.5. *Beeinflussung von Textur und mechanischen Eigenschaften pflanzlicher Stoffe in der zweiten Verarbeitungsstufe zu Lebensmitteln*

Die Mehrzahl der Lebensmittel besteht aus verschiedenartigen pflanzlichen und tierischen Rohstoffen, die nach einer bestimmten Rezeptur und einem geeigneten Produktionsverfahren erzeugt werden. Bei diesen technologischen Prozessen werden die mechanischen Eigenschaften, z. B. durch Mischen, Dispergieren, Emulgieren, Kneten, Verschäumen, Strukturmodifizieren, stark verändert. Für die Herstellung definierter Endprodukte mit bestimmten sensorischen Eigenschaften ist die gezielte Erzeugung einer bestimmten Textur ein wesentliches Qualitätsmerkmal, z. B. bei Backwaren, Süßwaren, Konfitüren, Säften, so daß Prozesse, die letztlich zur endgültigen Herausbildung dieser Textur führen, wie Wirken, Backen, Rösten, Conchieren, Kristallisieren, Tablieren, Strukturmodifizieren usw., zur gezielten Änderung der mechanischen Eigenschaften der Zwischen- und Endprodukte genutzt werden.

5. **Beanspruchungsarten und dabei auftretende mechanische Eigenschaften**

5.1. *Wahl der Beanspruchungsarten*

Die Messung mechanischer Eigenschaften an Objekten aus pflanzlichem Gewebe ist durch eine Reihe von Besonderheiten gegenüber Festkörpern gekennzeichnet, die in der klassischen Mechanik betrachtet werden.

- Die zu messenden Objekte zeigen Inhomogenitäten im Zellverband und in den Eigenschaften anisotropes Verhalten.
- Die „Prüfkörper“ haben eine naturbedingte Form und Größe, die es nicht immer gestatten, einheitliches Probenmaterial bezüglich Form und Größe zu verwenden.
- Die Prüfkörper unterliegen durch die ablaufenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse verhältnismäßig schnellen zeitlichen Veränderungen in ihrem Zustand und ihren mechanischen Eigenschaften.
- Das Hookesche Gesetz gilt nur im eingeschränkten Maße für elastische Deformationen. Die aus der Elastizitätstheorie für Konstruktionswerkstoffe abgeleiteten Spannungs- und Dehnungsbeziehungen gelten nur für kleine Deformationen, die jedoch bei Objekten pflanzlicher Herkunft in der Regel weit überschritten werden.
- Die Deformationen weisen meist viskoelastisches Verhalten mit partiellen Brucherscheinungen bei größeren Beanspruchungen auf. Die Deformationsgeschwindigkeit beeinflusst deshalb häufig im starken Maße Eigenschaften, wie Bruchfestigkeit, Biofließpunkt und andere.
- Die Schwierigkeiten der Übertragbarkeit der Meßwerte auf das Deformationsverhalten unter anderen Beanspruchungsbedingungen, wie es in der Festkörpermechanik üblich ist, führen in der Praxis oft dazu, daß die Beanspruchungsarten so gewählt werden, daß unmittelbar problemrelevante Aussagen gewonnen werden.

Wichtige Beanspruchungsarten, die in der Praxis starke Verbreitung gefunden haben, sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

5.2. *Meßdaten und Modellierung mechanischer Eigenschaften*

Die durch eine ausgewählte Beanspruchungsart erhaltenen Antwortfunktionen liegen meist in Form von Diagrammen oder Einzelwerten bei definierten Bedingungen vor. Die Auswertung und Interpretation der Meßdaten stellen gegenwärtig das Hauptfeld der Hypothesen- und Theorienbildung dar. Näherungsbetrachtungen führen dabei häufig bei speziellen Fällen zu einer befriedigenden Lösung, die in der Regel jedoch nicht übertragbar ist. Hauptmängel treten dabei meist durch Vernachlässigung der anisometrischen Eigenschaften und der viskoelastischen Eigenschaften infolge des speziellen

Tabelle 2

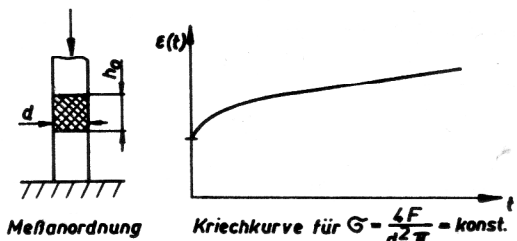
Häufig verwendete Beanspruchungsarten für die Untersuchung mechanischer Eigenschaften von pflanzlichen Festkörpern

Beanspruchungsart	Meßfunktion	Charakteristische Stoffwerte	Meßgeräte	Autoren
1. Konstanter Druck auf Prüfkörper konstanter Ausgangsfläche	$\epsilon = f(t)$ bei $F = \text{konst.}$	Kriechverhalten $J(t)$ Kriechnachgiebigkeit	Höppler-Konsistometer	[14] Nowicki u. a.
2. Veränderlicher Druck auf Prüfkörper konstanter Ausgangsfläche mit konstanter Deformationsgeschwindigkeit ³⁾	$\sigma = f(\epsilon)$, wobei $\sigma = f(t)$ $\frac{d\epsilon}{dt} = \text{konst.}$	Deformationskurve E Elastizitätsmodul E_D Deformationsmodul σ_{Bio} Biofließpunkt σ_{Br} Bruchspannung Relaxationseigenschaften μ Poisson-Zahl	Instron-Universal-Festigkeitsprüfgerät und ähnliche Festigkeitsprüfgeräte	[12],[13] Mohsenin u. a. [23] Tscheuschner [8] Holt u. a. [16] Peleg u. a. [21] Segerlind u. a. [9] Horvath u. a. [26] Sone u. Taneya
3. Veränderlicher Druck auf Objekt mit natürlicher Form und Größe bei konstanter Deformationsgeschwindigkeit ³⁾	wie 2., jedoch durch Variation des Meßobjektes größere Streuung der Meßwerte	Deformationskurve E Elastizitätsmodul E_D Deformationsmodul σ_{Bio} Biofließpunkt σ_{Br} Bruchspannung Relaxationseigenschaften μ Poisson-Zahl	Instron-Universal-Festigkeitsprüfgerät und ähnliche Festigkeitsprüfgeräte	[5] Chuma u. a. [8] Holt u. a. [11] Miles
4. Penetration mit konstanter Kraft bei definierter Form und Größe des Eindringkörpers	$\epsilon = f(t)$ bei $F = \text{konst.}$ oder $F = f(\epsilon)$	Biofließpunkt Eindringtiefe	Penetrometer, Festigkeitsprüfgeräte	[2],[3] Bourne
5. Scherung bei konstanter Geschwindigkeit	$P = f(D)$ bis P_{max}	Scherspannung τ_{Br}	Instron-Universal-Festigkeitsprüfgerät und ähnliche Festigkeitsprüfgeräte	[25] Voisey
6. Schwingungsdruckbeanspruchung	$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$ $\epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t - \delta)$	viskoelastische Eigenschaften Energiedissipation vor der Zerstörung elastischer Speicher-Modul $E' = E^* \cos \delta$ δ Phasenverschiebung $E^* = \sigma_{\text{max}} / \epsilon_{\text{max}}$	Schwingungsmeßgeräte (Dynamic Tester)	[17] Petrell u. a. [8] Holt u. a.
7. Hydrostatischer Druck	$\frac{\Delta V}{V} = f(t)$	Volumenelastizitätsmodul	Eigenbaugerät	[19] Sharma u. a.

3) Die Übereinstimmung von konstanter Geschwindigkeit des Joches des Prüfgerätes mit einer konstanten Deformationsgeschwindigkeit der Probe ist nur bei kleinen Deformationen gültig. Bei biologischen Materialien sind in der Regel jedoch große Deformationen bis zum Bruch des Materials erforderlich.

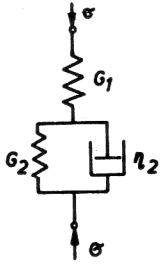
strukturellen Aufbaus der Zellverbände sowie der einzelnen Zellen auf. Die Modellierung des Deformations- und Bruchverhaltens trägt dazu bei, das mechanische Verhalten besser zu veranschaulichen und zu berechnen. Der mathematische Aufwand steigt damit jedoch in speziellen Fällen erheblich, wie einige realisierte Beispiele zeigen [4], [7], [22].

Die Bilder 11 bis 14 zeigen ausgewählte Beispiele der erhaltenen Meßdaten und Versuche zur Modellierung.



Meßanordnung

Kriechkurve für $\sigma = \frac{4F}{d^2 \cdot \pi} = \text{konst.}$



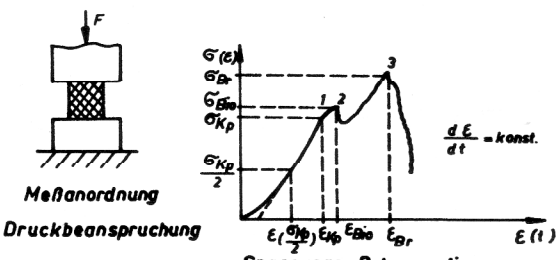
Modell nach Nowitzki

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{G_1} + \frac{\sigma}{G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right]$$

STOFFPARAMETER

Kartoffelsorte	$G_1 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	$G_2 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	$\eta_2 \cdot 10^8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Wyschoborskije	3,76	100,10	172,66
Dekama	4,48	33,16	98,39
Maritta	5,70	74,85	129,44

Bild 11 Kriechkurve von Kartoffeln nach [17]



Meßanordnung
Druckbeanspruchung

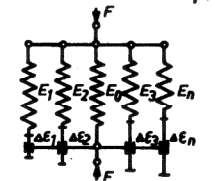
Spannungs-Dehnungsdiagramm

- 1 Knickpunkt
- 2 Bielfließpunkt
- 3 Bruchpunkt

$E = \frac{G_{Kp}}{\epsilon_{Kp}}$ Elastizitätsmodul bei Vernachlässigung der Nichtlinearität

$E_d = \frac{G_{Kp}}{2 \cdot \epsilon_{Kp}}$ Deformationsmodul als 1. Näherung bei Nichtlinearität nach [13]

Hooke-Modell für linearelastische Körper

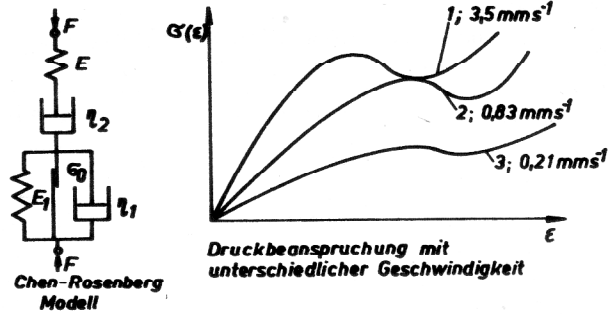


Modellvorschlag für nichtlinear-elastische Körper [24]

$$E(\epsilon) = E_0 + \left| \sum_{n=1}^n \left(1 - \frac{\Delta \epsilon_n}{\epsilon}\right) E_n \right|$$

Elastizitätsmodul bei Nichtlinearität

Bild 12 Deformationsverhalten von Früchten bei Druckbeanspruchung



Chen-Rosenberg Modell

Druckbeanspruchung mit unterschiedlicher Geschwindigkeit

$\frac{d\epsilon(1)}{dt} > \frac{d\epsilon(2)}{dt} > \frac{d\epsilon(3)}{dt}$

für $\frac{d\epsilon}{dt} = \text{konst.}$ und $G_0 > \frac{d\epsilon}{dt} \cdot \eta_2$ gilt

$$\sigma = E \eta \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right)$$

für $\frac{d\epsilon}{dt} = \text{konst.}$ und $G_0 < \frac{d\epsilon}{dt} \cdot \eta_2$ gilt

$$\sigma = A_1 \exp(-\lambda_1 t) + A_2 \exp(-\lambda_2 t) + \frac{d\epsilon}{dt} \eta_2$$

wobei $\lambda_{1/2} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{E_1}{\eta_1} - \frac{E_2}{\eta_2} \right)^2 - 4 \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2}}$

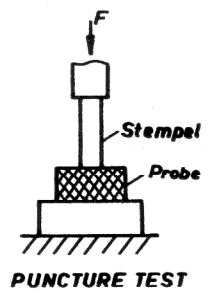
$A_1 = B_1 \exp(-\lambda_1 t_-)$; $A_2 = B_2 \exp(-\lambda_2 t_-)$

$$B_1 = \frac{\dot{\sigma}(t_-) + \lambda_2 (G_0 - \dot{\epsilon} \eta_2)}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

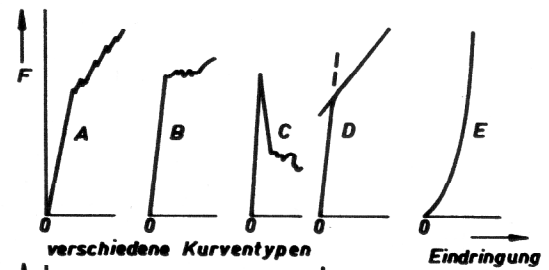
$$B_2 = \frac{\dot{\sigma}(t_-) + \lambda_1 (G_0 - \dot{\epsilon} \eta_2)}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

wobei $\dot{\sigma}(t_-) + \dot{\sigma}(t_+)$

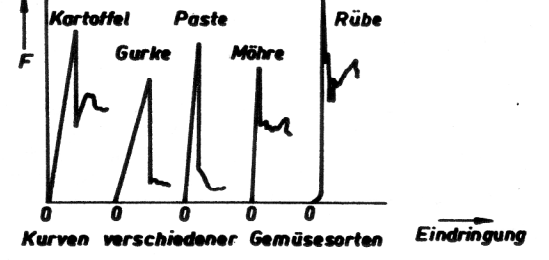
Bild 13 Verhalten bei unterschiedlicher Deformationsgeschwindigkeit



PUNCTURE TEST



verschiedene Kurventypen



Kurven verschiedener Gemüsesorten

Bild 14 Deformationskurven beim puncture test

6. Festigkeit pflanzlicher Stoffe und Möglichkeiten ihrer modellmäßigen Darstellung

Unter Festigkeit versteht man bekanntlich denjenigen inneren Widerstand eines Materials, den es entweder der Verformung bis zum Eintritt des Fließens (Fließfestigkeit) oder bis zum Eintritt des Bruchs (Bruchfestigkeit) entgegenbringt. Wird ein Material über seine Festigkeit beansprucht, beginnt es zu fließen bzw. zerbricht es.

Bei der Ernte oder Verarbeitung pflanzlicher Stoffe sind zwei Grundrichtungen der Festigkeitsbetrachtungen wesentlich:

1. Beanspruchung des Materials bei der Ernte, Lagerung und dem Transport innerhalb der Grenzen, bei denen die Fließ- oder Bruchfestigkeit nicht erreicht wird, um Schäden am Gut zu vermeiden.
2. Beanspruchung des Materials bei der Ernte oder Verarbeitung an definierten Stellen oberhalb der Festigkeitsgrenzen, um das Material gezielt zu verändern (z. B. Abschneiden, Zerkleinern, Verpressen, Verformen, Abpressen usw.).

Bei der Betrachtung der Festigkeitshypothesen und der an Festigkeitsprüfgeräten durchgeführten Messungen mit pflanzlichen Stoffen sind die Grenzen der statischen Festigkeitshypothesen, bei denen die Verformungsgeschwindigkeit nicht berücksichtigt wird, deutlich zu erkennen. Die Praxis zeigt, daß bei allen nichtspröden Materialien die Angabe von Festigkeitswerten, wie Biofließpunkt, Fließgrenze und Bruchgrenze, ohne Angabe der Deformationsgeschwindigkeit nicht hinreichend ist und insbesondere das Verhalten des Materials bei hohen Deformationsgeschwindigkeiten (Stoß, Schlag, Schneid- und Zerkleinerungsprozesse) sehr unvollständig widerspiegelt.

Die von Reiner und Weissenberg [18] für den Hooke'schen, Newton'schen und Maxwell-Körper entwickelten Gedanken zur dynamischen Festigkeitshypothese lassen sich auf kompliziertere Körper übertragen [21].

Nach der dynamischen Festigkeitshypothese von Reiner-Weissenberg bricht das Material, wenn die Verzerrungsarbeit, d. h. der aufgespeicherte Teil der Formänderungsenergie, eine gewisse Grenze E_f erreicht hat.

Die Formänderungsenergie viskoelastischer Körper umfaßt bekanntlich sämtliche Energieanteile, die durch Spannungen aufgebracht werden. Ein Teil davon wird als elastische Verzerrungsarbeit gespeichert, der Rest dissipiert.

Entsprechend dem verschiedenen Verhalten der Materialien bei Volumen- und Gestaltsänderung gibt es verschiedene Festigkeitswerte gegenüber kubischer Dilatation und Schubverformung [18].

Führt man bei den bekannten mechanischen Modellen für Elastizität, Viskosität und Plastizität ein Bruchelement ein, wie es von verschiedenen Autoren vorgeschlagen und in unterschiedlicher Weise realisiert wurde [4] bis [6], [10], [15], [22], so kann die Modellkörperdarstellung auch für die Festigkeitsbetrachtung genutzt werden, wie die Tabellen 3 bis 5 an ausgewählten Modellkörpern demonstrieren sollen.

Tabelle 3

Mechanische Modelle und mathematische Beziehungen für die dynamische Festigkeit elementarer Körper

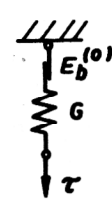
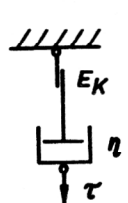
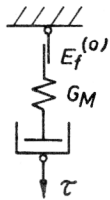
	<p>Bruchbedingung bei Gestaltsänderung durch einfachen Schub</p> $w_b^{(0)} = \int_0^{\gamma} G \cdot \gamma d\gamma \geq E_b^{(0)}$ <p>Bruchspannung</p> $\tau_b = \pm \sqrt{2 G E_b^{(0)}} = \text{konst.}$ <p>Bruchverzerrung</p> $\gamma_b = \pm \sqrt{2 E_b^{(0)} / G} = \text{konst.}$
<p>1. Modifizierter Hooke'scher Körper mit Bruchelement</p>	<p>Verformungsgeschwindigkeit $\dot{\gamma}_b$ hat bei Hooke'schem Körper keinen Einfluß auf Bruchspannung oder Bruchverzerrung</p>
	<p>Formänderungsenergie beträgt</p> $w^{(0)} = \int_0^t \eta \dot{\gamma}^2 dt$ <p>Bei laminarer Strömung tritt kein Bruch ein! Bei turbulenter Strömung tritt Bruch ein, wobei die kinetische Energie E_K des Turbulenzvorganges zum Aufreißen der Flüssigkeit führt</p>
<p>2. Modifizierter Newton'scher Körper mit Bruchelement</p>	
<p>Diese Modelle, die für die Darstellung der verschiedensten Deformations- und Bruchigenschaften aufgestellt werden können, lassen wesentliche Schlußfolgerungen für die Prozeßgestaltung zu, wie</p> <ul style="list-style-type: none"> – Deformationsbedingungen ohne Überschreitung der Bruchgrenze – Schneiden oder Zerkleinern bei minimaler bleibender Verformung des Produktes und geringem Energieverbrauch. <p>Bei der Lösung technologischer Probleme der Lebensmittelherstellung konnten auf der Grundlage dieser dynamischen Festigkeitsbetrachtungen effektive Ergebnisse, z. B. beim Schneiden von äußerst druckempfindlichem offenheißem Brot [22] bzw. Einback in geometrisch definierte Scheiben von hoher Schnittflächenqualität erreicht werden.</p>	

Tabelle 4

Mechanisches Modell und mathematische Beziehungen für dynamische Festigkeit des Maxwell-Körpers



Bruchbedingung bei Gestaltsänderung durch einfachen Schub

$$\int_0^t \left(\dot{w}_t - \frac{\tau^2}{\eta} \right) dt \geq E_f^{(0)} = E_b^{(0)}$$

hierbei ist

$$\dot{w}_t = \frac{\tau \cdot \dot{\gamma}}{G_M} + \frac{\tau^2}{\eta}$$

der aufgespeicherte Energieanteil beträgt hierbei

$$\tau \cdot \dot{\gamma} / G_M$$

und der dissipierte Anteil τ^2 / η

Die Bruchspannung beträgt

$$\tau_f = \pm \sqrt{2 G_M \cdot E_f^{(0)}}$$

und die Bruchverformung

$\gamma_f = f(\dot{\gamma}) \neq \text{konst.}$, d. h. sie wächst mit $\dot{\gamma}$ an.

3. Modifizierter Maxwell-Körper mit Bruchelement

Die Verformungsgeschwindigkeit für Bruch bei instationärer Belastung beträgt

$$\dot{\gamma}_f = \dot{\gamma}_{s,f} + \frac{\dot{\tau}_f}{G_M}$$

und bei stationärer Belastung

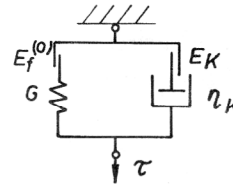
$$\dot{\gamma}_{s,f} = \frac{1}{\eta} \sqrt{2 G_M \cdot E_f^{(0)}}$$

LITERATUR

[1] Autorenkollektiv: Kleine Enzyklopädie Leben. VEB Bibliographisches Institut Leipzig 1978.
 [2] Bourne, M.C.: Theory and Application of the Puncture Test in Food Texture Measurement. In: P. Sherman, Food Texture and Rheology. Academic Press 1979.
 [3] Bourne, M.C.: Studies of the Punch Testing of Apples. Food Technology 19 (1965), S. 113-115.
 [4] Chen, Y., Rosenberg, J.: Nonlinear Viscoelastic Model containing a Yield Element for Modeling a Food Material. Journal of Texture Studies 8 (1977), S. 477-485.
 [5] Chuma, Y., Shiga, T., Iwamoto, M.: Mechanical Properties of Satsuma Orange as related to the Design of Container for Bulk Transportation. Journal of Texture Studies 9 (1978), S. 461-479.
 [6] Drake, R.: A Quasi-Rheological Element for Fracture. Journal of Texture Studies 2 (1971), S. 365-372.
 [7] Drake, B.: A Fortran Program „Framod“ for Simulation of large Fractoviscoelastic Models. Journal of Texture Studies 10 (1979), S. 165-182.
 [8] Holt, J.E., Schoorl, D.: Bruising and Energy Dissipation in Apples. Journal of Texture Studies 7 (1977), S. 421-432.

Tabelle 5

Mechanische Modelle und mathematische Beziehungen für die dynamische Festigkeit des Kelvin- und Schofield-Scott Blair-Körpers



Bruchspannung bei dynamischer Beanspruchung ($\dot{\gamma} > 0$)

$$\tau_f(\dot{\gamma}) = \tau_{s,f} + \eta_K \cdot \dot{\gamma} \neq \text{konst.}$$

Bei statischer Beanspruchung ($\dot{\gamma} \approx 0$)

$$\tau_f = \tau_{s,f} = \pm \sqrt{2 G \cdot E_f^{(0)}} = \text{konst.}$$

Bruchverformung

$$\gamma_f = \pm \sqrt{2 E_f^{(0)} / G} = \text{konst.}$$

Verformungsgeschwindigkeit für Bruch

$$\dot{\gamma}_f \neq \text{konst.}, \text{ da } \tau_f = f(\dot{\gamma})$$

4. Modifizierter Kelvin-Körper mit Bruchelement

Bruchbedingung für $E_{f1}^{(0)} \leq E_{f2}^{(0)}$

Bruchspannung

$$\tau_f = \pm \sqrt{2 G_B \cdot E_f^{(0)}} = \text{konst.}$$

Fließbedingung

$$\vartheta_t = \pm \sqrt{2 G_B \cdot E_{pl}^{(0)}}$$

\approx

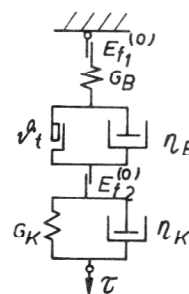
Bruchverformung für Bruch bei $E_{f1}^{(0)}$

$$\gamma_f = \pm \sqrt{2 E_f^{(0)} / G_B} + \gamma_B(\dot{\gamma}) \neq \text{konst.}$$

Verformungsgeschwindigkeit für Bruch

$$\dot{\gamma}_f \geq \dot{\gamma}_B = \frac{\tau_f - \vartheta_t}{\eta_B}$$

5. Modifizierter Schofield Scott Blair-Körper mit Bruchelement [24]



[9] Horvath, L., Mosonyi, M.: Texturmessungen gekochter Karotten. Bericht II. Kolloquium „Rheologie und Textur der Lebensmittel“, Teil 1, Dresden 1981, S. 154-167.
 [10] Lerchenthal, Ch. H.: A Quasi-Rheological Model Element for Fracture. Journal of Texture Studies 4 (1973), S. 284-292.
 [11] Miles, R.A., Friedley, R.B., Lorenzen, C.: Strength Characteristics of Tomatoes subjected to quasi-static Loading. Trans. Am. Soc. Agric. Engr. 12 (1969), S. 627-630.
 [12] Mohsenin, N.N.: Characterization and Failure in Solid Foods with particular Reference to Fruits and Vegetables. Journal of Texture Studies 8 (1977), S. 477-485.
 [13] Mohsenin, N.N., Mittal, J.P.: Use of Theological Terms and Correlation of Compatible Measurements in Food Texture Research. Journal of Texture Studies 8 (1977), S. 395-408.

- [14] Nowicki, W., Gasiowski, H., Kolodziejczyk, P.: Modellierung der rheologischen Eigenschaften von Kartoffeln. Bericht II. Kolloquium „Rheologie und Textur der Lebensmittel“, Teil I, Dresden 1981, S. 178–184.
- [15] Peleg, M.: Contact and Fracture Elements as Components of the rheological Memory of Solid Foods. *Journal of Texture Studies* 8 (1977), S. 39–48.
- [16] Peleg, M., Gomez Brito, L.: Textural Changes in Ripening Plantains. *Journal of Texture Studies* 7 (1977), S. 457–463.
- [17] Petrell, R.J., Mohsenin, N.N., Wallner, S.: Dynamic Mechanical Properties of the Apple Cortex in Relation to Sample Location and Ripening. *Journal of Texture Studies* 10 (1980), S. 217–229.
- [18] Reiner, M.: Rheologie in elementarer Darstellung. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1968.
- [19] Sharma, M.C., Mohsenin, N.N.: Mechanics of Deformation of a Fruit subjected to hydrostatic Pressure. *J. Agric. Engr. Res* 15 (1970), S. 65–74.
- [20] Segars, R.A., Hamel, R.G., Kaps, J.G.: Use of Poisson's Ratio for objective-subjective Texture Correlations in Beef. An Apparatur for obtaining the required data. *Journal of Texture Studies* 8 (1977), S. 433–447.
- [21] Segerlind, L.J., Snobar, B.A., Heldman, D.R.: Compression and Relaxation Properties of Carrots. *Journal of Texture Studies* 7 (1977), S. 451–456.
- [22] Gupta, N.K., Tscheuschner, H.-D.: Möglichkeiten zur Gestaltung des Schneidprozesses von Schnittbrot aus offenfrischem Brot. *Bäcker und Konditor* (1976) H. 10, S. 300–302.
- [23] Tscheuschner, H.-D.: Textur von Lebensmitteln, dargestellt an Zwieback und Schokolade. Internationales Kolloquium „Neue Trends in der Lebensmittelindustrie“ Prag 1981.
- [24] Tscheuschner, H.-D.: Rheologie und Textur von Lebensmitteln. *Wissenspeicher Lebensmitteltechnik* (Lehrheft für Studierende). Technische Universität Dresden, Sektion Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik 1982.
- [25] Voisey, P.: Effect of Blade Thickness on Readings from the F.T.C. Shear Compression Cell. *Journal of Texture Studies* 7 (1977), S. 433–440.
- [26] Sone, T., Taneya, S.: Breakdown Characteristics of Foods. Konferenzbericht vom IUFoST-Symposium „Food process engineering“ 1979.
- [27] Schenk, R.: Beziehungen zwischen Kaliumdüngung und Schwarzfleckigkeit der Kartoffelknollen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Humboldt-Universität zu Berlin, Math.-Nat. R.* XXX (1981) 2/3, S. 225–229.