

Mechanische Modelle zur Beschreibung des Deformationsverhaltens von Lebensmitteln und ihre Klassifizierung

Doan Du, Horst-Dieter Tscheuschner

1. Einleitung

Lebensmittel (einschließlich der Rohstoffe und Zwischenprodukte) weisen meist ein kompliziertes Deformationsverhalten bei großen Deformationen auf. Beim Verzehr und bei der Verarbeitung sind jedoch große Deformationen (bei der Zerkleinerung, beim Abpressen, Formen, Schneiden, Abbeißen, Kauen) dominierend.

Reiner [1], [2], der sich u. a. auch mit rheologischen Eigenschaften von Lebensmitteln, wie Weizenteig, befaßte, bezeichnete die mechanischen Modelle, die als Deformationsanalogon dienen, als ein nützliches Mittel zur Beschreibung und Quantifizierung der rheologischen Eigenschaften von Lebensmitteln. Die entsprechenden mathematischen Modelle in Form konstitutiver Differential- oder Integralgleichungen besitzen gegenüber den häufig verwendeten empirischen Modellen, die durch Korrelation oder Approximation der Deformationskurven gewonnen werden, einen höheren Informationsgehalt und gestatten eine physikalische Interpretation.

Die klassische lineare Modelltheorie benutzt dabei nur drei Grundelemente:

1. Die Feder als Symbol der idealen Elastizität, entsprechend dem Hookeschen Gesetz,
2. den Dämpfer als Symbol für die ideale Viskosität, entsprechend dem Newtonschen Gesetz,
3. das Reibelement als Symbol für die ideale Fließgrenze, entsprechend der Beziehung von St. Venant.

Diese drei Grundelemente wurden in den letzten Jahren um einige weitere bereichert:

4. durch das Bruchelement, entsprechend der Bruchfestigkeit des Materials bei einer definierten Spannung [3] bis [5],
5. durch das Kontaktelement, das begrenzte Dehnungen ohne Spannungen repräsentiert [6] bis [9],
6. durch das Kontraktelement, das das „Gedächtnis“ für vorangegangene Deformationen darstellt [10], [11].

Des Weiteren wurden modifizierte Bruchelemente für eine definierte Dehnung [12] und für eine definierte Bruchenergie [13] genutzt. Die lineare Modelltheorie hat den Vorteil der Anschaulichkeit des qualitativen Deformationsverhaltens des Modells. Die Übertragung dieses einachsigen Zug- oder Druckverhaltens bzw. des einfachen Scherverhaltens auf einen mehrachsigen Spannungszustand ist jedoch nicht ohne weiteres möglich bzw. äußerst aufwendig.

2. Mechanische Modelle, die zur Beschreibung rheologischer Eigenschaften von Lebensmitteln genutzt werden

Die Beschreibung rheologischer Eigenschaften von Lebensmitteln mittels mechanischer Modelle kann über 60 Jahre zurückverfolgt werden. Zu Beginn standen einfache Modelle aus zwei bis vier Grundelementen im Blickpunkt. Auch für komplizierte rheologische Eigenschaften, wie sie Weizenteig besitzt, wurden zunächst sehr einfache Modelle aufgestellt, die bestimmten Anforderungen genühten. Bei komplizierteren Anforderungen wurden sie jedoch zu ungenau, so daß weitere Modelle entwickelt worden sind [21], [26], [28].

Der Maxwell-Körper (Tabelle 1, Nr. 1) als Grundmodell der relaxierenden viskoelastischen Flüssigkeiten beschreibt hinreichend genau das Fließ- und Deformationsverhalten von flüssiger Karamelmasse, wie sie zur Herstellung von Hartkaramelbonbons dient. Bei Temperaturen über 100 °C ist die Viskosität sehr gering, so daß bei den Fließvorgängen die elastischen Eigenschaften nur wenig in Erscheinung treten. Beim Abkühlen unter 80 °C steigt die Viskosität stark an, die Masse erscheint plastisch, und die elastischen Eigenschaften fallen stärker ins Gewicht, was insbesondere bei der Strangausformung, Kalibrierung, beim Schneiden und Verpacken auf Hochleistungsanlagen bedeutsam wird. Im abgekühlten Zustand steigt die Viskosität des in einem glasartigen Zustand vorliegenden Hartkaramelbonbons auf äußerst hohe Werte ($n \rightarrow \infty$), und die elastischen Eigenschaften treten fast ausschließlich in Erscheinung.

Die Nutzung dieses Modells für Kartoffeln stellt eine starke Vereinfachung dar, bei der besonders das Relaxationsverhalten der Kartoffeln beschrieben wird. Es ist deshalb auch nicht zufällig, daß das Bingham-, das Maxwell-Thomson- und das Burger-Modell (Tabelle 1, Nr. 2, Nr. 3 und Nr. 7) ebenfalls für Kartoffeln Anwendung finden. Auch Äpfel, die einen ähnlichen strukturellen Aufbau des Zellgewebes wie Kartoffeln aufweisen [9], werden mit verschiedenen, meist jedoch mit den komplizierteren Modellen beschrieben (Tabelle 1, Nr. 4, Nr. 7).

Auch bei diesen Modellen handelt es sich um starke Vereinfachungen für das wahre Deformationsverhalten, wodurch die Gültigkeitsgrenze eingeschränkt ist.

Weizenmehlteig besitzt verhältnismäßig komplizierte Eigenschaften. Das von Bloksma (Tabelle 1, Nr. 5) gewählte Modell zeigt dabei nur drei Eigenschaften, das viskose Fließen und das Retardations- und Relaxations-

Tabelle 1
Nutzung mechanischer Modelle für das Deformations- und Fließverhalten von einigen Lebensmitteln

Nr.	Mechanisch. Modell	Material	Autor	Nr.	Mechanisch. Modell	Material	Autor	Nr.	Mechanisch. Modell	Material	Autor	Nr.	Mechanisch. Modell	Material	Autor
1		Kartoffel	Gießmann, Sager (1982)	4		Obst als Schnittgut	Mehsenin, Marrow (1966)	7		Kartoffel Einbeck und Zwieback Gelee	Marrow, Mehseini (1965) Bajsz, Sitkei (1982) Bindrich, Tschuschner (1983) Andersson, Schmandke (1984)	10		Pressen von nassem Zucker	Kot, Gyugala (1969)
2		Preißtorte Feste, langwirksame, schätzliche Stoffe Kartoffel	Tschuschner (1964) Gru, Berg, Gießmann (1982) Sager (1983) Sager, Gießmann (1984)	5		Weizenmehl	Blakama (1972)	8		konzentrierte Getreidelösung	Schwadoff, Hatschek, Jane (1928)	11		Hühnerfleisch	Nakagama (1970)
3		Kartoffel	Nowitzki (1983)	6		Butter	Elliott, Ganz (1971)	9		Fleisch, Fleischprodukt	Tschuschner (1982)	12		Tabak beim Pressen	Paschkow, Awgkjan (1970)
13		getrocknete Rübenschnitzel beim Pressen	Kegeles (1979)	15		frisches Brot beim Schneiden	Gupta, Tschuschner (1972)	17		Speiseeis	Sharma, Shermann (1968)	19		Schokolade	Tschuschner (1984)
14		Weizenmehl Brotkrume	Schofield-Scott-Blair (1932) Telegay Kovats, Laszity, Major, Mezel-kovits (1963)	16		Weizenmehl	Krasowskaja (1952)	18		Weizenmehl bei Dehnung	Glücklich, Sheleg (1982)	20		Apfel	Duan Du, Tschuschner (1985)

verhalten. Dieses Modell ist ausreichend bei der Beschreibung des Fließvorganges in Rohren und Kanälen von Verarbeitungsmaschinen. Für die Ausformung und andere verarbeitungstechnische Vorgänge ist es jedoch zu ungenau. Kompliziertere und damit für die Mehrzahl der praktisch vorkommenden Verformungs- und Beanspruchungsfälle gültige Modelle wurden von zahlreichen Autoren entworfen (Tabelle 1, Nr. 14, Nr. 16, Nr. 18), um nur einige vorzustellen. Auch für Brotkrume gelten gleiche Modelle wie für Weizenteig (Tabelle 1, Nr. 14, 15). Das Problem des Schneidens von frischem Brot, bei dem die Fließgrenze (Tabelle 1, Nr. 15) noch klein ist, Spannungen schnell relaxieren und plastische unerwünschte Deformationen entstehen, konnte dadurch gelöst werden [5], daß durch Einleiten von Schnittkräften bei hohen Deformationsgeschwindigkeiten die Bruchspannung σ_{Br} erreicht wurde, bevor die Spannungen relaxieren und spürbare plastische Deformationen eintreten. Viskoelastische Festkörpereigenschaften, zum Teil mit Fließgrenze, konnten beim Verpressen angefeuchteten Kristallzuckers (Würfelzuckerherstellung) (Tabelle 1, Nr. 10), bei Fleisch und Fleischprodukten (Tabelle 1, Nr. 9, 11) festgestellt werden. Die Modelle 12 und 13 (Tabelle 1), die für das Deformationsverhalten von Tabakblättern bzw. getrockneten Rübenschnitzeln beim Pressen vorgeschlagen wurden, sind qualitativ identisch mit dem Burger-Modell (Tabelle 1, Nr. 7), da mehrere in Reihe geschaltete Hookesche oder Newtonsche Elemente durch jeweils ein einziges Element ersetzt werden können (vgl. Tabelle 2, Nr. 20 und 22).

Modelle, die das Deformations- und Fließverhalten rheologisch komplizierter Lebensmittel in einem umfassenden Beanspruchungsbereich zeigen, wurden außer für Weizenteig und Brot auch für Speiseeis, erstarrte Schokoladenmasse und Äpfel bei einachsiger Druckbeanspruchung bis zum Bruch abgeleitet (Tabelle 1, Nr. 16 bis 20).

3. Systematik mechanischer Modelle zur Darstellung rheologischer Eigenschaften

Reiner [25] nahm eine Einteilung der mechanischen Modelle nach der Anzahl der Elemente und nach den Eigenschaften viskoses Fließen, plastische Deformation, elastische Deformation vor. Hierbei wurden als Grundelemente die Newtonsche Viskosität, die Hookesche Elastizität und das Reibglied von St. Venant verwendet. In dieser Betrachtung wurden das Trouton-Rankine-Modell, das Burger-Modell und das Schwedoff-Modell mit vier Elementen einbezogen. Als kompliziertestes Modell mit fünf Elementen wird nur das Schofield-Scott-Blair-Modell betrachtet.

Die Einteilung nach der Anzahl der Elemente eines Modells widerspiegelt jedoch nicht zwingend qualitativ vergleichbare Eigenschaften. Es wurde deshalb eine größere Anzahl von Modellen, die aus zwei bis neun Elementen bestehen, untersucht und dabei auch das Bruchelement und das Kontaktelement mit einbezogen. Für diese Modelle wurden die konstitutiven Differentialgleichungen des Typs

$$\sigma + A_1 \dot{\sigma} + A_2 \ddot{\sigma} + \dots = B_0 \epsilon + B_1 \dot{\epsilon} + B_2 \ddot{\epsilon} + B_3 \dddot{\epsilon} + \dots + C$$
 aufgestellt und die Koeffizienten berechnet (Tabelle 2).

Die Koeffizienten repräsentieren bestimmte Eigenschaften, die Grundlage der Einteilung der Modelle sein können.

Die Hookesche Elastizität wird durch den Koeffizienten B_0 , die Newtonsche Viskosität durch den Koeffizienten B_1 und die Unstetigkeitseigenschaften (Fließgrenze ϑ) werden durch den Koeffizienten C repräsentiert. Das Relaxationsverhalten spiegelt der Koeffizient A_1 , das Retardationsverhalten von festen Körpern der Koeffizient B_1 wider. Der Koeffizient A_2 zeigt beschleunigte Relaxation und der Koeffizient B_2 beschleunigte Retardation bei Festkörpern und der Koeffizient B_3 beschleunigte Retardation bei Flüssigkeiten an. Der Koeffizient C kann allein oder in Kombination mit anderen Koeffizienten auftreten. Er bewirkt eine Modifizierung der Grundeigenschaften für bestimmte Spannungs- oder Deformationsbereiche. Beim Überschreiten des entsprechenden Grenzwertes erfolgt plötzlich ein anderes Deformationsverhalten. Modelle, die Unstetigkeitselemente enthalten, können deshalb nur für definierte Spannungs- bzw. Deformationsbereiche einem bestimmten Grundmodell zugeordnet werden (Tabelle 3).

Ein Vergleich dieser Klassifizierungskriterien mit denen von Reiner zeigt, daß für die ausgewählten Grundmodelle eine Übereinstimmung besteht. Es erweist sich, daß die Anzahl der Elemente eines Modells ein notwendiges, aber nicht hinreichendes Kriterium ist. Eine Reihe komplizierter Modelle zeigt Eigenschaften, die auch mit Modellen geringerer Elementenzahl dargestellt werden können. Deshalb ist eine Klassifizierung der Modelleigenschaften nach den Koeffizienten der konstitutiven Gleichung eine hinreichende zuverlässige Methode. Eine systematische Übersicht über die Koeffizienten gibt Tabelle 4.

LITERATUR

- [1] Reiner, M.: Phenomenological macrorheology. In: Rheology - Theory and Applications (F. R. Eirich, ed.). Academic Press, New York 1957.
- [2] Reiner, M.; C. H. Lerchenthal: Correlation of technological measurements with rheological parameters of flour doughs prepared from wheat to provide a basis for increased utilization of wheat. Technion-Israel Inst. Technol. Dept. Mechanics, Final Rept. TDM 67 - 64 (1967).
- [3] Lerchenthal, C. H., C. B. Funt: The strength of wheat flour dough in uniaxial tension. Proc. Symp. on Rheology of Foodstuffs, Leeds 1967.
- [4] Drake, B.: A Fortran program „FRAMOD“ for simulation of large fracto-viscoelastic models. J. Texture Studies 10, 165 - 182 (1971).
- [5] Tscheuschner, H.-D.; N. K. Gupta: Möglichkeiten zur Gestaltung des Schneidprozesses von Schnittbrot aus offenem Brot. Forschungsbericht TU Dresden, Sektion Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik, 1972.
- [6] Bourne, M. C.: Deformation testing of foods. 2. A simple spring model of deformation. J. Food Sci. 32, 605 - 607 (1967)
- [7] Wiidik, A.: A rheological model for uncalcified parallel-fibered collagenous tissue. J. Biomechanics 1, 3 - 11 (1968).

Tabelle 2
Systematische Darstellung von mechanischen Modellen und
ihren konstitutiven Differentialgleichungen

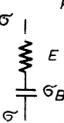
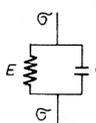
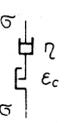
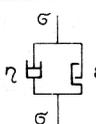
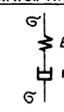
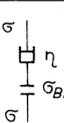
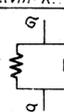
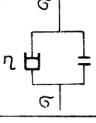
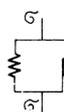
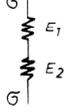
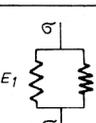
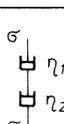
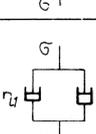
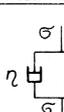
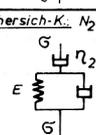
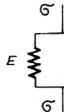
Lfd. Nr.	Mechanisches Modell	Konstitutive Differentialgleichung $\sigma + A_1 \dot{\sigma} + A_2 \ddot{\sigma} + A_3 \ddot{\sigma} + \dots = B_0 \epsilon + B_1 \dot{\epsilon} + B_2 \ddot{\epsilon} + \dots + C$	Lfd. Nr.	Mechanisches Modell	Konstitutive Differentialgleichung $\sigma + A_1 \dot{\sigma} + A_2 \ddot{\sigma} + A_3 \ddot{\sigma} + \dots = B_0 \epsilon + B_1 \dot{\epsilon} + B_2 \ddot{\epsilon} + \dots + C$
1	Hooke-Körper: H 	$\sigma = E \epsilon$	14a	H-Br. 	$\frac{\sigma < \sigma_{Br}}{\sigma = E \epsilon}$
2	Newton-Körper: N 	$\sigma = \eta \dot{\epsilon}$	14b		$\frac{\sigma \geq \sigma_{Br}}{\epsilon \rightarrow \infty ; E = 0}$
3a	Saint-Venant K.: St.V 	$\frac{\sigma < \dot{\nu}}{E = 0}$	15a	H/Br. 	$\frac{\sigma < \sigma_{Br}}{E = 0}$
3b		$\frac{\sigma \geq \dot{\nu}}{E \rightarrow \infty}$	15b		$\frac{\sigma \geq \sigma_{Br}}{\sigma = E \epsilon}$
4a	Bruch-Elem.: Br. 	$\frac{\sigma < \sigma_{Br}}{\epsilon = 0}$	16a	N-Co 	$\frac{E < \epsilon_c}{\sigma = 0}$
4b		$\frac{\sigma \geq \sigma_{Br}}{\epsilon \rightarrow \infty}$	16b		$\frac{E \geq \epsilon_c}{\sigma = \eta \dot{\epsilon}}$
5a	Kontakt-Elem.: Co 	$\sigma = 0$	17a	N/Co 	$\frac{E < \epsilon_c}{\sigma = \eta \dot{\epsilon}}$
5b		$\frac{\sigma = \sigma_{Bel}}{\epsilon = \epsilon_c}$	17b		$\frac{E = \epsilon_c}{\sigma = \sigma_{Bel}}$
6	Maxwell-K.: M=H-N 	$\sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\epsilon}$	18a	N-Br. 	$\frac{\sigma = \sigma_{Br}}{\sigma = \eta \dot{\epsilon}}$
7	Kelvin-K.: K=H/N 	$\sigma = E \epsilon + \eta \dot{\epsilon}$	18b		$\frac{\sigma \geq \sigma_{Br}}{E \rightarrow \infty ; \eta \rightarrow 0}$
8a	Prandtl-K.: H-St.V 	$\frac{\sigma < \dot{\nu}}{\sigma = E \epsilon}$	19a	N/Br. 	$\frac{\sigma \leq \sigma_{Br}}{\epsilon = 0}$
8b		$\frac{\sigma \geq \dot{\nu}}{\sigma = E \epsilon + \dot{\nu}}$	19b		$\frac{\sigma > \sigma_{Br}}{\sigma = \eta \dot{\epsilon}}$
9a	H/St.V 	$\frac{\sigma < \dot{\nu}}{E = 0}$	20	H-H ₂ 	$\sigma = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \epsilon$
9b		$\frac{\sigma \geq \dot{\nu}}{\sigma = E \epsilon + \dot{\nu}}$	21	H/H ₂ 	$\sigma = (E_1 + E_2) \epsilon$
10a	N-St.V 	$\frac{\sigma < \dot{\nu}}{\sigma = \eta \dot{\epsilon}}$	22	N-N ₂ 	$\sigma = \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \dot{\epsilon}$
10b		$\frac{\sigma \geq \dot{\nu}}{E \rightarrow \infty}$	23	N/N ₂ 	$\sigma = (\eta_1 + \eta_2) \dot{\epsilon}$
11a	Schwedoff-Bingham-K. N/St.V 	$\frac{\sigma < \dot{\nu}}{E = 0}$	24	Lethersich-K.: N ₂ -(H/N ₁) 	$\sigma + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E} \dot{\sigma} = \eta_2 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E} \ddot{\epsilon}$
11b		$\frac{\sigma \geq \dot{\nu}}{\sigma = \eta \dot{\epsilon} + \dot{\nu}}$			
12a	H-Co 	$\frac{E \leq \epsilon_c}{\sigma = 0}$			
12b		$\frac{E > \epsilon_c}{\sigma = E (\epsilon - \epsilon_c)}$			
13a	H/Co 	$\frac{E < \epsilon_c}{\sigma = E \epsilon}$			
13b		$\frac{E = \epsilon_c}{\sigma \geq E \epsilon + \sigma_{Bel}}$			

Tabelle 2 (Fortsetzung)

Lfd. Nr.	Mechanisches Modell	Konstitutive Differentialgleichung $\sigma = A_1 \dot{\sigma} + A_2 \ddot{\sigma} + A_3 \dot{\epsilon} + \dots = B_0 \epsilon + B_1 \dot{\epsilon} + B_2 \ddot{\epsilon} + \dots + C$	Lfd. Nr.	Mechanisches Modell	Konstitutive Differentialgleichung $\sigma = A_1 \dot{\sigma} + A_2 \ddot{\sigma} + A_3 \dot{\epsilon} + \dots = B_0 \epsilon + B_1 \dot{\epsilon} + B_2 \ddot{\epsilon} + \dots + C$
25		$\sigma + \frac{\eta_1}{E} \dot{\sigma} = (\eta_1 + \eta_2) \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E} \ddot{\epsilon}$	38a		$\sigma = \sigma_{Br}$ $\sigma = \eta_1 \dot{\epsilon}$
26		$\sigma + \frac{\eta}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon + \frac{\eta E_2}{E_1 + E_2} \dot{\epsilon}$	38b		$\sigma \approx \sigma_{Br}$ $\sigma = \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \dot{\epsilon}$
27		$\sigma + \frac{\eta}{E_1} \dot{\sigma} = E_2 \epsilon + \frac{\eta(E_1 + E_2)}{E_1} \dot{\epsilon}$	39a		$t < \frac{E_c \eta_2}{\sigma} \quad \sigma = \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \dot{\epsilon}$
28		$\sigma = (E_1 + E_2) \epsilon + \eta \dot{\epsilon}$	39b		$t \geq \frac{E_c \eta_2}{\sigma} \quad \sigma = \eta_1 \dot{\epsilon}$
29		$\sigma = E \epsilon + (\eta_1 + \eta_2) \dot{\epsilon}$	40a		$E \dot{\epsilon} < \dot{\sigma} \quad \sigma = E \epsilon + \eta \dot{\epsilon}$
30a		$\sigma < \dot{\sigma} \quad \epsilon = 0$	40b		$E \dot{\epsilon} \geq \dot{\sigma} \quad \sigma = \eta \dot{\epsilon} + \dot{\sigma}$
30b		$\sigma \geq \dot{\sigma} \quad \sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\epsilon} + \dot{\sigma}$	41a		$E \leq E_c \quad \sigma = E \epsilon$
31a		$\sigma < \dot{\sigma} \quad \sigma = E \epsilon$	41b		$E > E_c \quad \sigma = E_2 \epsilon + E_1 (E - E_c)$
31b		$\sigma \geq \dot{\sigma} \quad \sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\epsilon} + \dot{\sigma}$	42a		$\sigma < \dot{\sigma} \frac{E_1 + E_2}{E_1} \quad \sigma = (E_1 + E_2) \epsilon$
32a		$\sigma < \dot{\sigma} \quad \epsilon = 0$	42b		$\sigma \geq \dot{\sigma} \frac{E_1 + E_2}{E_1} \quad \sigma = E_2 \epsilon + \dot{\sigma}$
32b		$\sigma \geq \dot{\sigma} \quad \sigma = E \epsilon + \eta \dot{\epsilon} + \dot{\sigma}$	43a		$E \leq E_c \quad \sigma = \eta \dot{\epsilon}$
33a		$\sigma \leq \sigma_{Br} \quad \epsilon = 0$	43b		$E > E_c \quad \sigma = E (E - E_c) + \eta \dot{\epsilon}$
33b		$\sigma > \sigma_{Br} \quad \sigma = E \epsilon + \eta \dot{\epsilon}$	44		$\sigma + \frac{\eta_1(E_1 + E_2) + \eta_2 E_1}{E_1 E_2} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\epsilon}$
34a		$E < E_c \quad \sigma = E \epsilon + \eta \dot{\epsilon}$	45		$\sigma + \frac{\eta_1}{E_1} \dot{\sigma} = E_2 \epsilon + \frac{\eta_1(E_1 + E_2) + \eta_2 E_1}{E_1} \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1} \ddot{\epsilon}$
34b		$E = E_c \quad \sigma = E \epsilon + \sigma_{Bel}$	46		$\sigma + \frac{(E_1 \eta_2 + E_2 \eta_1)}{E_1 E_2} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = (\eta_1 + \eta_2) \dot{\epsilon} + \frac{(E_1 + E_2) \eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\epsilon}$
35a		$\sigma < \sigma_{Br} + E \dot{\epsilon} \quad \sigma = E \epsilon + \eta \dot{\epsilon}$	47		$\sigma + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon + \frac{E_1 \eta_2 + E_2 \eta_1}{E_1 + E_2} \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 + E_2} \ddot{\epsilon}$
35b		$\sigma \geq \sigma_{Br} + E \dot{\epsilon} \quad \sigma = E \epsilon$	48		$\sigma + \frac{E_1 \eta_2 + E_2 (\eta_1 + \eta_2)}{E_1 E_2} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\epsilon} + \frac{(E_1 + E_2) \eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\epsilon}$
36a		$\sigma < \sigma_{Br} \quad \sigma = \eta \dot{\epsilon}$	49a		$\sigma = \eta_1 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \dot{\sigma} = \eta_2 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E} \ddot{\epsilon}$
36b		$\sigma \geq \sigma_{Br} \quad \sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\epsilon}$	49b		$\sigma = \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \dot{\epsilon} + \frac{\eta_2 \dot{\sigma}}{\eta_1 + \eta_2}$
37a		$\sigma < E \dot{\epsilon} \quad \sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\epsilon}$			
37b		$\sigma \geq E \dot{\epsilon} \quad \sigma = \eta \dot{\epsilon}$			

Tabelle 2 (Fortsetzung)

Lfd. Nr.	Mechanisches Modell	Konstitutive Differentialgleichung $\sigma = A_1 \dot{\sigma} + A_2 \ddot{\sigma} + A_3 \ddot{\sigma} + \dots + B_0 \epsilon + B_1 \dot{\epsilon} + B_2 \ddot{\epsilon} + \dots + C$	Lfd. Nr.	Mechanisches Modell	Konstitutive Differentialgleichung $\sigma = A_1 \dot{\sigma} + A_2 \ddot{\sigma} + A_3 \ddot{\sigma} + \dots + B_0 \epsilon + B_1 \dot{\epsilon} + B_2 \ddot{\epsilon} + \dots + C$
50a		$\sigma < \dot{\sigma}$ $\sigma = E_1 \epsilon$	60a		$\sigma < \dot{\sigma}$ $\sigma + \frac{\eta_1}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon + \frac{\eta_1 E_2}{E_1 + E_2} \dot{\epsilon}$
50b		$\sigma \geq \dot{\sigma}$ $\sigma + \frac{\eta}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon + \frac{E_1 \eta}{E_1 + E_2} \dot{\epsilon} + \frac{E_1 \dot{\eta}}{E_1 + E_2} \dot{\epsilon}$	60b		$\sigma \geq \dot{\sigma}$ $\sigma + \frac{\eta_1 \eta_2 + \eta_2 (E_1 + E_2)}{E_1 E_2} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_2 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1} \ddot{\epsilon} + \dot{\sigma}$
51a		$\sigma < \dot{\sigma}$ $\sigma = E_1 \epsilon$	61a		$\sigma \leq \dot{\sigma} < \dot{\sigma}_{Br}$ $\sigma + \frac{\eta_1}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon + \frac{E_2 \eta_1}{E_1 + E_2} \dot{\epsilon}$
51b		$\sigma \geq \dot{\sigma}$ $\sigma + \frac{(E_1 + E_2) \eta}{E_1 E_2} \dot{\sigma} = \eta \dot{\epsilon} + \dot{\sigma}$	61b		$\dot{\sigma} < \sigma < \dot{\sigma}_{Br}$ $\sigma + \frac{E_2 \eta_1 + (E_1 + E_2) \eta_2}{E_1 E_2} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_2 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1} \ddot{\epsilon} + \dot{\sigma}$
52		$\sigma + \frac{E_1 (\eta_1 \eta_2 + \eta_3) + E_2 \eta_1}{E_1 E_2} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 (\eta_2 \eta_3)}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_3 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_3 (E_1 + E_2) + \eta_2 \eta_3 E_1}{E_1 E_2} \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3}{E_1 E_2} \ddot{\epsilon}$	61c		$\sigma \geq \dot{\sigma}_{Br}$ $\epsilon \rightarrow \infty$
53		$\sigma + \frac{(E_2 + E_3) \eta_1 + E_3 \eta_2}{E_2 E_3} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2 E_3} \ddot{\sigma} = E_1 \epsilon + \frac{(E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3) \eta_1 + E_1 E_3 \eta_2}{E_2 E_3} \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2 (E_1 + E_3)}{E_2 E_3} \ddot{\epsilon}$	62		$\sigma + \frac{(E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3) \eta_2 + E_1 E_2 \eta_3 + E_2 E_3 \eta_1}{E_1 E_2 E_3} \dot{\sigma} + \frac{(E_1 + E_2) \eta_2 \eta_3 + (E_2 + E_3) \eta_1 \eta_2 + E_1 \eta_1 \eta_3}{E_1 E_2 E_3} \ddot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3}{E_1 E_2 E_3} \ddot{\sigma} = \eta_2 \dot{\epsilon} + \frac{E_1 \eta_2 \eta_3 + E_3 \eta_1 \eta_2}{E_1 E_3} \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3}{E_1 E_3} \ddot{\epsilon}$
54		$\sigma + \frac{\eta_1 (E_1 + E_2 + E_3) + \eta_2 E_1}{E_1 (E_2 + E_3)} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 (E_2 + E_3)} \ddot{\sigma} = \frac{E_2 E_3}{E_2 + E_3} \epsilon + \frac{\eta_1 E_3 (E_1 + E_2) + \eta_2 E_1 E_3}{E_1 (E_2 + E_3)} \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2 E_3}{E_1 (E_2 + E_3)} \ddot{\epsilon}$	63a		$\sigma < \dot{\sigma}_1, \dot{\sigma}_2$ $\sigma = E_1 \epsilon$
55		$\sigma + \frac{(E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3) \eta_1 + E_1 E_3 \eta_2}{E_1 E_2 E_3} \dot{\sigma} + \frac{(E_1 + E_3) \eta_1 \eta_2}{E_1 E_2 E_3} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\epsilon}$	63b		$\dot{\sigma}_1 \leq \sigma < \dot{\sigma}_2$ $\sigma + \frac{\eta_1}{E_1} \dot{\sigma} = \eta_1 \dot{\epsilon} + \dot{\sigma}_1$
56		$\sigma + \frac{(E_1 + E_2) \eta_1 \eta_3 + E_1 \eta_2 (\eta_1 + \eta_3)}{E_1 E_2 (\eta_1 + \eta_3)} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3}{E_1 E_2 (\eta_1 + \eta_3)} \ddot{\sigma} = \frac{\eta_2 \eta_3}{\eta_1 + \eta_3} \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3}{E_2 (\eta_1 + \eta_3)} \ddot{\epsilon}$	63c		$\dot{\sigma}_2 \leq \sigma < \dot{\sigma}_1$ $\sigma + \frac{\eta_2}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon + \frac{E_1 \eta_2}{E_1 + E_2} \dot{\epsilon} + \frac{E_1 \dot{\eta}_2}{E_1 + E_2} \dot{\epsilon}$
57		$\sigma + \frac{(E_1 E_3 + E_2 E_3) \eta_1 + (E_1 E_3 + E_1 E_2) \eta_2}{E_1 E_2 E_3} \dot{\sigma} + \frac{(E_1 + E_2 + E_3) \eta_1 \eta_2}{E_1 E_2 E_3} \ddot{\sigma} = \eta_2 \dot{\epsilon} + \frac{(E_1 + E_2) \eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\epsilon}$	63d		$\sigma > \dot{\sigma}_1, \dot{\sigma}_2$ $\sigma + \frac{(E_1 + E_2) \eta_1 + E_1 \eta_2}{E_1 E_2} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\epsilon} + \dot{\sigma}_1$
58		$\sigma + \frac{E_1 \eta_3 (\eta_1 + \eta_2) + E_2 \eta_1 (\eta_2 + \eta_3)}{E_1 E_2 (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3}{E_1 E_2 (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)} \ddot{\sigma} = \frac{\eta_3 (\eta_1 + \eta_2)}{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3} \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3}{E_1 (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)} \ddot{\epsilon}$	64a		$\sigma < \dot{\sigma} + \dot{\sigma}_{Br} + \eta \dot{\epsilon}_N$ $\sigma + \frac{\eta}{E_1 + E_2 + E_3 + E_4} \dot{\sigma} = \frac{E_4 (E_1 + E_2 + E_3)}{E_1 + E_2 + E_3 + E_4} \epsilon + \frac{\eta (E_1 + E_2 + E_3)}{E_1 + E_2 + E_3 + E_4} \dot{\epsilon} + \frac{\dot{\eta} (E_1 + E_2 + E_3) + E_4 (E_2 E_4 + E_3 E_2)}{E_1 + E_2 + E_3 + E_4} \dot{\epsilon}$
59		$\sigma + \frac{\eta_2 + \eta_3}{E_2} \dot{\sigma} = E_1 \epsilon + \frac{E_1 (\eta_2 + \eta_3) + E_2 (\eta_1 + \eta_3)}{E_2} \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2 + \eta_2 \eta_3 + \eta_1 \eta_3}{E_2} \ddot{\epsilon}$	64b		$\sigma > \dot{\sigma}_{Br} + \dot{\sigma} + \eta \dot{\epsilon}_N$ $\sigma + \frac{\eta}{E_1 + E_2 + E_3} \dot{\sigma} = \eta \dot{\epsilon} + \dot{\sigma}$
			65a		$\sigma < \dot{\sigma}_1, \dot{\sigma}_2$ $\sigma + \frac{\eta_1}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon + \frac{\eta_1 E_1}{E_1 + E_2} \dot{\epsilon}$
			65b		$\dot{\sigma}_1 \leq \sigma < \dot{\sigma}_2, E_3 < E_{c1} < E_{c2}$ $\sigma + \frac{\eta_1 (E_1 + E_3)}{E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_2 E_3}{E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3} \epsilon + \frac{\eta_1 E_1 E_3}{E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3} \dot{\epsilon} + \frac{E_1 E_2 \dot{\eta}_1}{E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3} \dot{\epsilon}$
			65c		$\dot{\sigma}_2 \leq \sigma < \dot{\sigma}_1, E_3 > E_{c2} > E_{c1}$ $\sigma + \frac{\eta_1 (E_1 + E_3)}{E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_2 E_3}{E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3} \epsilon + \frac{\eta_1 E_1 E_3}{E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3} \dot{\epsilon} + \frac{E_1 E_2 \dot{\eta}_1}{E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3} \dot{\epsilon}$
			65d		$\sigma > \dot{\sigma}_1, \dot{\sigma}_2$ $\sigma + \frac{\eta_2 (E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3) + \eta_1 E_1 E_3}{E_1 E_2 E_3} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2 (E_1 + E_3)}{E_1 E_2 E_3} \ddot{\sigma} = \eta_2 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\epsilon} + \dot{\sigma}_2$

Tabelle 3

Klassifizierung der mechanischen Modelle nach Tabelle 2 durch die Koeffizienten der Differentialgleichung

1. Feste Körper

- | | |
|---|---|
| 1.1. $B_0 > 0$, alle anderen 0 | reinelastischer Festkörper
Grundmodell Nr. 1 Hooke |
| 1.2. $B_0, B_1 > 0$, alle anderen 0 | retardierender viskoelastischer Festkörper
Grundmodell Nr. 7, Kelvin |
| 1.3. $A_1, B_0, B_1 > 0$, alle anderen 0 | retardierender und relaxierender viskoelastischer
Festkörper
Grundmodell Nr. 26 Maxwell-Thomson |
| 1.4. $A_1, B_0, B_1, B_2 > 0$, alle anderen 0 | beschleunigt retardierender und relaxierender
Festkörper
Grundmodell Nr. 45 |
| 1.5. $A_1, A_2, B_0, B_1, B_2 > 0$, alle anderen 0 | beschleunigt retardierender und beschleunigt
relaxierender Festkörper
Grundmodell Nr. 53 |

2. Flüssigkeiten

- | | |
|---|---|
| 2.1. $B_1 > 0$, alle anderen 0 | reinviskose Flüssigkeit
Grundmodell Nr. 2 Newton |
| 2.2. $A_1, B_1 > 0$, alle anderen 0 | relaxierende viskoelastische Flüssigkeit
Grundmodell Nr. 6 Maxwell |
| 2.3. $A_1, B_1, B_2 > 0$, alle anderen 0 | relaxierende und retardierende viskoelastische
Flüssigkeit
Grundmodell Nr. 24 Lethersisch |
| 2.4. $A_1, A_2, B_1, B_2 > 0$, alle anderen 0 | beschleunigt relaxierende und retardierende
viskoelastische Flüssigkeit
Grundmodell Nr. 44 Burger |
| 2.5. $A_1, A_2, B_1, B_2, B_3 > 0$, alle anderen 0 | beschleunigt relaxierende und beschleunigt
retardierende viskoelastische Flüssigkeit
Grundmodell Nr. 52 |

3. Plasto-viskose Körper

Jeder flüssige Körper entsprechend Gruppe 2.1. bis 2.5., deren Modell ein Reibelement parallel zu den viskosen Elementen enthält. Grundmodelle sind Nr. 11, 30 (Tabelle 2).

Die Koeffizienten B_1, C müssen größer Null sein,
 B_0 muß Null sein.

4. Plasto-elastische Körper

Jeder feste Körper entsprechend Gruppe 1.1. bis 1.5., deren Modell ein Reibelement parallel zu einem oder mehreren elastischen Elementen enthält.

Grundmodelle sind Nr. 9 b, 32 b (Tabelle 2).

Die Koeffizienten B_0, C müssen größer Null sein.

- | | |
|---|--|
| [8] Peleg, M.: Contact and fracture elements as components of the rheological memory of solid foods. <i>J. Texture Studies</i> 8, 39 – 48 (1977). | [13] Tscheuschner, H.-D.: Wissensspeicher Rheologie der Lebensmittel. TU Dresden 1982. |
| [9] Tscheuschner, H.-D., L. Linke: Probleme der Erfassung mechanischer Eigenschaften pflanzlicher Rohstoffe und deren Verarbeitungsprodukte. <i>Technische Mechanik</i> 4, H. 4 (1983). | [14] Gießmann, E.-J., D. Sager: Temperaturabhängigkeit der Relaxation bei Kartoffeln. <i>Physik und Landwirtschaft. Tagungsbericht Nr. 20 Teil II</i> , 1982. |
| [10] Stoner, D. L., G. C. Haugh, J. C. Forrest, V. E. Sweat: A mechanical model for post mortem striated muscle. <i>J. Texture Studies</i> 4, 483 – 493 (1970). | [15] Bajsz, I., G. Sitkei: Apfelbeschädigung bei zyklisch wiederholter dynamischer Belastung. <i>Physik und Landwirtschaft. Tagungsbericht Nr. 208 Teil II</i> , 1982. |
| [11] Fung, Y. C.: <i>Biomechanics</i> . Springer-Verlag, New York 1981. | [16] Grau, P., G. Berg, E.-J. Gießmann: Rheologische Untersuchungen fester Stoffe mit Dehnungsratenwechsellösungen. <i>Technische Mechanik</i> 4, H. 3, (1983). |
| [12] Peleg, M., M. D. Normand: Comparison of two methods for stress relaxation data presentation of solid foods. <i>Rheolog. Acta</i> 22, 108 – 113 (1983). | [17] Hellebrand, I.: Mechanische Eigenschaften pflanzlicher Stoffe bei dynamischer Beanspruchung. <i>Physik und Landwirtschaft. 3. Wissenschaftliche Tagung Agrophysik</i> 1984. |

Tabelle 4
Systematische Koeffizientenübersicht (nach Tabelle 2)

Nr.	A ₁	A ₂	A ₃	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	C	Nr.	A ₁	A ₂	A ₃	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	C	Nr.	A ₁	A ₂	A ₃	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	C
1				+					22					+				44	+	+			+	+		
2					+				23						+			45				+		+		
3a									24	+				+	+			46	+	+			+	+		
3b								+	25	+				+	+	+		47	+			+	+	+		
4a									26	+			+					48	+	+			+	+	+	
4b								+	27	+			+	+				49a	+				+	+		
5a									28				+	+				49b						+		+
5b									29				+	+				50a					+			+
6	+				+				30a									50b	+			+	+			+
7				+	+				30b	+				+				51a				+				
8a				+					31a				+					51b	+				+			+
8b								+	31b	+			+					52	+	+			+	+	+	
9a								+	32a									53	+	+		+	+	+		
9b				+				+	32b				+	+				54	+	+		+	+	+		
10a					+				33a				+	+				55	+	+		+	+	+		
10b								+	33b				+	+				56	+	+		+	+	+		
11a									34a				+	+				57	+	+		+	+	+		
11b					+			+	34b				+	+				58	+	+		+	+	+		
12a								+	35a				+	+				59	+			+	+	+		
12b				+					35b				+					60a	+			+	+	+		
13a				+					36a				+					60b	+	+		+	+	+		+
13b				+				+	36b	+			+					61a	+			+	+	+		+
14a				+					37a	+			+					61b	+	+		+	+	+		+
14b									37b				+					61c								
15a									38a				+					62	+	+	+		+	+	+	
15b				+					38b				+					63a				+		+	+	
16a									39a				+					63b	+			+				+
16b					+				39b				+					63c	+			+	+	+		+
17a					+				40a				+	+				63d	+	+		+	+	+		+
17b								+	40b				+	+				64a	+			+	+	+		+
18a					+				41a				+					64b	+			+	+	+		+
18b									41b				+					65a	+			+	+	+		+
19a									42a				+					65b	+			+	+	+		+
19b					+				42b				+					65c	+			+	+	+		+
20				+					43a				+	+				65d	+	+		+	+	+		+
21				+					43b				+	+												

- [18] Sager, D.: Temperaturabhängigkeit der Spannungsrelaxation in Kartoffeln. Diss. A an der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg 1983.
- [19] Sager, D., E.-J. Gießmann: Über eine Methode zur Beschreibung von Spannungsrelaxationskurven. III. Kolloquium „Rheologie und Textur der Lebensmittel“ 1984.
- [20] Morrow, C. T., N. N. Mohsenin: Consideration of selected agricultural products as viscoelastic material. J. Food Sci. 31, 686 – 698 (1966).
- [21] Bloksma, A. H.: Rheology of wheat flour doughs. J. Texture Studies 3, 3 – 17 (1972).
- [22] Elliot, J. H., A. J. Ganz: Modification of food characteristics with cellulose hydrocolloids. I. Rheological characterization of an organoleptic property. J. Texture Studies 2, 220 – 229 (1971).
- [23] Bindrich, U., H.-D. Tscheuschner: Textur von Lebensmitteln als Qualitätsmerkmal, dargestellt an Zwieback. Wiss. Zeitschrift der TU Dresden 32, H. 2(1983).
- [24] Andersson, O., H. Schmandke: Zur Untersuchung von viskoelastischen Kriechkurven an einigen Lebensmitteln. III. Kolloquium „Rheologie und Textur der Lebensmittel“ 1984.
- [25] Reiner, M.: Rheologie in elementarer Darstellung. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1968.
- [26] Matschichin, Ju. A., S. A. Matschichin: Technische Rheologie von Lebensmittelmateriale. Moskau, Leicht- und Lebensmittelindustrie, 1981.
- [27] Sato, Y., T. Nakayama: Discussion of the binding quality of minced meats based on their rheological properties before and after heating. J. Texture Studies 1, 309 – 326 (1970).
- [28] Schofield, R. K., G. W. Scott Blair: The relationship between viscosity, elasticity, and plastic strength of soft materials as illustrated by some mechanical properties of flour doughs. I. Proc. Roy. Soc. London 138, 707 – 710 (1932), II. Proc. Roy. Soc. London A 139, 557 – 566 (1933).
- [29] Holt, J., D. Schoorl: Bruising and energy dissipation in apples. J. Texture Studies 7, 421 – 432 (1977).
- [30] Gupta, N. K., H.-D. Tscheuschner: Möglichkeiten zur Gestaltung des Schneidprozesses für die Herstellung von Schnittbrot aus offenfrischem Brot. Bäcker und Konditor H. 10, 300 – 301 (1976).
- [31] Tscheuschner, H.-D.: Untersuchung über die Anwendbarkeit des Penetrometers AP 4 zur Bewertung von Qualitätseigenschaften an Roh-, Zwischen- und Fertigprodukten der Backwarenindustrie. Dissertation, TU Dresden 1964.
- [32] Tscheuschner, H.-D.: Forschungsbericht 1984 (unveröffentlicht). TU Dresden.
- [33] Doan Du, H.-D. Tscheuschner: Forschungsbericht (unveröffentlicht). TU Dresden.
- [34] Shama, F., P. Sherman: J. Food Sci. 31, 699 (1966).
- [35] Tscheuschner, H.-D.: Studie über rheologische Eigenschaften von Karamelmassen (unveröffentlicht). TU Dresden 1984.