

<b>Zeitschrift:</b>	Mitteilungen aus dem Gebiete der Lebensmitteluntersuchung und Hygiene = Travaux de chimie alimentaire et d'hygiène
<b>Herausgeber:</b>	Bundesamt für Gesundheit
<b>Band:</b>	70 (1979)
<b>Heft:</b>	1
<b>Artikel:</b>	Qualitätsbeurteilung von Lebensmitteln mit physikalischen Methoden
<b>Autor:</b>	Schubert, H.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-983709">https://doi.org/10.5169/seals-983709</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 25.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

H. Schubert, Institut für Verfahrenstechnik der Bundesforschungsanstalt für Ernährung, Karlsruhe (2. Hauptvortrag)

## Qualitätsbeurteilung von Lebensmitteln mit physikalischen Methoden

### Einleitung

Neben den Inhaltsstoffen und den sensorischen Qualitätsmerkmalen wie Geschmack und Geruch sind physikalische Eigenschaften Kriterien zur Beurteilung von Lebensmitteln. Gegenüber der sensorischen Analyse liefern physikalische Methoden objektive Meßdaten, die vielfach schnell und zuverlässig erfaßt werden können. Man beobachtet daher eine zunehmende Tendenz, physikalische Meßverfahren für Lebensmittel zu entwickeln bzw. bekannte Meßmethoden auf Lebensmittelstoffe anzuwenden. Diese Entwicklung wird durch die Bereitstellung neuer Meßelemente und Auswertmöglichkeiten unterstützt.

Eine systematische Einteilung der physikalischen Meßmethoden wird durch die große Vielfalt der Lebensmittelstoffe erschwert. Je nach Produktart muß mitunter dieselbe physikalische Eigenschaft mit sehr unterschiedlichen Methoden gemessen werden. Im folgenden wird daher eine Einteilung nach übergeordneten physikalischen Eigenschaften und nicht nach den Meßmethoden vorgenommen. Bereits Jowitt (1) hat eine derartige Klassifizierung vorgeschlagen und hierbei zwischen 1. mechanischen Eigenschaften, 2. thermischen Eigenschaften, 3. Diffusions- und verwandten Eigenschaften sowie 4. elektromagnetischen und elektrostatischen Eigenschaften unterschieden. Insgesamt enthält diese Zusammenstellung fast 80 verschiedene physikalische Eigenschaften, von denen mehr als die Hälfte den mechanischen Eigenschaften zugeordnet ist. In der folgenden Uebersicht kann davon nur eine kleine Auswahl behandelt werden. Aufgrund der hier gesetzten Schwerpunkte unter besonderer Berücksichtigung fester, insbesondere auch disperter Lebensmittel hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die von Jowitt vorgeschlagene Einteilung zu modifizieren. Bei den mechanischen Eigenschaften wird zwischen kompakten und dispersen Lebensmittelstoffen unterschieden, da jeweils sehr unterschiedliche Meßverfahren erforderlich sind. Ein Stoff wird als kompakt bezeichnet, wenn er hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften eine fest miteinander verbundene Einheit bildet und das Zusammenwirken einzelner Elemente nicht gesondert betrachtet werden muß. Beispiele hierfür sind eine einzelne Kartoffel, ein Apfel oder auch die einzelnen Partikel eines Pulvers. Handelt es sich dagegen um eine Anordnung vieler Partikeln, beispiels-

weise einer Pulverschüttung, so spricht man von einem dispersen Stoff. Darüber hinaus existieren noch sog. kompakt-disperse Stoffsysteme, die je nach Fragestellung zu den kompakten oder zu den dispersen Systemen gezählt werden können. Ein Beispiel hierfür ist ein aus einzelnen Partikeln zusammengesetztes Agglomerat. Zur Kennzeichnung der Agglomeratgröße hat es die Eigenschaft eines kompakten Stoffes. Will man die Durchströmungseigenschaften charakterisieren, so gelten im allgemeinen die Gesetzmäßigkeiten für disperse Systeme. In Abbildung 1 ist die hier gewählte Einteilung nach physikalischen Eigenschaften und nach den Stoffklassen fester Lebensmittel zusammengefaßt.

#### A. Einteilung nach physikalischen Eigenschaften

1. Mechanische Eigenschaften
2. Thermische Eigenschaften
3. Diffusions- und Sorptionseigenschaften
4. Elektrische Eigenschaften
5. Optische Eigenschaften

#### B. Einteilung nach Stoffklassen fester Lebensmittel

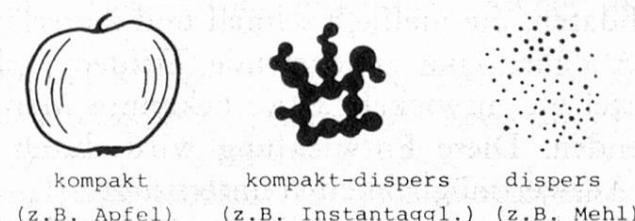


Abb. 1. Einteilung fester Lebensmittel nach physikalischen Eigenschaften und Stoffklassen

### Qualität und physikalische Eigenschaften

Unter Qualität im Zusammenhang mit Lebensmitteln werden Eigenschaften verstanden, die einen gewissen Wert oder Gütegrad charakterisieren sollen. Neben der ernährungsphysiologischen Qualität, die den Wert hinsichtlich der Inhaltsstoffe, der Verträglichkeit usw. kennzeichnet, interessieren in Verbindung mit physikalischen Eigenschaften hauptsächlich folgende Qualitäten:

- a) Eigenschaften, die durch eine Sinneswahrnehmung bewertet werden wie beispielsweise Geschmack, Geruch, Farbe, Widerstand gegen mechanische Beanspruchung, Größe und Form.
- b) Eigenschaften, die den Gütegrad für die Be- und Verarbeitung sowie für das Lagerungsverhalten charakterisieren. Als Beispiele seien die Beschaffenheit von Gemüse zur Herstellung von Trockenprodukten und die Eignung von Erdbeeren zum Tiefgefrieren genannt.

Die unter a) genannten Eigenschaften, die auch als sensorische Qualität bezeichnet werden können, enthalten überwiegend physikalische Eigenschaften, die

prinzipiell auch durch objektive Meßmethoden und nicht nur durch subjektive sensorische Beurteilung erfassbar wären. In den meisten Fällen lassen sich jedoch diese Eigenschaften nicht durch wenige Meßgrößen eindeutig beschreiben. Man versucht daher, nur einige charakteristische Meßwerte zu erfassen, die sich möglichst gut mit sensorischen Beurteilungen verknüpfen lassen. Schon seit langem ist man bemüht, durch empirische Beziehungen eine Korrelation zwischen subjektiv bestimmten physikalischen Eigenschaften und objektiv meßbaren Größen herzustellen. Die hierbei auftretenden Probleme und die bisher erzielten Erfolge auf diesem Gebiet wurden insbesondere von *Kramer* und *Twigg* (2), *Toda et al.* (3), *Kramer* und *Szczesniak* (4), *Jowitt* (5), *Rha* (6), *Kapsalis* und *Moskowitz* (7) sowie *Szczesniak* (8) zusammengestellt und diskutiert.

Die unter b) aufgeführten Eigenschaften, die man auch unter dem Begriff «technologische Qualität» zusammenfassen kann, sind ebenfalls zu einem großen Teil physikalische Eigenschaften. Im Gegensatz zu a) charakterisieren sie jedoch vielfach unabhängig von Sinneswahrnehmungen die Beschaffenheit von Lebensmitteln und sind in diesen Fällen einer unmittelbaren objektiven Messung zugänglich. Häufig kann jedoch die Eignung eines Lebensmittels für einen technologischen Prozeß erst am Endprodukt mit Hilfe der sensorischen Qualität geprüft werden. Verwendet man auch in diesem Fall objektive Meßmethoden zur Qualitätsbeurteilung, so ist man wie in Fall a) auf eine ausreichende Korrelation mit der subjektiven sensorischen Analyse angewiesen.

Neben den bisher genannten Eigenschaften, die man direkt mit Hilfe von objektiven Meßmethoden zu erfassen versucht, können physikalische Meßverfahren auch zur indirekten Beurteilung anderer Qualitätsmerkmale geeignet sein. In diesem Fall muß die Meßgröße mit der anderen Qualitätseigenschaft verknüpft sein. Beispiele hierfür sind Farb- und Festigkeitswerte, die auch Auskunft über den Reifezustand von Früchten, beispielsweise von Apfelsorten (vgl. z. B. 9), geben können. Mit in die Gruppe der indirekten Meßmethoden gehören Indikatoren, die man beispielsweise an tiefgefrorenen Lebensmitteln befestigen kann, um damit den Qualitätsverlust während der Lagerung anzuzeigen (10).

Darüber hinaus können physikalische Eigenschaften bzw. die darauf aufbauenden Meßverfahren auch zur Auslegung, Ueberwachung, Steuerung und Regelung von verfahrenstechnischen Anlagen herangezogen werden, ohne daß damit eine Qualitätsbeurteilung verbunden sein muß. Hierzu gehören beispielsweise viele thermische Eigenschaften von Lebensmitteln. Nach *Jowitt* (5) kann zwar jede physikalische Eigenschaft auch als «Qualität» bezeichnet werden, in dem hier verwendeten Sinn wird die Qualität von Lebensmitteln jedoch nur als Wertigkeit verstanden.

In dem folgenden Ueberblick wird eine Auswahl physikalischer Eigenschaften von Lebensmittelstoffen vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt auf den objektiven Meßmöglichkeiten. Hinsichtlich einer Korrelation mit subjektiven Beurteilungen wird auf die bereits zitierte Literatur verwiesen. Weitere Angaben über die Messung physikalischer Eigenschaften von Lebensmitteln wurden kürzlich von *Gaffney* (11) zusammengestellt.

## Verteilung physikalischer Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften von Lebensmittelstoffen sind praktisch nie gleich, sondern unterliegen einer Verteilung. Ein einsichtiges Beispiel ist die Verteilung der Farbe bzw. eines Farbkennwertes auf der Oberfläche eines Apfels. Man kann jedoch auch viele Äpfel betrachten und nach der Verteilung eines bestimmten charakteristischen oder mittleren Merkmals fragen, das man jedem einzelnen Apfel zuordnet. Als Merkmal könnte man die physikalische Eigenschaft «Größe» wählen, die man beispielsweise der Anzahl zuordnet. Der Begriff Größe muß genauer definiert werden, z. B. als größter Durchmesser jedes Apfels. Bei dem genannten Beispiel wird man stets nur eine endliche Anzahl von Elementen (hier: Element = Apfel) erfassen und der Größe zuordnen können. Man erhält in diesem Fall eine diskrete Verteilung. Hier soll davon ausgegangen werden, daß die Merkmale von so vielen Elementen bestimmt wurden, daß man praktisch eine kontinuierliche Merkmal-Verteilungsfunktion erhält, die sich stetig differenzieren läßt. Damit lassen sich Berechnungen ausführen, die auf lange bekanntem Wissen aus der Wahrscheinlichkeitslehre aufbauen. Sie wurden für die Darstellung von Partikelgrößenverteilungen von *Rumpf* und Mitarbeitern weiterentwickelt (12), eingeführt und inzwischen zusammenfassend dargestellt (13). Einen ausführlichen Ueberblick über die Darstellung und Auswertung von Partikelgrößenverteilungen gibt eine Arbeit von *Leschonski, Alex und Koglin* (14). Der große Vorteil dieser Darstellungsweise ist die Möglichkeit, verschiedene charakteristische Verteilungswerte berechnen und Umrechnungen von Verteilungen aus anderen Mengenarten vornehmen zu können.

Bei allen gemessenen Verteilungen treten Fehler auf. Es kann sich um systematische und zufällige Fehler handeln. Systematische Fehler muß man abschätzen, Zufallsfehler lassen sich mit statistischen Methoden erfassen. Hier werden nur zufällige Fehler behandelt, die sich aus den Meßfehlern — d. h. aus den Ungenauigkeiten in der Bestimmung von Menge und Merkmal — und aus dem Probenahmefehler zusammensetzen. Ein Probenahmefehler tritt immer dann auf, wenn aus der meist sehr großen Grundmenge nur eine Teilmenge (= Probe) für die Messung verwendet wird. Um auf die Merkmalsverteilung der Grundmenge aus Messungen an einer Teilmenge schließen zu können, muß die Probe zufällig gezogen werden. Dann läßt sich der Probenahmefehler berechnen. Beispielsweise gilt für die Fehlergrenzen der Anzahl-Verteilungssummenfunktion  $Q_0(x)$ :

$$f_p \approx \pm t \sqrt{\frac{Q_0(x) [1 - Q_0(x)]}{n}} \quad [1]$$

Die Konstante  $t$  ist ein Maß dafür, mit welcher Wahrscheinlichkeit  $P(t)$  die aufgrund des Probenahmefehlers auftretenden Abweichungen von  $Q_0(x)$  der Grundmenge innerhalb der Fehlergrenzen liegen. Für eine vielfach verwendete Wahrscheinlichkeit  $P(t) = 95\%$  ist  $t = 1,96 \approx 2$ , sofern  $n$  hinreichend groß ist. Hierin ist  $n$  die Zahl der einzelnen Elemente der Probe, an denen das Merkmal  $x$  gemessen wurde. Mißt man beispielsweise die Festigkeit (= Merkmal  $x$ ) jeweils

von  $n = 50$  Möhren, so ist für  $Q_0 = 0,5$  der absolute Fehler bei  $P = 95\%$  nach Gleichung [1]  $f_p \approx \pm 2 / \sqrt{0,5(1-0,5)/50} \approx \pm 0,14$ . Der entsprechende Betrag des relativen Probenahmefehlers ist dann  $|f_p/Q_0(x)| = 0,28 \hat{=} 28\%$ . Wäre in diesem Fall nur ein relativer Probenahmefehler von  $10\%$  zugelassen, so müßte man nach Gleichung [1] die Festigkeit von jeweils 400 Möhren messen. Das Beispiel zeigt die große Bedeutung des Probenahmefehlers, wenn nur eine geringe Zahl von Elementen untersucht wurde.

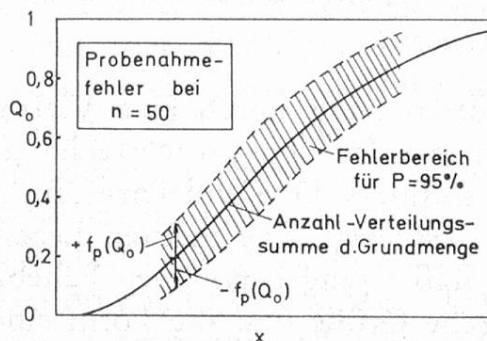


Abb. 2. Beispiel für einen Probenahmefehler. Erläuterungen im Text

Abbildung 2 veranschaulicht den Probenahmefehler für das genannte Beispiel. Für die im Bild angenommene Anzahl-Verteilungssumme der Grundmenge läge die gemessene Anzahl-Verteilung einer Probe aus  $n = 50$  Elementen mit einer Wahrscheinlichkeit von  $95\%$  im schraffierten Bereich, wenn man nur den Probenahmefehler berücksichtigt, d. h. beliebig genau messen könnte.

Es sei darauf hingewiesen, daß Gleichung [1] nur eine Näherung darstellt, da die Voraussetzung einer sehr großen Zahl  $n$  zur Herleitung notwendig ist (15). Ungenauigkeiten ergeben sich insbesondere im Bereich großer und kleiner  $Q_0$ -Werte. In Abbildung 2 wurde daher für diese Bereiche kein Vertrauensintervall angegeben.

Eine ausführliche Darstellung des Probenahmefehlers auch für andere Verteilungen hat Sommer (16) gegeben.

Die Größen zur Kennzeichnung von Verteilungen sind im Lebensmittelbereich nur wenig gebräuchlich. Sie lassen sich jedoch für nahezu alle physikalischen Eigenschaften von Lebensmittelstoffen verwenden. Ueblicherweise wurden bisher fast nur integrale Meßwerte bzw. Mittelwerte erfaßt. Zur Beschreibung der Qualität gibt jedoch häufig die Verteilung der physikalischen Eigenschaften eine wertvolle zusätzliche Information. Mitunter erlaubt erst die Kenntnis der Verteilung eine ausreichende Qualitätsbeurteilung von Lebensmitteln aufgrund von physikalischen Eigenschaften. Die Verteilung der geometrischen Größe ist ein anschauliches Beispiel. So besagt etwa die mittlere Größe von frischem Obst, Gemüse usw. nur wenig, wenn eine breite Verteilung der Grundmenge vorliegt und eine Qualitätsbeurteilung nach der Größe vorgenommen werden soll. Ähnliches gilt auch für viele andere physikalische Eigenschaften. Meist ist eine möglichst enge

Verteilung der physikalischen Größen erwünscht. Insbesondere für die industrielle Verarbeitung von Lebensmitteln werden gleichbleibende Eigenschaften der Rohstoffe angestrebt. Die Verteilungsbreite dieser Eigenschaften kann sogar das ausschlaggebende Qualitätsmerkmal für die Auswahl der Rohstoffe sein.

## Mechanische Eigenschaften

### Kompakte Feststoffe

#### Größe, Form

Die Größe von Feststoffen kann durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Merkmalen charakterisiert werden. Liegen einfache geometrische Formen wie Kugel, Zylinder usw. vor, so sind Größe und Form durch eine oder mehrere Längenabmessungen eindeutig festgelegt. Die meisten Lebensmittelstoffe sind jedoch unregelmäßig geformt, so daß streng genommen beliebig viele Parameter erforderlich sind, die geometrische Größe und die Form eindeutig zu bestimmen. Da dies nicht praktikabel ist, muß man charakteristische Merkmale festlegen, die je nach Problemstellung zur Beschreibung ausreichen. Eine besondere Schwierigkeit ergibt sich aus der Tatsache, daß die charakteristischen Längenabmessungen von Lebensmittelstoffen die Größenordnungen von dm bis  $\mu\text{m}$ , also mehr als 5 Zehnerpotenzen umfassen können (vgl. auch Abbildung 5). Da man insbesondere bei feinen Partikeln erhebliche Meßprobleme hat, ist man bei der Wahl der die Größe charakterisierenden Merkmale nicht immer frei, sondern an bestimmte Meßmethoden gebunden.

Prinzipiell kann man zur Festlegung der Größe alle meßbaren physikalischen Eigenschaften verwenden, die eine eindeutige Verknüpfung zu charakteristischen geometrischen Abmessungen oder sog. Aequivalentabmessungen gestatten. Aequivalentabmessungen sind die einen (gedachten) Vergleichskörper charakterisierenden Längen, wobei der Vergleichskörper die gleichen physikalischen Eigenschaften aufweist wie der zu messende, unregelmäßig geformte Körper. Als Vergleichskörper wählt man einfache geometrische Formen wie Kugel und Zylinder. Die Wahl des Vergleichskörpers richtet sich nach der Form des zu messenden Partikels. Beispielsweise kann man die Größe eines Apfels durch den Durchmesser einer volumengleichen Kugel beschreiben. Bei länglich geformten Körpern wird man einen Zylinder als Vergleichskörper wählen, wobei man einen zusätzlichen Parameter, zweckmäßigerweise die Zylinderlänge, benötigt. Aequivalentabmessungen, insbesondere Aequivalentdurchmesser von Kugeln, haben sich zur Beschreibung sehr feiner Partikel bewährt.

Die hauptsächlich verwendeten physikalischen Eigenschaften zur Kennzeichnung der Größe von Feststoffen lassen sich wie folgt einteilen (14):

#### 1. Geometrische Merkmale

##### 1.1 Charakteristische Längen: Hauptabmessungen, Umkreisdurchmesser, statistische Sehnenlängen, längste Sehne in gegebener Richtung

1.2 Oberfläche, Projektionsfläche (z. B. Äquivalentdurchmesser einer Kugel mit gleicher Projektionsfläche)

1.3 Volumen

2. Masse

3. Sinkgeschwindigkeit in einem Gas oder einer Flüssigkeit

4. Intensität des gestreuten und/oder absorbierten Lichtes

5. Störung eines elektrischen Feldes

6. Störung einer Gasströmung

Bei nicht pulverförmigen Stoffen wird man zur Bestimmung der Größe einfache geometrische Merkmale oder die Masse bevorzugen. Bei pulverförmigen Stoffen kommen je nach den verwendeten Meßverfahren die unter 3. bis 6. genannten Merkmale hinzu (vgl. 14, 17).

Da viele der Merkmale wenig anschaulich sind, empfiehlt sich die Umrechnung in Äquivalentdurchmesser, beispielsweise je nach Meßgröße in den Durchmesser einer Kugel mit gleichem Volumen, mit gleicher Projektionsfläche, mit gleicher Sinkgeschwindigkeit oder mit gleicher Streulichtintensität.

Neben der Partikelgröße ist die Form vielfach von erheblicher Bedeutung. Die Methoden zur Beschreibung von Partikelformen haben Pahl, Schädel und Rumpf (18) zusammengestellt. Sie unterscheiden zwischen Gestalt, Ecken- und Kantenrundheit sowie Oberflächenrauhigkeit. Auf die vielfältigen Beschreibungsmöglichkeiten kann im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden. Es soll nur auf einige für Lebensmittelstoffe wichtige Gesichtspunkte hingewiesen werden.

Für geometrische Merkmale oder Äquivalentdurchmesser kann die Gestalt durch den Formfaktor

$$f_{a,b} = \frac{x_a}{x_b} \quad [2]$$

charakterisiert werden. Hierin sind  $x_a$  und  $x_b$  zwei beliebige geometrische Merkmale oder Äquivalentdurchmesser desselben Partikels. Wählt man beispielsweise für  $x_a$  den Durchmesser  $x_v$  der volumengleichen Kugel und für  $x_b$  den Durchmesser  $x_s$  der oberflächengleichen Kugel, so ist der Formfaktor

$$f_{v,s} = \frac{x_v}{x_s} \leq 1 \quad [3]$$

Die Größe  $f_{v,s}^2$  wird auch als Sphärizität  $\psi$  bezeichnet.  $x_v$  kann bei bekannter Dichte aus der Partikelmasse bestimmt werden,  $x_s$  ist gleich dem Durchmesser  $x_p$  des projektionsflächengleichen Kreises für konvexe Partikeln in zufälliger Lage. Die Sphärizität lässt sich auch mit Hilfe des aus der Sinkgeschwindigkeit  $w$  bei schlechender Umströmung zu gewinnenden Stockesdurchmessers

$$x_{St} = \sqrt{\frac{18 \eta w}{g \Delta \rho}} \quad [4]$$

ermitteln:

$$\psi = \left\{ \frac{x_{St}}{x_v} \right\}^4 = \left\{ \frac{x_{St}}{x_s} \right\}^{4/3} \quad [5]$$

In Gleichung 4 bedeuten  $\eta$  die dyn. Zähigkeit des Fluids,  $g$  die Erdbeschleunigung und  $\Delta\varrho$  die Dichtedifferenz zwischen Feststoff und Fluid.

Trotz der vielen objektiv bestimmmbaren Kennzahlen für die Beschreibung der Gestalt, von der hier nur ein Beispiel genannt wurde, muß man häufig auch auf subjektive Methoden zurückgreifen. Bewährt hat sich der Vergleich nach dem Augenschein mit einem Standardsatz. Beispiele hierfür sind in der bereits genannten Arbeit von Pahl et al. (18) zusammengestellt, die auch weitere Angaben zur Erfassung der Kantenrundheit und Oberflächenrauhigkeit enthält. Bei vielen Produkten wie Obst und Gemüse kann man eine sortenspezifische «Idealform» festlegen und die Abweichungen davon mit Hilfe von Standardsätzen und entsprechend zugeordneten Kennzahlen charakterisieren.

### Dichte, Porosität

Die Dichte  $\varrho$  eines Stoffes ist das Verhältnis aus Masse  $m$  und dem Feststoffvolumen  $V_s$ . Bei unregelmäßig geformten Stoffen bereitet die Messung von  $V_s$  vielfach Schwierigkeiten. Mit Hilfe der Pyknometrie, die auf einer Verdrängung von Flüssigkeiten oder Gasen durch den Feststoff beruht, sind meist die genauesten Ergebnisse zu erzielen. Bei porösen Körpern ist zur Charakterisierung noch die Porosität

$$\varepsilon = \frac{V_H}{V_{ges}} = 1 - \frac{V_s}{V_{ges}} \quad [6]$$

erforderlich, die als Quotient aus Hohlraumvolumen  $V_H$  und Gesamtvolume  $V_{ges}$  definiert ist. Stattdessen wird mitunter auch die Scheindichte

$$\varrho_{sd} = \frac{m}{V_{ges}} = \frac{\varrho V_s}{V_{ges}} = (1-\varepsilon) \varrho \quad [7]$$

verwendet. Die Messung von  $\varepsilon$  bzw.  $\varrho_{sd}$  kann insbesondere bei kleinen Partikeln, z. B. Agglomeraten, zu erheblichen Problemen führen (19). Meist geht man von den Gleichungen [6] und [7] aus und bestimmt  $V_H$  bzw.  $V_s$  und  $V_{ges}$ . Das Hohlraumvolumen  $V_H$  kann aus der Masse einer gut benetzenden Flüssigkeit ermittelt werden, die in den zuvor evakuierten Porenraum eingedrungen ist. Das Feststoffvolumen lässt sich entweder pyknometrisch oder bei bekannter Dichte aus der Feststoffmasse bestimmen. Aus dem verdrängten Volumen einer nicht benetzenden Flüssigkeit wie Quecksilber kann auf das Gesamtvolume geschlossen werden.

Spezielle Verfahren existieren für sehr kleine, poröse Partikeln. Aus der Messung der Partikelgröße mit zwei unterschiedlichen Meßverfahren ist eine Bestimmung der Porosität möglich (20).

Ein universelles Verfahren zur Ermittlung der Porosität ist die sog. Schnittmethode. Hierbei werden ein oder mehrere Schnitte durch den porösen Stoff ge-

legt und die Fläche  $A_s$  des geschnittenen Feststoffs sowie die Gesamtschnittfläche  $A_{ges}$  gemessen. Man erhält zunächst die Flächenporosität

$$\epsilon_F = 1 - \frac{A_s}{A_{ges}} \quad [8]$$

Bei zufällig angeordneten Hohlräumen ist  $\epsilon_F = \epsilon$ , bei beliebig angeordneten Hohlräumen müssen entsprechend viele Schnittflächen gelegt werden, so daß für die mittlere Flächenporosität  $\bar{\epsilon}_F = \bar{\epsilon}$  gesetzt werden darf. Selbst wenn man automatische Flächenmeßgeräte einsetzt, ist die Schnittmethode meist aufwendig, da die Präparation der Schnitte im allgemeinen viel Zeit in Anspruch nimmt und große Erfahrung verlangt (21).

Eine schnelle und zerstörungsfreie Möglichkeit zur Bestimmung von Dichte und Porosität bietet die radiometrische Meßtechnik (22). Hierbei werden radioaktive Strahler eingesetzt und die Strahlschwächung beim Durchgang durch das Untersuchungsobjekt zur Bestimmung von  $\rho$  bzw.  $\epsilon$  verwendet. Ausführliche Darstellungen über diesen Anwendungsbereich enthalten Arbeiten von Kurz (23) sowie Sowka und Schubert (24).

### *Widerstandsverhalten gegen mechanische Beanspruchung*

Zu den wichtigsten mechanischen Eigenschaften von Lebensmitteln gehört das Verhalten bei mechanischer Beanspruchung. Dieser Begriff ist sehr weit gespannt und umfaßt beispielsweise die verschiedenen Arten der Festigkeit und des Fließverhaltens (Rheologie) unter der Wirkung mechanischer Spannungen. Es handelt sich um Eigenschaften, die prinzipiell durch objektive Meßmethoden aus dem Spannungs-Verformungsverhalten erfaßbar sind. Die meisten Lebensmittel zeigen jedoch ein so kompliziertes Spannungs-Verformungsverhalten, daß eine eindeutige Beschreibung durch nur wenige Parameter, die für eine Anwendung noch praktikabel sind, nicht möglich ist. Man versucht daher, durch vereinfachte Meßmethoden möglichst charakteristische Kennwerte zu ermitteln, die das wesentliche Verhalten bei einer vorgegebenen mechanischen Beanspruchung beschreiben sollen. Wegen des sehr unterschiedlichen Verhaltens der verschiedenen Lebensmittel bei aufgeprägten Spannungen wurde eine Vielzahl von Meßmethoden entwickelt. Die Auswahl der für eine bestimmte Fragestellung am besten geeigneten Meßmethode gehört zu den Problemen, die bis heute für die meisten Lebensmittel noch nicht gelöst sind.

Für Lebensmittel ist ferner der Begriff Textur gebräuchlich, der jedoch im Schrifttum nicht einheitlich verwendet wird. Meistens wird hierunter die «Zusammensetzung aller Eigenschaften, die sich aus der Struktur des Stoffes ergeben und der Art, wie sie von den Sinnen wahrgenommen werden» verstanden (8). Die Textur ist also eine sensorische Eigenschaft. Sie umfaßt nicht nur das von den Sinnen wahrgenommene Widerstandsverhalten gegen mechanische Beanspruchung, sondern auch noch andere Eigenschaften wie Geometrie der Probe, Oberflächenstruktur und Geräusche, die beim Kauen auftreten. Mitunter wird statt Textur auch der Begriff Konsistenz verwendet (25).

Ueber die Möglichkeiten, objektiv meßbare Eigenschaften mit der Textur zu verknüpfen, wird seit langem im Rahmen der Lebensmitteltexturforschung gearbeitet. Auf die zusammenfassenden Darstellungen von Szczesniak et al. (26), Kramer und Twigg (2), Kramer (27), Kapsalis et al. (28), Kramer und Szczesniak (4), Breene (29), Kapsalis und Moskowitz (7) sowie Szczesniak (4) sei hingewiesen. Trotz der erzielten Fortschritte auf diesem Gebiet sind noch so viele Fragen offen, daß langfristige Forschungen zur Verbesserung der vorgeschlagenen Konzeptionen erforderlich sind. Verbesserungsfähig erscheinen auch die objektiven Meßmethoden, die für diese Forschungen eingesetzt werden. Wir sind in Karlsruhe darum bemüht, einen Beitrag zur Verbesserung der Meßmethoden zu leisten.

Im folgenden wird eine kurze Uebersicht über einige Meßprinzipien zur objektiven Erfassung des Widerstandes gegen eine mechanische Beanspruchung gegeben. Es handelt sich lediglich um eine Auswahl von Prinzipien, ausführlichere Darstellungen enthalten die Uebersichtsarbeiten von Voisey (30), Szczesniak (31) und Bourne (32). Als Grundgeräte für die Messung benötigt man eine Vorrichtung, die einen Weg vorgibt, eine Kraftmeßdose und einen Weggeber. Das Meßergebnis wird in Form einer Kraft-Weg-Kurve aufgenommen. Ein typisches Beispiel hiefür zeigt Abbildung 3. Es sei angenommen, daß die Probe zwischen zwei Auflagern zusammengepreßt wurde. Zunächst steigt die Kraft mit zunehmendem Beanspruchungsweg an. Bei vielen biologischen Materialien beobachtet man danach einen Abfall und anschließenden Anstieg der Kraft, was auf erste Brüche der Probe hindeutet. Dieses relative Maximum der Kraft-Weg-Kurve wird vielfach als biologischer Fließpunkt («biolyield point») bezeichnet (vgl. 9). Eine allgemeine Bezeichnung hierfür ist 1. Fließpunkt, da auch noch weitere relative Maxi-

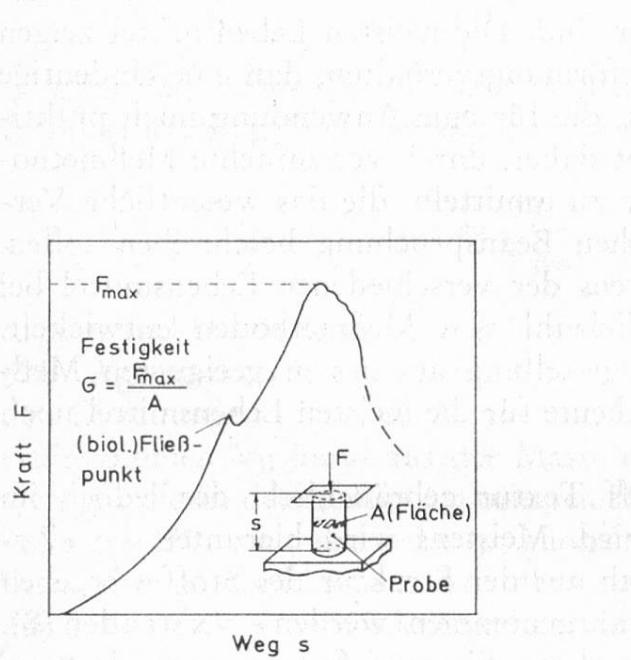


Abb. 3. Typischer Kraft-Weg-Verlauf eines Druckversuches, bei dem eine Maximalkraft  $F_{\max}$  auftritt

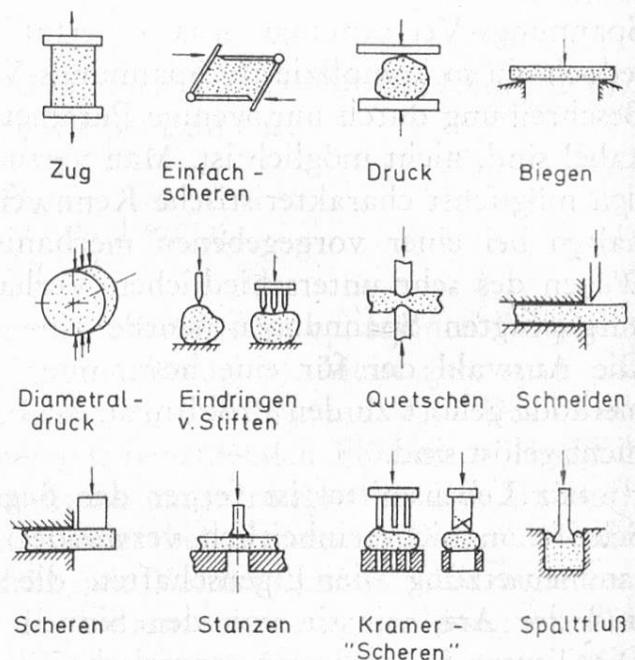


Abb. 4. Schematische Darstellung einiger mechanischer Beanspruchungsarten, die als Prüfmethoden für Lebensmittel gebräuchlich sind

ma bei einigen Materialien möglich sind. Die maximale Kraft  $F_{\max}$  der Kraft-Weg-Kurve, bezogen auf einen charakteristischen Probenquerschnitt A, ergibt die Festigkeit  $\sigma$  (Abbildung 3). Interessiert nur die Festigkeit, so kann auf eine Wegmessung verzichtet werden. In der Regel gibt die Festigkeit den Wert an, bei dem die Probe bricht. Es sei darauf hingewiesen, daß je nach Material und Beanspruchungsart ein absolutes Kraftmaximum und damit eine Festigkeit nicht existieren müssen. Wenn möglich sollten daher stets Kraft-Weg-Kurven aufgenommen werden, die zudem einen wesentlich höheren Informationswert besitzen.

Eine schematische Uebersicht über einige Beanspruchungsarten zeigt Abbildung 4. Beim Zug- und Einfachschererversuch können definierte Spannungszustände in der Probe realisiert werden. Da Materialien entweder durch maximale Zug- oder Scherspannungen brechen, lassen sich mit diesen Versuchen eindeutige Aussagen über das Festigkeitsverhalten gewinnen. Beide Testmethoden erfordern eine bestimmte Form der Probe. Darüber hinaus ist sowohl beim Zugversuch (33) als auch beim Einfachscherversuch (34) ein erheblicher experimenteller Aufwand nötig. Sie werden daher nur für grundlegende Untersuchungen und im allgemeinen nicht für Routinemessungen benutzt. Lediglich bei fadenförmigen Lebensmittelstoffen, wie beispielsweise gesponnenen Proteinfasern, ist der Zugversuch gebräuchlich (35). Ein universell verwendbarer Test ist der Druckversuch, der an keine bestimmte Form des Probekörpers gebunden ist. Bei vielen Materialien mit plastischem Stoffverhalten liefert die Druckbeanspruchung jedoch keinen Festigkeitswert.

Der Biege- und Diametraldruckversuch erfordern eine bestimmte Formgebung der Probe. Bei Materialien mit sprödem Stoffverhalten tritt ein Bruch unter der Wirkung der maximalen Zugspannungen ein, die aus diesen Beanspruchungsarten berechnet werden können. Die übrigen, in Abbildung 4 gezeigten Prinzipien sind weitgehend unabhängig von der Probenform für viele Lebensmittel verwendbar. Besonders häufig wird die Scherzelle nach Kramer (36) für Festigkeits- und Kraft-Verformungs-Untersuchung von Lebensmitteln eingesetzt. Es handelt sich hierbei um eine komplizierte Beanspruchung, die nicht nur aus einer Scherbeanspruchung besteht.

Gegenüber dem Einfachscheren ist beim Scherversuch in Abbildung 4 der verformte Bereich der Probe nicht definiert, so daß Rückschlüsse auf die tatsächlichen Scherspannungen im allgemeinen nicht möglich sind. Gleicher gilt für den Stanzversuch, der sich vom Prinzip der Beanspruchungsart nicht vom Scherversuch unterscheidet.

Ein bisher nicht behobenes Problem stellt die Umrechnung von Kennwerten dar, die mit unterschiedlichen Testmethoden ermittelt wurden. Da mit Ausnahme des Zug- und Einfachscherversuches — in bestimmten Fällen auch für den Druck-, Biege- und Diametraldruckversuch — die Spannungsverteilung in der Probe während der Beanspruchung unbekannt ist, scheidet in diesen Fällen eine theoretische Umrechnung aus. Hinzu kommt, daß für feste Lebensmittel die Materialgesetze im allgemeinen nicht bekannt sind, die für eine Umrechnung von Kennwerten wie z. B. Festigkeit, Verformungsarbeit usw. erforderlich wären. Um zumindest Meßwerte bei gleicher mechanischer Beanspruchungsart beurteilen und

miteinander vergleichen zu können, sollten die Meßmethoden standardisiert werden.

Die Auswahl eines geeigneten Meßsystems zur Bestimmung des Widerstandes gegen eine mechanische Beanspruchung richtet sich nach der Fragestellung und ist vom Verhalten des jeweiligen Materials abhängig. Trotz der vielen Arbeiten auf diesem Gebiet und der daraus abgeleiteten Empfehlungen für die Auswahl von Meßsystemen (vgl. 25) sind noch erhebliche Anstrengungen zur Erarbeitung ausreichender Auswahlkriterien erforderlich. Lediglich für spezielle Produkte wie beispielsweise Erbsen (37) liegen systematische Untersuchungen vor, die ausreichende Kenntnisse über die Auswahl der am besten geeigneten Testmethoden für ein bestimmtes Untersuchungsziel vermitteln. Stark vereinfacht lassen sich folgende Hinweise geben: Bei Lebensmitteln mit sprödem Stoffverhalten sollten Beanspruchungen gewählt werden, die zumindest Abschätzungen über die bruchauslösenden, maximalen Zugspannungen liefern können (z. B. Biegeversuch). Bei inelastischem Stoffverhalten sind vielfach Scherbeanspruchungen vorteilhaft. Da die meisten festen Lebensmittel sowohl einen elastischen als auch einen inelastischen Verformungsanteil besitzen, ist die Auswahl der am besten geeigneten Beanspruchungsart für eine bestimmte Fragestellung bisher nur empirisch möglich. Hinzu kommt, daß sich viele Lebensmittel durch eine Be- oder Verarbeitung in ihrem Materialverhalten ändern. Will man den Einfluß derartiger Behandlungen mit einem Festigkeits- bzw. einem Kraft-Verformungstest erfassen, so ist im allgemeinen ein Kompromiß erforderlich, da für Vergleichszwecke dieselbe Beanspruchungsart gewählt werden sollte.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich daraus, daß bei vielen Lebensmittelstoffen der Widerstand gegen eine mechanische Beanspruchung auch von der Verformungsgeschwindigkeit abhängt. Eine ausreichende Klärung der damit zusammenhängenden rheologischen Probleme steht noch aus. Um Meßergebnisse später vergleichen zu können, sollte die beim Experiment gewählte Beanspruchungsgeschwindigkeit stets angegeben werden.

Ein bei der Messung von Kraft-Verformungskurven bisher nur wenig beachterter Fragenkomplex hängt mit der Steifigkeit der Meßapparatur zusammen. Fällt die Kraft mit zunehmender Verformung ab, so liegt eine Instabilität vor (38). Insbesondere bei Materialien mit sprödem Stoffverhalten müssen Apparaturen mit hoher Steifigkeit gewählt werden, da anderenfalls die Meßkurve erheblich durch die Kenndaten der Apparatur beeinflußt wird und nicht mehr das Stoffverhalten charakterisiert. Auch bei dynamischen Messungen des mechanischen Verformungsverhaltens (39) ist auf die Kenndaten der Meßanordnung zu achten.

Eine besondere Erschwernis bei der Auswertung von Messungen des Widerstandes gegen mechanische Beanspruchung stellt die bei vielen Lebensmitteln beobachtete Inhomogenität und Anisotropie der Probe dar. Eine zufriedenstellende Lösung der damit zusammenhängenden Fragestellungen steht vielfach noch aus. Insbesondere fehlt es an praxisgerechten Methoden, das Verhalten anisotroper Lebensmittel ausreichend zu erfassen.

Eine vertiefte Darstellung der Meßprobleme zur Bestimmung des mechanischen Verformungsverhaltens von Lebensmitteln enthält eine Arbeit von Grüne-

wald (40). Darin wird auch die bisher nicht erwähnte Texturprofilanalyse behandelt, aus der wichtige Kenndaten über das Texturverhalten von Lebensmitteln mit Hilfe einer mehrfachen Be- und Entlastung der Probe gewonnen werden können (vgl. auch 29).

### Disperse Feststoffe

#### *Größe, Form*

Bei dispersen Feststoffen wird im allgemeinen nicht die Eigenschaft einer einzelnen Partikel, sondern die Verteilung der Eigenschaften bestimmt, beispielsweise mit Hilfe der Partikelgrößen- oder der Partikelformanalyse. Während in der Partikelgrößenanalyse — insbesondere für feine Partikel — im letzten Jahrzehnt große Fortschritte erzielt wurden, ist die Formanalyse weniger gut ausgebaut. Verstärkte Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der Formverteilungsmessungen sind erkennbar. Auf Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden; es sei auf eine kürzlich erschienene Literaturzusammenstellung neuerer Arbeiten verwiesen (41).

Im Rahmen dieser kurzen Uebersicht können auch nicht die Meßverfahren der Partikelgrößenanalyse behandelt werden, da es inzwischen so viele Meßmethoden gibt, daß hierzu eine umfangreiche gesonderte Darstellung erforderlich wäre. Es wird hier nur auf einige Meßmöglichkeiten hingewiesen, die sich für Lebensmittelstoffe bewährt haben. Einen Einblick in den für Lebensmittel vorkommenden Partikelgrößenbereich vermittelt Abbildung 5 anhand einiger Produktbeispiele. Die Bereichseinteilungen sind nur grobe Näherungen; die Partikelgröße ist als Äquivalentdurchmesser einer volumengleichen Kugel angegeben. Ebenfalls nur

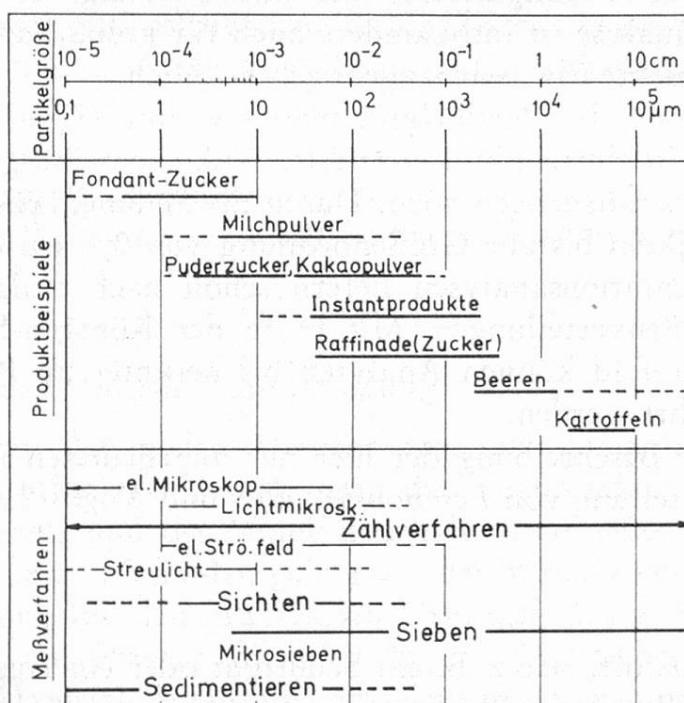


Abb. 5. Partikelgrößenbereich fester Lebensmittel mit Produktbeispielen und gebräuchlichen Meßverfahren zur Bestimmung von Partikelgrößenverteilungen

als Anhaltswerte sind die Anwendungsbereiche einiger Meßverfahren eingetragen. Zählverfahren können im gesamten Partikelgrößenbereich eingesetzt werden. Als Mengenmaß dient stets die Anzahl, als Größenmerkmal kommen je nach Meßverfahren verschiedene physikalische Eigenschaften in Frage. Bei der mikroskopischen Ausmessung von Partikeln (abbildende Zählverfahren) werden geometrische Merkmale bestimmt; mit den heutigen quantitativen Bildauswertungssystemen mit Fernsecheinrichtungen sind schnelle und zuverlässige Partikelgrößenanalysen möglich (42). Ebenfalls schnelle Analysen sind durch die Ausnutzung der Störung eines elektrischen Strömungsfeldes möglich. Der bekannteste Zählautomat dieser Gruppe der unmittelbaren Zählverfahren ist der Coulter Counter, bei dem die Änderung des elektrischen Widerstandes beim Durchströmen eines Partikels durch eine Zählöffnung gemessen wird. Der jeweilige elektrische Impuls ist dem Partikelvolumen proportional. Eine Zusammenstellung der vielfältigen Meßmöglichkeiten mit diesem System ist kürzlich erschienen (43). Die Streulichtzählung (44) wurde inzwischen auch für hohe Partikelkonzentrationen zur Serienreife entwickelt. Das Meßprinzip ist insbesondere auch zur Beurteilung von Sprühtrocknern und damit auch zur Verbesserung der Qualität sprühgetrockneter Lebensmittel geeignet.

Die wichtigsten Trennverfahren sind die Siebanalyse und die Windsichtung. Neu entwickelte Geräte der On-line-Querstromsichtung (45) könnten auch zur fortlaufenden Partikelgrößen-Verteilungsmessung von Lebensmittelstoffen und damit zur Qualitätskontrolle dieser Produkte interessant sein. Die für Lebensmittel wichtigste Methode zur Bestimmung von Partikelgrößenverteilungen ist die Siebanalyse. Durch Naßsiebung mit Hilfe von Mikrosieben lassen sich Partikelgrößen bis 5 µm erfassen. Umfangreiche Untersuchungen von Niediek (46, 47) haben den großen Anwendungsbereich der Mikrosiebung für Lebensmittelstoffe aufgezeigt. Die Siebanalyse ist insbesondere auch für grobe Partikeln wie Kartoffeln, verschiedene Früchte usw. seit langem gebräuchlich.

Schließlich sei noch die Partikelgrößenanalyse mit Hilfe der Sedimentation genannt, bei der die in einem Fluid ermittelte Sinkgeschwindigkeit von Partikeln als Größenmerkmal herangezogen wird. Durch die Sedimentation im Zentrifugalfeld lassen sich Partikeln bis zur Größenordnung von 0,1 µm erfassen. Moderne, automatische Sedimentationsanalysen liefern schon nach einigen Minuten vollständige Partikelgrößenverteilungen. Mit Hilfe der Röntgen-Sedimentationsverfahren im Erdschwerefeld können Analysen bis herunter zu Partikelgrößen von etwa 0,3 µm ausgeführt werden.

Eine ausführliche Beschreibung der hier nur angedeuteten Meßverfahren enthält eine Zusammenstellung von *Leschonski, Alex und Koglin* (14).

### Porengröße

Ein disperser Feststoff, wie z. B. ein Schüttgut oder ein Agglomerat, lässt sich nicht nur durch die Partikelgrößenverteilung, sondern auch durch die Porengrößenverteilung charakterisieren. Die Abgrenzung zwischen den einzelnen Poren ist problematisch, da sie meist über sog. Porenhälse miteinander verbunden sind.

Entsprechend problematisch sind auch die Meßverfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilung. Man ist daher gezwungen, Porenmodelle zugrunde zu legen.

Als wichtigste Verfahren zur Messung von Porengrößenverteilungen seien die Schnittmethode, die Sorptionsmethode und die Kapillardruckmethode genannt. Bei der Schnittmethode wird das disperse System zunächst durch eine Füllmasse fixiert und danach eben geschnitten (48). Durch Auswertung der Schnittfläche kann auf die Porengrößenverteilung geschlossen werden. Grundsätzlich andere Verfahren haben Brunauer und Mitarbeiter (vgl. 49) entwickelt. Sie ermitteln mit Hilfe von Modellen die Porengrößenverteilung aus Sorptions- und aus Kapillarkondensationsmessungen. Am weitesten ausgebaut ist die Messung von Porengrößenverteilungen mit Hilfe der Kapillardruckmethode, wobei die sog. Quecksilberporosimetrie (vgl. z. B. 50) am häufigsten verwendet wird. Hierbei wird der Kapillardruck in Abhängigkeit von der Flüssigkeitsmenge in der Probe gemessen und über ein Modell auf die Porengrößenverteilung geschlossen. Statt Quecksilber kann auch eine benetzende Flüssigkeit (z. B. Wasser) verwendet werden (21). Mit den verschiedenen Verfahren lassen sich folgende Porengrößenbereiche erfassen, wobei d den Äquivalentdurchmesser eines Zylinders angibt: Schnittmethode:  $d > 0,1 \mu\text{m}$ ; Sorptionsmethode:  $2 \text{ \AA} < d < 20 \text{ \AA}$ ; Kapillarkondensationsmethode:  $30 \text{ \AA} < d < 0,5 \mu\text{m}$ ; Quecksilberporosimetrie:  $70 \text{ \AA} < d < 200 \mu\text{m}$ ; Kapillardruckmethode mit benetzenden Flüssigkeiten:  $0,1 \mu\text{m} < d < 200 \mu\text{m}$ . Ausführliche Darstellungen und einen Vergleich der Meßmethoden enthalten die Arbeiten von Dullien und Batra (50) sowie Baiker und Richarz (51).

Mitunter wird ein disperser Feststoff nicht durch die Verteilung von physikalischen Merkmalen, sondern durch einen einzigen Wert charakterisiert. Gebräuchliche Kennwerte sind die verschiedenen mittleren Partikelgrößen, die Porosität und die Oberfläche. Die Oberfläche von realen Partikeln ist wegen der bis in molekulare Abmessungen reichenden Rauhigkeiten keine eindeutig definierte Größe, sondern von den jeweiligen Meßverfahren abhängig. Man unterscheidet zwischen der Oberfläche, die sich aus der Partikelgrößenverteilung berechnen lässt, der fotometrischen Oberfläche sowie den Oberflächen, die sich aus Durchströmungs- und Sorptionsmessungen ergeben. Die einzelnen Meßverfahren wurden von Koglin et al. (52) zusammengestellt und kritisch analysiert.

### *Widerstand gegen mechanische Beanspruchung*

Im Gegensatz zu den vielen Meßmethoden bei kompakten Feststoffen sind bei dispersen Feststoffen nur die Messung der Zugfestigkeit, des Zugspannungs-Verformungsverhaltens und des Materialverhaltens bei einer Scherbeanspruchung gebräuchlich. Mit diesen Methoden gelingt es, das Materialverhalten gegen mechanische Beanspruchung für den praktischen Gebrauch ausreichend zu beschreiben. Abbildung 6 zeigt das Prinzip dieser Meßmethoden. Ueberträgt das zu untersuchende disperse Material (Schüttgut) ausreichend hohe Zugspannungen, so kann die Wandhaftungsmethode verwendet werden (21), universell einsetzbar zur Messung der Zugfestigkeit  $\sigma_t$  pulverförmiger Stoffe ist der Zugtisch (53). Die kritische

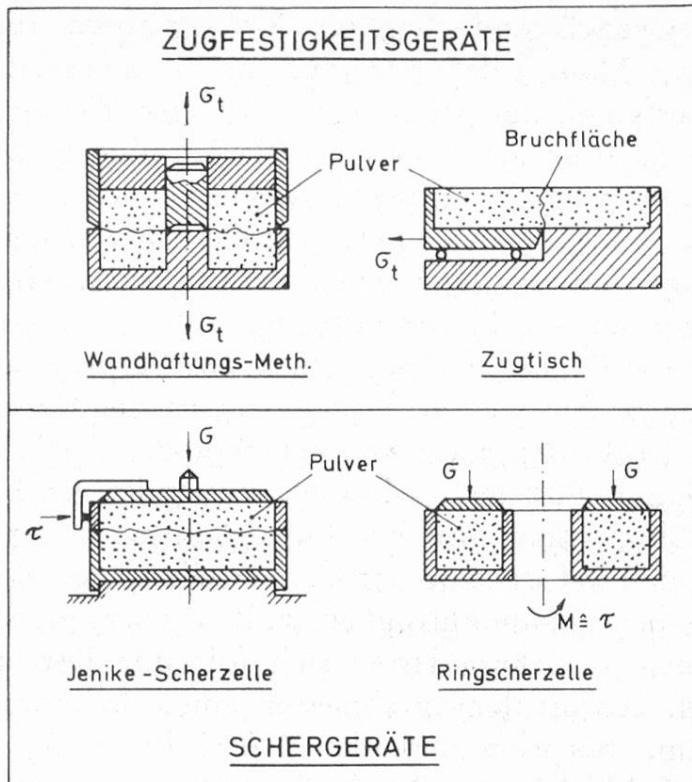


Abb. 6. Schematische Darstellung von Geräten zur Messung der Zugfestigkeit und des Scherverhaltens von dispersen (pulverförmigen) Stoffen

Wertung der Methoden sowie Einzelheiten über die Versuchsausführung können einer bereits publizierten Arbeit entnommen werden (33).

Zur Bestimmung der Fließeigenschaften von Schüttgütern wird in der Praxis meist das Jenike-Schergerät verwendet, über das *Schwedes* (54) ausführlich berichtet hat\*. Gemessen wird die Scherspannung  $\tau$  in Abhängigkeit von der Normalspannung  $\sigma$  beim Fließen des Materials. Daraus ergibt sich der sog. Fließort, der mit Hilfe der Schüttgutmechanik eine Beschreibung des Fließverhaltens von pulverförmigen Stoffen erlaubt (vgl. 54). Eine neue Geräteentwicklung zur Messung von Fließorten ist die Ringscherzelle (55), die inzwischen auch in der Lebensmittelindustrie verwendet wird. Wie aus der Prinzipskizze in Abbildung 6 erkennbar ist, wird die Scherspannung über ein Drehmoment auf das Gut übertragen. Der wesentliche Vorteil des Ringschergerätes gegenüber dem Jenike-Gerät ist die einfachere und schnellere Handhabung.

Mit den Methoden der Kontinuumsmechanik, die auch eine Verknüpfung mit der Zugfestigkeit und der Partikelhaftung erlaubt (56), lässt sich das Verhalten

\* Mit einem von *Schwedes* (34) entwickelten Einfachschergerät (vgl. Prinzipskizze in Abbildung 6) kann im Gegensatz zum Jenike-Schergerät der Spannungszustand in der Probe erfasst werden. Wegen seiner komplizierten Handhabung ist es jedoch nur für Forschungszwecke geeignet. Der Begriff «Einfachschergerät» bezieht sich nur auf die einfache Form des Schervorganges, nicht auf das Gerät selbst, das sehr kompliziert aufgebaut ist.

von Schüttgütern bei mechanischer Beanspruchung beschreiben, wenn die Meßwerte vorliegen, die sich aus den in Abbildung 6 skizzierten Geräten ermitteln lassen. Diese Meßwerte können nicht nur zur Auslegung von Apparaten wie beispielsweise Silos verwendet, sondern auch zur Qualitätsbeurteilung pulverförmiger Lebensmittel herangezogen werden. Hierunter fällt z. B. die Rieselfähigkeit von Produkten, die sich mit der Lagerzeit erheblich verändern kann. Mitunter können feindisperse Lebensmittel so stark klumpen und verhärten (d. h. agglomerieren), daß sie nicht mehr marktfähig sind (57).

### *Grenzflächenenergetische Eigenschaften, Instanteigenschaften*

Je feindisperser Stoffe sind, um so bedeutsamer werden grenzflächenenergetische Eigenschaften, da die Grenzfläche bei gleichem Feststoffvolumen mit kleiner werdender Partikelgröße zunimmt. Als relatives Maß für die Grenzflächengröße ist die volumenbezogene Oberfläche  $S_v$  gebräuchlich, die als Quotient aus Oberfläche  $S$  und Volumen  $V$  definiert ist. Bei ideal glatten Kugeln mit dem Durchmesser  $x$  gilt

$$S_v = \frac{S}{V} = \frac{6}{x} \quad [9]$$

Beispielsweise hat eine Kugel vom Durchmesser  $x = 1 \text{ cm}$  eine Oberfläche von  $S = 3,14 \text{ cm}^2$  und eine volumenbezogene Oberfläche von  $S_v = 6 \text{ cm}^{-1}$ . Wird diese Kugel in gleich große Kugeln vom Durchmesser  $x = 1 \mu\text{m}$  zerteilt, so ist  $S = 3,14 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 = 3,14 \text{ m}^2$  und  $S_v = 6 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ . Das Beispiel läßt erkennen, daß Erscheinungen an Oberflächen, die bei grobdispersen Systemen kaum in Erscheinung treten, bei feindispersen Materialien von überragender Bedeutung sein können.

Moleküle, die sich in der Grenzfläche zwischen zwei Phasen befinden, besitzen im allgemeinen einen höheren Energ Zustand als solche im Innern einer Phase. Die Ueberschußenergie wird vereinfacht als Grenzflächenenergie bezeichnet. Die auf die Grenzfläche bezogene Ueberschußenergie nennt man spezifische Grenzflächenenergie. Sie läßt sich bei Flüssigkeiten und unter Zuhilfenahme von Modellen auch bei Feststoffen als mechanische Kraft deuten, die auf eine Einheitslänge in der Grenzfläche senkrecht zur Kraftrichtung bezogen wird. Diese Größe trägt die Bezeichnung Grenzflächenspannung  $\gamma$ . Sie hat im Gegensatz zur flächenbezogenen mechanischen Spannung  $\sigma$  die Dimension Kraft pro Länge. Grenzt ein Festkörper oder eine Flüssigkeit gegen seinen eigenen Dampf, so wird  $\gamma$  als Oberflächenspannung bezeichnet. Liegt statt des eigenen Dampfes ein inertes Gas vor, so braucht in praktischen Fällen nicht zwischen Grenz- und Oberflächenspannung unterschieden zu werden, da die Unterschiede im allgemeinen vernachlässigbar klein sind.

Oberflächenspannungen von Flüssigkeiten sind einer Messung zugänglich. Padday (58) hat die wichtigsten Meßmethoden zusammengestellt und Hinweise für die Auswahl der am besten geeigneten Methoden für die verschiedenen Stoffe angegeben. Wasser hat bei  $20^\circ\text{C}$  bekanntlich die Oberflächenspannung  $\gamma = 0,073$

N/m, alle übrigen, in Lebensmitteln vorkommenden Flüssigkeiten besitzen kleinere  $\gamma$ -Werte ( $0,02 \text{ N/m} < \gamma < 0,05 \text{ N/m}$ ). Die Oberflächenspannung von Festkörpern kann nur in Ausnahmefällen wie etwa niederenergetischen Kunststoffen (z. B. PTFE («Teflon»)):  $\gamma = 0,019 \text{ N/m}$ ) gemessen werden, bei den meisten Feststoffen ist man auf grobe Schätzwerte angewiesen. Viele feste Inhaltsstoffe von Lebensmitteln dürften Oberflächenspannungen von 0,1 bis 0,5 N/m haben. Durch sorbierte Wasserschichten verringert sich bei diesen Stoffen die nach außen wirksame Oberflächenspannung vielfach beträchtlich. Die Grenzflächenspannung  $\gamma_{sL}$  zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten L ist ebenfalls nur in wenigen Ausnahmefällen einer Messung zugänglich.

Aufgrund dieser Schwierigkeiten wird zur Beurteilung grenzflächenenergetischer Eigenschaften von Feststoffen der sog. Randwinkel  $\delta$  verwendet. Wie Abbildung 7 zeigt, stellt sich  $\delta$  an der Dreiphasengrenzlinie (3PL) von fester (s = solid), flüssiger (L = liquid) und gasförmiger (g = gas) Phase ein. Statt des Gases kann auch eine zweite, mit der anderen L-Phase nicht mischbare Flüssigkeit vorliegen. Der Randwinkel wird stets in der fluiden Phase mit der höheren Dichte gemessen; im Beispiel von Abbildung 7 ist dies die Flüssigkeit. Aus dem Kräftegleichgewicht erhält man die bekannte Youngsche Gleichung (Abb. 7).

$$\cos \delta = \frac{\gamma_s - \gamma_{sL}}{\gamma_L} \quad [10]$$

Hierin sind  $\gamma_s$  bzw.  $\gamma_L$  die Oberflächenspannung von Feststoff bzw. Flüssigkeit und  $\gamma_{sL}$  die Grenzflächenspannung zwischen fester und flüssiger Phase. Die in Abbildung 7 gestrichelt eingetragene Kraft  $\gamma_r = \gamma_{Lg} \cdot \sin \delta$  wird als

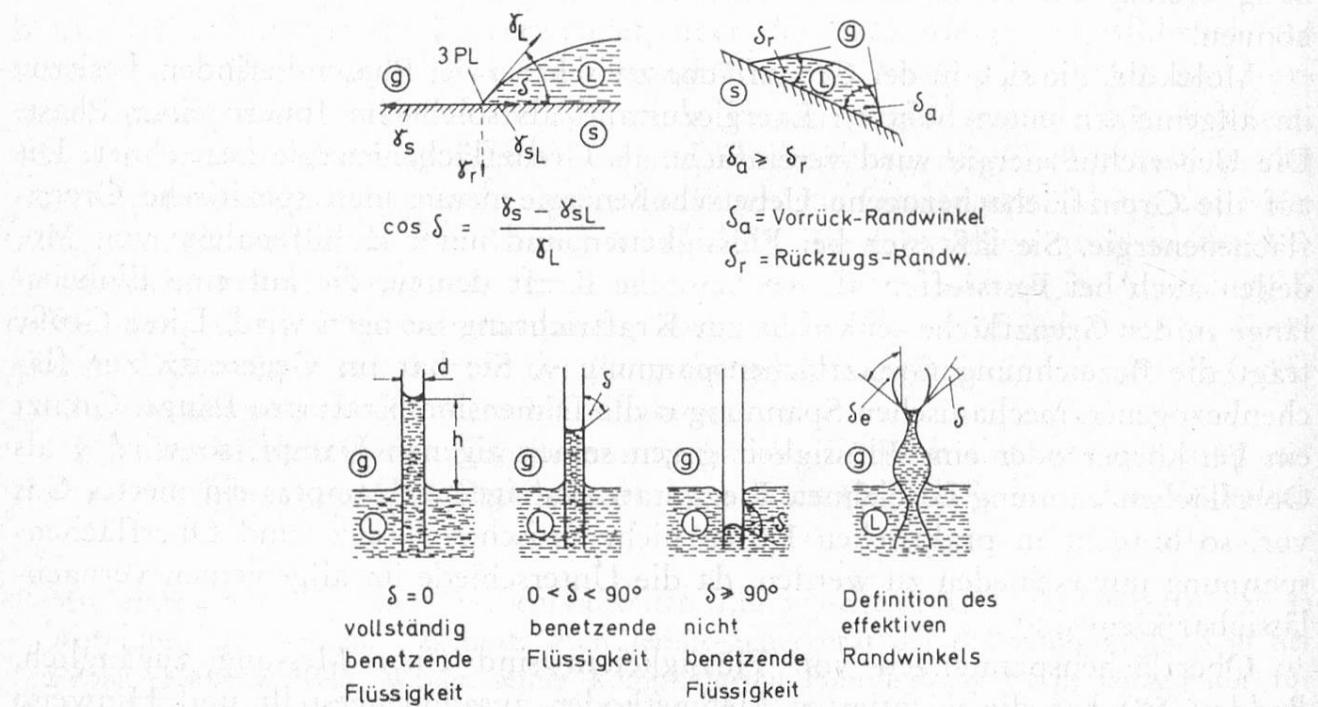


Abb. 7. Zur Erläuterung einiger grenzflächenenergetischer Eigenschaften von Feststoffen (s) und Flüssigkeiten (L)

Reaktionskraft vom Festkörper aufgenommen, dessen dadurch bedingte Verformung im allgemeinen vernachlässigbar klein ist.

Die Youngsche Gleichung [10] gilt exakt nur für Idealfälle. Bei realen Stoffen beobachtet man aufgrund von Rauigkeiten und Inhomogenitäten der Festkörperfritzflächen eine Randwinkelhysterese, wie sie schematisch in Abbildung 7 skizziert ist. Der Vorrückrandwinkel  $\delta_a$  (advancing contact angle), der sich an der vorschreitenden Dreiphasengrenzlinie einstellt, ist meist erheblich größer und niemals kleiner als der Rückzugsrandwinkel (receding contact angle), den man an einer sich zurückziehenden Dreiphasengrenzlinie beobachtet.

Je nach Größe des Randwinkels unterscheidet man zwischen vollständig benetzenden ( $\delta = 0$ ), benetzenden ( $0 < \delta < 90^\circ$ ) und nicht benetzenden ( $\delta \geq 90^\circ$ ) Flüssigkeiten (vgl. Abb. 7). Entsprechend sind auch die Bezeichnungen vollständig benetzter, benetzter und nicht benetzter Feststoff üblich. Wie Abbildung 7 zeigt, wird die Flüssigkeit aufgrund des Kapillardruckes

$$p_k = p_g - p_L = \frac{4 \gamma_L}{d} \cos \delta \quad [11]$$

je nach der Größe des Randwinkels entweder in eine dünne Kapillare eingesaugt oder herausgedrückt. In Gleichung [11] sind  $p_g$  der Gasdruck unmittelbar oberhalb des Flüssigkeitsmeniskus,  $p_L$  der Druck in der Flüssigkeit direkt unterhalb des Meniskus und  $d$  der Durchmesser der Kapillare. Gleichung [11] gilt nur für hinreichend dünne Kapillarrohre, in denen sich kugelförmige Flüssigkeitsmenisken bilden können.

Der Randwinkel ist für viele Fragen der Kapillarität von großer Bedeutung, da er einer Messung zugänglich ist. Beispielsweise kann er mit Hilfe von Gleichung [11] aus der kapillaren Steighöhe  $h = p_k/g\Delta\varrho$  ( $g$  = Erdbeschleunigung,  $\Delta\varrho$  = Dichtedifferenz zwischen Flüssigkeit und Gas) bei bekannten  $\gamma_L$ - und  $d$ -Werten ermittelt werden. Weitere Randwinkel-Meßmethoden sind in der Literatur mehrfach beschrieben worden, auf eine zusammenfassende Arbeit von Neumann (59) sei hingewiesen. Die Methoden beschränken sich jedoch auf die Messung an makroskopisch einfachen geometrischen Flächen. Ein zuverlässiges Verfahren zur Messung des Randwinkels an beliebigen Feststoffpartikeln bzw. Partikelhaufwerken existiert noch nicht. Man kann jedoch für disperse Feststoffe einen effektiven Randwinkel  $\delta_e$  definieren, der aus dem Eindringverhalten von Flüssigkeit in ein poröses System bestimmt werden kann (60). Der effektive Randwinkel ist derjenige Randwinkel, der sich in einem gedachten Kapillarrohr mit gleichem Querschnitt wie die beliebig geformte Pore an der Stelle des Flüssigkeitsmeniskus für das gleiche Dreiphasensystem einstellt. Abbildung 7 verdeutlicht diese Definition am Beispiel einer Kapillare mit wechselndem Querschnitt, die vielfach als Modellpore für Partikelhaufwerke verwendet wird. In diesem Fall ist der effektive Randwinkel  $\delta_e$  größer als der tatsächliche Randwinkel  $\delta$ . Mit Hilfe des effektiven Randwinkels kann ein kompliziertes Poresystem hinsichtlich der Benetzung wie eine zylindrische Kapillare behandelt werden; man kann also ebenfalls je nach vorliegender Flüssigkeit zwischen vollständig benetzten ( $\delta_e = 0$ ),

benetzten ( $0 < \delta_e < 90^\circ$ ) und nicht benetzten ( $\delta \geq 90^\circ$ ) dispergierten Feststoffen unterscheiden.

Diese Definition hat sich zur Erfassung von Instanteigenschaften als hilfreich erwiesen. Ein dispergierter Feststoff wird als Instantprodukt bezeichnet, wenn sich die Partikeln schnell in Flüssigkeiten — bei Lebensmitteln in der Regel in Wasser oder Milch — dispergieren bzw. lösen lassen. Dieses Verhalten wird durch die Instanteigenschaft charakterisiert, die sich aus folgenden Teileigenschaften zusammensetzt:

- Eindringvermögen der Flüssigkeit in das poröse System
- Untersinkvermögen der Partikeln
- Dispergierbarkeit
- Löslichkeitsvermögen, falls es sich um Feststoffe handelt, die sich in der betreffenden Flüssigkeit lösen.

Diese vier Teilvergänge laufen zwar in der angegebenen Reihenfolge ab, wenn man ein Instantprodukt auf eine Flüssigkeitsoberfläche bringt, sie überlagern sich jedoch mitunter und sind daher nicht immer streng voneinander trennbar. Vielfach tritt z. B. schon während der Befeuchtung ein Lösungsvorgang ein. Dennoch zielen die modernen Methoden darauf ab, die einzelnen Teileigenschaften getrennt zu messen, um gezielt die Instantqualität verbessern zu können.

Zur Messung des Eindringvermögens von Flüssigkeiten in das Haufwerk wurde kürzlich eine Methode beschrieben (60), die schematisch in Abbildung 8 (links) gezeigt ist. Mit Hilfe einer Kraftmeßdose wird die in das poröse System aufgrund von Kapillarität eingesaugte Flüssigkeitsmenge in Abhängigkeit von der Eindringzeit gemessen. Durch eine spezielle Versuchsauswertung können die das Eindringvermögen charakterisierenden Kennwerte ermittelt werden.

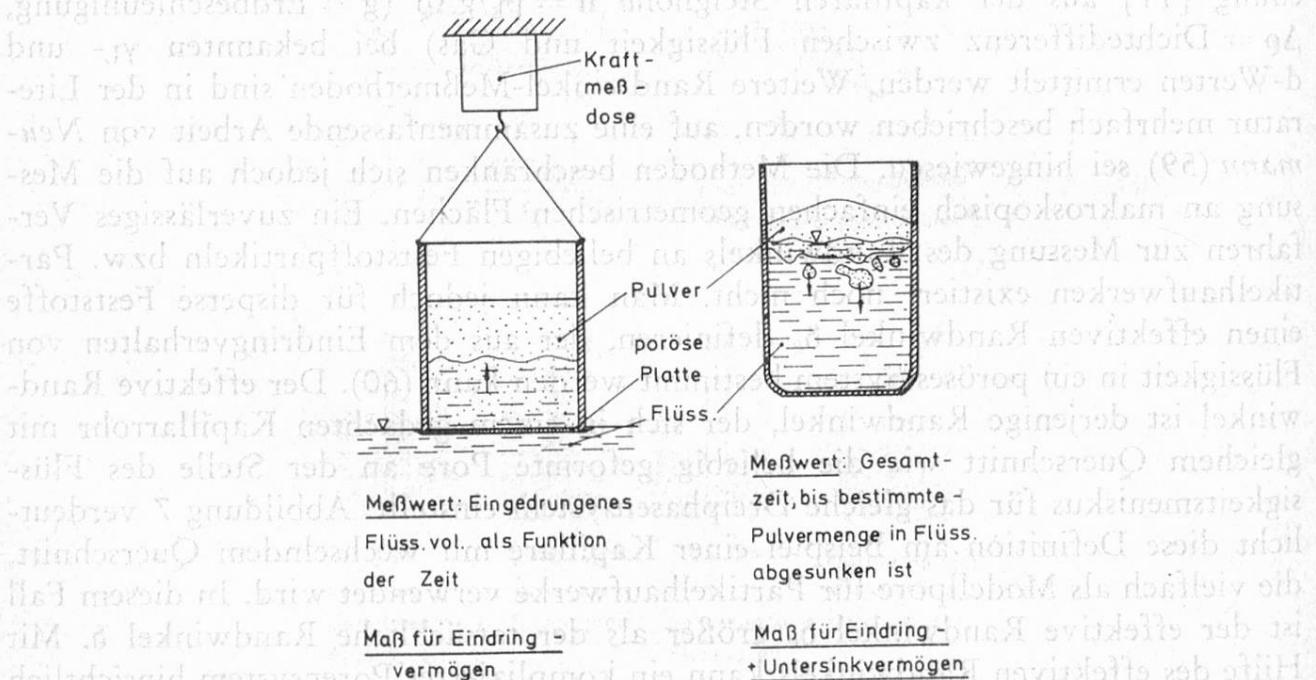


Abb. 8: Meßmethoden zur Bestimmung des Eindringvermögens von Flüssigkeiten und des Untersinkvermögens von Partikeln bei Instantprodukten

Eine andere Methode besteht darin, eine bestimmte Menge des zu prüfenden Instantprodukts auf eine Flüssigkeitsoberfläche zu schütten und die Zeit bis zum Absinken dieser Pulvermenge zu messen, Abbildung 8 rechts (vgl. 61). Diese Zeit ist ein Maß für das Eindring- und Untersinkvermögen; die Methode kann also nicht zwischen den Teilvergängen a) und b) unterscheiden. Von der IDF (International Dairy Federation, Paris) ist dieses Meßverfahren als Maß für die «Bennetzbarkeit» seit kurzem für Instant-Milchpulver standardisiert (E-Doc 90, 1978).

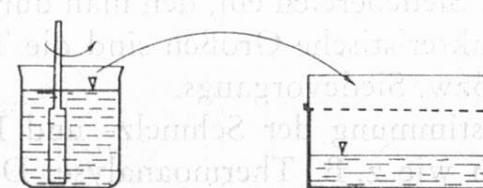
Zur Messung der Dispergierbarkeit von Instantprodukten wurden mehrere Verfahren vorgeschlagen. Für Instant-Milchpulver ist die kürzlich standardisierte IDF-Methode (E-Doc 90, 1978) gebräuchlich, bei der die Probe zunächst nach einer bestimmten Vorschrift in Wasser dispergiert und danach durch ein Sieb (Lochdurchmesser 150 µm) filtriert wird (Abbildung 9). Der Feststoffgehalt des Filtrats (Siebdurchgang), bezogen auf den Ausgangsfeststoffgehalt, wird als Dispergierbarkeit bezeichnet.

Eine fotometrische Methode zur Messung der Dispergiergeschwindigkeit von Instantprodukten haben *Polke, Herrmann und Sommer* (19) beschrieben (vgl. auch 62). Hierbei wird die Dispergierung durch Messung der Transmission

$$T = \exp(-A_v c_v L) \quad [12]$$

mit Hilfe eines Durchflußfotometers in Abhängigkeit von der Dispergierzeit gemessen (Abb. 9). In Gleichung [12] bedeuten  $A_v$  den volumenbezogenen Extinktionsquerschnitt des Feststoffs,  $c_v$  die Partikelvolumenkonzentration und  $L$  die Schichtdicke der Durchflußküvette. Aendert sich  $T$  (Intensität des durch die Suspension geschwächten Lichtstrahls, bezogen auf die Intensität des durch die feststofffreie Flüssigkeit gedrungeenen Lichtstrahls) nicht mehr mit der Zeit, so ist der mit der jeweiligen Methode maximal erzielbare Dispergiergrad erreicht.

#### a) IDF - Standard(1978) für Milchpulver



#### b) Fotometr. Messung der Disp. geschwindigkeit

( Polke, Herrmann u. Sommer, 1977 )

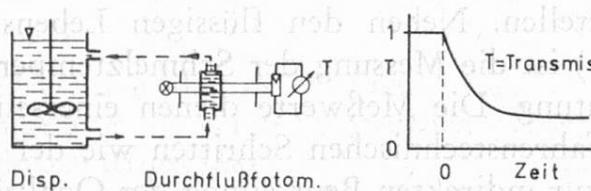


Abb. 9. Meßmethoden zur Bestimmung der Dispergierbarkeit von Instantprodukten

Eine ähnliche fotometrische Meßmethode hat *Samhammer* (63) zur Beurteilung der Instanteigenschaften von Milchpulvern verwendet. Das Verfahren erfordert zwar einen höheren Aufwand als der sehr einfache IDF-Dispergiertest, man erhält jedoch auch eine Auskunft über die Dispergier- bzw. Lösungsgeschwindigkeit. Insbesondere kann mit einer fotometrischen Methode auch die Dispergierung sehr feiner Partikeln erfaßt werden.

### Thermische Eigenschaften

Thermische Eigenschaften von Lebensmitteln interessieren hauptsächlich bei der Auslegung von verfahrenstechnischen Apparaten. Sie sind also in erster Linie zur Beurteilung der technologischen Qualität wichtig. Auch für den Verbraucher können thermische Eigenschaften unmittelbar von Bedeutung sein wie beispielsweise der Schmelz- und Siedebereich von Lebensmitteln.

Im folgenden werden nur einige Erläuterungen zu den wichtigsten thermischen Eigenschaften gegeben. Vertiefte Kenntnisse, die in der Lebensmittelverfahrenstechnik benötigt werden, vermittelt eine umfangreiche Fachliteratur (vgl. 64). Es sei darauf hingewiesen, daß hier unter thermischen Eigenschaften nur physikalische Eigenschaften verstanden werden. Eigenschaften, die eine Empfindlichkeit von Lebensmitteln gegen eine thermische Behandlung ausdrücken, beispielsweise die Empfindlichkeit gegen chemische Veränderungen der Inhaltsstoffe, sind hier nicht gemeint.

#### Schmelz- und Siedebereiche

Reine Stoffe schmelzen (bzw. erstarren, gefrieren) und sieden (bzw. kondensieren) bei bestimmten Temperaturen, die nur vom Druck abhängen. Beim Erstarren, Sieden und Kondensieren müssen jedoch ausreichende Keime vorhanden sein, damit sich der Gleichgewichtszustand einstellen kann. Lebensmittel setzen sich im allgemeinen aus mehreren Komponenten zusammen. In diesen Fällen stellt sich ein Schmelz- bzw. Siedebereich ein, den man durch Schmelz- bzw. Siedekurven kennzeichnet. Charakteristische Größen sind die Temperaturen zu Beginn und am Ende des Schmelz- bzw. Siedevorgangs.

Zur experimentellen Bestimmung der Schmelz- und Erstarrungstemperaturen werden bekannte Methoden wie z. B. Thermoanalyse, Differentialthermoanalyse und Differentialthermogravimetrie verwendet. Bei Erstarrungs- bzw. Gefrierpunktmessungen stört oft der Kristallisationsverzug, da die Bildung von Keimen bei der Phasenumwandlung gehemmt ist. Dies führt im allgemeinen zu einer Unterkühlung der Flüssigkeit, so daß kein Phasengleichgewicht vorliegt. Durch Zugabe von Fremdkeimen gelingt es vielfach, das Phasengleichgewicht zumindest näherungsweise einzustellen. Neben den flüssigen Lebensmitteln wie beispielsweise Fruchtsäften (65) ist die Messung der Schmelztemperatur insbesondere von Fetten (66) von Bedeutung. Die Meßwerte dienen einerseits zur Festlegung von Temperaturen bei verfahrenstechnischen Schritten wie der Gefrierkonzentrierung (67) und andererseits zur indirekten Beurteilung der Qualität wie der Textur von Fetten.

Siedetemperaturen werden durch die Messung des Dampfdrucks bestimmt. Die Hauptschwierigkeit besteht darin, das genaue Gleichgewicht zwischen der flüssigen und der dampfförmigen Phase einzustellen, da der Siedevorgang mit der Bildung von instabilen Keimen beginnt. Gleches gilt für die Kondensation. Für genaue Messungen sind daher ebenso wie bei Gefrierpunktmessungen Fremdkeime erforderlich.

### Kalorische Eigenschaften

Zu den kalorischen Daten zählen die spezifische Wärmekapazität, die Enthalpie und die Hydratationswärme. Bei isobaren Prozessen besteht zwischen der Änderung der massenbezogenen Wärmemenge  $q$  (Dimension  $J/g \cdot K$ ), der Änderung der massenbezogenen Enthalpie  $h$  ( $J/g$ ), der spezifischen (d. h. massenbezogenen) isobaren Wärmekapazität  $c_p$  ( $J/g \cdot K$ ) und der Temperatur  $T$  ( $K$ ) die bekannte Beziehung

$$(dq)_p = dh = c_p dT. \quad [13]$$

Wird der Druck konstant gehalten, lässt sich die Enthalpieänderung und damit die spez. Wärmekapazität  $c_p$  unmittelbar aus der aufgenommenen oder abgegebenen Wärmemenge kalorimetrisch messen. Die hierzu verwendeten Kalorimeter beruhen auf sehr genauen Temperaturmessungen. Für viele Lebensmittel hat Riedel (68) die spezifischen Wärmekapazitäten und Enthalpien mit Hilfe eines adiabatischen Kalorimeters gemessen und zusammengestellt. Die Publikation enthält neben einem Verzeichnis aller Arbeiten des Autors über kalorimetrische Untersuchungen an Lebensmitteln auch eine empirische Formel, die mit hoher Genauigkeit die Berechnung der Enthalpie fettarmer Lebensmittel in Abhängigkeit vom Wassergehalt und von der Temperatur gestattet. Am Beispiel von Magerquark zeigt Abbildung 10 die gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und

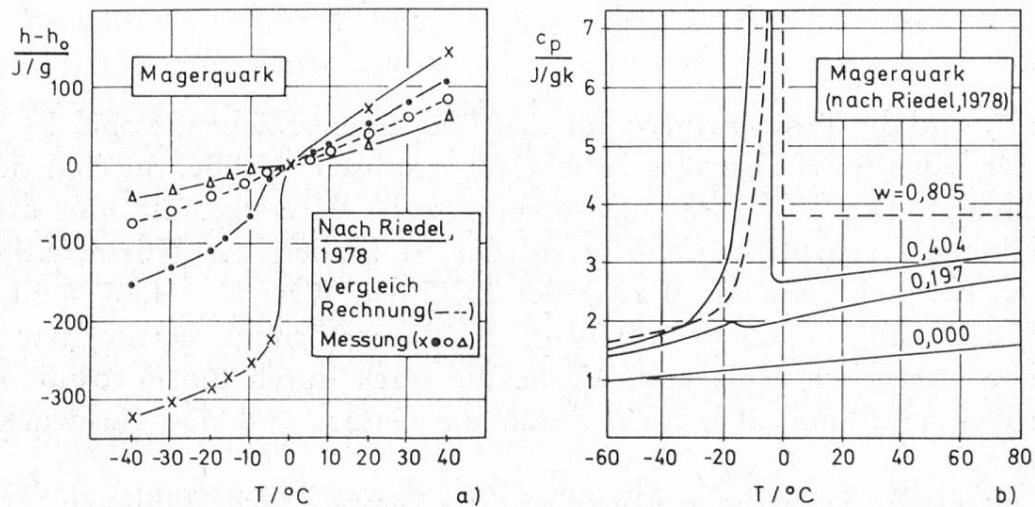


Abb. 10. a) Enthal piedifferenz  $h - h_0$  ( $h_0 = 0$  bei  $T = 0^\circ C$ ) von Magerquark in Abhängigkeit von der Temperatur  $T$ . Vergleich zwischen Messung und Berechnung nach einer empirischen Formel nach Riedel (68)

b) Spez. Wärmekapazität  $c_p$  von Magerquark in Abhängigkeit von der Temperatur für vier verschiedene Wassergehalte  $w$  (69)

Messung. Aufgetragen ist die Enthalpiedifferenz  $h - h_0$  über der Temperatur T bei verschiedenen Wassergehalten w (g Wasser je 1 g Substanz). Als Bezugsenthalpie wurde von Riedel  $h_0 = 0$  bei  $T = 0^\circ\text{C}$  gewählt.

Abbildung 10b zeigt für den gleichen Stoff die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  als Funktion der Temperatur T für 4 verschiedene Wassergehalte w (69). Die bei hohen Wassergehalten kurz unterhalb von  $0^\circ\text{C}$  erkennbaren großen  $c_p$ -Werte sind auf die latenten Wärmen beim Ausfrieren des Eises zurückzuführen.

Als weitere kalorische Größe hat Riedel (70) die integrale Hydrationswärme wasserarmer, pulverförmiger Lebensmittel gemessen und die Ergebnisse durch eine mathematische Formel erfaßt. Die Hydrationswärme  $q_h$  gibt die beim Immergieren, d. h. beim vollständigen Befeuchten mit Wasser freigesetzte Wärmemenge eines Stoffes an. Ebenso wie die übrigen kalorischen Eigenschaften  $c_p$  und  $h$  ist  $q_h$  eine Größe, die zur Beurteilung der technologischen Qualität von Lebensmitteln von Bedeutung ist.

### Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit

Für die (vektorielle) Wärmestromdichte  $\dot{q}_A$  (Wärmestrom  $\dot{Q}$ , bezogen auf die zur Transportrichtung senkrechte Fläche A) gilt für isotrope Materialien die bekannte Beziehung

$$\dot{q}_A = -\lambda \operatorname{grad} T \quad [14]$$

$\lambda$  wird als Wärmeleitfähigkeit bezeichnet,  $\operatorname{grad} T$  ist der Temperaturgradient (in Richtung der Flächennormalen).  $\lambda$  ist also ein Maß dafür, wie gut Wärme durch einen Stoff transportiert wird. Bildet sich beispielsweise in einer Platte mit der Fläche A und der Dicke y ein lineares Temperaturprofil aus, so gilt für die Wärmestromdichte senkrecht zu A nach Gleichung [14]

$$\dot{q}_A = \frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \frac{T_1 - T_2}{y} \quad [14a]$$

$T_1$  und  $T_2$  sind die Temperaturen auf den Plattenoberflächen, wobei  $T_2 > T_1$  ist.  $\lambda$  ist eine für jeden Stoff charakteristische physikalische Größe, die von der Temperatur abhängt. Die Stoffzusammensetzung (z. B. Wassergehalt) und die Stoffstruktur können  $\lambda$  erheblich beeinflussen. Die SI-Einheit der Wärmeleitfähigkeit ist  $\text{W/m} \cdot \text{K}$ . Beispielsweise hat Wasser bei  $20^\circ\text{C}$  den Wert  $\lambda = 4,18 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , für Fette bei  $20^\circ\text{C}$  ist  $\lambda = (1,8 \div 2,5) \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . Pulverförmige, getrocknete Lebensmittel haben wesentlich kleinere  $\lambda$ -Werte, die stark durch die Porosität und die Partikelgrößenverteilung, aber auch durch die Gasart und den Gasdruck beeinflußt werden.

Eine weitere physikalische Stoffgröße ist die Temperaturleitfähigkeit

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad [15]$$

Hierin ist  $\rho$  die Dichte und  $c_p$  die spezifische (massenbezogene) isobare Wärmekapazität. Das Produkt  $\rho c_p$  ist also die volumenbezogene isobare Wärmekapa-

zität. Die Temperaturleitfähigkeit  $a$  (SI-Einheit  $m^2/s$ ) ist ein Maß dafür, wie schnell sich eine Temperaturänderung in einem Stoff ausbreitet und damit die maßgebliche Stoffgröße zur Berechnung von Temperaturfeldern in Lebensmitteln.

Ueber die Messung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Lebensmitteln haben Riedel (vgl. Literaturzusammenstellungen 69 und 71) ausführlich berichtet und für viele flüssige und feste (kompakte und disperse) Lebensmittel Meßdaten bereitgestellt. Diese Daten sind für die günstige thermische Behandlung von Lebensmitteln und für die Auslegung der dazu verwendeten Apparate notwendig.

## Sorptions- und Stofftransporteigenschaften

### Wasserdampfsorption

Die Qualität von Lebensmitteln insbesondere im Hinblick auf das Lagerungsverhalten wird entscheidend durch den Wassergehalt beeinflußt. Liegt ein Gleichgewichtszustand mit der Umgebungsfeuchte vor, so läßt sich die Qualitätsbeeinflussung besser durch die Wasseraktivität als durch den Wassergehalt kennzeichnen (72). Die Wasseraktivität  $a_w$  ist der Quotient aus der Fugazität des Wasserdampfes der Umgebungsatmosphäre und der Fugazität des reinen Wasserdampfes bei derselben Temperatur (vgl. 73). Die Fugazität berücksichtigt das reale Gasverhalten, das in praktischen Fällen vom idealen Verhalten des Wasserdampfes so gering abweicht, daß man

$$a_w \approx p/p_0 = \varphi \quad [16]$$

als ausreichende Näherung erhält.  $p$  ist der Partialdruck des Wasserdampfes über dem Lebensmittel,  $p_0$  ist der Dampfdruck des reinen Wassers bei gleicher Temperatur und gleichem Gesamtdruck. Der Quotient  $p/p_0$  wird auch als relative Feuchte  $\varphi$  bezeichnet.

Die Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasseraktivität bzw. relativer Feuchte stellt die Sorptionsisotherme her. Es handelt sich hierbei um eine Gleichgewichtseinstellung zwischen Wassergehalt und Umgebungsfeuchte bei einer bestimmten Temperatur. Als Maß für den Wassergehalt sind verschiedene Größen gebräuchlich, meist wird die auf die Masse  $m_s$  des trockenen Feststoffs bezogene Wassermasse  $m_{H_2O}$  verwendet. Ein typisches Beispiel für eine Sorptionsisotherme zeigt Abbildung 11. Es handelt sich hierbei um Meßergebnisse von Roth (74) bei  $T = 20^\circ C$  an kristallinem Puderzucker mit 3,45 EWG-Punkten und einer massenbezogenen BET-Stickstoff-Oberfläche von  $S_m = 0,44 \text{ m}^2/\text{g}$ . Man hat im allgemeinen zwischen der Sorption bei Flüssigkeitsaufnahme (Adsorptionsisotherme) und Flüssigkeitsabgabe (Desorptionsisotherme) zu unterscheiden. Meist ist der Wassergehalt für den gleichen  $a_w$ -Wert bei der Adsorption kleiner als bei der Desorption, bei amorphisierten Oberflächen wurden auch umgekehrte Verhältnisse gemessen (57). Für das unterschiedliche Ad- und Desorptionsverhalten, das als Sorptionshysterese bekannt ist, gibt es mehrere Ursachen, die letztlich auf die komplizierten Mechanismen der Wasserbindung und auf Stoffveränderungen bei Anwesenheit von Wasser zurückzuführen sind.

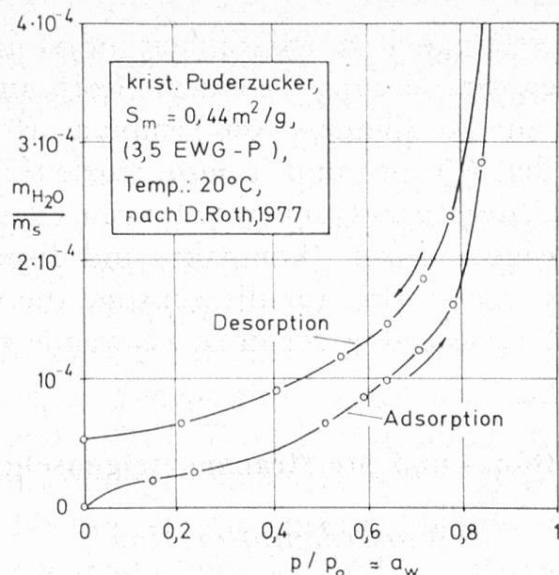


Abb. 11. Beispiel für eine Sorptionsisotherme aus Messungen von Roth (74) bei  $T = 20^\circ\text{C}$  an kristallinem Puderzucker

Die vielfältigen Möglichkeiten, die Wasseraktivität bzw. Wasserdampf-Sorptionsisothermen zu messen, sollen im Rahmen dieser Uebersichtsarbeit nicht behandelt werden. Auf eine zusammenfassende Darstellung von Gál (75) über die wichtigsten Sorptionsmessungen sei hingewiesen. Genaue Sorptionsmessungen erfordern einen erheblichen Aufwand. Insbesondere ist zu beachten, daß die Vorgeschichte des zu untersuchenden Lebensmittels das Meßergebnis erheblich beeinflussen kann. Trotz der umfangreichen Messungen von Sorptionsisothermen verschiedenartiger Lebensmittel, die mehrfach zusammengestellt wurden (vgl. 76 mit weiterführenden Literaturangaben), sind noch erhebliche Forschungsanstrengungen nötig, um die bisherigen Ergebnisse zu vervollständigen und die Reproduzierbarkeit der Methoden zu verbessern.

Die große Bedeutung der Wasseraktivität bzw. der Sorptionsisothermen auf die Qualität von Lebensmitteln haben Loncin und Weisser (72) und Labuza (77) diskutiert. Insbesondere beeinflußt die Wasseraktivität die Textur von Lebensmitteln, das Wachstum von Mikroorganismen, die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen (z. B. Maillard-Reaktionen), die Enzymaktivität und die Aromaerhaltung bei Trocknungs- und Konzentriervorgängen. Darüber hinaus ist die Sorptionsisotherme für Trocknungsverfahren von Bedeutung. Sie liefert ferner auch Hinweise über andere Eigenschaften wie beispielsweise das Agglomerationsverhalten von frisch gemahlenen Lebensmitteln (57).

### Stofftransporteigenschaften

Die Qualität von Lebensmitteln kann durch die Eigenschaften, wie schnell ein Stoff im Gut transportiert wird, beeinflußt werden. Man unterscheidet zwischen molekularem und konvektivem Transport. Der molekulare Stofftransport, die sog. Diffusion, wird durch einen Massenkonzentrationsgradienten grad  $c_m$  bewirkt, der konvektive Transport erfolgt aufgrund eines Druckgradienten grad  $p$

und/oder äußerer Felder. In Analogie zur Wärmeleitung lässt sich entsprechend Gleichung [14] für die Diffusion eines Stoffes  $i$  in einem isotropen Material schreiben:

$$\dot{m}_{Ai} = -D_i \operatorname{grad} c_{mi} \quad [17]$$

Hierin sind  $\dot{m}_{Ai}$  die (vektorielle) Massenstromdichte (Massenstrom  $m_i$ , bezogen auf die zur Transportrichtung senkrechte Fläche  $A$ ) und  $D_i$  der Diffusionskoeffizient (SI-Einheit  $\text{m}^2/\text{s}$ ), jeweils für den Stoff  $i$ . Der Diffusionskoeffizient ist vom jeweiligen Stoff, von der Zusammensetzung des Lebensmittels und vom Druck abhängig. Die verschiedenen Meßmethoden zur Bestimmung von Diffusionskoeffizienten wurden schon mehrfach beschrieben (78), sie sollen hier nicht behandelt werden. Als Anhaltswerte für die Diffusion von verschiedenen Stoffen in Luft bei normalen Raumbedingungen kann  $D = (10^{-4} \text{ bis } 10^{-5}) \text{ m}^2/\text{s}$  benutzt werden, für die Diffusion in Wasser bei  $20^\circ\text{C}$  gilt  $D = (10^{-9} \text{ bis } 10^{-10}) \text{ m}^2/\text{s}$ .

Bei bekannten Diffusionskoeffizienten können erwünschte (z. B. Wasserentzug bei der Trocknung) und unerwünschte (z. B. Auslaugen von Vitaminen beim Wässern) Stofftransportvorgänge vorausberechnet werden. In Zusammenhang mit Lebensmitteln sind Diffusionskoeffizienten insbesondere auch für Verpackungsstoffe von Bedeutung.

Wird Stoff konvektiv durch ein isotropes Material transportiert, so gilt nach dem verallgemeinerten Gesetz von Darcy

$$\dot{m}_{Ai} = -k_i \rho_i \operatorname{grad} (p + \Phi) \quad [18]$$

Hierin sind  $k_i$  die Permeabilität des Stoffes  $i$ ,  $\rho_i$  die Dichte des Stoffes  $i$ ,  $p$  der Druck und  $\Phi$  das Potential aufgrund äußerer Kräfte. Der konvektive Transport kann für die Bewegung von Flüssigkeiten oder Gasen in porösen Lebensmitteln von Bedeutung sein. Die Permeabilität muß mit Hilfe eines Durchströmungsversuchs experimentell bestimmt werden (vgl. z. B. 48). Meist wird  $k_i$  nur für verfahrenstechnische Berechnungen von Prozessen benötigt, die Permeabilität kann jedoch auch zur Bestimmung der mittleren Oberfläche poröser Systeme (Oberfläche nach den Durchströmungsverfahren) verwendet werden (52).

## Elektrische Eigenschaften

### Dielektrische Eigenschaften

Lebensmittel stellen Dielektrika dar. Die dielektrischen Eigenschaften werden durch die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  beschrieben, die eine Proportionalitätskonstante zwischen dielektrischer Erregung und der elektrischen Feldstärke darstellt (vgl. z. B. 79). Die Dielektrizitätskonstante wird üblicherweise in der Form

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad [19]$$

geschrieben, wobei  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$  die Dielektrizitätskonstante des Vakuums und  $\epsilon_r$  die (dimensionslose) relative Dielektrizitätskonstante bedeuten. Im elektrischen Wechselfeld ist  $\epsilon$  eine komplexe Größe

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' = |\epsilon| e^{-i\delta} \quad [20]$$

Hierin sind  $\delta$  der sog. Verlustwinkel und  $\epsilon'$  bzw.  $\epsilon''$  der reale bzw. imaginäre Anteil von  $\epsilon$ . In der Regel interessiert nur die relative Dielektrizitätskonstante, für die nach Gleichung [20] gilt:

$$\epsilon_r = \frac{1}{\epsilon_0} (\epsilon' - i\epsilon'') = \epsilon'_r - i\epsilon''_r = \epsilon'_r (1 - i \operatorname{tg} \delta) \quad [21]$$

Der Tangens des Verlustwinkels,  $\operatorname{tg} \delta = \epsilon''/\epsilon' = \epsilon''_r/\epsilon'_r$  gibt den Dissipationsfaktor für das Material an.

Im Schrifttum werden mitunter  $\epsilon'$  bzw.  $\epsilon'_r$  als absolute bzw. relative Dielektrizitätskonstante und  $\epsilon''$  bzw.  $\epsilon''_r$  als absoluter bzw. relativer dielektrischer Verlustfaktor bezeichnet. Bei Angaben von Werten ist daher stets zu prüfen, welche Bezeichnungen gemeint sind.

Die relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  ist vom Material, von der Temperatur und von der Frequenz abhängig. Eine Zusammenstellung von  $\epsilon'_r$ - und  $\epsilon''_r$ -Werten für verschiedene Lebensmittel bei unterschiedlichen Temperaturen und Frequenzen enthält eine Uebersichtsarbeit von *Nelson* (80). Weitere  $\epsilon$ -Werte wurden von *de Loor* und *Meijboom* (81) zusammengestellt.

Diese Arbeit gibt auch über die hier nicht behandelten Meßmethoden Auskunft. Als Anhaltswerte bei ca. 20°C und einer Frequenz  $f < 1\text{GHz}$  erhält man für wasserfreie Lebensmittelstoffe wie Fette, Oele, Kohlenhydrate und Proteine  $\epsilon'_r = 1$  bis 10. Mit  $\epsilon'_r \approx 80$  hat Wasser einen extrem hohen Wert. Bei wasserhaltigen Lebensmitteln wird  $\epsilon'_r$  daher wesentlich durch den Wassergehalt bestimmt.

Wegen der hohen Dielektrizitätskonstanten des Wassers werden dielektrische Messungen zur Feuchtebestimmung von Lebensmitteln verwendet (82, 83). Moderne Meßgeräte erlauben eine schnelle und genaue Wassergehaltsbestimmung und damit eine kontinuierliche Qualitätskontrolle (84), da der Wassergehalt vielfach ein entscheidendes Qualitätsmerkmal ist. Darüber hinaus geben dielektrische Eigenschaften auch Auskunft über andere Qualitätseigenschaften wie beispielsweise Reifegrad von Früchten (85). Die bisherigen Ergebnisse lassen eine erfolgreiche Anwendung dieser noch neuen Meßtechnik zur Beurteilung der Qualität von Lebensmitteln erkennen. Da die dielektrischen Eigenschaften nicht ein direktes Qualitätsmerkmal sind, muß die Korrelation zur Qualität experimentell ermittelt werden.

Die weitere Bedeutung der Dielektrizitätskonstanten ergibt sich aus der Möglichkeit, durch Anlegen eines elektrischen Wechselfeldes Wärme in einem Dielлектrikum zu erzeugen. Vorzugsweise verwendet man elektrische Felder mit hohen Frequenzen im Bereich von GHz, die als Mikrowellenfelder bezeichnet werden. (Die für Mikrowellengeräte zugelassene und gebräuchliche Frequenz ist

2,45 GHz.) Die entstehende Mikrowellenwärme hat den Vorteil, daß sie im Innern des Materials erzeugt wird. Dadurch ist eine weitgehend gleichmäßige und vor allem schnelle Erwärmung von Nahrungsmitteln möglich. Mikrowellengeräte werden daher zunehmend auch im Haushalt verwendet (86). Sie sind insbesondere zum schnellen Auftauen tiefgefrorener Lebensmittel, aber auch für andere schnelle Wärmebehandlungen von Nahrungsmitteln geeignet.

Die Wärmeerzeugung im elektrischen Wechselfeld beruht auf der Schwingung von Dipolen, die durch das umgebende Medium gedämpft werden. Diese Dämpfung erzeugt Reibungswärme. Dipole sind entweder als Moleküle mit polaren Strukturen vorhanden oder werden durch das Mikrowellenfeld induziert. Die darüber hinaus erzeugte Reibungswärme durch Ionenwanderung im elektrischen Wechselfeld ist für praktische Anwendungsfälle gegenüber der Dipolwärme im allgemeinen vernachlässigbar klein.

Für die in einem Dielektrikum pro Volumen erzeugte Dipolwärmeleistung gilt (vgl. z. B. 87)

$$P_v = \text{konst } E^2 f \epsilon' \operatorname{tg} \delta \quad [23]$$

Hierin sind  $E$  die im Dielektrikum wirksame, mittlere Feldstärke und  $f$  die Frequenz. Da sich  $E$  wegen der begrenzten Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen im zu erwärmenden Material örtlich ändert und auch  $\epsilon' \operatorname{tg} \delta$  örtlich unterschiedliche Werte annehmen kann, ist praktisch keine absolut gleichmäßige Mikrowellen-Erwärmung von Lebensmitteln möglich (88). Aus Gleichung [23] ist ersichtlich, daß an Stelle mit hohen  $\epsilon''$ -Werten ( $\epsilon'' = \epsilon' \operatorname{tg} \delta$ ) die örtliche Wärmeerzeugung groß ist. Beim Auftauen von gefrorenen Lebensmitteln kann dies zu großen Temperaturunterschieden im Material führen, da  $\epsilon''$  von Eis wesentlich kleiner ist als von aufgetautem Wasser.

Eine Uebersicht über die Anwendung und die Probleme der Mikrowellen erwärmung in Industrie und Haushalt hat kürzlich Sale (89) gegeben.

### *Elektrischer Widerstand*

Ebenso wie die dielektrischen Eigenschaften ist der elektrische Widerstand bzw. die elektrische Leitfähigkeit keine direkte Qualitätseigenschaft. In einigen Fällen besteht jedoch eine Korrelation zwischen Meßwerten, die aus einer Widerstandsmessung gewonnen werden können und der Qualität von Lebensmitteln.

Ein Beispiel hiefür ist die Ermittlung der Frische von Fisch aus Impedanzmessungen bei verschiedenen Frequenzen (Impedanz = komplexer Wechselstromwiderstand). Ein von Hennings (90) entwickeltes Meßgerät wird inzwischen kommerziell hergestellt. Ein weiteres Beispiel ist der Nachweis einer erfolgten Bestrahlung aus Impedanzmessungen (91). Weitere Anwendungen dieser Methoden z. B. zur Ermittlung des Frischezustandes von Lebensmitteln, zum Nachweis von Milchfälschungen (92) und zur Ueberprüfung des Reifezustandes von pflanzlichen Produkten erscheinen aussichtsreich, müssen jedoch noch für den Einsatz in der Praxis weiterentwickelt werden. Wir sind in Karlsruhe bemüht, an dieser Entwicklung mitzuwirken. Ueber die meßtechnischen Schwierigkeiten und erste

Ergebnisse, aufgrund von elektrischen Eigenschaften die Qualität von Lebensmitteln zu beurteilen, berichtet *Ehlermann* (93).

### Optische Eigenschaften von Lebensmitteln

Die Farbe von Lebensmitteln ist ein Merkmal, das insbesondere vom Verbraucher zur Beurteilung der Qualität in starkem Maße herangezogen wird. Die große Beachtung der Farbe ist dadurch erklärbar, daß sie berührungslos und sofort durch das Auge registriert werden kann. Aufgrund von Erfahrungswerten werden vom Verbraucher mit der Farbe auch andere Eigenschaften von Lebensmitteln wie beispielsweise Reifegrad von Obst und Geschmack verbunden. Da mit fast jedem Produkt eine bestimmte Farberwartung verknüpft ist, kommt der Farbe eine besondere Bedeutung zu. Dies gilt insbesondere auch für zugesetzte Farbstoffe, die zu keinem «unnatürlichen» Farbton führen dürfen.

Die Farbe ist eine vom Auge vermittelte Empfindung, also eine sinnesphysiologische Erscheinung. Die Ursache dieser Farbempfindung sind Lichtstrahlen im Wellenlängenbereich von ca. 380 bis 760 nm, die auf die Netzhaut des Auges treffen und einen Farbreiz auslösen, der die Farbempfindung hervorruft. Bei nicht selbstleuchtenden Körpern ist eine Lichtquelle erforderlich, um die Farbe wahrnehmen zu können. Bei undurchsichtigen Körpern werden (im Auflicht) die reflektierten Strahlen registriert, bei durchsichtigen Stoffen kann auch die durchscheinende Strahlung den Farbreiz auslösen. Neben der verwendeten Lichtart hängt die Farbe vom Körper selbst und vom individuellen Beobachter ab. Der normalsichtige Mensch kann etwa  $10^7$  Farben voneinander unterscheiden, zu denen sowohl die bunten Farben (rot, grün, blau usw.) als auch die unbunten Farben (schwarz, grau, weiß) gehören.

Da die Farbempfindung eine subjektive Größe ist, kann sie nicht direkt durch objektive Methoden erfaßt werden. Eindeutig und objektiv meßbar ist jedoch die Farbvalenz. Sie ist mit der Farbempfindung eines Normalbeobachters über eine Bewertung verknüpft. Die Farbentheorie lehrt, daß jede Farbvalenz eindeutig und vollständig durch drei Zahlenwerte gekennzeichnet ist. Die objektive Farbmessung hat die Aufgabe, diese drei Zahlenwerte, die sog. Farbwerte, für eine vorgelegte Farbe zu bestimmen. Die Farbmessung dient hauptsächlich zum Informationsaustausch über Farben und zur Kontrolle von Farben, ohne auf eine subjektive Beurteilung angewiesen zu sein.

Da die Farbvalenz durch drei Zahlen gekennzeichnet ist, läßt sie sich in einem dreidimensionalen Koordinatensystem veranschaulichen. Die Wahl dieses Koordinatensystems ist nicht willkürlich, sondern bedarf einer Vereinbarung. Eines der bekanntesten Systeme ist das CIE-System (CIE = Commission internationale de l'Eclairage); es wurde in die deutsche Norm DIN 5033 aufgenommen. Im CIE-System wird im dreidimensionalen Farbraum die Lage jedes Farbreizes durch seine Normfarbwerte X, Y und Z festgelegt, die durch hier nicht näher erläuterte Integrale definiert sind (vgl. DIN 5033). Hieraus erhält man die Normfarbwertanteile

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Wegen  $x + y + z = 1$  genügt die Angabe von zwei Farbwertanteilen, die man in einem rechtwinkligen Koordinatensystem darstellen kann. Die x-y-Ebene, d. h.  $z = \text{konst.}$ , stellt dabei einen Schnitt durch den Farbraum X/Y/Z dar. Diese Ebene des CIE-Systems wird als Normfarbtafel (DIN 5033) bezeichnet. Durch die rechtwinkligen Koordinaten x und y wird die Farbart (Farbton und Sättigung) festgelegt, die Helligkeit ist nicht berücksichtigt. Abbildung 12 zeigt die CIE-Farbtafel (= Normfarbtafel nach DIN 5033). Auf der durchgezogenen Linie liegen die Spektralfarben, d. h. die Farben mit der höchsten Sättigung. Einige Wellenlängen in nm sind eingetragen. Der Kurvenzug ist nicht geschlossen, sondern besitzt zwei Endpunkte. Die gestrichelt eingetragene Gerade zwischen diesen Endpunkten ist der geometrische Ort der nicht im Spektrum vorkommenden Purpurfarben. Der durch die Farbwertanteile  $x = y = z = \frac{1}{3}$  festgelegte Punkt gibt die Farbe unbunt an. Je nach Helligkeit handelt es sich um einen Grauwert zwischen weiß und schwarz. Mit größerer Entfernung von E in der Normfarbtafel werden die Farben bunter.

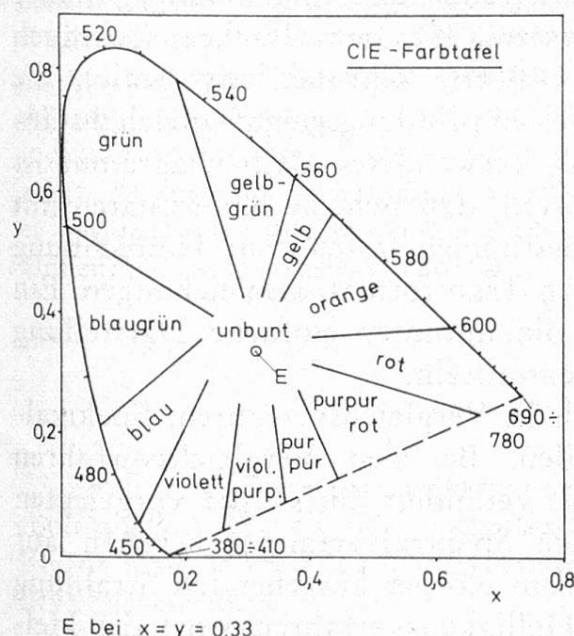


Abb. 12. CIE-Farbtafel (Normfarbtafel nach DIN 5033) mit Angabe gebräuchlicher Farbnamen (vereinfachte Darstellung)

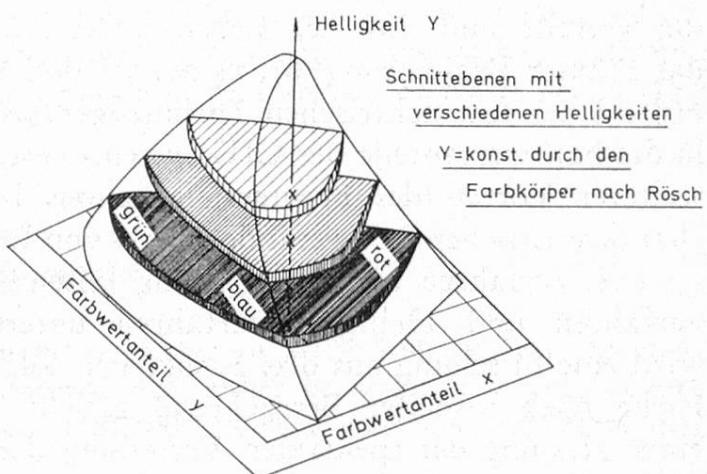


Abb. 13. Räumliche Darstellung der Farbvalenz mit drei Schnittflächen durch den Farbkörper nach Rösch (vereinfachte Darstellung, vgl. z. B. 94)

Durch die Normfarbtafel sind also der Farbton und die Farbsättigung eindeutig festgelegt. Zur Bestimmung der Farbvalenz muß jedoch noch die Helligkeit ermittelt werden, also neben den Farbwertanteilen  $x$  und  $y$  noch der die Helligkeit kennzeichnende Farbwert  $Y$ . Man legt hierzu bei nicht selbstleuchtenden Körpern als Maximalwert  $Y = 100$  für den ideal weißen Körper fest. Die Helligkeit ist demnach durch die Zahlenwerte 0 bis 100 durch Vereinbarung festgelegt. Zur anschaulichen Darstellung sind in Abbildung 12 einige Farben durch gebräuchliche Farbnamen gekennzeichnet, die bei mittlerer Helligkeit und unter Normlicht C (DIN 5033) auftreten.

Eine Vorstellung von der räumlichen Darstellung der Farbvalenz vermittelt Abbildung 13. Ueber dem rechtwinkligen Koordinatensystem mit den Farbwertanteilen  $x$  und  $y$  ist als dritte Koordinate die Helligkeit  $Y$  eingetragen. Die Oberfläche des Farbkörpers (Farbkörper nach Rösch, vgl. 94) enthält die sog. Optimalfarben (Spektral- und Purpurfarben), alle übrigen Farben befinden sich im Innern. Parallel zur  $x$ - $y$ -Ebene sind Scheiben «herausgeschnitten», deren Flächen Farbtafeln mit verschiedenen Helligkeiten  $Y$  darstellen.

Neben dem hier als Beispiel gezeigten Farbsystem existieren noch eine Vielzahl weiterer Systeme, die in der Farbmethrik ausführlich behandelt sind (vgl. 94). Das CIE-System beruht auf der Grundlage der additiven Farbmischung. In der Normfarbtafel bedeutet dies, daß auf einer beliebigen Geraden zwischen dem Unbuntpunkt E und der durchgezogenen oder gestrichelten Begrenzungslinie gleiche Farbtöne vorliegen, die sich nur durch die Sättigung unterscheiden. Der Nachteil dieses Farbsystems ist, daß gleiche geometrische Abstände auf der Farbtafel vom Auge in nicht gleich große Farbunterschiede aufgelöst werden. Es gibt jedoch auch Farbsysteme, bei denen der geometrische mit dem empfundenen Abstand übereinstimmt. Zu einem derartigen Farbsystem mit empfindungsgemäßer Gleichabständigkeit gehört das Munsell-Farbsystem (95). In vielfachem Gebrauch sind jedoch auch UCS-Diagramme (UCS = Uniform Chromaticity Scale), die durch projektive Verzerrung der CIE-Farbtafel empfindungsgemäß gleichabständig verteilt sind. Ein für Lebensmittel häufig verwendetes UCS-Diagramm ist das Hunter-Diagramm (96). Es besitzt den Vorteil, daß sich die Koordinaten mit Hilfe eines fotoelektrischen Farbmeßgerätes bestimmen lassen. Zur Umrechnung in die Farbwertanteile des CIE-Systems bestehen Transformationsgleichungen. Ein weiterer Vorteil des Hunter-Diagramms ist die mitunter einfache Darstellung charakteristischer Farbveränderungen von Lebensmitteln.

Die Verfahren zur Farbmessung lassen sich in Vergleichsverfahren, Spektralverfahren und Helligkeitsverfahren unterteilen. Bei den Vergleichsverfahren wird eine Mischung aus drei Eichfarben solange verändert, bis sie der vorgelegten Farbe nach visueller Betrachtung gleicht. Die Spektralverfahren beruhen auf einer Messung der spektralen Verteilung der vom Körper ausgehenden Strahlung mit Hilfe eines Spektralfotometers. Bei den Helligkeitsverfahren wird die Helligkeit des Körpers mittels eines Fotometers unter Benutzung von drei Filtern gemessen; daraus lassen sich die Farbwerte berechnen.

Die Probleme der Farbmessung beruhen nicht auf der großen Zahl der angebotenen Farbmeßgeräte, die einen hohen Entwicklungsstand besitzen, sondern auf

den Schwierigkeiten, die sich aus Farbinhomogenitäten, dem Glanz, der ungleichmäßigen Oberflächenstruktur und der Oberflächenform ergeben. Ein zusätzliches Problem stellt die Messung von Farbverteilungen dar, mit der wir uns in Karlsruhe derzeit befassen. In einer Arbeit von Grünwald (40) werden die Schwierigkeiten der Farbmessung an einem Beispiel erläutert und Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt.

### Zusammenfassung

Mit Hilfe von physikalischen Meßverfahren lassen sich einige Qualitätsmerkmale von Lebensmitteln erfassen. Hierbei können die gemessenen physikalischen Eigenschaften direkt ein Qualitätsmerkmal sein oder indirekt zur Qualitätsbeurteilung herangezogen werden, wenn sie mit anderen Qualitätseigenschaften korreliert sind.

Die für die Qualitätsbeurteilung von Lebensmitteln besonders interessierenden physikalischen Eigenschaften werden vorgestellt und die jeweiligen Meßprinzipien angegeben und diskutiert. Schwerpunktmäßig werden die mechanischen Eigenschaften behandelt unter besonderer Berücksichtigung disperter Lebensmittelstoffe. Darüber hinaus werden thermische, elektrische und optische Eigenschaften sowie das Sorptions- und Stofftransportverhalten von Lebensmitteln beschrieben und diskutiert.

### Résumé

Des procédés physiques de mesure permettent d'apprécier quelques caractéristiques de qualité de produits alimentaires. Les propriétés physiques mesurées peuvent directement constituer une caractéristique de qualité ou bien servir de façon indirecte à juger la qualité, si elles sont en corrélation avec d'autres caractéristiques de qualité.

Les propriétés physiques particulièrement intéressantes pour le jugement de la qualité de produits alimentaires sont présentées et les principes de mesure employés sont indiqués et discutés. L'étude porte avant tout sur les propriétés mécaniques, notamment, de produits alimentaires dispersés. En outre, les propriétés thermiques, électriques et optiques ainsi que le comportement de sorption et de transfert de masse des produits alimentaires sont décrits et discutés.

### Summary

Physical measurement techniques can be employed to assess some characteristics of food quality. The physical properties measured may either be direct indicators of quality or may be used for quality assessment indirectly, if they correlate with other quality characteristics.

The physical properties of particular interest in food quality assessment are described and the applicable principles of measurement are indicated and discussed. Especially mechanical properties are dealt with, special attention being given to disperse food substances. In addition, thermal, electrical and optical properties and the sorption and diffusional properties of foods are described and discussed.

## Literatur

1. Jowitt, R.: Classification of foodstuffs and physical properties. Lebensm.-Wiss. Technol. **7**, 6, 358—371 (1974).
2. Kramer, A. and Twigg, B. A.: Fundamentals of quality control for the food industry. Avi Publ. Co. Inc., Westport, Conn. 1966.
3. Toda, J., Wada, T., Yasumatsu, K. and Ischii, K.: Application of principal component analysis to food texture measurements. J. Texture Studies **2**, 207—219 (1971).
4. Kramer, A. and Szczesniak, A. S.: Texture measurements of foods. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland/Boston-USA 1973.
5. Jowitt, R.: Physical properties and quality of food. Proceedings 6th Eur. Symposium «Engineering and Food Quality», Cambridge, Sept. 8—10, 1975.
6. Rha, C. (Hrsg.): Theory, determination and control of physical properties of food materials. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland/Boston-USA 1975.
7. Kapsalis, J. G. and Moskowitz H. R.: The psychophysics and physics of food texture. Food Technol. **31** (4) 91—94, 99 (1977).
8. Szczesniak, A. S.: An overview of recent advances in food texture research. Food Technol. **31** (4) 71—75, 90 (1977).
9. Van Lanker, J. et al.: Mechanical behaviour and compression tests on apples (Golden Delicious). Lebensm.-Wiss. Technol. **10**, 1, 12—20 (1977).
10. Schubert, H.: Criteria for the application of TT-I indicators to quality control of deep frozen food products. In: Freezing, frozen storage and freeze-drying. Vol. 1, S. 367—374. Hrsg.: Institut International du Froid, Paris 1978.
11. Gaffney, J. J.: Quality detection in foods. Am. Soc. Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, USA 1976.
12. Rumpf, H. und Ebert, K. F.: Darstellung von Kornverteilungen und Berechnung der spezifischen Oberfläche. Chem. Ing. Tech. **36**, 523—537 (1964).
13. Rumpf, H.: Mechanische Verfahrenstechnik. Carl Hanser Verlag, München, Wien 1975.
14. Leschonski, K., Alex, W. und Koglin, B.: Teilchengrößenanalyse. 1. Darstellung und Auswertung von Teilchengrößenverteilungen. Chem. Ing. Tech. **46**, 23—26, 101—106 (1974).
15. Alex, W.: Prinzipien und Systematik der Zählverfahren in der Teilchengrößenanalyse. Aufbereitungstech. **13**, 105—111 (1972).
16. Sommer, K.: Probeteilung von körnigen Produkten und Probenahme bei der Korngrößenanalyse. Aufbereitungstech. **17**, 605—612 (1976).
17. Leschonski, K., Alex, W. und Koglin, B.: Teilchengrößenanalyse. Chem. Ing. Tech. **46**, 23—26, 101—106, 289—292, 387—390, 477—480, 563—566, 641—644, 729—732, 821—824, 901—904, 984—987 (1974) **47**, 21—24, 97—100 (1975).
18. Pahl, M. H., Schädel, G. und Rumpf, H.: Zusammenstellung von Teilchenformbeschreibungsmethoden. Aufbereitungstech. **14**, 257—264, 672—683, 759—764 (1973).
19. Polke, R., Herrmann, W. und Sommer, K.: Charakterisierung von Agglomeraten. Vortrag auf der int. Arbeitssitzung «Agglomerieren» des GVC-Fachausschusses, Düsseldorf, 12.—14. 4. 1978.
20. Reichert, H.: Desagglomeration organischer Farbpigmente in Couetteströmungen hochzäher viskoelastischer Flüssigkeiten. Diss. Universität Karlsruhe, 1973.
21. Schubert, H.: Untersuchungen zur Ermittlung von Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten Haufwerken aus körnigen Stoffen. Diss. Universität Karlsruhe, 1972.

22. Amrehn, H.: Radiometrische Verfahren in der industriellen Meßtechnik. Fortschr. Verfahrenstech. **15**, 416—444 (1977).
23. Kurz, H. P.: Statistische Optimierung der Porositätsmessung mit Gammastrahlen. Powd. Tech. **6**, 167—170 (1972).
24. Sowka, J. und Schubert, H.: Radiometrische Bestimmung der Porositäts- und Feuchteverteilung in Filterkuchen. Aufbereitungstech. Im Druck.
25. Heiß, R. und Witzel, H.: Objektive Methoden zur Messung der Konsistenz fester Lebensmittel. Z. Lebensm. Untersuch. -Forsch. **141**, 87—102 (1969).
26. Szczesniak, A. S., Brandt, M. A. and Friedmann, H. H.: Development of standard rating scales for mechanical parameters of texture and correlation between the objective and the sensory methods of texture evaluation. J. Food Sci. **28**, 397—403 (1963).
27. Kramer, A.: Texture — its definition, measurement and relation. Food Technol. **26**, 34—39 (1972).
28. Kapsalis, J. G., Kramer, A. and Szczesniak, A. S.: Quantification of objective and sensory texture relations. In: A. Kramer u. A. S. Szczesniak: Texture measurements of foods. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland/Boston-USA 1973.
29. Breene, W.: Application of texture profile analysis to instrumental food texture evaluation. J. Texture Studies **6**, 53—82 (1975).
30. Voisey, P. W.: Modernization of texture instrumentation. J. Texture Studies **2**, 129—195 (1971).
31. Szczesniak, A. S.: Instrumental methods of texture measurements. In: A. Kramer u. A. S. Szczesniak: Texture measurements of Foods. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland/Boston-USA 1973.
32. Bourne, M. C.: Texture measurements in vegetables. In: C. Rha: Theory, determination and control of physical properties of food materials. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland/Boston-USA 1975.
33. Schubert, H.: Tensile strength of agglomerates. Powder Tech. **11**, 107—119 (1975).
34. Schwedes, H. J.: Scherverhalten leicht verdichteter, kohäsiver Schüttgüter. Diss. Universität Karlsruhe, 1971.
35. Huang, F. and Rha, C.: Formation of single-cell protein filament with hydrocolloids. J. Food Sci. **43**, 780—782, 786 (1978).
36. Kramer, A.: The shear-press, a basis tool for the food technologist. Food Scientist **5**, 5—16 (1961).
37. Voisey, P. W. and Nonneke, I. L.: Measurement of pea tenderness. J. Texture Studies **2**, 348—368 (1971); **3**, 329—358 (1972); **4**, 171—195 (1973).
38. Schubert, H., Herrmann W. and Rumpf, H.: Deformation behaviour of agglomerates under tensile stress. Powder Tech. **11**, 121—131 (1975).
39. Hard, M. M. and Hard, A. R.: Static and dynamic measures of fresh apple texture. J. Am. Soc. Horticult. Sci. **101**, 361—367 (1976).
40. Grünwald, T.: Messung der Farbe und Festigkeit von Lebensmitteln. Mitt. Gebiete Lebens. Hyg. **70**, 97—106 (1979).
41. Alex, W. und Koglin, B.: Partikelmeßtechnik. Fortschr. Verfahrenstech. **16**, 53—69 (1978).
42. Hoffmann, H.: Vollautomatisches Bildanalyseverfahren zur Messung von engen Korngrößenverteilungen. Chem. Ing. Tech. **48**, 561 (1976).
43. Coulter Electronics: Coulter Counter industrial bibliography. Coulter Electronics GmbH, Krefeld 1977.

44. *Umhauer, H.*: Ermittlung von Partikelgrößenverteilungen in Aerosolströmungen hoher Konzentration mit Hilfe einer Streulichtmeßeinrichtung. VDI-Bericht Nr. 232, 101 bis 105 (1975).
45. *Metzger, K. L.* und *Leschonski, K.*: Untersuchung eines Querstromsichters zur Oneline-Teilchengrößenanalyse. *Chem. Ing. Tech.* **48**, 565 (1976).
46. *Niediek, E. A.*: Theorie und Praxis der Kennzeichnung der Mahlfeinheit in der Süßwarenindustrie. *Süßwaren* **23**, 1157—1164, 1236—1240 (1970); **24**, 28—36 (1971).
47. *Niediek, E. A.*: Grinding and particle size analysis in food technology with particular reference to cocoa and sugar. Proceed. 6th Eur. Symp. Food «Engineering and Food Quality» S. 366—379. Cambridge 1975.
48. *Gupte, A. R.*: Experimentelle Untersuchung der Einflüsse von Porosität und Korngrößenverteilung im Widerstandsgesetz der Porenströmung. Diss. Universität Karlsruhe 1970.
49. *Everett, D. H.*: Surface area determination. Butterworths, London 1970.
50. *Dullien, F. A. L.* and *Batra, V. K.*: Determination of the structure of porous media. *Ind. Eng. Chem.* **62**, 25—53 (1970).
51. *Baiker, A.* und *Richarz, W.*: Vergleich der Meßmethoden zur Bestimmung der Porenradienverteilung und spezifischen Oberfläche poröser Katalysatoren. *Chem. Ing. Tech.* **49**, 399—403 (1977).
52. *Koglin, B.*, *Leschonski, K.* und *Alex, W.*: Teilchengrößenanalyse; 7. Oberflächenmessung. *Chem. Ing. Tech.* **46**, 984—987 (1974); **47**, 21—24 (1975).
53. *Schubert, H.* und *Wibowo, W.*: Zur experimentellen Bestimmung der Zugfestigkeit von gering verdichteten Schüttgütern. *Chem. Ing. Tech.* **42**, 541—545 (1970).
54. *Schwedes, H. J.*: Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern. Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr. 1968.
55. *Münz, G.* und *Rumpf, H.*: Entwicklung eines Ringschergerätes zur Messung der Fließ-eigenschaften von Schüttgütern. *Chem. Ing. Tech.* **49**, 253 (1977).
56. *Molerus, O.*: Einfluß der Haftkräfte auf das Fließverhalten kohäsiver Schüttgüter. *Chem. Ing. Tech.* **50**, 309 (1978).
57. *Roth, D.*: Amorphisierung bei der Zerkleinerung und Rekristallisation als Ursachen der Agglomeration von Puderzucker und Verfahren zu deren Vermeidung. Diss. Universität Karlsruhe, 1976.
58. *Padday, J. F.*: Surface tension. Part II. Measurement of surface tension. In: *E. Matijević: Surface and colloid science*. Wiley-Interscience, New York, London, Sydney, Toronto 1969.
59. *Neumann, A. W.*: Contact angle and their temperature dependence: Thermodynamic status measurement, interpretation and application. *Adv. Coll. Interf. Sci.* **4**, 105 bis 191 (1974).
60. *Schubert, H.*: Optimierung der Größe und Porosität von Instantagglomeraten in Bezug auf eine schnelle Durchfeuchtung. *Verfahrenstech.* **12**, 5, 296—301 (1978).
61. *Pfalzer, L.*, *Bartusch, W.* und *Heiß, R.*: Untersuchungen über die physikalischen Eigenschaften agglomerierter Pulver. *Chem. Ing. Tech.* **45**, 510—516 (1973).
62. *Koglin, B.*: Photometrische Untersuchungen zur Wirkung grenzflächenaktiver Stoffe als Dispergiermittel in Suspensionen. Berichte V. Int. Kongreß Grenzflächenaktive Stoffe, Barcelona 1969. Band II/1, S. 237—246. Ed. Unidas, Barcelona, 1970.
63. *Samhammer, E.*: Untersuchungen zur Beurteilung der «Instant»-Eigenschaften von Milchpulvern. *Milchwiss.* **20**, 63—70 (1965).
64. *Loncin, M.*: Die Grundlagen der Verfahrenstechnik in der Lebensmittelindustrie. Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt/M. 1969.

65. Riedel, L.: Brechungsvermögen und Gefriertemperaturen von Fruchtsäften in Abhängigkeit von der Konzentration. Z. Lebensm. Unters.-Forsch. **89**, 289—299 (1949).
66. Seher, A.: Bestimmung der Schmelz- und Erstarrungstemperaturen von Fetten. Fette, Seifen, Anstrichmittel **73**, 481/486 (1971).
67. Huige, N. J. J., Senden, M. M. G. and Thijssen, H. A. C.: Nucleation and growth kinetics for the crystallization of ice from dextrose solutions in a continuous stirred tank crystallizer with supercooled feed. Kristall Tech. **8**, 785—801 (1973).
69. Riedel, L.: Eine Formel zur Berechnung der Enthalpie fettärmer Lebensmittel in Abhängigkeit von Wassergehalt und Temperatur. Chem. Mikrobiol. Technol. Lebensm. **5**, 129—133 (1978).
69. Riedel, L.: Enthalpiemessungen an Lebensmitteln. Chem. Mikrobiol. Technol. Lebensm. **5**, 118—127 (1977).
70. Riedel, L.: Kalorimetrische Bestimmung der Hydratationswärme von Lebensmitteln. Chem. Mikrobiol. Technol. Lebensm. **5**, 97—101 (1977).
71. Kostaropoulos, A. E.: Die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit getrockneter Lebensmittel. Diss. Universität Karlsruhe, 1971.
72. Loncin, M. und Weißer, H.: Die Wasseraktivität und ihre Bedeutung in der Lebensmittelverfahrenstechnik. Chem. Ing. Tech. **49**, 312—319 (1977).
73. Riedel, L.: Physikalische Chemie. Bibl. Institut Mannheim, Wien, Zürich. B. I. Wissenschaftsverlag 1974.
74. Roth, D.: Das Wasserdampfsorptionsverhalten von Puderzucker. Zucker **30**, 274—284 (1977).
75. Gál, S.: Die Methodik der Wasserdampf-Sorptionsmessungen. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1967.
76. Wolf, W., Spieß, W. E. L. und Jung, G.: Wasserdampf-Sorptionsisothermen von Lebensmitteln. Berichtsheft 18 der Fachgemeinschaft Allgem. Lufttechnik im VDMA, Frankfurt/M 1973.
77. Labuza, T. P.: The properties of water in relationship to water binding in foods. A review. J. Food Proc. Preserv. **1**, 167—190 (1977).
78. Jost, W. und Hauffe, K.: Diffusion. Methoden der Messung und Auswertung. Stein-kopf Verlag, Darmstadt 1972.
79. Weizel, W.: Lehrbuch der theoretischen Physik. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1963.
80. Nelson, S. O.: Electrical properties of agricultural products — A critical review. In: J. J. Gaffney: Quality detection in foods, **101**, S. 86—97. Am. Soc. Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, USA 1976.
81. de Loor, G. P. and Meijboom, F. W.: The dielectric constant of food and other materials with high water contents at microwave frequencies. J. Food Technol. **1**, 313 bis 322 (1966).
82. Ahlgrimm, H.-J.: Ein Beitrag zur dielektrischen Bestimmung des Feuchtegehalts an sehr feuchten organischen Stoffen. Grundl. Landtech. **25**, 165—172 (1975).
83. Breen, S. and Monaghan, R.: Moisture measurement of food products by dielectric techniques. In: J. J. Gaffney: Quality detection in foods, S. 102—105. Am. Soc. Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, USA 1976.
84. Gildemeister, E. und Räuber, H.-J.: Kontinuierliche dielektrische Feuchtigkeitsmessung an Lebensmitteln. Lebensmittelind. **23**, 489—494 (1976).
85. Zachariah, G.: Electrical properties of fruits and vegetables for quality evaluation. In: J. J. Gaffney: Quality detection in foods. Am. Soc. Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, USA, 98—101 (1976).

86. Pichert, H.: Das Mikrowellengerät im Haushalt — Theorie und Anwendung. *Hauswirtsch. Wiss.* **25** (2), 83—89 (1977).
87. Spreng, H.: Mikrowellen in der Lebensmittelbereitung. *Lebensm.-Wiss. Technol.* **6**, (3), 77—85 (1973).
88. Püschner, H. A.: Mikrowellenwärme: Anwendungsbeispiele in der Ernährungsindustrie. *Ernährungswirtsch./Lebensmitteltech.* **1**, 16—23 (1973).
89. Sale, A. J. H.: A review of microwaves for food processing. *J. Food. Technol.* **11**, 319—329 (1976).
90. Hennings, C.: Ein schnelles elektronisches Schnellverfahren zur Ermittlung der Frische von Seefischen. *Z. Lebensm. Untersuch. -Forsch.* **119**, 461—477 (1962).
91. Ehlermann, D.: Electrical (ac) resistance of irradiated fish — Quality control and detection of irradiation treatment. Berichte der Bundesforschungsanstalt für Lebensmittelfrischhaltung, Karlsruhe 3/1973.
92. Scharner, E. und Borkert, H.: Leitfähigkeitsmessungen und einige Anwendungsmöglichkeiten in der Lebensmittelindustrie. *Lebensmittelind.* **15**, 61—65, 102—103 (1968).
93. Ehlermann, D.: Beurteilung von Lebensmitteln aufgrund elektrischer Eigenschaften. *Mitt. Gebiete Lebensm. Hyg.* **70**, 107—116 (1979).
94. Wyszeycki, G.: Farbsysteme. Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Berlin, Frankfurt/M 1960.
95. Munsell, A. H.: Munsell book of color. Munsell Color Comp., Baltimore, Md./USA, Vol. I, 1929, Vol. II, 1943.
96. Hunter, R. S.: A multipurpose photoelectric reflectometer. *J. Opt. Soc. Am.* **30**, 536—544 (1940).

Dir. und Prof. Dr.-Ing. H. Schubert  
 Institut für Verfahrenstechnik der  
 Bundesforschungsanstalt für Ernährung  
 Ergessenstraße 20  
 D-7500 Karlsruhe 1