

- [ 7 ] *Kneer, F.*: Verfahren zum Kompostieren von Klärschlamm durch einen über die Luftzufuhr gesteuerten Rotteprozeß. DPA Nr. 2253 0092.
- [ 8 ] *Glathe, H. u. G. Farkasdi*: Biologie und Hygiene der Kompostierung, in: Müll- und Abfallbeseitigung, Band 2. Berlin: Erich Schmidt Verlag 1970.
- [ 9 ] *Niese, G.*: Die Bestimmung der mikrobiellen Aktivität in Müll und Müllkomposten durch die Messung der Sauerstoffaufnahme und der Wärmebildung. Habil.-Schr. Gießen 1969.
- [ 10 ] *Glathe, H. u. a.*: Bestimmung von Kompostmodellen von Müll mit und ohne Klärschlamm unter Verwendung physikalischer, chemischer und biologischer Messungen. Ber. d. Arb. Gem. f. komm. Abfallwirtschaft, Frankfurt: DLG-Verlag 1961.
- [ 11 ] *Willson, G.B. u. J.W. Hummel*: Aeration rates for rapid composting of dairy manure. Conference Agric. Waste Management Syracuse, N.Y. 1972.
- [ 12 ] *Cooney, C.L., D.I.C. Wang u. R.I. Mateles*: Measurement of heat evolution and correlation with oxygen consumption during microbial growth. Biotechnology and Bioengineering 11 (1968) S. 269/81.
- [ 13 ] *Bell, R.G.*: The influence of aeration on the composting of poultry manure-ground corn cob mixtures. Journ. agric. Eng. Res. 15 (1970) No. 1, S. 11/16.
- [ 14 ] *Willson, G.B.*: Composting dairy cow wastes. Livestock Waste Management, St. Joseph Mich. 1971, S. 163/65.
- [ 15 ] *Strauch, D. u. H. Schwab*: Hygienische Überprüfung eines Verfahrens zur Überprüfung flüssiger tierischer Exkremente in einen umweltfreundlichen Feststoff mit hohem Nutzwert. Deutsche Tierärztliche Wochenschrift Bd. 81 (1974) Nr. 31, S. 313/16.

## Durchflußmessung unregelmäßiger Flüssigkeitsströme mit Ringelektroden für programmgesteuerte Melkanlagen

Von Char Lie Pen, Anton Meiering, Hans Stanzel, Hans Schön, Weihenstephan\*)

DK 637.125:532.57

Bei automatisierten Produktionsprozessen in der Nahrungsmittelerzeugung und -verarbeitung dienen häufig unregelmäßige Strömungen als Steuer- oder Regelgrößen, wie beispielsweise bei programmgesteuerten Melkanlagen. Im folgenden Beitrag wird über die Möglichkeit berichtet, aus der Messung des elektrischen Leitwertes G des pulsierenden Milchstromes in teilgefüllten Milchschläuchen ein geeignetes Steuersignal zu gewinnen.

### 1. Problemstellung

In programmgesteuerten Melkanlagen werden Pulsfrequenz, Taktverhältnis und Vakuum während des Melkens in Abhängigkeit von der Milchabgabe der Kuh gesteuert. Der allgemeine Verlauf der Milchabgabe während des üblichen Maschinenmelkens ist in **Bild 1** dargestellt. Nach einer kurzen Stimulationsphase mit geringem Milchfluß steigt die Intensität der Milchabgabe sehr schnell an, bleibt eine gewisse Zeit nahezu konstant, um dann langsam abzuklingen. In der Nachmelkphase kann es — meist durch zusätzliche Manipulationen bedingt — zu einem nochmaligen kurzen Anstieg der Milchabgabe kommen.

Aus den Arbeiten des Sonderforschungsbereiches 141 "Produktionstechniken der Rinderhaltung" an der TU München-Weihenstephan, durchgeführt vom Institut für Landtechnik, Weihenstephan (Dir.: Prof. Dr. H.L. Wenner).

\*) *Dr. Char Lie Pen* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und für das SFB-Teilprojekt "Programmgesteuerte Melkanlagen" verantwortlich. *Dr. Anton Meiering* ist Professor für Food Engineering an der Universität Guelph, Canada, und war 1974 als Gastwissenschaftler am Institut für Landtechnik der TU München-Weihenstephan tätig. *Dr. Hans Stanzel* ist Leiter der Meßabteilung an der Landtechnik Weihenstephan. *Akad. Oberrat Dr. Hans Schön* ist Leiter des Projektbereiches "Maschinelles Melken".

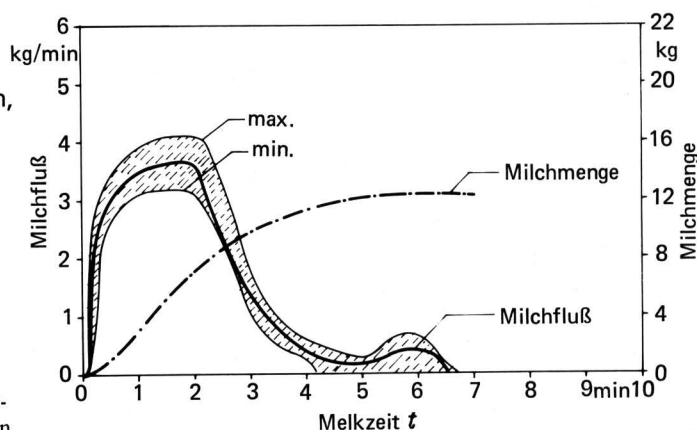


Bild 1. Beispiel einer Milchabgabekurve beim Maschinenmelken.

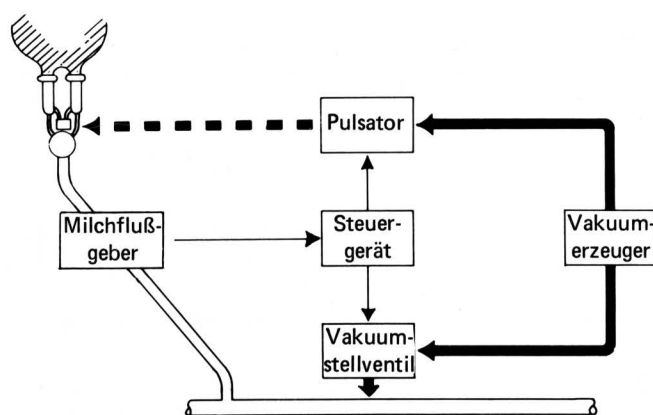


Bild 2. Schema einer gesteuerten Melkanlage.

Die Charakteristik der Milchabgabe unterliegt starken individuellen Schwankungen und hängt außerdem beim Einzeltier vom Laktationsstadium ab. Die beim Melkvorgang in der Zeiteinheit abgegebene Milchmenge, der Milchfluß, muß also individuell und kontinuierlich gemessen werden, um mit dem Signal des Meßgebers die Anlage in der in Bild 2 gezeigten Weise steuern zu können.

Bisher bekannt gewordene Geber verwenden Staukammern, in denen die Höhe [1] oder das Gewicht [2] der rückgestauten, dem Volumenstrom proportionalen Flüssigkeitsmenge gemessen wird. Beide Lösungen können bei einem leichtverderblichen Nahrungsmittel wie Milch zu Reinigungsproblemen führen. Aufbauend auf ausgedehnten Untersuchungen über milchflußgesteuerte Endabschalter [3] wurde deshalb versucht, den Milchstrom im Milchschlauch zwischen Sammelstück des Melkzeuges und der Absaugleitung, s. Bild 2, mit Ringelektroden zu messen, die ohne Querschnittsveränderung in den Milchschlauch eingesetzt werden. Durch diese Anordnung wird erreicht, daß die Reinigungsflüssigkeit mit unveränderter Intensität den Meßgeber durchfließen und sicher von Milchresten reinigen kann.

## 2. Aufbau und Funktion des Meßgebers

### 2.1 Aufbau des Meßgebers

Der Ringelektrodengeber, Bild 3, besteht aus einem Isolierstoffkörper, in den 2 Ringelektroden aus rostfreiem Stahl bündig mit der Innenwand eingelassen sind. An die Elektroden ist eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 50 Hz angelegt. Diesem Meßgeber liegt das physikalische Prinzip zugrunde, daß der elektrische Leitwert  $G$  einer Flüssigkeit dem Flüssigkeitsquerschnitt proportional ist. Dies setzt aber eine ausreichend homogene Verteilung der elektrischen Feldlinien voraus, die nur gegeben ist, wenn das Verhältnis zwischen dem Abstand und dem Radius der Ringelektroden genügend groß gehalten wird.

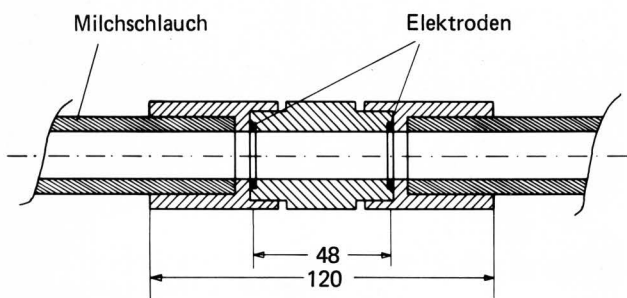


Bild 3. Schnittzeichnung des Ringelektrodengebers 14/48.

### 2.2 Funktionsuntersuchungen bei ruhender Milch

Experimentelle Untersuchungen mit ruhender Milch bestätigen bei dem Geber eindeutig die lineare Beziehung zwischen Leitwert und Füllmenge [4], Bild 4. Dieser gemessene Leitwert kann mit dem Flüssigkeitsquerschnitt in Beziehung gesetzt und der Meßwert entsprechend kalibriert werden. Dabei ist eine Korrektur erforderlich, welcher folgende Überlegungen zugrunde liegen: Den Leitwert der Anordnung denke man sich zusammengesetzt aus dem Leitwert der im Rohr stehenden Flüssigkeit  $G_Q$ , dem Leitwert der benetzenden Flüssigkeit  $G_N$  und einem festen durch die Anordnung vorgegebenen Leitwert  $G_F$ . Sie sind jeweils proportional dem Querschnitt des entsprechenden Flüssigkeitsanteiles bzw. des Leiters:

$$G_N \sim F_N; \quad G_Q \sim F_Q$$

$$G_{ges} = G_Q + G_N + G_F$$

$$\text{also } G_Q = G_{ges} - G_N - G_F$$

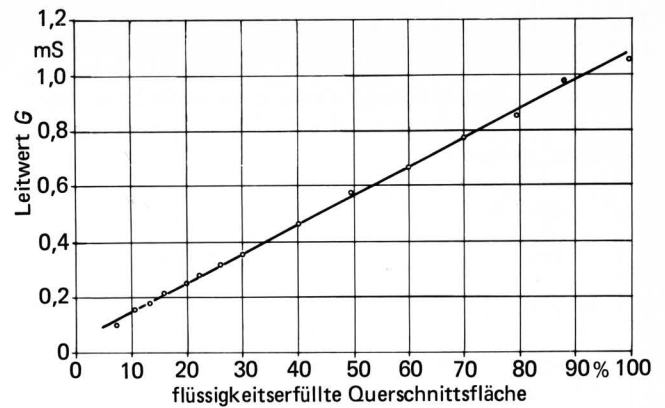


Bild 4. Einfluß der Rohrfüllung auf den Leitwert der Milchsäule im teilgefüllten Rohr. Handelsübliche Frischmilch, 3,5 % Fett.

Der Leitwert soll als ein Maß für den Querschnitt der sich zwischen den Elektroden bewegenden Flüssigkeit verwendet werden. Gemessen wird aber immer  $G_{ges}$ . Prinzipiell sind also die Anteile  $G_N$  und  $G_F$  bei Erstellung einer Eichkurve zu berücksichtigen. Nach Bild 5 gilt:

$$F_Q = \frac{\pi R^2 2\beta}{2\pi} - R^2 \sin \beta \cos \beta$$

$$= R^2(\beta - \sin \beta \cos \beta)$$

$$F_N = (R^2 - R_0^2) \pi \frac{2\pi - 2\beta}{2\pi}$$

$$= (R^2 - R_0^2) (\pi - \beta).$$

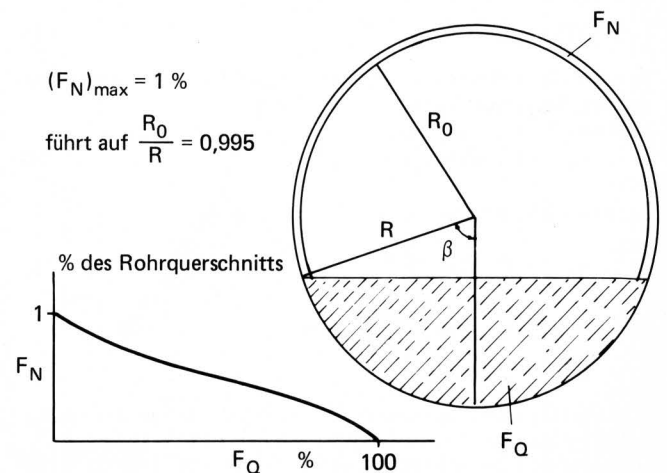
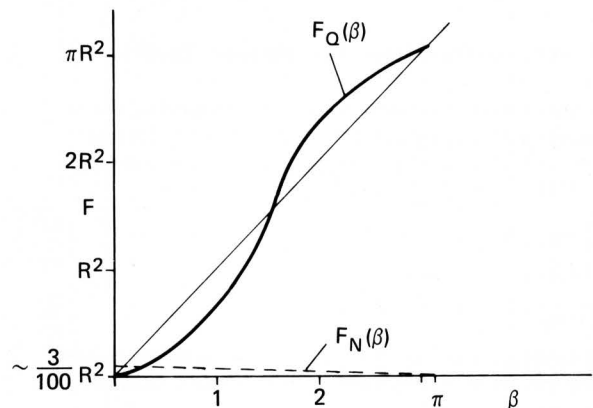
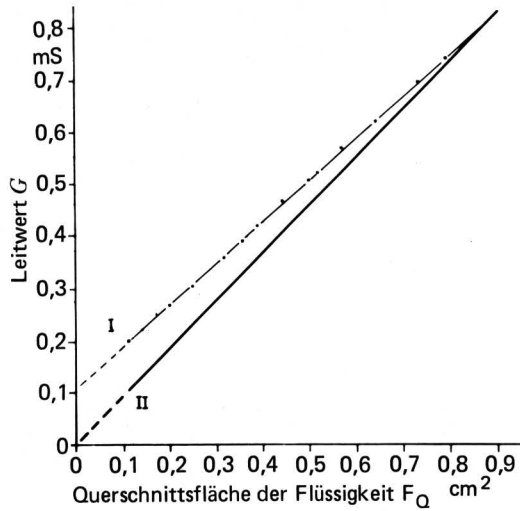


Bild 5. Graphische Darstellung der Beziehung zwischen dem Querschnitt der stehenden Flüssigkeit  $F_Q$  und der leitenden Fläche der benetzenden Flüssigkeit  $F_N$ .

Vernachlässigt man die geringe Nichtlinearität in der Beziehung zwischen dem Querschnitt der stehenden Flüssigkeit  $F_Q$  und der leitenden Fläche aus der Benetzung  $F_N$ , Bild 5 unten, so kann aus den Untersuchungsergebnissen über die Beziehung zwischen Leitwert und Rohrfüllung, Bild 4, die in Bild 6 dargestellte Eichkurve entwickelt werden.



**Bild 6.** Gemessene (I) und korrigierte (II) Beziehung zwischen Leitwert und Flüssigkeitsquerschnitt  $F_Q$  für ein Kreisrohr (Radius = 5,75 mm).

Von den gemessenen Leitwerten kann also auf die Größe der flüssigkeitserfüllten Querschnittsfläche  $F_Q$  geschlossen werden.

Dieses Ergebnis gilt zunächst nur für ruhende Flüssigkeiten.

### 2.3 Funktionsuntersuchungen bei konstantem Durchfluß

Wird nun auch bei fließender Milch davon ausgegangen, daß ein homogenes Feld zwischen den Elektroden existiert, der gesamte Elektrolyt sich gleichförmig bewegt und gleiche Ladungsdichte für positive und negative Ladungsträger besitzt, so gilt:

$$N_{\text{pos}} = N_{\text{neg}} \quad (1)$$

In der Zeiteinheit  $dt$  passieren

$$dN_{\text{pos}} = \Gamma^+ (v(t) + v) F(v) dt \quad (2)$$

positive Ladungsträger den Querschnitt des Flüssigkeitsstromes  $F(v)$ . Ihre aus der Wechselspannung resultierende Geschwindigkeit ist

$$v(t) = v_0^+ \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

Aus den Gleichungen (2) und (3) folgt nach Substitution und Integration, daß während einer Halbperiode  $T/2$

$$N_{\text{pos}} = \Gamma^+ F(v) T \left( \frac{v_0^+}{\pi} + \frac{v}{2} \right) \quad (4)$$

positive Ladungsträger und entsprechend

$$N_{\text{neg}} = \Gamma^- F(v) T \left( \frac{v_0^-}{\pi} + \frac{v}{2} \right) \quad (5)$$

negative Ladungsträger, mithin insgesamt

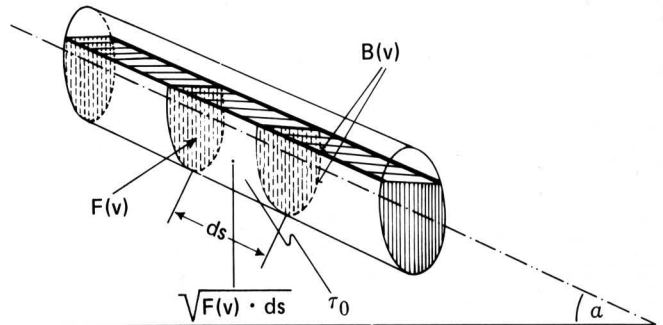
$$N_{\text{ges}} = N_{\text{pos}} + N_{\text{neg}} \quad (6)$$

Ladungsträger, den Querschnitt des Flüssigkeitsstromes  $F(v)$  passieren. Wird nun gleiche Beweglichkeit für beide Trägerarten angenommen, so folgt nach Einsetzen von Gl. (4) und (5) in (6), wenn nach Gl. (1)  $\Gamma^+ = \Gamma^- = \Gamma$ :

$$N_{\text{ges}} = \Gamma F(v) T \left( \frac{v_0^+ + v_0^-}{\pi} \right) \quad (7)$$

Aus Gleichung (7) geht hervor, daß der elektrische Stromfluß zwischen den Elektroden und damit die elektrische Leitfähigkeit unabhängig von der Fließgeschwindigkeit  $v$  des Elektrolyten sind. Die Bestimmung des Querschnittes fließender Milch entspricht also der Bestimmung des Querschnittes stehender Milch.

Es stellt sich nun die Frage, ob der mit Milch gefüllte Querschnitt vom Volumenstrom linear abhängig ist und damit die Möglichkeit besteht, auf einfache Weise über die Messung des elektrischen Leitwertes den Milchfluß zu erfassen. Diese Überlegungen wurden analog zu Strömungen in offenen Gerinnen angestellt [5]. Beide Fälle sind durch strömende Flüssigkeiten bestimmt, deren Querschnitt teils durch eine feste Wand und teils durch eine freie Oberfläche begrenzt wird. Für ein fixiertes Rohr mit einer Neigung  $\alpha$  sind diese Bedingungen einer stationären Strömung in Bild 7 festgehalten.



**Bild 7.** Bedingungen für einen stationären Fluß im teilgefüllten Rohr.

Für das Gleichgewicht der wirkenden Kräfte — Schwere und Reibung — an den eingezeichneten Teilchen gilt:

$$\rho g F(v) ds \sin \alpha - \tau_0 B(v) ds = 0 \quad (8)$$

Nach Truckenbrodt [6] gilt weiter

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \rho \frac{v^2}{c} \quad (9)$$

Aus den Formeln (8), (9) und mit

$$d_h = \frac{4 F(v)}{B(v)} \quad (10)$$

ergibt sich die mittlere Geschwindigkeit:

$$v = \sqrt{c} \sqrt{2 g d_h \sin \alpha} \quad (11)$$

Die Einflüsse der Wandreibung, Reibung innerhalb der Flüssigkeit werden durch die Größe  $c$  beschrieben. Im allgemeinen gilt:

$$c = c(\text{Re}, H) \quad (12)$$

wobei  $H$  die Wandrauhigkeit ist.

Hierfür liegen empirisch gefundene Formeln und Meßkurven vor [5]. Bei turbulenter Strömung, hydraulisch glatter Rohrwandung ergibt sich das universelle Widerstandsgesetz von Prandtl:

$$\sqrt{c} = 2,0 \log \left( \frac{\text{Re}}{\sqrt{c}} \right) - 0,8 \quad (13)$$

Suspensionen biologischen Ursprungs wie Milch lassen sich generell in die Gruppe der thixotropen Fluide einordnen, deren interne Schubspannung bei Fließvorgängen durch die Beziehung:

$$\tau = \mu \left( \frac{\delta v}{\delta n} \right)^\sigma ; 0 < \sigma < 1 \quad (14)$$

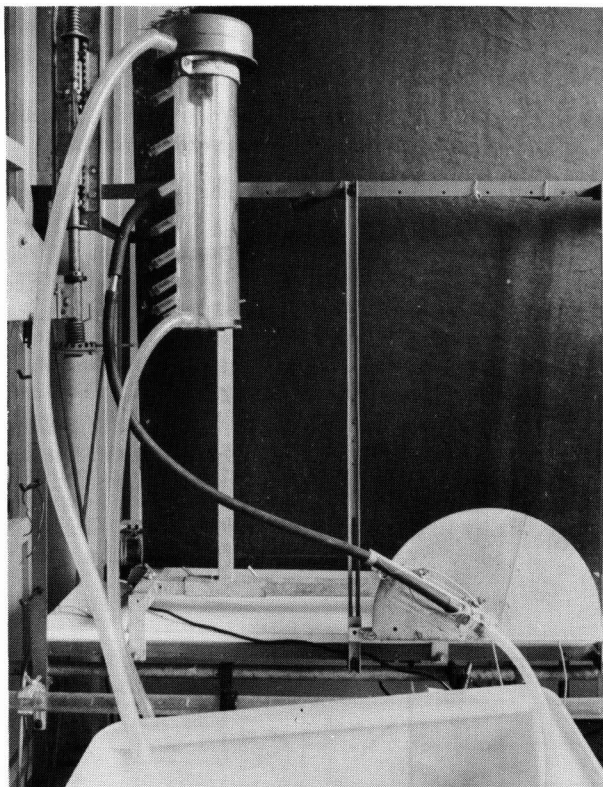
definiert sind [7, 8]. Es wird angenommen, daß die Milch sich beim Gravitationsfluß im teilgefüllten Rohr etwa wie eine Newtonsche Flüssigkeit verhält. In diesem Falle strebt  $\sigma \rightarrow 1$  und zur Beschreibung der Strömung kann die Reynoldszahl

$$Re = \frac{v \cdot d_h}{\nu} \quad (15)$$

herangezogen werden, in der die kinematische Zähigkeit mit  $\nu = 0,0221 \text{ cm}^2/\text{s}$  eingesetzt wird [8].

Bei bekannten Werten von Rohrdurchmesser, Neigung und kinematischer Zähigkeit  $\nu$  der Flüssigkeit läßt sich die Fließgeschwindigkeit  $v$  mit den Formeln (15), (13), (11) und (10) numerisch berechnen.

Mit einer Versuchsanordnung, in der ein definierter Volumenstrom für eine längere Versuchsperiode erzeugt werden kann, Bild 8, wurde diese theoretische Analyse überprüft.



**Bild 8.** Versuchsanordnung zur experimentellen Bestimmung des elektrischen Leitwertes fließender Milch.

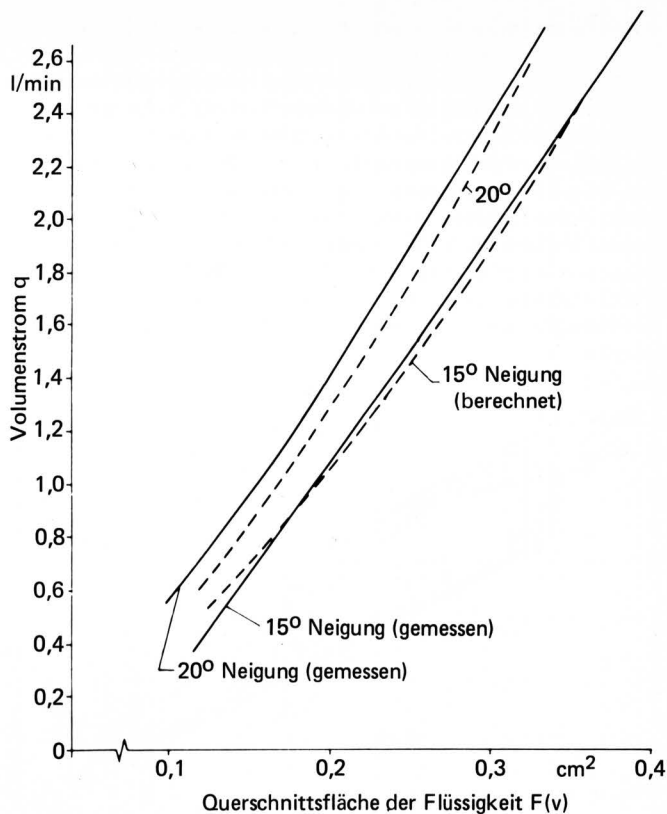
Die so ermittelten empirischen Beziehungen zwischen Volumenstrom  $q$  und Flüssigkeitsquerschnitt  $F(v)$  werden in Bild 9 den errechneten Werten gegenübergestellt.

Die befriedigende Übereinstimmung der theoretisch errechneten Werte mit den empirisch ermittelten Werten ermöglicht es, die weiteren Untersuchungen an Rechenmodellen mit Hilfe von numerischen Methoden durchzuführen.

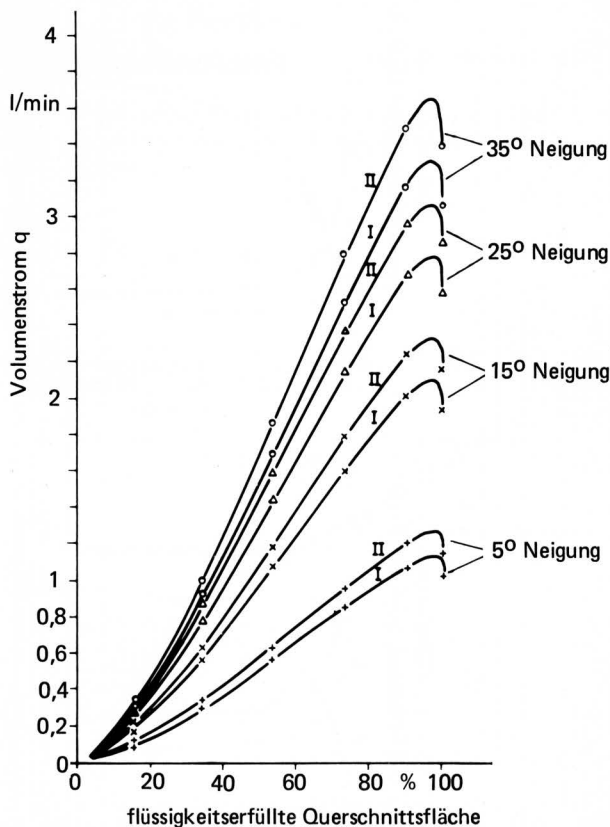
Die dabei erzielten Ergebnisse sind in Bild 10 am Beispiel eines Rohres mit 16 mm Durchmesser aufgezeigt.

Die Beziehung zwischen dem Volumenstrom  $q$  und dem mit den Ringelektroden zu bestimmenden Querschnitt der Flüssigkeit  $F(v)$  ist im Bereich zwischen 30 % und 90 % Rohrfüllung weitgehend linear, wobei der Verlauf der Kurven allerdings stark vom Neigungswinkel des Rohres abhängig ist.

Somit ist es möglich, bei zweckmäßiger Dimensionierung des Meßrohres einen konstanten Volumenstrom über den Querschnitt der Flüssigkeit  $F(v)$  zu bestimmen. Da der Querschnitt der Flüssigkeit annähernd durch den elektrischen Leitwert, gemessen mit den Ringelektroden, bestimmt werden kann, ist der untersuchte Geber für das Messen bei stationären Strömungen geeignet.



**Bild 9.** Berechnete und gemessene Beziehung zwischen Volumenstrom  $q$  und Querschnittsfläche der Flüssigkeit  $F(v)$ .

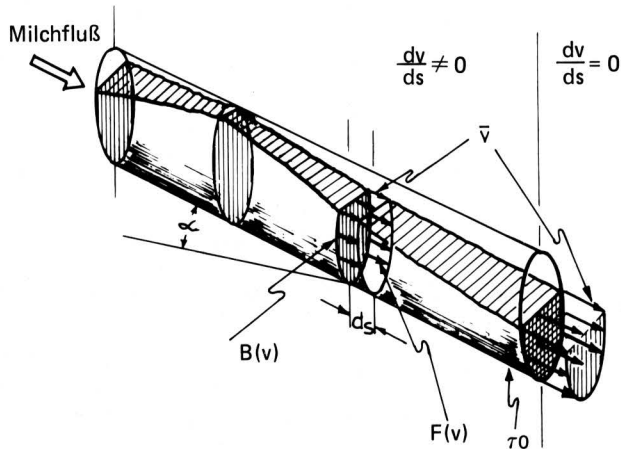


**Bild 10.** Beziehungen zwischen dem Volumenstrom  $q$  und der flüssigkeitserfüllten Querschnittsfläche eines Rohres ( $D = 16 \text{ mm}$ ) für unterschiedliche Neigungswinkel.

I  $\nu = 2,9 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$   
 II  $\nu = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$

## 2.4 Funktionsuntersuchungen bei pulsierender Strömung

Bei Melkanlagen muß allerdings mit pulsierenden, ungleichmäßigen Strömungen gerechnet werden. Hier wird der Milchentzug über Pulsatoren so gesteuert, daß bei einem Vakuum von etwa 0,5 bar die Euterviertel in alternierender und absätziger Weise entleert werden. In gerade ausgerichteten Abschnitten einer solchen Leitung lassen sich bei genügend großem Neigungswinkel während der gesamten Melkperiode die Fließbedingungen des offenen Gerinnes herstellen, deren nichtstationärer Abfluß in **Bild 11** dargestellt ist. Dabei muß allerdings unterstellt werden, daß die Beschleunigung des Flüssigkeitselementes ausschließlich durch Schwerkraft hervorgerufen wird.



**Bild 11.** Modell der nichtstationären Strömung in einer teilgefüllten Rohrleitung.

Eine Summierung der auf das Element einwirkenden Schwer-, Reibungs- und Beschleunigungskräfte ergibt unter diesen Bedingungen:

$$\rho g F(v) ds \sin \alpha - \tau_0 B(v) ds - \rho F(v) ds \frac{dv}{dt} = 0 \quad (16)$$

Mit Gl. (10) läßt sich Gleichung (16) in

$$\frac{dv}{dt} = g \left( \sin \alpha - \frac{4\tau_0}{\rho g d_h} \right) \quad (17)$$

umformen. Mit  $\frac{ds}{dt} = v$  wird

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\delta v}{\delta s} v + \frac{\delta v}{\delta t} \quad (18)$$

so daß nach Einsetzen von Gl. (18) in Gl. (17) der Milchfluß in der teilgefüllten Rohrleitung mit

$$v \frac{\delta v}{\delta s} + \frac{\delta v}{\delta t} = g \left( \sin \alpha - \frac{4\tau_0}{d_h \rho g} \right) \quad (19)$$

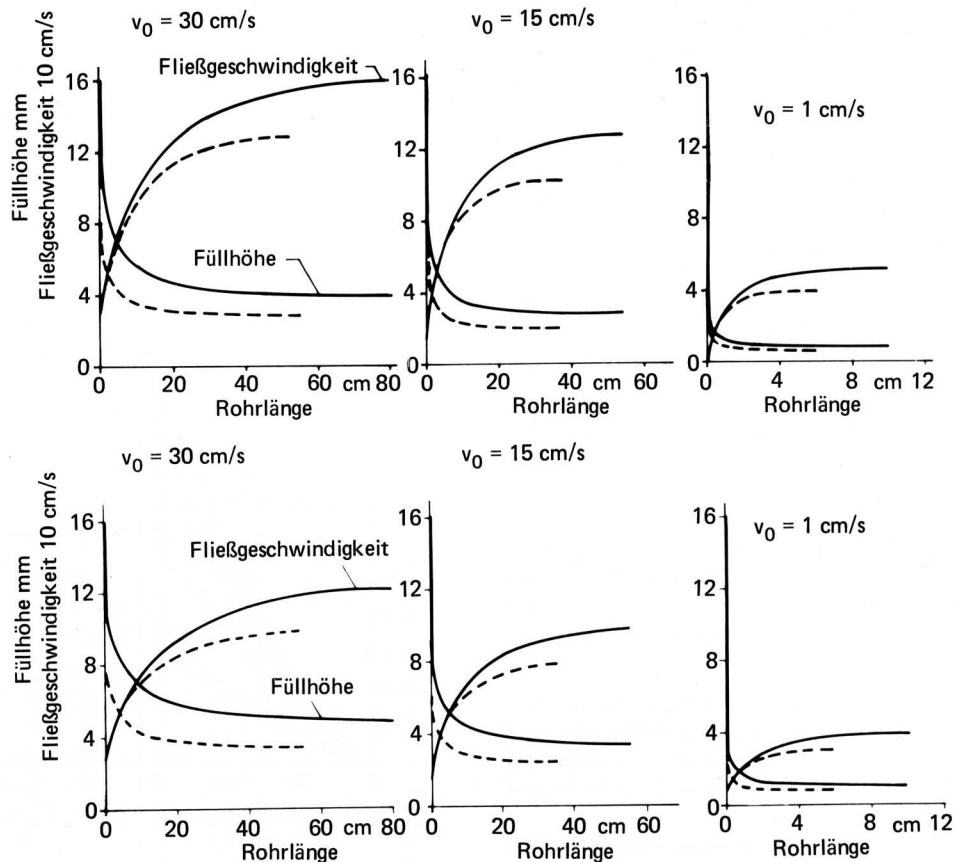
angegeben werden kann. Die Gln. (9), (13) und (15) sind hier ebenfalls gültig. Dazu gilt noch bei nichtstationären Fließvorgängen

$$dq = d(v \cdot F(v)) = v \left( \frac{\delta F(v)}{\delta s} \cdot ds + \frac{\delta F(v)}{\delta t} \cdot dt \right) \quad (20)$$

Damit ist es möglich, Gl. (19) numerisch nach  $v$  zu lösen. Und mit bekannter Fließgeschwindigkeit  $v$  kann wiederum in Gl. (20) der Flüssigkeitsquerschnitt  $F(v)$  gefunden werden.

Für die Berechnungen wurden als Grenzbedingungen Einlaufgeschwindigkeiten von  $v = 1,0$  cm/s,  $v = 15$  cm/s und  $v = 30$  cm/s jeweils bei voller oder halber Rohrfüllung gewählt.

Die Simulationsergebnisse des Milchflusses sind für die genannten Grenzbedingungen in **Bild 12** für gerade ausgerichtete Milchschläuche mit einem Neigungswinkel von  $15^\circ$  bzw.  $30^\circ$  dargestellt.



**Bild 12.** Simulationsergebnisse für den Milchfluß in geneigten, teilgefüllten Rohrleitungen bei unterschiedlicher Eintrittsgeschwindigkeit  $v_0$ .

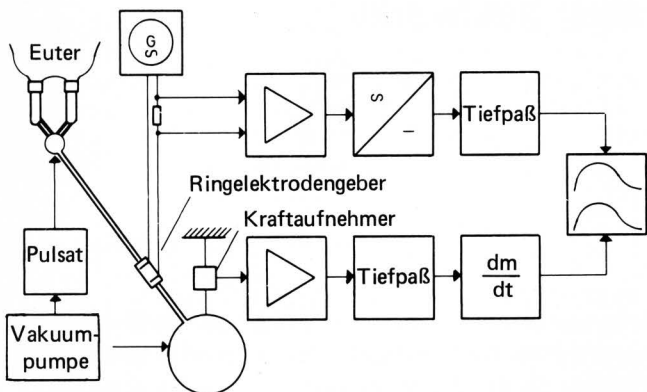
oben: Neigungswinkel  $30^\circ$ ,  $\nu = 0,021$  cm<sup>2</sup>/s  
 unten: Neigungswinkel  $15^\circ$ ,  $\nu = 0,021$  cm<sup>2</sup>/s  
 — bei Beginn Rohrquerschnitt voll gefüllt  
 - - - bei Beginn Rohrquerschnitt halb gefüllt

Bei einem Milchentzug von ca. 1,6 kg/min, der etwa der Milchabgabe einer Durchschnittskuh entspricht, erreicht der Milchstrom zum Beispiel bei einem Neigungswinkel von 30° nach ca. 60 cm eine konstante Endgeschwindigkeit von 125 cm/s und konstanten Querschnitt. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Kombination der Anfangswerte  $v_0 = 15$  cm/s bei Ausfüllen des vollen Rohrquerschnitts oder  $v_0 = 30$  cm/s bei Füllen des halben Querschnittes beträgt. Steigt der Milchentzug auf 3,6 kg/min an, wird nach einer Strecke von etwa 80 cm eine nahezu konstante Endgeschwindigkeit von ca. 113 cm/s bei einem Querschnitt von 0,53 cm<sup>2</sup> erreicht.

Die Ergebnisse zeigen, daß in einem gerade ausgerichteten Milchslauch nach einer Anlaufstrecke von wenigstens 80 cm bei Neigungswinkeln zwischen 15° und 45° unter normalen Melkbedingungen eine Stabilisierung des Milchflusses eintritt. Wird der Leitungsdurchmesser so groß gehalten, daß Beschleunigungen als Folge von Druckunterschieden in dieser Anlaufstrecke verhindert werden, so kann der Milchfluß auch bei ungleichmäßigen Strömungen am Ende der Strecke zuverlässig mit Ringelektroden gemessen werden.

### 3. Überprüfung des Gebers im praktischen Melkversuch

Zur Überprüfung dieser Überlegungen wurde ein Ringelektrodengeber in einem Melkstand eingesetzt, in dem die Milchabgabe der Kuh simuliert werden kann. Der Geber saß am Ende einer 80 cm langen, 30° geneigten Milchleitung. Die Elektroden hatten eine Nennweite von 14 mm und einen Abstand von 48 mm. Ge speist wurde die Elektrodenstrecke mit einer konstanten Wechselspannung von  $U_{\text{eff}} = 9,65$  V. Der Leitwert des pulsierenden Milchstroms zwischen den Elektroden wurde über den Strom  $I_{\text{eff}}$  gemessen und in einem Mittelwertgleichrichter in ein Gleichspannungssignal überführt. Nach einer Glättung mit einem RC-Tiefpaß mit einer Zeitkonstante von 5 s wurde das Signal auf einem Linienschreiber aufgezeichnet, **Bild 13**.

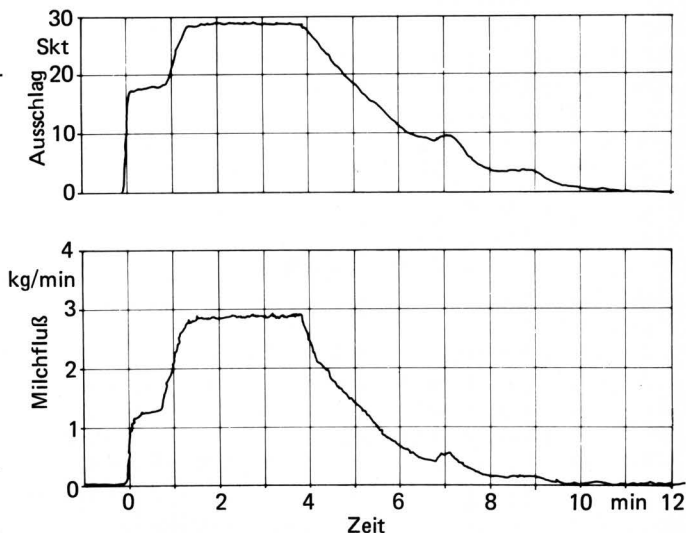


**Bild 13.** Schema der Anlage zur Simulation und Messung des Milchflusses.

Zu Vergleichszwecken wurde die Milch in einem Sammelbehälter aufgefangen, dessen Gewicht von einem Kraftaufnehmer in ein elektrisches Signal umgeformt wurde. Nach Verstärkung und Glättung wurde das Differential  $dm/dt$  errechnet und dieses genaue Milchflußsignal ebenfalls auf dem Schreiber registriert. Damit können die beiden auf verschiedene Weise gewonnenen Meßwerte miteinander verglichen werden, **Bild 14**.

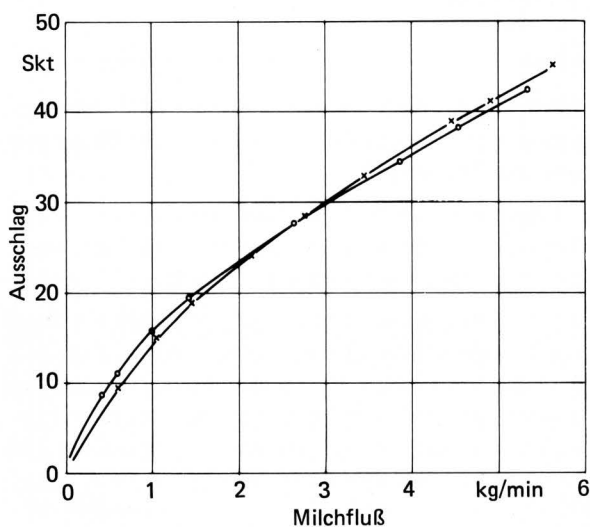
Die erhaltenen Kurven zeigen eine gute Übereinstimmung. Trägt man die mit dem Ringelektrodengeber erhaltenen Werte über den mit dem Sammelgefäß ermittelten Vergleichswerten auf, dann ist der nichtlineare Zusammenhang zu erkennen, **Bild 15**.

Diese Darstellung zeigt auch, daß die Meßunsicherheit der Meßwerte recht klein ist (im Beispiel < 5 %) und somit ein elektrisches Signal zur Verfügung steht, das als Führungsgröße für die Stellglieder einer gesteuerten Melkanlage dienen kann. Wenn die technischen Einflußfaktoren konstant gehalten werden können, dann wird die Genauigkeit dieser Milchflußmessung im wesentlichen nur von den Schwankungen der Viskosität und des spezifischen Widerstands der Milch beeinträchtigt. Diese Einflüsse und das Zeitstandverhalten des Gebers sind weiteren Untersuchungen vorbehalten.



**Bild 14.** Milchflußkurven aus dem Melkversuch mit zwei Meßverfahren.

oben: Milchfluß, gemessen mit dem Ringelektrodengeber  
unten: Milchfluß, gemessen mit Sammelgefäß und Kraftaufnehmer



**Bild 15.** Kennlinien des Ringelektrodengebers 14/48 bei 30° Neigung, gemessen mit Kochsalzlösung ( $\sigma = 37 \mu S/m$ ) bei konstantem (x) und pulsierendem Durchfluß (o).

## Verwendete Formelzeichen

$\alpha$	Neigungswinkel der geraden Rohrleitung
$\beta$	Winkel
$\Gamma$	Ladungsdichte
$\mu$	dynamische Zähigkeit
$\rho$	Dichte der Flüssigkeit
$\sigma$	Leitfähigkeit der Flüssigkeit
$\tau$	interne Schubspannung der Flüssigkeit
$\tau_0$	Schubspannung der Flüssigkeit an der Leitungswand
$B(v)$	benetzter Umfang des Rohrquerschnittes
$c$	Reibungsbeiwert (Geschwindigkeitsbeiwert)
$d_h$	hydraulischer Durchmesser
$F_N$	Querschnitt der benetzenden Flüssigkeit
$F_Q$	Flüssigkeitsquerschnitt
$F(v)$	Querschnitt des Flüssigkeitsstromes
$f$	Frequenz
$g$	Schwerebeschleunigung
$G_F$	Leitwert der Versuchsanordnung
$G_N$	Leitwert der benetzenden Flüssigkeit
$G_Q$	Leitwert der stehenden Flüssigkeit
$n$	Normale zur Fließrichtung
$N_{\text{pos}}$	Anzahl positiver bzw. negativer Ladungsträger
$N_{\text{neg}}$	
$q$	Volumenstrom pro Zeiteinheit
$r$	halbe lichte Weite der Rohrleitung
$Re$	Reynoldszahl
$s$	Länge der Rohrleitung
$t$	Zeit
$T$	Periode
$v$	Durchschnittliche Fließgeschwindigkeit
$v_0^+, v_0^-$	Anfangsgeschwindigkeit der Ladungsträger
$v(t)$	Geschwindigkeit der Ladungsträger

## Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] *Reuschenbach, H.*: Entwicklung milchflußgesteuerter Melkanlagen mit pneumatischen Systemen. Bericht über die Jahrestagung der Landtechnik Weihenstephan, Landtechnik Weihenstephan (1974) H. 8, S. 4/11.
- [ 2 ] *Schön, H. u. C.L. Pen*: Arbeitswirtschaftliche Verbesserungen bei Melkarbeiten. Landtechnik Bd. 24 (1969) H. 9, S. 289/94.
- [ 3 ] *Pen, C.L.*: Untersuchungen zur Steigerung der Arbeitsleistung beim Melken in Gruppenständen, insbesondere durch Verbesserung der Arbeitsorganisation und Automatisierung einiger Arbeitsverrichtungen. Diss. Gießen 1971.
- [ 4 ] *Pen, C.L., H. Schön u. H. Stanzel*: Erarbeitung von Grundlagen zur optimalen Gestaltung des maschinellen Milchentzuges durch programmgesteuerte Melkmaschinen. Unveröffentl. Arbeitsbericht über das DFG-Forschungsvorhaben We 519/3, Weihenstephan 1974.
- [ 5 ] • *Reinius, F.*: Steady uniform flow in open channels. Trans. Roy. Inst. Techn., Stockholm 1961.
- [ 6 ] • *Truckenbrodt, E.*: Strömungsmechanik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 1968.
- [ 7 ] *Charm, S.E.*: The Fundamentals of Food Engineering. z. Ed. AVF Publishing Co. Inc., Westport Conn. 1971.
- [ 8 ] • *Earle, R.L.*: Unit Operations in Food Processing. London, New York, Paris: Pergamon Press 1966.
- [ 9 ] *Stanzel, H. u. C.L. Pen*: Zur Entwicklung milchflußgesteuerter Melkanlagen mit elektronischer Steuerung. Bericht über die Jahrestagung der Landtechnik Weihenstephan, Landtechnik Weihenstephan (1974) H. 8, S. 12/19.

# Neuere Grundlagen der Mechanik körniger Haufwerke

Von Otto-Horst Hoffmann, Braunschweig\*)

DK 624.131:539.215.9

Die Mechanik körniger Haufwerke findet eine vielseitige Anwendung, z.B. in der Bodenmechanik, der Bodenbearbeitung und Silotechnik.

Grundlage der klassischen Haufwerksmechanik ist u.a. die Mohr-Coulombsche Bruchhypothese, die hier neueren Erkenntnissen gegenübergestellt wird:

Der Winkel der inneren Reibung ist nach Mohr-Coulomb konstant. Nach neueren Erkenntnissen muß jedoch zwischen einem konstanten Winkel des stationären Fließens und einem veränderlichen Winkel des beginnenden Fließens unterschieden werden, der von der Porenziffer und der Normalspannung abhängig ist.

Entgegen Mohr-Coulomb tritt Bruch bzw. Gleiten in einem Haufwerk in der Regel nicht in Schnittebenen auf, in denen die Bruchspannungen herrschen. Die Lage der Gleitebenen zu den Bruchspannungsebenen ist über den sogenannten Winkel der Dilatation bestimmbar.

Die Anwendung und Bedeutung der neueren Erkenntnisse wird an Beispielen gezeigt.

## 1. Einleitung

Die Mechanik körniger Haufwerke hat ihren Ursprung in der Bodenmechanik. Die hier gewonnenen theoretischen Auffassungen und experimentellen Methoden, die sich mit dem mechanischen Verhalten von Erdmassen beschäftigen, wurden in den letzten Jahrzehnten zunehmend auf eine Vielzahl anderer Güter und Anwendungsbereiche übertragen, wie z.B. auf die Verfahrenstechnik und die Fördertechnik, im Bereich der Landtechnik z.B. auf die landwirtschaftliche Bodenbearbeitung, die Probleme zwischen Schlepperrädern und Boden und die Silotechnik.

\*) Dipl.-Ing. Otto-Horst Hoffmann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthies) der Technischen Universität Braunschweig.