

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Genauigkeit von Zellenraddosierungen für Kraftfuttermittel

Von Bernd J. Scholtysik, München*)

DK 636.084:621.86.08

Bei den in der Rinderhaltung für eine mechanisierte Kraftfutterzuteilung eingesetzten Geräten werden oft Zellenräder als Dosierorgane verwendet. Im vorliegenden Beitrag werden theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Genauigkeit dieser Geräte beschrieben.

1. Einleitung

Die Zuteilung von Kraftfutter in der Milchviehhaltung soll aus ernährungsphysiologischen, ökonomischen und arbeitswirtschaftlichen Gründen leistungsbezogen, in mehreren Rationen über den Tag verteilt erfolgen [1]. Für diese Aufgabe sind geeignete, möglichst automatisierte Dosiereinrichtungen notwendig. Trotz prinzipieller Nachteile werden aus Kostengründen in der landwirtschaftlichen Praxis bisher nicht Massen-, sondern Volumendosierer verwendet. Neben den bereits früher untersuchten Schneckendosierern [2] werden vor allem Zellenraddosierer eingesetzt, z.B. bei Kraftfutterautomaten im Melkstand. Da diese Geräte z.T. hinsichtlich der angestrebten Genauigkeit nicht befriedigend sind, wurden theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die für die Genauigkeit wesentlichen Einflußgrößen zu ermitteln.

2. Theoretische Untersuchung des Zuteilfehlers

Aus der Sicht der Tierernährung wird für den Zuteilfehler, mit dem die gewünschten Rationen an die Tiere abgegeben werden, oft ein Wert von maximal 5 % gefordert [3]. Der auftretende Zuteilfehler entsteht als Überlagerung des Einstell- und des Dosierfehlers.

2.1 Einstellfehler

Der Einstellfehler beschreibt, wie genau eine gewünschte, zu dosierende Sollmasse m_{Soll} am Dosierer eingestellt werden kann. Beim Zellenraddosierer erfolgt die Dosierung mit ganzzahligen Vielfachen einer Grundmenge Δm , das ist die pro Zelle ausgeworfene Masse. Wenn die gewünschte Sollmasse mit einer der möglichen Dosiermassen übereinstimmt, kann der Zellenraddosierer so eingestellt werden, daß kein Einstellfehler auftritt. Alle anderen Sollmassen können dagegen nicht genau dosiert werden. Die hierbei auftretenden Verhältnisse werden in Bild 1 verdeutlicht.

Die Dosierung erfolgt in diesem Fall am günstigsten mit dem bezüglich der Sollmasse nächstgelegenen Vielfachen Z der Grundmenge. Die zu verwendende Dosiermasse $Z \cdot \Delta m$ liegt dabei im Bereich $m_{\text{Soll}} \pm \Delta m/2$. Das einzustellende Vielfache der Grundmenge, d.h. die zu dosierende Zellenanzahl, berechnet sich nach der Funktion:

$$Z = \text{int} \left(\frac{m_{\text{Soll}}}{\Delta m} + \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

Der Operator "int(. . .)" bedeutet, daß der ganzzahlige Anteil des Klammerausdrucks zu nehmen ist. Der bei dieser Einstellung des Zellenraddosierers auftretende Einstellfehler

$$f_E = Z \cdot \Delta m - m_{\text{Soll}} \quad (2)$$

hat eine Größe zwischen Null und $\Delta m/2$. Der relative, auf die Sollmasse bezogene Einstellfehler beträgt:

$$f_{E,\text{rel}} = Z \cdot \frac{\Delta m}{m_{\text{Soll}}} - 1 \quad (3)$$

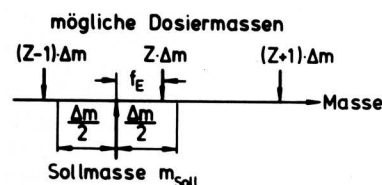


Bild 1. Einstellfehler f_E bei Dosierung einer Sollmasse m_{Soll} mit Vielfachen einer Grundmenge Δm .

*) Dipl.-Ing. B.J. Scholtysik ist wiss. Assistent am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Söhne) der Technischen Universität München.

Bild 2 zeigt den Betrag des nach Gl. (3) berechneten relativen Einstellfehlers in Abhängigkeit vom Verhältnis aus der dosierten Masseneinheit Δm und der Sollmasse m_{Soll} . Der Tendenz nach wird der Einstellfehler um so geringer, je kleiner der Zelleninhalt Δm ist. Eine zu starke Verkleinerung des Zellenvolumens ist jedoch nicht sinnvoll, weil sich dann Schwierigkeiten mit Kraftfuttermitteln größerer Struktur ergeben können (z.B. Einklemmen von Pellets und dadurch unvollständiges Entleeren der Zellen). Wenn das Zellenvolumen in gewissen Grenzen veränderbar ist (z.B. durch eine Breitenverstellung des Zellenrades), läßt sich der Einstellfehler vermeiden, weil dann der Zelleninhalt als ganzzahliger Teil der Sollmasse eingestellt werden kann.

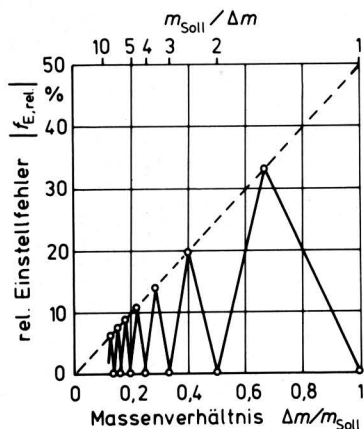


Bild 2. Betrag des relativen Einstellfehlers in Abhängigkeit vom Massenverhältnis $\Delta m/m_{\text{Soll}}$.

2.2 Dosierfehler

Der Dosierfehler beschreibt, wie genau bei konstanter Einstellung des Dosierers die einzelnen Futterrationen dosiert werden. Ungenauigkeiten können hierbei sowohl durch Veränderungen des Mittelwertes der dosierten Massen als auch durch Schwankungen der einzelnen dosierten Massen um den jeweiligen Mittelwert auftreten.

Veränderungen des Mittelwertes der dosierten Massen können durch unterschiedliche Stoffeigenschaften (z.B. Schüttdichte, Struktur, Feuchtegrad) entstehen. Der Einfluß dieser Stoffeigenschaften kann durch eine Kalibrierung des Dosierers ausgeglichen werden. Diese Kalibrierung wird jedoch in der Praxis meist nicht häufig genug durchgeführt, so daß die unerwünschten Einflüsse der Stoffeigenschaften gewöhnlich doch vorhanden sind. Der Mittelwert der dosierten Massen kann sich auch bei geänderten Betriebsbedingungen der Dosiereinrichtung ändern, z.B. bei belastungsbedingten Drehzahlschwankungen des Zellenrades.

Die Schwankungen der einzelnen dosierten Massen um den Mittelwert lassen sich anschaulich mit Hilfe von Häufigkeitsverteilungen darstellen. Zur Kennzeichnung der Schwankungen kann die Standardabweichung verwendet werden, die für die unterschiedlichen Formen von Normalverteilungen den Bereich um den Mittelwert angibt, in dem etwa zwei Drittel (68,3 %) der dosierten Massen auftreten. Hier wird der Dosierfehler durch den Variationskoeffizienten s_r der dosierten Massen beschrieben, der als Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert definiert ist. Mittelwert \bar{m}_D und Standardabweichung s werden aus n unter gleichen Bedingungen dosierten Massen m_i berechnet:

$$\bar{m}_D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (4)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m}_D)^2} \quad (5)$$

$$s_r = \frac{s}{\bar{m}_D} \quad (6)$$

Bei Zellenraddosierern können die Schwankungen der dosierten Massen dadurch entstehen, daß bei konstanter Geräteeinstellung ein Zelleninhalt mehr oder weniger ausgeworfen wird. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn bei einer kontinuierlichen Drehung des Zellenrades die Dosierung in einer vorgegebenen Dosierzeit t_D erfolgt. Bei konstanter Drehgeschwindigkeit wird das Zellenrad während der Dosierzeit um den "Dosier"-Winkel β_D gedreht. Je nach der Winkelstellung des Zellenrades am Anfang des Dosiervorgangs werden bei der Drehung um den Winkel β_D zwei unterschiedliche Zellenanzahlen ausgeworfen. In **Bild 3** ist ein Beispiel dargestellt – links werden bei der Drehung um $\beta_D = 160^\circ$ 4 Zellen, rechts bei gleichem β_D nur 3 Zellen ausgeworfen.

Die Winkelstellung des Zellenrades am Anfang des Dosiervorgangs kann durch den Winkel β_0 beschrieben werden. β_0 ist der Winkel, um den das Zellenrad gedreht werden muß, damit der "nächste" Zellensteg die Auswurföffnung erreicht und so der "nächste" Zelleninhalt ausgeworfen wird. Für β_0 ist also der Bereich $0 < \beta_0 < \beta_Z$ möglich. Die Anzahl der dosierten (d.h. ausgeworfenen) Zellen Z_D beträgt:

$$Z_D = \text{int} \left(\frac{\beta_D - \beta_0}{\beta_Z} \right) + 1 \quad (7)$$

Für verschiedene Werte von β_0 können nach Gl. (7) zwei benachbarte Zellenanzahlen auftreten, und zwar:

$$Z_{D1} = \text{int} \left(\frac{\beta_D}{\beta_Z} \right) \quad (8)$$

$$Z_{D2} = \text{int} \left(\frac{\beta_D}{\beta_Z} \right) + 1 \quad (9)$$

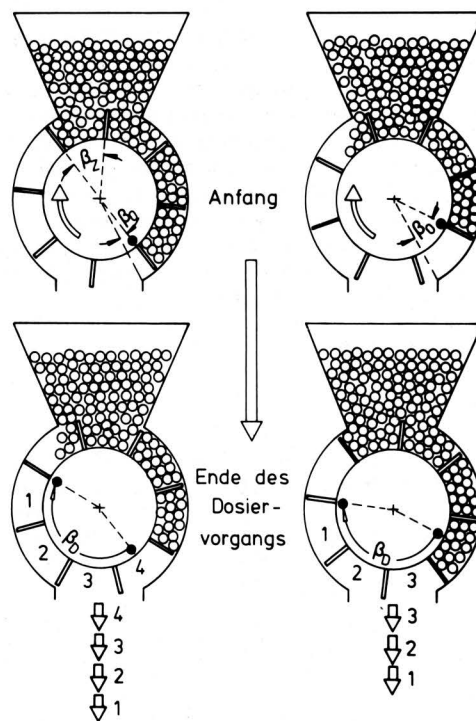


Bild 3. Beispiel für unterschiedliche ausgeworfene Zellenanzahlen bei gleichem Dosierwinkel β_D .

Wenn β_D ein ganzzahliges Vielfaches von β_Z ist, wird stets die Zellenanzahl Z_{D1} ausgeworfen. Allgemein treten die beiden möglichen Zellenanzahlen Z_{D1} und Z_{D2} je nach dem Winkelverhältnis β_D/β_Z verschieden häufig auf. Diese Häufigkeiten wurden folgendermaßen ermittelt: Es wird der Fall betrachtet, daß ausgehend von einer Anfangsstellung des Zellenrades die Dosierung nacheinander mit dem Winkel β_D erfolgt. Dabei ergibt sich nach Bild 4 die $(i + 1)$ te Winkelstellung $\beta_0(i + 1)$ aus der i -ten Winkelstellung $\beta_0(i)$:

$$\beta_0(i + 1) = \beta_Z - \beta_D + \beta_0(i) + \left[\text{int} \left(\frac{\beta_D - \beta_0(i)}{\beta_Z} \right) \right] \beta_Z \quad (10).$$

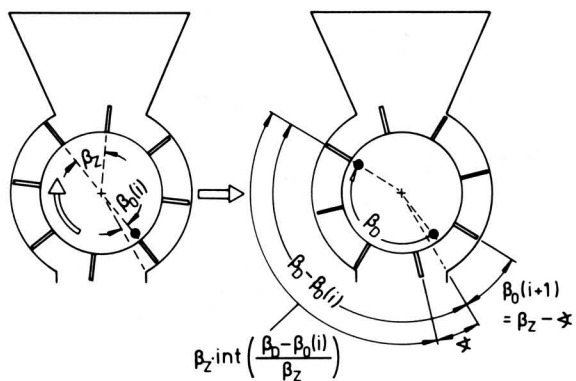


Bild 4. Zur Ermittlung der $(i+1)$ ten Winkelstellung des Zellenrades aus der i -ten Winkelstellung.

Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis sich wieder der ursprüngliche Anfangszustand ergibt. Für die nacheinander auftretenden Stellungen des Zellenrades kann jeweils nach Gl. (7) die ausgeworfene Zellenanzahl bestimmt werden, wobei jeweils Z_{D1} oder Z_{D2} auftreten. Aus den nacheinander auftretenden Zellenanzahlen kann einfach die relative Häufigkeit von Z_{D1} bzw. Z_{D2} ermittelt werden. Es zeigte sich, daß bei einer Veränderung der Anfangsstellung des Zellenrades die Zellenanzahlen Z_{D1} und Z_{D2} zwar in einer anderen Reihenfolge auftreten, die relativen Häufigkeiten bleiben aber unverändert. In Bild 5 sind die so berechneten, relativen Häufigkeiten $h(Z_{D1})$ und $h(Z_{D2})$ in Abhängigkeit vom Winkelverhältnis β_D/β_Z dargestellt. Nach Bild 5 betragen die relativen Häufigkeiten der Zellenanzahlen Z_{D1} und Z_{D2} :

$$h(Z_{D1}) = 1 - \frac{\beta_D}{\beta_Z} + \text{int} \left(\frac{\beta_D}{\beta_Z} \right) \quad (11)$$

$$h(Z_{D2}) = 1 - h(Z_{D1}) = \frac{\beta_D}{\beta_Z} - \text{int} \left(\frac{\beta_D}{\beta_Z} \right) \quad (12).$$

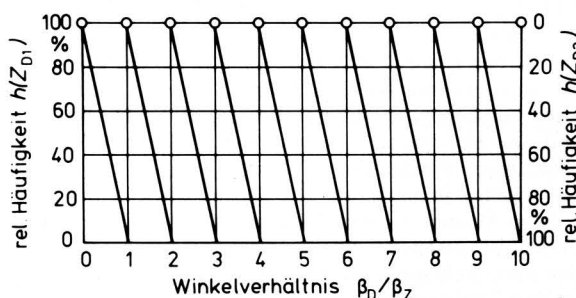


Bild 5. Relative Häufigkeit der Zellenanzahl Z_{D1} bzw. Z_{D2} in Abhängigkeit vom Winkelverhältnis β_D/β_Z .

In dem hier theoretisch untersuchten Fall ist die dosierte Masse proportional zur Anzahl der geförderten Zellen. Daher braucht zur Ermittlung der Dosiergenauigkeit nur der Variationskoeffizient der ausgeworfenen Zellenanzahlen Z_{D1} und Z_{D2} berechnet zu werden. Dazu werden in Abhängigkeit von β_D/β_Z die ausgeworfenen Zellenanzahlen nach Gl. (7) und die zugehörigen relativen Häufigkeiten nach den Gln. (11) und (12) ermittelt. Bild 6 zeigt den berechneten Variationskoeffizienten in Abhängigkeit vom Winkelverhältnis β_D/β_Z . Für ganzzahlige Werte von β_D/β_Z wird der Variationskoeffizient gleich Null, weil immer die gleiche Anzahl von Zellen ausgeworfen wird. Etwa in der Mitte zwischen zwei benachbarten Nullstellen liegt jeweils ein lokales Maximum des Variationskoeffizienten, weil dann die beiden Zellenanzahlen Z_{D1} und Z_{D2} etwa gleich oft auftreten (vgl. Bild 5). Für wachsende Winkelverhältnisse β_D/β_Z hat der Variationskoeffizient eine abnehmende Tendenz, weil die vorhandene Schwankung der Zellenanzahl auf eine immer größere mittlere Zellenanzahl bezogen wird. Dies bedeutet, daß die Dosiergenauigkeit mit wachsender dosierter Masse besser wird.

Diese theoretische Berechnung für den Variationskoeffizienten bei Zellenraddosierern, die mit einer vorgegebenen Dosierzeit (bzw. Dosierwinkel) arbeiten, berücksichtigt die durch eine ungleichmäßige Zellenfüllung hervorgerufenen Dosierfehler nicht. Die ungleichmäßige Zellenfüllung spielt jedoch gegenüber dem hier beschriebenen Effekt eine untergeordnete Rolle.

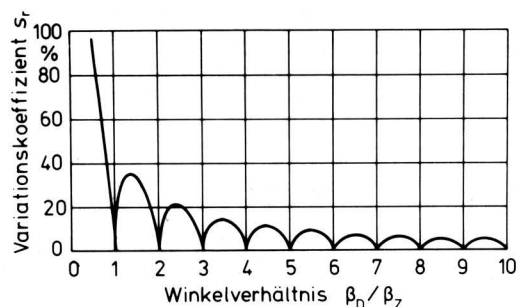


Bild 6. Berechneter Verlauf des Variationskoeffizienten in Abhängigkeit vom Winkelverhältnis β_D/β_Z .

2.3 Zuteilfehler

Der Zuteilfehler entsteht als Überlagerung von Einstell- und Dosierfehler. Bild 7 zeigt dafür ein schematisches Beispiel.

Der Zuteilfehler $f_{Z,s}$, der von etwa zwei Dritteln der Massen nicht überschritten wird, ergibt sich aus dem Einstellfehler f_E und der Standardabweichung s , die die Schwankungen der dosierten Massen um den Mittelwert kennzeichnet:

$$f_{Z,s} = f_E \pm s \quad (13).$$

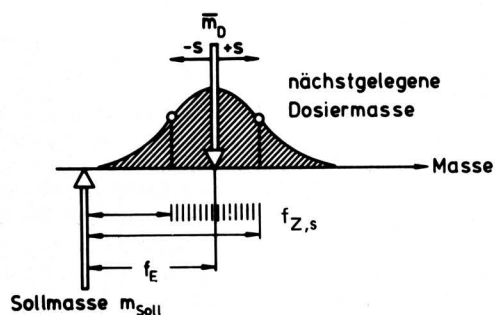


Bild 7. Schematische Darstellung der Überlagerung von Einstell- und Dosierfehlern zum Zuteilfehler.

Der relative, auf die Sollmasse bezogene Zuteilfehler beträgt damit für etwa zwei Drittel der dosierten Massen maximal:

$$f_{Z,s,rel} = \frac{f_E \pm s}{m_{Soil}} = f_{E,rel} \pm s_r (1 + f_{E,rel}) \quad (14).$$

3. Experimentelle Untersuchungen zur Genauigkeit von Zellenraddosierern

3.1 Verwendete Kraftfuttermittel

Bei einer Volumendosierung üben die Stoffeigenschaften der verwendeten Kraftfuttermittel einen wesentlichen Einfluß auf den Dosiervorgang aus. Aus diesem Grund wurden für die experimentellen Untersuchungen zwei typische handelsübliche Kraftfuttermittel mit sehr unterschiedlicher Struktur verwendet:

1. mehliges "Milchleistungsfutter" (MLF) mit einem mittleren Partikeldurchmesser von etwa 0,75 mm
2. pelletiertes "Kuhkorn" (KK), Durchmesser der Pellets etwa 6,6 mm, Länge 5–30 mm, im Mittel etwa 16,5 mm.

Bei beiden Kraftfuttermitteln zeigte sich eine starke Verringerung der Schüttdichte mit wachsendem Feuchtegrad, Bild 8. Dies ist damit zu erklären, daß die einzelnen Partikel bei der Wasseraufnahme stark aufquellen. Höhere Feuchtegrade können bei Kraftfutter z.B. bei der Lagerung in feuchten Melkständen auftreten.

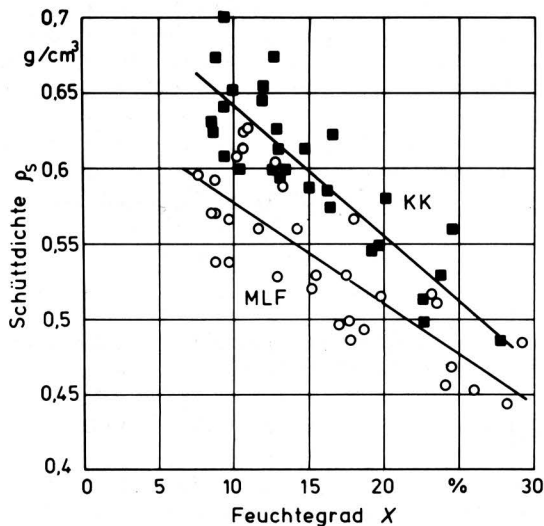


Bild 8. Schüttdichte von mehligem Futter (MLF) und pelletiertem Futter (KK) in Abhängigkeit vom Feuchtegrad.

3.2 Aufbau und Funktion des Versuchsgerätes

Das bei den experimentellen Untersuchungen verwendete Zellenraddosier-Versuchsgerät ist in Bild 9 schematisch dargestellt.

Das im Mantelrohr a rotierende Zellenrad b fördert das Kraftfutter vom Vorratsbehälter c (Volumen etwa 40 l) zur Auswurföffnung e. An der Einlauföffnung in das Zellenrad ist eine Nylonbürste f angebracht, die ein Einklemmen von Kraftfutter zwischen dem Mantelrohr und den Zellenstegen verhindern soll. Die Bürste g an der Auswurföffnung soll die Abdichtung des Zellenrades verbessern und verhindern, daß beim Stillstand des Zellenrades mehliges Kraftfutter zwischen den Zellenstegen und dem Mantelrohr ausrieseln kann. Der Mantelrohrdurchmesser beträgt 150 mm, die Zellenradlänge 100 mm. Für den Innendurchmesser des Zellenrades wurden die Werte $d = 60, 80, 100, 120$ mm verwendet. Die Zellenzahlen betragen $z = 4, 6, 8, 12, 24$. Durch verschiedene Kombinationen von Innendurchmesser und Zellenzahl können 20

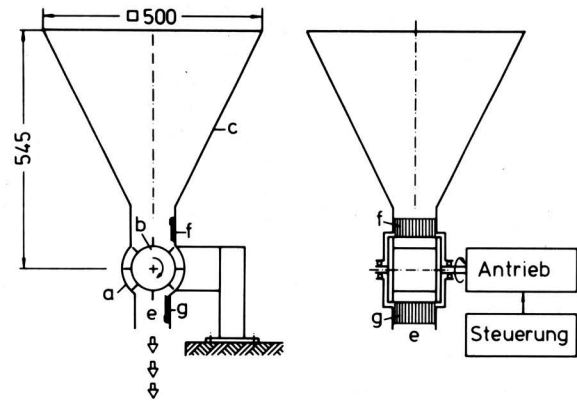


Bild 9. Schematische Darstellung des verwendeten Zellenraddosierers.

- | | |
|-------------------|--------------------------|
| a Mantelrohr | e Auswurföffnung |
| b Zellenrad | f Nylonbürste am Einlauf |
| c Vorratsbehälter | g Nylonbürste am Auslauf |

unterschiedliche Zellenräder hergestellt werden. Die Zellenräder besitzen dabei Zellenvolumen zwischen 20 und 350 cm³, wobei sehr verschiedene Zellenformen, zwischen "breit – flach" (z.B. $d = 120$ mm, $z = 4$) und "schmal – tief" (z.B. $d = 60$ mm, $z = 24$), auftreten, Bild 10.

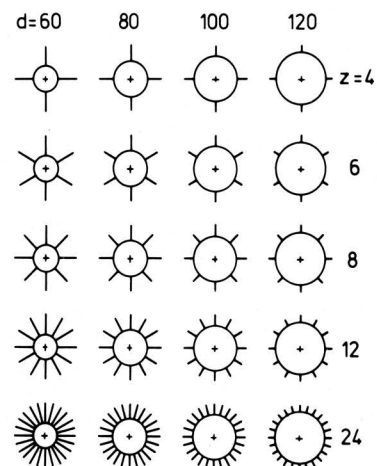


Bild 10. Zellenformen bei verschiedenen Innendurchmessern d und Zellenzahlen z.

Beim Zellenrad mit 24 Zellen sind die einzelnen Zellen sehr schmal, besonders innen bei kleinerem Durchmesser d. Dies führt bei pelletiertem Kraftfutter zu einer geringen Füllung der Zellen und zu einer verstärkten Beschädigung der Pellets. Um diese ungünstigen Verhältnisse zu verbessern, wurde die in Bild 11 dargestellte Zellenradgeometrie "3 x 8" verwendet. Dieses Zellenrad hat einen Innendurchmesser $d = 100$ mm und ist durch zwei dünne Blechscheiben in drei Abschnitte gleicher Breite unterteilt. Jeder dieser Abschnitte besitzt 8 Zellen, wobei die Zellenstege der drei Abschnitte jeweils um 15° gegeneinander versetzt sind. Dadurch werden die insgesamt vorhandenen 24 Zellen nacheinander ausgeworfen, wobei jedoch die Zellenform günstiger ist als beim normalen Zellenrad mit 24 Zellen.

Für die in Bild 9 angedeutete Kombination von Antrieb und Steuerung wurden zwei verschiedene Varianten verwendet: Bei der Steuerungsart "Motor/Dosierzeit t_D " wird das Zellenrad von

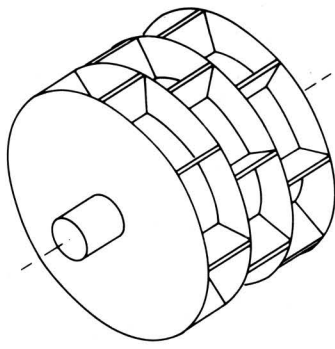


Bild 11. Zellenrad "3 x 8" mit 24 Zellen.

einem Elektromotor über ein Getriebe kontinuierlich mit $n_z = 30 \text{ min}^{-1}$ angetrieben. Die Dosierzeit t_D wird an einer den Antriebsmotor steuernden Schaltuhr vorgewählt. In Abschn. 2.2 wurde bereits gezeigt, daß bei dieser Steuerungsart bei konstanter Geräteeinstellung zwei benachbarte Zellenanzahlen ausgeworfen werden können. Um den Einfluß dieser Fehlerquelle zu untersuchen, wurde daneben die Steuerungsart "Zylinder/Zellenanzahl Z_D " verwendet. Dabei wird das Zellenrad von einem Pneumatikzylinder mit Klinkenschaltwerk absätzig jeweils um eine Zelle gedreht. Die Arbeitsfrequenz beträgt etwa 42 Hübe/min. Die Anzahl Z_D der zu dosierenden Zellen wird an einer Zähl- und Vergleicherschaltung vorgewählt. Mit dieser Steuerungsart wird erreicht, daß genau die vorgegebene Anzahl von Zellen ausgeworfen wird. Der Antrieb des Zellenrades mit dem Pneumatikzylinder entspricht der in der Praxis im Melkstand oft verwendeten Betätigung von Hand mit Seilzug und Ratsche. Beim Seilzugantrieb können jedoch Ungenauigkeiten durch eine ungleichmäßige Handbetätigung auftreten.

3.3 Messungen zur Dosiergenauigkeit

Bei den Messungen zur Dosiergenauigkeit wurde die Dosierzeit t_D bzw. die Anzahl der dosierten Zellen Z_D so gewählt, daß sich dosierte Massen im Bereich von etwa 0,25–5 kg ergaben. Bei konstanter Einstellung des Zellenrad dosierers wurde jeweils 10mal dosiert und aus den einzelnen Massen der Mittelwert \bar{m}_D und der Variationskoeffizient s_r der dosierten Massen bestimmt (vgl. Abschn. 2.2). Bild 12 zeigt ein typisches Beispiel für die gemessene Abhängigkeit des Variationskoeffizienten vom Mittelwert der dosierten Masse bei vorgegebener Dosierzeit. Der Variationskoeffizient verringert sich mit steigender dosierter Masse, d.h. die Dosiergenauigkeit wird besser. In Bild 12 ist zum Vergleich auch der Verlauf eingezeichnet, der sich bei der theoretischen Betrachtung als Einhüllende des Kurvenzugs in Bild 6 ergibt. Dabei wird statt des Winkelverhältnisses β_D/β_Z das entsprechende Massenverhältnis $\bar{m}_D/\Delta m$ eingesetzt. Die pro Zelle geförderte Masse Δm ergibt sich aus dem Zellenvolumen V_Z , der Schüttdichte ρ_S des Kraftfutters und dem Füllungsgrad ϵ , für den bei KK experimentell ein Wert von etwa 90 % ermittelt wurde.

$$\Delta m = V_Z \rho_S \epsilon \quad (15)$$

Der so berechnete theoretische Verlauf stimmt etwa mit der Messung überein.

Um die Streuung der Meßpunkte auszugleichen, wurden Regressionskurven errechnet, wofür als Näherungen Geraden, Exponential- und Potenzfunktionen in Frage kommen [4]. Für etwa 86 % der Messungen wurde die beste Annäherung durch die Potenzfunktion

$$s_r = s_r(1 \text{ kg}) \bar{m}_D^{-a} \quad (16)$$

erreicht. Zum Vergleich der Variationskoeffizienten bei verschiedenen Kraftfuttermitteln, Zellenradgeometrien, Antriebs- und Steuerungsarten wird im folgenden der Variationskoeffizient $s_r(1 \text{ kg})$ (s_r für eine dosierte Masse $\bar{m}_D = 1 \text{ kg}$) verwendet.

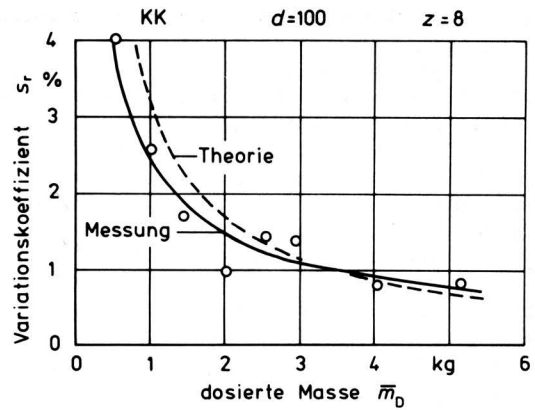


Bild 12. Typisches Beispiel für die Abhängigkeit des Variationskoeffizienten vom Mittelwert der dosierten Masse bei Dosierung mit Vorgabe der Dosierzeit.

Bei Voruntersuchungen mit der Zellenradgeometrie $d = 100 \text{ mm}$, $z = 8$ und kontinuierlichem Antrieb mit Zeitsteuerung zeigte sich, daß in einem Bereich der Zellenradrehzahl $n_z = 20\text{--}100 \text{ min}^{-1}$ kein Einfluß auf den Variationskoeffizienten auftritt, Bild 13. Aus diesem Grund wurden die weiteren Messungen bei einer Zellenradrehzahl $n_z = 30 \text{ min}^{-1}$ durchgeführt.

Bild 14 zeigt am Beispiel von MLF, daß der Variationskoeffizient bei steigendem Kraftfutterfeuchtegrad geringer wird. Bei steigendem Feuchtegrad sinkt die Schüttdichte des Kraftfutters deutlich ab (vgl. Bild 8), wodurch nach Gl. (15) die pro Zelle geförderte Masse geringer wird. Dies führt nach der theoretischen Betrachtung in Abschn. 2.2 zu geringeren Schwankungen der dosierten Masse und damit auch zu einer besseren Dosiergenauigkeit. Bei den weiteren Untersuchungen betrug der Feuchtegrad bei beiden verwendeten Kraftfuttermitteln etwa $X = 10 \%$.

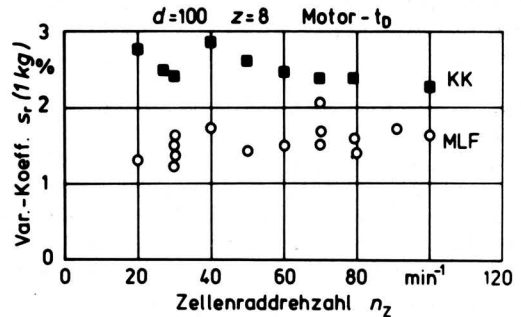


Bild 13. Variationskoeffizient in Abhängigkeit von der Zellenradrehzahl.

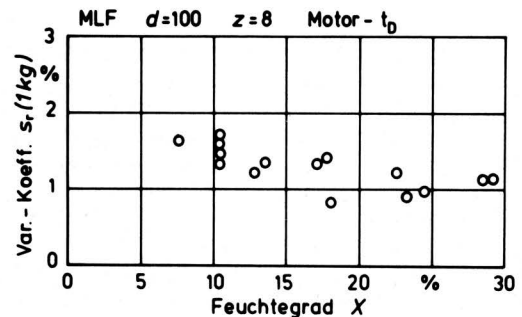


Bild 14. Variationskoeffizient in Abhängigkeit vom Feuchtegrad bei MLF.

3.4 Einfluß der Zellenradgeometrie bei vorgegebener Dosierzeit

Zunächst wurde der Variationskoeffizient der dosierten Masse bei kontinuierlichem Zellenradantrieb und vorgegebener Dosierzeit t_D experimentell bestimmt. Beim mehligem MLF wurden alle in den Bildern 10, 11 dargestellten Zellenräder untersucht. Beim pelletierten Futter KK und großen Zellenzahlen wurden die Pellets so stark zerkleinert, daß für reproduzierbare Messungen laufend neue Pellets notwendig gewesen wären. Bei der Zellenzahl $z = 24$ klemmten sich außerdem Pellets zwischen den Zellenstegen ein, so daß sich das Zellenrad nicht vollständig entleerte. Aus diesem Grund wurden bei KK keine Messungen mit dem einfachen Zellenrad mit $z = 24$ durchgeführt. Stattdessen erfolgten die Messungen mit dem Zellenrad "3 x 8" nach Bild 11. Die Zellenzahl $z = 12$ wurde bei KK nur beim Durchmesser $d = 100$ mm verwendet.

Bild 15 zeigt die ermittelten Variationskoeffizienten in Abhängigkeit vom Innendurchmesser d des Zellenrades und der Zellenzahl z . Der Variationskoeffizient nimmt bei beiden Kraftfuttermitteln mit steigendem Durchmesser stark ab und wird bei kleinem Durchmesser auch mit wachsender Zellenzahl deutlich geringer. Sowohl mit wachsendem Innendurchmesser als auch mit steigender Zellenzahl wird das Zellenvolumen kleiner.

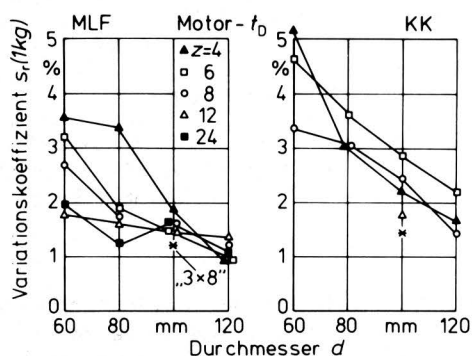


Bild 15. Variationskoeffizient in Abhängigkeit vom Durchmesser d bei verschiedenen Zellenzahlen; Dosierung mit Vorgabe der Dosierzeit.

Bild 16 zeigt dementsprechend, daß der Variationskoeffizient mit wachsendem Zellenvolumen größer wird. Dies bestätigt die theoretische Betrachtung in Abschn. 2.2. Der Variationskoeffizient ist bei KK etwas größer als bei MLF. Dies läßt sich damit erklären, daß die einzelnen Zellen vom pelletierten KK etwas ungleichmäßiger ausgefüllt werden als vom mehligem MLF. Eine lineare Regression liefert für die in Bild 16 dargestellten Messungen das Ergebnis:

$$\begin{aligned} \text{für MLF: } s_r(1 \text{ kg}) &= 0,953 + 0,0067 V_z \\ \text{für KK: } s_r(1 \text{ kg}) &= 1,149 + 0,0099 V_z \end{aligned} \quad (17)$$

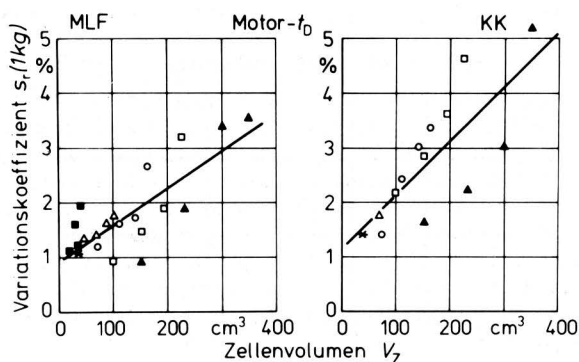


Bild 16. Variationskoeffizient in Abhängigkeit vom Zellenvolumen. Symbole wie in Bild 15, Dosierung mit Vorgabe der Dosierzeit.

mit $s_r(1 \text{ kg})$ in % und V_z in cm^3 .

3.5 Einfluß der Zellenradgeometrie bei vorgegebener Zellenanzahl

Bei den Messungen mit absätzigem Antrieb wurde nur ein Teil der möglichen Zellenradgeometrien verwendet. Bild 17 zeigt, daß die ermittelten Variationskoeffizienten unabhängig vom Zellenvolumen, d.h. von der pro Zelle ausgeworfenen Masse Δm sind. Dagegen ist der Variationskoeffizient beim pelletierten KK deutlich größer als beim mehligem MLF. Weil die Dosierung mit einer vorgegebenen Zellenanzahl Z_D erfolgt, sind die auftretenden Dosierfehler nur auf die ungleichmäßige Füllung der Zellen und auf eine gewisse Inhomogenität des Kraftfutters zurückzuführen. Beim pelletierten KK besitzen diese Fehlerquellen offensichtlich einen größeren Einfluß als beim mehligem MLF. Im Mittel beträgt der Variationskoeffizient bei vorgegebener Zellenanzahl:

$$\begin{aligned} \text{bei MLF: } s_r(1 \text{ kg}) &= 0,25 \% \\ \text{bei KK: } s_r(1 \text{ kg}) &= 1 \% \end{aligned} \quad (18)$$

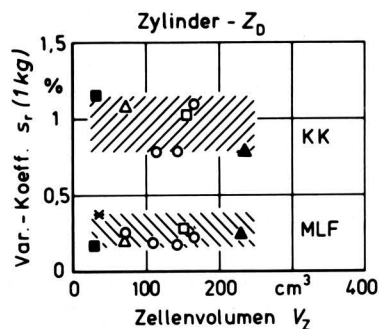


Bild 17. Variationskoeffizient in Abhängigkeit vom Zellenvolumen. Symbole wie in Bild 15; Dosierung mit Vorgabe der Zellenanzahl.

3.6 Minimale Portionsgröße bei vorgegebener Genauigkeit

Bei Zellenraddosierern wird mit steigender dosierter Masse die Dosiergenauigkeit besser (vgl. Bild 12). In Abschn. 2.1 wurde bereits gezeigt, daß auch der Einstellfehler bei der Dosierung mit ganzen Vielfachen einer Grundmenge mit wachsender dosierter Masse abnimmt. Dosierfehler und Einstellfehler überlagern sich zum Zuteilfehler (vgl. 2.3).

Bild 18 zeigt für ein Beispiel den Variationskoeffizienten s_r und den maximalen relativen Einstellfehler $f_{E,rel,max} = 0,5 \Delta m/m_D$ in Abhängigkeit von der dosierten Masse. Außerdem ist der maximale relative Zuteilfehler $f_{Z,s,rel}$ eingezeichnet, der sich aus Gl. (14) bei positivem Vorzeichen für das zweite Glied ergibt. Wenn ein maximaler Wert des Zuteilfehlers von 5 % zugelassen wird, ergibt sich nach Bild 18 für die minimale Portionsgröße (dosierte Masse) ein Wert von etwa 0,9 kg.

Nach Abschn. 2.1 kann der Einstellfehler vermieden werden, wenn die dosierte Masse ein ganzzahliges Vielfaches der pro Zelle geförderten Masse ist. Dies läßt sich bei veränderlicher dosierter Masse erreichen, wenn auch das Zellenvolumen veränderbar ist. Dafür könnte eine Breitenverstellung des Zellenrades dienen, wie sie bei Schubsrädern von Drillmaschinen üblich ist [5]. In diesem Fall wird die Genauigkeit nur durch den Variationskoeffizienten festgelegt. Für das Beispiel in Bild 18 beträgt bei einem maximalen Variationskoeffizienten von 5 % die minimale dosierte Masse etwa 0,15 kg.

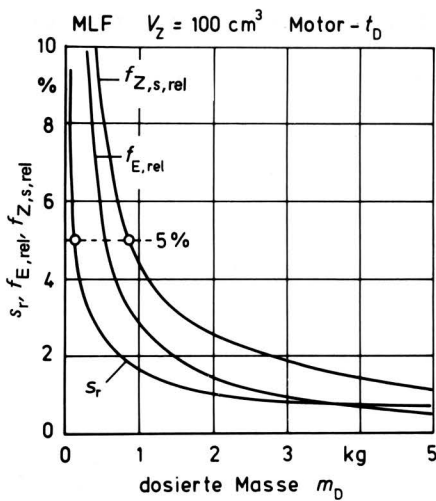


Bild 18. Variationskoeffizient s_r , Einstellfehler $f_{E,rel}$ und Zuteilfehler $f_{Z,s,rel}$ in Abhängigkeit von der dosierten Masse; MLF $V_Z = 100 \text{ cm}^3$, Dosierung mit Vorgabe der Dosierzeit.

In **Bild 19** sind die minimalen Portionsgrößen für MLF und KK bei den Antriebs- und Steuerungsarten "Motor- t_D " und "Zylinder- Z_D " in Abhängigkeit vom Zellenvolumen dargestellt. Beim Antrieb mit Motor ist der Verlauf der minimalen Masse für einen zulässigen Wert des Variationskoeffizienten (Motor- s_r) bzw. des Zuteilfehlers (Motor- f_Z) von 5% eingezeichnet. Beim Antrieb mit Zylinder ist nur der Verlauf für 5% Zuteilfehler (Zylinder- f_Z) dargestellt, weil sich bei 5% Variationskoeffizient wegen der hohen Dosiergenauigkeit des Geräts verschwindend kleine minimale Portionsgrößen ergeben. Aus dem Bild kann entnommen werden, welche Zellenvolumen, Antriebs- und Steuerungsart geeignet sind, um die jeweiligen Anforderungen zu erfüllen. Als minimale Portionsgröße sind für Kraftfutterdosierer im Melkstand etwa 500 g ausreichend. Bei Kraftfutterabruftautomaten sind die minimalen dosierten Massen oft im Bereich von nur 100 g [6].

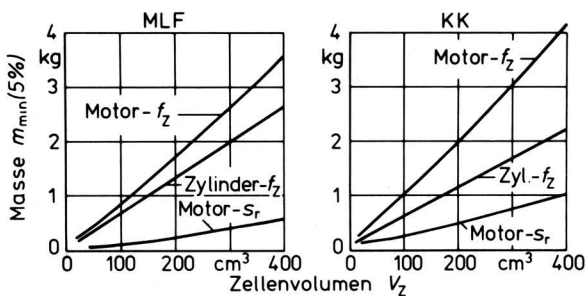


Bild 19. Berechnete minimale dosierte Masse, wenn für den Variationskoeffizienten bzw. für den Zuteilfehler ein Wert von 5% nicht überschritten wird.

3.7 Einfluß des Kraftfutterfeuchtegrads auf die dosierte Masse

Bei konstanter Einstellung des Zellenraddosierers ändert sich der Mittelwert der dosierten Masse mit dem Feuchtegrad des Kraftfutters. Dies läßt sich hauptsächlich mit der starken Abhängigkeit der Schüttdichte des Kraftfutters vom Feuchtegrad erklären, vgl. Bild 8. Andererseits ändern sich mit der Materialfeuchte auch andere Stoffeigenschaften (z.B. Rieselfähigkeit), wodurch etwas unterschiedliche Füllungsgrade auftreten können. **Bild 20** zeigt ein typisches Beispiel für den Einfluß des Feuchtegrads auf die dosierte Masse.

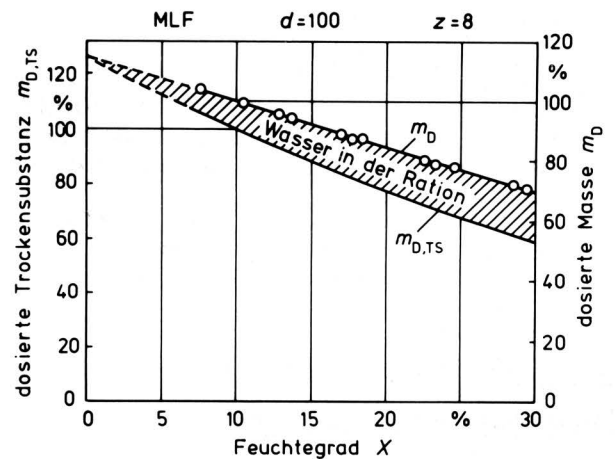


Bild 20. Dosierte Masse bzw. dosierte Trockensubstanzmasse in Abhängigkeit vom Feuchtegrad; Bezugswert des Feuchtegrads $X = 10\%$.

Für die leistungsbezogene Versorgung der Tiere ist nicht die zugeteilte feuchte Masse des Kraftfutters entscheidend, sondern die zugeteilte Trockensubstanzmasse $m_{D,TS}$, da in ihr die benötigten Nährstoffe enthalten sind. Die Trockensubstanzmasse ergibt sich aus der dosierten Masse m_D und dem Feuchtegrad X zu:

$$m_{D,TS} = m_D / (1 + X) \quad (19)$$

Die dosierte Trockensubstanzmasse wird also mit wachsendem Feuchtegrad noch stärker verringert als die dosierte feuchte Masse, siehe Bild 20. Bei dem im Bild dargestellten Beispiel ändert sich die dosierte Trockensubstanzmasse bereits um 5%, wenn der Feuchtegrad um nur 2,2% geändert wird. Daraus wird die große Bedeutung der Kalibrierung von Volumendosierern bei sich änderndem Feuchtegrad des Kraftfutters ersichtlich.

4. Zusammenfassung

Zur Kraftfutterzuteilung werden häufig Zellenraddosierer verwendet. Zur Bestimmung der Genauigkeit dieser Geräte wurden theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die beim Dosieren auftretenden Zuteilfehler ergeben sich aus der Überlagerung von Einstell- und Dosierfehlern. Eine theoretische Analyse des Einstellfehlers zeigt, daß er vom Zellenvolumen abhängt und das Zellenvolumen daher nicht zu groß sein soll. Die bei kontinuierlichem Lauf in vorgegebener Dosierzeit auftretenden Dosierfehler entstehen dadurch, daß zwei benachbarte Zellenanzahlen ausgeworfen werden können. Es wurde ein Berechnungsverfahren entwickelt, mit dem der dadurch verursachte Variationskoeffizient der dosierten Massen berechnet werden kann.

Die experimentellen Untersuchungen bestätigen, daß bei Vorgabe der Dosierzeit die Dosiergenauigkeit mit wachsender Zellengröße abnimmt. Dagegen ist bei Vorgabe der Zellenanzahl die Dosiergenauigkeit vom Zellenvolumen unabhängig und wesentlich besser als bei Vorgabe der Dosierzeit. Bei Vorgabe der Zellenanzahl entstehen die Dosierfehler nur durch eine ungleichmäßige Füllung der Zellen. Dieser Effekt ist bei mehligem Kraftfutter geringer als bei pelletiertem Kraftfutter. Aus den Messungen wurden die minimalen dosierten Massen berechnet, bei denen der Dosier- bzw. Zuteilfehler einen Wert von 5% nicht überschreitet.

Die dosierte Masse wird mit steigendem Kraftfutterfeuchtegrad stark verringert, weil die Schüttdichte deutlich abnimmt. Die für die Nährstoffversorgung wichtige Trockensubstanzmasse wird dabei noch stärker vermindert als die dosierte feuchte Masse.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] Kaufmann, W. u. H. Hagemeyer: Fütterungstechnik und Verdauungsablauf bei Milchkühen. Übersichten zur Tierernährung Bd. 1 (1973) S. 193/221.
- [2] Scholtysik, B.J.: Einfluß der geometrischen Parameter auf die Dosiergenauigkeit von Schneckendosierern für Kraftfuttermittel. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 1, S. 9/15.
- [3] •Heyde, H. u.a.: Landmaschinenlehre. Bd. 2, Berlin: VEB Verlag Technik 1965.

- [4] •Soom, E.: Varianzanalyse, Regressionsanalyse und Korrelationsrechnung. Statistische und mathematische Methoden in der Fertigung. Blaue TR-Reihe Heft 102, Bern und Stuttgart: Verlag Technische Rundschau im Hallwag Verlag.
- [5] •Kanafojski, C.: Dünge-, Sä- und Pflanzmaschinen. Berlin: VEB Verlag Technik 1967.
- [6] •Pirkelmann, H.: Mechanisierung der Kraftfuttermittel an Milchvieh. Arbeiten der DLG, Band 164, Frankfurt/Main: DLG-Verlag 1980.

Der Einfluß thermischer Vorbehandlung auf die statische Festigkeit von Maiskörnern

Teil 2: Versuchsergebnisse und Diskussion

Von Martin Kustermann und Heinz Dieter Kutzbach, Stuttgart-Hohenheim*)

Mitteilungen aus dem Sonderforschungsbereich 140 – Landtechnik "Verfahrenstechnik der Körnerfruchtproduktion" der Universität Hohenheim

DK 633.15:633.004.12:539.4

Inhalt

1. Teil¹⁾

- 1. Einleitung
- 2. Aufgabenstellung
- 3. Belastungsarten und Festigkeitsgrößen
- 4. Methodische Grundlagen
 - 4.1 Bruchenergie
 - 4.2 Elastizitätsgrad
 - 4.3 Elastizitätsmodul
- 5. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung
 - 5.1 Versuchsaufbau
 - 5.2 Versuchsdurchführung

2. Teil

- 6. Versuchsergebnisse
 - 6.1 Bruchfestigkeit
 - 6.2 Elastizitätsgrad
 - 6.3 Elastizitätsmodul
- 7. Zusammenfassung

Die Verfasser danken Herrn cand. agr. D. Heinz für die sorgfältige Durchführung der Messungen und Frau D. Dörner-Ibrahim, LTA, für die exakte Auswertung und Darstellung der Meßwerte.

¹⁾ Der erste Teil dieser Arbeit ist abgedruckt in "Grundlagen der Landtechnik" Bd. 31 (1981) Nr. 5, S. 171/77.

*) Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach ist Inhaber des Lehrstuhls für Grundlagen der Landtechnik des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim. Dipl.-Ing. M. Kustermann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 140 (Grundlagen der Landtechnik).

6. Versuchsergebnisse

6.1 Bruchfestigkeit

Verglichen mit metallischen Werkstoffen weist Mais ein wesentlich unheillicheres und auch komplizierteres Festigkeitsverhalten auf. Infolge der bei biologischen Stoffen üblichen Inhomogenität sind die ermittelten Werte häufig mit einem beträchtlichen Streubereich behaftet. Es ist deshalb nützlich, als Maß für die Größe einer Eigenschaft statt des Mittelwertes eine Summenhäufigkeitskurve anzugeben. In Bild 3 und Bild 4 sind solche Summenhäufigkeitskurven für die Deformation bis zum Eintritt des Bruches dargestellt. Aus diesen Bildern läßt sich leicht ersehen, mit welchem Anteil gebrochener Körner bei einer – evtl. konstruktiv – vorgegebenen Deformation gerechnet werden muß. In beiden dargestellten Fällen wird eine Deformation um ca. 0,3 bis 0,4 mm von allen Körnern ertragen, ohne daß es zum Bruch kommt.

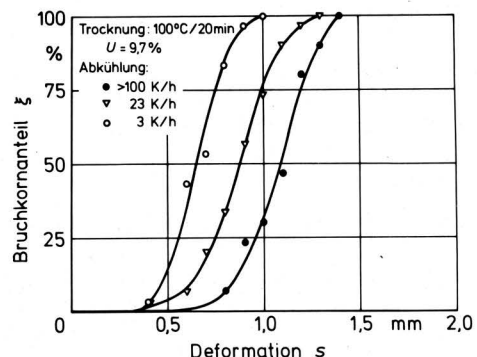


Bild 3. Bruchkornanteil von heißluftgetrockneten Maiskörnern (100 °C/20 min) in Abhängigkeit von der Deformation; Abkühlungsgeschwindigkeit als Parameter.