

Portionsdosierung von Kälbertränke in die Futtereimer einer kontinuierlich umlaufenden Futterkette

Dipl.-Ing. E. Dressler, KDT/Dr.-Ing. G. Hörnig, KDT

Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR, Betriebsteil Potsdam-Bornim

Verwendete Formelzeichen

H	mm	Ventilhub
h_a	mm	Anfangshöhe des Flüssigkeitsspiegels
h_e	mm	Endhöhe des Flüssigkeitsspiegels
h_m	mm	mittlere Höhe des Flüssigkeitsspiegels
K	$\text{dm}^3/\text{s} \cdot \text{mm}^{1/2}$	Stromkonstante
p_D	N/cm^2	Anfangsdruck p_m Dosierventil
t_D	s	mittlere Dosierzeit
t_E	s	Einschaltdauer
t_U	s	Umschaltzeit
t_V	s	Verzögerungszeit
V_D	dm^3	Dosiervolumen
V_0	dm^3	Volumenkonstante
\dot{V}_D	dm^3/s	Dosiervolumenstrom
\dot{V}_z	dm^3/s	Zulaufstrom
αt_E	ms	Abweichung von der Einschaltdauer

1. Problemstellung

Die weitere Intensivierung und Industrialisierung der Tierproduktion in der sozialistischen Landwirtschaft erfordern besonders auf dem Gebiet der Fütterung hochproduktive Mechanisierungsmittel, die einen rationellen und bedarfsgerechten Einsatz der Futterstoffe ermöglichen.

In industriemäßig produzierenden Kälberaufzuchtanlagen lag für die teilautomatisierte Fütterung der Kälber im Alter von einer Woche bis zu 8 Wochen, speziell für die programmgesteuerte Dosierung von Kälbertränke in eine endlos umlaufende Eimerkette, entsprechend den Agrotechnischen Forderungen (ATF) keine technische Lösung vor. Die Schaffung eines geeigneten Dosierautomaten wurde damit für die Praxis dringend notwendig.

Die Eignung des Dosierers wird an der Erfüllung der folgenden ATF gemessen [1]:

- Portionsdosierung von max. 4 dm^3 Tränke in 1,2 s
- stufenweise Änderung des Dosiervolumens im Bereich $V_D = 1 \dots 4 \text{ dm}^3$ in Schritten von $0,5 \text{ dm}^3$ bei Einhaltung einer Umschaltzeit $t_U = 3 \text{ s}$
- maximaler Dosierfehler 5%
- hohe Funktionssicherheit und Verfügbarkeit
- toxikologische Unbedenklichkeit
- instandhaltungsgerechte, übersichtliche, antikorrosive und verschleißarme Gestaltung
- vollständige Restfuttergewinnung sowie einfache Reinigung und Desinfektion
- maximale Antriebsleistung 1,5 kW.

2. Lösungsweg

Zur Erfüllung dieser Forderungen wurde mit Hilfe einer Punktbewertung aus einer Vielzahl von möglichen Lösungen [2] als Vorzugsvariante die zeitabhängige Volumendosierung mit Magnetventil ausgewählt und in den folgenden Schritten bearbeitet:

- Vorversuche zur Eignung der ausgewählten Lösung im Dosierzeitbereich $t_D = 0,25 \dots 1 \text{ s}$
- Konstruktion, Bau und Untersuchung eines

Funktionsmusters zur Gewinnung dosierungstechnischer Grundlagen

- Entwurf eines Dosierkomplexes mit zwei zeitgesteuerten Volumendosierern für eine teilstationäre Bearbeitungsstation
- Versuchsauswertung und Vergleich der Ergebnisse mit den Zielparametern.

Die wesentlichen Ergebnisse bei der Entwicklung eines funktionssicheren Volumendosierers entsprechend den ATF sind Inhalt des folgenden Beitrags.

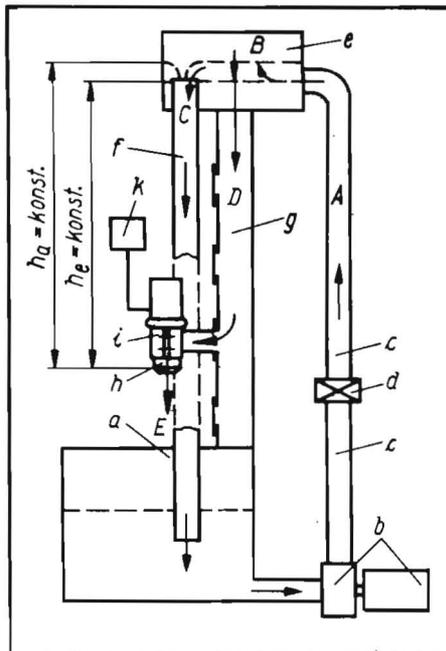
3. Zeitabhängige Volumendosierung mit Magnetventil

Die im Forschungszentrum für Mechanisierung Schlieben/Bornim, Betriebsteil Potsdam-Bornim, entwickelte Lösung zur zeitabhängigen Volumendosierung mit Magnetventil besteht aus den folgenden Hauptbaugruppen (Bild 1), deren Einstellgrößen entscheidenden Einfluß auf den Dosierfehler haben:

- Einrichtung zur Druckregelung (e, f, g)
- Zeitsteuerungseinrichtung k
- Dosierventil h.

Bild 1. Schema der Versuchseinrichtung zur Untersuchung der zeitabhängigen Volumendosierung mit Magnetventil;

A Zulaufstrom, B Vorratsbildung bis Anfangshöhe h_a des Flüssigkeitsspiegels, C Überlaufstrom, D Dosiervorgang bis Endhöhe h_e des Flüssigkeitsspiegels, E Dosierstrom, a Vorratsbehälter, b Kreiselpumpe mit Motor, c Zuführleitung zur Druckregelung, d Durchgangsventil, e Speicherbehälter der Druckregelung, f Überlaufrohr, g Fallrohr der Druckregelung, h Dosierventil, i Klammer, k Zeitsteuerungseinrichtung



3.1. Einrichtung zur Druckregelung

Eine Druckregelung ist erforderlich, weil beim Direktanschluß von Dosierventilen an eine Ringleitung und bei parallelem Einsatz keine konstanten Zulaufdruckverhältnisse am einzelnen Dosierventil vorliegen. Bereits die Abnahme des Füllstands um 1 m bei einem Anfangsdruck am Dosierventil von $p_D = 10 \text{ N}/\text{cm}^2$ würde einen Dosierfehler von 5% verursachen [2]. Unterschiedlich lange Zulaufstrecken zur Förderpumpe bei gestaffelter Entnahme aus verschiedenen Vorratsbehältern und die Diskontinuität der Entnahme aus der Druckleitung beim Parallelsatz von Dosierventilen sind weitere Dosierfehlerursachen, die durch die Druckregelung auf ein vertretbares Maß zu verringern sind.

Die im Bild 1 dargestellte Versuchseinrichtung besteht aus Überlaufsystem mit Obenzulauf c, Speicherbehälter e und Überlaufrohr f, bei dem eine Änderung des Durchsatzes durch den Zapfanschluß an eine Ringleitung einen wesentlich geringeren Einfluß auf den Flüssigkeitsdruck am Dosierventil verursacht als bei direktem Anschluß. Nach dem Öffnen des Dosierventils h entsteht so ein im wesentlichen konstanter mittlerer Zulaufdruck im Fallrohr g. Beim Obenzulauf ist eine Rückwirkung auf den Durchsatz durch die Versorgungsleitung ausgeschlossen. Die Änderung des Zulaufstroms von $\dot{V}_z = 2,1 \text{ dm}^3/\text{s}$ auf $2,0 \text{ dm}^3/\text{s}$ würde beispielsweise bei $V_D = 4 \text{ dm}^3$ in $t_D = 1 \text{ s}$ lediglich einen Dosierfehler von 0,05% bewirken, wenn ein 1 m hohes Überlaufsystem mit 0,4 m Durchmesser der Überlaufkante verwendet würde. Der Vorteil der Druckregelung durch Überlauf besteht vor allem in der Funktionssicherheit und im einfachen Aufbau, da keine mechanisch bewegten Teile vorhanden sind.

3.2. Einrichtung zur Zeitsteuerung

Die Einrichtung zur Zeitsteuerung muß weitgehend konstante, den Portionsgrößen zugeordnete Einschaltzeiten für den Ventilmagneten und eine möglichst kurzzeitige Änderung der Magnetkraft realisieren, da bereits eine Abweichung von der Einschaltdauer $\Delta t_E = 10 \text{ ms}$ bei der mittleren Dosierzeit $t_D = 1 \text{ s}$ einen Dosierfehler von 1% verursachen würde [2]. Für den automatischen Ablauf sind folgende Funktionseinheiten der Zeitsteuerungseinrichtung erforderlich:

- Programmspeicher
- Informationsvermittler
- elektronisches Zeitglied
- Verstärker
- Auslöseschalter für den Dosierbeginn.

Das elektronische Zeitglied kann durch Verwendung eines Kondensators mit Verstärker und mehrerer wahlweise ansteuerbarer Potentiometer für alle erforderlichen Dosierzeiten ungleichzeitig arbeitender Dosierer eingesetzt werden. Das Fütterungsprogramm wird manuell in einem Kugelschrittschaltwerk gespeichert. Detaillierte Angaben über Aufbau und Funktion der im Forschungszentrum entwickelten Zeitsteuerungseinrichtung sind der Literatur [3] zu entnehmen.

3.3. Dosierventil

Folgende Forderungen an ein Dosierventil werden durch das entworfene Ventilmuster (Bild 2) im wesentlichen erfüllt:

- Herstellung eines konstanten Auslaßquerschnitts, der sich selbsttätig nur durch Verschleiß über einen längeren Zeitraum geringfügig ändert
- stufenlose Änderung des Auslaßquerschnitts zur Kalibrierung des Ventils, zur vollständigen Ausnutzung der verfügbaren Dosierzeit und zur Korrektur verschleißbedingter Querschnittsänderungen
- kurzzeitiges Arbeitsspiel (Öffnen — Schließen) für einen minimalen Zeitfehlereinfluß durch Geschwindigkeitsdifferenzen des Arbeitsspiels
- sicherer Verschluß des Ventils im Havariefall und während der Ruhestellung.

Der Auslaßquerschnitt wird durch Hub und Anschlag des Magnetankers exakt begrenzt. Über ein Gewinde im Verschlußkörper f können der durch ein starres und demzufolge verschleißfreies Gestänge i mit dem Verschlußkörper verbundene Magnetanker in eine beliebige Ausgangsstellung für einen Hub im Bereich von 0 bis 20 mm geschraubt und ein Auslaßquerschnitt im Bereich von 0 bis 25 cm² stufenlos hergestellt werden. Durch eine zweckmäßige Bilanzierung von Öffnungs- und Schließkraft im Ventil wird ein schnelles Arbeitsspiel erzielt.

4. Versuchsergebnisse

Die Untersuchungen zur zeitabhängigen Volumendosierung mit Magnetventil wurden auf die Ermittlung des Einsatzbereichs des Ventilmusters, der erreichbaren Dosierfehler und der Fehlerquellen konzentriert.

Die Analyse der Einflußgrößen auf den Dosiervorgang bei geringen Dosierzeiten ergab wesentliche Erkenntnisse für die Gestaltung und für den Einsatz der erarbeiteten Vorzugslösung.

4.1. Ventilkennlinien

Die wichtigsten Untersuchungsergebnisse sind in den Bildern 4 und 5 dargestellt. Für verschiedene Werte der mittleren Höhe des Flüssigkeitsspiegels h_m , des Ventilhubes H und der Einschaltdauer t_E wurde das Dosiervolumen V_D bestimmt, wobei sich eine streng lineare Abhängigkeit $V_D = f(t_E)$ bis $t_E = 1,6$ s (Bild 3) zeigte. Damit kann das Dosiervolumen V_D rechnerisch bestimmt werden:

$$V_D = V_0 + \dot{V}_D t_E = \dot{V}_D t_D \quad (1)$$

Dabei ergibt sich die mittlere Dosierzeit t_D mit der von der Zeitsteuerungseinrichtung abhängigen Verzögerungszeit t_v wie folgt:

$$t_D = t_E - t_v \quad (2)$$

Der mittlere Dosierstrom ist von der mittleren Höhe des Flüssigkeitsspiegels h_m und vom Ventilhub H abhängig und kann nach der Torricellischen Ausflußformel bestimmt werden:

$$\dot{V}_D = K \sqrt{h_m} \quad (\text{für } H = \text{konst.}) \quad (3)$$

Die Stromkonstante $K = f(H)$ mußte experimentell ermittelt werden (Bild 4).

Auf dieser Grundlage wurde mit dem erarbeiteten Ventilmuster nach Bild 2 ein stufenloser Durchsatzbereich $\dot{V}_D = 0 \dots 7,1$ dm³/s bei $h_m = 1200$ mm realisiert. Damit sind die wesentlichen Fakten zur Einstellung des Dosierventils bekannt. Die Berechnungsgrundlagen hierzu sind ausführlich in [2] dargelegt.

4.2. Dosierfehler

Aus insgesamt 204 Meßreihen mit über 4400 Meßwerten wurden die Fehler der zeitabhän-

Bild 2
Dosierventil;
a Gehäuse, b Dichtsitz,
c Flansch,
d Führung, e Überwurf-
mutter, f Dichtkegel,
g Flachdichtung,
h Zylindermanschette,
i Zug- und Führungs-
stange, k Muffe,
l Kontermutter,
m Feder

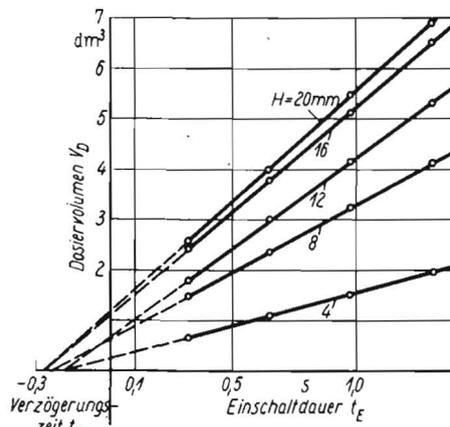
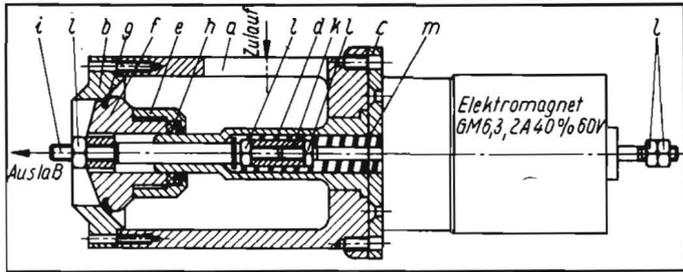


Bild 3. Abhängigkeit des Dosiervolumens von der Einschaltdauer für $h_m \approx 450$ mm

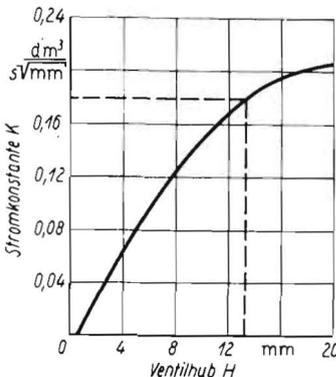
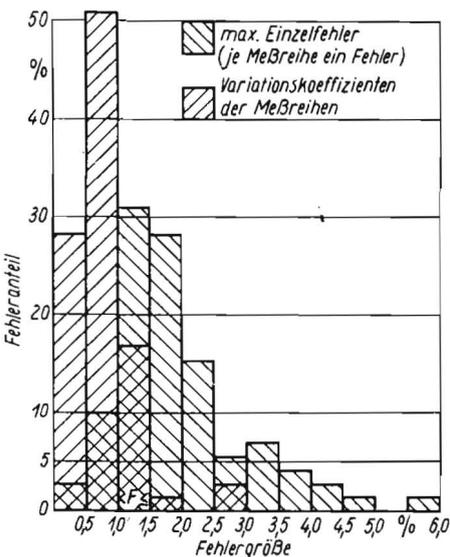


Bild 4. Abhängigkeit der Stromkonstanten vom Ventilhub

Bild 5. Anteil der Fehlergrößen an der Gesamtzahl der aus 71 Meßreihen ermittelten Fehler



gigen Volumendosierung mit einem Magnetventil ermittelt. Die Einsatzuntersuchungen des Tränkedosierers ($t_D = 0,16 \dots 1,6$ s) zeigen, daß die zulässige 5%-Grenze für den Dosierfehler mit Sicherheit unterschritten werden kann (Bild 5). Die Wahrscheinlichkeit für die Einhaltung bzw. Unterschreitung der 5%-Fehlergrenze beträgt 99,9%. Der Dosierfehler, der sich aus der Summe der Einstellabweichungen und der Streuung, bezogen auf den Sollwert der Dosiermasse, ergibt, betrug max. 4,1%. Treten beim Praxiseinsatz höhere Dosierfehler auf, so kann durch Interpretation der Abhängigkeit $V_D = f(t_E)$ die Fehlerursache gefunden werden (Bild 3). Eine Veränderung des Anstiegs der Geraden wird durch veränderte Strömungsbedingungen, eine Parallelverschiebung der Geraden durch Zeitfehler verursacht.

Die Strömungsbedingungen können sich ändern durch Veränderung der dynamischen Viskosität sowie der Dichte infolge Luftanreicherung, durch eine selbsttätige Verstellung des Drosselventils vor der Druckregelung, durch eine verschleißbedingte Vergrößerung des Auslaßquerschnitts im Dosierventil und durch einen Rückstau bei Mehrkomponentendosierung in einen Übergabetrichter. Der Viskositätsendwert ist vor dem Fütterungsbeginn durch Umpumpen oder Rühren herzustellen. Einer Luftanreicherung der Tränke ist durch minimalen Zulaufstrom zum Speicherbehälter der Druckregelung e und Mündung der Rücklaufleitung f für den Überlaufstrom unter dem Flüssigkeitsspiegel des Vorratsbehälters a entgegenzuwirken (Bild 1). Eine verschleißbedingte Vergrößerung des Auslaßquerschnitts des Dosierventils ist durch Veränderung des Ventilhubes zu korrigieren oder durch Anordnung einer zusätzlichen, fest einstellbaren Drosselstelle mit einem Querschnitt analog zum kleinsten Auslaßquerschnitt des Ventils bei maximalem Ventilhub zu eliminieren.

Zeitfehler, die hauptsächlich durch das Dosierventil entstehen, werden durch eine Änderung der Kräftebilanz im Ventil bei veränderlichen Reibkräften verursacht. Die geringste Änderung der Reibkräfte während des Einsatzes kann durch eine hohe Fertigungsqualität (glatte Gleitflächen, genaue Gestängeflucht) und durch Sicherung des Gestänges gegen Verdrehen erzielt werden.

Für den praktischen Einsatz der entwickelten Dosiereinrichtung ist die Kalibrierung des Dosierventils beim Hersteller in einem Versuchsgesetz zweckmäßig, wobei für die maximal mögliche Einschaltdauer und die größte Portion der Durchlaßquerschnitt einzustellen und anschließend die Kalibrierkennlinie $V_D = f(t_E)$ aufzunehmen sind, so daß in der Produktionsanlage mit Hilfe eines elektronischen Zeitmessers nur die ermittelten Einschaltzeiten und die zur größten Portion gehörende Endhöhe des Flüssigkeitsspiegels einzustellen sind. Umfangreiche Messungen in der Produktionsanlage können dadurch entfallen. Diese Verfahrensweise setzt allerdings in jedem Dosierer gleiche

Strömungsbedingungen voraus (keine Montageabweichungen). Die Kalibrierung des gleichen Ventils für andere Tränkearten kann durch Aufnahme der Kennlinie ohne Veränderung des Durchlaßquerschnitts erfolgen.

5. Zusammenfassung

Das Problem der Tränkedosierung entsprechend den ATF läßt sich durch die zeitabhängige Volumendosierung mit Magnetventil lösen. Ein Dosierer besteht aus den Hauptbaugruppen Druckregelungseinrichtung (Reduzierung von Druckschwankungen in der Zulaufleitung zum Dosierer), Dosierventil (Herstellung konstanter Auslaßbedingungen) und Zeitsteuerungseinrichtung (programmge-

steuerte Herstellung konstanter, den Portionsgrößen zugeordneter Einschaltzeiten für den Ventilmagneten).

Die zugelassene 5%-Dosierfehlergrenze wird auch im Einschaltzeitbereich $t_E = 0,2 \dots 1,0$ s durch die Schaffung weitgehend konstanter Strömungsbedingungen unterschritten. Die entwickelte Dosiereinrichtung erfüllt durch die konstruktive Ausbildung und die getroffene Materialauswahl auch die anderen, eingangs dargestellten Agrotechnischen Forderungen. Aufgrund der positiven Ergebnisse wurde die vorliegende Lösung für die Tränkedosierung bereits im Jahr 1974 zur Industrieentwicklung übergeben.

Literatur

- [1] Agrotechnische Forderungen an einen Tränkedosierer. IfM Potsdam-Bornim 1972 (unveröffentlicht).
- [2] Dressler, E.: Konzipierung, Bau und Erprobung eines Dosierers für Kälbertränke mit schwerpunktmäßiger Bearbeitung eines Dosiermechanismus. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Wiss. Abschlußarbeit/Diplomarbeit 1975.
- [3] Kraut, H.: Prinziplösung für die Steuerung eines Dosierers für Kälbertränke. IfM Potsdam-Bornim, Forschungsbericht 1975 (unveröffentlicht).

A 1574

Messung des Druckverlustes beim Rohrleitungstransport konzentrierter, grobdisperser Suspensionen

Dr.-Ing. M. Türk, KDT/Dipl.-Ing. H. Schmidt

Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR, Betriebsteil Potsdam-Bornim

Verwendete Formelzeichen

d	m	Rohrdurchmesser
d_L	mm	Bohrungsdurchmesser
h	mm	Höhendifferenz der Quecksilbersäule im U-Rohr-Manometer
l	m	Rohrlänge
m_{TMF}	kg	Masseanteil Trockenmischfutter
m_{ZR}	kg	Masseanteil Zuckerrübenschnitzel
Δp	Pa	statische Druckdifferenz
R_K	m	Krümmungsradius von Rohrkrümmern
Re	—	Reynoldszahl
s_R	m	absolute Rohrrauigkeit
Tr	%	Trockensubstanzgehalt
v	m/s	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
\dot{V}	m^3/s	Durchsatz
V	dm^3	Volumen
ζ	—	Widerstandszahl
λ	—	Rohrreibungszahl
ρ	kg/m^3	Dichte
ρ_{Hg}	kg/m^3	Dichte von Quecksilber
ρ_{H_2O}	kg/m^3	Dichte von Wasser

1. Problemstellung

Der statische Druckverlust Δp bei laminarer und stationärer Rohrströmung hat zur Kennzeichnung des Fließverhaltens der Fördermedien entscheidende Bedeutung. Da konzentrierte Suspensionen aus vielen Bereichen der chemischen Verfahrenstechnik sowie der Land- und Nahrungsgüterwirtschaft zumeist ein nicht-Newtonsches Verformungsverhalten aufweisen, können mit Hilfe der integralen Meßgrößen Druckverlust Δp und Durchsatz \dot{V} Fließkurven bestimmt und verallgemeinerungsfähige Bemessungsgrundlagen für die Rohrförderung abgeleitet werden. Auch zur Untersuchung der Reibungsverluste beim Durchströmen von örtlichen Widerständen (Armaturen und Formstücke) ist die reproduzierbare Bestimmung der Druckverlustanteile die einzige experimentelle Möglichkeit.

Beim Fördern von konzentrierten Suspensionen mit grobdispersen Komponenten, z. B. mit Zuckerrübenschnitzeln [1], ergeben sich erhebliche Probleme bei der Messung von Druckdifferenzen. Ist weiterhin die gleichzeitige Erfassung von Druckverlusten an mehreren Bauteilen einer Rohrleitung notwendig, so sind

bekanntes Meßverfahren (Bild 1) mit vertretbarem Aufwand nicht mehr einsetzbar. Der Nachteil dieser Meßprinzipien ist meist eine hohe Störanfälligkeit, vor allem der notwendige wiederholte Abgleich sowie die Verstopfungsgefahr bei angebohrter Meßleitung. Daher wurde im Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim, Betriebsteil Potsdam-Bornim, ein funktions-sicheres Meßkammerprinzip entwickelt und erprobt, wobei das Fördermedium durch eine großflächige Gummimembran von der druckübertragenden Flüssigkeit getrennt und der Differenzdruck mit Hilfe eines U-Rohr-Manometers angezeigt wird.

2. Aufbau und Wirkungsweise des Membrankammer-Meßverfahrens

Die Messung der statischen Druckdifferenzen Δp erfolgt mit Hilfe von Membrankammern (Bild 2), die mit Flanschen vor und hinter dem zu untersuchenden Bauteil in der Rohrleitung angeordnet und über unelastische, wassergefüllte Schläuche mit Quecksilber-U-Rohr-Manometern verbunden sind. Die U-Rohr-Manometer können für mehrere nacheinander durchströmte Bauteile in Reihe geschaltet und visuell abgelesen oder fotografiert werden. Eine Membrankammer (Bild 3) besteht im wesentlichen aus einem runden Behälter a von etwa 200 mm Durchmesser, den Rohrstücken mit Flanschen b, deren Innendurchmesser mit dem des zu untersuchenden Bauteils übereinstimmen muß, sowie aus dem oben angeordneten Flansch c zur Befestigung des Deckels d mit der Gummimembran e. Durch einen Ab-laßstutzen f, der mit einem Schnellschlußschieber abgesperrt ist, kann eine Entleerung und Reinigung der Membrankammer erfolgen.

Die Gummimembran e besteht aus dünnem Gummi (≈ 1 mm) und hat einen freien Durchmesser von 200 mm. Sie kann in der Mitte etwa 15 mm durchhängen und ist in diesem Bereich nahezu ideal biegeschlaff. Der Raum zwischen Membran e und Deckel d wird so mit Wasser gefüllt, daß die Membran eine ebene Fläche bilden kann. Eine ebenfalls mit Wasser gefüllte durchsichtige Polyäthylen-Schlauchleitung ver-

bindet den Schlauchstutzen g des Absperrhahns h mit einem Schenkel des U-Rohr-Manometers. Ist an beiden Schenkeln jeweils eine Membrankammer angeschlossen, wird der Differenzdruck richtig angezeigt, wenn sich diese in gleicher geodätischer Höhe befinden. Die Glasröhren der U-Rohr-Manometer haben einen lichten Durchmesser von etwa 1,5 mm, so daß sich der Spannungszustand der Membran e auch bei maximalem Meßbereich (rd. 1000 mm Hg, d. h. 123,23 kPa) praktisch nicht verändert. Zur Bestimmung des Zahlenwerts des Differenzdrucks ist die Wasserfüllung zu berücksichtigen, so daß sich folgende Beziehungen ergeben:

$$\Delta p = \rho h g \quad (1)$$

$$\rho = \rho_{Hg} - \rho_{H_2O} = 12565,8 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta p = (\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) h g = 123,23 \cdot h \quad (2)$$

So entsteht ein abgeschlossenes hydraulisches System zur Differenzdruckmessung, das unabhängig von der Konsistenz und von der Korngrößenzusammensetzung des Fördermediums funktionssicher eingesetzt werden kann. Folgende Besonderheiten sind weiterhin zu beachten:

- Sorgfältige Entlüftung der gesamten Meßeinrichtung
- gleiches Wasservolumen in den Deckeln der Membrankammern (etwa 150 bis 400 cm^3)
- gleiches Material und etwa gleiche Länge der Schlauchleitungen (z. B. Polyäthylen-Schlauchleitung PE-hart 10 \times 14 mm)
- gleiche geodätische Höhe der Membrankammern und der U-Rohr-Manometer. Dieses Meßprinzip wurde unter der Voraussetzung von Laminarströmung entwickelt, wobei angenommen wird, daß diese Strömungsform auch in den mit dem Fördermedium gefüllten Membrankammern erhalten bleibt. Der angezeigte Differenzdruck Δp setzt sich dann aus den Widerständen sämtlicher zwischen den Membrankammern angeordneten Bauteile zusammen, so daß entsprechende Korrekturen notwendig sind. Die durch die Flanschverbindungen entstehenden Anteile des Differenzdrucks können bei sorgfältigem Zusammenbau der Meßrohrleitungen zumeist vernachlässigt werden.

Anstelle von Quecksilber können auch andere