

Grundlagen der Landtechnik

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

Herausgegeben mit Unterstützung durch die
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
Braunschweig-Völkenrode (FAL)

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Institut
für landtechnische Grundlagenforschung

Grundl. Landtechnik Bd. 36 (1986) Nr. 4, S. 97 bis 132

Sensoren und Aktoren für eine geschwindigkeitsabhängige Durchflußregelung an Flüssigmist-Tankwagen

Von Rüdiger Krause und Heinrich Peters,
Braunschweig-Völkenrode*)

*Mitteilung aus dem Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
Braunschweig-Völkenrode*

DK 631.333.4:631.862:62-52

Zur Verbesserung der Applikation von Pflanzenschutzmitteln, Dünger und Saatgut kommen zunehmend Dosiercomputer zum Einsatz. Exaktes Düngen mit Flüssigmist zum Schutze der Umwelt und der Ressourcen dagegen hängt bislang trotz verbesserter Verteilorgane vom exakten Einhalten der Arbeitsgeschwindigkeit durch den Fahrer ab. Der Einsatz vorhandener Bordcomputer bietet sich zwar an, scheiterte jedoch bisher an dem Fehlen für Flüssigmist geeigneter, preiswerter Sensoren und Aktoren.

In der vorliegenden Arbeit wurden eine Vielzahl von Durchflußmessern und einige Regelventile im Hinblick auf ihre Eignung untersucht und verschiedene Lösungen einer geschwindigkeitsabhängigen Durchflußregelung zur Flüssigmist-Ausbringung vorgeschlagen. Eine Alternative zu elektronischen Regelsystemen bietet der geregelte hydrostatische Antrieb einer volumetrisch fördernden Tankwagenpumpe.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Wachsende Anforderungen bezüglich der Umweltneutralität landwirtschaftlicher Produktionsverfahren und steigende Kosten der Betriebsmittel zwingen zu einer ständigen Weiterentwicklung bekannter Geräte und zum sparsamen Umgang mit Betriebsmitteln. Dies gilt insbesondere auch beim Ausbringen von Flüssigmist, der Stickstoff und andere Pflanzennährstoffe enthält.

Demnach ist es das Ziel der Entwicklung, beim Ausbringen von Flüssigmist und Klärschlamm eine exakte Dosierung und Verteilung auch kleiner Gaben organischer Schlämme auf dem Feld zu erreichen

*) Dr.-Ing. Rüdiger Krause, Wiss. Oberrat, und Dipl.-Ing. H. Peters sind Mitarbeiter am Institut für Technologie (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

- zur Verminderung von Umweltbelastungen
- zum sparsamen Mitteleinsatz und
- zur Vereinfachung der Kontrolle für Auftraggeber und Auftragnehmer bei überbetrieblichem Maschineneinsatz.

Die Aufgabe besteht darin, mit einer Regelung die flächenbezogene Ausbringungsmenge von Flüssigmist V'' (m^3/ha) unabhängig von Arbeitsgeschwindigkeit v_f (m/s) (Schlupf, Gang und Motor- bzw. Zapfwelldrehzahl), Füllstand oder Druck im Faß und Schieberstellung konstant zu halten:

$$V'' = \frac{\dot{V}}{v_f \cdot b} = \text{const.}$$

Wird die Arbeitsbreite b (m) als konstant angenommen, so muß der Durchsatz \dot{V} (l/min) proportional zu v_f eingestellt werden.

2. Lösungen

Bei Tankwagen wird die Ausbringung derzeit nahezu ausschließlich über die vom Fahrer eingestellte Fahrgeschwindigkeit dosiert. Das ist unsicher und schwierig. Zur automatischen Regelung der Ausbringungsmenge bieten sich zwei Lösungsalternativen an, Bild 1:

1. Stromteilung und Rückführen der geschwindigkeitsabhängigen Überflußmenge in den Tank bei konstanter Förderleistung (Pumpentankwagen) bzw. bei konstantem Druck (Drosselung Kompressortankwagen);
2. Regeln der Förderleistung der Pumpe nach der Fahrgeschwindigkeit durch Drehzahlregelung.

2.1 Lösungsalternative 1

Die Ausbringungsmenge wird mittels Durchfluß- und Geschwindigkeitsaufnehmer erfaßt und der Durchsatz über einen Drei-Wege-Hahn oder mittels je eines Ventils im Bypass und im Hauptstrom eingestellt, wobei das Bypassventil als Regelventil (RV) und das Hauptstromventil als Arbeitsventil (AV) eingesetzt wird, Bild 2.

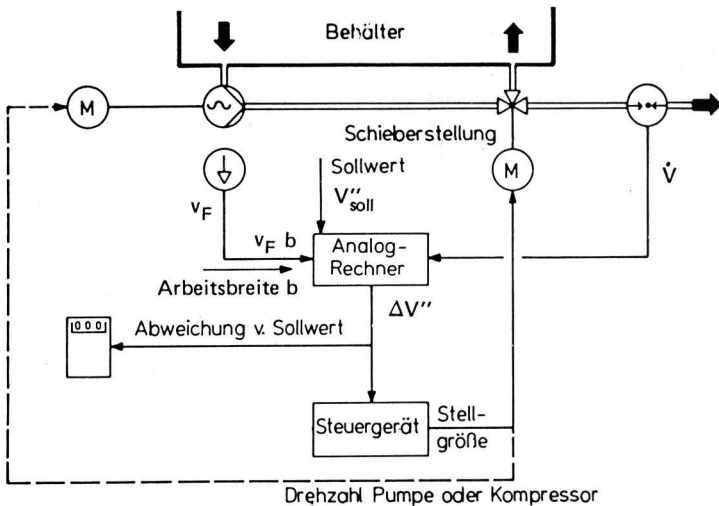


Bild 1. Prinzip einer geschwindigkeitsabhängigen Durchflußregelung durch Verstellen des Rückflusses in den Behälter bzw. (gestrichelte Linie) durch Regeln der Förderleistung der Pumpe.

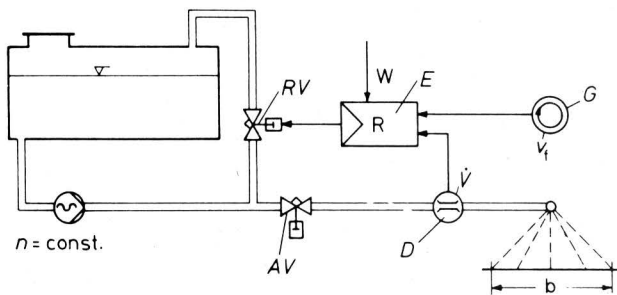


Bild 2. Elemente des Durchfluß-Regelsystems.

Die wesentlichen Elemente dieses Systems [1] sind:

- Die Regelelektronik (E),
- ein Geschwindigkeitsaufnehmer (G),
- ein Durchflußaufnehmer (D),
- das (die) Absperrorgane, Regelorgane (AV, RV).

Dieses System ermöglicht eine sensible Regelung auch kleiner Mengen, verursacht jedoch einen höheren Druckverlust bei großem Durchsatz. Die Fahrgeschwindigkeit kann in Grenzen frei gewählt werden. Die Drehzahl der Pumpe bzw. der durch den Kompressor erzeugte Vordruck darf in Grenzen schwanken, ohne daß die Ausbringmenge die Toleranzgrenzen überschreitet. Ein weiterer Vorteil dieser Bypassanordnung ist ein konstanter Druck auf das Regelventil.

2.1.1 Elektronik

Mit Monitoren zur Überwachung von Arbeitsgängen in der Außenwirtschaft sowie mit elektronischen Geräten zum Regeln der Ausbringmenge ("Dosiercomputer") für die Applikation von Pflanzenschutzmitteln und Mineraldünger hat die Meß-, Steuer- und Regeltechnik in der Agrarproduktion ebenso Eingang gefunden wie z.B. beim Dosieren und Verteilen von Streusalz und Split im Straßenwinterdienst. Es kann folglich davon ausgegangen werden, daß für die vorliegende Regelaufgabe eine geeignete Regelelektronik im Prinzip verfügbar ist [2]. Im Hinblick auf die verschiedenen Konzeptionen von Regelgeräten ist anzustreben, einen zentralen Bordcomputer mit normierter Schnittstelle durch entsprechende Programmierung für die verschiedenen Regelfunktionen am Schlepper und am Gerät einzusetzen und in Zukunft einen Datenverbund von Bordcomputer und Betriebscomputer herzustellen.

2.1.2 Sensoren

Schlüssel zur Nutzung der Vorteile der Elektronik ist die Sensortechnik. Einzelne Sensoren – wie z.B. zur Bestimmung der Geschwindigkeit über Grund – für die Anwendung bei verschiedenen Arbeitsgängen können fest am Schlepper installiert sein, andere ein- und produktspezifische oder sehr preiswerte Sensoren können an den Geräten verbleiben. Eine sichere Übertragung der Meßwerte an die Regelelektronik muß sichergestellt sein, wobei im allgemeinen der Digitaltechnik der Vorzug zu geben sein wird.

Die Anforderungen an die Elektronik ergeben sich aus den Stoffkennwerten von Flüssigmist, den Konstruktionsdaten der Tankwagen, den eingesetzten Sensoren und Aktoren, den Einsatzbedingungen und den bereits genannten Toleranzen für die Gleichmäßigkeit der Verteilung. Gerade für den Stoff "Flüssigmist" als Grobsuspension mit stark veränderlicher Konsistenz und unkontrollierbarem Anteil an Fremdkörpern und Feststoffen sowie für den rauen Feldeinsatz ist die Auswahl geeigneter mikroelektronikkompatibler Sensoren jedoch schwierig. Bei dem relativ geringen Wert des Flüssigmistes sind hohe Investitionskosten nicht vertretbar, so daß einzelne technisch geeignete Sensoren aus Kostengründen nicht oder nur bei Mehrfachnutzung in Frage kommen. Hier werden der Meßgrößen-Aufnahmetechnik neue Aufgaben gestellt.

Geschwindigkeitsaufnehmer

Die Geschwindigkeit über Grund ist eine entscheidende Einfluß- und Störgröße. Für ihre exakte Erfassung kommen angetriebene Räder wegen des großen positiven Schlupfes grundsätzlich nicht in Frage, so daß für Allrad-Schlepper eine Abnahme vom Rad oder an der Tachowelle ausscheidet. Auch ein Rad des gezogenen Tankwagens ist für die Geschwindigkeitsermittlung nicht geeignet, wurden doch unter schwierigen Feldbedingungen Werte für den negativen Schlupf bis 50 % gemessen. Zur Zeit wird daher ein Nachlaufrad mit Impulsgeber benutzt, das in der Spur des Tankwagens läuft und kinematisch so angeordnet ist, daß selbst ein Zurückstoßen auf dem Acker ohne Gefahr für diesen Geschwindigkeitsaufnehmer möglich ist. Bei Kurvenfahrt ist mit einem dem Kurvenradius entsprechenden Fehler zu rechnen. Dieses Nachlaufrad wird jedoch nur als Übergangslösung betrachtet.

Hinreichend genaue Geschwindigkeitsaufnehmer z.B. nach dem Doppler-Radar-Prinzip sind grundsätzlich verfügbar und dürften trotz einiger Einsatzprobleme und der mit der Überwindung verbundenen notwendigen Trägheit in absehbarer Zeit zur Ausrüstung des Schleppers gehören und dann für verschiedene Dosieraufgaben in der Pflanzenproduktion genutzt werden können [3, 4]. Im Rahmen der Entwicklung des beschriebenen Regelsystems wird z.Zt. gemeinsam mit dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der FAL mit einem Radaraufnehmer experimentiert.

Die aktuelle Geschwindigkeit des Regnerorschubes von Flüssigmist-Verregnungsanlagen kann mittels einer Meßrolle an dem eingezogenen Schlauch abgetastet und zur Regelung der Ausbringmenge herangezogen werden.

Durchflußaufnehmer

Für grobdisperse Suspensionen mit wechselnden Viskositäten wie Flüssigmist bleiben aus der Vielzahl der Durchflußaufnehmer [5], Tafel 1, für die vorliegende Aufgabe nur wenige im Prinzip geeignete Sensoren übrig. Neben dem als Referenzaufnehmer dienenden induktiven Durchflußmesser wurden Sensoren nach dem Wirkdruckverfahren sowie nach dem hydrodynamischen, kalorimetrischen und nach dem Ultraschallverfahren auf einem Laborprüfstand, Bild 3, mit Wasser und mit Flüssigmist untersucht. Der induktive wie der Ultraschallaufnehmer bringen ein dem Durchsatz proportionales Signal, Bild 4. Alle Druckaufnehmer sowie der hydrodynamische und der kalorimetrische Sensor zeigen eine quadratische Abhängigkeit zwischen Durchsatz und Signal und bedürfen daher eines radifizierenden Meßumformers.

Zur Beurteilung der Durchflusßaufnehmer wurden die folgenden Kriterien herangezogen:

- Einfluß von Dichte, Viskosität und Feststoffanteil des Mediums auf Meßwert und Funktion,
- Genauigkeit,
- Reaktionsgeschwindigkeit,
- Druckverlust,
- Empfindlichkeit gegen Schwingungen,
- Bauaufwand/Preis.

| Wirkdruckverfahren | | | |
|--------------------|--|--|--|
| Prinzip | Normdüse DIN 1952 | Venturidüse DIN 1952 | Rohrbogen |
| Symbol | | | |
| Gleichung | $\dot{V} = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}$ | $\dot{V} = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}$ | $\dot{V} = k \cdot A \sqrt{\frac{R}{2D}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}$ |
| Prinzip | stat. Druck | Rohrleitung | |
| Symbol | | | |
| Gleichung | $\dot{V} = A \cdot k \cdot \sqrt{p_{st}}$ | $\dot{V} = A \cdot k \cdot \sqrt{\Delta p}$ | |

| Prinzip | Elektromagn. Verfahren | Kalorimetr. Verfahren | |
|------------------|--------------------------------------|---|-----------------------------------|
| | Induktive Durchflußm. | Messung der Heizleistung | Hitzdraht-anemometer |
| Symbol | | | |
| Gleichung | $\dot{V} \sim \frac{E}{B}$ | $\dot{V} \sim \frac{W}{\Delta S}$ | $\dot{V} \sim \frac{W}{\Delta S}$ |
| Neuere Verfahren | | | |
| Prinzip | Hydrodynamisch. Sensor | Ultraschall | gyrostat. Verf. (Corioliskräfte) |
| Symbol | | | |
| Gleichung | $\dot{V} = A \cdot k \cdot \sqrt{F}$ | $\dot{V} = A \cdot k \cdot (\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1})$ | $\dot{m} \sim \alpha$ |

| Neuere Verfahren | | | |
|------------------|-------------------------------------|---|---|
| Prinzip | Markierungsverfahren | kernmagnetische Resonanz | optisch-elekt. Korrelation opt. Rauschsignale |
| Symbol | | | |
| Gleichung | $\dot{V} = A \cdot \frac{L_M}{t_M}$ | $\dot{V} = k \cdot (\frac{U}{U_0} - 1)$ | $\dot{V} = A \cdot \frac{L_M}{t_M}$ |
| Prinzip | Vortex-Shedding (Karmansche Wirbel) | | |
| Symbol | | | |
| Gleichung | $\dot{V} \sim A \cdot f_w$ | | |

Tafel 1. Übersicht über Verfahren der Durchflusßmessung.

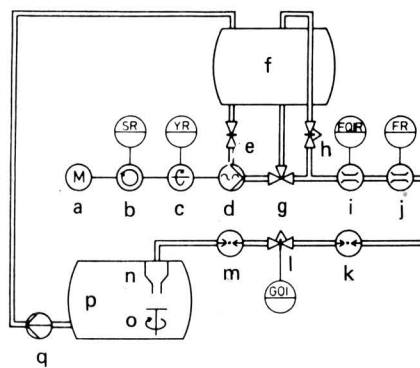


Bild 3. Laborprüfstand zur Untersuchung von Elementen für die Durchflusßregelung bei der Flüssigmist-Ausbringung.

- a stufenlos regelb. Drehstr.-Motor
- b Drehzahlmessung mit Registrierung
- c Drehmomentmessung m. Registr.
- d Exzentrerschneckenpumpe
- e Absperrschieber
- f Behälter
- g Drei-Wege-Hahn
- h Regelventil im Bypass
- i Induktiver Durchflusßmesser
- j Ultraschall-Durchflusßmesser (m. Registr. bzw. Druckdifferenzmessung m. Registr.)
- k Messung des stat. Drucks
- l Regelventil (m. Registr. des Weges)
- m Messung des stat. Drucks
- n Düse
- o Angetriebener Prallteller
- p Behälter
- q Kreiselpumpe

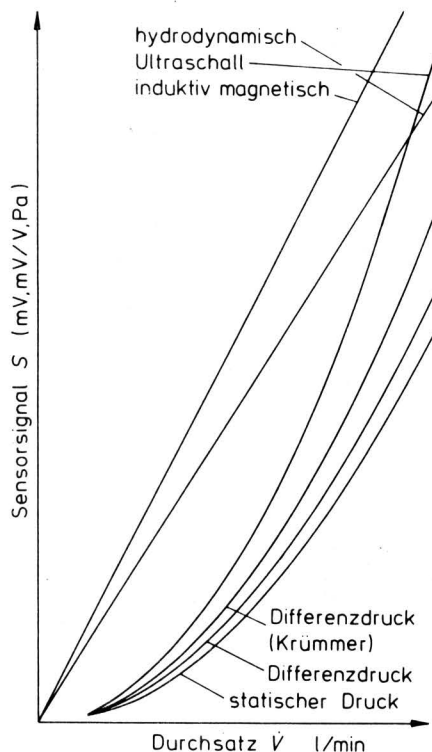


Bild 4. Signal als Funktion des Durchsatzes für verschiedene Durchflusßaufnehmer.

Tafel 2 zeigt eine Bewertung der Aufnehmer entsprechend den genannten Kriterien. Dichteänderungen bewegen sich bei Flüssigmist in engen Grenzen und spielen daher kaum eine Rolle, während die Viskosität stark variiert. Der hydrodynamische Sensor und zwei der Wirkdrucksensoren müßten daher für Flüssigmist unterschiedlicher Viskosität jeweils neu kalibriert werden. Der Ultraschallaufnehmer ist nicht geeignet für hohe Trockenmassegehalte. Wiederum der Ultraschallaufnehmer und ebenso das Hitzdrahtanemometer benötigen in der handelsüblichen Form beträchtliche Reaktionszeiten, Bild 5.

| Prinzip | Wirldruckverfahren | | | Elektromagn. Verfahren | Kalorimetr. Verfahren | Neuere Verfahren | |
|---------------|---|--|--|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|
| | stat. Druck | Venturidüse DIN 1952 | Rohrbogen | | | Hydrodynamisch. Sensor | Ultraschall |
| Symbol | | | | | | | |
| Gleichung | $\dot{V} = A \cdot k \cdot \sqrt{p_{st}}$ | $\dot{V} = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}$ | $\dot{V} = k \cdot A \sqrt{\frac{R}{2D}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}$ | $\dot{V} \sim \frac{E}{B}$ | $\dot{V} \sim \frac{W}{\Delta p}$ | $\dot{V} = A \cdot k \sqrt{F}$ | $\dot{V} = A \cdot k \left(\frac{1}{l_2} - \frac{1}{l_1} \right)$ |
| Viskosität | — | — | ++ | ++ | Wärmeleitung + | — | ++ |
| Dichte | + | + | + | ++ | + | + | ++ |
| Feststoffe | ++ | ++ | ++ | ++ | — | — | + (TS ≤ 5%) |
| Genauigkeit | + | + | + | ++ | + | + | ++ |
| Reaktionszeit | ++ | ++ | ++ | + | — | ++ | — |
| Druckverlust | + | + | ++ | ++ | + | + | ++ |
| Schwingungen | + | + | ++ | ++ | ++ | — | ++ |
| Bauaufwand | ++ | + | + | — | + | + | — |

Tafel 2. Bewertung von Verfahren der Durchflußmessung.

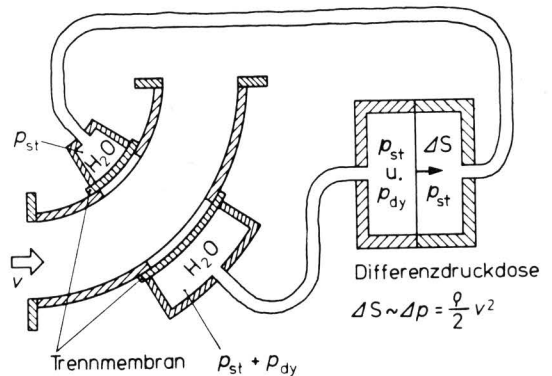


Bild 6. Durchflußmessung über den Differenzdruck an einem 90°-Rohrkrümmer.

2.1.3 Absperrorgane

Absperrorgane spielen in dem diskutierten Regelsystem eine wichtige Rolle. Es sollen nicht nur die beiden Funktionen "Umpumpen" und "Ausbringen" – teils getrennt, teils gleichzeitig – einstellbar sein, sondern auch beim Ausbringen die Durchsätze über einen sehr weiten Bereich geregelt werden. Neben dem für Pumpentankwagen üblichen Drei-Wege-Hahn wurde auch eine Auflösung in zwei getrennte Absperrorgane – jeweils eines im Hauptstrom und im Bypass – untersucht (Bild 2). An Kompressortankwagen muß ohnehin das Absperrorgan als Stellglied benutzt werden.

Es wurden insgesamt fünf verfügbare und für Flüssigmist eingesetzte Absperrorgane unterschiedlicher Bauart [6] auf ihre Eignung überprüft:

- Drei-Wege-Hahn
- Zylinderhahn
- Plattenschieber
- Quetschventil (Membranverschluß)
- Schlauchklemme.

Dabei wurden die wichtigsten Kriterien:

- Freier Querschnitt als Funktion des Schließweges
- Form des freien Querschnitts (Spalt oder Kreisfläche)
- Durchfluß als Funktion des Schließweges
- Schließweg und nutzbarer Anteil
- Anfälligkeit gegenüber Fremdkörpern
- Verstopfung, Festsitzen
- Verlustziffer bzw. K_{VS} -Wert (Volumenstrom \dot{V} von Wasser in m^3/h bei $\Delta p = 0,98$ bar und $5 < t < 30$ °C)
- Bauaufwand/Preis

in einer stationären Meßstrecke untersucht und zur Beurteilung herangezogen.

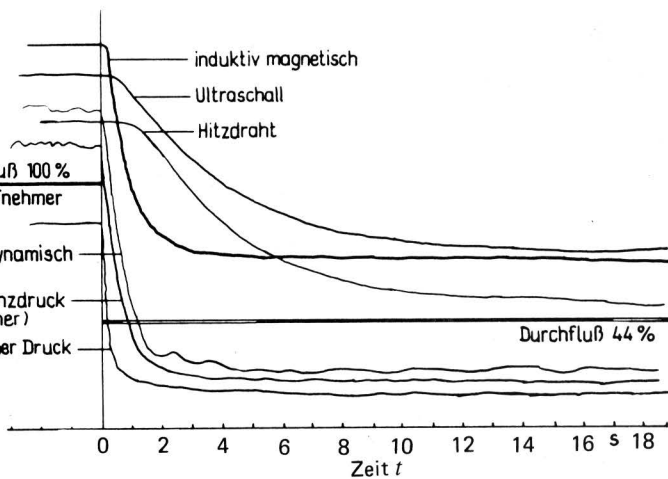


Bild 5. Zeitverhalten verschiedener Durchflußmeßgeräte.

Der hydrodynamische Sensor reagiert, wie sich in Prüfstand- und Felduntersuchungen zeigte, empfindlich auf Schwingungen in Strömungsrichtung; auch die Wirldruckverfahren sind nicht unempfindlich gegen Schwingungen, insbesondere bei Luftblasen in der Sperrflüssigkeit. Der statische Druck steigt zwar sehr genau mit dem Quadrat des Durchsatzes, er hängt jedoch auch von dem Strömungswiderstand im Verteilsystem ab. Der Austausch des Verteilers z.B. verlangt eine neue Eichkurve. Verstopfungen könnten zunächst als Anstieg des Durchflusses gedeutet werden. Der statische Druck kann daher nur bedingt als Meßgröße für die genannte Regelaufgabe benutzt werden.

Der induktive Aufnehmer erfüllt technisch alle Anforderungen, kommt aber von seinem derzeitigen Preis her und wegen seiner Stromversorgung (220 V) nicht in Frage. Neuerdings zeichnet sich jedoch eine Entwicklung zu einfachen, preisgünstigeren Aufnehmern mit 12V-Versorgung ab, so daß die derzeitige Beurteilung möglicherweise nur befristet gelten wird. Erste Messungen mit einem derartigen preiswerten Gerät zeigen ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit und Genauigkeit, jedoch eine starke Empfindlichkeit gegen Störungen der Strömung.

Damit zeigt sich, daß völlig befriedigende Lösungen z.Zt. nicht zur Verfügung stehen. Der im Institut für Technologie entwickelte Rohrkrümmer mit Druckdifferenzmessung ohne Einfluß der Viskosität des Mediums [1], Bild 6, könnte daher insbesondere mit Hilfe einer integrierten Linearisierung, Signalfilterung, Verstärkung und Analog/Digital-Wandlung eine brauchbare Lösungsalternative darstellen.

Durchfluß als Funktion des Schließweges

Während der freie Querschnitt bei allen untersuchten Absperrorganen mit Ausnahme der Schlauchklemme nahezu linear mit dem Schließweg abnimmt, ändert sich der Durchfluß sehr unterschiedlich. Die Durchflußcharakteristik entscheidet sich mit über die Eignung.

Bild 7 zeigt für die Schlauchklemme über fast 80 % des Schließweges kaum eine Veränderung des Durchsatzes, der dann gegen Ende fast schlagartig abbricht. Eine solche Charakteristik ist für eine Regelung denkbar ungeeignet. Auch eine hyperbolische Abhängigkeit, wie sie für manche Kugelhähne zutrifft, ist wenig geeignet.

Drei der untersuchten Absperrorgane erfordern zahlreiche Umdrehungen einer Stellspindel zum Schließen. Die erforderlichen Drehmomente wurden nicht ermittelt, da sie hier eine untergeordnete Rolle spielen.

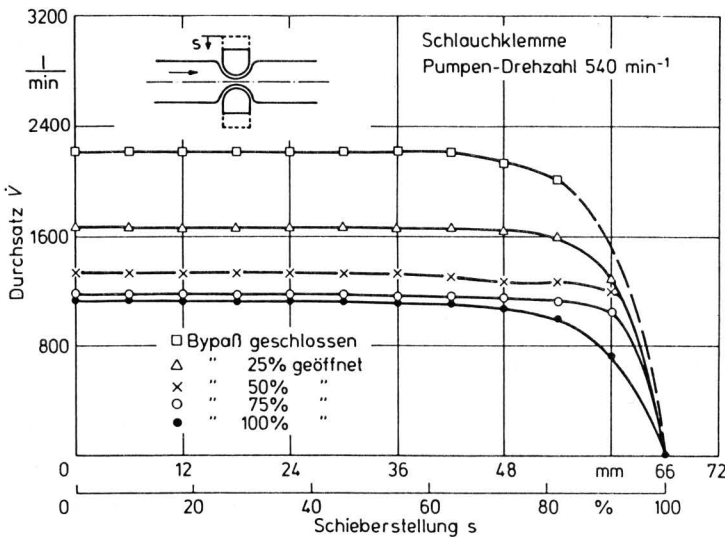


Bild 7. Durchsatz als Funktion des Schieberweges für eine Schlauchklemme; Öffnung des Bypass-Ventils als Parameter.

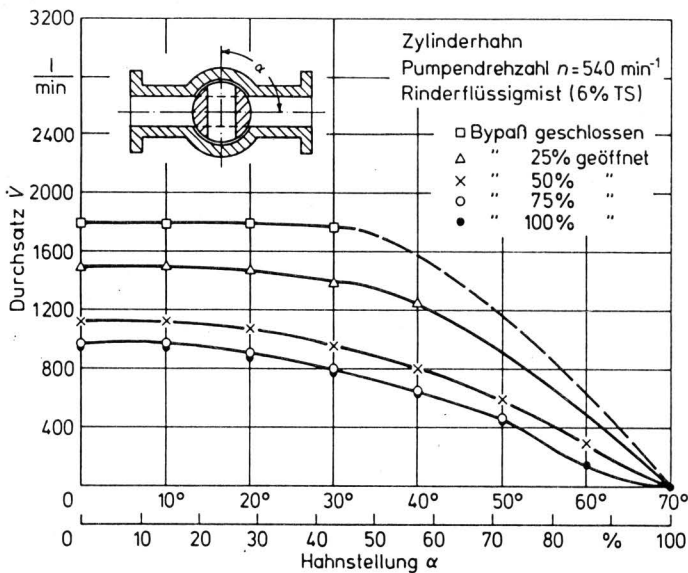


Bild 8. Durchsatz als Funktion des Schließwinkels für einen Zylinderhahn; Öffnung des Bypass-Ventils als Parameter.

Der Zylinderhahn, Bild 8, weist mit 90°-Schließwinkel einen kleinen Stellbereich (hohe Stellgeschwindigkeit) mit einem hohen für die Regelung nutzbaren Anteil von nahezu 50 % auf; ähnlich verhält sich der Drei-Wege-Hahn, Bild 9.

Die weiteren untersuchten Absperrorgane liegen zwischen diesen beiden Grenzfällen. Annähernd runde Öffnungen sind weniger verstopfungsempfindlich als schlitzzartige gleicher Querschnittsfläche. Der Zylinderhahn schließt zwar – ähnlich wie die Schlauchklemme – mit einem Spalt, neigt jedoch wenig zum Verstopfen und Festsitzen, so daß er den genannten Anforderungen einer Lösung mit zwei getrennten Absperrorganen am besten entspricht, Tafel 3.

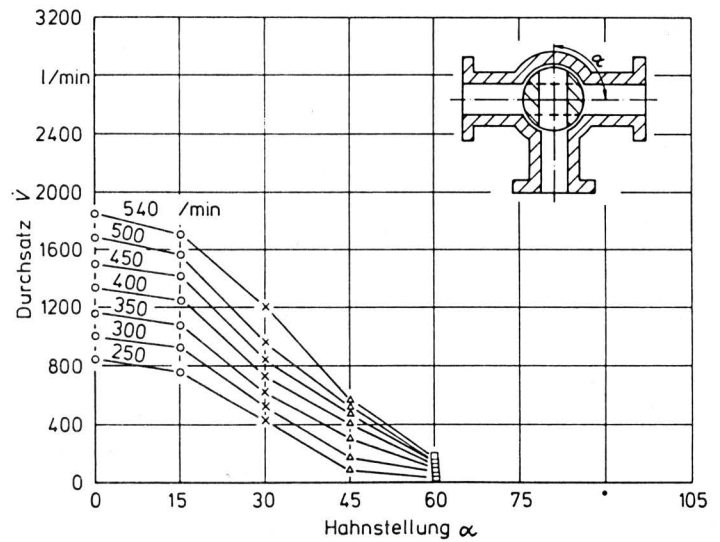


Bild 9. Durchsatz als Funktion des Schließwinkels für einen Drei-Wege-Hahn; Pumpendrehzahl als Parameter.

| Kriterium | 1 kombin. Absperrorgan | 2 getrennte Absperrorgane für Pumpen und Ausbringen | | | |
|--|------------------------|---|-----------------|---------------|----------------|
| | Drei-Wege-Hahn | Zylinderhahn | Plattenschieber | Quetschventil | Schlauchklemme |
| Schließweg | + | + | - | - | - |
| Freier Querschnitt als Funktion des Schließweges | + | + | + | + | + |
| Form des freien Querschnitts | - | - | - | + | - |
| Durchfluß als Funktion des Schließweges | + | + | - | - | - |
| Nutzbare Anteil des Schließweges | + | + | + | + | - |
| Anfälligkeit gegen Fremdkörper | + | + | - | - | - |
| Verstopfen, Festsitzen | + | + | - | + | + |
| Drosselverluste | - | - | - | + | + |
| Baufwand Preis | + | - | - | - | + |

Tafel 3. Bewertung von Absperrorganen.

Drosselverluste

Die Drosselverluste Δp – bzw. der Leistungsbedarf zum Fördern von Flüssigmist –, Bild 10, unterscheiden sich für die untersuchten Absperrorgane gleichen Querschnitts trotz unterschiedlicher Widerstandsbeiwerte (K_{VS}) nur geringfügig.

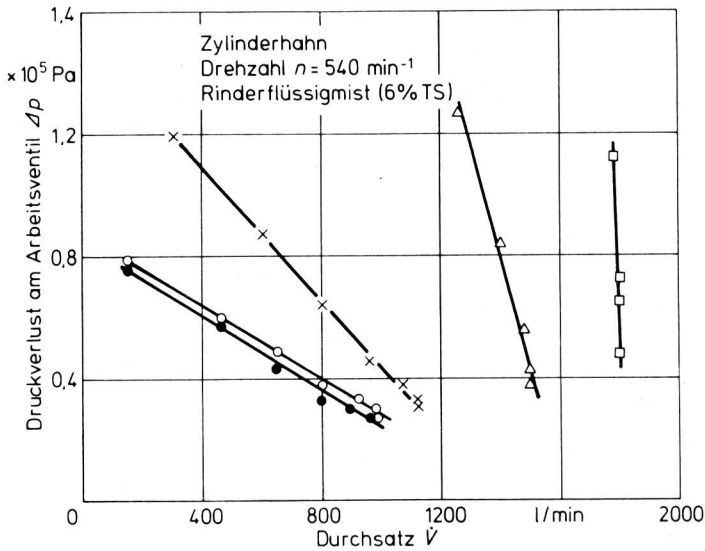


Bild 10. Druckverlust in Abhängigkeit vom Durchsatz für einen Zylinderhahn; Öffnung des Bypaß-Ventils als Parameter.

- Bypaß geschlossen
- △ " 25 % geöffnet
- x " 50 % "
- " 75 % "
- " 100 % "

Die Verlustziffer von Absperrorganen steigt jedoch exponentiell mit dem Grad der Drosselung. Durch entsprechende Sicherseinrichtungen muß das Überschreiten des zulässigen Höchstdruckes im System vermieden werden. In jeder Stellung des Drei-Wege-Hahns wächst der Leistungsbedarf für die Pumpe progressiv mit der Zapfwelldrehzahl bzw. mit dem Durchsatz, Bild 11; in dem vorliegenden Beispiel allerdings für das Umpumpen (Bypaß geöffnet, Schieber 30°, links) stärker als für das Ausbringen (Schieber 90°).

Wird – wie allgemein üblich – aus fahrtechnischen Gründen mit hoher Motordrehzahl gearbeitet (Drehmomentreserve) und die ausgebrachte Menge bei Bedarf mit dem Schieber gedrosselt, dann nimmt der Anteil des umpumpten Flüssigmistes zu bei nur leicht fallendem Leistungsbedarf (obere Begrenzungslinie $n = 540 \text{ min}^{-1}$). Der Energiebedarf ist in diesem Fall leicht 2,5- oder 3mal so hoch wie beim Reduzieren der Pumpendrehzahl bis zu dem gewünschten Durchsatz, bei völlig geöffnetem Schieber (untere Begrenzungslinie bei 90° Schieberstellung). Die gestrichelte vertikale Linie zeigt den Leistungsbedarf für den gleichen Durchsatz bei unterschiedlichen Schieberstellungen und Drehzahlen.

Die bereits erwähnte Lösung mit zwei getrennten Absperrorganen im Hauptstrom und im Bypaß (Bild 2) erscheint vorteilhaft wegen der höheren Regelgenauigkeit im Bereich kleiner Durchsätze, wegen des konstanten Druckes auf das Regelventil und wegen der Möglichkeit, über den Bypaß Zusatzstoffe in den Flüssigmist einzubringen. Die Regelung erfolgt dann so, daß zunächst das Arbeitsventil AV hydraulisch geöffnet wird, bis der gewünschte Durchsatz bei etwa mittlerer Öffnung des Regelventils RV erreicht wird.

Im gezeigten Beispiel, Bild 12, kann der Durchsatz dann bei minimalem Leistungsbedarf von etwa 950 bis 1800 l/min geregelt werden. Durch Reduzieren der Pumpendrehzahl, Bild 13, kann der

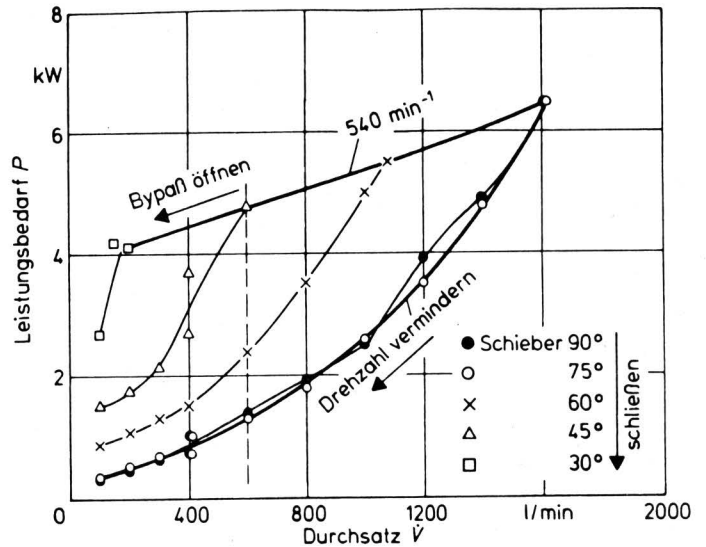


Bild 11. Leistungsbedarf der Meßstrecke mit Drei-Wege-Hahn in Abhängigkeit vom Durchsatz; Öffnung des Drei-Wege-Hahns und Pumpendrehzahl als Parameter.

gleiche Durchsatz bei dieser Lösung mit einem deutlich niedrigeren Leistungsbedarf erreicht werden. Entsprechend könnte bei einem Kompressortankwagen für geringe Ausbringmengen der Druck vermindert werden. (Hier sei jedoch auf die Abnahme der Arbeitsbreite hingewiesen, wenn passive Verteilelemente mit verminderter Beaufschlagung arbeiten.)

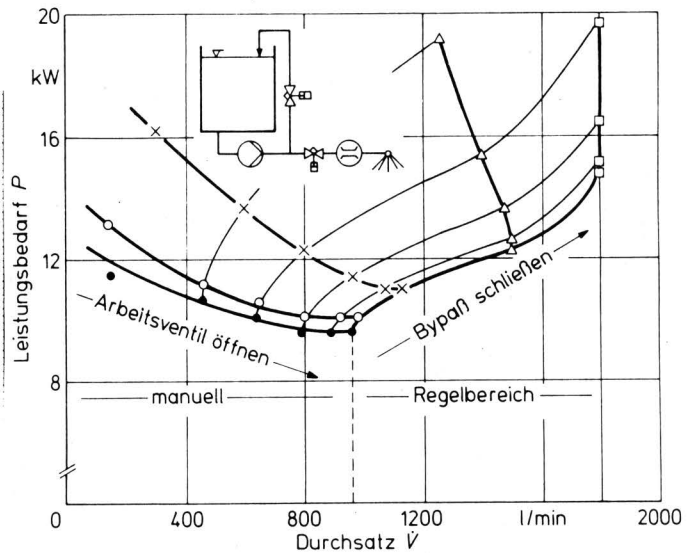


Bild 12. Leistungsbedarf der Meßstrecke in Abhängigkeit vom Durchsatz für zwei getrennte Ventile in Hauptstrom und Bypaß, Pumpendrehzahl konstant, Öffnung des Bypaß-Ventils als Parameter.

- Exzentrerschneckenpumpe
- Drehzahl $n = 540 \text{ min}^{-1}$
- Rinderflüssigmist 6 % TS
- Zylinderhahn
- Bypaß geschlossen
- △ " 25 % geöffnet
- x " 50 % "
- " 75 % "
- " 100 % "

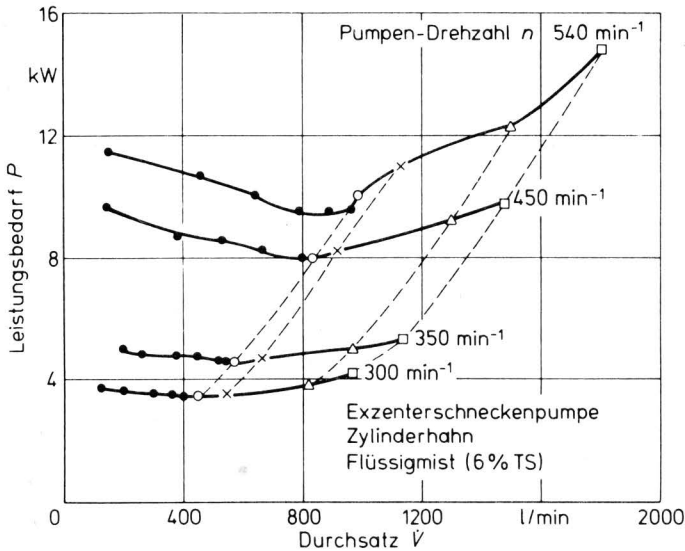


Bild 13. Leistungsbedarf der Meßstrecke in Abhängigkeit vom Durchsatz für zwei getrennte Ventile in Hauptstrom und Bypass, Pumpendrehzahl und Öffnung des Bypass-Ventils als Parameter, Bedeutung der Symbole siehe Bild 12.

2.2 Lösungsalternative 2

Wesentliche Nachteile der Alternative 1 sind die Notwendigkeit eines z.Zt. nicht verfügbaren, optimal geeigneten Durchflußaufnehmers sowie die Tatsache, daß die Durchflußregelung mittels Stromteilung bzw. Drosselung zu erheblichen Energieverlusten führt. Gesucht wurde daher auch nach einem von der Motordrehzahl unabhängigen Regelsystem, das direkt auf das Förderorgan wirkt. Dabei sollte die Notwendigkeit der Durchflußmessung vermieden werden.

Der Ersatz von Stellventilen durch drehzahlgesteuerte Pumpen-Antriebe ist in weiten Bereichen der Technik eingeleitet. Verschiedene Lösungsalternativen [7, 8] sind in Bild 14 zusammengefaßt. Hier bietet sich für eine volumetrisch fördernde (Exzentrerschnecke- oder Drehkolben-) Pumpe (bei stark wechselnder Konsistenz evtl. Kalibrieren erforderlich) ein hydrostatischer Antrieb an, der von der Arbeitsgeschwindigkeit über ein Stromregelventil (Proportionalventil mit Druckausgleich) gesteuert wird, Bild 15.

Eine vielleicht noch elegantere hydraulische Lösung ohne Elektronik ist der Einsatz einer Verdrängermaschine als Dosiereinheit (z.B. eine Orbitmaschine) mit Bodenantrieb (oder anstelle des Bodenantriebes ein geschwindigkeitsgesteuerter Schrittmotor), Bild 16. Die Dosiereinheit hat die Aufgabe, dem hydrostatischen Antrieb der Flüssigmistpumpe eine geschwindigkeitsproportionale Ölmenge zuzuteilen. (Es wurde davon ausgegangen, daß eine entsprechende Leistung an der Schlepperhydraulik abgenommen werden kann). Probleme könnte das hohe Anlaufmoment z.B. einer trockenen Exzentrerschneckenpumpe bieten. Das Anlaufmoment ist unter diesen Bedingungen nach eigenen Messungen je nach Stillstandszeit und Restmenge an Flüssigkeit im System 3- bis 10mal so hoch wie das normale Anlaufmoment. Verschiedene Hersteller bieten hier bereits mechanische Anlaufhilfen oder versuchen, durch entsprechende Materialwahl und Untermaße dem hohen Anlaufmoment zu begegnen. Vorteil einer solchen Lösung mittels Dosiereinheit dagegen ist der Wegfall des Durchflußmessers, der Regelelektronik sowie der Gelenkwelle. Damit könnte der Gesamtpreis für diese Regel- und Dosiereinheit unter dem von Lösung 1 liegen. Eine hohe Genauigkeit der Dosierung ist jedoch – insbesondere bei Bodenantrieb – nicht zu erwarten. Der Leistungsbedarf dürfte deutlich unter dem der Lösung 1 liegen.

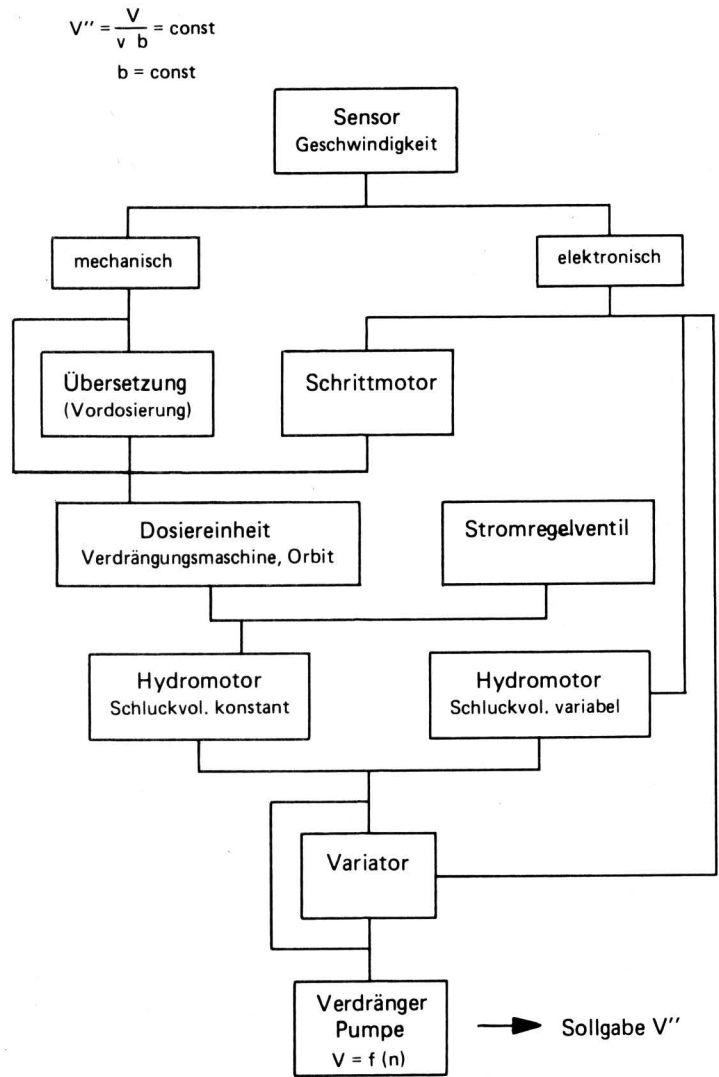


Bild 14. Möglichkeiten der geschwindigkeitsproportionalen Regelung der Ausbringung über die Regelung der Pumpendrehzahl.

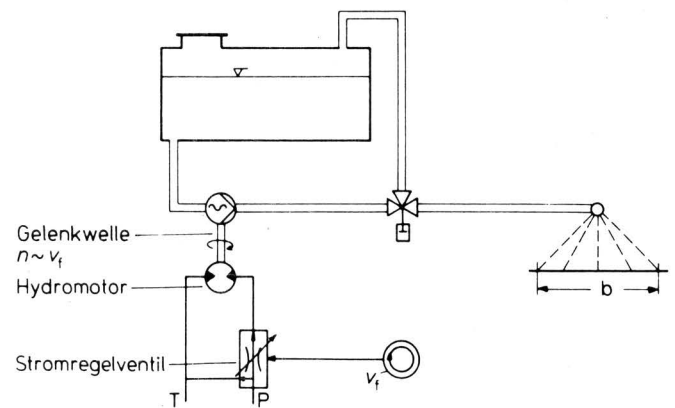


Bild 15. Regelung der Pumpendrehzahl über ein Stromregelventil.

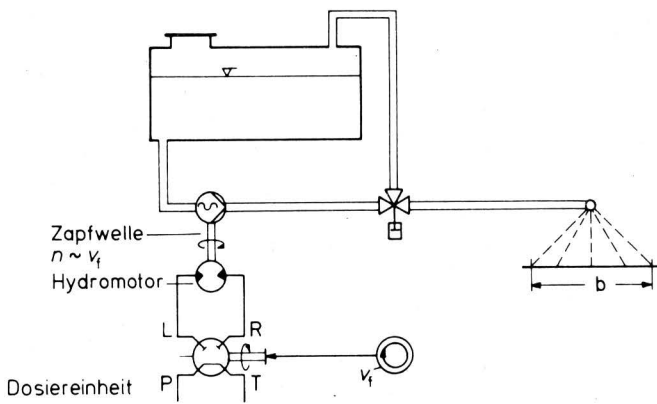


Bild 16. Regelung der Pumpendrehzahl über eine Dosiereinheit.

3. Zusammenfassung

Die Realisierung einer geschwindigkeitsabhängigen Durchflußregelung für das dosierte Ausbringen von Flüssigmist ist durch Auswahl geeigneter mikroelektronik-kompatibler Sensoren und Aktoren und deren gezielte Weiterentwicklung in greifbare Nähe gerückt. Eine Alternative zu der elektronischen Regelung könnte eine hydraulische Lösung mit Hilfe eines hydrostatischen Antriebes einer volumetrisch fördernden Pumpe darstellen.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Michaelsen, Th.*: Ein technisches Verfahren zum gezielten Düngen mit Gülle und Klärschlamm. *Grundl. Landtechnik* Bd. 33 (1983) Nr. 4, S. 103/107.
- [2] *Biller, R. u. R. Artmann*: Elektronik in der Pflanzenproduktion. DLG Manuskript, April 1986.
- [3] *Fichtel, H. u. S.M. Ismail*: Untersuchungen zur Messung der Arbeitsgeschwindigkeit von Landmaschinen mit Hilfe eines Radargerätes. *Grundl. Landtechnik* Bd. 32 (1982) Nr. 4, S. 136/40.
- [4] *Mertins, K.H. u. H. Göhlich*: Fahrgeschwindigkeitsmessung an landwirtschaftlichen Fahrzeugen. *Grundl. Landtechnik* Bd. 33 (1983) Nr. 1, S. 14/20.
- [5] *Meyer, D. u. B. Greiner*: Erfahrungen beim Einsatz von Durchfluß- und Mengennessern in der chem. Industrie. *Technisches Messen* mit Bd. 52 (1985) Nr. 1. S. 13/21.
- [6] • *Dubbel* – Taschenbuch für den Maschinenbau. 14. Aufl. Berlin/Heidelberg/ New York: Springer 1981.
- [7] • *Matthies, H.J.*: Einführung in die Ölhydraulik. Teubner Studienbücher Maschinenbau – Stuttgart: Teubner 1984.
- [8] *Erendal, J.*: Proportionalventile auch in der Landwirtschaft? *Internat. Tagung Landtechnik, Neu-Ulm, 25./26. Okt. 1984.*

Zykloidsche Scherversuche

Von Ingo Bolling, München*)

DK 631.43:625.03

Zykloidsche Scherversuche erlauben die Bestimmung des Verhaltens nachgiebiger Böden unter Rädern und bilden die kinematischen Vorgänge hierbei sehr genau nach. Wichtige Einflußgrößen sowie Vor- und Nachteile dieses Verfahrens werden angegeben und der Bezug zu bekannten Arten der Bodenuntersuchung hergestellt.

Für die analytische Beschreibung wird ein rheologisches Modell vorgeschlagen, das eine physikalisch sinnvolle Deutung des Problemes erlaubt und sich mit wenigen Gleichungen darstellen läßt.

1. Einleitung

Eine wichtige Aufgabe der Terramechanik ist die Berechnung des Systems Reifen-Boden bzw. Rad-Boden. Vor allem interessiert die Triebkraft, die ein Reifen mit einer bestimmten Radlast erzeugt, wenn er durch ein Drehmoment angetrieben wird. Zusammen mit dem Rollwiderstand kann aus diesen Größen der Wirkungsgrad der Kraftübertragung vom Reifen auf den Boden abgeleitet werden. Oft ist auch der Bodendruck zu ermitteln.

*) *Dipl.-Ing. I. Bolling ist Akad. Rat a.Z. am Lehrstuhl für Landmaschinen (Leiter: o. Prof. Dr.-Ing. K.Th. Renius, vorm.: em. o. Prof. Dr.-Ing. Dr. agr. h.c. W. Söhne) der TU München.*

Verfahren, die solche Berechnungen gestatten, sollen in erster Linie in der Tendenz zeigen, wie Fahrzeug- und Reifenparameter das Fahrverhalten auf unterschiedlichen aber "charakteristischen" Böden beeinflussen. So konnte *Söhne* [1] bereits 1964 rechnerisch, d.h. quantitativ, nachweisen, daß allradangetriebene Schlepper den hinterradangetriebenen um so stärker überlegen sind, je ungünstiger die Bodenverhältnisse sind; ein Ergebnis, das durch die Entwicklung der Absatzzahlen seither deutlich bestätigt wurde und Unternehmen, die sich diese Überlegungen frühzeitig zunutze machen, sicher erhebliche Marktvorteile brachte.

Ein Verfahren zur Berechnung des Fahrverhaltens von Reifen ist nur so gut wie das dabei eingesetzte Modell für den nachgiebigen Boden. Die zwei Hauptforderungen an solche Modelle sind, daß sie anschaulich formulierbar sein sollen, damit der Einfluß einzelner Parameter gut erkannt werden kann, und daß sie mit möglichem geringem Aufwand experimentell nachgeprüft werden können.

Dies läßt sich z.B. mit dem vor allem von *M. G. Bekker* [2] gestalteten Modell zeigen. Im Experiment wird dabei eine Stempelplatte vertikal in den Boden gedrückt und die notwendige Kraft abhängig von der Einsinktiefen z erfaßt, Bild 1a. Bezieht man die Kraft auf die Plattenfläche, erhält man den mittleren Druck p . Mit den vom Boden abhängigen Konstanten k_c , k_φ und n , der Plattenbreite b und der Bezugstiefe z_B lassen sich die Meßergebnisse für die meisten Böden mit der Gleichung:

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) \left(\frac{z}{z_B} \right)^n \quad (1)$$