

# Zum Fließverhalten von Flüssigfutmischungen

Dr.-Ing. D. Dähre/Dr. sc. techn. M. Türk, KDT

Forschungszentrum für Mechanisierung und Energieanwendung in der Landwirtschaft Schlieben der AdL der DDR

## Verwendete Formelzeichen

$A_k$	Pa · s <sup>n</sup>	Koeffizient
$A_n$		Koeffizient
$B_k$		Koeffizient
$B_n$		Koeffizient
H	m	Zylinderhöhe
k	Pa · s <sup>n</sup>	Konsistenzkoeffizient (Fließkennwert)
k'	Pa · s <sup>n</sup>	Konsistenzkoeffizient, unkorrigiert
M	N · m	Kraftmoment
$m_K$	kg	Massenanteil Kartoffeln
$m_{TMF}$	kg	Massenanteil Trockenmischfutter
$m_{TW}$	kg	Massenanteil Wasser
$m_{ZR}$	kg	Massenanteil Zuckerrüben
n		Fließexponent (Fließkennwert)
$R_a$	m	Radius des Außenzylinders
$R_i$	m	Radius des Innenzylinders
TS	%	Trockensubstanzgehalt
$t_0$	s	Ausgangszustand
$t_M$	s	Misch- bzw. Rührzeit
$t_N$	s	Normbelastungszeit zum Abbau thixotroper Strukturen
$t_R$	h	Ruhezeit
$\beta$		Radienverhältnis; $\beta = (R_i/R_a)^2$
$\dot{\gamma}$	1/s	Schergeschwindigkeit
$\dot{\gamma}_N$	1/s	Newtonsche Schergeschwindigkeit
$\delta_Z$		Zeitkennzahl
$\eta_{pl}$	mPa · s	plastische Viskosität
$\eta_d$	mPa · s	dynamische Viskosität
$\vartheta$	°C	Temperatur
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\Omega$	1/s	Winkelgeschwindigkeit
$\tau$	Pa	Schubspannung
$\tau_0$	Pa	Fließgrenze

## 1. Problemstellung

Eine wichtige Voraussetzung für die quantitativ und qualitativ gleichmäßige Versorgung von Schweinen mit Flüssigfutter bei der rechnergesteuerten Futterzubereitung und -verteilung ist die Einhaltung eines relativ konstanten Trockensubstanzbereichs. Vor allem im Hinblick auf die Prozeßoptimierung sollte auf der Grundlage einer vorgegebenen Rezeptur das Fließverhalten im voraus berechnet werden können. Beim Einsatz oft unterschiedlicher Futterkomponenten (Tafel 1) mit variablem Massenanteil ergeben sich dabei jedoch erhebliche Probleme. Nicht nur Dosierfehler beim Anmischen, sondern vor allem auch verschiedene Aufbereitungsverfahren und -formen bewirken – vor allem beim Hackfruchteinsatz – große Differenzen des rheologischen Verhaltens der Futtermischungen. Bisher ist man größtenteils auf Richtwerte und praktische Erfahrungen in den Schweinemastanlagen angewiesen. Der Kenntnisstand der angewandten Rheologie landwirtschaftlicher fluider Fördermedien hat sich in den letzten Jahren ständig erweitert [1, 3]. Daher ist eine Systematisierung und Bewertung der relevanten Einflußgrößen auf das Fließverhalten von Flüssigfutmischungen erforderlich, und es sind schrittweise komplexe rheologische Zustandsgleichungen zu formulieren. Nachfolgend soll über erste Ergebnisse zum Fließverhalten von Getreide- und Kartoffel-Futtermischungen berichtet werden, um frühere Untersuchungen [4, 5] zu präzisieren und zu ergänzen.

## 2. Methodik

Das Fließverhalten von Flüssigfutter wird hauptsächlich durch folgende Einflußkomplexe bestimmt:

- Zusammensetzung (Massenanteil der Komponenten), vor allem Wasseranteil
  - physikalische Eigenschaften der Futterkomponenten, vor allem bestimmt durch das Aufbereitungsverfahren (Dämpfen, Silieren, Trocknen, Schrotten, Mahlen, Lagern usw.), gekennzeichnet durch:
    - TS-Gehalt
    - Dichte
    - Korngröße und -massenanteile
    - Kornform
    - Struktureigenschaften
    - Viskosität u. a.
  - Belastungen im Prozeß der Futteranmischung, -förderung und -verteilung:
- Schergeschwindigkeit  
Mischzeit  
Belastungszeit beim Rohrtransport  
Ruhezeit in Förderpausen  
Temperatur.
- Diese Einflußgrößen sind bei der meßtechnischen Ermittlung repräsentativer Fließkurven von Futtermischungen zu berücksichtigen. Dabei hat sich das Rotationsviskosimeter großer Spaltweite [6] gut bewährt. Im Normalfall ist es ausreichend, die Meßwerte mit Hilfe des einfachen Potenzansatzes von Ostwald und de Waele zu approximieren:
- $$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Tafel 1. Kennzeichnung von praxisrelevanten Flüssigfutterkomponenten [1, 2]

lfd. Nr.	Stoff	Aufbereitung; Kennzeichnung	TS %	Schüttdichte kg/m <sup>3</sup>	Viskosität mPa·s
1.	Getreide	- ungemahlen	75...87	450...800	
		- geschrotet	85...94	400...600	
2.	Mischfutter	- siliert	≈ 70	500...900	
		- geschrotet; z. T. gemahlen, industriemäßig hergestellt aus Getreide (Weizen, Roggen), Mais, Grünmehl, Sojabohnen, Mineralstoffgemisch u. a. Zusätzen	87...92	400...600	
3.	Kleie	- pelletiert	87...92	700...750	
4.	Trockengrüngut	- gemahlen	> 85	150...350	
		- pelletiert	87...92	300...400	
5.	Tierkörpermehl	- industriell getrocknet, gemahlen	> 90	550	
6.	Fischmehl	- industriell getrocknet, gemahlen	> 88	600...800	
7.	Sojabohnenschrot	- industriell getrocknet, gemahlen	85...91	500...600	
8.	Milchpulver	- industriell getrocknet, gemahlen	> 94	450...700	
9.	Mineralstoffgemisch	- industriell getrocknet, gemahlen	> 94	700...1 400	
10.	Kartoffeln	- roh	≈ 20	650...750	
		- gedämpft	19...22	670	
		- gedämpft und siliert	≈ 20	975...1 050	
		- roh zerkleinert (Reibe)	20...23	1 000...1 050	
		- roh zerkleinert (Bröckel)	20...23	1 000...1 050	
11.	Kartoffelflocken	- roh zerkleinert und chemisch konserviert	20...23	1 000...1 050	
		- zerkleinert, getrocknet	> 90	150...300	
12.	Kartoffeltrockenschnitzel	- zerkleinert, getrocknet	> 90	500...600	
13.	Kartoffelmehl	- industriell aufbereitet	> 90	500...600	
14.	Zuckerrüben	- roh geschnitzelt, gemust	20...25	480...780	
		- geschnitzelt, chemisch konserviert	13...23	480...780	
15.	Sammelfutter	- Naßschnitzel, extrahiert (aus Zuckerfabrik)	13...15	580...620	
		- Zuckersaft bei chemischer Konservierung	15...17	1 075	
16.	Grünfutter (Wiesengras)	- Trockenschnitzel	> 90	300...500	
		- gedämpft, zerkleinert	30...60	500...1 000	
17.	Grobfutter, z. B. Mais	- frisch, gehäckselt (l < 40 mm)	15...25	150...310	
		- frisch, gehäckselt	12...15	300...330	
18.	Strohhäcksel	- siliert	17...30	350...600	
		- l < 20 mm	> 86	50...80	
19.	Heuhäcksel	- l < 20 mm	> 86	120...140	
20.	Maiskorn-Spindel-Gemisch (CCM)	- zerkleinert, siliert	50...70	450...700	
21.	Strohpellets	- 25% Strohanteil und Mischfutter	80...92	450...600	
22.	Mohrrüben	- zerkleinert	≈ 20	≈ 780	
23.	Eiweißmischsilage	- Schlacht- und Fischabfälle, thermisch aufbereitet, zerkleinert, siliert (flüssig)	< 20	900...1 050	
24.	Pülpe	- Industrieabfälle (flüssig)	≈ 15	≈ 1 000	
25.	Schlempe	- Brauereiabfälle	6...8	1 020	8...40
		$\eta_{pl} = 0,5651 \exp(0,4265 TS)$ $\tau_0 = 0,005835 \exp(0,7390 TS)$			
26.	Melasse	- Zuckerindustrie	70...85	1 300...1 450	$\vartheta = 40^\circ C;$ 80...1500
27.	Magermilch	- Molkereiindustrie	9	1 033...1 036	1,60
28.	Molke		7	1 010...1 030	1,2...1,3
29.	Milchtränke		≈ 10	1 030	3...6

Tafel 2. Koeffizienten der Gln. (6) und (7) zur Bestimmung der Fließkennwerte des Ostwald-de Waele-Potenzgesetzes von Futtermischungen bei Verdünnung mit Wasser

lfd. Nr.	Futterzusammensetzung	Geltungsbereich TS %	A <sub>k</sub> Pa · s <sup>n</sup>	B <sub>k</sub>	A <sub>n</sub>	B <sub>n</sub>
1.	Trockenmischfutter (TMF) t <sub>M</sub> = 10...20 min	17...36	0,0091	0,2353	0,8312	0,0110
2.	frisch gedämpfte Kartoffeln und TMF					
2.1.	m <sub>k</sub> /m <sub>TMF</sub> = 2:1 - t <sub>M</sub> = 10...20 min - t <sub>N</sub> ≥ 30 min	14...27	0,0430 0,0484	0,3078 0,2879	0,4850 0,4246	0,00928 0,00673
2.2.	m <sub>k</sub> /m <sub>TMF</sub> = 4:1 - t <sub>M</sub> = 10...20 min - t <sub>N</sub> ≥ 30 min	10...26	0,3258 0,0969	0,2508 0,2896	0,1498 0,4335	-0,00526 0,00874
3.	chemisch konservierte Zuckerrübenschnitzel und TMF [5]					
3.1.	m <sub>ZR</sub> /m <sub>TMF</sub> = 1:1	18...26	0,0023	0,4179	1,4952	0,04665
3.2.	= 3:1	14,4...20	0,0621	0,3244	1,0056	0,02816

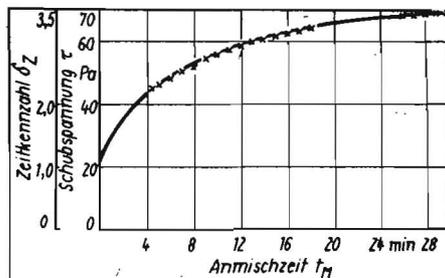


Bild 1. Zeitverhalten beim Anmischen von Flüssigfutter aus Trockenmischfutter und Wasser (m<sub>TMF</sub>:m<sub>W</sub> = 1:2; TS = 28,6%)

**Schubspannung**

$$\tau (R_i) = \frac{M}{2 \pi H R_i^2} \quad (2)$$

und Newtonsche Schergeschwindigkeit

$$\dot{\gamma}_N = \frac{2 \Omega}{1 - \beta} \quad (3)$$

werden aus den Meßwerten M (Ω) berechnet, und die Korrektur der Pseudofließkurve

$$\ln \tau (R_i) = \ln k' + n \ln \dot{\gamma}_N \quad (4)$$

$$k = k' \left[ \frac{n(1 - \beta^{1/n})}{1 - \beta} \right]^n \quad (5)$$

Die Fließkennwerte k und n des Potenzgesetzes (1) sind dann bei hinreichendem Wertevorrat mit dem TS-Gehalt in Beziehung zu setzen:

$$k = A_k \exp (B_k TS) \quad (6)$$

$$n = A_n - B_n TS. \quad (7)$$

**3. Ergebnisse und Diskussion**

Während der technologisch erforderlichen Zeit zum Anmischen des Flüssigfutters ergeben sich in Abhängigkeit von den eingesetzten Futtermitteln Veränderungen des Fließverhaltens. Dabei ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen

- Flüssigfutter aus den Hauptkomponenten Trockenmischfutter (Getreideschrot) und Wasser sowie
- Flüssigfutter aus Hackfruchtbestandteilen und Wasser mit geringen Anteilen von Getreideschrot.

Beim Einsatz von Trockenfuttermitteln ergibt

sich während des Anmischens eine zeitabhängige Verschlechterung des Fließverhaltens (Bild 1) und damit auch eine Erhöhung des Rührerleistungsbedarfs. Wesentliche Ursache des Anwachsens der Viskosität ist die intensive Wasseraufnahme und -bindung durch die Trockenfuttermittel, die auch zu einer Quellung der Stärke- und Eiweißmoleküle führt. Mit Hilfe einer Kennzahl

$$\delta_Z = \frac{\eta_s(t_M)}{\eta_s(t_0)} = \frac{\tau(t_M)}{\tau(t_0)} \quad (8)$$

kann das Zeitverhalten quantitativ beschrieben werden. So ergibt sich im Rührversuch mit dem Rotationsviskosimeter großer Spaltweite für das Beispiel im Bild 1 bei konstanter maximaler Belastung von  $\dot{\gamma}_N = 75 \text{ s}^{-1}$ :

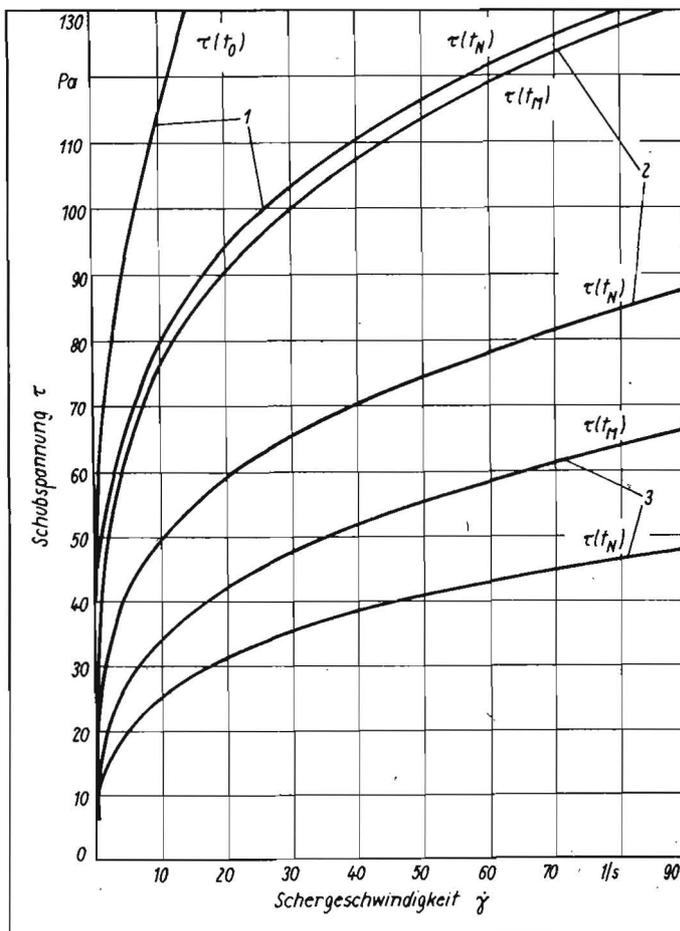
$$\delta_Z(t_M) = 0,669 \ln t_M - 1,5046, \quad (9)$$

d. h. nach einer Rührzeit von t<sub>M</sub> = 30 min beträgt der Reibungsdruckverlust bei laminarer Rohrströmung das 3,5fache gegenüber einem definierten Ausgangszustand bei t<sub>0</sub>. Daher sind die Anmischzeiten beim durchgängigen Einsatz von Trockenmischfutter aus energieökonomischer Sicht auf ein Minimum zu beschränken. Das Ziel der technischen Entwicklung sollte für diesen Einsatzfall in der Verminderung des Mischervolumens und in der Erhöhung der Zuführgeschwindigkeit der Futterkomponenten gesehen werden.

Im Gegensatz dazu tritt beim Hackfruchteinsatz, z. B. mit gedämpften Kartoffeln, während des Anmischprozesses meist eine zeitabhängige Verbesserung des Fließverhaltens ein, die u. a. auch von der Intensität der mechanischen Belastung abhängt. Die Fließkurven im Bild 2 verdeutlichen diese sich mit dem Kartoffelanteil erhöhenden thixotropen Effekte, deren Ursachen im wesentlichen in der Zerkleinerung grober Bestandteile und in der Durchmischung von festen und flüssigen Futterinhaltsstoffen zu suchen sind.

Bild 2. Fließkurven τ = f(γ̇) von Futtermischungen mit Kartoffeln (TS = 19,4%)

Kurve	Zusammensetzung	m <sub>k</sub> /m <sub>TMF</sub>	t min	k Pa · s <sup>n</sup>	n
1	chemisch konservierte gelagerte Kartoffeln; Trockenmischfutter	6:1	t <sub>M</sub> = 0	57,3905	0,2395
			t <sub>N</sub> = 60	45,5480	0,2395
2	frisch gegarte Kartoffeln; Trockenmischfutter	4:1	t <sub>M</sub> = 10...20	42,2688	0,2519
			t <sub>N</sub> ≥ 30	26,6757	0,2640
3		2:1	t <sub>M</sub> = 10...20	16,8570	0,3050
			t <sub>N</sub> ≥ 30	12,8891	0,2940



In der DDR werden für die Schweinemast vorwiegend Wirtschaftsfuttermittel sowie aus energieökonomischer Sicht langsamlaufende Mischwerkzeuge eingesetzt. Der Einfluß der Mischbehältergröße und damit der Anmischzeit auf das Fließverhalten von Flüssigfuttermischungen ist unbedeutend. Zur Kennzeichnung des Fließverhaltens von Kartoffel-Trockenmischfutter-Mischungen dienen deshalb die Fließkennwerte im Zeitintervall  $t_M = 10 \dots 20$  min als Bemessungsgrundlage.

Nach Förderpausen ergeben sich infolge von Strukturänderungen durch Quellvorgänge und thixotrope Erholungsprozesse in Abhängigkeit vom TS-Gehalt erhöhte Anfahrdruckverluste, die jedoch nur kurzzeitig wirksam werden. Bei einer Trockenmischfutter-Wasser-Mischung mit  $TS = 29,2\%$  wurde nach  $t_R = 4$  h ein um den Faktor 2,4 erhöhter Anfahrdruckverlust festgestellt. Diese Einflüsse vermindern sich bei sinkendem TS-Gehalt erheblich und wirken sich im praktischen Betrieb beim Einsatz von Kreiselpumpen nur unwesentlich aus.

Die Ergebnisse systematischer Fließkurvenmessungen mit Futtermischungen aus Trockenmischfutter und Wasser sowie gedämpften Kartoffeln, Trockenmischfutter und Wasser (Bild 2) sind in Tafel 2 zusammengestellt. Die Gln. (6) und (7) ermöglichen die Berechnung der Fließkennwerte des Potenzgesetzes (1) in Abhängigkeit vom TS-Gehalt. Die Werte für Zuckerrüben-Futtermischungen entstammen früheren Versuchen [5]. Prinzipiell ist eine gute Vergleichbarkeit der Fließkurven von Kartoffel-Futtermischungen (Bild 2, Kurven 2 und 3) und Ergebnissen früherer Förderversuche mit Kartoffelkonservat (Bild 2, Kurve 1 [4]) gegeben. Dabei zeigen Futtermischungen mit frisch gegartem Kartoffeln aufgrund einer weicheren und z. T. aufgelösten Zellstruktur eine verbesserte Fließfähigkeit. Gleichzeitig wird deutlich, daß sich trotz des gleichen TS-Gehalts bei nicht genügender Berücksichtigung von Zusammensetzung und/oder Belastungsverhältnissen erhebliche Differenzen des rheologischen Verhaltens ergeben. Jedoch beeinflusst der Wassergehalt das Fließverhalten der polydispersen und oftmals grobstrukturierten Futtermischungen in erster Linie, da das nicht gebundene Wasser als Schmiermittel zwischen den organischen Feststoffen wirkt.

Die Orientierung vieler Praxisanlagen auf maximalen TS-Gehalt im Futter ist dabei aus verfahrenstechnischer und ökonomischer Sicht abzulehnen. Wenn die Nährstoffversorgung der Tiere gesichert ist – im Normalfall bei Getreide-Futtermischungen ab  $TS = 20 \dots 22\%$  [8, 9] – und eine Entmischung während der Förderung ausgeschlossen werden kann, verursacht eine weitere TS-Erhöhung zusätzliche Energieverluste. Wenn zudem – wie in einigen Praxisanlagen mit Erfolg praktiziert [10] – auf separate Tränken im Stall verzichtet wird und die Wasserversorgung der Mastschweine generell über das Flüssigfutter erfolgt, ergibt sich eine nochmalige Erweiterung des Anwendungsbereichs der Flüssigfütterung.

Bei der Futterzubereitung ist also in Abhängigkeit von der Zusammensetzung ein vorherbestimmter optimaler TS-Bereich zu sichern und einzuhalten. Die Konstanz der nacheinander bereiteten Futtermischungen ist eine wichtige Voraussetzung für eine Automatisierung der Futterverteilung, da nur so eine quantitativ und qualitativ gleichmäßige sowie prozeßkontrollierte Versorgung aller Tiere ermöglicht wird. Schlußfolgernd ist festzustellen, daß das Fließverhalten von Flüssigfuttermischungen mit Hackfrüchten bei mehr als zwei Komponenten aufgrund einer Vielzahl von nicht quantifizierbaren Einflußgrößen nur mit erheblicher Unsicherheit vorherbestimmbar ist.

Zur Sicherung eines optimalen Betriebs sind daher die festgelegten Rezepturen in einem bestimmten TS-Bereich möglichst genau einzuhalten. Bei oft wechselnder Futterzusammensetzung wäre zur Überwachung der Futtermischprozesse der Einsatz von angepaßten Prozeßviskosimetern zweckmäßig. Hierzu sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

#### 4. Zusammenfassung

Auf der Grundlage systematischer Fließkurvenmessungen mit Flüssigfuttermischungen aus Trockenmischfutter sowie gedämpften Kartoffeln und Trockenmischfutter werden konzentrationsabhängige Fließkennwerte angegeben. Damit liegen erste präzisierende Projektierungsangaben für Futterverteilprozesse vor, die direkt anwendbar sind. Weitere Einflußgrößen auf das Fließ- und Förderverhalten von Flüssigfutter werden disku-

tiert. Aufgrund einer Vielzahl von Futterkomponenten (Tafel 1) im praktischen Betrieb ist eine exakte Vorausbestimmung des Fließverhaltens in jedem Fall nicht möglich. Das kann nur für festgelegte Normzusammensetzungen erfolgen. Wichtigste Voraussetzungen sind die Wahl und die Kontrolle eines optimalen TS-Bereichs der Flüssigfuttermischungen.

#### Literatur

- [1] Türk, M.: Das Fließverhalten landwirtschaftlicher fluider Medien bei isothermer Rohrströmung – ein Beitrag zur angewandten Rheologie. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Dissertation B, 1987.
- [2] Mührel, K., u. a.: Transport, Umschlag und Lagerung in der Landwirtschaft. Berlin: VEB Verlag Technik 1983.
- [3] Dähre, D.: Untersuchungen zum zeitabhängigen Fließverhalten von trocken-substanreicher Rindergülle und die Anwendung auf die Rohrströmung. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Dissertation A, 1986.
- [4] Türk, M.: Druckverlust bei der Förderung konzentrierter fluider Medien aus Kartoffeln in Rohrleitungen. agrartechnik, Berlin 28 (1978) 8, S. 347–350.
- [5] Türk, M.: Berechnung des Druckverlustes bei Förderung konzentrierter Futtermischungen mit chemisch konservierten Zuckerrüben in Rohrleitungen. agrartechnik, Berlin 28 (1978) 3, S. 134–137.
- [6] Türk, M.; Schmidt, H.; Dähre, D.: Rotationsviskosimeter für landwirtschaftliche fluide Fördermedien. agrartechnik, Berlin 37 (1987) 12, S. 568–570.
- [7] Dähre, D.; Türk, M.: Methode zur Bestimmung aboluter Fließkurven nichtlinear-plastischer Medien mit Rotationsviskosimetern. Chemische Technik, Leipzig 39 (1987) 11, S. 477–479.
- [8] Kracht, W., u. a.: Die Auswirkungen einer Anfeuchtung von Konzentrationen auf die Mastleistung der Schweine. Tierzucht, Berlin 33 (1979) 3, S. 138–141.
- [9] Lindner, J. P.; Bucher, E.: Einfluß von Fließfutter mit unterschiedlichem Trockensubstanzanteil auf die Mast- und Schlachtleistung sowie auf die Nährstoffverwertung beim Mastschwein im Vergleich zu Trockenfutter. Bayr. Landw. Jahrbuch, München 62 (1985) 6, S. 685–697.
- [10] Hörnig, G., u. a.: Einsatz von Stauklappen in Fließkanälen von Schweineproduktionsanlagen. agrartechnik, Berlin 33 (1983) 11, S. 501–503.

A 5398

## Rationelle Nutzung der Elektroenergie in Tierproduktionsanlagen durch Optimierung des Maschineneinsatzes

Dipl.-Ing. J. Bothe, KDT/Dr.-Ing. W. Härtwig, KDT

Forschungszentrum für Mechanisierung und Energieanwendung in der Landwirtschaft Schlieben der AdL der DDR

### 1. Problem- und Zielstellung

Die Erzeugung von Elektroenergie als der am höchsten veredelten Energieform ist unter den Bedingungen der DDR mit hohen volkswirtschaftlichen Aufwendungen verbunden. Die Kosten für den Elektroenergiebezug der landwirtschaftlichen Betriebe wurden bis zum Inkrafttreten der Agrarpreisreform im Jahr 1983 aus dem Staatshaushalt gestützt. Seit 1983 sind die Energiekosten von den Landwirtschaftsbetrieben in vollem Umfang entsprechend dem Industrietarif zu tragen.

Der sparsame, rationelle Einsatz der Elektroenergie in allen Bereichen der Volkswirtschaft, besonders durch die Großverbraucher in der materiellen Produktion – darunter auch der Landwirtschaft –, ist objektiv notwendig und von höchster Priorität [1]. Das Ziel besteht in der Senkung des spezifischen Elektroenergieverbrauchs. Eine absolute Senkung ist wegen der fortschreitenden Mechanisierung der Anlagen, die mit der Schaffung optimaler Umweltbedingungen im Stall, mit der Beseitigung schwerer körperli-

cher Arbeit und mit Verbesserungen im Sozialbereich verbunden ist, nicht möglich. Die Entwicklung des Elektroenergieverbrauchs in der DDR ist in Tafel 1 zusammengestellt. Von 1980 bis 1984 wurde die allgemeine Tendenz des jährlich steigenden absoluten Elektroenergiebedarfs unterbrochen. Das wird im Bereich des MLFN besonders deutlich, wo der Verbrauch relativ stabil bei rd. 20,4 PJ/a lag. Die Ursachen hierfür waren die in diesem Zeitraum in breitem Umfang eingeleiteten energiesparenden, schnell