

2.6. Schärfe der Häckselmesser

Größeren Einfluß als die Häcksellängeneinstellung auf den spezifischen DK-Verbrauch beim Welkguthäckseln haben die Schärfe der Häckselmesser und die Schneidspalteinstellung. Die in Tafel 7 aufgeführten Ergebnisse, die eine Auswahl aus einer Vielzahl durchgeführter Untersuchungen darstellen, zeigen, daß sich mit steigender verarbeiteter Erntegutmenge der Zustand der Messer und des gesamten Häckselaggregats – charakterisiert durch die erreichte mittlere Häcksel­länge – wesentlich verschlechtert. Es wird deutlich, daß je 100 t verarbeitetes Welkgut (TS-Gehalt von 30 bis 60%) ein höherer spezifischer DK-Verbrauch von rd. 10% ent-

steht. Dieser Anstieg des DK-Verbrauchs verläuft jedoch mit weiterer Erhöhung der Erntegutmenge nicht linear, sondern nähert sich asymptotisch einem Maximalwert. Daraus ist abzuleiten, daß beim Welkguthäckseln die Messer nach spätestens 6 bis 8 Einsatzstunden nachzuschleifen sind und der Schneidspalt entsprechend den Anforderungen der Bedienanweisung exakt einzustellen ist.

Der technische Zustand des Häckselaggre­gats wirkt sich weiterhin auch auf die Häckselqualität aus. Mit der Erhöhung des DK-Verbrauchs geht gleichzeitig eine Verschlechterung der Qualität des Häckselgutes einher, die einen nachteiligen Einfluß auf

die Transportmittelauslastung, die Verdichtbarkeit im Silo und damit eventuell auch auf den Siliererfolg haben kann.

3. Zusammenfassung

Im Beitrag wurden Möglichkeiten zur Reduzierung des DK-Verbrauchs im Verfahren der Welksilageproduktion durch größere Arbeitsbreite bei der Mahd, Doppelschwadbildung bei geringen Erträgen, Einschränkungen der Schwadbearbeitung, exakte Einstellung der Schneidwerke und des Häckselaggre­gats sowie durch richtige Wahl der Häcksel­längeneinstellung untersucht. Möglichkeiten und Hinweise zur Reduzierung des DK-Verbrauchs werden abgeleitet. A 5030

Zur optimalen Belastung von Biogasanlagen mit Rinder- und Schweinegülle

Dr. agr. B. Linke/Dr. rer. nat. R. Vollmer/Dr. agr. J. Angelow, Institut für Biotechnologie Potsdam der AdL der DDR
Dr. rer. nat. H. Rückauf, KDT, Technische Hochschule „Carl Schorlemmer“ Leuna-Merseburg

Verwendete Formelzeichen		
A	m ²	Wandfläche
B _R	kg/m ³ · d	Faulraumbelastung
	$\frac{Q_Z S_{OTS}}{V_M}$	
c _m	kJ/kg · K	mittlere spezifische Wärmekapazität
D _h	d	mittlere Verweilzeit
E _ε	MJ/d	Erwärmungsenergie
E _p	MJ/d	Wärmeenergiepotential im Biogas
E _T	MJ/d	Transmissionswärmeverlust
E _Q		Energiequotient
FS	kg/m ³	Konzentration wasserdampf­flüchtiger Fettsäuren
H _M	MJ/m ³	unterer Heizwert von Methan
k	W/m ² · K	Wärmedurchgangskoeffizient
p		Verhältnis Durchmesser zur Höhe bei zylindrischen Reaktoren
Q _{CH₄}	m ³ /d	Methanproduktion (Normzustand)
Q _Z	m ³ /d	Güllemenge
S _{OTS}	kg/m ³	Substratkonzentration (organische Trockensubstanz)

t _G	°C	Temperatur der Frischgülle
t _L	°C	Temperatur der Außenluft
t _R	°C	Temperatur im Biogasreaktor
TS	kg/m ³	Trockensubstanzgehalt
v _{CH₄}	m ³ /m ³ · d	Methanbildungsgeschwindigkeit
	$\frac{Q_{CH_4}}{V_M}$	
V _M	m ³	Volumen der Reaktionsmasse
y _{CH₄}	m ³ /kg	Methanausbeute
	$\frac{Q_{CH_4}}{Q_Z S_{OTS}}$	
η _K		Kesselwirkungsgrad

1. Einleitung

Die Produktion von Biogas aus tierischen Exkrementen, besonders aus Gülle, gewinnt als Verfahrensschritt zur Güllebehandlung zunehmend an Bedeutung, da bei sinnvoller ganzjähriger Verwertung von Biogas fossile Energieträger im Bereich der Tierproduktionsanlagen eingespart werden können [1]. Hinsichtlich der verwendeten Anlagentechnik bei der Biogaserzeugung überwiegt der Rührkessel als Reaktortyp, der mit Hilfe mechanischer Rührwerke, durch Umpumpen

des Reaktorinhalts oder durch Einpressen des produzierten Biogases homogenisiert wird [2] und im mesophilen Temperaturbereich zwischen 30 und 35°C arbeitet.

Im quasikontinuierlichen Betrieb durchgeführte Belastungssteigerungsversuche mit Schweinegülle (Bild 1) und Rindergülle (Bild 2) ergaben eine Reduzierung der Methanausbeute mit steigender Faulraumbelastung bzw. Verkürzung der Verweilzeit. Die Methanbildungsgeschwindigkeit dagegen strebt einem Maximalwert zu und kommt bei y_{CH₄} = 0 ebenfalls zum Erliegen.

Der Betrieb eines Biogasreaktors bei maximaler Methanbildungsgeschwindigkeit ist in bezug auf die Ausnutzung des Reaktorvolumens zwar günstig, aber bereits mit einem erheblichen Rückgang der Methanausbeute verbunden. Deshalb stellt sich die Frage, ob nicht eine geringere Belastung, die zwar eine kleinere Methanbildungsgeschwindigkeit, aber eine bessere Methanausbeute liefert, vorteilhaft ist.

Bild 1. Methanausbeute und Methanbildungsgeschwindigkeit aus Schweinegülle in Abhängigkeit von der Faulraumbelastung und der mittleren Verweilzeit

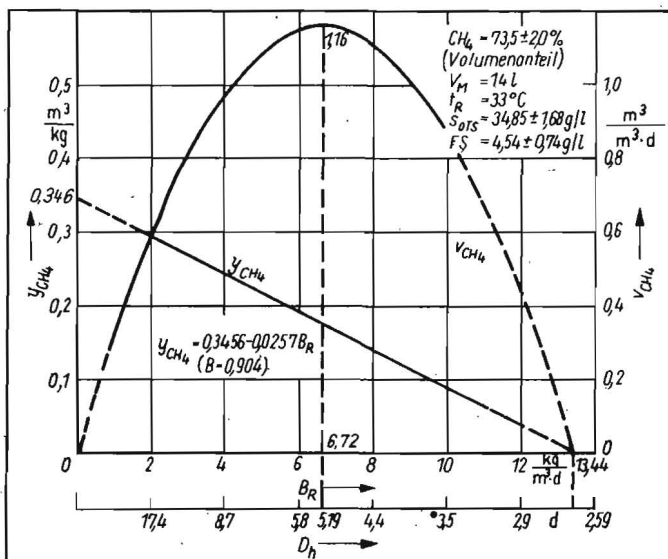
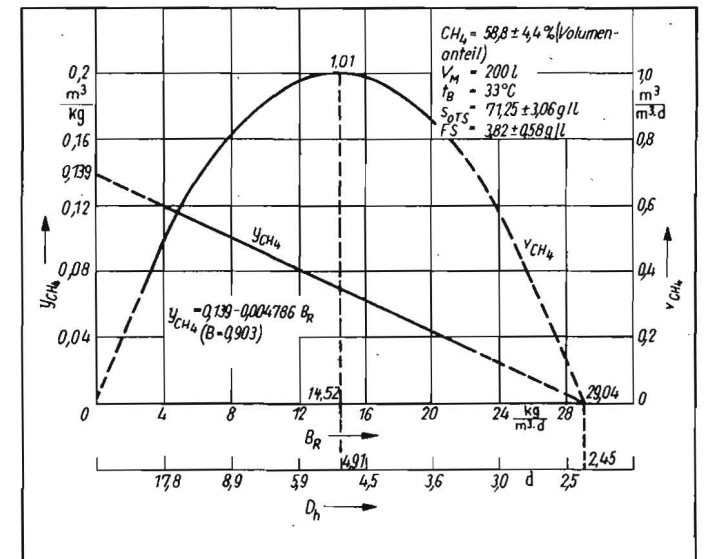


Bild 2. Methanausbeute und Methanbildungsgeschwindigkeit aus Rindergülle in Abhängigkeit von der Faulraumbelastung und der mittleren Verweilzeit



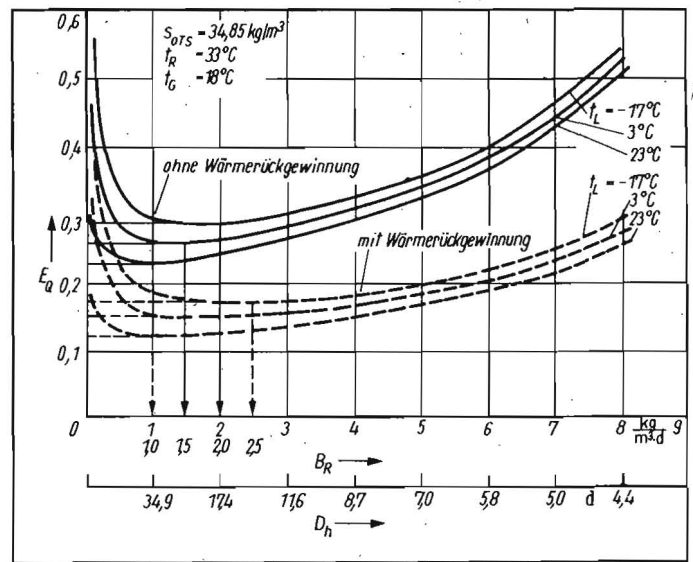
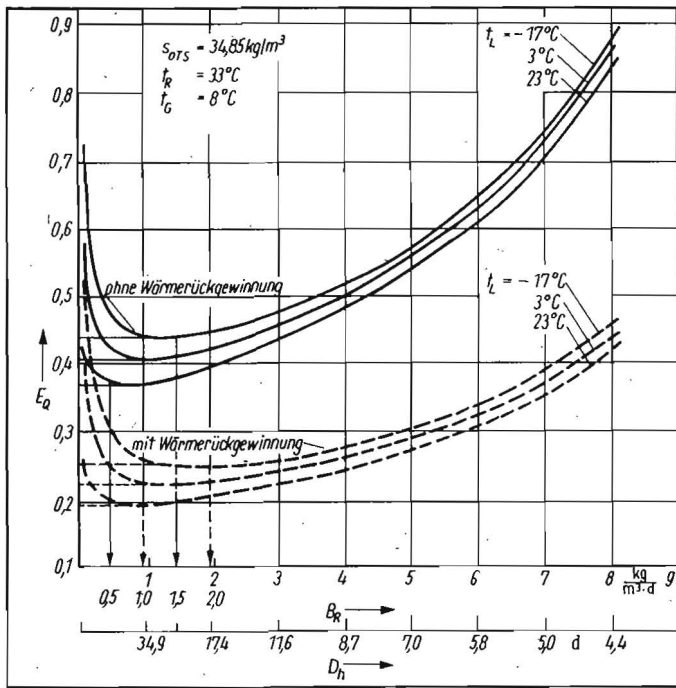


Bild 4. Energiequotient in Abhängigkeit von der Faulraumbelastung und der mittleren Verweilzeit bei Schweinegülle ($t_c = 18^\circ\text{C}$)

Bild 3. Energiequotient in Abhängigkeit von der Faulraumbelastung und der mittleren Verweilzeit bei Schweinegülle ($t_c = 8^\circ\text{C}$)

2. Lösungsweg

Eine Lösung dieser Aufgabenstellung kann mit Hilfe einer Optimierungsbetrachtung auf der Grundlage von Energiebilanzen erfolgen. Da die Differenz der Standardbildungsenthalpiesummen zwischen den Reaktionspartnern und den Reaktionsprodukten bei der Biogasbildung annähernd Null ist, d. h. die Stoffwandlung mit kleiner Wärmetönung verbunden ist, reduziert sich die Energiebilanz auf die Wärmebilanz, und es kann die mit dem Biogas produzierte Energie der Prozeßenergie gegenübergestellt werden. Bilanzgrößen für die Prozeßenergie sind:

- Energiebedarf für Frischgülleerwärmung
- Transmissionswärmeverluste des Biogasreaktors
- Heizleitungsverluste
- Auskühlverluste des Heizungssystems bei Stillstand der Förderpumpe für das Heizmedium
- Betriebstemperaturänderung des Biogasreaktors.

Geht man von einem stabilen Betriebszustand der Biogaserzeugung aus, dann entfallen die beiden letzten Größen, so daß nur die drei ersten zu berücksichtigen sind. Da die Heizleitungsverluste bei guter Isolierung, kurzer Leitungsführung und geringem Leitungsinhalt klein sind [3], kann man sie bei der weiteren Betrachtung vernachlässigen.

2.1. Berechnung der Erwärmungsenergie

Die Erwärmungsenergie berechnet sich nach Gl. (1):

$$E_E = Q_Z (t_R - t_G) C_m \quad (1)$$

Die spezifische Wärme der Gülle ist nach Chen [4] vom Trockensubstanzgehalt abhängig und folgt Gl. (2):

$$c_m = 4,19 - 0,00275 \text{ TS} \quad (2)$$

2.2. Berechnung der

Transmissionswärmeverluste

Für den Transmissionswärmeverlust ergibt sich entsprechend Gl. (3):

$$E_T = k A (t_R - t_L) \quad (3)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient wird für gut isolierte Biogasanlagen mit einem Summenwert von $k = 0,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ [5] angegeben, während der Faktor 0,0864 aus der Umrechnung in MJ/d resultiert.

2.3. Berechnung des durch die Biogasverbrennung verfügbaren Wärmeenergiepotentials

Die Berechnung des verfügbaren Wärmeenergiepotentials erfolgt entsprechend Gl. (4):

$$E_P = \gamma_{\text{CH}_4} Q_Z S_{\text{OTS}} H_M \eta_k \quad (4)$$

Nach der Bildung eines Energiequotienten

$$E_Q = \frac{E_E + E_T}{E_P} \quad (5)$$

erhält man den Anteil des Eigenverbrauchs zum gesamten nutzbaren Wärmeenergiepotential bei der thermischen Verwertung des produzierten Biogases. Dieser Energiequotient kann als Optimierungsgröße betrachtet werden und sollte ein Minimum anstreben. Für verschiedene Faulraumbelastungen sind nun die zugehörigen Energiequotienten zu ermitteln. Bei vorgegebenem Substratangebot ($Q_Z S_{\text{OTS}}$) erhält man durch Variation der Faulraumbelastung unterschiedliche Faulraumvolumina mit verschiedenen großen Reaktoroberflächen:

$$V_M = \frac{Q_Z S_{\text{OTS}}}{B_R} \quad (6)$$

Um mit Gl. (3) rechnen zu können, fehlt noch eine Beziehung zwischen Faulraumvolumen und Reaktoroberfläche, die bei zylindrischen Biogasreaktoren durch Gl. (7) gegeben ist:

$$A = \frac{(2p + 4) V_M}{p \sqrt{\frac{4 V_M}{\pi p^2}}} \quad (7)$$

Der Gasraum im Biogasreaktor wurde in Gl. (7) vernachlässigt, da er sich proportional zum erforderlichen Faulraumvolumen verhält.

3. Ergebnisse

Für diese Optimierungsaufgabe wurde ein Rechenprogramm für einen MC80 erarbeitet, in dem alle in den Gln. (1) bis (7) erforderlichen Ausgangsparameter frei wählbar sind. Weiterhin mußten die in den Bildern 1 und 2 dargestellten linearen Regressionsgleichungen zur Methanausbeute in Abhängigkeit von der Faulraumbelastung berücksichtigt werden. Das Programm ist so aufgebaut, daß, begin-

nend mit einer kleinen Faulraumbelastung, schrittweise die Belastung erhöht und dabei nach jedem Schritt der zugehörige Energiequotient berechnet wird. In den vorliegenden ausgewählten Berechnungsbeispielen (Bilder 3 bis 6) sind zwei verschiedene Gülletemperaturen (8°C , 18°C) unterstellt worden, denen jeweils drei unterschiedliche Außenlufttemperaturen (-17°C , 3°C , 23°C) zugeordnet sind.

Ausgehend von den in den Bildern 1 und 2 gewählten Substratkonzentrationen S_{OTS} für Rinder- und Schweinegülle wurden diese auch in den Betrachtungen beibehalten. Der Wärmedurchgangskoeffizient k betrug $0,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, der Kesselwirkungsgrad $\eta_k = 0,7$ und der untere Heizwert des Methans $H_M = 36,1 \text{ MJ/m}^3$. Für die Berechnung wurde die Menge der täglich auszufaulenden Gülle mit 100 m^3 festgelegt.

Zur Simulation einer Wärmerückgewinnung aus der ausgefaulten Gülle braucht nur der Wärmeenergiebedarf zur Gülleerwärmung E_E mit einem Faktor kleiner 1 multipliziert zu werden.

In den dargestellten Beispielen (Kurven mit Wärmerückgewinnung) wurde ein Faktor von 0,5 angenommen, d. h. 50% der Wärme werden aus der ausgefaulten Gülle genutzt.

4. Diskussion

Aus dem Verlauf der in den Bildern 3 bis 6 dargestellten Kurven geht hervor, daß der Wert des Energiequotienten, unabhängig von der Faulraumbelastung, mit steigender Gülle- und Außenlufttemperatur erwartungsgemäß geringer, also günstiger wird. Die besten Werte werden bei den Varianten mit einer simulierten Wärmerückgewinnung erzielt, da nur 50% des Wärmeenergiebedarfs für die Gülleerwärmung benötigt werden. Betrachtet man den Wert des Energiequotienten in Abhängigkeit von der Faulraumbelastung, so ist bei allen untersuchten Varianten ein Optimum festzustellen, d. h., daß bei einer bestimmten Faulraumbelastung bzw. mittleren Verweilzeit der Wert des Energiequotienten ein Minimum erreicht. Dieses Optimum ist nicht scharf ausgeprägt und bewegt sich, je nach Gülle- und Außen-

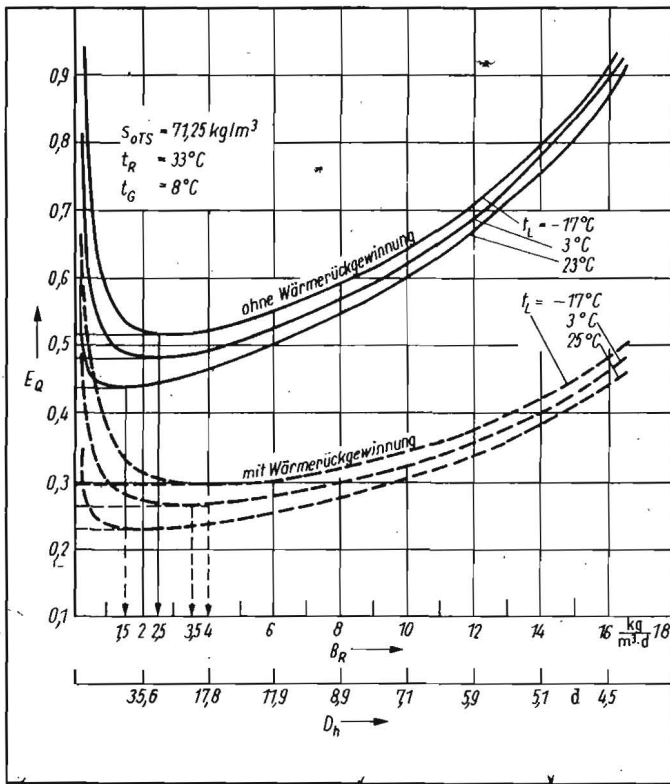


Bild 5. Energiequotient in Abhängigkeit von der Faulraumbelastung und der mittleren Verweilzeit bei Rindergülle ($t_G = 8^\circ\text{C}$)

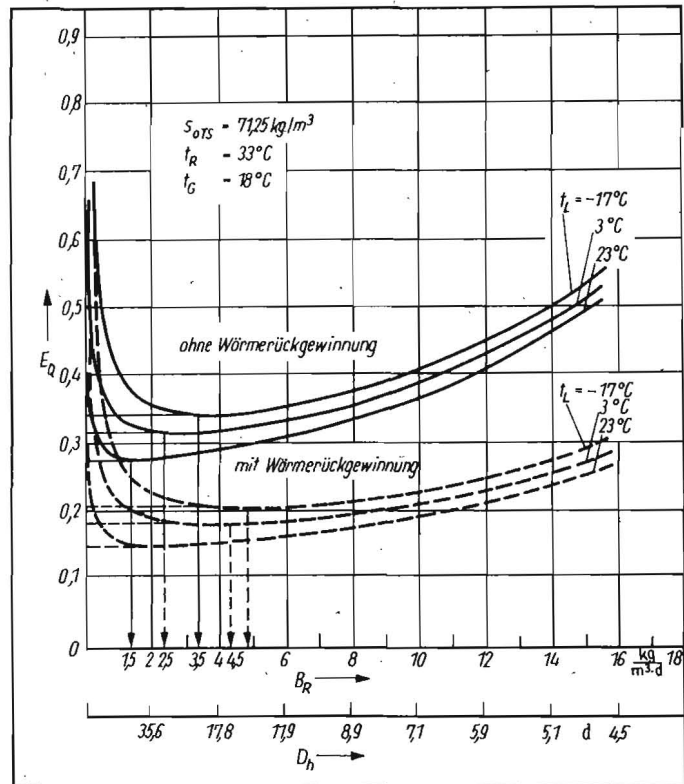


Bild 6. Energiequotient in Abhängigkeit von der Faulraumbelastung und der mittleren Verweilzeit bei Rindergülle ($t_G = 18^\circ\text{C}$)

lufttemperatur, bei Rindergülle im Bereich der Faulraumbelastung von 1,5 bis 5,0 $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ und bei Schweinegülle von 0,5 bis 2,5 $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$.

Für die betrachteten Substratkonzentrationen entspricht dieses Ergebnis einer optimalen Verweilzeit von 14 bis 48 Tagen für Rindergülle bzw. von 14 bis 70 Tagen für Schweinegülle. Dabei ist festzustellen, daß eine Wärmerückgewinnung nicht nur den Energiequotienten günstig beeinflusst, sondern sich das Optimum auch bei höheren Faulraumbelastungen einstellt. Der Betrieb eines Biogasreaktors bei hohen Faulraumbelastungen ist grundsätzlich anzustreben, da sich durch den geringeren Reaktorvolumenbedarf auch die Investitionen verringern. Die vorgestellte Methode zur Ermittlung der optimalen Faulraumbelastung auf der Grundlage von Energiebilanzen hat die Bestimmung des höchsten energetischen Wirkungsgrades einer Biogasanlage bei der Verbrennung des Biogases in Kesselanlagen als Zielfunktion. Neben dieser Betrachtungsweise können aber auch andere Restriktionen von Bedeu-

tung sein, wie z. B. Deckung des Wärmebedarfs der Tierproduktionsanlage durch Biogas aus der anfallenden Gülle oder Nutzung des Biogases in Gasmotoren. Hierfür sind jedoch spezielle Kosten-Nutzen-Rechnungen anzustellen, die dem produzierten Biogas einen bestimmten Wert zuweisen.

5. Zusammenfassung

Die Auslegung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen wirft das Problem der optimalen Belastung mit organischer Substanz auf, da sich die anzustrebenden Zielgrößen, wie z. B. hohe Methanausbeute, geringes Reaktorvolumen, hohe Methanbildungsgeschwindigkeit, nicht bei einer konstanten Faulraumbelastung realisieren lassen.

Auf der Grundlage von Wärmeenergiebilanzen wird eine Lösung dieses Optimierungsproblems vorgestellt. In einem Rechenprogramm für Bürocomputer können alle für die Optimierungsaufgabe notwendigen Parameter variiert werden. Das Ergebnis ist ein Energiequotient, der Aufschluß über den Prozeßenergiebedarf in Abhängigkeit von der

Faulraumbelastung bzw. Verweilzeit einer Biogasanlage gibt und einen Minimalwert anstrebt.

Literatur

- [1] Kehr, K.: Ergebnisse und Anforderungen aus dem Vorbereitungsprozeß für die Einführung anaerober Gülleaufbereitungsverfahren in Anlagen der industriemäßigen Tierproduktion mit Energieerzeugung und -verwertung. In: Biogas - Vorträge der Arbeitskonferenz „Biogas“ der AdL der DDR und der AdW der DDR am 2. und 3. Juli 1981 in Eberswalde. AdL der DDR, 1982.
- [2] Braun, R.: Biogas - Methangärung organischer Abfallstoffe. Wien/New York: Springer Verlag 1982.
- [3] Wellinger, A.; Edelmann, W.; Favre, R.: Biogas-Handbuch. Aarau: Verlag Wirz AG 1984.
- [4] Chen, Y. R.: Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications (Untersuchungen zur Kinetik der Faulung von Schweinegülle und Schlußfolgerungen für die Anwendung). Agricultural wastes, Barking 8 (1983) 2, S. 65-81.
- [5] Wenzlaff, R.: Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung. Betriebswirtschaftliche Mitteilungen der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein (1981) 319, S. 3-16.

Folgende Fachzeitschriften des Maschinenbaus erscheinen im VEB Verlag Technik:

agrartechnik; Feingerätetechnik; Fertigungstechnik und Betrieb; Hebezeuge und Fördermittel; Kraftfahrzeugtechnik; Luft- und Kältetechnik; Maschinenbautechnik; Metallverarbeitung; Schmierungstechnik; Schweißtechnik; Seewirtschaft