

3 Grundlagen und Verfahren der Biogasgewinnung

Bernd Linke, Pia Mähnert, Monika Heiermann, Jan Mumme

3.1 Grundlagen des Gärprozesses

3.1.1 Biochemie und Mikroorganismen

Die Gewinnung von Biogas ist ein mehrstufiger Prozess, bei dem Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen, d.h. unter Ausschluss von Luftsauerstoff, die in Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen gespeicherte chemische Energie für ihren Stoffwechsel nutzen. Hierbei werden zunächst Makromoleküle durch hydrolytische Bakterien in Verbindungen mit geringerem Molekulargewicht (z.B. Zucker, Fettsäuren, Aminosäuren, Basen) aufgespalten (**Abb. 3.1**). Die auf diese Weise entstandenen Spaltprodukte werden durch fermentative Bakterien weiter vergoren, wobei reduzierte niedermolekulare Verbindungen, wie Carbonsäuren, Gase oder Alkohole entstehen. Methanogene Bakterien sind nicht in der Lage, alle Stoffwechselprodukte der fermentativen Bakterien zu verwerten, so dass acetogene Bakterien ein wichtiges Bindeglied zwischen Vergärung (Versäuerung) und Methanbildung darstellen. Sie bauen insbesondere Propionsäure, Buttersäure (Carbonsäuren) und Alkohole zu Essigsäure, Kohlendioxid und Wasserstoff ab, die von den methanogenen Bakterien als Substrate genutzt werden.

Da acetogene Bakterien nur bei sehr geringen Wasserstoffpartialdrücken leben können, andererseits aber selbst Wasserstoff produzieren, sind sie auf methanogene Bakterien angewiesen, die Wasserstoff als Substrat nutzen und somit für den notwendigen geringen Wasserstoffpartialdruck sorgen. Etwa 70 % aller bekannten Methanbakterien verwerten Essigsäure (acetogenotroph), während etwa 30 % der bekannten Arten Wasserstoff und Kohlendioxid (hydrogenotroph) für ihren Stoffwechsel nutzen. In Gärungen komplexer Substrate kommen methanogene Bakterien in Konzentrationen von 10^5 bis 10^8 Keimen je ml vor. Klärschlämme z.B. enthalten vorwiegend Vertreter der Genera

Methanobacterium, *Methanospirillum*, *Methanosarcina* und *Methanococcus*. Die sauerstoffempfindlichen methanogenen Bakterien stehen am Ende einer Stoffwechselkette, deren Leistungsfähigkeit nicht nur in technischen Systemen genutzt wird, sondern sie tragen vor allem in natürlichen Ökosystemen zur biologischen Entgiftung von Wasserstoff und organischen Säuren bei.

3.1.2 Physiologie und Milieueinflüsse

Alle von Mikroorganismen ausgehenden Stoffwechselprozesse erfordern physiologisch günstige Milieubedingungen. Es sind vor allem die Temperatur, der pH-Wert und die Konzentration von Substraten und Hemmstoffen im Reaktionsmedium, die den Biogasprozess beeinflussen. Von der Temperatur ist bekannt, dass steigende Werte auch höhere Reaktionsgeschwindigkeiten zur Folge haben. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Reaktionsgeschwindigkeit lässt sich durch die ARRHENIUS-Beziehung beschreiben (**Gl. 3.1**), die für biologische Vorgänge durch die Einführung eines Temperaturterms (Randall et al., 1982) vereinfacht werden kann. Als Maß für die Reaktionsgeschwindigkeit kann die Biogasrate, d.h. die je Kubikmeter Fermenterraum täglich produzierte Biogasmenge, verwendet werden (**Gl. 3.2**).

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_A}{R} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

$$\frac{k_2}{k_1} = f_r^{(T_2 - T_1)} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

T_1, T_2	Temperaturen in K (T_2 höher als T_1)
k_1, k_2	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante in 1/d bei T_1 und T_2 (k_2 größer als k_1)
E_A	Aktivierungsenergie in $\text{kJ} \cdot \text{Mol}^{-1}$
R	Gaskonstante in $\text{kJ} \cdot \text{Kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
f_r	Temperaturterm, dimensionslos

Die meisten Biogasanlagen werden mesophil, d.h. zwischen 35°C und 45°C betrieben. Für diesen Temperaturbereich kann man für Rinder- und Schweinegülle mit einem Wert für f_r von 1,06 bzw. von 1,13 rechnen (Linke und Vollmer, 1989). Würde

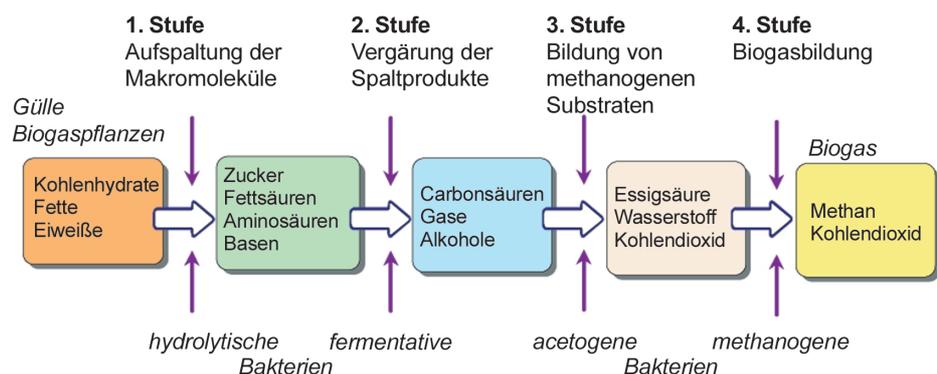
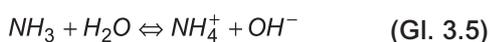
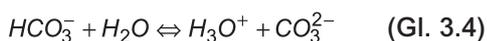
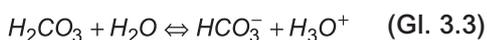


Abb. 3.1: Vereinfachtes Schema der Biogasbildung

z.B. die Temperatur einer bei $T_2 = 35 \text{ °C}$ betriebenen Biogasanlage, bei der eine Biogasrate von $k_2 = 1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ gemessen wird, auf eine Prozesstemperatur von $T_1 = 28 \text{ °C}$ abfallen, hätte diese Maßnahme eine Reduktion der Biogasrate auf $k_1 = 1,0/1,06^{(35-28)} = 0,66 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ zur Folge.

Neben der mesophilen Betriebsweise arbeiten Biogasanlagen auch bei 55 °C bis 65 °C . Man spricht in diesem Fall von thermophiler Prozessführung. Diese Anlagen erfordern jedoch wegen der höheren Empfindlichkeit der Mikroorganismen, insbesondere gegen Ammoniak, einen höheren Aufwand für die Prozessführung. Trotz der erforderlichen stabilen Temperaturführung ist der thermophile Betrieb einer Biogasanlage interessant, insbesondere wenn überwiegend Biogaspflanzen vergoren werden, bei denen keine kritischen Ammoniakkonzentrationen im Fermenter zu erwarten sind. Ein Vorteil der thermophilen Biogaserzeugung liegt in der Inaktivierung seuchenhygienisch relevanter Organismen, die in der Regel bei mesophilen Anlagen nicht gewährleistet werden kann (Anonymous, 1996). Kaltanlagen, die im psychrophilen Bereich bei Temperaturen unter 20 °C arbeiten und insbesondere in den 80er Jahren in der Schweiz untersucht wurden (Wellinger und Kaufmann, 1982; Göbel, 1986), haben sich in der heutigen Praxis der Biogaserzeugung nicht durchgesetzt.

Der pH-Wert der Reaktionsmasse in Biogasanlagen mit Gülle als Substrat wird kaum außerhalb des für Mikroorganismen verträglichen Bereichs liegen. Allgemein werden Werte im neutralen bis schwach alkalischen Milieu ($\text{pH} = 7,0$ bis $8,5$) gemessen. Hierfür sorgt das hohe Pufferungsvermögen, wenn z.B. Gülle vergoren wird, so dass H_3O^+ oder OH^- Ionen abgefangen und neutralisiert werden. Die Pufferwirkung wird dabei hauptsächlich durch den Carbonat- und Ammoniakpuffer erreicht (Gl. 3.3 bis Gl. 3.5). Werden beispielsweise Biogaspflanzen vergoren, so ist die Pufferung weniger ausgeprägt, und es kann schneller zu einer Übersäuerung des Prozesses kommen.



Durch das gute Pufferungsvermögen des Fermenterinhaltendes wird der pH-Wert in der Regel zu einem ungeeigneten Kontrollparameter, da z.B. eine Übersäuerung der Reaktionsmasse nicht zwangsläufig zu einem messbaren Abfall des pH-Wertes führt. Für die Überwachung des Biogasbildungsprozesses ist die Bestimmung der organischen Säuren besser geeignet. Bei einer ungestörten Bio-

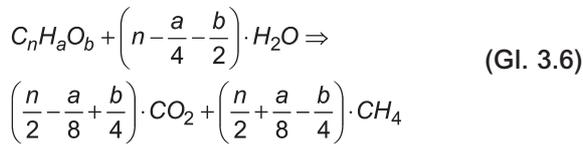
gasbildung werden im Biogasreaktor Werte kleiner $1.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ gemessen. Die Hemmkonzentrationen sind jedoch im Zusammenhang mit dem im Fermenter vorliegenden pH-Wert zu sehen. Es ist bekannt, dass Mikroorganismen nur den undissoziierten Anteil der Substrate verwerten können, dessen Konzentration wiederum vom pH-Wert abhängt. So beträgt z.B. die Konzentration des undissoziierten Anteils der stark hemmenden Propionsäure bei $\text{pH}=6,8$ $10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$, während bei $\text{pH}=8,3$ die entsprechende Konzentration nur noch $10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ beträgt. Das Festlegen einer bestimmten Grenzkonzentration ist deshalb schwierig und lässt sich für die Vielzahl der Substratmischungen nicht verallgemeinern. Erst wenn durch Überlastung des Biogasreaktors oder durch Zugabe toxischer Inhaltsstoffe die Säurekonzentration Werte über $10.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ übersteigt, ist eine Störung des mikrobiellen Gleichgewichts eingetreten, was sich in einem höheren CO_2 -Anteil im Biogas und einer Verringerung der Biogasproduktion äußert. Tritt ein solcher Fall ein, kann es mehrere Wochen dauern, bis das Gleichgewicht wieder zur methanogenen Seite verschoben ist und die Biogasproduktion wieder einsetzt.

Ammoniak und Schwefelwasserstoff als Stoffwechselprodukte des anaeroben Abbaus von Proteinen oder von anorganischen Schwefelverbindungen können die Biogasbildung ebenfalls stören. Ammoniak hemmt besonders bei höheren pH-Werten und Temperaturen die Biogasbildung, da unter diesen Bedingungen das Gleichgewicht zwischen NH_3 und NH_4^+ zunehmend auf die Seite des toxisch wirkenden NH_3 verschoben ist (Gl. 3.5). Gesamtkonzentrationen an $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ von mehr als etwa $3.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ werden, trotz der Fähigkeit methanogener Bakterien, sich an physiologisch bedenkliche Konzentrationen zu gewöhnen (Akklimation), als kritisch betrachtet. Für Schwefelwasserstoff ist eine Konzentration von mehr als $100 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ Sulfid, was einem Volumenanteil von etwa 1 % im Biogas entspricht, bedenklich. Die für die Methanogenese wichtigen Spurenelemente wie Nickel, Kobalt, Molybdän und Eisen werden bei solchen Schwefelwasserstoffkonzentrationen als schwerlösliche Metallsulfide ausgefällt und stehen dann nicht mehr für den methanogenen Stoffwechsel zur Verfügung.

Gefahr für den Stoffwechsel besteht auch dann, wenn chlorierte Kohlenwasserstoffe, Bakterizide, Insektizide, Lösungsmittel oder Schwermetalle in toxischen Konzentrationen auftreten. Insbesondere sind es Futteradditive, Antibiotika oder Stalldesinfektionsmittel, bei denen durch nicht ordnungsgemäßen Gebrauch Hemmwirkungen nachgewiesen wurden (Wellinger et al., 1984). In der Regel sind jedoch nahezu alle Reststoffe aus Tierhaltungsbetrieben für die Biogasgewinnung nutzbar.

3.1.3 Biogasausbeuten diverser Substrate

Kennt man die chemische Zusammensetzung des Gärsubstrates mit einer bestimmten Anzahl Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffatomen, dann können mit Hilfe der vereinfachten BUSWELL-Gleichung (Gl. 3.6) die Anteile an Methan (CH₄) und Kohlendioxid (CO₂) im Biogas berechnet werden.



Pflanzliche Biomassen (ohne Nährstoffe und Spurenelemente) lassen sich näherungsweise mit der Summenformel C₃₈H₆₀O₂₆ (Molgewicht 932) beschreiben und liefern nach Gl. 3.6 je Mol Biomasse zusammen mit 10 Mol H₂O 18 Mol CO₂ und 20 Mol CH₄. Unter Berücksichtigung des Molvolumens idealer Gase von 22,4 Liter entspricht das einem Biogasvolumen von insgesamt (18+20) · 22,4 = 851 Liter je Mol bzw. 851/932 = 0,914 Liter Biogas oder 0,914 · 0,53 = 0,48 Liter Methan je Gramm pflanzlicher Biomasse. Der Methananteil im Biogas beträgt (20/38) · 100 = 53 %, was einem Bruttoenergiegehalt des Biogases von 5,3 kWh·m⁻³ entspricht.

Da die genaue chemische Zusammensetzung von Biomassen oft nicht bekannt ist, kann die zu erwartende Methanproduktion über den Abbau des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) während der Biogasbildung berechnet werden (Gl. 3.7).



Unter Berücksichtigung der in Gl. 3.7 umgesetzten Molmassen und dem Molvolumen idealer Gase, ergibt sich, dass je Liter gebildetes Methan 2,857 g CSB umgesetzt werden. Eine Übertragung dieser Rechnung auf pflanzliche Biomassen (Molgewicht 932 g) ergibt, dass ein Mol dieses Substrats ein CSB-Äquivalent von 1280 g aufweist und bei vollständigem Abbau zu Biogas einem Methanvolu-

men von 1280/2,857 = 448 l entspricht. Je kg Biomasse werden dann 448 · 1000/932 = 480 l Methan gebildet, was mit der Berechnung aus der BUSWELL-Gleichung gut übereinstimmt. Die aus den drei Hauptstoffgruppen (Kohlenhydrate, Fette und Proteine) zu erwartende Biogaszusammensetzung sowie die maximal möglichen Biogasausbeuten wurden auf der Grundlage der BUSWELL-Gleichung berechnet (Tab. 3.1). Den mengenmäßig größten Anteil organischer Verbindungen auf der Erde bilden Kohlenhydrate, die ebenso viele Kohlenstoff- wie Sauerstoffatome aufweisen. Das aus dieser Stoffgruppe produzierte Biogas besteht zur Hälfte aus CO₂, wogegen aus Fetten und Proteinen ein deutlich höherer Methangehalt im Biogas erwartet werden kann.

Aus Labor-, Pilot- und Praxisexperimenten liegen zahlreiche Ergebnisse zur Biogasausbeute von nahezu allen vergärbaren Substraten vor (Braun, 1982; Wellinger et al., 1984; Kuhn, 1998; Graf, 1999; Schulz, 2001). Ein Problem hierbei ist jedoch die Vergleichbarkeit, da die Randbedingungen (z.B. Temperatur, Gärzeit oder Gärumbelastung) oft nicht angegeben werden. So sind auch die zum Teil erheblichen Streuungen für gleiche Substrate zu erklären. Hinzu kommt, dass z.B. bei Abfällen aus der Tierhaltung die Verwendung des Futtermittels, die Art der Entmistung und damit das Güllealter den Wert der Biogasausbeute beeinflussen. Bestandteil jeder Planung sollten deshalb Gärversuche mit den zu behandelnden Substraten sein, aus denen die zu erwartende Biogasausbeute bestimmt werden kann.

Neben den wirtschaftseigenen Düngern wie Gülle, Jauche und Mist aus der Nutztierhaltung werden Energiepflanzen zur Vergärung eingesetzt (vgl. Kap. 4) Eine Zusammenstellung, im Gärtest bei 35 °C, gemessener Biogasausbeuten von Wirtschaftsdüngern, organischen Reststoffen und Energiepflanzen (Tab. 3.2) zeigt die große Schwankungsbreite der untersuchten Substrate. Hinsichtlich des Methangehaltes im Biogas gelten die in Tab. 3.1 dargestellten Grundsätze, wonach bei

Tab. 3.1: Biogaszusammensetzung und -ausbeuten verschiedener Stoffgruppen

Stoffgruppen	Molgewicht [g·mol ⁻¹]	Molanteile CO ₂ und CH ₄ im Biogas [mol]	Molvolumen des Biogases [g·mol ⁻¹]	mögliche Biogasausbeute [l·g ⁻¹]
Kohlenhydrate C ₆ H ₁₂ O ₆ oder (CH ₂ O) _n	180	3 CO ₂ + 3 CH ₄	6 · 22,4 = 134,4	134,4/180 = 0,746
Fette (z.B. Palmitin) C ₁₆ H ₃₂ O ₂	256	4,5 CO ₂ + 11,5 CH ₄	16 · 22,4 = 358,4	358,4/256 = 1,39
Proteine mit 21 Aminosäuren C ₁₃ H ₂₅ O ₇ (N ₃ S)	367	5,125 CO ₂ + 7,857 CH ₄	13 · 22,4 = 291	291/367 = 0,79
Pflanzliche Biomasse C ₃₈ H ₆₀ O ₂₆	932	18 CO ₂ + 20 CH ₄	38 · 22,4 = 851	851/932 = 0,91

Wirtschaftsdüngern sich ein Methangehalt im Biogas von etwa 60 % und bei den genannten organischen Reststoffen und Energiepflanzen ein Wert von etwa 55 % einstellt.

3.1.4 Reaktionskinetik und Bemessung

Von den in der Praxis verwendeten Fermentersystemen überwiegt der vollständig durchmischte Reaktor (Rührkessel) mit kontinuierlicher Substratzufuhr. Zur Charakterisierung des hierbei ablaufenden Biogasprozesses ist die Kenntnis der Gärtemperatur sowie bestimmter Grundparameter Voraus-

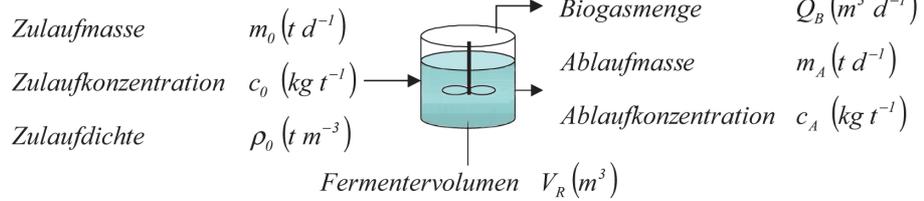
setzung für die Bemessung einer Biogasanlage (**Abb. 3.2**). Bei festgelegtem Volumen des Fermenters V_R in m^3 ergibt sich je nach Belastung des Fermenters die Masse des täglichen Zulaufes m_0 und damit des täglichen Ablaufes m_A . Da die organische Trockenmasse (oTM) ein Maß für die Konzentration vergärbare Verbindungen ist, entspricht die Konzentration des Zulaufes c_0 und des Ablaufes c_A dem Gehalt an oTM in kg pro t Frischmasse. Mit Hilfe dieser Grundparameter lassen sich einfache Belastungs- und Leistungsparameter nach **Abb. 3.2** berechnen. Für die Bemessung des Biogasreaktors dient die Raumbelastung B_R . Sie

Tab. 3.2: Biogasausbeuten verschiedener Substrate aus Gärtests (35 °C, Auswertung entsprechend VDI 4630 am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim)

Substrate	TM [% FM]	oTM [% TM]	Biogasausbeute	
			$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{oTM}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1} \text{FM}]$
Wirtschaftsdünger				
Rindermist	25	85	0,45	95
Schweinemist	35	85	0,37	110
Putenmist (Stroh)	70	85	0,45	270
Putenmist (Holzspäne)	55	85	0,30	140
Hühnertrockenkot	70	77	0,56	300
Milchviehgülle	8	80	0,41	26
Mastviehgülle	8,5	80	0,41	28
Schweinegülle	7	75	0,42	22
organische Reststoffe				
Zuckerrübenpressschnitzel	22	90	0,84	166
Roggenschlempe	5,5	95	0,79	41
Apfeltrester	8	98	0,68	53
Citrustrester (ohne Pektin)	18	90	0,51	83
Weizenstroh (4 mm)	91	92	0,48	400
Kartoffelschalen	13	92	0,88	105
Kartoffelpülpe	14	93	0,72	93
Melasse	73	78	0,51	290
Getreidestaub (Mühle)	88	80	0,51	360
Rapskuchen	90	82	0,63	465
Energiepflanzen				
Triticale GPS (Milchreife)	41	95	0,74	289
Roggen GPS (Milchreife)	33	93	0,73	225
Gerste GPS (Milchreife)	25	93	0,92	218
Sudangras				
1. Schnitt	19	92	0,76	133
2. Schnitt	24	95	0,81	185
Roggenschrot	86	96	0,87	723
Rübensilage	13	94	0,88	100
Maissilage (mittelfrühe Sorte)				
Erntetermin 1	29	96	0,68	188
Erntetermin 2	35	97	0,73	249
Erntetermin 3	34	96	0,86	281
Maissilage (frühe Sorte)				
Erntetermin 1	29	96	0,72	226
Erntetermin 2	37	96	0,79	255
Erntetermin 3	37	96	0,81	280
Gras-Welksilage	35	91	0,54	168
Hanfsilage	36	93	0,53	177
Luzerne (FM, 2. Schnitt)	23	89	0,53	155

FM = Frischmasse; TM = Trockenmasse; oTM = organische Trockenmasse; GPS = Ganzpflanzensilage

Grundparameter



Belastungsparameter

Raumbelastung B_R ($\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$)

$$B_R = \frac{m_0 \cdot c_0}{V_R}$$

Mittlere hydraulische Verweilzeit t_m (d)

$$t_m = \frac{V_R \cdot \rho_0}{m_0} = \frac{c_0 \cdot \rho_0}{B_R}$$

Leistungsparameter

Biogausausbeute y ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)

$$y = \frac{Q_B}{m_0 \cdot c_0} = \frac{Q_B}{B_R \cdot V_R}$$

Biogasbildungsrate r ($\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$)

$$r = \frac{Q_B}{V_R} = y \cdot B_R$$

Abb. 3.2: Grund- und Bemessungsparameter landwirtschaftlicher Biogasanlagen

gibt an, mit welcher oTM-Last in kg pro Tag ein Kubikmeter Reaktorraum belastet wird. Der zulässige Wert ist substratspezifisch und muss in Experimenten ermittelt werden, um den Biogasreaktor vor Überlastung zu schützen. Daraus ergibt sich je nach oTM-Konzentration und Dichte des Zulaufs die mittlere hydraulische Verweilzeit t_m in Tagen. Andererseits lässt sich bei gegebener Zulaufmasse und angestrebtem t_m das notwendige V_R berechnen.

Geht man davon aus, dass die Dichte des Zulaufs ρ_0 im Reaktor $1 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ beträgt und die Zwischenräume im Biogasreaktor mit Flüssigkeit aufgefüllt sind, besteht zwischen t_m und B_R der in **Abb. 3.3** dargestellte Zusammenhang. In der Praxis ist z.B. für die Vergärung von Schweine- und Rindergülle für t_m meist ein Wert zwischen 20 und 30 Tagen anzutreffen. Bei einer Rindergülle mit $c_0=100 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ergeben sich daraus Raumbelastungen von 5 bzw. 3,3

$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$. Wird dagegen Maissilage ($c_0=300 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$) als einziges Substrat vergoren, sind mittlere Verweilzeiten von 20 bis 30 Tagen nicht möglich, da wegen der zu hohen Raumbelastung eine Übersäuerung des Prozesses eintreten würde. Bei mesophiler Monovergärung von Maissilage kann B_R in Höhe von $3,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ schon als sehr hoch, aber unter optimalen Bedingungen als noch praktikabel angesehen werden. In diesem Fall ergibt sich eine dreimal höhere Verweilzeit von 90 Tagen gegenüber der Güllevergärung.

Von den Leistungsparametern einer Biogasanlage (**Abb. 3.2**) ist für den Landwirt vor allem die Biogausausbeute y von Interesse. Sie ist ein substratspezifischer Wert und gibt an, welche Menge Biogas je kg zugeführter oTM gebildet wurde. Die Biogausausbeute sollte jedoch immer in Verbindung mit der Gärtemperatur und der Belastung des Biogasreaktors betrachtet werden. Niedrigere Tem-

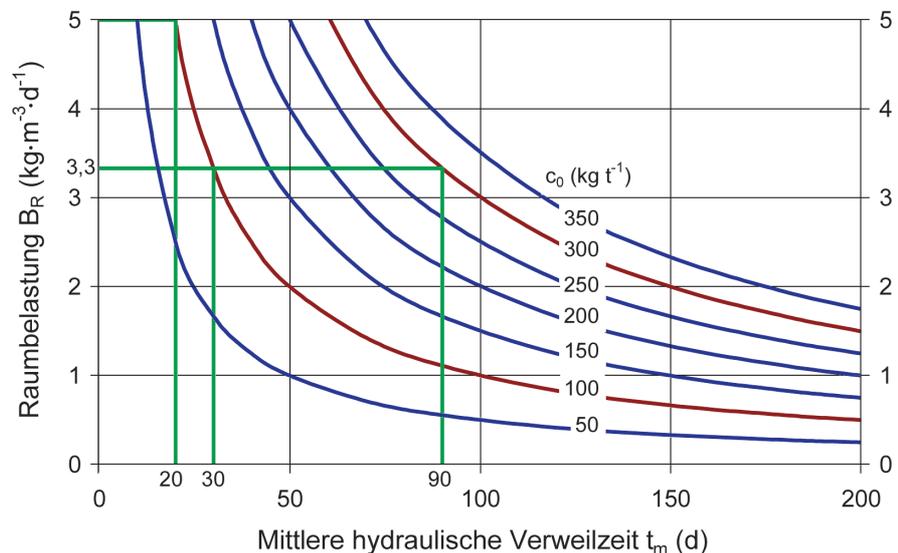


Abb. 3.3: Beziehung zwischen Raumbelastung, Verweilzeit und Substratkonzentration

peraturen und höhere Belastungen haben in der Regel auch geringere Biogasausbeuten zur Folge (**Abb. 3.4**). Ab einer kritischen Raumbelastung $B_{R,k}$ beginnt die Übersäuerung und damit die Überlastung des Prozesses. Als unmittelbare Folge fällt die Biogasausbeute so stark ab, bis kaum noch eine Gasproduktion zu verzeichnen ist. Die Biogasbildungsrate r als Produkt aus y und B_R in m^3 Biogas pro m^3 Reaktorvolumen und Tag nimmt mit steigender Raumbelastung bis $B_{R,k}$ stetig zu und fällt im Bereich der Überlastung ebenso wie die Biogasausbeute stark ab. Der Optimalbereich der Biogasproduktion liegt also bei einer Raumbelastung, die möglichst hoch ist, aber noch unterhalb von $B_{R,k}$ anzutreffen ist. Lage und Breite dieses Optimalbereichs sind von zahlreichen biologischen, chemischen und physikalischen Faktoren abhängig. Daher ist keine pauschale substratspezifische Festlegung möglich. Bezogen auf t_m nimmt die Biogasausbeute mit steigender Verweilzeit stetig zu, während die Biogasbildungsrate ein Maximum durchläuft. Dieses Maximum liegt bei der kritischen Verweilzeit $t_{m,k}$, die in jedem Fall überschritten werden sollte. Da diese Beziehungen für alle fließfähigen Substrate gelten, wurde auf die Angabe von Werten für y und r auf den Achsen verzichtet (**Abb. 3.4**).

Zur mathematischen Beschreibung der von Mikroorganismen ausgehenden Stoffwechselaktivitäten lassen sich grundsätzlich die aus der Bioprozesstechnik bekannten Beziehungen anwenden (Moser, 1981). Dazu müssen die am Stoffwechsel beteiligten Substrate und Mikroorganismen jedoch bekannt sein. Für ein komplex zusammengesetztes Medium, wie z.B. Gülle und pflanzliche Biomasse, mit einer kaum überschaubaren Anzahl von Substraten, Bakterien und Stoffwechselprodukten erscheint es nahezu aussichtslos, diese Beziehungen anzuwenden. Bei der Bemessung von Biogasanlagen ist man deshalb gezwungen, Summenparameter zu verwenden, die mit hinreichender Genauigkeit den Prozess beschreiben. Unter der Annahme, dass der mikrobielle Substratabbau nach einer Reaktion erster Ordnung erfolgt, lässt sich y in Abhängigkeit von B_R für den Bereich bis $B_{R,k}$ mit hoher Genauigkeit über **Gl. 3.8** beschreiben. Diese hyperbolische Funktionsgleichung enthält als Konstanten die maximal mögliche Biogasausbeute y_{max} sowie einen weiteren Parameter b , die über Kurvenanpassungen an Ergebnisse aus Langzeitversuchen ermittelt werden können. Der Wert für y_{max} ist substratspezifisch und kann alternativ mit Hilfe eines einfachen Gärtests bestimmt werden. Der Parameter b hängt von c_0 ,

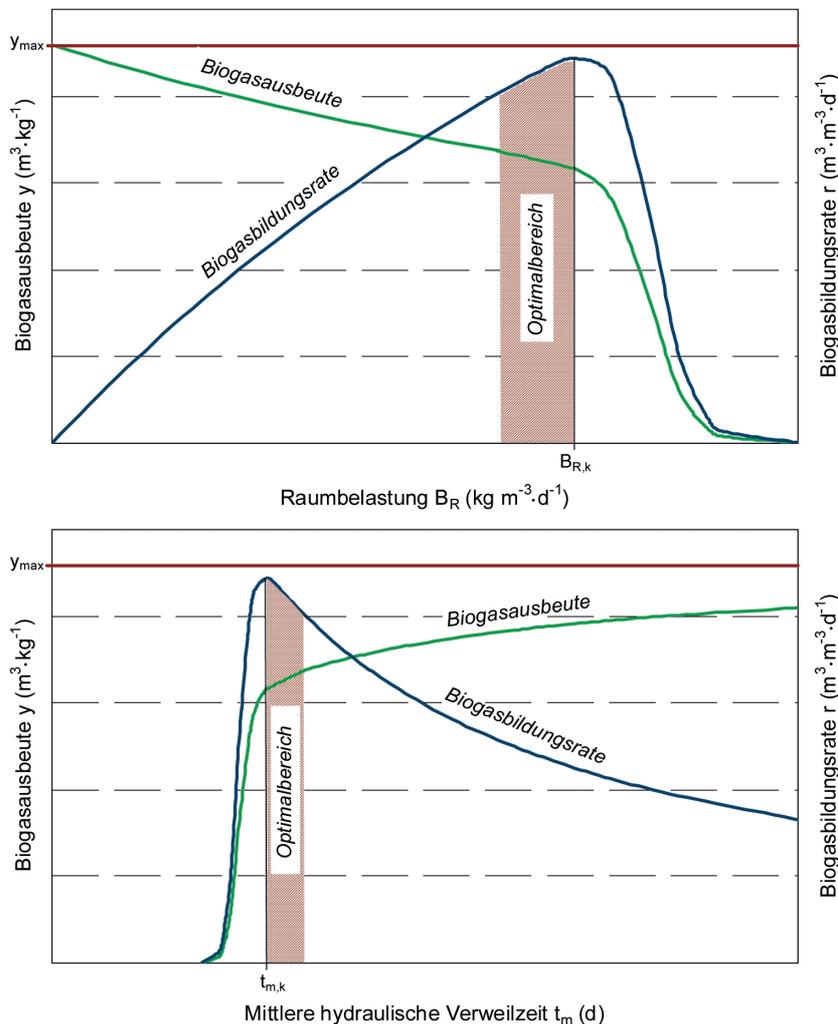


Abb. 3.4: Allgemeine Beziehung zwischen Biogasausbeute und Biogasbildungsrate in Abhängigkeit von Raumbelastung bzw. mittlerer hydraulischer Verweilzeit in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k sowie von der Dichte des Zulaufs und des Biogases ab. Als Summenparameter ist b damit eine substrat- und prozessspezifische Größe, mit deren Hilfe sich y berechnen lässt. Für B_R -Werte oberhalb $B_{R,k}$ muss **Gl. 3.8** um eine Hemmfunktion erweitert werden, auf die nicht weiter eingegangen werden soll.

$$y = y_{max} \frac{b}{b + y_{max} \cdot B_R} \quad (\text{Gl. 3.8})$$

- y : B_R -abhängige Biogasausbeute ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ oTM)
 y_{max} : maximal mögliche Biogasausbeute ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ oTM)
 b : Parameter aus hyperbolischer Kurvenanpassung (d^{-1})
 B_R : Raumbelastung ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

Ergebnisse des von der FNR geförderten Projektes „Kinetik der Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen bei kontinuierlicher Prozessführung als Grundlage für die Bemessung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen“ am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (FKZ 22011402) zeigen im Falle der kontinuierlichen mesophilen Monovergärung von Maissilage, dass mit steigender Raumbelastung bis $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ die Biogasausbeute von $0,92$ auf $0,67 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ abnimmt (**Abb. 3.5**). Im Bereich der Raumbelastung von $3,5$ - $4,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ tritt mit steigender Propionsäurekonzentration eine deutliche Prozesshemmung auf, die mit einem starken Rückgang der Biogasausbeute und Biogasrate einhergeht. Bei den beiden untersuchten Kovergärungsvarianten mit Maissilage und Rindergülle im oTM-Verhältnis von 1:2 bzw. 2:1 sowie der Vergärung von reiner Rindergülle ist für den untersuchten Bereich bis zu BR von $4,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ keine deutliche Prozesshemmung zu verzeichnen. Für diesen Bereich lässt sich die Abnahme von y mit zunehmender B_R sehr gut über **Gl. 3.8** beschreiben.

Die für die Berechnung von y in Abhängigkeit von B_R notwendigen Parameter y_{max} und b wurden für die mesophile Vergärung von Mais-, Rüben- und Roggen-Ganzpflanzensilage (GPS) als Monosubstrat und im Gemisch mit Rindergülle in kontinuierlichen Langzeitversuchen (**Abb. 3.5**) ermittelt und sind gemeinsam mit den zugehörigen Werten für c_0 , dem Methangehalt CH_4 und y bei $B_R = 3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ in **Tab. 3.3** dargestellt.

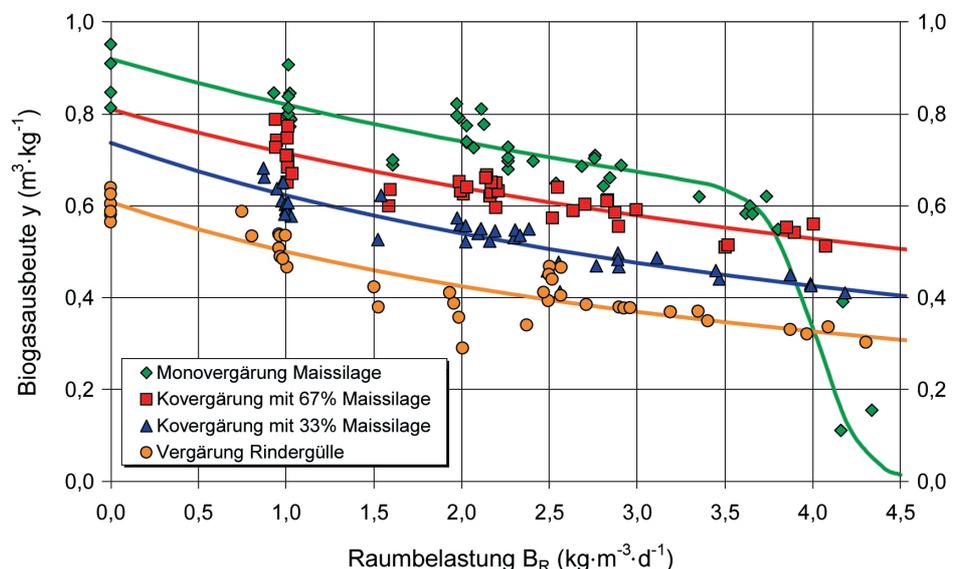
Die in **Abb. 3.5** dargestellten Biogasausbeuten der Kovergärungsvarianten verlaufen bis etwa $3,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ nahezu parallel zu den Biogasausbeuten der Monovergärung von Maissilage und Rindergülle. Da der Abstand zwischen den Kurven dem Anteil der oTM aus dem Kosubstrat in der Mischung ρ_K entspricht, lässt sich die Biogasausbeute aus einer Mischung aus Kosubstrat und Gülle y_M mit Hilfe von **Gl. 3.9** berechnen. Hierfür müssen außer ρ_K auch die Biogasausbeuten aus der Monovergärung der beiden Einzelsubstrate Gülle y_G und des Kosubstrates y_K bei der angestrebten Raumbelastung bekannt sein. Dieser Zusammenhang wurde auch bei den kontinuierlichen Versuchen mit Rübensilage und Roggen-GPS bestätigt.

$$y_M = y_G + \rho_K \cdot (y_K - y_G) \quad (\text{Gl. 3.9})$$

- y_M : B_R -abhängige Biogasausbeute aus der Mischung ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ oTM)
 y_G : B_R -abhängige Biogasausbeute aus der Gülle ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ oTM)
 y_K : B_R -abhängige Biogasausbeute aus dem Kosubstrat ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ oTM)
 ρ_K : oTM-Anteil aus dem Kosubstrat in der Mischung mit Gülle (-)

Als Berechnungsbeispiel für eine solche Kovergärung wird eine Mischung aus Maissilage und Rindergülle gewählt, die bei einer Raumbelastung von $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ vergoren wird. Die oTM-Masse der Mi-

Abb. 3.5: Biogasausbeute bei kontinuierlicher Vergärung von Maissilage als Mono- und Kosubstrat mit Rindergülle sowie Vergärung von reiner Rindergülle in Abhängigkeit von der Raumbelastung



schung soll zu gleichen Teilen aus Maissilage und Rindergülle bestehen, woraus sich ein Wert von $\rho_K=0,5$ ergibt. Die Biogasausbeute der Einzelsubstrate, die bei der genannten Raumbelastung zu erwarten ist, lässt sich mit Hilfe der Parameter y_{max} und b aus **Tab. 3.3** sowie **Gl. 3.8** berechnen. Sie beträgt bei der Güllevergärung $y_G = 0,37 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ und bei der Monovergärung von Maissilage $y_K = 0,67 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. Nach **Gl. 3.9** ergibt sich für die Biogasausbeute aus der genannten Mischung bei der gewählten Raumbelastung dann ein Wert y_M in Höhe von $0,52 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. Gleiche Berechnungen können auch auf der Grundlage der in **Tab. 3.3** dargestellten Parameter angestellt werden, die aus der Vergärung von Rübensilage, Roggen-GPS und Rindergülle für Raumbelastungen bis etwa $3,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ermittelt wurden.

In der Praxis der Biogasgewinnung findet die Fermentation oft nicht nur in einer Stufe statt, sondern dem Fermenter (F) ist meist noch ein Nachgärer (N) nachgeschaltet, der bei der gleichen Temperatur arbeitet. Definiert man den Anteil der im Fermenter erzielten Gasausbeute y von y_{max} als η^F (**Gl. 3.10**), der gleichbedeutend mit einem Wirkungsgrad ist, dann stellt sich die Frage, welcher Anteil am Gesamtwirkungsgrad durch den Nachgärer geleistet werden kann. Dieser Gesamtwirkungsgrad η^{F+N} , der vor allem durch die Verweilzeit des Gärrestes im Nachgärer und damit vom Volumenverhältnis Nachgärer zu Fermenter q bestimmt wird, lässt sich nach **Gl. 3.11** berechnen.

$$\eta^F = \frac{y}{y_{max}} \quad (\text{Gl. 3.10})$$

$$\eta^{F+N} = \frac{\eta^F \cdot (q + 1)}{\eta^F \cdot q + 1} \quad (\text{Gl. 3.11})$$

- η^F : Anteil y aus dem Fermenter von y_{max}
 η^{F+N} : Anteil Gasausbeute aus dem Fermenter und Nachgärer von y_{max}
 q : Verhältnis Volumen des Nachgärers zum Volumen des Fermenters

Der Zusammenhang zwischen η^{F+N} und q ist für ausgewählte Werte von η^F in **Abb. 3.6** dargestellt. Für die Monovergärung von Maissilage und Rindergülle ergibt sich z.B. bei einer Raumbelastung von $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ein Wert für η^F von 0,7 bzw. 0,6, so dass nur 70 % bzw. 60 % des vergärbaren Potenzials bei dieser Raumbelastung erreicht werden. Wird dem Fermenter ein Nachgärer mit gleichem Volumen nachgeschaltet, was einem Wert von $q=1$ entspricht, steigt der Anteil auf 0,82 bzw. 0,75. Diese Anteile lassen sich durch Volumenvergrößerung des Nachgärers noch steigern, wobei bei der Wahl der Größe des Nachgärers auch noch wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen sind.

3.2 Verfahren und Anlagentechnik

3.2.1 Verfahren und Anlagentechnik zur Nassvergärung

Die in der landwirtschaftlichen Biogaspraxis anzutreffenden Verfahren der Biogasgewinnung lassen sich zurzeit überwiegend der Technologie der Nassvergärung zuordnen, bei dem der Prozess der

Tab. 3.3: Ergebnisse der kontinuierlichen mesophilen Vergärung von NawaRos als Mono- und Kosubstrat mit Rindergülle: Zulaufkonzentration des Substrates c_0 , aus der Kurvenanpassung ermittelte Parameter y_{max} und b , berechnete Biogasausbeute bei $B_R=3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ sowie mittlerer Methangehalt des Biogases mit Standardabweichung ($\text{CH}_4 \pm s$; $n=69 \dots 74$)

Substrat mit oTM-Anteil in der Mischung		c_0 [g·kg ⁻¹]	y_{max} [m ³ ·kg ⁻¹]	b [d ⁻¹]	y ($B_R=3$) [m ³ ·kg ⁻¹]	CH_4 [Vol-%]
Maissilage	100 %	292±22	0,92	7,6	0,67	54,6±1,3
Maissilage	67 %	147±12	0,82	6,1	0,58	56,2±1,4
Maissilage	33 %	98±10	0,74	4,0	0,48	58,1±1,1
Rübensilage	100 %	124±11	0,93	31,2	0,85	55,5±2,2
Rübensilage	67 %	100±9	0,80	20,3	0,72	56,4±2,1
Rübensilage	33 %	84±9	0,73	7,8	0,57	58,4±1,3
Roggen-GPS	100 %	198±5	0,91	6,5	0,67	57,2±1,7
Roggen-GPS	67 %	125±10	0,81	5,3	0,56	58,3±1,5
Roggen-GPS	33 %	92±10	0,72	4,2	0,48	59,9±1,3
Rindergülle	100 %	72±9	0,61	2,8	0,37	61,3±1,9

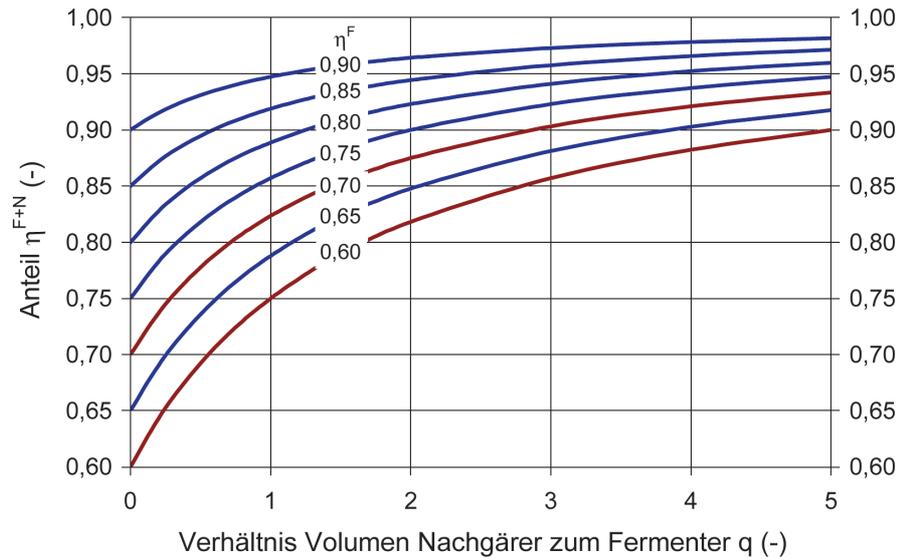


Abb. 3.6: Beziehung zwischen anteiliger Gasausbeute von y_{\max} aus dem Fermenter bzw. einem Fermenter mit Nachgärer und dem Größenverhältnis zwischen Fermenter und Nachgärer

Biogasgewinnung in einem flüssigen Medium stattfindet. Als Fermentertyp kommt der quasi-kontinuierlich betriebene Rührkessel zur Anwendung, der im Durchflussverfahren bei konstantem Füllvolumen betrieben wird. Der Raum des Biogasfermenters sollte täglich etwa die gleiche oTM-Last erhalten, so dass eine gleichmäßige Biogasproduktion zu erwarten ist. Das Volumen des Fermenters kann jedoch nicht auf das Speichervolumen für den Gärrest angerechnet werden, da den Fermenter täglich eine bestimmte Menge an Gärrest verlässt. Die Speicherung des Gärrestes vor der pflanzenbaulichen Verwertung erfolgt im nachgeschalteten Lagerbehälter. Dieser Behälter sollte ebenfalls gasdicht verschlossen sein, um das während der Lagerung noch gebildete Biogas zu nutzen.

Der Betrieb einer landwirtschaftlichen Biogasanlage umfasst im Wesentlichen die Bereiche Substratbereitstellung und -vorbehandlung, Biogaser-

zeugung, Gasspeicherung sowie die Gasaufbereitung und -verwertung. Neben Gülle und evtl. Stallmist aus der Tierhaltung, die in einer Güllegrube gesammelt werden (**Abb. 3.7**), nutzen die meisten Landwirte heute den Energiepflanzenbonus und vergären Biogaspflanzen. Diese für die Biogasgewinnung angebauten Pflanzen können entweder in der Güllegrube eingemaischt oder direkt in den Fermenter gegeben werden. Entschließt sich ein Landwirt, betriebsfremde organische Abfälle (z.B. Bioabfälle) zu vergären, muss er die Vorbehandlung so durchführen, dass die seuchen- und phytohygienische Unbedenklichkeit der behandelten organischen Abfälle sichergestellt ist (Anonymous, 1998). In der Praxis wird meist eine Hygienisierung für die Dauer einer Stunde im batch-Betrieb bei 70 °C durchgeführt.

Kernstück einer Biogasanlage ist der gasdicht verschlossene, wärmeisolierte und durchmischbare

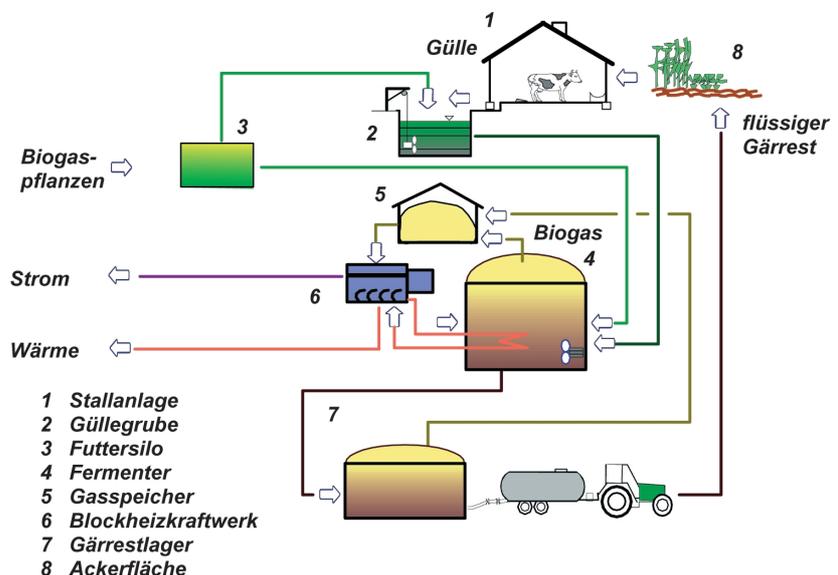


Abb. 3.7: Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage mit Nassvergärung

Biogasfermenter. Neben verschiedenen Reaktorformen und Baustoffen sind in der Praxis verschiedene Systeme zur Durchmischung (Abb. 3.8) und Erwärmung der Reaktionsmasse (Abb. 3.9) anzutreffen. Die Durchmischung erfolgt in der Regel mehrmals täglich und die Erwärmung wird über einen Warmwasserkreislauf mit dem BHKW vorgenommen. Die Verwendung von Paddelrührwerken hat sich besonders für faserige Biomassen oder Biomassen mit hohem Feststoffanteil bewährt. Weit verbreitet sind auch die in der konventionellen Gülletechnik eingesetzten Tauchmotor-Propellerrührwerke.

Zur Erwärmung des Substrats werden im Fermenter befindliche (interne) und außerhalb des Fermenters befindliche (externe) Wärmetauscher-systeme eingesetzt, die sich in der Praxis bewährt haben. Beim Neubau von Biogasreaktoren aus Beton können z.B. die Heizschlangen als Fußbodenheizung gleich mit einbetoniert werden. Solche internen Wärmetauscher erfordern jedoch eine gute Durchmischung der Reaktionsmasse, damit Sink-schichten den Wärmeübergang vom Heizkreislauf an die Reaktionsmasse nicht behindern. Eine Alternative zur Fußbodenheizung stellt die Wandheizung dar, die ebenfalls verbreitet ist.

Vor der Ausbringung des Gärrestes auf landwirtschaftliche Nutzflächen ist eine Lagerung für etwa sechs Monate erforderlich. Um das im Gärrest

noch vorhandene Biogaspotenzial zu nutzen und gleichzeitig Methanemissionen zu reduzieren, sollte das Endlager gasdicht ausgeführt werden.

Eine Speicherung des Biogases ist wegen der geringen Energiedichte von Biogas (1000 l Biogas mit 60 % Methan entsprechen etwa 0,6 l Heizöl) nur für wenige Stunden sinnvoll. Eine geringe Speicherkapazität für Biogas ist bereits im Biogasreaktor vorhanden, der mit dem Gasspeicher in direkter Verbindung steht. Durch diese Verbindung ist der Reaktor gegen Über- oder Unterdruck gesichert. Die meisten Gasspeicher sind als Niederdruckspeicher konzipiert (Abb. 3.10). Während früher vor allem Nassgasometer mit Wasser oder Gülle als Sperrflüssigkeit gebaut wurden, die bei Drücken von 50 bis 100 mm Wassersäule (WS) eine direkte Verbrennung im Gasherd oder Kessel ermöglichten, überwiegen heute Gasspeicher aus Folie mit nur 0,5 bis 1 mm WS Innendruck. Mitteldruckgasspeicher von 5 bis 20 bar haben den Vorteil, dass proportional zum Druck die speicherbare Biogasmenge ansteigt. Sie erfordern aber mehr Aufwand für Verdichtung (Kompressor) und Gasentnahme (Druckregler).

Die Nutzung des Biogases erfolgt heute überwiegend als Kraft-Wärme-Kopplung in einem Blockheizkraftwerk (BHKW). Zum Schutz des Gasmotors ist eine Reinigung des Biogases, insbesondere zur

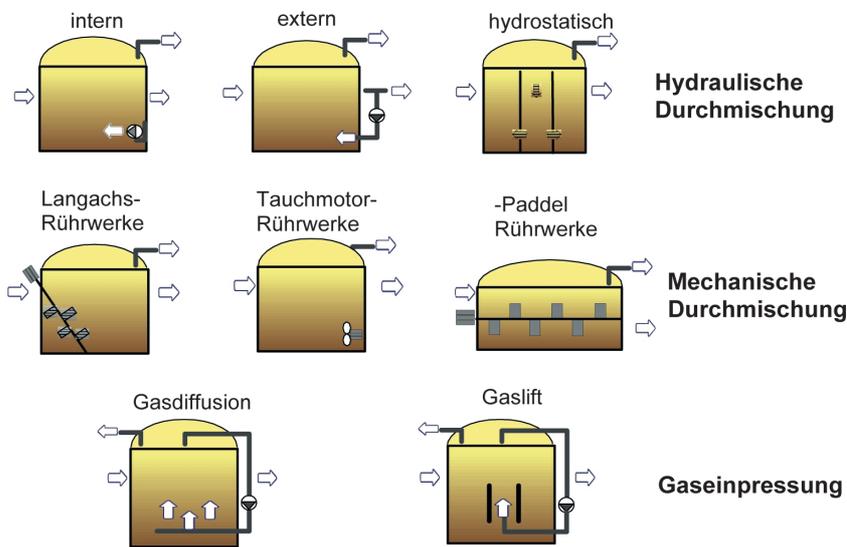


Abb. 3.8: Systeme zur Durchmischung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

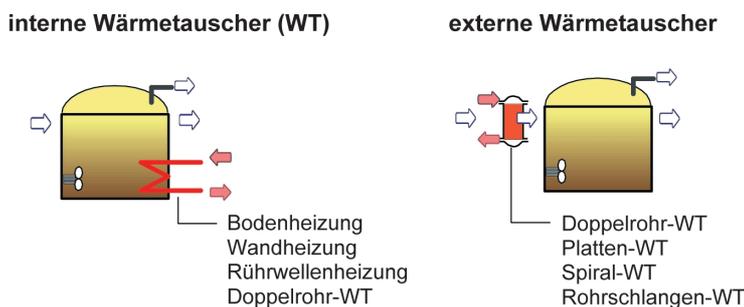


Abb. 3.9: Systeme zur Erwärmung des Biogasfermenters

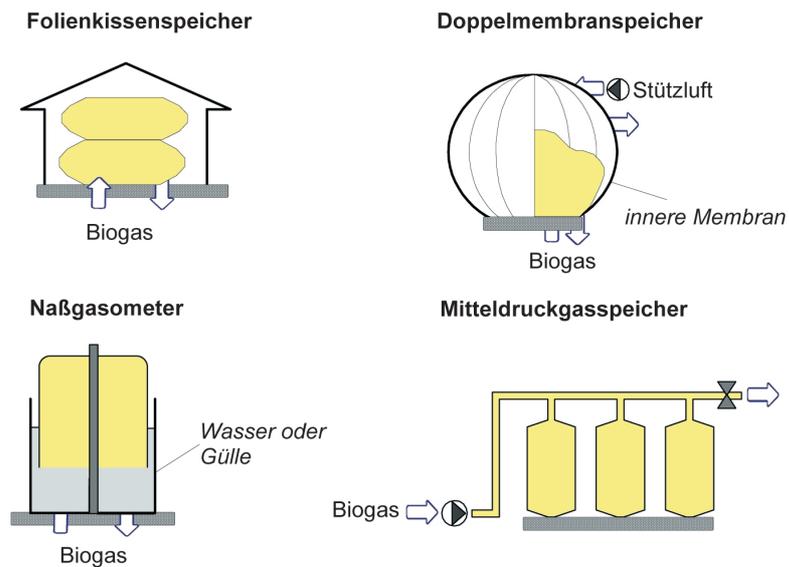


Abb. 3.10: Systeme zur Speicherung von Biogas

Entfernung von Schwefelwasserstoff sinnvoll. Weit verbreitet ist die biologische Entschwefelung, indem Luft in den Gasraum des Biogasreaktors in einer Menge von 3 bis 5 % des täglich produzierten Biogases eingeblasen wird. Durch diese Maßnahme werden die im Gärmedium vorhandenen Thiobacillus-Bakterien aktiviert. Sie oxidieren H_2S zu elementarem Schwefel, der im Gärrest verbleibt und den Pflanzen zugute kommt.

Durch das EEG ist der Verkauf des erzeugten Stromes an ein Energieversorgungsunternehmen (EVU) zu vorherbestimmten Konditionen möglich geworden und trägt zum wirtschaftlichen Betrieb einer Biogasanlage bei. Ein Teil der Motorabwärme (etwa 30 %) wird für die Substraterwärmung und die Kompensation der Abstrahlverluste benötigt. In den Sommermonaten ist jedoch meist ein Wärmeüberschuss vorhanden, der, falls keine anderen Verbraucher angeschlossen sind, über einen Notkühler ins Freie abgegeben werden muss.

Eine Alternative zur Verbrennung des Gases in einem BHKW ist die Gasaufbereitung auf Erdgasqualität und die Einspeisung des Gases in das Erdgasnetz (vgl. Kap. 5). Diese Technologie wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen.

3.2.2 Verfahren und Anlagentechnik zur Trockenvergärung

Bei der Vergärung von Stalldung, Biogaspflanzen und anderer schüttfähiger Biomassen in Nassvergärungsanlagen werden diese Stoffe entweder mit Gülle oder flüssigem Gärrest eingemaischt oder direkt in den Fermenter eingebracht. Der Gärrest aus der Nassvergärung ist fließfähig, da die zugeführten Substrate in der Regel mehr als 70 % Feuchte enthalten, die im Gärrest verbleibt und die organische Substanz zum Großteil in Biogas umgewandelt wird.

Die Gewinnung von Biogas ist jedoch nicht zwingend an den im Flüssigfermenter vorhandenen Feuchtegehalt gebunden, sondern ist auch im stapelbaren Zustand möglich. Diese als Trockenvergärung bekannten Verfahren sind insbesondere für die Bioabfallbehandlung entwickelt worden und in entsprechenden Standardwerken beschrieben (Thome-Kozmiensky, 1995; Bidlingmaier und Müskén, 1997). Für die Landwirtschaft werden zurzeit vor allem batch-Verfahren entwickelt, bei denen die in den Fermenter eingebrachten Biomassen im stapelbaren Zustand abgebaut werden.

Die Trockenvergärung geht vor allem auf die Behandlung von Stalldung zurück. Bekannt hierfür waren das „System München“ und das „System Massaux“ (Tschierschke, 1962). Beide Verfahren nutzten den natürlichen Feuchtegehalt des Stallmistes für die Gewinnung von Biogas. Das zu damaliger Zeit besonders in Südfrankreich verbreitete „System Massaux“ sah eine Selbsterwärmung des Mistes zur Bereitstellung der notwendigen Prozessstemperatur vor und war als batch-Verfahren mit mehreren Behältern über etwa drei Monate je Ansatz konzipiert. Die Beschickung der Behälter erfolgte von Hand und das entstehende Biogas wurde im Haushalt genutzt. Erst Mitte der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts erfolgte eine Weiterentwicklung der Trockenvergärung von Stalldung in Hustopece (Tschechische Republik) und in Dömsöd (Ungarn). Über die Entwicklung einer 10 m^3 Pilotanlage zur trockenen kontinuierlichen Vergärung (**Anacom: Anaerobic composting of manure**), die in der Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT) Tänikon (CH) entwickelt wurde, berichten Baserga et al. (1994). Bei einer mittleren Verweilzeit des Mistes im Fermenter von 28 Tagen (Beschickung mit „Maulwurf“ von oben und Entnahme mit Schnecke von unten) bei $32 \text{ }^\circ\text{C}$ Gärtemperatur werden je kg zugeführte oTM etwa 320 Liter Biogas mit etwa 58 % Methangehalt pro-

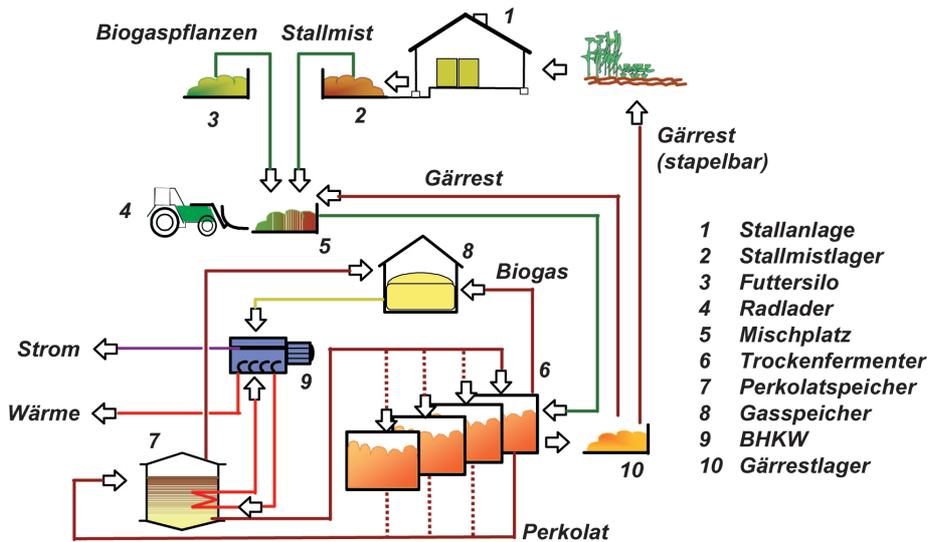


Abb. 3.11: Schema einer diskontinuierlichen Trockenfermentation

duziert. Neuere Ergebnisse zur Trockenfermentation sind Kusch et al. (2005) zu entnehmen, die in einer Feststoffvergärungsanlage, bestehend aus 4 garagenförmigen Fermentern mit einem Volumen von je 130 m^3 und einem 45 m^3 Perkolationsstank, insbesondere Grünschnitt untersucht haben. Die Verwendung einer Perkolationsflüssigkeit, welche die eingebrachte Biomasse durchdringen muss, ist neben der satzweisen Beschickung und Entleerung der Fermenter auch ein wesentliches Element der von den Firmen LOOCK-Biogassysteme, BIO-FERM und BEKON angebotenen Verfahren. Neben der Verwendung von Perkolationsflüssigkeit sorgt die Zugabe von ausgegorenem, schüttfähigem Gärrest (Impfmateriale) für eine Beschleunigung des Fermentationsprozesses. Der Anteil Impfmateriale im Gemisch ist abhängig vom Substrat und beträgt etwa 20 bis 40 Masse % in der Mischung. Besondere Anforderungen an die Sicherheit stellt der Betrieb der Trockenfermenter dar, damit vor dem Entleeren kein explosionsfähiges Gasgemisch vorhanden ist. Durch Spülen mit Luft kann dieser Anforderung entsprochen werden (**Abb. 3.11**).

Mit Unterstützung der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. wurde die von der Firma LOOCK-



Abb. 3.12: Trockenfermentationsanlage in der Agrar Genossenschaft Pirow (Land Brandenburg)

Biogassysteme GmbH geplante und errichtete Biogasanlage nach dem Trocken-Nass-Simultan (TNS)-Verfahren in der Agrar Genossenschaft Pirow im Land Brandenburg gemeinsam mit den Partnern durch das Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. erprobt. Die Anlage besteht im wesentlichen aus 4 gasdichten Trockenfermentern mit einem Nutzvolumen von je 150 m^3 , die mit gasdicht verschließbaren Toren, Belüftungstechnik zum Einblasen von Luft, einer Vorrichtung zur Perkolations der Prozessflüssigkeit und zugehöriger Prozessleittechnik ausgestattet ist. Die Beheizung der Trockenfermenter erfolgt indirekt über den Perkolatstrom (**Abb. 3.12**).

Von den 4 Trockenfermentern musste ein Fermenter als Perkolationspeicher umgerüstet werden, da der flüssige Gärrest einer am Standort vorhandenen Nassvergärungsanlage aufgrund einer unzureichenden Fließfähigkeit als Perkolationsflüssigkeit ungeeignet war. Nach jeweils zwei Befüllungen je Fermenter mit einer Mischung aus 60 Ma.% Maisilage (TM=30 %), 13 Ma.% Putenmist (TM=40 %) und 27 Ma.% Gärrest (TM=20 %) wurden nach drei Wochen Fermentationszeit im Trockenfermenter je Tonne Mischung aus Maisilage und Putenmist 90 m^3 Methan ($0,3 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ je kg oTM) produziert (Linke et al. 2006). Damit werden die für Nassvergärungsanlagen gemessenen Werte auch für die Trockenfermentation erreicht. Der anfallende Gärrest ist schüttfähig und kann wie Stallung als organischer Dünger ausgebracht werden.

Literatur

- Anonymous (1996): Positionspapier „Kofermentation“, Herausgegeben vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, 1996.
- Anonymous (1998): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich

- schaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV) vom 21.9.1998, Bundesgesetzblatt Teil I, G 5702, Nr. 65.
- Anonymous (2006): VDI-Richtlinie 4630, Vergärung organischer Stoffe, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf.
- Baserga, U.; Egger, K.; Wellinger, A. (1994): Biogas aus Festmist, Entwicklung einer kontinuierlich betriebenen Biogasanlage zur Vergärung von strohareichem Mist, FAT-Berichte Nr. 451.
- Bidlingmaier, W.; Müsken, J. (1997): Biotechnologische Verfahren zur Behandlung fester Abfallstoffe. In: Umweltbiotechnologie, Hrsg. von Johannes C.G. Ottow und Werner Bidlingmaier, Stuttgart; Jena; Lübeck; Ulm: G. Fischer, 1997.
- Braun, R. (1982): Biogas-Methangärung organischer Abfallstoffe: Grundlagen und Anwendungsbeispiele, Wien; New York: Springer, 1982.
- Graf, W. (1999): Kraftwerk Wiese, Strom und Wärme aus Gras, 1999.
- Göbel, W. (1986): Betriebsparameter bei unbeheizten Biogasanlagen. Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik Tänikon, FAT-Berichte Nr. 283.
- Kuhn, E. (1998): Kofermentation, KTBL-Arbeitspapier 249, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt, 1998.
- Kusch, S.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2005): Vergärung landwirtschaftlicher Substrate in diskontinuierlichen Feststofffermentern, Agrartechnische Forschung 11, H. 4, S. 81-91.
- Linke, B.; Vollmer, G.R. (1989): Untersuchungen zur Gewinnung von Biogas aus Rinder- und Schweinegülle, Dissertation B, Institut für Biotechnologie Potsdam der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR.
- Linke, B.; Heiermann, M.; Mumme, J. (2006): Ergebnisse aus den wissenschaftlichen Begleitungen der Pilotanlagen Pirow und Clausnitz, In: Gülzower Fachgespräche: Trockenfermentation – Stand der Entwicklungen und weiterer F&E Bedarf, Band 24, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow.
- Moser, A. (1981): Bioprozeßtechnik: Berechnungsgrundlagen der Reaktionstechnik biokatalytischer Prozesse. Wien; New York: Springer, 1981.
- Randall, C.W.; Benefield, L.D.; Buth, D. (1982): The effects of the temperature on the biochemical reaction rate in the activated sludge process. Sci. Tech. 14, 413-430.
- Schulz, H. (2001): Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele; Stufen bei Freiburg: Ökobuch Verlag, 2001.
- Thome-Kozmiensky, K.J. (1995): Biologische Abfallbehandlung, Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, 1995.
- Tschierschke, M. (1962): Die Erzeugung von Biogas im landwirtschaftlichen Betrieb, Archiv für Landtechnik 3, S. 243-272.
- Wellinger, A.; Kaufmann, R. (1982): Biogasproduktion aus Schweinegülle in nicht beheizten Anlagen. Schweizer Landtechnik 44, S. 95-104.
- Wellinger, A.; Edelmann, W.; Favre, R.; Seiler, B.; Woschitz, D. (1984): Biogas Handbuch, Grundlagen, Planung, Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen. Verlag Wirz Aarau, 1984.